

# **Модульная многофункциональная оптоволоконная спектрометрическая система**

Под редакцией профессора, докт. физ.-мат. наук Никитенко В.А. и доцента, канд. физ.-мат. наук Некрасова В.В.  
**А.И.Андреев, С.В.Мухин, В.В.Некрасов, В.А.Никитенко, А.В.Пауткина**

## **Оглавление:**

Предисловие

Введение

1. Методы и аппаратура для измерения оптических и спектрально-люминесцентных характеристик объекта.  
Оптические процессы

1.1. Типы оптических переходов в двухуровневой системе

1.2. Поглощение, отражение и пропускание света в различных средах

1.2.1. Общие представления

1.2.2. Поглощение света в кристаллах

1.3. Люминесценция твёрдых тел. Фотолюминесценция

1.4. Вынужденное излучение. Лазеры

1.5. Спектроскопия рассеянного света

1.6. Спектрометры. Источники и приёмники излучения. Техника эксперимента

1.6.1. Измерение спектров комбинационного рассеяния (КР)

1.6.2. Измерение спектров отражения, пропускания, прозрачности,  
люминесценции и возбуждения излучения

1.7. Основные фотометрические величины

1.8. Волоконная оптика

1.9. Новые горизонты машинного зрения

2.1. Спектрометрическая аппаратура XXI века

2.1.1. Высокие технологии в спектрально-измерительных приборах  
нового поколения

2.1.2. Многофункциональные оптоволоконные спектрометры

Avantes B.V.

2.1.3. Устройство оптоволоконных модулей Avantes B.V.

2.1.4. Оптимальная комплектация оптоволоконных спектрометров

## AvaSpec

### 2.2. Состав лабораторного комплекса УНИР на базе модульной оптоволоконной системы Avantes

#### 2.2.1. Структура рабочих мест лабораторного комплекса

#### 2.2.2. Принцип построения модульной оптоволоконной системы

### 2.3. Технические характеристики и назначение измерительных спектрометрических модулей оптоволоконной системы лабораторного комплекса УНИР

#### 2.3.1. Модуль высокоскоростной спектрорадиометрии на базе

оптоволоконного высокоскоростного спектрометра

#### AvaSpec-2048-USB2

#### 2.3.2. Многофункциональный модульный измерительный комплекс на

базе двухканального оптоволоконного спектрометра

#### AvaSpec-2048 FT-2-SPU

#### 2.3.3. Модуль оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 TEC-USB2 с

термоэлектрическим охлаждением фотодетектора

#### 2.3.4. Модуль абсорбционно-флуоресцентного мониторинга на базе

оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048x14-USB2

#### 2.3.5. Модуль спектрометрии комбинационного рассеяния на базе

оптоволоконного двухканального спектрометра

#### AvaSpec-2048FT-2-TEC

### 2.4. Технические характеристики источников света лабораторного комплекса УНИР

#### 2.4.1. Компактные комбинированные AvaLight-DH-S, AvaLight-DHc и

сбалансированный AvaLight-DH-S-BAL дейтериево-галогенные источники света

#### 2.4.2. Импульсный ксеноновый источник оптического излучения

#### Avalight-XE

#### 2.4.3. Узкополосный источник излучения AvaLight-LED470

#### 2.4.4. Калибровочный источник излучения AvaLight-HAL-CAL

#### 2.4.5. Калибровочный источник излучения AvaLight-CAL

### 2.5. Технические характеристики и назначение приставок и дополнительных устройств

#### 2.5.1. Косинусный UV/VIS корректор

#### 2.5.2. Стандартный рефлектометрический датчик (пробник)

#### 2.5.3. Держатель рефлектометрического датчика

#### 2.5.4. Штатив рефлектометрического датчика Thinfilm Stage

- 2.5.5. Интегрирующая сфера
- 2.5.6. Референсный белый отражатель
- 2.5.7. Стандартный набор тонкослойных пластин Thinfilm Standard
- 2.5.8. Держатели жидкостных кювет
- 2.5.9. Проточная оптическая кювета Flowcell
- 2.5.10. Оптоволоконный лабораторный лазерный зонд AvaRaman-PRB
- 2.5.11. Лабораторный держатель образцов AvaRaman-SH
- 2.6. Конфигурации модульных узлов AvaSpec для практических измерений
  - 2.6.1. Измерение толщины тонких пленок
  - 2.6.2. Колориметрические измерения
  - 2.6.3. UV/VIS/NIR радиометрические исследования
  - 2.6.4. Исследования радиометрических параметров светоизлучающих

диодов

- 2.6.5. Фотоабсорбционные измерения в УФ и видимом диапазоне
- 2.6.6. Фотолюминесцентные измерения
- 2.6.7. Система Рамановской спектроскопии AvaRaman для измерения спектров комбинационного рассеяния света
- 2.6.8. Волоконно-оптический кислородный сенсор
- 2.6.9. Геммологический аналитический комплекс
- 2.6.10. Измерительная система для растениеводства

Часть II

Введение

- 4. Методические указания к практическим лабораторным работам
  - 4.1. Измерение толщины наноразмерных объектов
    - Практические измерения толщины тонких плёнок
  - 4.2. Исследование фотометрических параметров светоизлучающих диодов
    - Практические фоторадиометрические измерения
  - 4.3. Экспериментальная фотоколориметрия
    - Описание установки для экспериментальной фотоколориметрии
  - 4.4. Изучение механизмов фотолюминесценции поликристаллических порошковых материалов
  - 4.5. Освоение экспериментальных методов спектроскопии комбинационного рассеяния света

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие многофункционально, как и сама многомодульная спектрометрическая система, созданная на основе унифицированных современных оптоволоконных модулей "Avantes B.V." в рамках реализации инновационной образовательной программы Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Многофункциональность пособия продиктована следующими обстоятельствами. Во-первых, необходимо было дать представление о возможностях современных автоматизированных спектрально-измерительных систем, как сенсорных устройств для реализации информационно-аналитических технологий в области контроля структуры и свойств вещества на уровне элементарных наномасштабных составляющих (молекул, точечных дефектов кристаллической структуры, экситонов и т. п.) и проведения наноизмерений в целом. Во-вторых, разработать лабораторный практикум, способствующий развитию у преподавателей и студентов инновационного мировоззрения, основанного на понимании роли наноструктур в формировании макроскопических свойств конденсированных систем и выделить теоретические предпосылки для его реализации. В третьих, показать возможности многомодульной информационно-аналитической системы, построенной на базе оптоволоконных модулей "Avantes B.V.", как базовой составляющей общего проекта по развитию в МИИТ оригинальных нанотехнологий контроля качества и безопасности промышленных и природных объектов.

Всё это, вместе взятое, преследует своей целью решение общей задачи – реализовать лабораторный комплекс таким образом, чтобы он отвечал основным требованиям инновационной образовательной программы: от простого к сложному, обучение через исследование.

Надеемся, что наш труд даст возможность получения студентами дополнительных, выходящих за рамки плановой специализации, навыков практической деятельности в инновационных областях и окажется весьма полезен для повышения квалификации преподавателей ВУЗов, аспирантов и специалистов транспортной и других отраслей.

Учебное пособие подготовлено авторским коллективом преподавателей кафедры "Физика - 2" МИИТ: проф. Никитенко В.А. (гл.1 и раздел 4.4), доц. Андреев А.И. (разделы 4.2 и 4.3), доц. Некрасов В.В. (гл.1, 2, 3 и теоретическая часть раздела 4.5), доц. Пауткина А.В. (раздел 4.1.), ст. преподаватель Мухин С.В. (гл.3 и разделы 4.4, 4.5). Общая редакция пособия осуществлена проф. Никитенко В.А. и доц. Некрасовым В.В. Подготовка пособия одобрена компанией "Avantes B.V.".

Авторы выражают благодарность компании "Avantes B.V." за возможность стажировки в учебном центре в Голландии и ООО "Локамед" за предоставленные для использования в настоящем пособии материалы.

Отдавая себе отчёт в том, что предлагаемое учебное пособие не лишено недостатков, авторы с благодарностью примут все пожелания и замечания. Просим направлять их по адресу: 103055 Москва, ул. Образцова 15, МИИТ, кафедра "Физика - 2" или [fizika-2@mail.ru](mailto:fizika-2@mail.ru).



## Введение

Вузовско-академические подразделения и научно-образовательные центры наиболее полно отвечают требованиям настоящего момента, когда создаются новые перспективные научные направления и делаются величайшие открытия. Такие структуры способны обеспечить реализацию наиболее важных для подготовки специалистов с инновационным мышлением методов – «обучение через исследование».

Развитие наукоёмких информационно-аналитических технологий в инновационной образовательной программе МИИТ (ИОП МИИТ) тесно связано с организацией Научно-образовательного центра фотоники многокомпонентных систем и инструментальных информационно-аналитических технологий (НОЦ ФИАТ) и оснащением его самой передовой спектрально-аналитической аппаратурой.

Такой центр даёт возможность получения студентами дополнительных, выходящих за рамки плановой специализации, навыков практической деятельности в инновационных областях и весьма полезен для повышения квалификации преподавателей ВУЗов, аспирантов и специалистов транспорта. Это в первую очередь связано с тем, что в НОЦ ФИАТ развиваются современные нанотехнологии экспресс-контроля качества и безопасности промышленных и природных объектов, основанные на анализе их обобщённых факсимильных оптических образов.

Важным элементом аппаратного оснащения НОЦ ФИАТ является комплект малогабаритных волоконно-оптических аналитических модулей фирмы Avantes BV, объединённых в локальную информационно-аналитическую сеть и перспективных как для постановки современных учебно-методических лабораторных работ, так и для реализации новых технологических разработок в области дистанционного контроля и обучения.

Описанию лабораторного практикума, построенного на основе модульной многофункциональной оптоволоконной системы, и теоретических предпосылок для его использования, посвящено настоящее учебное пособие.

Пособие состоит из двух частей: первая часть посвящена описанию оптических процессов, имеющих место при взаимодействии оптического излучения с веществом, методам и аппаратуре для измерения оптических и спектрально-люминесцентных характеристик исследуемых объектов. Особое внимание здесь уделено специфическим особенностям автоматизированных волоконно-оптических спектрометрических модулей – новому направлению развития измерительной техники, органично сочетающему достижения высоких технологий в реализации аппаратной части спектрометрических сенсорных узлов с современными средствами информатики, использующимися в управлении измерениями, хранении, передаче и обработке экспериментальных данных. Подробное руководство по структуре и практическому использованию реализующего эти функции универсального программного обеспечения приведено в Приложении к первой части пособия. Вторая часть пособия содержит описание практических лабораторных работ, охватывающих разные методические направления

спектрального анализа, и способствующих углублённому пониманию связи наноструктуры вещества с его макроскопическими свойствами.

## *Часть I*

### *Устройство и принципы эксплуатации аппаратуры*

## 1. Оптические процессы, методы и аппаратура для измерения оптических и спектрально-люминесцентных характеристик объектов.

Представляемая многофункциональная оптоволоконная система состоит из 5 унифицированных аппаратных модулей компании «Avantes B.V.», обеспечивающих колориметрические, рефлексометрические, фотоабсорбционные, люминесцентные и КР-исследования органических и неорганических материалов в спектральном диапазоне  $200 \div 1000$  нм. Целью настоящей главы является развитие общих представлений об основных оптических свойствах и методах исследования разнообразных объектов, входящих в лабораторный практикум или планируемых в дальнейших экспериментах.

### 1.1. Типы оптических переходов в двухуровневой системе

Корпускулярная и континуальная концепции описания природы наиболее наглядны на примере сочетания волновых и квантовых представлений электромагнитного излучения.

Как вы знаете, во времена Ньютона торжествовала корпускулярная теория света. В то же время Х. Гюйгенсом начала интенсивно развиваться волновая теория, получившая общее признание в результате создания Максвеллом теории классической электродинамики и получения Герцем электромагнитных волн.

В 1887 году Г. Герц открыл явление внешнего фотоэффекта, что возродило корпускулярную парадигму. Дело в том, что скорость вылетающих из металла под действием света электронов оказалась не зависящей от его интенсивности. Этот факт приводил в тупик, так как сила, вырывающая электроны из металла, должна быть пропорциональной напряженности электрического поля световой волны.

В конце девятнадцатого века выяснилось, что волновая теория и классическая физика не в состоянии описать распределение энергии теплового излучения по спектру. Выход был найден в 1900 году М. Планком, предположившим, что атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями – квантами. В 1905 году А. Эйнштейн с квантовой точки зрения объяснил и внешний фотоэффект, записав так называемое уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\text{max}}^2}{2} \quad (1.1.1)$$

Началась эпоха возрождения квантовых представлений. Именно за эту квантовую теорию фотоэффекта, а не за теорию относительности А. Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике в 1921 г.

В 1929 году американский ученый Г. Льюис назвал элементарную частицу, квант электромагнитного излучения, **фотоном**. Масса фотона равна нулю, то есть он существует только в движении со скоростью света. Спин фотона равен 1 и, следовательно, он относится к бозонам.

Фотоны взаимодействуют с атомами, при этом возможны три вида взаимодействия (для простоты рассмотрим двухуровневую систему), рис. 1.1.1.

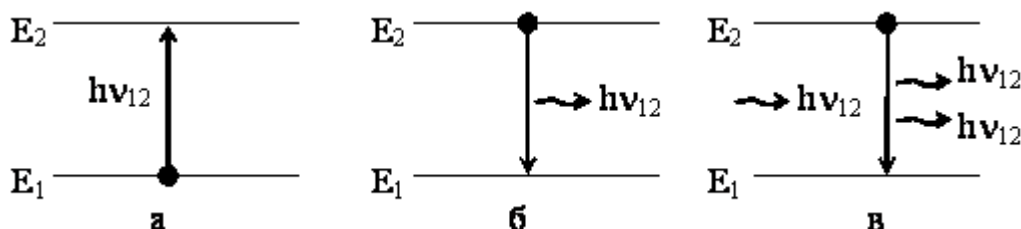


Рис. 1.1.1.

*Три вида взаимодействия электромагнитного излучения с двухуровневой системой*

**Поглощение излучения.** Фотон с энергией  $h\nu_{12}$  поглощается атомом, который совершает квантовый переход  $E_1 \rightarrow E_2$ , сопровождающийся переводом электрона на верхний энергетический уровень, рис. 1.1.1, а.

**Спонтанное излучение.** Атом, находящийся в возбужденном состоянии, через некоторый, очень малый, промежуток времени спонтанно (самопроизвольно) переходит в состояние с меньшей энергией (наглядно можно представить как переход электрона с уровня  $E_2$  на  $E_1$ ; рис. 1.1.1, б), испуская фотон.

**Вынужденное излучение.** Если атом находится в возбужденном состоянии, то существует вероятность вынужденного испускания энергии под действием поля проходящей волны. С квантовых позиций фотон с энергией  $h\nu_{12}$  стимулирует квантовые переходы в атоме с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$ , в результате имеем два идентичных фотона с энергией  $h\nu_{12}$ ; рис. 1.1.1, в.

## Контрольные вопросы

1. В чём смысл корпускулярно-волнового дуализма электромагнитного излучения?
2. Что такое фотон?
3. Что происходит в атоме при поглощении кванта света?
4. Что такое спонтанное излучение атома?
5. Опишите вынужденное излучение.

## 1.2. Поглощение, отражение и пропускание света в различных средах

### 1.2.1. Общие представления

При падении излучения на тело часть света отражается, а другая проходит внутрь среды. В среде остальная часть пройти через неё. Поглощённое излучение превращается в тепло или излучается с другой

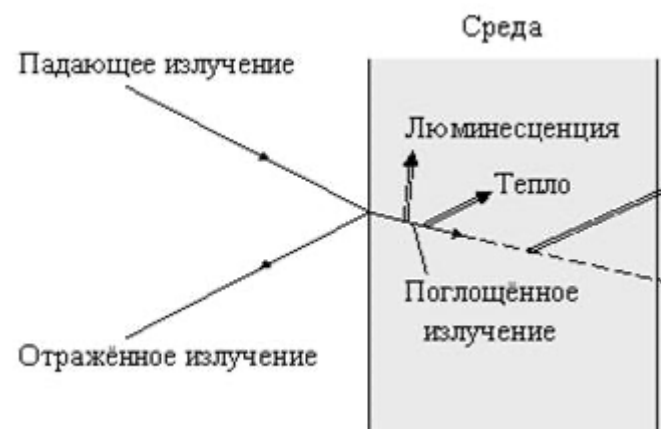


Рис. 1.

Схема, иллюстрирующая происходящие на поверхности

В общем случае световой поток, падающий на образец, делят на три компоненты:

$$\Phi_0 = \Phi_r (\text{отражение}) + \Phi_a (\text{поглощение}) + \Phi_t$$

$$= \rho \Phi_0 + \alpha \Phi_0 + \tau \Phi_0,$$

где  $\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi_0}$ ,  $\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_0}$ , и  $\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_0}$ , соответственно, коэффициенты отражения, поглощения и пропуск:

При направленном пропускании, когда рассеянием можно пренебречь, отношение  $\frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_0}$  называется

Очевидно, что

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Все коэффициенты зависят от длины волны.

Как следует из курса общей физики, электромагнитная волна, попадая в однородный диэлектрик, становится источником вторичных электромагнитных волн. Интерферируя с первичной волной, эти волны распространяются с фазовой скоростью в  $n$  раз меньшей скорости света в вакууме ( $n$  - абсолютный показатель преломления).

Вторичные волны от поверхностного слоя выходят и наружу образца. Складываясь, они образуют

Расчёт коэффициента отражения в зависимости от показателя преломления граничащих плоскостями Максвелла для границы раздела двух сред, имеющих различные диэлектрические проницаемости.

Если электромагнитная волна падает перпендикулярно границе раздела двух сред, то коэффициенты

$$\rho = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}, \quad (1.2.3)$$

где  $n$  - относительный показатель преломления.

В целом коэффициент отражения зависит от угла падения, оставаясь минимальным при нормальном

Металлы отличаются от диэлектриков как высокими значениями коэффициента отражения, так и легко раскачиваются падающим излучением. В результате появляется очень мощная отражённая волна, а энергия падающего излучения в тепло.

Рассеяние вызвано оптическими неоднородностями среды (посторонними частицами) или флуктуациями (обычно называют молекулярным).

Рассеяние на неоднородностях среды происходит из-за отражения, преломления и дифракции на с длиной волны, то рассеяние практически отсутствует (например, излучение оптического диапазона не к молекулам) рассеяние сильно растёт и существенно зависит от длины волны. Согласно закону Рэлея п квадрату объёма частицы и обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны. Однако, уже для зависеть от частоты излучения.

Характер отражённого света зависит от интенсивности рассеяния:

- если рассеяние отсутствует (однородный слой с гладкими поверхностями), то имеет место напц
  - если излучение полностью рассеивается (молочные стёкла), то говорят о диффузном отражении
  - смешанное отражение и пропускание (направленно-рассеянное) обычно наблюдается на поверх
- стекло).

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри неё при падени
  2. Дайте определение коэффициентов отражения, поглощения и пропускания.
  3. В результате чего появляется преломлённая и отражённая волна?
  4. Чем вызвано рассеяние света?
  5. В чём смысл закона Рэлея? Где мы встречаемся с его проявлением?
  6. От чего зависит характер отражённого света?
  7. Как меняется картина рассеяния света с увеличением размера рассеивающих частиц?
- 

### **1.2.2. Поглощение света в кристаллах**

Интенсивность света, проходящего через вещество, постепенно уменьшается. Поглощение электромагнитного излучения твердым телом осуществляется различными путями: 1) энергия излучения расходуется на перевод электронов в более высокое энергетическое состояние; 2) энергия электромагнитного поля передается кристаллической решетке и превращается в тепло.

Возможные переходы электронов в кристаллах под действием света показаны на рис. 1.2.2,а, где  $E_C$  – энергия, соответствующая нижнему краю зоны проводимости;  $E_V$  – верхнему краю валентной зоны. Переход 1 приводит к появлению электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне, он возможен при энергии фотонов  $h\nu \geq E_C - E_V$  и соответствует собственному (фундаментальному) поглощению. В момент возникновения созданные светом носители заряда могут и не находиться в тепловом равновесии с кристаллической решеткой. Однако вследствие взаимодействия с ней эти носители быстро (примерно за  $10^{-10}$  с) передают решетке свою избыточную энергию (этот процесс называется термализацией), поэтому распределение по энергиям избыточных и основных носителей заряда будет одинаковым.

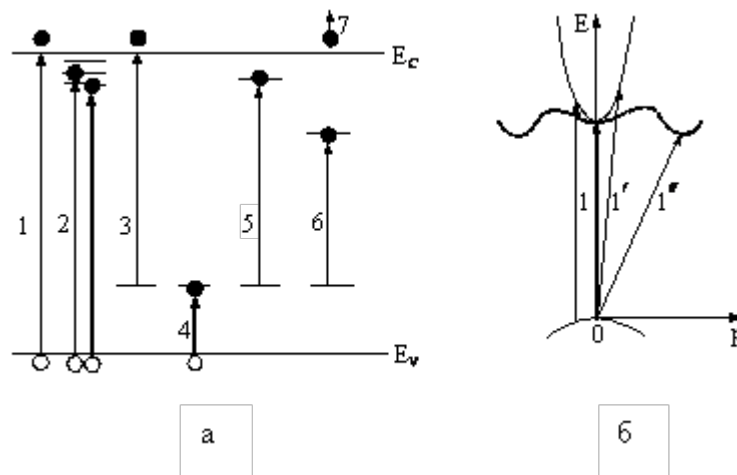


Рис. 1.2.2. Основные электронные переходы при поглощении света в кристаллах (а), прямые и не прямые межзонные переходы (б)

При поглощении электроном фотона должны выполняться законы сохранения энергии и импульса, поэтому более наглядно поглощение света описывается с помощью схемы, учитывающей изменение энергии  $E$  и импульса  $p$ . На рис.1.2.2, показана зависимость энергии электрона в зоне проводимости для определенного направления в кристалле (вверху) и дырки в валентной зоне (внизу) от импульса. Сплошная линия соответствует полупроводнику или диэлектрику, у которых минимумы энергии электрона и дырки находятся в одной точке пространства импульсов (прямозонный материал), пунктирная – когда эти минимумы могут быть разнесены (учитывается, что в простейшем случае зависимость кинетической энергии электрона от импульса задается

функцией 
$$E = \frac{p^2}{2m}.$$

Для материалов с прямыми зонами (например, GaAs с  $\Delta E=1,4$  эВ; CdSe – 1,8 эВ; CdS – 2,5 эВ; ZnO – 3,1 эВ и т.д.) преобладают прямые межзонные переходы (переходы 1), происходящие без

изменения импульса. Такие переходы возможны, так как импульс фотона  $\frac{h\nu}{c}$  ( $c$  – скорость света) очень мал и приращением импульса электрона, поглотившего фотон, можно пренебречь. В прямозонных веществах имеют место и непрямые переходы (переходы 1'), когда сохранение импульса обеспечивается генерацией или поглощением фонона или за счет рассеяния на свободных носителях заряда и дефектах кристаллической решетки. При этом могут осуществляться переходы из любого занятого состояния валентной зоны в любое свободное состояние зоны проводимости.

В непрямозонных кристаллах (например, Ge с  $\Delta E=0,7$  эВ; Si – 1,1 эВ; GaP – 2,3 эВ и т.д.) доминируют непрямые переходы, соответствующие наименьшей энергии фотонов (переходы 1''), при этом в процессе поглощения фотона участвует третья частица – фонон, с которой и связано изменение импульса электрона.

В сильно легированных полупроводниках (например, n-типа проводимости) состояния вблизи дна зоны проводимости заполнены электронами и собственное поглощение, связанное с переходами в эти состояния, оказывается невозможным.

В результате край собственного поглощения смещается в сторону больших частот (эффект Бурштейна-Мосса).

При поглощении света кристаллическим твердым телом возможно и такое возбуждение электрона валентной зоны, при котором он не переходит в зону проводимости, а образует с дыркой связанную кулоновскими силами систему (см. рис.1.2.2 а, переход 2; энергия системы обозначена чёрточками вблизи зоны проводимости). Такая система называется экситоном. В предположении слабого взаимодействия, когда размеры экситона велики по сравнению с постоянной решетки кристалла, экситон можно представить как электрон и дырку, связанные кулоновскими силами и медленнодвигающиеся по большим орбитам относительно их центра масс. В такой модели экситон ведет себя аналогично атому позитрония и имеет водородоподобную схему расположения энергетических уровней (квазичастица, предсказанная в 1931 г. Я.И.Френкелем и впервые зафиксированная в спектрах поглощения кристаллов закиси меди Е.Ф.Гроссом в 1951 г.). Поскольку экситон может перемещаться по кристаллу, полная энергия свободного экситона складывается из внутренней энергии экситонного возбуждения и его кинетической энергии:



$$E_{\text{ЭК}} = E_0 + \frac{Mv^2}{2} = E_0 + \frac{\hbar^2 k^2}{2M}, \quad (1.2.4)$$

где  $M$  - полная масса экситона, равная сумме масс электрона и дырки;  $E_0 = \Delta E - E_x$

( $E_x$  - энергия связи экситона),  $k$  - его волновое число.

Подобно атому водорода экситон может находиться в возбужденном состоянии, поэтому в спектральной области, близкой к краю собственного (межзонного) поглощения, может наблюдаться водородоподобная серия узких пиков экситонного поглощения. Экситоны могут образовываться как в результате прямых, так и не прямых переходов. Они являются нейтральными образованиями (подчиняются статистике Бозе) и их появление не приводит к изменению электрических характеристик образца. Если температура достаточно высока, чтобы под действием тепловой энергии экситонный электрон смог перейти в зону проводимости, то конечным итогом будет тот же результат, что и при межзонном поглощении света. Экситоны могут локализоваться возле различных дефектов кристаллической структуры (в основном, у нейтральных), и в спектрах поглощения можно наблюдать линии, обусловленные возникновением таких связанных экситонов. В этом плане спектроскопия связанных электронов (обычно при низких температурах,  $T = 4,2 \div 77$  К) широко используется для обнаружения точечных дефектов в кристаллах.

При энергии фотонов  $h\nu < E_C - E_V$  могут происходить переходы электронов с локальных уровней примесей или собственных дефектов в зону проводимости (см. рис. 1.2.2 а, переход 3) или из валентной зоны на эти уровни (переход 4). Если кристаллы содержат почти в равных и достаточно больших количествах как донорные, так и акцепторные дефекты, то возможна ситуация, когда доноры и акцепторы будут находиться недалеко друг от друга (на расстоянии меньше или порядка 10 нм). В этом случае будет иметь место перекрытие электронных орбит (точнее, волновых функций) донора и акцептора, которые образуют так называемые донорно-акцепторные пары (ДАП). При поглощении кванта света возможен переход электрона с акцепторного на свободный донорный уровень ДАП (переход 5). Зависимость кулоновского взаимодействия между донором и акцептором от межатомного расстояния между ними задает целый ряд значений энергии такого поглощения:

$$h\nu = \Delta E - E_d - E_A + \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (1.2.5)$$

где  $\Delta E$  - ширина запрещенной зоны;  $E_d$  и  $E_A$  - энергии ионизации донора и акцептора соответственно;  $q$  - заряд электрона (случай однократно заряженных дефектов);  $r$  - расстояние между центрами ДАП;  $\epsilon$  - статическая диэлектрическая проницаемость среды.

Расстояние между линиями поглощения в ДАП определяется, таким образом, дискретными положениями дефектов в кристаллической решетке.

Переходы 1, 3, 4 изменяют электропроводность кристаллов, на этом явлении внутреннего фотоэффекта основана работа многих фотоприемников. При внутрицентровых переходах 6 электрон не освобождается, и процесс поглощения света не приводит к изменению электропроводности. То же относится к экситонному поглощению, переходу в ДАП и поглощению свободными носителями заряда (переход 7), более характерному для металлов. Если под действием света осуществляются переходы с участием точечных дефектов (переходы 3–5), то закон сохранения импульса может выполняться при участии самих дефектов.

Экспериментально установлено, что уменьшение потока излучения при его поглощении в среде толщиной  $dl$  пропорционально величинам пройденного пути и потока падающего излучения

$$d\Phi = -\alpha\Phi dl, (1.2.6)$$

где  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности, получивший название показателя поглощения (не путать с коэффициентом поглощения, который представляет собой отношение потока излучения, поглощенного телом, к потоку излучения, упавшему на это тело).

Разделяя переменные и интегрируя, получим закон Бугёра-Ламберта

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha l}, (1.2.7)$$

установленный экспериментально в 1729 г. П.Бугером и теоретически обоснованный в 1760 г.

И.Ламбертом. При  $l = l^* = \frac{1}{\alpha}$  имеем  $\Phi(l) = \Phi_0/e$  ( $\Phi_0$  – поток излучения, входящего в кристалл), то есть показатель поглощения является величиной, обратной расстоянию  $l^*$ , на котором поток излучения уменьшается примерно в 2,7 раза.

В качестве характеристики поглощающей способности вещества часто используют величину  $D = \lg(\Phi_0/\Phi)$ , которую называют оптической плотностью среды.

В случае собственного поглощения излучения  $\alpha \cong 10^5 \text{ см}^{-1}$  и  $l^* \cong 0,1 \text{ мкм}$ , при примесном поглощении  $\alpha \cong 10 \div 100 \text{ см}^{-1}$ , так как концентрация примеси (обычно порядка  $10^{16} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) существенно меньше, чем концентрация атомов основного вещества.

Зависимость показателя  $\alpha$  от длины волны (или частоты) падающего света называется спектром поглощения вещества. Обобщенная зависимость  $\alpha$  от  $h\nu$  показана на рис. 1.2.3. Собственное поглощение начинается при частоте  $\nu_0$ , на краю которого при низких температурах хорошо проявляется структура экситонного поглощения света (см. рис. 1.2.2, а переходы 1, 2). Примесное поглощение создает полосы 3–6 (полоса 5 может иметь более явный структурный характер), в широком диапазоне частот присутствует слабое поглощение света свободными носителями заряда – полоса 7, и, наконец, при малых энергиях квантов излучения обычно хорошо выделяется участок 8, связанный с поглощением излучения ионами кристаллической решетки (в этом случае световая энергия превращается в энергию колебаний ионов).

Заметим, что деформация кристалла, присутствие внешнего электрического поля, температура образца оказывают существенное влияние на характер спектра поглощения. В частности, у полупроводников с повышением температуры происходит расширение кристаллической решетки и усиление колебания атомов относительно положения равновесия, что сопровождается уменьшением ширины запрещенной зоны.

Примесное поглощение света может привести к определенной окраске кристаллов. Например, кристаллы рубина – темно-красные, кристаллы сапфира – голубые. Окраска этих материалов связана с наличием в кристаллах  $Al_2O_3$  соответственно примеси  $Cr^{3+}$  и  $Ti^{3+}$ , внутрицентровые переходы в которой и задают определенный цвет образца.

Точное воспроизведение окраски является важным элементом производства ювелирных кристаллов.

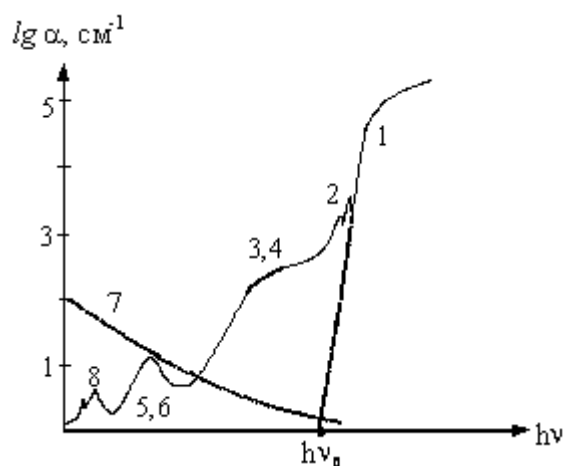


Рис.1.2.3. Типичный спектр поглощения света твердым телом

В целом, поглощение света является частным случаем более сложного процесса, который получил название экстинкция и представляет собой ослабление интенсивности излучения при его

распространении в веществе за счет поглощения и рассеяния света. В этом случае коэффициент  $\alpha$  в законе Бугера (1.2.7) называется показателем экстинкции и равен сумме показателей поглощения и рассеяния среды.

### **Контрольные вопросы**

1. На зонной диаграмме рассмотрите основные электронные переходы при поглощении света в кристаллах.
2. Что такое экситон?
3. Введите понятие донорно-акцепторных пар.
4. Какие переходы электронов могут вызвать фотопроводимость кристаллов?
5. Запишите и поясните закон Бугера-Ламберта.
6. Что такое показатель поглощения среды?
7. Что понимают под оптической плотностью среды?
8. Нарисуйте общий спектр поглощения света твёрдым телом.
9. Что такое экстинкция света?

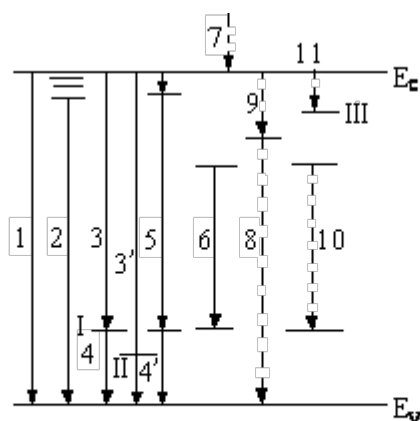
### **1.3. Люминесценция твёрдых тел. Фотолюминесценция**

Люминесценция (в переводе с латинского – свет, обладающий слабым действием), согласно определению С.И.Вавилова, представляет собой свечение, избыточное над тепловым излучением тела, если это избыточное излучение продолжается после прекращения возбуждения в течение времени, превышающего период световой волны ( $t_c \cong 10^{-14}$  с). Первая часть этого определения отделяет люминесценцию от теплового равновесного излучения тела и позволяет отнести ее к неравновесным процессам. Вторая часть выделяет люминесценцию среди других видов неравновесного излучения, таких как отражение и рассеяние света, тормозное излучение и т.д., которые практически безынерционны. При этом основным отличием люминесценции является то, что при ней между поглощением и испусканием энергии происходят промежуточные процессы, длительность которых больше периода световой волны. В результате этого, если люминесценция возбуждается светом, теряется связь между фазами колебаний поглощенного и излученного света.

Твердые и жидкие вещества, способные люминесцировать под действием различного рода возбуждений, получили название люминофоров. Неорганические люминофоры часто называют фосфорами, а в случае, если они имеют кристаллическую структуру, – кристаллофосфорами. В зависимости от вида возбуждения люминофора различают: фотолюминесценцию, возникающую в результате поглощения света; катодо-, рентгено- и радиолюминесценцию, возбуждаемую ускоренным потоком электронов, рентгеновским излучением,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицами, протонами, осколками ядерного деления соответственно; электролюминесценцию, вызываемую электрическим полем; хеми- и биолюминесценцию, при которых излучение света сопровождает химическую реакцию.

Люминесценцию с очень коротким временем послесвечения часто называют **флуоресценцией** (более характерно для атомной и молекулярной спектроскопии). Длительное послесвечение называется **Фосфоресценцией**. Фосфоресценция, в отличие от флуоресценции, обусловлена переходами из так называемых «триплетных» возбужденных состояний, в которых направление спина электрона, находящегося в возбужденном состоянии, то же, что и у электрона, оставшегося в основном состоянии.

На рис. 1.2.2, а приводилась схема электронных переходов, происходящих при поглощении энергии в полупроводниках и диэлектриках. Практически все обратные переходы, при которых энергия электронов уменьшается, могут сопровождаться излучением в той или иной спектральной области. Используя полупроводники и диэлектрики с различной шириной запрещенной зоны и различными точечными дефектами, можно получить люминесценцию во всем видимом, а также ближнем ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах (рис. 1.3.1).



*Рис. 1.3.1..Электронные переходы, сопровождающиеся выделением энергии*

Основные закономерности излучательной рекомбинации носителей заряда определяются законами сохранения энергии и импульса, поэтому энергия квантов люминесценции может соответствовать разнице энергетических уровней электрона до и после соответствующего

излучательного перехода или отличаться от нее на энергию рожденных в процессе рекомбинации носителей заряда фононов. Показательной в этом плане является экситонная люминесценция (переход 2), которая может быть как бесфононной, когда энергия и импульс экситона полностью передаются фотону, так и многофононной, то есть с одновременным испусканием фононов. Любопытно, что при многофононном исчезновении экситонов, в спектрах излучения непосредственно проявляется кинетическая энергия экситонов (обычное максвелловское распределение квазичастиц по кинетическим энергиям), и изучение таких процессов используется для получения информации о движении экситонов в кристаллах.

Возможна ситуация, когда вся энергия, выделенная при электронных переходах, расходуется на выделение тепла (образование фононов), такие переходы называются безызлучательными и условно показаны на рис. 1.3.1 штриховыми линиями. Точечные дефекты, участвующие в таких переходах, называются центрами тушения. Примеси и собственные дефекты кристаллической решетки, участвующие в излучательных переходах получили название центров свечения. Если в излучательных переходах участвует хотя бы одна из зон, то соответствующую люминесценцию называют рекомбинационной. Переход электрона (см. рис. 1.3.1) с возбужденного уровня дефекта решетки на основной (переход 6) происходит в пределах определенного точечного центра свечения, и соответствующую люминесценцию называют внутрицентральной.

Важной характеристикой люминесценции является спектральный состав излучаемого света (спектр люминесценции), который чаще всего изображается в виде кривых зависимости яркости люминесценции  $L$  от энергии квантов  $h\nu$  (или длины волны  $\lambda$ ). Типичный спектр люминесценции, отражающий основные электронные переходы, изображенные на рис. 1.3.1, показан на рис. 1.3.2. Он зависит от типа люминофора, интенсивности и длины волны возбуждающего излучения, от температуры и ряда других причин. При этом форма полосы или линии излучения может определяться целым рядом факторов, например, уширением энергетических уровней центра за счет их расщепления под действием внутрикристаллических полей, временем жизни системы в возбужденном состоянии, на которое существенное влияние оказывает характер взаимодействия центров свечения с колебаниями кристаллической решетки и т.д. В реальной ситуации часто регистрируется суммарная полоса люминесценции, отвечающая набору линий многофононного излучения или наложению отдельных полос изучаемого спектра.

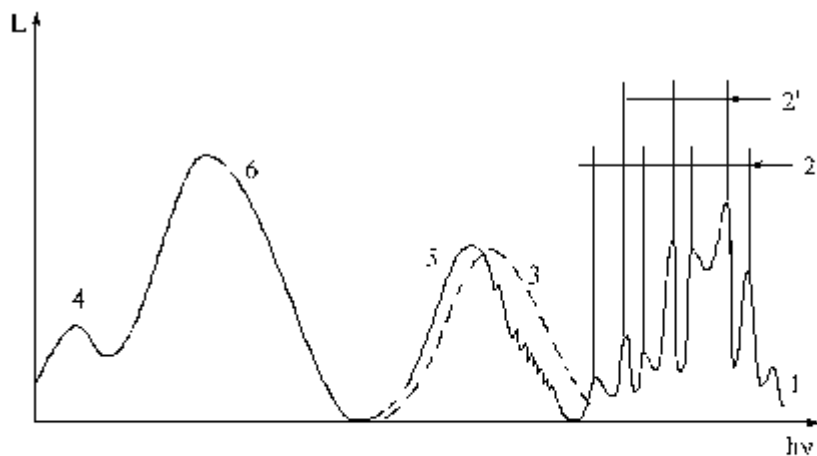


Рис. 1.3.2. Типичный спектр люминесценции полупроводникового кристалла:

1, 3, 4, 5, 6 – соответствуют переходам на рис. 7.7;

2 – многофононная люминесценция свободных экситонов;

2' – та же люминесценция, но с участием фононов.

Основные свойства люминесценции твёрдых тел рассмотрим далее на примере фотолюминесценции, которая с точки зрения возбуждения является наиболее простым видом люминесценции.

Согласно правилу Стокса максимум в спектре люминесценции смещен, по отношению к соответствующему максимуму в спектре поглощения, в сторону длинных волн как изображено, например, на рис. 1.3.3. Это обстоятельство объясняется наличием так называемых “стоксовых” потерь, так как часть поглощаемой люминофором энергии рассеивается в кристаллической решетке, переходя в тепло. В некоторых случаях при взаимодействии падающих квантов света с возбужденными атомами вещества энергия кванта добавляется к уже имеющейся энергии возбуждения. Тогда в небольшой области спектра излучения может регистрироваться люминесценция более коротковолновая, чем длина волны падающего излучения, так называемая антистоксовая люминесценция.

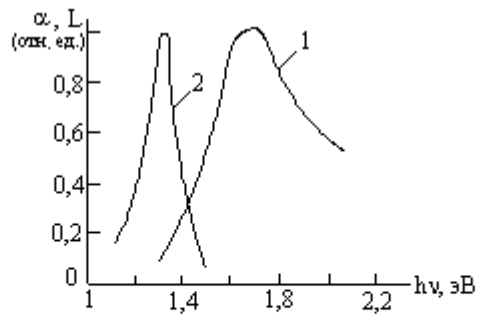


Рис. 1.3.3. Спектры поглощения (1) и люминесценции (2) с участием глубокого уровня примеси кислорода в фосфиде галлия

Не удалось отобразить рисунок.

С увеличением уровня возбуждения люминофора обычно увеличивается яркость люминесценции  $L$ , которая пропорциональна числу квантов излучения, испускаемых телом за единицу времени с единицы поверхности. Рассмотрим характер этой зависимости подробнее.

При стационарной концентрации избыточных носителей  $\Delta n$  (для электронов) скорость их генерации  $G$  должна равняться скорости рекомбинации  $R$  (числу носителей определенного сорта, рекомбинирующих в единице объема за секунду), которую можно представить в виде  $R = \frac{\Delta n}{\tau_n}$ , где  $\tau_n$  – время жизни неравновесных электронов.

Таким образом, можно записать в общем случае

$$\frac{d\Delta n}{dt} = G - R, \quad (1.3.1)$$

что при  $R = G$  и  $L \sim R$  приводит с учетом (7.9) к зависимости  $L \sim \Phi$ , и



$$R = \eta_l \frac{\alpha \Phi}{h\nu} \quad (1.3.2)$$

Эта зависимость действительно реализуется при собственном поглощении света и малых интенсивностях примесного поглощения, когда  $\alpha$  не зависит от  $\Phi$ .

Число безызлучательных переходов обычно сильно возрастает с повышением температуры, что описывается выражением

$$R_6 = A_1 \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right), \quad (1.3.3)$$

где  $R_6$  – скорость безызлучательных переходов;  $E_T$  – энергия активации температурного тушения;  $A_1$  – коэффициент, не зависящий от температуры.

Поскольку вероятность излучательных переходов при изменении температуры считается постоянной, то квантовый выход процесса излучения  $\eta_l$ , определяемый как отношение числа испущенных фотонов к числу созданных за это же время в результате возбуждения носителей заряда или электронно-дырочных пар, записывается в виде:

$$\eta_l = \frac{R_{\text{изл}}}{G} = \frac{1}{1 + C \cdot \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right)}, \quad (1.3.4)$$

где  $G = R = R_{\text{изл}} + R_6$ ;  $C = \frac{A_1}{R_{\text{изл}}}$  – константа.

В случае рекомбинационной люминесценции причиной подобного температурного тушения может быть, например, тепловой заброс электронов из валентной зоны на уровни центров свечения (переход, обратный переходу 4 на рис. 1.3.1), приводящий к уменьшению числа рекомбинаций на этих центрах (переход 3 на рис. 1.3.1) и соответственно к увеличению числа безызлучательных переходов через другие уровни (внешнее тушение). В случае внутрицентральной люминесценции с повышением температуры возможно увеличение вероятности безызлучательных переходов внутри самого центра свечения (внутреннее тушение).

Для понимания процесса внутреннего тушения рассмотрим схему (рис. 1.3.4,а), изображающую энергию основного 1 и возбужденного 2 уровней примеси, расположенных в запрещенной зоне кристалла, в зависимости от конфигурационной координаты  $r$ . Конфигурационная координата соответствует расстоянию данного центра от окружающих его ионов решетки и существенно зависит от их тепловых колебаний. После возбуждения (переход АВ) электрон может вернуться на основной уровень не только путем перехода CD, сопровождающегося излучением фотона, но и через точку F с последующим этапом FA, при котором происходит уменьшение энергии электрона вследствие генерации фононов (выделение тепла).

Из рис. 1.3.4,а следует, что средняя энергия (CD) излучаемых фотонов меньше средней энергии (AB) поглощаемых фотонов (закон Стокса). Изменение равновесного расстояния  $r_0^*$  для возбужденного состояния 2 связано с изменением распределения заряда в примеси после перехода электрона на уровень 2 и соответствующим изменением взаимодействия этого центра с окружающими ионами решетки.

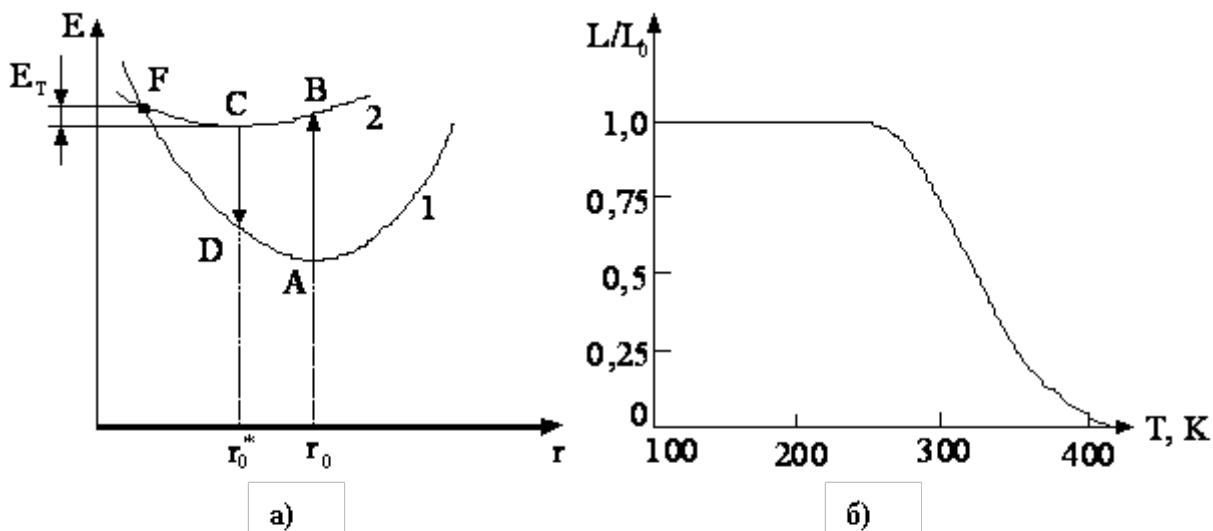


Рис. 1.3.4. Модель конфигурационных кривых (а) и зависимость яркости люминесценции  $ZnS-Ag,Co$  от температуры (б)

Энергия термического возбуждения примесного центра (возможно ионизации)  $E_{терм}$  обычно меньше энергии оптического возбуждения  $E_{опт}$  (особенно характерно для полярных соединений с большой долей ионной связи). Энергия  $E_{терм}$  определяется минимальным энергетическим расстоянием между конфигурационными кривыми (энергетический интервал AC на рис. 1.3.4,а), оптическая энергия  $E_{опт}$  соответствует мгновенному переходу АВ, в процессе которого не успевает произойти

перегруппировка атомов кристаллической решетки. Разницу  $E_{\text{опт}} - E_{\text{терм}}$  часто называют сдвигом Франка-Кондона.

Наблюдаемые в спектре люминесценции полосы излучения являются огибающими серии линий, каждая из которых возникает в результате оптического перехода между колебательными уровнями возбужденного и основного состояний. Расчёт показывает, что спектр люминесценции в этом случае обычно удается описать гауссовой формой, а полуширина полосы  $\Delta$  увеличивается с ростом температуры (при высоких температурах  $\Delta \sim \sqrt{T}$ ). Последнее обстоятельство понятно и из классических соображений, так как энергия гармонического осциллятора  $E \cong \frac{\kappa(r - r_0)^2}{2} \sim T$ .

Заметим также, что в отдельных случаях фиксируется очень слабая люминесценция, возникающая в результате оптических переходов примесных центров с высоких колебательных уровней возбужденного электронного состояния на нижние (переходы на участке ВС рис. 1.3.4,а). Такая люминесценция называется горячей, потому что ее линии лежат в той области, где расположены линии обычной люминесценции при высоких температурах.

При внешнем и внутреннем тушении температурная зависимость яркости фотолюминесценции (рис. 1.3.4,б) хорошо описывается формулой

$$L(T) = L_0 \left[ 1 + C \cdot \exp\left(-\frac{E_T}{\kappa T}\right) \right], \quad (1.3.5)$$

которая соответствует зависимости  $\eta(T)$ , где  $L_0$  – яркость при  $T = 0$  К.

При внутрицентровом тушении величина  $E_T$  имеет смысл энергетического расстояния от минимума энергии возбужденного состояния центра свечения до энергии, при которой электрон из возбужденного состояния может перейти в основное без излучения фотона (точка F на рис. 1.3.4, а).

При внешнем тушении  $E_T$  обычно представляет собой энергетическое расстояние от уровня центра свечения до зоны, взаимодействие с которой приводит к тушению.

В люминофоре, содержащем рекомбинационные центры свечения двух типов (I и II на рис. 1.3.1), с энергетическими уровнями, расположенными на разном расстоянии от потолка валентной зоны (характеризующимися поэтому двумя разными полосами в спектре излучения – переходы 3 и 3'), возможно так называемое рекомбинационное взаимодействие центров свечения. Оно проявляется в том, что с повышением температуры увеличивается доля более длинноволновой компоненты в спектре

свечения. Дело в том, что рост  $T$  сопровождается увеличением вероятности теплового заброса электронов из валентной зоны на более “мелкие” уровни центров II, они оказываются занятыми, и вероятность коротковолновых переходов  $3'$  снижается по сравнению с вероятностью более длинноволновых переходов 3 на уровни I. Подобное явление наблюдается, например, у ZnS–Cu – люминофоров, имеющих голубую и зеленую полосы люминесценции: по мере повышения температуры доля зеленой полосы в спектре возрастает.

Ещё одной возможностью превращения энергии возбуждения не в энергию излучения, а в тепловую энергию, являются так называемые Оже-процессы, когда энергия, выделенная при переходе электрона на более низкий уровень (например, при переходах 8, 9 на рис. 1.3.1), передается другому электрону в зоне проводимости. Далее этот электрон опускается на дно зоны проводимости (при определенных условиях может наблюдаться и слабое свечение, соответствующее внутризонным переходам 7). Вероятность Оже-процессов растет с увеличением концентрации свободных носителей заряда.

В целом характер спектра излучения кристаллов зависит от очень многих факторов как внутренних (например, тип и концентрация дефектов), так и внешних (температура, уровень возбуждения образца, наличие деформаций, электрических и магнитных полей и т.д.).

Именно поэтому спектральный анализ люминесценции является мощным методом исследования полупроводников и диэлектриков. В качестве примера разнообразия возможных ситуаций рассмотрим хотя бы кратко основные механизмы экситонного излучения, которые могут развиваться в зависимости от примесного состава кристалла, а также температуры и уровня возбуждения.

Мы уже упоминали о возможности наблюдения при низких температурах экситонной люминесценции, вызванной многофононной аннигиляцией свободных (рис. 1.3.2, переходы 2) и связанных (переходы 2') экситонов (обычно  $T \leq 100$  К, при которой не очень развит тепловой распад экситонов). При высоком уровне возбуждения кристаллов, когда резко возрастает концентрация свободных экситонов, появляется излучение, соответствующее неупругому рассеянию свободных экситонов. В результате столкновения двух экситонов один из них превращается в фотон с энергией, меньшей энергии свободного экситона, а другой переходит в возбужденное состояние. При большой концентрации свободных электронов регистрируется и излучение, обусловленное экситон-электронным взаимодействием, в результате которого свободный или связанный экситон передает часть энергии электрону зоны проводимости, а сам превращается в испускаемый фотон. При высокой концентрации, например, донорной примеси отмечены двухэлектронные переходы с участием связанных экситонов (излучательный распад связанного экситона сопровождается одновременным возбуждением и

ионизацией соответствующего донора). При высокой плотности экситонного газа происходит образование экситонных молекул (биэкситонов) и соответственно наблюдается их излучение. Наконец, при очень большом уровне возбуждения и гелиевых температурах  $T \leq 4,2$  К происходит конденсация экситонов (бозе-частицы, см. п. 2.2), что сопровождается излучением электрон-дырочной жидкости.

Вследствие конечной длительности пребывания системы в возбужденном состоянии, люминесценция не исчезает мгновенно после прекращения возбуждения, а затухает с определенной скоростью. В случае внутрицентральной люминесценции излучательный переход в каждом центре происходит независимо от состояния других центров и определяется только его вероятностью.

Если  $N$  – число возбужденных центров свечения в момент времени  $t$ , а  $\tau$  – среднее время “жизни” возбужденного состояния, то число центров  $dN$ , переходящих в основное состояние за время  $dt$ ,

$$dN = -N \frac{dt}{\tau}. \quad (1.3.6)$$

Преобразуя выражение (1.3.6.) и интегрируя, получим

$$\ln N = -\frac{t}{\tau} + \text{const.} \quad (1.3.7)$$

Если в начале процесса (при  $t = 0$ )  $N = N_0$ , то

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.3.8)$$

Яркость излучения  $L$  определяется числом излучательных переходов в единицу времени ( $\gamma$  – коэффициент пропорциональности):

$$L = -\gamma \frac{dN}{dt} = \gamma \frac{N_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = L_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.3.9)$$

Таким образом, приходим к экспоненциальному закону затухания внутрицентральной люминесценции.

В случае рекомбинационной люминесценции яркость излучения пропорциональна скорости рекомбинации электронов с центрами свечения, а эта скорость определяется числом эффективных встреч между ними. Расчеты дают в этом случае гиперболический закон затухания рекомбинационной люминесценции :

$$L = \frac{L_0}{[1 + (L_0\beta)^{1/2}t]^2}, \quad (1.3.10)$$

где  $b$  - коэффициент рекомбинации (положив в уравнении (7.16)  $G = 0$ , а  $R = \beta\Delta n n$ , где  $N$  – концентрация ионизированных центров; при  $N = \Delta n$  получим:  $R = \beta(\Delta n)^2$ ).

Рассмотренные два основных типа люминесценции отличаются друг от друга зависимостью затухания от интенсивности возбуждения. Как следует из выражений (1.3.9) и (1.3.10), при внутрицентральной люминесценции относительное изменение яркости свечения при затухании не зависит от интенсивности возбуждения, тогда как при рекомбинационной люминесценции это изменение тем быстрее, чем больше  $L_0$ . В связи с этим низкого уровня возбуждения люминесценции в случаях, когда рекомбинационное послесвечение создает помехи, стараются избежать.

Из уравнения (1.3.10) видно, что при больших временах затухания яркость рекомбинационного послесвечения не зависит от начальной интенсивности возбуждения люминофора, и кривые затухания (вне зависимости от начальной интенсивности возбуждения) асимптотически устремляются друг к другу.

Энергетическое положение и конфигурация точечных дефектов могут оказаться такими, что свободные носители, захваченные ловушками, сохраняются на них длительное время (например, переход 11, рис. 1.3.1 из зоны проводимости на уровень III). Освобожденные через некоторое время (переход с уровня III в зону проводимости, обратный переходу 11) эти носители могут участвовать в излучательной рекомбинации с центрами свечения и, в частности, создают послесвечение люминофора. Стимулировать процесс освобождения захваченных носителей из ловушек может повышение температуры кристалла. Начинаясь при определенной температуре свечение образца, вызванное рекомбинацией освобожденных носителей, называется термовысвечиванием. Для его появления всегда необходимо предварительное возбуждение образца (светом, электронным пучком и т.д.) при более низких температурах, способствующих захвату и сохранению избыточных носителей заряда на ловушках. Запасание определенной светосуммы, зависящей от уровня предварительного возбуждения кристалла, лежит в основе работы термолюминесцентных дозиметров ионизирующего излучения.

Рассмотрение системы с ловушками показывает, что если ловушки расположены по соседству с центрами свечения и если возбужденные электроны пробегают очень малые расстояния (меньше или порядка  $10^{-6}$  см), перемещаясь лишь от ловушки до центра свечения или наоборот, то такую систему можно рассматривать как независимую. В этом случае вероятность рекомбинации постоянна во

времени, и затухание люминесценции будет следовать экспоненциальному закону (в данной ситуации время  $\tau$  в уравнении (1.3.9) соответствует пребыванию электрона в ловушке).

Если ловушки распределены в пространстве независимо от центров свечения и пробег электрона достаточно велик (больше или порядка  $10^{-5}$  см), чтобы позволить ему рекомбинировать с большим числом центров, то вероятность рекомбинации будет пропорциональна числу ионизованных центров. Мы опять получаем для кинетики затухания уравнение гиперболы второго порядка. Скорость затухания люминесценции при этом будет, в основном, определяться временем пребывания электронов на ловушках.

Таким образом, затухание по гиперболе второго порядка однозначно устанавливает, что люминесценция является рекомбинационной. Часто ситуация существенно усложняется из-за вклада в кинетику затухания ловушек различного типа, отличающихся друг от друга глубиной. Тем не менее математический анализ процесса показывает, что и в этом случае затухание рекомбинационной люминесценции подчиняется гиперболическому закону, но сподказателем степени  $1 \leq p \leq 2$ . Это приводит к уравнению гиперболы дробной степени, выведенному на основе данных экспериментов ещё в прошлом веке Э. Беккерелем ( $a = \text{const}$ ).

$$L = \frac{L_0}{(1 + at)^p}, \quad (1.3.11)$$

Определение природы центров свечения в кристаллах является обычно очень сложной задачей, которая часто решается путем параллельного исследования термовысвечивания и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Воссоединение освобожденных из ловушек носителей с центрами свечения сопровождается не только термовысвечиванием, но и меняет зарядовое состояние центров, переводя их из парамагнитного в диамагнитное состояние (или наоборот), что регистрируется методом ЭПР (с предварительной идентификацией парамагнитного центра), (рис. 1.3.5).

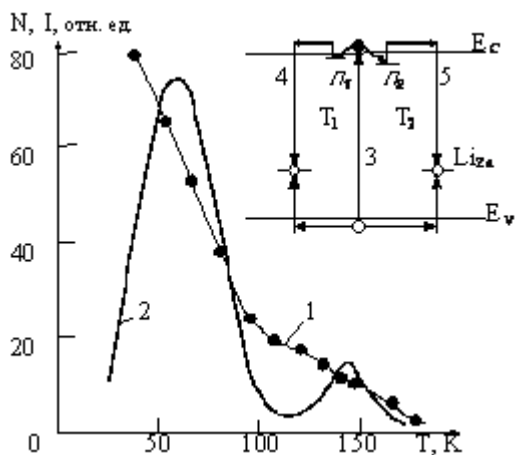


Рис. 1.3.5. Зависимость концентрации литиевых парамагнитных центров (1) от температуры отжига монокристаллов оксида цинка и кривая интенсивности его желто-оранжевого термовысвечивания (2). Схема опыта: межзонное возбуждение люминофора при  $T = 4,2$  К (3), сопровождающееся захватом электронов на ловушки ( $L_1$  и  $L_2$ ); прекращение возбуждения и нагрев образца, приводящий к освобождению электронных ловушек, сначала при  $T_1 \cong 55$  К, затем при  $T_2 \cong 145$  К с последующим термовысвечиванием (4, 5) при соответствующих температурах. Параллельно регистрируется сигнал ЭПР литиевых центров, проявляемый только до захвата ими электронов

Подбором люминофора и соответствующих центров свечения можно широко варьировать длину волны люминесценции (рис. 1.3.6). При этом даже в одном люминофоре, меняя тип примесей и соответственно энергетическое положение центра свечения в запрещенной зоне, удастся существенным образом регулировать спектральный состав излучения. Например, ZnS–Ag обладает голубой, ZnS–Cu – зеленой, и наконец, ZnS–Mn – оранжевой люминесценцией. Возможно и одновременное присутствие в люминофоре различных центров свечения, включение которых в работу регламентируется способом возбуждения образца.

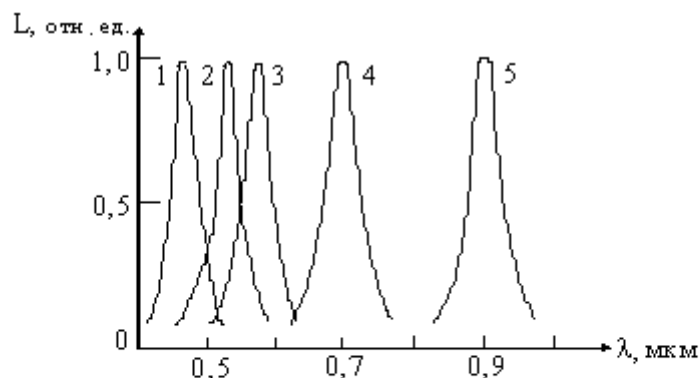


Рис. 1.3.6. Спектры люминесценции нескольких люминофоров:  
1–ZnS:Ag; 2–ZnS:Cu; 3–ZnS:Mn; 4–GaP:Zn,O; 5–GaAs

Процессы, связанные с образованием центров свечения, и механизмы люминесценции очень многообразны. Дело в том, что во многих случаях точечные дефекты могут быть многозарядными (например, междоузельный цинк в ZnO может находиться в нейтральном  $Zn_i^0$ , однократно ионизированном  $Zn_i^+$  и двукратно ионизированном состоянии  $Zn_i^{2+}$ ), при этом зарядовое состояние дефекта зависит от электрических свойств материала и типа возбуждения люминофора (в конечном итоге – от положения уровня Ферми). При высоких концентрациях точечные дефекты способны образовывать ассоциаты, например,  $(Cl_i^+ V_{Zn}^{2-})'$  в ZnS или  $(Zn_i^+ Li_{Zn}^-)$  в том же ZnO, которые также могут являться центрами свечения. Чтобы оттенить многообразие механизмов излучения, перечислим хотя бы некоторые конкретные примеры: внутрицентровая люминесценция (KCl–Tl), излучательная рекомбинация носителей заряда в донорно-акцепторных парах (GaP : Zn,O), рекомбинационная люминесценция с участием одной из зон (ZnS : Ag), излучательный распад свободных экситонов (соединения  $A_2B_6$ ) и экситонов, связанных с мелкими донорами ( $A_2B_6$  с примесью из III и VII групп периодической таблицы), люминесценция экситонов, локализованных на изоэлектронных ловушках (GaP : N) и т.д.



Некоторые точечные дефекты являются тушителями люминесценции, например, примеси Fe, Co и Ni, а также радиационные дефекты в соединениях  $A_2B_6$ . Тушение связано с перепоглощением люминесценции на уровнях центров тушения и перзахвате ими образующихся неравновесных носителей заряда.

Встречаются случаи и так называемого концентрационного тушения люминесценции, которое возникает при увеличении концентрации центров свечения. Дело связано с тем, что при большой концентрации центров свечения они располагаются столь близко друг от друга, что возникающее между ними взаимодействие приводит к уменьшению вероятности излучательного перехода. Причиной этого может быть, в частности, резонансная передача энергии от одного центра свечения к другому, происходящая до тех пор, пока эта энергия не будет перехвачена центром тушения.

В отдельных случаях в вещество кроме центров свечения вводят еще дополнительные центры, которые расширяют спектральную область поглощения люминофора и называются сенсibilизаторами. Энергия, полученная сенсibilизатором, передается центрам свечения, вызывая так называемую сенсibilизированную люминесценцию. Условием резонансной передачи энергии является перекрытие спектров излучения сенсibilизатора и поглощения центра свечения (активатора). Такая ситуация, например, реализуется при взаимодействии  $Gd^{3+}$  (сенсibilизатор) и  $Tb^{3+}$  (активатор) в люминофоре  $YPO_4 : Tb, Gd$ .

Наличие у кристаллов анизотропных свойств (например, гексагональные кристаллы) и возможность формирования анизотропных центров свечения (например, ассоциаты дефектов) приводит к появлению поляризации люминесценции. Это явление характерно для излучения экситонов в гексагональных соединениях  $A_2B_6$ , люминесценции близких донорно-акцепторных пар и т.д. и служит, во многих случаях, основой для изучения механизма излучательной рекомбинации носителей заряда в кристаллах.

Кратко остановимся на характеристиках, определяющих эффективность люминесценции. Уже было введено понятие квантового выхода излучения  $\eta_{\text{и}}$ . Более общей характеристикой, отражающей процесс превращения поглощенной в люминофоре энергии в излучение, является квантовый выход люминесценции  $\eta_{\text{к}}$ , под которым понимается число фотонов, приходящихся на каждый поглощенный квант света (при фотолюминесценции), или электрон, прошедший через кристалл (при электролюминесценции). Квантовый выход люминесценции  $\eta_{\text{к}}$  можно представить как произведение квантового выхода ионизации или возбуждения  $\eta_{\text{в}}$  (т.е. числа неравновесных пар электрон-дырка или возбужденных центров свечения, появляющихся при поглощении одного кванта света или при прохождении одного электрона) и квантового выхода процесса излучения ( $\eta_{\text{к}} = \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{и}}$ ). Поскольку во

многих случаях излучение может поглощаться внутри образца, используют понятие внешнего квантового выхода, который отличается от  $\eta_k$  множителем, учитывающим только вышедшее из кристалла и измеренное излучение.

Эффективность преобразования разных видов энергии в излучение при люминесценции характеризуют также энергетическим выходом (КПД), который определяется как отношение излученной энергии к поглощенной за то же время:

$$\eta = \frac{E_{\text{изл}}}{E_{\text{погл}}} \quad (1.3.12)$$

В случае фотолюминесценции

$$\eta = \eta_k \cdot \frac{\nu_{\text{изл}}}{\nu_{\text{погл}}} \quad (1.3.13)$$

так как  $E = Nh\nu$ .

При фотолюминесценции, возбуждаемой фотонами с энергией  $h\nu < 2\Delta E$ , квантовый выход может быть близок единице, в то время как при рентгенолюминесценции он обычно достигает значений сотен и тысяч (происходит фотонное умножение, при котором поглощение одного рентгеновского кванта сопровождается рождением нескольких квантов меньших энергий). Квантовый выход люминесценции лучших ламповых люминофоров для ламп дневного света равен 90%, поэтому и КПД таких источников света существенно выше, чем у обычных ламп накаливания, КПД которых не больше 3–4%.

Фотолюминесценция широко используется в технике. Так, среди поликристаллических люминофоров, выпускаемых промышленностью во всем мире, фотолюминофоры составляют наибольшую долю (до 90%). Это связано с тем, что 10% всей вырабатываемой в мире электроэнергии идет на цели освещения; применение фотолюминофоров, используемых в люминесцентных лампах, позволяет наиболее экономно расходовать эту энергию.

Люминесцентная лампа является газоразрядным прибором, в котором электроны, вылетающие из нагретого катода и ускоряемые электрическим полем, сталкиваются с атомами газа, заполняющего лампу (как правило, парами ртути с небольшими добавками инертных газов), и возбуждают их. При возвращении этих атомов в основное состояние возникает излучение, которое принадлежит, в основном, ультрафиолетовой области спектра (длины волн 184,9 нм и 253,7 нм). Для преобразования этого

излучения в видимое и используется фотолюминофор, который наносится на внутреннюю поверхность стеклянной колбы лампы. Среди наиболее распространенных фотолюминофоров следует отметить галофосфат кальция, активированный сурьмой и марганцем. Вводя различные примеси и меняя их концентрацию, можно получать люминофоры разных типов и изготавливать лампы разной цветности, в том числе лампы, спектр излучения которых близок к спектру солнечного света.

В заключение заметим, что очень информативен спектр возбуждения люминесценции (СВЛ). В этом случае спектрометр настраивается на излучение образца с определенной энергией фотона, и измеряется зависимость интенсивности фотолюминесценции от энергии возбуждающего фотона. Обычно предполагается, что спектр СВЛ эквивалентен спектру поглощения образца. Подобный анализ стал актуален для изучения, например, тонких эпитаксиальных слоев, выращенных на непрозрачных подложках.

Иногда, удобнее исследовать СВЛ, сканируя длину волны возбуждающего излучения, в этом случае поддерживается постоянной энергия возбуждения при измерениях во всем спектральном интервале.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение люминесценции.
2. Какие виды люминесценции Вы знаете? Чем они отличаются?
3. На зонной диаграмме рассмотрите основные излучательные переходы электронов в кристаллах.
4. Нарисуйте типичный спектр люминесценции полупроводникового кристалла.
5. В чём смысл правила Стокса?
6. Что такое квантовый выход излучения? Как он зависит от температуры?
7. От чего зависит характер спектра излучения кристаллов?
8. Рассмотрите отличие законов затухания внутрицентральной и рекомбинационной люминесценции.
9. Каким образом можно определить природу центра свечения?

10. Что такое энергетический выход люминесценции?

11. Опишите примеры применения фотолюминесценции в технике.

12. Что такое спектр возбуждения люминесценции?

## 1.4. Вынужденное излучение. Лазеры

Поглощение и спонтанное излучение света кристаллами мы уже рассмотрели. Остановимся теперь на вынужденном излучении, наличие которого было впервые постулировано А. Эйнштейном в 1905 году для объяснения спектров излучения абсолютно чёрного тела.

Если атом находится в возбужденном состоянии, то существует вероятность вынужденного испускания света под действием поля проходящей электромагнитной волны. С квантовых позиций фотон с энергией  $h\nu_{12} = E_2 - E_1$  стимулирует квантовые переходы в атоме с верхнего уровня  $E_2$  на нижний  $E_1$ , в результате возникает еще один фотон с энергией  $h\nu$ . Принципиально важным является то, что вынужденное излучение имеет точно такие же характеристики, что и первичное: ту же частоту, направление распространения и поляризацию. Иными словами, первичный и вторичный фотоны неразличимы (см. п. 1.1).

Таким образом, новые фотоны, индуцированные падающим светом, усиливают свет, проходящий через коллектив излучающих атомов (или центров излучения в твердом теле). Препятствуют этому процессу центры, находящиеся в основном состоянии и имеющие определенную вероятность поглощения света. В случае преобладания актов вынужденного излучения среда становится усиливающей (говорят об отрицательном поглощении света), что определяется формулой В.А.Фабриканта (1951 г.):

$$\Phi = \Phi_0 e^{kz}, \quad (1.4.1)$$

где  $\alpha(\nu)$  – отрицательный показатель поглощения, а сам закон сопоставим с законом Бугера-Ламберта (7.4).

Для усиления излучения необходимо создать неравновесное состояние системы ( $N_2 > N_1$ , где  $N_1$  и  $N_2$  – число центров, находящихся в данный момент времени в основном и возбужденном состояниях), иначе говоря, – осуществить инверсию населенности ее энергетических уровней (рис. 1.4.1). Перевод среды в инверсное состояние называется накачкой усиливающей среды (оптическая накачка, с помощью электронного пучка и т.д.). Вследствие спонтанного излучения использование двухуровневой системы

для получения инверсии населенности оказывается неэффективным. В этих целях применяют многоуровневые квантовые системы атомов или ионов, накачка которых сначала переводит рабочие центры в возбуждённые состояния с более высокой энергией, чем энергия, соответствующая испусканию квантов индуцированного излучения. Такие системы могут работать по трёх-, четырёх- (или более) уровневым схемам, причём желательно, чтобы нижнее состояние для индуцированного светом перехода было расположено несколько выше по энергии, чем основное состояние квантовой системы, что явно упрощает условия получения инверсной заселённости соответствующих уровней (малая равновесная заселённость конечного состояния этих переходов). Трёхуровневый метод создания сред с отрицательным поглощением, предложенный Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым (1955 г.) используется и в твердотельных устройствах (например, в рубиновых лазерах – рис. 1.4.1 в).

Упрощённая схема квантового усилителя представлена на рис. 1.4.1,а. Среду, в которой возможно создание инверсии населенностей энергетических уровней, называют активным элементом усилителя.

При наличии накачки активного элемента входной сигнал на частоте  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ , пройдя через этот элемент, усиливается за счет процессов вынужденного излучения, так что на выходе системы формируется усиленный сигнал  $\Phi_{\text{вых}}$ .

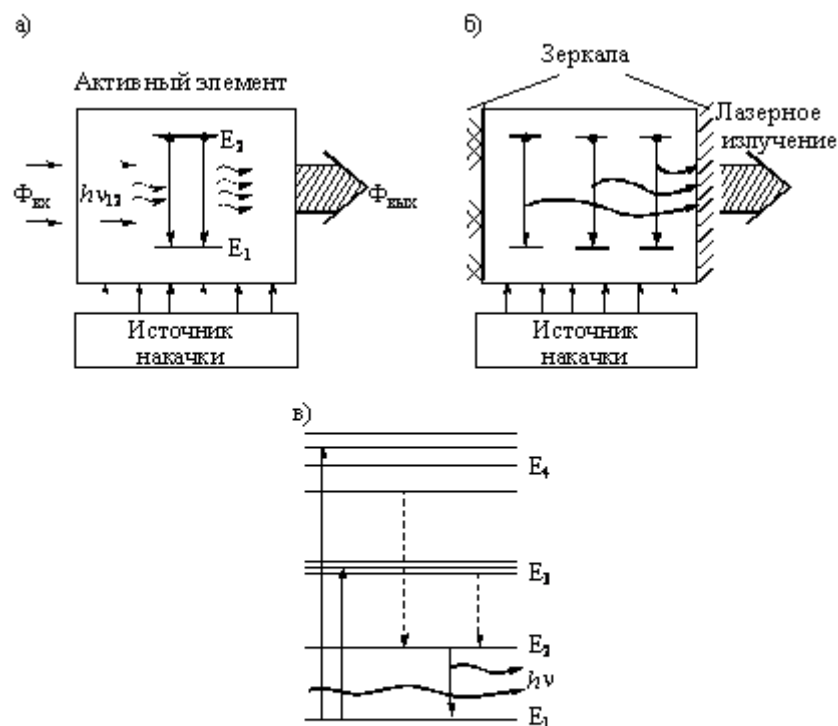


Рис. 1.4.1. Общая схема квантового усилителя (а), лазера (б)

Для превращения усилителя в оптический квантовый генератор (лазер) желательно ввести положительную обратную связь, как это обычно делается и в электронных усилителях. То есть часть усиленной мощности с выхода подать на вход системы, в этих целях в лазерах используют оптический резонатор: активный элемент (кристалл) помещается между двумя строго параллельными зеркалами (модифицированный интерферометр Фабри-Перо) (рис. 1.4.1,б). Любой фотон, возникающий в активном элементе за счет спонтанного излучения атомов среды, является источником начала генерации света. Например, если рожденный фотон движется вдоль оси резонатора (ось, проходящая через активный элемент, перпендикулярна зеркалам), то он образует лавину фотонов,двигающихся в том же направлении. Этот поток фотонов будет поочередно отражаться от зеркал, усиливаясь при каждом последующем прохождении через активный элемент вследствие вынужденного испускания света. Для вывода лазерного излучения одно из зеркал делается частично прозрачным, меняя значение коэффициента отражения этого зеркала, можно изменять величину обратной связи. Иногда отражающие покрытия наносят непосредственно на плоскопараллельные торцы стержней активной среды, в этом случае необходимость в выносных зеркалах отпадает. При изготовлении активных элементов из полупроводниковых материалов с высоким показателем преломления света ( $n = 2,5 \div 4$ ) коэффициент отражения границы раздела воздух-кристалл может превысить 35%, поэтому естественные грани кристалла образуют неплохой резонатор и отражающие покрытия часто вообще не применяются.

С точки зрения волновой теории процесс усиления света означает увеличение амплитуды световой волны. Для того, чтобы волна, дважды отраженная от зеркал, возвратилась к испустившему ее центру в той же фазе, в которой она была испущена (условие максимума при интерференции первичной и отраженной волн), необходимо выполнение условия резонанса:

$$2L = m\lambda, (1.4.2)$$

где  $L$  - расстояние между зеркалами;  $\lambda$  - длина волны;  $m = 1,2,\dots$

В качестве примера накачки активного элемента с целью получения лазерного излучения рассмотрим работу лазера на рубине (Т.Мейман, 1960), то есть кристалле  $Al_2O_3$  с примесью хрома, который в виде ионов  $Cr^{3+}$  замещает часть (0,05%) атомов  $Al$ . Уровни хрома располагаются в пределах широкой (около 6 эВ) запрещенной зоны  $Al_2O_3$ , и процессы поглощения энергии и излучения могут происходить внутри этих центров свечения (рис. 1.4.1,в). Свет от мощной ксеноновой лампы переводит электроны с основного уровня  $E_1$  на возбужденные уровни  $E_3$  и  $E_4$ , образующие две широкие полосы. Примерно через  $10^{-8}$  с электроны безызлучательно опускаются на метастабильные уровни  $E_2$ , на которых они могут находиться около  $10^{-3}$  с. На уровнях  $E_2$  происходит постепенное накопление

электронов, создается инверсная заселенность этих уровней по отношению к уровням  $E_1$ , и свет с частотой  $\nu$ , удовлетворяющей условию  $h\nu = E_2 - E_1$ , может вызвать вынужденные переходы электронов с уровней  $E_2$  на уровни  $E_1$  с излучением на длине волны 0,69 мкм (красный свет).

Рубин лазера представляет собой искусственный монокристалл, как правило, цилиндрической формы (диаметром около 1 см и длиной примерно 10 см) с тщательно отполированными плоскими торцами. На них путем испарения наносят диэлектрические (или металлические) зеркала. Усиление и излучение происходит вдоль направлений, параллельных оси цилиндра.

Для миниатюрных оптоэлектронных устройств более предпочтительным является лазер на кристаллах иттриево-алюминиевого граната с примесью неодима  $Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ . Неодим замещает в решетке примерно 1% атомов иттрия, создавая четырехуровневую систему, которая излучает на длине волны 1,06 мкм; в качестве источника накачки используется вольфрамовая или ртутная лампа. Благодаря повышенной концентрации центров свечения лазер с неодимом имеет более высокую мощность излучения (до 10 Вт), что позволяет снижать размеры устройства. КПД таких лазеров равен примерно 1%, хотя у лазеров на основе редкоземельных скандиевых гранатов он может быть в 4–5 раз выше. Лазерную генерацию можно получить и на стеклах с соответствующей примесью (например, неодима). Преимуществом стекол является их изотропность и разнообразие возможных технологических процессов (сверление, вытягивание, плавление и т.д.), недостатком – низкая теплопроводность (не применимы при высокой средней мощности излучения). Кроме того, перспективны лазеры и усилители света на световодах с примесью ионов редкоземельных элементов.

Специально изготовленные светодиоды (с сильным заполнением электронами возбужденных уровней) используются для создания полупроводниковых инжекционных лазеров, которые более эффективны (КПД достигает 50%) и миниатюрны, чем рассмотренные ранее лазерные системы, хотя и уступают по расходимости потока излучения твердотельным лазерам с редкоземельными ионами.

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите основные свойства вынужденного излучения.
2. Что означает инверсия населённости энергетических уровней?
3. Рассмотрите общую схему квантового усилителя.
4. Опишите принцип работ лазера.
5. Рассмотрите работу лазера на рубине.

## 1.5. Спектроскопия рассеянного света

Если размер рассеивающих частиц много меньше длины волны света, то наблюдается упругое рассеивание падающих фотонов по закону Рэлея (интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна четвёртой степени частоты  $\omega^4$  падающего излучения). Согласно модели Рэлея оптическая неоднородность создаётся мелкими сферическими частичками, которые, с волновой точки зрения, не создают фазового сдвига, зависящего от их формы и размеров. Таким образом, рассеянная волна оказывается когерентной с падающей. Закон Рэлея качественно был подтверждён более ранними работами Дж. Тиндаля (эффект Тиндаля), который наблюдал, что белый свет при рассеянии становится синеватым. Заметим, что закон Рэлея объясняет гоубой цвет неба днём и красноватый при восходе и закате Солнца.

Если размеры частичек рассеивающего света оказываются сравнимы с длиной волны падающего излучения, то при рассеивании появляется фазовый сдвиг, зависящий от формы, размеров и оптических свойств частиц. Появляется рассеяние Ми (G. Mie), которое не подчиняется закону Рэлея, но имеет похожую частотную тенденцию. Данный вид рассеяния мы обычно наблюдаем в облаках, тучах, туманах и т.п.

Интересно, что молекулярное рассеяние имеет место и в идеально чистых средах за счёт тепловых флуктуаций плотности атомов и молекул (флуктуаций показателя преломления).

**Комбинационное рассеяние света.** При спектральных исследованиях в кварце и исландском шпате (1928 г.) Мандельштам и Ландсберг обнаружили, что каждая спектральная линия падающего света сопровождается появлением линий изменённой частоты: стоксовых (с уменьшением частоты – «красные сателлиты») и антистоксовых (с увеличением частоты – «фиолетовые сателлиты»). Практически одновременно в Индии Раманом и Кришнаном этот эффект наблюдался в жидкостях (комбинационное рассеяние света или эффект Рамана).

По квантовым представлениям эффект Рамана объясняется неупругим столкновением падающих фотонов с молекулами. Стоксова (красная) компонента с частотой  $(\nu - \Delta\nu)$  возникает, когда энергия фотона  $h\nu$  уменьшается на величину, равную энергии колебательного возбуждения молекулы. Антистоксова с частотой  $(\nu + \Delta\nu)$  (фиолетовая) появляется, когда квант энергии  $h\Delta\nu$  первоначально колебательно-возбуждённой молекулы передаётся кванту излучения. Поскольку невозбуждённых молекул больше, чем возбуждённых, интенсивность фиолетового сателлита меньше, чем красного.



Рамановская спектроскопия широко применяется для определения молекулярного состава исследуемых образцов.

Комбинационное рассеяние света в твёрдых телах с квантовой точки зрения является следствием рассеяния фотона исходного светового пучка с испусканием или поглощением кванта упругих колебаний кристаллической решётки – фонона (квазичастица с энергией  $h\nu_1 = h\Delta\nu$ ) – рис. 1.5.1.

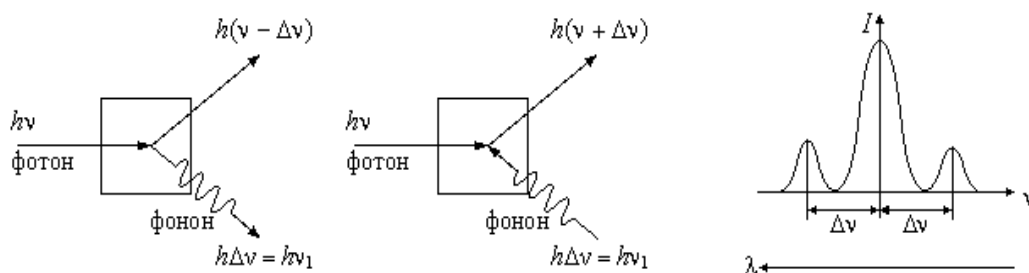


Рис. 1.5.1. Комбинационное рассеяние в результате взаимодействия фотона и фонона

### Контрольные вопросы

1. Рассмотрите рассеяние Рэлея. Объясните голубой цвет неба днём и красноватый при восходе и закате Солнца.
2. В чём смысл рассеяния Ми?
3. Может ли наблюдаться молекулярное рассеяние в идеально чистых средах?
4. Что обнаружили при изучении рассеяния Мандельштам и Ландсберг?
5. В чём заключается эффект Рамана?
6. Объясните комбинационное рассеяние с квантовой точки зрения.

## 1.6. Спектрометр спектрограф излучения

### 1.6.1. Измерение спектров комбинационного рассеяния (КР)

Техника экспериментов по КР - спектроскопия включает:

- источник параллельного монохроматического излучения;
- спектрометр для анализа спектрального состава рассеянного излучения;

- высокочувствительную фотоприёмную систему для регистрации сигнала слабого рассеянного излучения.

**Источники света.** В долазерную эпоху источниками монохроматического излучения служили газоразрядные лампы большой мощности (использовались отдельные линии в спектрах излучения газа или пара, например, паров ртути). Первым лазером, который применили в рамановском рассеянии, стал He-Ne лазер непрерывного действия ( $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ ), потом появились ионные лазеры и т.д. С помощью непрерывно перестраиваемых лазеров на красителях и центрах окраски в ионных кристаллах стали даже проводить рамановскую спектроскопию возбуждения (по аналогии со спектрами возбуждения люминесценции).

**Спектрометры.** В классической спектроскопии применяют три способа разложения в спектр: дифракционный, призмный и интерференционный. Последний очень точен и позволяет исследовать даже контур очень узких линий излучения, два первых более просты и менее громоздки (и получили большее распространение).

Последовательность операций, происходящих в призмных и дифракционных спектральных приборах можно представить следующим образом (принципиальная схема конкретного прибора обычно рассматривается в описании соответствующей лабораторной работы):

- 1) поток излучения, пройдя входную щель прибора, попадает на объектив (линзу), в фокусе которого и расположена входная щель;
- 2) объектив превращает расходящийся пучок в параллельный, который падает на призму или дифракционную решётку;
- 3) призма или дифракционная решётка отклоняет излучение различных длин волн на соответствующие углы, зависящие от длины волны;
- 4) выходной объектив фокусирует разложенное в спектр излучение на фокальную плоскость.

Спектр, лежащий в фокальной плоскости, можно рассматривать глазом с помощью окуляра. Такой прибор называется спектрокопом. В спектрографах такой спектр регистрируется на фотопластинку или иной многоканальный приёмник излучения.

Если выходную щель и отклоняющий свет элемент (призма или дифракционная решётка) перемещать друг относительно друга, то получим монохроматор, в котором используются разнообразные по принципу действия приёмники излучения.

В большинстве КР-экспериментов изучаемый сигнал на несколько порядков слабее упруго рассеянного лазерного излучения. Кроме того, частотный интервал между рамановским сигналом и сигналом от лазера очень мал (около 1% от опорной частоты).

В этой ситуации спектрометры КР должны иметь высокую спектральную разрешающую способность  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} > 10^4$ , чего можно добиться с помощью современных дифракционных решёток. Используемые решётки не должны давать «духов» и «сателлитов», которые можно принять за рамановские сигналы (в этом плане хороши голографические решётки). Спектрометр КР обязан иметь высокий коэффициент подавления ненужного рассеянного света (от зеркал, решёток, стенок и т.д.). Этот коэффициент определяется как отношение фона рассеянного света к сигналу и имеет значения  $10^{-4} \div 10^{-6}$ . Чтобы улучшить ситуацию часто применяют следующие меры:

- 1) делают поверхность образца идеально гладкой, что позволяет минимизировать упруго рассеянный свет от лазера;
- 2) ставят светофильтры, подавляющие лазерный свет;
- 3) используют системы с двойной и даже тройной монохроматизацией, соединяя последовательно два и более монохроматора (выходная щель одного монохроматора, служит входной щелью для другого).

**Приёмники излучения.** Раман регистрировал комбинационное рассеяние с помощью фотопластинок. Этот способ имеет ряд преимуществ: высокая чувствительность фотопластинок; они могут одновременно измерять сигналы на различных длинах волн, т.е. фотопластинки являются многоканальными приёмниками; наконец, они могут накапливать сигнал во времени. Тем не менее, очевидным недостатком такой регистрации является нелинейность интенсивности почернения фотопластинки относительно интенсивности падающего света, что затрудняет преобразование сигнала в цифровую форму.

В современной технике КР-эксперимента стали применять разнообразные фотоэлектрические методы регистрации фотосигнала: это и метод счёта фотонов, охлаждаемые фотоприёмники, использование многоканальных приёмников на приборах с зарядовой связью (ПЗС-цепочки линейки и матрицы) которые, по сути, представляют собой миниатюрные телевизионные камеры, применение фотоумножителей с датчиками положения изображения и т.д.

## **Контрольные вопросы**

1. Что в себя включает техника экспериментов по комбинационному рассеянию света?
2. Какие источники света используются в КР-спектроскопии?
3. Какие способы разложения света в спектр применяют в классической спектроскопии?
4. Опишите последовательность операций спектрального разложения света в призмённых и дифракционных спектральных приборах.
5. Что применяют для подавления «паразитного» рассеянного света в КР-спектрометрах?
6. Какие приёмники излучения используют в спектроскопии КР?

### 1.6.2. Измерение спектров отражения, пропускания, прозрачности, люминесценции и возбуждения излучения

Наука о методах фотометрирования потоков оптического излучения в зависимости от длины волны называется спектрофотометрией. Она включает в себя фотометрию, спектрометрию и метрологию.

Измерения таких фотометрических параметров как коэффициент направленного пропускания или зеркального отражения относительно просты и основаны на том, что в пучок падающего излучения вводят образец, и относят поток, прошедший через него (или соответственно отражённый от него), к падающему потоку при отсутствии образца.

При диффузном отражении или пропускании необходимо собрать все лучи, рассеянные по разным направлениям. В этом случае для измерения коэффициентов пропускания и отражения часто применяют интегрирующий фотометрический шар, имеющий диффузно отражающую белую внутреннюю поверхность.

Подобные шары используют и для измерения светового потока от источника излучения (источник излучения помещают внутрь шара). Идея эксперимента заключается в том, что освещённость, создаваемая многократными отражениями внутри шара, равномерно распределяется по его внутренней поверхности и прямо пропорциональна полному световому потоку. Если какую-либо точку внутренней поверхности шара защитить от прямого попадания лучей от источника, то её освещённость будет прямо пропорциональна его полному световому потоку. Проводя поочерёдно измерения с эталонным и исследуемым образцом по отношению полученных освещённостей можно рассчитать световой поток от образцового источника.

Спектрометрия включает в себя разнообразные спектральные приборы, являющиеся составной частью спектрофотометра.

В целом в состав спектрофотометра входят: источник оптического излучения, устройство для выделения необходимых спектральных интервалов (монокроматор или набор светофильтров), фотоприемник, и система регистрации сигнала. Система регистрации может быть одноканальной (обычно строится на базе монокроматора, в котором сканирование осуществляется поворотом дифракционной решетки или призмы) или многоканальной (сканирование не применяется, а дискретный ряд длин волн в полихроматорах или участки непрерывного спектра в спектрографах регистрируются одновременно). Во всех современных серийных спектрофотометрах монокроматор располагают между источником света и образцом, чтобы свести к минимуму фотохимическое действие зондирующего излучения.

При измерении спектров поглощения обычно получают кривые, на которых по оси абсцисс откладывается длина волны или волновое число, а по оси ординат - прозрачность или оптическая плотность.

Одним из важных факторов устранения ошибок при спектрофотометрических измерениях является выбор диапазона значений измеряемого сигнала. Поскольку для определения прозрачности, оптической плотности или пропускания сравниваются два сигнала, важно, чтобы их разность значительно превышала уровень шумов.

Для корректного определения величин  $D$  и  $T$  очень важно учитывать влияние отраженного и рассеянного образцом и элементами аппаратуры света. На приемник кроме излучения измеряемой длины волны всегда, в той или иной мере, попадает отраженное или рассеянное оптическими деталями прибора излучение других длин волн (как правило из максимума излучения источника света). Минимальным уровнем рассеянного света обладают спектрофотометры, оборудованные двойными монокроматорами, особенно с комбинированным призмочно-решеточным диспергирующим устройством (типа Shimadzu mod. UV-365). Однако не следует обольщаться высокими паспортными возможностями приборов (самые современные характеризуются диапазоном оптических плотностей вплоть до  $D=5$ ). Если не приняты все меры для сведения к минимуму влияния побочного (рассеянного) света, пропущенного монокроматором на тех длинах волн, где исследуемый объект не поглощает, то измеренные значения оптической плотности и прозрачности могут оказаться очень далеки от истинных.

Доля рассеянного света ( $i$ ) становится особенно большой в той спектральной области измерений, где мала чувствительность фотоприемника или яркость источника и наиболее сильно проявляется при

регистрации интенсивных полос поглощения. При этом измеряемая оптическая плотность  $D_{\text{рег}}$  оказывается меньше истинной  $D$ :

$$D_{\text{рег}} = \lg \frac{I_0 + i}{I + i}, \text{ а } D = \lg \frac{I_0}{I}. \quad (1.6.1)$$

Рассеяние света в объеме и на поверхности исследуемых образцов, а также их фотолюминесценция, вносят дополнительные искажения в наблюдаемые спектры поглощения. Рассеяние света образцом приводит к искажению формы спектров и к неверному определению величины оптической плотности.

### **Измерение спектров люминесценции**

Отличие флуоресцентной спектроскопии от других спектроскопических методик состоит в том, что регистрируемая спектральная зависимость является функцией двух переменных - длины волны возбуждения  $\lambda_{\text{ex}}$  и длины волны испускания  $\lambda_{\text{em}}$ . Если  $\lambda_{\text{ex}}$  поддерживается постоянной, а  $\lambda_{\text{em}}$  сканируется, то измеряется спектр флуоресценции  $I(\lambda_{\text{em}})$  (спектральная зависимость интенсивности флуоресцентного испускания от длины волны). Если сканируется  $\lambda_{\text{ex}}$  при постоянной  $\lambda_{\text{em}}$ , то получается спектр возбуждения флуоресценции  $I(\lambda_{\text{ex}})$  (спектральная зависимость эффективности возбуждения флуоресценции от длины волны). При графическом изображении спектров испускания (или возбуждения) флуоресценции по оси абсцисс откладывают длину волны (в нанометрах) или волновое число (в  $\text{см}^{-1}$ ), а по оси ординат - интенсивность флуоресценции  $I_{\text{fl}}$  (в произвольных единицах). Если оптическое поглощение света достаточно мало, а спектральное распределение возбуждающего света учитывается корректно, спектр возбуждения будет близок по форме к спектру поглощения.

У жидких растворов индивидуальных органических молекул, как правило, форма спектра испускания флуоресценции не зависит от длины волны возбуждения. Форма полосы истинного спектра флуоресценции молекулярного раствора в большинстве случаев зеркально симметрична наиболее длинноволновой полосе поглощения. Как правило эти полосы перекрываются друг с другом в некотором спектральном диапазоне.

При возбуждении в самый длинноволновый край спектра поглощения, спектры флуоресценции твердых молекулярных растворов испытывают смещение.

Для исследования спектрального распределения света, испускаемого образцом, предназначены спектрофлуориметры. На этих приборах можно также измерять изменения интенсивности испускания в зависимости от длины волны возбуждения (спектры возбуждения флуоресценции).

Спектрофлуориметр состоит из следующих основных устройств: источника возбуждающего света; устройств для выделения спектральных интервалов возбуждения люминесценции и ее регистрации (в наиболее универсальных приборах это монохроматоры); фотоприемника с электронной системой регистрации сигнала.

Пропускание монохроматоров и чувствительность фотоприемников зависят от длины волны. Поэтому, для получения истинного относительного распределения интенсивностей в спектрах флуоресценции, измеренные зависимости тока фотоприемника от длины волны должны быть скорректированы на калибровочную функцию (спектральная чувствительность прибора). В противном случае измеренные спектральные распределения не будут соответствовать истинным спектрам флуоресценции. В большинстве современных спектрофлуориметров исправление спектров происходит автоматически. Спектры, полученные на разных приборах, ни в коем случае нельзя сопоставлять, если нет уверенности, что они скорректированы на спектральную чувствительность аппаратуры.

Особенностью спектрофлуориметрии является то, что флуоресцентное излучение возникает во внутреннем объеме образца и изотропно распространяется по всем направлениям (в полном телесном угле  $4\pi$ ). Условия сбора этого излучения на фотоприемник и геометрическая форма образцов сильно сказываются на интенсивности регистрируемых спектров флуоресценции. Нарушение условий изотропности в оптическом тракте или образце могут привести к изменению их спектральной формы.

Флуоресценция крайне чувствительный метод. Поэтому сильные искажения спектров могут быть вызваны рассеянием света в образце и (или) присутствием в нем даже незначительных количеств примесей. Примеси могут приводить как к искажению истинных спектральных зависимостей вкладом своей люминесценции, так и к уменьшению интенсивности свечения вплоть до полного тушения. Какая-либо компенсация этих эффектов или их учет по измерениям эталонных образцов, не содержащих исследуемого люминесцирующего соединения невозможны.

Даже в условиях полного отсутствия искажающих факторов, экспериментально измеренные спектральные зависимости далеко не всегда соответствуют истинным спектрам флуоресценции. Их интенсивность может зависеть от геометрической схемы регистрации флуоресценции по отношению к направлению возбуждающего светового пучка.

Если оптическая плотность исследуемого образца мала ( $D < 0,1$ ), то интенсивность флуоресценции одинакова в любой точке вдоль пути возбуждающего света через образец. При увеличении оптической поглощательной способности образца интенсивность флуоресценции, регистрируемой под прямым углом, вначале растет, затем ее рост постепенно замедляется и, наконец, падает, поскольку флуоресценция почти перестаёт проходить сквозь основной объем образца. При этом

флуоресцирует лишь часть образца, прилегающая к поверхности на которую падает возбуждающее излучение. Регистрация флуоресценции с этой поверхности (регистрация "на отражение") позволяет проводить измерения и в таких условиях. При регистрации "на отражение" наблюдается насыщение роста интенсивности флуоресценции с ростом концентрации флуоресцирующих молекул.

Такое поведение флуоресценции, наряду с геометрией эксперимента, обусловлено двумя эффектами: поглощением возбуждающего света и света собственной флуоресценции в объеме образца. Первый эффект называют эффектом внутреннего фильтра, а второй - реабсорбцией или вторичным поглощением. Обсудим их подробнее.

Эффект внутреннего фильтра наблюдается при высоких оптических плотностях и заключается в том, что интенсивность возбуждающего света в объеме образца удаленном от источника света меньше, чем в ближайшем к источнику объеме. Передние слои образца работают как фильтр, поглощающий большую часть возбуждающего света. Освещенность образца становится неравномерной, а интенсивность люминесценции уменьшается. При очень больших концентрациях возбуждающий свет поглощается практически полностью, и флуоресценция может наблюдаться только из тонкого приповерхностного слоя. Форма спектра флуоресценции может и не искажаться, если достаточно мала оптическая плотность в области перекрывания спектров поглощения и флуоресценции или перекрывание незначительно. Эффект внутреннего фильтра может быть вызван любыми поглощающими свет компонентами образца, включая растворитель (полимерную основу) и примеси. Искажения формы спектров флуоресценции за счет внутреннего фильтра будут наблюдаться, если поглощение этих компонент лежит в спектральной области исследуемой флуоресценции.

Если спектры поглощения и флуоресценции перекрываются и оптическая плотность образца в области перекрывания велика, то наблюдается поглощение света собственной флуоресценции самим флуоресцирующим компонентом - реабсорбция или вторичное поглощение. Эффект реабсорбции, наряду с уменьшением интенсивности флуоресценции, всегда приводит к искажению формы спектров. При этом нарушается зеркальная симметрия спектров поглощения и флуоресценции. Это обусловлено тем, что реабсорбция вызывает искажения формы спектра флуоресценции исключительно в области его перекрывания со спектром поглощения. В результате этих искажений постепенно, с ростом оптической плотности образца в этой области (например, за счет увеличения концентрации флуоресцирующего компонента), исчезает коротковолновая (для многих люминофоров обладающая разрешенной колебательной структурой) часть спектра флуоресценции. Искажения становятся тем больше, чем больше оптическая плотность флуоресцирующего компонента в области перекрывания спектров. В конечном счете, от истинного спектра флуоресценции остается лишь длинноволновый бесструктурный хвост, расположенный практически вне области собственного поглощения флуоресцирующего



компонента. Спектральный максимум этого бесструктурного образования может оказаться на десятки нанометров смещенным относительно положения максимума истинного спектра.

Явление реабсорбции обусловлено как люминесцентными свойствами вещества, так и методическими особенностями измерения флуоресценции. Как уже упоминалось выше, квантовый выход люминесценции всегда меньше единицы и часть поглощенного молекулой света расходуется безызлучательно. Это означает, что с каждым актом вторичного поглощения кванта флуоресценции интенсивность последующего флуоресцентного излучения уменьшается. С другой стороны, в изотропной среде молекулы испускают флуоресценцию в полный телесный угол  $4\pi$ . Тогда как технические возможности флуориметров позволяют собирать на фотоприемник свет в телесном угле с раствором  $30^0$ - $40^0$ , что составляет лишь около 10% полного испускания. Учитывая угол светосбора и тот факт, что каждая вторично поглотившая квант света люминесценции молекула переизлучает его в сферу с интегральной интенсивностью определяемой квантовым выходом, нетрудно видеть, что в каждом акте вторичного испускания регистрируемая интенсивность флуоресценции уменьшается более чем в десять раз.

Кажущиеся изменения формы спектров и спектральные сдвиги, обусловленные тривиальным эффектом реабсорбции, неискушенным исследователем вполне могут быть интерпретированы за счет структурных изменений в образце. Например, проявление реабсорбции может быть интерпретировано, как разгорание сенсibilизированной флуоресценции в результате переноса энергии с донора на акцептор или ошибочно отнесено к образованию эксимеров. Поэтому при измерениях флуоресценции всегда следует помнить, что искажения интенсивности и формы полос спектров флуоресценции пренебрежимо малы только в случаях, когда оптическая плотность образца в области перекрывания спектра поглощения флуоресцирующего компонента со спектром его испускания (можно назвать эту величину “оптической толщиной” образца) не превышает значений 0,01-0,05. При таких оптических плотностях практически не проявляется и эффект внутреннего фильтра. Требования к этому фактору для примесей не столь жесткие, если нужно измерить только форму спектров флуоресценции, а не их интенсивность, и поглощение примесей не попадает в полосу флуоресценции. В измерениях квантового выхода люминесценции учет примесного фактора необходим.

Как видим, корректное измерение спектров люминесценции возможно лишь при малых оптических плотностях. Подбор требуемой величины оптической плотности возможен за счет уменьшения концентрации люминесцирующей компоненты в образе или за счет уменьшения толщины слоя. Однако в последнем случае далеко не всегда удастся устранить проявление реабсорбции. В тонких слоях растворов (толщиной 1мм) с оптической плотностью порядка 0,04 отчетливо наблюдался эффект реабсорбции. Устранение полного внутреннего отражения уменьшало эффект лишь вдвое. Наилучший

эффект был получен при ограничении поперечных размеров возбуждающего пучка. В этом случае наблюдали десятикратное уменьшение вклада реабсорбции, практически пропорциональное уменьшению площади возбуждения. Это явление можно объяснить объемной реабсорбцией флуоресценции, распространяющейся вдоль поглощающего слоя (в направлении перпендикулярном возбуждающему пучку). С уменьшением толщины слоя возрастает роль реабсорбции за счёт полного внутреннего отражения.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называют спектрофотометрией?
2. Как проводят определение коэффициента направленного пропускания и отражения?
3. Опишите работу интегрирующих фотометрических шаров.
4. Что входит в состав спектрофотометра?
5. Что необходимо учитывать при корректном определении оптической плотности и прозрачности среды?
6. В чём заключается отличие флуоресцентной спектроскопии от других спектральных методик?
7. Из каких основных элементов состоит спектрофлуориметр?
8. В чём заключается эффект внутреннего фильтра?
9. Что такое вторичное поглощение в флуоресцентном анализе объекта?

## **1.7. Основные фотометрические величины**

Большую часть информации человек получает с помощью зрения. Именно поэтому изучению вопросов фотометрии уделяется особое внимание. Немалую роль в вопросах производительности и безопасности труда, а также бытовой безопасности играют вопросы освещённости жилых и производственных помещений. Примером решения задач, связанных с освещением производственных объектов, может служить железнодорожная отрасль.

Для повышения производительности труда работников транспорта и безопасности людей открытые территории железнодорожных станций и внутренние помещения вокзалов, депо, постов

электрической централизации, мастерских и прочих железнодорожных объектов должны иметь хорошую освещенность.

Для экономного использования электроэнергии необходимо выбирать рациональные способы освещения, внедрять новые экономичные источники света и улучшать конструкции осветительных приборов. Одновременно необходима правильная организация эксплуатации осветительных установок, повышение ответственности работников за экономное расходование электроэнергии.

На железнодорожных станциях работа с движущимся подвижным составом предъявляет к осветительным установкам жесткие требования. Они должны обеспечивать безопасное движение и создавать условия для безопасного и эффективного труда людей. Для этого осветительные установки должны:

1. Создавать нормальные условия для восприятия машинистом видимых сигналов (светофоров, семафоров, щитов, фонарей, сигнальных указателей).

2. Для безопасной посадки-высадки пассажиров обеспечить достаточную освещенность платформ, переходов через железнодорожные пути, пешеходных мостов.

3. Для безопасной работы обслуживающего персонала на путях локомотивного и вагонного хозяйства создавать отчетливую видимость крупных деталей подвижного состава, элементов верхнего строения пути, стрелочных переводов, надписей на подвижном составе. Особое внимание следует уделять освещению междупутий из-за их необычной конфигурации (длина во много раз превышает ширину) и сортировочных горок, т.к. некоторые виды работ (расцепка вагонов, перевод стрелок, подтормаживание отцепов) на немеханизированной горке производятся вручную.

Специальными нормативными документами регулируются технические условия освещения бытовых помещений, учебных помещений, промышленных помещений.

Основоположником экспериментальной фотометрии считают П.Бугера, предложившего в 1729 году визуальный метод количественного сравнения источников света: установление равенства освещенностей соседних поверхностей путем изменения расстояний до источников. Методы визуальной фотометрии применяются и сегодня, используя понятия эквивалентной яркости. Особенно эти методы распространены в области малых яркостей.

## Основные фотометрические величины

Целью некоторых лабораторных заданий будет определение ряда фотометрических величин (в широком смысле радиометрических величин), поэтому введём определения наиболее важных.

### 1. Интегральная энергия

Интегральная энергия – это энергия  $Q$ , переносимая в данном потоке излучения на всех длинах волн.

$$[Q] = \text{Дж}$$

### 2. Спектральная плотность энергии излучения

При необходимости учёта распределения энергии по длинам волн  $\lambda$  можно записать

$$Q(\lambda) = \frac{dQ}{d\lambda}, \quad (1.7.1)$$

где  $Q(\lambda)$  - спектральная плотность энергии излучения.

$$[Q(\lambda)] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}}$$

### 3. Объёмная плотность энергии излучения

Излучение находится в каком-то пространстве, поэтому вводится новая величина

$$U = \frac{dQ}{dV}, \quad (1.7.2)$$

$U$  - объёмная плотность энергии излучения,  $V$  - рассматриваемый объём.

$$[U] = \frac{Дж}{м^3}$$

#### 4. Спектральная плотность объёмной плотности энергии излучения

Эту величину вводят по аналогии со спектральной плотностью энергии излучения.

$$U(\lambda) = \frac{dU}{d\lambda} \quad (1.7.3)$$

$$[U(\lambda)] = \frac{Дж}{м^4}$$

#### 5. Поток энергии излучения

Поток энергии излучения – это количество энергии проходящий через данную площадку в единицу времени.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.7.4)$$

$$[\Phi] = \frac{Дж}{с} = Вт$$

#### 6. Спектральная плотность потока энергии

Спектральная плотность потока энергии – доля потока энергии, приходящаяся на единичный интервал длин волн.

$$\Phi(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (1.7.5)$$

$$[\Phi(\lambda)] = \frac{Вт}{м}$$

#### 7. Энергетическая светимость

Энергетическая светимость – поток энергии, приведённый к единице площади, т.е. поток излучения, испускаемый единичной площадкой.

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.7.6)$$

$$[M] = \frac{Вт}{м^2}$$

## 8. Энергетическая освещённость

Энергетическая освещённость – поток, падающий на единичную площадку.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.7.7)$$

$$[E] = \frac{Вт}{м^2}$$

Спектральные распределения, выраженные по шкале длин волн, требуют пересчёта в шкале частот. Например,

$$M(\lambda) = \frac{\lambda^2}{c} M(\nu), \quad E(\lambda) = \frac{\lambda^2}{c} E(\nu) \quad (1.7.8)$$

## 9. Сила излучения

Сила излучения:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.7.9)$$

где  $d\Phi$  - поток энергии излучения в телесном угле  $d\Omega$ .

$$[I] = \frac{Вт}{ср}$$

Поток излучения, испускаемый светящейся площадкой  $dS$  в телесном угле  $d\Omega$ , (рис.1.7.1) определяется как

$$d\Phi = L \cos \theta dS d\Omega \quad (1.7.10)$$

где  $\mathbf{L}$  - энергетическая яркость площадки,  $\theta$  - угол между нормалью к площадке и направлением хода лучей.

Для люминесцирующих и рассеивающих тел соотношение (1.7.10) несколько нарушается, так как надо учитывать зависимость яркости от углов  $\theta$  и  $\varphi$  в сферической системе координат (индикатрису излучения).

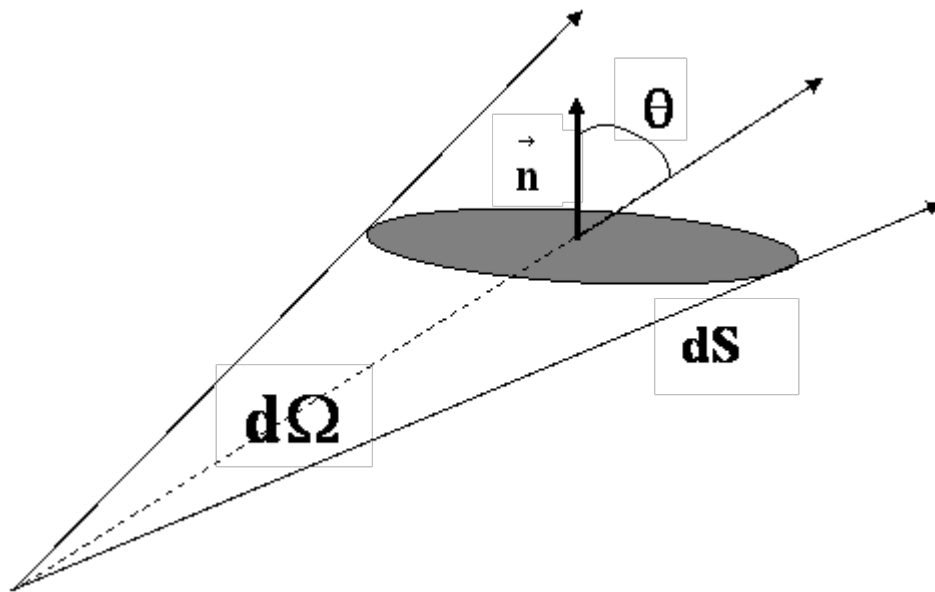


Рис.1.7.1. Пояснение к формуле (1.7.10)

Формула (1.7.10) работает, когда под яркостью понимают интенсивность светового потока (световой трубки), однако в данном варианте  $d\Phi$  - поток энергии излучения от внешнего источника, проходящий через сечение световой трубки  $dS$ , а  $\mathbf{L}$  - яркость потока.

Из формул (1.7.9) и (1.7.10) следует, что

$$L = \frac{I}{dS \cdot \cos \theta}, \quad (1.7.11)$$

то есть яркость равна силе излучения, испускаемого в нормальном направлении с единичной площадки.

Все рассмотренные выше величины приводились в энергетических единицах и требовали объективных приёмников энергии. Однако, в более простом варианте в фотометрии используют своеобразную световую систему единиц, основанную на усреднённой чувствительности глаза человека. В данном случае при расчётах вводят функцию видности  $v(\lambda)$  или  $v(\nu)$ , которая учитывает чувствительность глаза к свету разных длин волн или частот.

В этом случае основополагающей единицей стала единица силы света.  $I_c$  - свеча (она составляет  $\frac{1}{60}$  силы света, испускаемого с площади  $1 \text{ см}^2$  стандартного эталона по нормали к поверхности). Все фотометрические световые величины выражаются через свечу:

световой поток  $\Phi_c$  - люмен (Вт),

световая энергия  $Q_c$  - люмен·с (Дж),

сила света  $I_c$  - свеча=кандела ( $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$ ),

освещённость  $E_c$  - люкс=люмен·м<sup>-2</sup> ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ),

светимость  $M_c$  - люкс ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ),

световая яркость  $L_c$  - свеча·м<sup>-2</sup> ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ ).

В скобках представлены обычные энергетические единицы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое интегральная энергия излучения?
2. Дайте определение спектральной плотности энергии.
3. Что такое объёмная плотность энергии излучения?
4. Введите понятие потока энергии излучения?
5. Что такое спектральная плотность потока энергии излучения?
6. Дайте определение энергетической светимости.
7. Что такое энергетическая освещённость?
8. Введите понятие силы света.
9. Что такое световая яркость?



## 10. Почему появилась единица силы света «свеча»?

### 1.8. Волоконная оптика - фиброоптика

Модульная многофункциональная система Avantes, изучаемая в лабораторном практикуме, базируется на оптоволоконных линиях связи. В целом световод (светопровод) представляет собой закрытое устройство для направленной передачи (канализации) света. Переход к световоду позволяет значительно уменьшить потери энергии при её передаче на большие расстояния, а также передавать световую энергию по криволинейным трассам.

В настоящее время доминируют волоконные световоды, а раздел оптики, изучающий распространение оптического излучения по волоконным световодам (ВС) и сопутствующие этому процессу явления, получил название волоконная оптика.

Простейшая схема волоконного световода показана на рис. 1.8.1. Он представляет собой длинную гибкую нить, сердцевина которой изготовлена из высокопрозрачного диэлектрика (например, кварцевого стекла) с показателем преломления  $n_1$  и окружена оболочкой с показателем преломления  $n_2 < n_1$ .

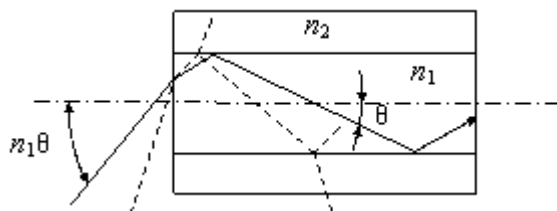


Рис. 1.8.1 Траектория лучей в многомодовом световоде со ступенчатым профилем показателя преломления

Распространение света в волоконном световоде вызвано его полным внутренним отражением на границе сердцевина-оболочка. Лучи, распространяющиеся под достаточно малыми углами к оси световода  $\theta \leq \theta_K$  ( $\theta_K$  - критический угол), испытывают полное внутреннее отражение, приводя к зигзагообразному распространению света вдоль световода. При этом угол падения луча на торец

световода составляет  $n_1 \theta$ , а  $\sin \theta_K = \frac{1}{n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Если угол  $\theta > \theta_K$  (пунктирная линия на рис. 1.8.1), то лучи, падающие на границу сердцевина-оболочка, частично отражаясь от неё, преломляются в оболочку и поглощаются внешним покрытием.

В целом, основными причинами световых потерь в оптоволоконке являются: отражение света на торцах, поглощение и рассеяние в сердцевине, а также потери при внутренних отражениях. При передаче по волоконным световодам оптических импульсов скорость передачи информации ограничена их уширением за счёт дисперсии, поэтому в последнее время особое внимание уделяют солитонным линиям связи.

Характер распространения света по волоконным световодам зависит от диаметра волокна и профиля показателя преломления по сечению сердцевины. Например, для определённой длины волны светового излучения число типов колебаний (мод), распространяющихся по волоконным световодам, пропорционально квадрату диаметра сердцевины  $2a$  и разности показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n = n_1 - n_2$  (рис. 1.8.2).

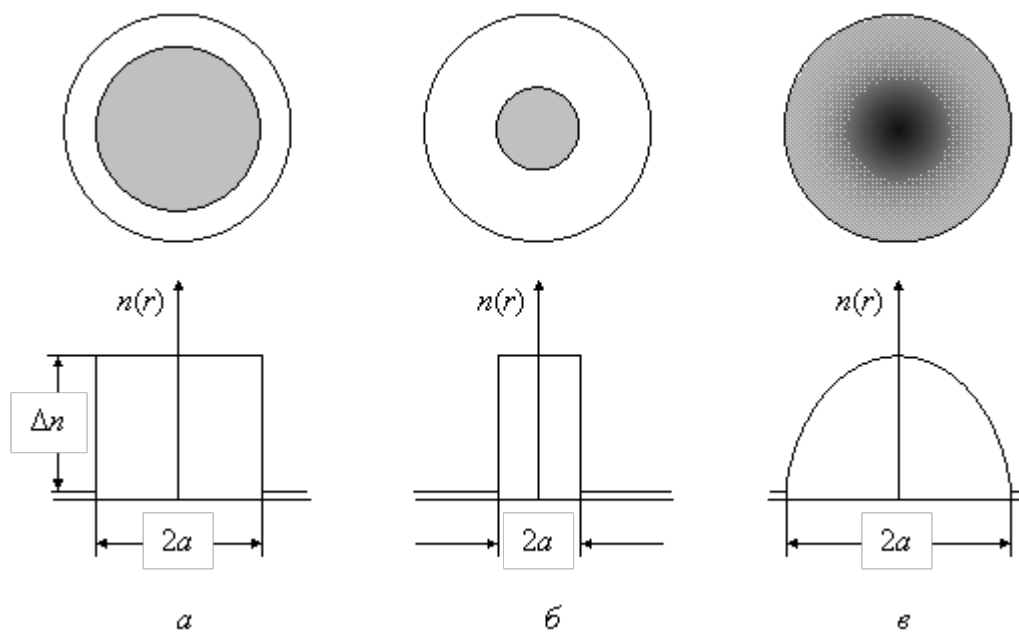


Рис. 1.8.2 Поперечное сечение и профиль показателя преломления по сечению

для световодов: а – многомодовых ступенчатых;

б – одномодовых; в – многомодовых градиентных

Уменьшая эти параметры, можно добиться одномодового режима передачи светового сигнала. В одномодовом волокне диаметр  $2a \cong 5 \div 10$  мкм,  $\Delta n$  - десятые доли процента, в многомодовом  $2a$  - десятки и сотни микрон,  $\Delta n \cong (1 \div 3)\%$ .

Волокна с плавным изменением показателя преломления сердцевины называются градиентными, рис. 1.8.2. В последнее время стали популярными регулярные световодные жгуты, способные передавать на большие расстояния не только световую энергию, но и целое изображение.

## Контрольные вопросы

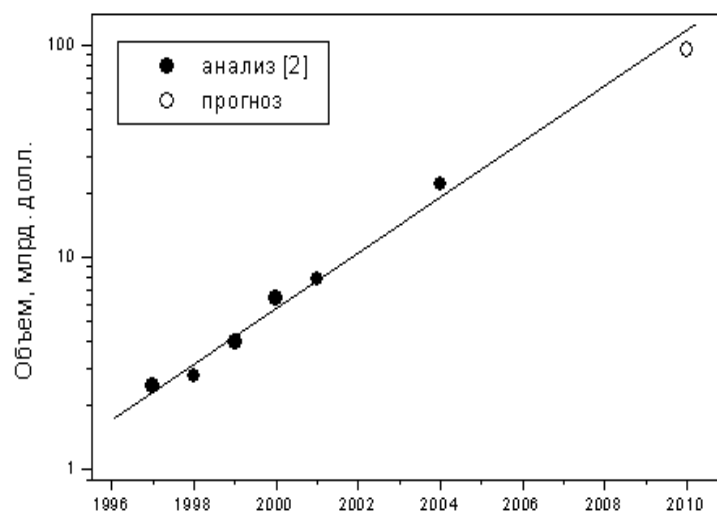
1. На чём основана работа волоконных световодов?
2. Нарисуйте простейшую схему волоконного световода.
3. Что представляет собой ступенчатый и градиентный волоконный световод?
4. Каковы основные причины световых потерь в оптоволокне?
5. Что такое одномодовый и многомодовый режим работы световода?
6. Как можно перейти к одномодовому режиму работы световода?

## 1.9. Новые горизонты машинного зрения

Системы машинного зрения (СМЗ) – сравнительно молодая область высоких технологий, связанная с распознаванием образов. История СМЗ как наукоемкой области знаний берет начало с конца 50-х годов XX века, что по меркам точных наук не выходит за рамки становления. Тем не менее, современный мир уже невозможно представить без этих технологий.

Использование систем машинного зрения является одним из ключевых моментов промышленной стратегии развития большинства передовых предприятий всего мира. Об этом свидетельствует лавинообразный рост рынка потребления СМЗ, наблюдающийся в последние годы (рис.1.9.1). Мировой рынок промышленного внедрения этих систем, составлявший на рубеже прошлого и нынешнего столетия около 8 млрд. долларов, имеет тенденцию утраиваться каждые 2-3 года. Ежегодные темпы развития предприятий, работающих в этой области, составляют 15-30%. Тем не менее, имеющиеся коммерческие разработки покрывают менее 10% всех потенциальных возможностей СМЗ.

На рисунке 1.9.1 представлены тенденции развития рынка внедрения систем машинного зрения.



*Рис.1.9.1 Тенденции развития рынка внедрения систем машинного зрения*

Возможности и области применения СМЗ долгое время развивались, преимущественно, как электронный аналог органа зрения человека. Основным функциональным назначением таких систем является контроль внешнего вида и расположения наблюдаемых объектов, а также преобразование изображений в цифровую форму для последующей компьютерной обработки и (или) дистанционной передачи. К наиболее значимым направлениям использования таких СМЗ принято относить зрение роботов и устройства для дистанционного управления, средства обработки и распознавания зрительных образов и символьной информации, различного рода системы мониторинга и обеспечения безопасности, системы биометрического контроля и медицинской диагностики.

Вместе с тем, СМЗ имеют и существенные преимущества перед человеческим зрением. Системы машинного зрения, оборудованные специфическими сенсорными устройствами, могут увидеть и то, что простому невооруженному глазу недоступно. Расширение спектрального диапазона восприятия СМЗ за пределы чувствительности человеческого глаза значительно расширяет функциональные возможности этих систем. Примером таких устройств, в частности, являются системы безопасности, работающие в тепловом диапазоне спектра и приборы ночного видения. Важной особенностью последних является и то, что такие системы обеспечивают трансформацию невидимого изображения объектов в доступный для человеческого восприятия диапазон, расширяя возможности человека в принятии оперативных решений.

Реализация вышеперечисленных возможностей систем машинного зрения надежно обеспечивается современными фотоприемными устройствами (видеокамерами), обеспечивающими высокую пространственную селекцию освещенности контролируемых объектов. Использование

спектрально-селективных оптических детекторов и источников света открывает качественно новый уровень возможностей СМЗ, освоение которых еще только начинается. Этот новый уровень связан с использованием СМЗ в решении задач автоматического мониторинга специфических свойств контролируемых объектов, обусловленных их химическим составом. Эти возможности до недавнего времени не находили практической реализации в СМЗ несмотря на широко известный факт, что спектральные зависимости распределения света, испытавшего взаимодействие с объектом содержат богатую информацию о его химическом составе. Такая ситуация была обусловлена отсутствием эффективных алгоритмов извлечения этой информации из экспериментально наблюдаемых величин и недостаточной мощностью вычислительных устройств.

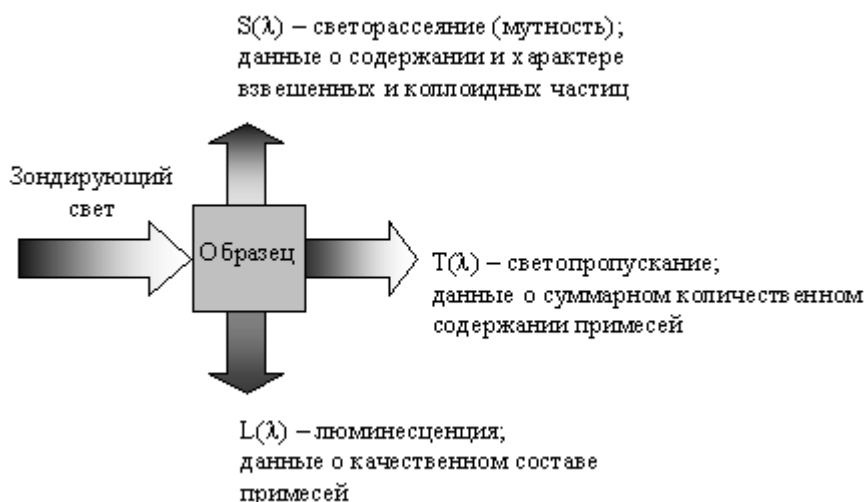
Современный уровень развития аппаратных средств и разработка новых принципов компьютерного анализа спектроскопической информации открывают перспективу создания нового поколения СМЗ. Имеющиеся данные указывают, что такие устройства перспективны для весьма актуальной области практических приложений: мониторинга качества и безопасности объектов промышленного и природного происхождения, контроля изменений в экосистемах, экспресс-диагностики загрязнения объектов несвойственными им, в том числе и неизвестными, соединениями.

Рассмотрим принципиальные возможности использования спектрально-селективных оптических характеристик контролируемых объектов в системах машинного зрения на примере результатов работ по исследованию качественно-количественного поведения микропримесей воды. Физической основой сенсорной части устройств, использованных в этих работах для получения набора взаимодополняющих аналитических параметров, были выбраны методы фотоабсорбционной и люминесцентной спектроскопии в ультрафиолетовом и видимом диапазоне оптического спектра. В дальнейшем изложении не будем углубляться в методические тонкости этих процедур. Уделим основное внимание обсуждению результатов этих работ, заключающихся в демонстрации принципиальных возможностей систем машинного зрения для извлечения из спектроскопических данных информативных количественных параметров, характеризующих состояние и безопасность водных объектов в режиме реального времени без применения каких-либо предварительных процедур подготовки и (или) обогащения пробы.

Методы оптического спектрального анализа в выбранном диапазоне являются привлекательными для реализации в СМЗ контроля качественно-количественного состава многокомпонентных смесей по следующей причине. Особенностью таких спектров является то обстоятельство, что в физико-химических механизмах их формирования находит комплексное отражение как компонентный состав смеси и свойства составляющих индивидуальных компонент, обусловленные их химическим строением, так и сложный набор взаимодействий компонент смеси друг

с другом нековалентной природы (супрамолекулярных взаимодействий). Эти взаимодействия определяют надмолекулярную структуру вещества на наномасштабном уровне. В воде они играют важнейшую роль, определяя в значительной степени ее физико-химические свойства. Зачастую именно супрамолекулярные взаимодействия изменяют, а порой и задают характер химической и биологической активности присутствующих в воде соединений. Они же ответственны и за особенности характера формирования оптических спектров. В силу этих обстоятельств, оптические спектры многокомпонентных систем обладают уникальной чувствительностью к малейшим изменениям компонентного состава объектов, проявляющихся как за счет механизмов внутримолекулярной фотоники, так и вследствие влияния на спектроскопические проявления этих механизмов супрамолекулярных взаимодействий и обусловленной ими микрогетерогенной структуры оптических свойств реальных объектов анализа.

Совокупный набор доступных для экспериментального наблюдения спектроскопических параметров водных систем формируется в ходе комплекса практически одновременно протекающих процессов их взаимодействия с оптическим излучением. Этот набор определяется тремя основными характеристиками (рис.1.9.2) – способностью анализируемого образца пропускать зондирующее излучение  $T(\lambda)$ , рассеивать это излучение  $S(\lambda)$  и трансформировать его в люминесценцию  $L(\lambda)$ . Спектральные и пространственные проявления поведения каждой из этих характеристик связаны с физико-химическими и структурными свойствами анализируемой системы фундаментальными физическими закономерностями. Уже в силу этого обстоятельства набор перечисленных характеристик обладает перекрестной чувствительностью к различным свойствам примесных компонент, удовлетворяющей требованиям методологии компьютерной аналитики.



*Рис.1.9.2. Взаимодополняющие спектроскопические параметры водных систем и характеризующие ими свойства микропримесей*

Вдобавок имеется также и перекрестная чувствительность к одинаковым физико-химическим свойствам анализируемой системы каждого из поименованных параметров. Так, в частности, светорассеяние обязано своим существованием оптической неоднородности анализируемого объекта. Спектральная зависимость «чистого» светорассеяния  $S(\lambda)$  определяется, в основном, размерами и количественным содержанием коллоидных и взвешенных частиц, не способных поглощать оптическое излучение наблюдаемого диапазона, но имеющих коэффициент преломления отличный от воды. Наличие молекулярного поглощения в той или иной степени искажает (ослабляет) измеряемые значения величины светорассеяния. Характер этих искажений зависит от суммарного поглощения частиц, присутствующих в объекте в форме молекулярного раствора. Поглощательные свойства многокомпонентных систем формируются аддитивным наложением совокупности этих свойств индивидуальных частиц и определяются их концентрацией и химическим строением. Для идеальных растворов, состоящих из частиц с одинаковыми значениями индивидуальных коэффициентов преломления и не способных рассеивать зондирующее излучение, параметр  $T(\lambda)$  однозначно определяется исключительно поглощательными свойствами этих частиц. Наличие светорассеивающих свойств у анализируемого объекта ведет к увеличению экспериментально измеряемых значений этого параметра.

Люминесцентные свойства вещества  $L(\lambda)$  определяются исключительно способностью индивидуальных молекул трансформировать поглощенную энергию в излучение другого спектрального диапазона. Это обстоятельство в некоторой степени минимизирует искажения, вносимые поглощением и рассеянием света. В результате повышается селективная чувствительность этого параметра к индивидуальным физико-химическим свойствам люминесцирующих систем, что делает люминесценцию наиболее информативной характеристикой качественного состава компонент анализируемого объекта.

В общем случае в измеряемых значениях  $S(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$  и  $L(\lambda)$  анализируемых объектов всегда в той или иной мере присутствуют вклады механизмов и рассеяния и поглощения света. Таким образом, общую характеристику контролируемого объекта, однозначно характеризующую его совокупный компонентный состав, можно представить в виде цифровой матрицы спектральных зависимостей интенсивностей света, сформированных в ходе вышеуказанных процессов:

$$\|M\| = \begin{vmatrix} T_1 & L_{1,1} & \dots & L_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_m & L_{m,1} & \dots & L_{m,n} \\ & S_1 & \dots & S_m \end{vmatrix} \quad (1.9.1)$$

Такая матрица является по существу обобщенным показателем контролируемого объекта, однозначно характеризующим его компонентный состав. Этот набор параметров может быть представлен графически в виде трехмерного образа или его топографического сечения, подобного отпечатку пальца (рис. 1.9.3).

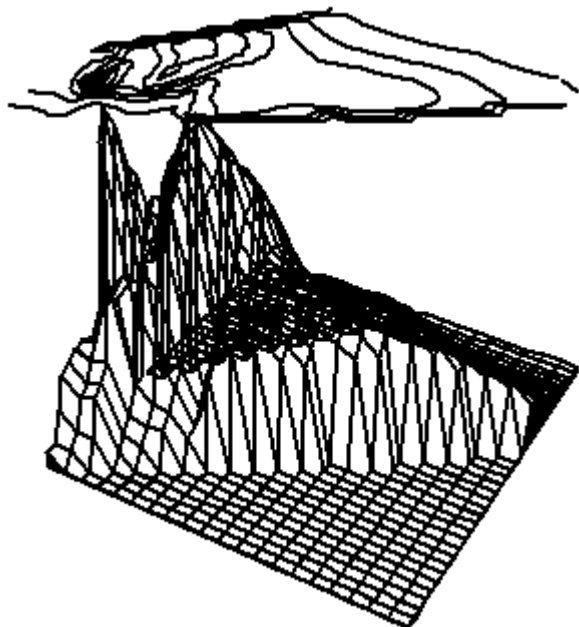


Рис.1.9.3

Графическое представление обобщенного оптического образа природной воды в виде трехмерной диаграммы и её топографического сечения изолиниями равной интенсивности-«отпечатка пальца»

На рисунке 1.9.4 представлены такие образы для чистой воды разного происхождения и воды, содержащей различные загрязняющие примеси. Из рисунка хорошо видно, что уже графическое представление оптических образов имеет самостоятельную аналитическую ценность. Они обеспечивают визуализацию состояния компонентного состава объектов в удобном для зрительного сопоставления виде, обеспечивая возможность проведения дальнейшей диагностики состояния объектов даже простым невооруженным глазом.

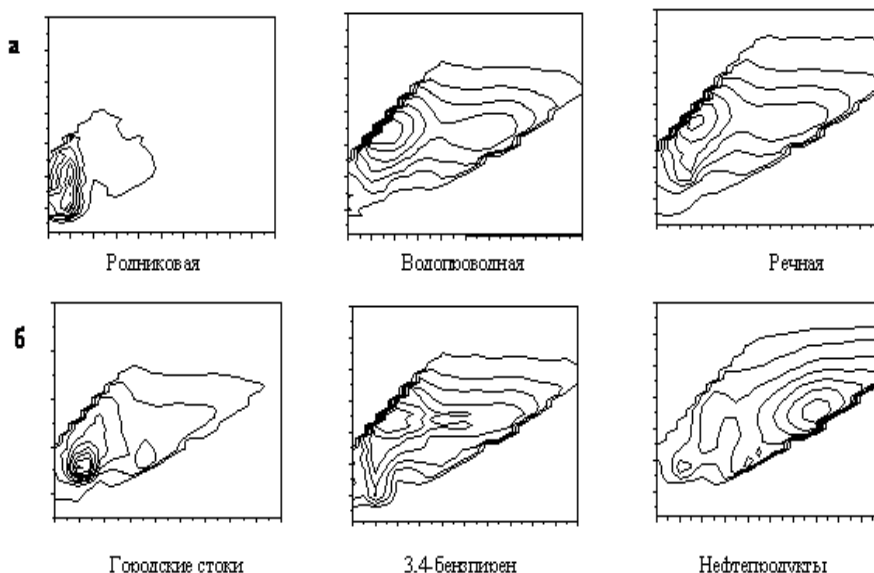


Рис. 1.9.4 Обобщенные оптические образы воды различного происхождения (а) и проявление загрязнений различной природы в оптических образах водопроводной воды (б)



Представление матрицы набора спектрально-селективных оптических характеристик объекта в цифровой форме и различный характер проявления соотношения вкладов индивидуальных механизмов взаимодействия света с веществом в спектральные зависимости измеряемых величин  $S(\lambda)$ ,  $T(\lambda)$  и  $L(\lambda)$  определяет перспективы применения методов компьютерного анализа для их разделения и повышения аналитической информативности наблюдаемых параметров и проведения подробного качественно-количественного анализа состояния микропримесей в контролируемых объектах.

Немаловажным обстоятельством, определяющим применимость этого совокупного набора характеристик в системах машинного зрения, является и принципиальная возможность измерения всей совокупности отраженных на рисунке параметров в едином аналитическом цикле на единственном специализированном измерительном устройстве. Такая возможность способствует также и уменьшению совокупности экспериментальных погрешностей и минимизации временных затрат на проведение измерений.

К достоинствам предлагаемого подхода относится то обстоятельство что, как процедура получения «отпечатков пальцев» анализируемых объектов, так и их идентификация, основанные на привлечении спектроскопических методов и возможностей современных информационных технологий, могут осуществляться автоматически на специализированных аналитических устройствах, не требующих привлечения высококвалифицированного персонала.

Совершенно очевидно, что методологические принципы, заложенные в основу обсуждаемого подхода, пригодны для контроля не только водных объектов, но и любых других многокомпонентных систем. Эти принципы могут быть положены в основу создания нового поколения систем машинного зрения для централизованного мониторинга промышленных и природных объектов для решения задач:

- контроля качества, безопасности и выявления фальсификатов рыночной продукции;
- непрерывного мониторинга состояния безопасности систем жизнеобеспечения и объектов окружающей среды, предотвращения и минимизация последствий чрезвычайных ситуаций;
- контроля за состоянием экологического баланса и долгосрочного перспективного прогнозирования направления развития локализованных экосистем.

Проведенные оценки показывают, что применение СМЗ в решении подобного рода задач обеспечивает:

- сокращение времени аналитического цикла в 10-100 раз;

- снижение себестоимости анализов более чем в 10 раз;
- создание полностью автоматизированных систем непрерывного инструментального мониторинга без участия человека.

Такие СМЗ способны обеспечить человека оперативной информацией о составе воздуха, воды и объектов быта. Иными словами – обеспечить эффективное решение наиболее актуальных на сегодняшний день задач – определения качества и безопасности среды обитания и продуктов потребления.

Модульная многофункциональная оптоволоконная система Avantes в сочетании с IT - технологиями может служить прекрасной основой для развития переносных систем машинного зрения.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой система машинного зрения?
2. Каким образом можно получить обобщённый оптический образ объекта?
3. Какие принципы могут быть положены в основу создания нового поколения систем машинного зрения?

## **2.1. Спектрометрическая аппаратура XXI века**

### **2.1.1. Высокие технологии в спектрально-измерительных приборах нового поколения**

Фотометр, фотоколориметр, радиометр, рефлектометр, флюориметр, нефелометр, люминометр - типовые названия оптических спектрометров, используемые в зависимости от природы источника сигнала и технической реализации спектрометрической системы. Оптоволоконная спектрометрия - техника регистрации спектрального распределения оптического сигнала в UV-, VIS-, NIR-и IR-областях, широко используется в естественно-научных и прикладных исследованиях для определения спектров электромагнитного излучения, спектров поглощения, пропускания, отражения, рассеяния и вторичной эмиссии.

В общем случае в спектрометрическую систему входит входная щель, коллиматор, дисперсионный элемент - дифракционная решётка или призма, фокусирующие оптические элементы и фотометрический детектор. В монохроматических системах обычно используется выходная щель, через

которую узкая полоса спектрального сигнала проецируется на датчик с одним элементом. Изменение ширины входной и выходной щелей монохроматора влияет на чувствительность и избирательность спектрометрической системы, а вращаемая дифракционная решётки или призма обеспечивает спектральное сканирование исследуемого излучения.

Бурное развитие высоких технологий на рубеже XX и XXI веков сформировало предпосылки создания нового поколения спектрально-измерительных приборов. В арсенал оптической спектроскопии в эти годы вошли высокотехнологичные низкопоглощающие кварцевые оптические волокна, изначально разрабатывавшиеся для потребностей систем оптоволоконной связи. Применение специализированных оптоволоконных кабелей в спектрометрах обеспечивает оптимизацию передачи энергии от источника излучения к исследуемому образцу и (или) доставки оптического сигнала от образца в измерительный тракт спектрометра. Оптоволоконное соединение способствует и гибкому наращиванию системы, состоящей обычно из источника света, оптоволоконного спектрометра и набора измерительных фотодетекторов. Компонентная база фотометрических детекторов нового поколения явилась результатом развития высоких технологий микроэлектроники. Были созданы относительно дешёвые многоэлементные фотометрические детекторы: зарядно-разрядные устройства (CCD), многоэлементные фотодиодные матрицы (PDA), CCD сканеры, камеры и т.д., позволяющие проводить спектральные измерения без каких-либо подвижных оптических элементов. Оптоволоконные спектрометры с многоэлементными фотодетекторами, по сравнению с традиционными спектрометрическими технологиями, обладают рядом преимуществ, таких как многофункциональность, эффективность, высокая надёжность и компактность измерительной системы.

### **2.1.2. Многофункциональный оптоволоконный спектрометр AvaSpec**

Семейство спектрометров AvaSpec, созданное Голландским холдингом Avantes B.V. в 2003 г., обеспечивает качественно новый уровень оптической спектрометрии в диапазоне 180-2500 нм с разрешением от 0.025 нм. Основными компонентами миниатюрных оптических модулей Avantes B.V. являются высокотехнологичные многоэлементные датчики различных типов и самые современные волоконно-оптические и микрооптические элементы.

Модульная комплектация оптоволоконных спектрометров позволяет использовать один спектрометр AvaSpec для обеспечения самых разнообразных спектрометрических методов исследований: радиометрия, фотоколориметрия, фотометрия, спектрофотометрия, рефлектометрия, спектрофлуориметрия, нефелометрия. Высокая скорость автоматизированных измерений позволяет вести аналитические исследования и управлять технологическими процессами в режиме реального времени, а использование относительно дешёвых датчиков и экономичных измерительных модулей обуславливает низкую общую

стоимость спектрометрических систем Avantes B.V.

Оптоволоконные автоматизированные спектрометры AvaSpec при габаритах в сотни и стоимости в десятки раз меньше чем сопоставимый классический спектрометр (рис. 2.1.1.) отличаются высокой эффективностью и надёжностью благодаря использованию оптических измерительных модулей с высокочувствительными матричными детекторами и уникальных микропроцессорных электронных платформ.

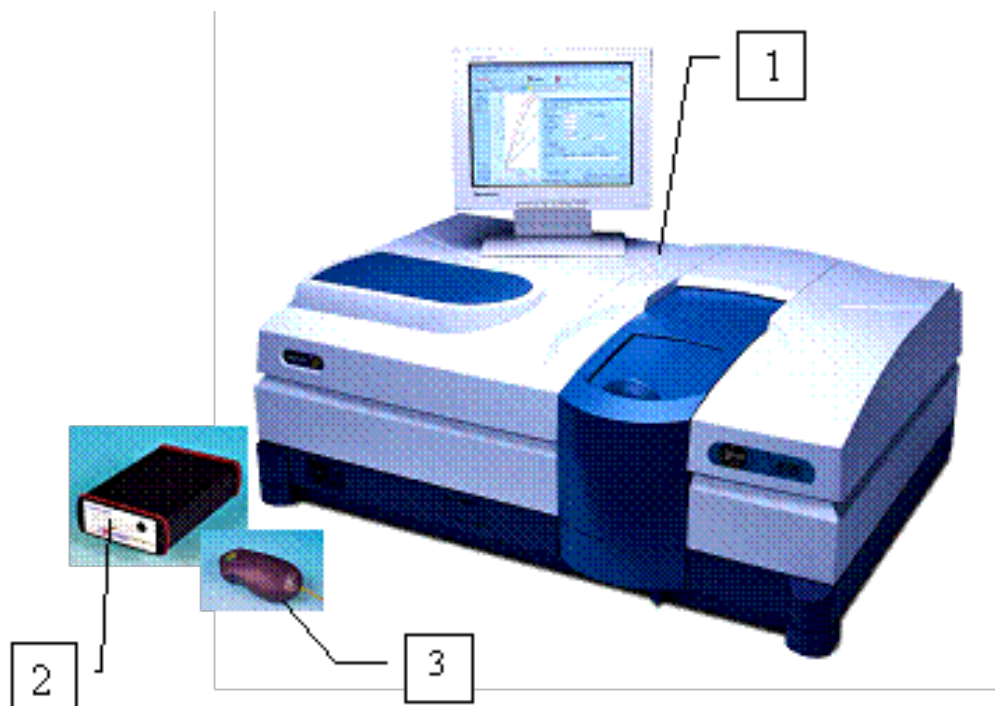


Рис. 2.1.1.

*Сравнительные габариты классического сканирующего спектрофотометра Varian mod. 4000 (1) и матричных волоконно-оптических спектрофотометров Avantes – AvaSpec-2048 (2) и AvaMouse (3).*

### 2.1.3. Устройство оптоволоконных модулей Avantes B.V.

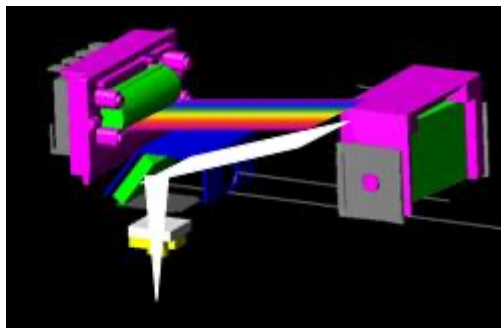
#### Оптическая скамья

Сердцем новейшего семейства оптоволоконных спектрометров AvaSpec является оптическая скамья – миниатюрный полихроматор, в котором объединены диспергирующее свет устройство и встроенный многоэлементный фотоприёмник.

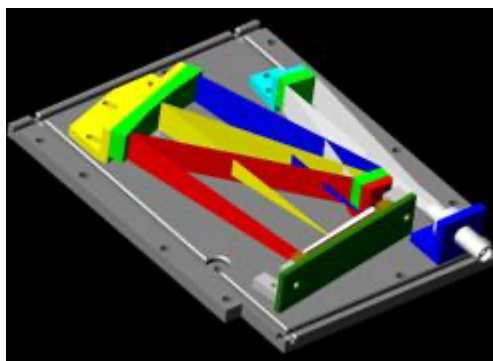
Avantes B.V. производит спектрометры на базе оптических скамей 3-х типов. Сверхминиатюрные спектрометры AvaMouse и AvaSpec-micro базируются на скамье AvaBench-28 с фокусным расстоянием 28 мм, построенной по схеме Литтрова с матричной входной оптикой и оригинальной патентованной конструкцией фокусирующей решетки-линзы. Скамья AvaBench-28 предназначена, главным образом, для колориметрических измерений с невысоким спектральным разрешением и оптимизирована для работы в спектральном диапазоне 380-750 нм. Многофункциональные спектрометры AvaSpec

комплектуются оптической скамьей с фокусным расстоянием 75 или 45 мм, функционирующей по симметричной оптической схеме Черни-Турнера:

**Скамья AvaBench-28**



**Скамьи AvaBench-45 и -75**



В спектрометрах разных модификаций используются фотодетекторы с числом элементов от 102 до 2048. Базовая комплектация оптических скамей разной модификации приведена в последующей таблице 2.1.1:

**Таблица 2.1.1. Базовая комплектация оптических скамей Avantes B.V.**

Скамья	Базовые элементы
<b>AvaBench-28-102</b>	Унифицированная скамья с фокусным расстоянием 28 мм, 102-элементная фотодиодная матрица, специализированная дифракционная решетка
<b>AvaBench-45-102</b>	Унифицированная скамья с фокусным расстоянием 45 мм, 102-элементная фотодиодная матрица, специализированная дифракционная решетка
<b>AvaBench-45-256</b>	Унифицированная скамья с фокусным расстоянием 45 мм, 256-элементная CMOS матрица, специализированная дифракционная решетка
<b>AvaBench-75-1024</b>	Унифицированная скамья с фокусным расстоянием 75 мм, 1024-элементная CMOS матрица, специализированная дифракционная решетка
<b>AvaBench-75-2048</b>	Унифицированная скамья с фокусным расстоянием 75 мм, 2048-элементная CCD матрица, специализированная дифракционная решетка

Рабочий спектральный диапазон и спектральное разрешение многофункциональных спектрометров Avantes B.V. определяются типом используемой решетки и числом фоточувствительных элементов регистрирующего фотодетектора (табл. 2.1.2):

**Таблица 2.1.2. Технические характеристики спектрометров Avantes B.V. в зависимости от типа используемой скамьи и применяемых фотодетекторов**

Оптическая скамья	AvaBench-28	AvaBench-45	AvaBench-75
Тип спектрометра	AvaMouse / AvaSpec-micro	AvaSpec-102 / 256	AvaSpec-1024 / 2048

<b>Фокусное расстояние</b>	28 мм	45 мм	75 мм
<b>Рабочий диапазон</b>	380-750 нм	200-1100 нм	200-1100 нм
<b>Разрешение (FWHM)</b>	16 нм	0,2 – 40 нм*	0,08 – 20 нм*
<b>Паразитный свет</b>	< 0.4 %	< 0.15%	< 0.1%
<b>Решётки</b>	Решетка-линза	Различные	Различные
<b>Щели</b>	200 мкм x 2 мм	10, 25, 50, 100, 200, 500 мкм	10, 25, 50, 100, 250, 500 мкм
<b>фотодетектор</b>	TAOS 102	TAOS 102 / HAM 256	HAM 1024 / SONY 2048
<b>Линза детектора</b>	Стандартная, VIS	Стандартная, VIS	UV/VIS
<b>Габариты модуля</b>	49 x 34 x 31 мм	82 x 72 x 20 мм	120 x 91 x 21 мм

\* определяется типом решётки и числом чувствительных элементов фотоприёмника

Оптическая скамья может иметь множество дополнительных оптических элементов, что в зависимости от предназначенной области использования спектрометра обеспечивается множеством различных конфигураций измерительных модулей с широким диапазоном оптических параметров. Оптимальный подбор оптических элементов: входная щель, дифракционная решётка, широкополосные оптические фильтры и фильтры 2-го порядка, цилиндрическая линза детектора и фотоэмиссионное покрытие датчика оказывают значимое влияние на аппаратные характеристики системы. Различные модификации спектрометров, их оптическое разрешение, диапазон измерений и используемые оптические и электронные компоненты обсуждаются ниже.

### Дифракционные решётки

Дифракционная решётка – оптический элемент, разлагающий исходный полихроматический (ахроматический) свет на составляющие длины волн. Решётка состоит из ряда индивидуальных параллельных бороздок (штрихов), сформированных в отражающем или пропускающем свет покрытии, нанесённом на подходящую подложку. В большинстве спектрометров используются отражательные решетки.

Способ, которым сформированы бороздки, разделяет решётки на два типа – голографические и нарезные. В нарезных решётках отражающая поверхность формируется алмазным резцом на специальной делительной машине. Голографические решетки создаются с помощью лазеров и фотолитографии.

Волоконно-оптический спектрометр оснащается незаменимой решёткой, тип которой должен быть определён пользователем, исходя из требований решаемых задач. Пользователь должен определить, какой диапазон длин волн должен регистрироваться фотодетектором. В ряде случаев требуемый диапазон решётки шире диапазона спектра, проецируемого на фотодетектор. Чтобы охватить более широкий спектральный диапазон, рекомендуется использовать двух- или трёхканальные спектрометры. В таких спектрометрах в разные спектрометрические каналы устанавливают решетки

разного типа. Использование двух- или трёхканальных спектрометров может обеспечить и более высокое спектральное разрешение в широком спектральном диапазоне. В спектрометрах Avantes B.V. используется 14 типов дифракционных решёток. Выбор комплектующих решёток и диапазонов длин волн, регистрируемых фотодетектором, осуществляется при оптимальной комплектации спектрометрических каналов (см. ниже).

Для спектрометров AvaSpec-2048 оптимальный выбор решёток и диапазонов длин волн может быть сделан на основании данных таблицы 2.1.3:

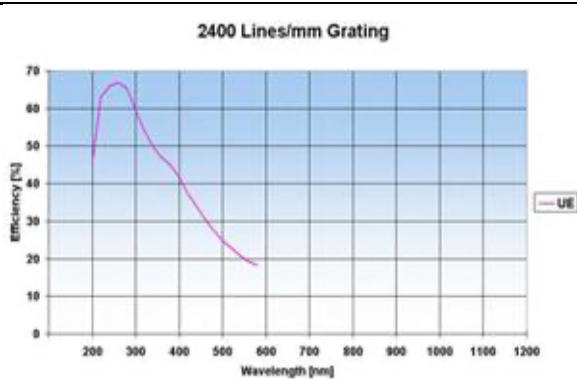
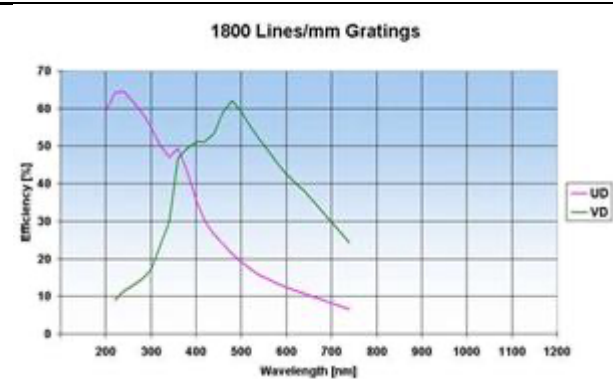
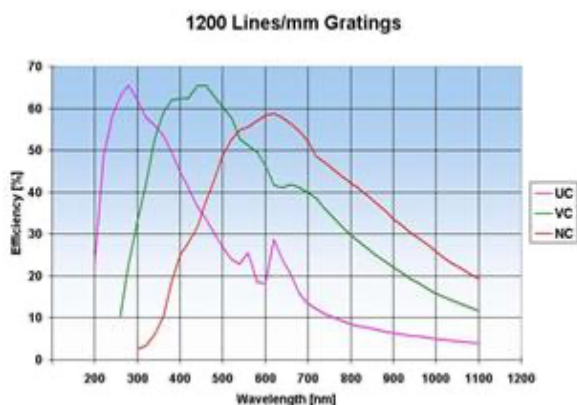
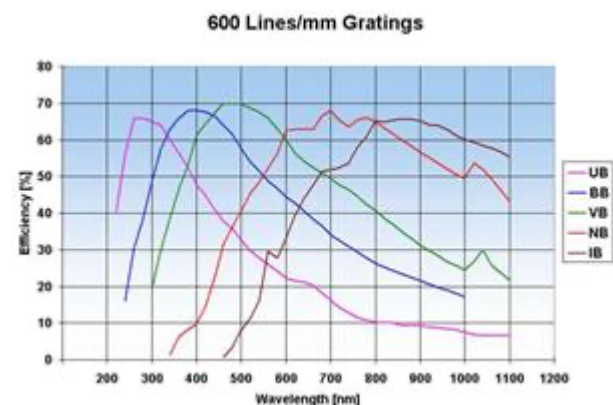
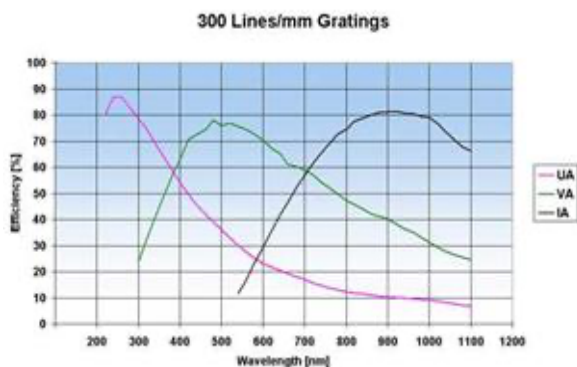
**Таблица 2.1.3 Параметры и диапазон дифракционных решёток, применяемых в спектрометрах Avantes**

Область применения	Рабочий диапазон длин волн ( $\lambda$ , нм)	Наблюдаемый диапазон ( $\Delta\lambda$ , нм)	Частота штрихов решётки (лин/мм)	Угол блеска решётки (нм)	Тип решётки
UV/VIS/NIR	200-1100	900	300	300	UA
UV/VIS	200-850	520	600	250	UB
UV	200-750	250-220	1200	250	UC
UV	200-650	165-145	1800	250	UD
UV	200-580	115-70	2400	250	UE
UV/VIS	250-850	520	600	400	BB
VIS/NIR	300-1100	800	300	500	VA
VIS	360-1000	500	600	500	VB
VIS	300-800	250-200	1200	500	VC
VIS	350-750	145-100	1800	500	VD
NIR	500-1050	500	600	750	NB
NIR	500-1050	220-150	1200	630	NC
NIR	600-1100	500	300	1000	IA
NIR	600-1100	500	600	1000	IB

Как видно из таблицы, выбор оптимального спектрального диапазона зависит от начального значения диапазона длин волн, наблюдаемого с данной решёткой и частоты штрихов решётки (лин/мм). Чем выше начальная длина волны, тем больше дисперсия и уже наблюдаемый спектральный диапазон.

При выборе решётки следует учитывать, что эффективность отражения света в разных участках спектрального диапазона неодинакова и различается для решёток разного типа. От этого зависит чувствительность спектрометра в разных спектральных диапазонах. Кривые спектральной эффективности светопередачи стандартных решёток спектрометров Avantes и зависимости от длины волны их спектрального разрешения (нм/пиксел) для AvaSpec-2048 приведены на рисунках в нижеследующих таблицах.

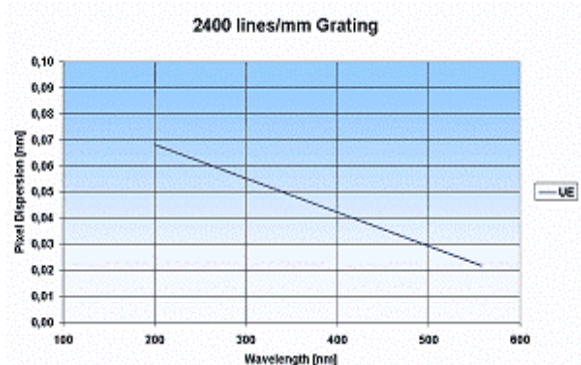
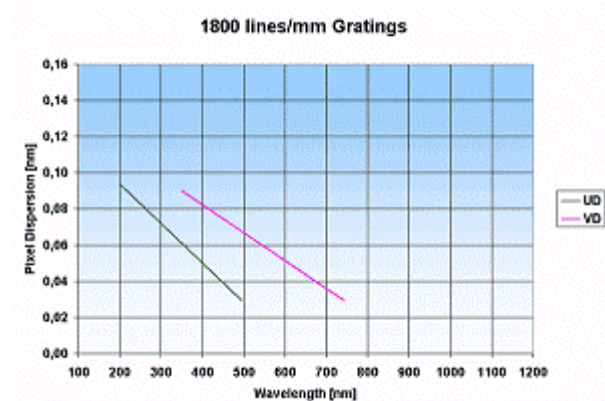
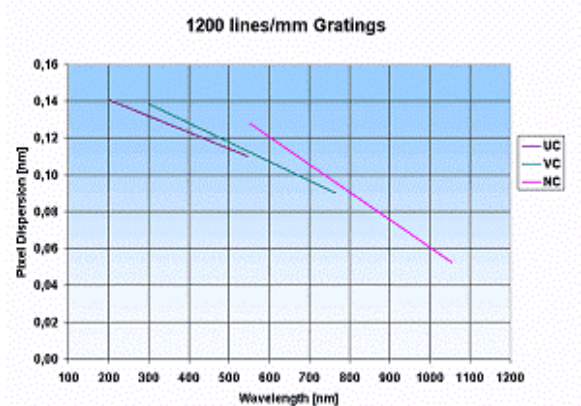
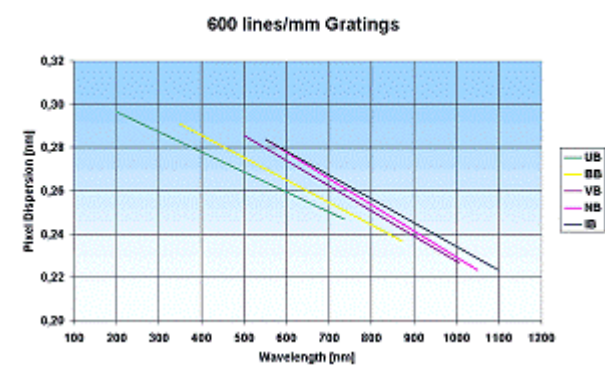
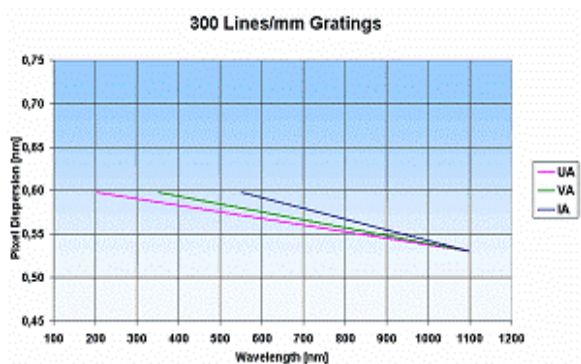
Кривые спектральной эффективности  
светопередачи стандартных решёток  
спектрометров AvaSpec-2048



При рассмотрении кривых эффективности решёток следует понимать, что полная эффективная спектральная чувствительность системы регистрации складывается из комбинации спектральной эффективности светопередачи оптоволоконна, решётки, зеркал и оптических покрытий и спектральной чувствительности фотоприёмника.

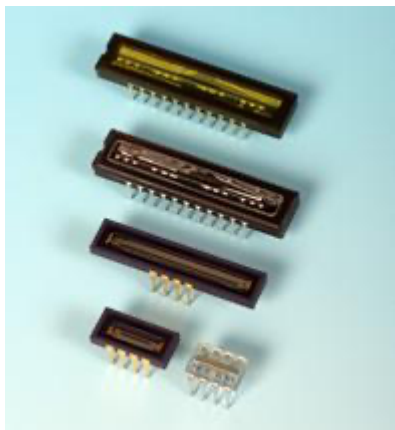


Кривые зависимости от длины волны  
спектрального разрешения (нм/пиксел)  
стандартных решёток спектрометров  
AvaSpec-2048



### 2.1.3. Устройство оптоволоконных модулей Avantes B.V.

#### Матричные фотодетекторы



Спектрометры AvaSpec комплектуются несколькими типами матричных многоэлементных фотодетекторов. Для диапазона 200-1100 нм используются многоэлементные кремниевые CCD-, CMOS-детекторы и фотодиодные матрицы (PD). Для диапазона NIR (900-2200nm) – InGaAs детекторы. Матричные элементы, в зависимости от типа, могут содержать от 102 до 2048 последовательно расположенных фоточувствительных элементов.

**CCD-детекторы** – зарядово-сопряженные устройства, или приборы с зарядовой связью (ПЗС), накапливают заряд, распределённый по светочувствительной поверхности многоэлементной матрицы пропорционально количеству падающих на каждый её элемент фотонов. В конце заданного временного интервала (времени интегрирования) накопленный заряд перемещается в буфер и затем передаётся в аналого-цифровой преобразователь (АЦП). CCD-детекторы имеют огромный динамический диапазон, ограниченный только темновым (термическим) потоком и быстродействием АЦП.

Чувствительность CCD-детекторов в спектральной области короче 350 нм очень низкая. Для работы в этой области в спектрометрах AvaSpec-2048 применяют два типа специальных люминофорных покрытий детекторов – UV и DUV. DUV покрытие увеличивает чувствительность детектора в области 150-350 нм, и UV покрытие – в области 200-350 нм. Общая эффективность UV покрытия лучше, чем DUV покрытие.

**Линейные датчики изображения CMOS** имеют более низкую эффективность преобразования заряд-напряжение по сравнению с матрицами CCD и поэтому меньшую светочувствительность, но намного лучше по отношению сигнал/шум.

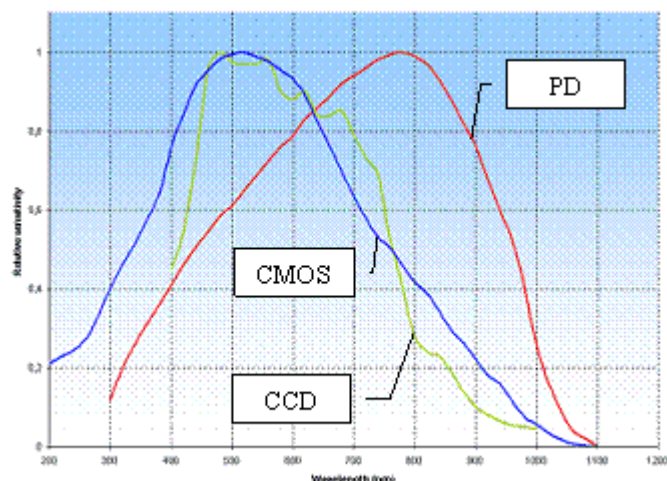
**Фотодиодные (PD) матрицы.** Кремниевые фотодиодные матрицы представляют собой линейки последовательно расположенных фотодиодов, содержащих 102, 256 или 1024 фоточувствительных элемента (пиксела). Каждый пиксел состоит из **pn**-перехода с положительно допированной **p**-областью и отрицательно допированной **n**-областью. Электрический сигнал в фотодиоде вызывается светом, возбуждающем фотоэлектроны. Сигнал большинства фотодиодных матриц объединяется в единую технологическую цепочку с усилителем считывания/интеграции на общем чипе.

## Технические параметры матричных

### фотодетекторов

### Спектральная чувствительность фотодетекторов

разного типа приведена на рисунке слева.



Чувствительность отдельного элемента (пиксела) фотодетектора на некоторой длине волны определяется как величина электрического сигнала на единицу падающей на этот

пиксел лучистой энергии фотонов. С данным АЦП эта величина может быть выражена как число отсчётов на мJ падающего излучения. Соотношение между световой энергией, входящей в оптическую скамью и её количеством, попадающим на отдельный пиксел, зависит от оптической конфигурации скамьи. Главными параметрами конфигурации скамьи, определяющими эту величину, являются эффективность используемой решетки, диаметр оптоволоконна и ширина входной щели, качество применяемых зеркал и используемой коллимационной линзы. Конфигурацией спектрометра можно обеспечить варьирование диапазона измерения оптических сигналов около 6-7 порядков. Для повышения чувствительности, на фотодетектор может быть установлена дополнительно цилиндрическая собирающая линза. В частности такая цилиндрическая линза из УФ-кварца, установленная на фотодетектор спектрометра AvaSpec-2048, увеличивает его чувствительность в 3-5 раз в зависимости от диаметра входного оптоволоконна. Некоторые технические параметры спектрометров с различными фотодетекторами приведены в таблице 2.1.4:

**Таблица 2.1.4. Технические параметры спектрометров с различными фотодетекторами**

Детектор	TAOS 102	HAM256	HAM1024	SONY2048
Тип	Фотодиодная матрица	CMOS линейная матрица	CMOS линейная матрица	CCD линейная матрица
Число элементов, шаг	102, 85 $\mu\text{m}$	256, 25 $\mu\text{m}$	1024, 25 $\mu\text{m}$	2048, 14 $\mu\text{m}$
Размеры элемента (ширина/высота)	77 x 85 $\mu\text{m}$	25 x 500 $\mu\text{m}$	25 x 500 $\mu\text{m}$	14 x 56 $\mu\text{m}$
Чувствительность – число отсч. за 1 ms интегрирования (лампа HL2000, волокно 8 $\mu\text{m}$ )	2720 (AvaSpec-102) 56 (AvaSpec-micro)	30 (AvaSpec-256)	t.b.d	6500 (AvaSpec-2048)
Область макс. чувствительности	750 nm	500 nm	500 nm	500 nm
Сигнал/шум	1000:1	10.000 :1	10.000 :1	1000 :1
Темновой сигнал	Ca. 11 counts	Ca. 14 counts	t.b.d	Ca. 22 counts
Спектральный диапазон	360-1100 nm	200-1000 nm	200-1000 nm	200-1100 nm

Полная чувствительность фотодетекторов дается в таблице в числе отсчётов за 1 миллисекунду времени интегрирования. Данные приведены для решёток 600 лин/мм, входного волокна диаметром 8 мкм, галогенного источника AvaSpec-HL2000, в отсутствии цилиндрической линзы детектора.

### **Паразитный свет и эффекты второго порядка**

При работе на пределе чувствительности фотодетектора, порог чувствительности спектрометра определяет паразитный свет. Паразитный свет – излучение длин волн, не соответствующих настройке монохроматора, попадающее на фотоприёмник. Источниками паразитного света могут быть:

- Окружающий свет
- Рассеяние света несовершенными оптическими элементами или отражение света от конструктивных элементов спектрометра
- Перекрывающиеся порядки дифракции решетки.

Окружающий паразитный свет устраняется размещением спектрометра в светозащитном кожухе. Кроме того, крепёжные сочленения оптической скамьи, изготовленной из чёрного анодированного алюминия, защищены суперчёрным силиконом.

При работе на пределе чувствительности спектрометра, порог обнаружения определяет уровень паразитной засветки от оптической скамьи, фокусирующих зеркал и дифракционной решётки. Для снижения этих эффектов сейчас применяют голографические решётки, обладающие низким уровнем паразитного света.

Измерения уровня паразитного света проводят, освещая оптическую скамью лазерными источниками и измеряя интенсивность света на удалённых от положения проекции лазерной линии пикселях. В других методах используют галогенные источники света в совокупности с широкополосными и узкополосными оптическими фильтрами. Характеристики уровня паразитного света указываются в сопровождающей спектрометр калибровочной документации.

Типичные уровни паразитной засветки спектрометров Avantes –  $< 0.05 \%$  в 600 нм;  $< 0.10 \%$  в 435 нм;  $< 0.10 \%$  в 250 нм.

Эффекты второго порядка, обусловленные 2-м порядком дифракции света, могут играть важную роль при использовании решёток с низкой частотой штрихов для измерений в широком спектральном диапазоне. Иногда этими эффектами можно пренебречь, но в ряде случаев они требуют принятия

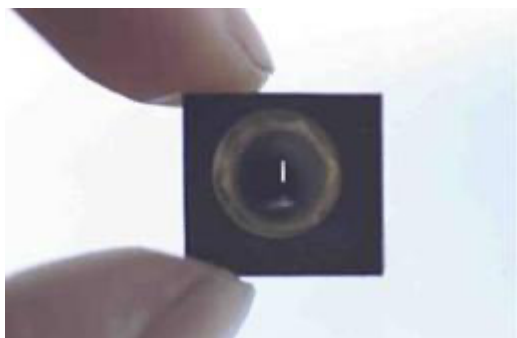
специальных мер для устранения. Эти меры заключаются в ограничении света областью спектра, где перекрывание порядков невозможно. Эффекты второго порядка могут быть устранены установкой широкополосного фильтра во входном SMA-коннекторе.

Для устранения эффектов второго порядка при использовании дифракционных решёток разного типа рекомендуется использование следующих типов широкополосных фильтров: OSF-475 для решёток NB и NC, OSF-515 для решёток NB и OSF-550 для решёток IB. Диапазон широкополосных фильтров, рекомендуемых для установки в оптической скамье Avantes может быть найден в Таблице паразитной засветки, размещённой по адресу: [https://www.avantes.ru/Spectrometers/filters\\_table.htm](https://www.avantes.ru/Spectrometers/filters_table.htm).

#### Оптическое разрешение оптоволоконных спектрометров Avantes BV

Оптическое разрешение оптоволоконных спектрометров Avantes BV определяется как минимально различимая длина волны, разрешаемая спектрометром. Для разделения двух спектральных линий необходимо отобразить их, по крайней мере, в 2 элементах светочувствительной детекторной матрицы.

Основным параметром функции оптического разрешения спектрометров является диспергирующая способность дифракционной решётки. Этот параметр решётки определяет ширину полосы света падающего на многоэлементную детекторную матрицу и её спектральные характеристики. Другой важный параметр – ширина входящего в оптоволоконный спектрометр светового луча. В общем случае ширина луча определяется шириной оптической щели на входе спектрометра или диаметром оптического волокна, когда входная щель отсутствует.



При использовании оптоволоконных кабелей большого диаметра, степень оптического разрешения спектрометра может быть повышена установкой оптических щелей (рис. слева), ширина которых меньше диаметра оптического волокна.

Для получения требуемого уровня избирательности спектрометра на входе оптической скамьи могут быть установлены оптические щели: 25, 50 мкм ширины и 1000 мкм высоты или 100, 200, 500 мкм ширины и 2000 мкм высоты. Изображение щели на поверхности детектора перекрывает множество светочувствительных элементов. Для оптического разрешения нескольких спектральных линий требуется, чтобы количество светочувствительных элементов оптического детектора в поле изображения щели, по крайней мере, на единицу превышало число разрешаемых линий (полос) спектра.

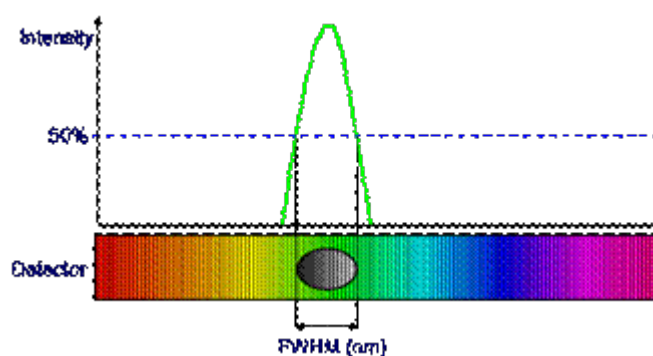
Зависимость оптического разрешения спектрометра AvaSpec-2048 от типа выбранной дифракционной решётки и эффективной ширины пучка входящего света представлена в таблице 2.1.5:

**Таблица 2.1.5. Оптическое разрешение (FWHM in nm) спектрометров AvaSpec-2048**

решётка (лин/мм)	Щель (мкм)					
	10	25	50	100	200	500
300	0.8	1.4	2.4	4.3	8.0	20.0
600	0.4	0.7	1.2	2.1	4.1	10.0
1200	0.1-0.2*	0.2-0.3*	0.4-0.6*	0.7-1.0*	1.4-2.0*	3.3-4.8*
1800	0.07-0.12*	0.12-0.21*	0.2-0.36*	0.4-0.7*	0.7-1.4*	1.7-3.3*
2400	0.05-0.09*	0.08-0.15*	0.14-0.25*	0.3-0.5*	0.5-0.9*	1.2-2.2*

*\* зависит от рабочего спектрального диапазона решётки; чем выше длина волны, тем больше дисперсия и лучшее решение*

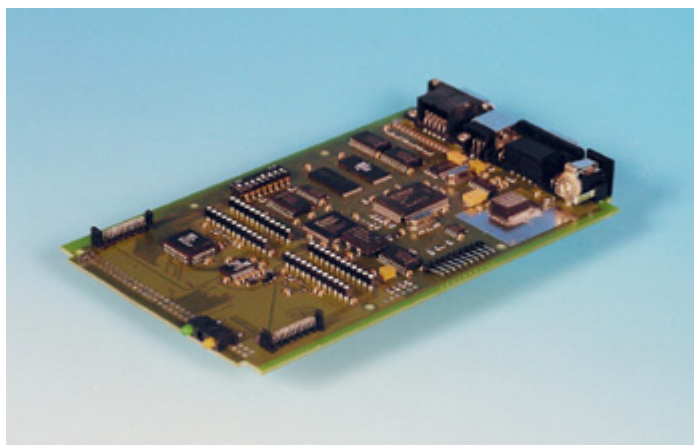
Оптическое разрешение спектрометра в этой таблице определяется как F (ull) W (idth) H (alf) M (aximum), представляемое шириной пика в nm на уровне 50 % максимальной интенсивности. Определение этой величины поясняет приведённый ниже рисунок:



### 2.1.3. Устройство оптоволоконных модулей Avantes B.V.

#### Управление измерениями





Управление измерениями спектрометров Avantes осуществляет унифицированный микроконтроллер. Плата микроконтроллера оснащена 15-ю цифровыми IO коннекторами с 14 программируемыми I/O портами (2 DI, 12 DO). Один DO порт зарезервирован для управления внешним импульсным ксеноновым источником (одна или множество вспышек на сканирование),

один DO порт может быть использован для управления внешними TTL устройствами. Один цифровой вход зарезервирован для подключения к внешнему триггеру.

Универсальный интерфейсный кабель обеспечивает возможность подключения электронной платы микроконтроллера к оптической скамье, оснащённой любым из используемых в системах Avantes B.V. типов матричных фотоприёмников, таких как фотодиодные линейки TAOS TSL1301, Hamamatsu C-MOS фотодетекторы 5463-256Q, S8378-256Q, S8378-512Q, S8378-1024Q и CCD-детекторы Sony ILX511, ILX554B.

Встроенное программное обеспечение управляет сложным сбором данных с двух каналов. Полученные данные передаются через интерфейс на внешний ПК с возможностью увеличения скорости передачи данных за счет их объема, определяемого начальным и конечным пикселями каждого канала. Параметры могут быть адаптированы на каждый канал. Управление встроенным ПО осуществляется через USB или RS-232 интерфейс.

В зависимости от используемого типа внешнего интерфейса (USB1 или USB2) плата микроконтроллера может быть оснащена одним из двух типов микроконтроллеров – AS-161 или AS-5216.

Электронная плата микроконтроллера с микропроцессором AS-161 имеет аналогово-цифровой преобразователь 14 bit, 1.33 MHz и DB-15 коннектор и предназначена для работы с USB1.

Микроконтроллер с процессором AS-5216, предназначенный для USB2, имеет аналогово-цифровой преобразователь 16 bit, 2 MHz и HD-26 коннектор. Версия USB2 отличается большим диапазоном времени интегрирования регистрируемого сигнала, более высокой скоростью получения и передачи данных, возможностью измерений в триггерном режиме и синхронизации измерений.

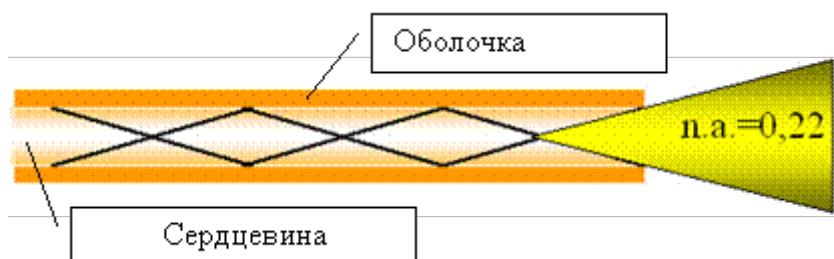
Более подробная информация о спектрофотометрах на базе USB1 и USB2 изложена на сайте . в разделе [технические характеристики](#)

## Устройства оптического сопряжения измерительных трактов спектрометров

### Оптоволоконные кабели

Для оптического сопряжения спектрометра с исследуемым объектом и источником света используются оптоволоконные кабели. Использование волоконной оптики для передачи света позволяет значительно увеличить модульность и гибкость оптических систем измерения.

Оптоволоконные кабели могут быть сделаны из многих материалов, таких как пластик, стекло и силикаты (SiC<sub>b</sub>). Для высококачественного оптоволокна, которое применяется в спектроскопических приложениях Avantes, используется синтетически синтезированный кремний (аморфный диоксид кремния), дополнительно легированный микроэлементами для выравнивания оптических свойств стекла.



Основной принцип передачи света через оптоволокно – полное внутреннее отражение. Это означает, что свет с численной апертурой (н.а.) оптоволокна будет отражен и передан через кабель.

Величина численной апертуры зависит от материала сердцевины и оболочки оптоволокна.

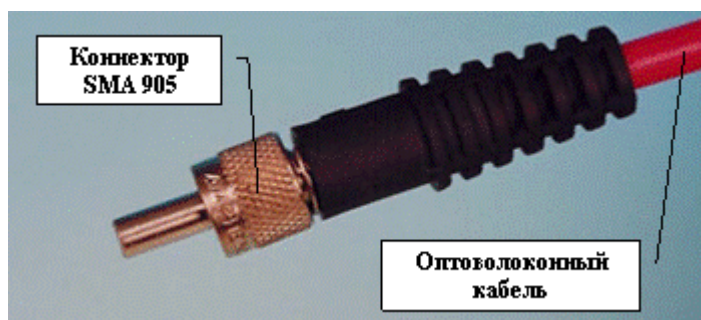
На рисунке справа приведена схема хода лучей и численная апертура для кварцевого оптоволокна.

Внешний вид оптоволоконного кабеля		Технические характеристики	
		Тип оптоволокна	Оптоволокно со ступенчато-изменяющимся показателем преломления
		Численная апертура сердцевины	$0.22 \pm 0.02$
		Сопротивление разрушению под действием лазерного излучения	1,3 кВт/мм <sup>2</sup> при 1060 нм, до 10 Дж в импульсе
		Внешнее покрытие	кевлар, полихлорвинил
		Внутренняя оболочка	полипропилен



	Сердцевина	легированный SiO <sub>2</sub>
	Внешний диаметр	3,8 мм
	Диапазон температур	от -20 °С до +65 °С


### Стандартный SMA коннектор



Оптоволоконные кабели, оснащены стандартными SMA 905 коннекторами, обеспечивающими унифицированное соединение кабелей с внешними устройствами. Уровень потерь, вносимых коннектором, – порядка 0,5 Дб.

### Коллимационная линза

Коллимационная линза преобразует исходящий из оптоволоконного кабеля расходящийся пучок света в параллельный луч или фокусирует падающий поток излучения на торце оптического волокна. Линза оптимизирована для использования в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах, ее корпус изготовлен из анодированного алюминия. Унифицированный корпус линзы стыкуется с оптоволоконными кабелями через стандартный SMA 905 коннектор.

Внешний вид блока коллимационной линзы		Технические характеристики	
		Диаметр линзы	6 мм
		Конфокальное расстояние	8.7 мм
		Материал линзы	Кварцевое стекло
		Диапазон длин волн	200 - 2000 нм
		Отражение	>90% (200 - 1100 нм)
		Материал корпуса	Анодированный алюминий
		Рабочий диапазон температур	-30 °С до 100 °С

## 2.1.4. Оптимальная комплектация оптоволоконных спектрометров AvaSpec

Модульная конструкция AvaSpec спектрометров позволяет создать измерительный комплекс при строгом соответствии его параметров экспериментальным требованиям. Ниже обсуждаются технические эксплуатационные характеристики спектрометрических систем и пути достижения требуемых технических показателей спектрометра.

#### Диапазон измерения оптоволоконных спектрометров

При задании оптимальной конфигурации спектрометрической системы диапазон измерения является наиболее важным параметром, который определяется выбором типа дифракционной решётки. Если необходим широкий диапазон измерения спектрометра, то рекомендуется использование дифракционной решётки А- типа (300 штрих/мм) или В- типа (600 штрих/мм). Если требуется широкий диапазон измерений при высоком разрешении, то наилучшим решением может быть многоканальная спектрометрическая система, каждый канал которой с высоким разрешением обрабатывает отдельный, растянутый, спектральный участок.

#### Оптическое разрешение оптоволоконных спектрометров

Для обеспечения высокого разрешения спектрометров рекомендуется установка решёток 1200 или более штрих/мм (С, D,Е или F типа) в сочетании с узкой щелью и 2048 элементным детектором, например 10 мкм щель для высокого разрешения спектрометра AvaSpec-2048 (см. таб.2 - раздел "Оптическое разрешение").

#### Чувствительность спектрометров

Следующий важный этап, определяющий чувствительность спектрометра, – выбор фотодетектора. Avantes B.V. предлагает 4 типа детекторов с различными светочувствительными характеристиками. Для UV диапазона измерений рекомендуются 256/1024 элементные SМОС детекторы или UV- расширенные 2048 элементные CCD детекторы. При обсуждении чувствительности спектрометров очень важно произвести разграничение между фотометрической чувствительностью (как много света необходимо для достоверной регистрации сигнала?) и чувствительностью по уровню абсорбции (какие уровни абсорбции могут быть различимы?)

#### Фотометрическая чувствительность спектрометров

Для того чтобы достичь чувствительности спектрометра достаточной для флюорометрических или Рамановских измерений рекомендуются 2048 элементные CCD детекторы и AvaSpec-2048 спектрометры, в которых надлежит использовать DCL-UV/VIS цилиндрические линзы детектора и относительно широкие входные оптические щели (100 мкм и выше) или вовсе исключить щель и использовать решётку А-типа. Решётки А- типа (300 штрих/мм) обладают наименьшей дисперсией и соответственно обеспечивают максимальную чувствительность по сравнению с решётками других типов. Термоэлектрическое охлаждение детекторов (AvaSpec-2048-ТЕС) используется для понижения уровня темнового электронного шума детектора и увеличения динамического диапазона за счёт роста допустимого времени интегрирования (60 секунд).

### Чувствительность по уровню абсорбции

Для детектирования двух близких друг к другу абсорбционных величин с предельной разрешающей способностью требуется достижение максимального значения сигнал/шум (S/N). Детекторы 256/1024 SMOС в AvaSpec-256/1024 спектрометрах имеют максимальные значения этого параметра. Параметр S/N может быть эффективно повышен при использовании усреднённой оценки спектрального распределения по множеству единичных измерений с помощью программного обеспечения AvaSoft или использования термоэлектрически охлаждаемых AvaSpec-2048 TEC спектрометров.

### Длительность спектрометрических измерений

Высокая скорость процесса спектрометрических измерений оптоволоконных спектрометров AvaSpec обусловлена отсутствием подвижных элементов и быстроедействием оптического детектора. Однако существует оптимальный режим регистрации для каждого типа спектрометрических измерений. Для высокоскоростных приложений рекомендуется использование AvaSpec-2048-FT высокоскоростного триггерного спектрометра. Когда необходимо передавать малый объём данных, время передачи может быть снижено путём выбора пикселей в узком диапазоне для передачи их значений на персональный компьютер; в общем случае AvaSpec-102 спектрометр может рассматриваться как самый высокоскоростной оптоволоконный автоматизированный спектрометр.

Перечисленные параметры являются наиболее существенными при выборе конфигурации спектрометров и определяют область их применения. Нижеприведённая таблица 2.1.6. представляет собой краткий перечень основных приложений спектрометров AvaSpec и типовые варианты использования основных оптических компонентов:

**Таблица 2.1.6. Краткий перечень основных приложений спектрометров AvaSpec и типовые варианты использования основных оптических компонентов**

AvaSpec-тип	Решетка	диапазон (nm)	покрытие	Slit	FWHM разрешение (nm)	DCL	OSF	OSC
2048	NB	500-1000	-	50	1.2	-	475	-
1024	UA	200-1100	-	50	2.0	-	-	200-1100
102	VA	360-780	-	100	6.4	X/-	-	-
256	VA	360-780	-	50	3.2	-	-	-
2048	BB	360-780	-	200	4.1	X/-	-	-
2048	VA	350-1100	-	200	8.0	X	-	350-1100
102	IA	800-1100	-	50	5.4	X	550	-
2048	VA	350-1100	-	25	1.4	X	-	350-1100
2048	VD	600-700	-	10	0.07	-	550	-
2048	UA	200-1100	UV	50	2.8	X/-	-	200-1100
2048	NC	700-800	-	10	0.1	-	550	-
2048	VA	350-1100	-	25	1.4	X/-	-	350-1100
2048FT	UE	200-300	DUV	10	0.09	-	-	-
2048TEC	IB	780-1100	-	50	1.2	X	550	-
2048	UA	200-1100	UV	-	4.1	X	-	200-1100
2048	UA	200-1100	UV	25	1.4	X/-	-	200-1100

Как видно из таблицы, самую широкую область применения в самых разных прикладных областях имеют спектрометры семейства AvaSpec-2048.

## 2.2. Состав лабораторного комплекса УНИР на базе модульной оптоволоконной системы Avantes

### 2.2.1. Структура рабочих мест лабораторного комплекса

Лабораторный комплекс УНИР состоит из пяти учебных автоматизированных рабочих мест (АРМ) пользователей и АРМ преподавателя-руководителя работ.

Учебные АРМ пользователей объединены в локальную сеть через головной компьютер рабочего места АРМ руководителя работ, осуществляющего текущий контроль за ходом их выполнения. Предусмотрена возможность подключения лабораторно-измерительного комплекса через компьютер АРМ руководителя работ к сети удалённого доступа (см. рис. 2.2.1). Это обеспечивает возможность его функционирования комплекса УНИР в режиме лаборатории дистанционного обучения.

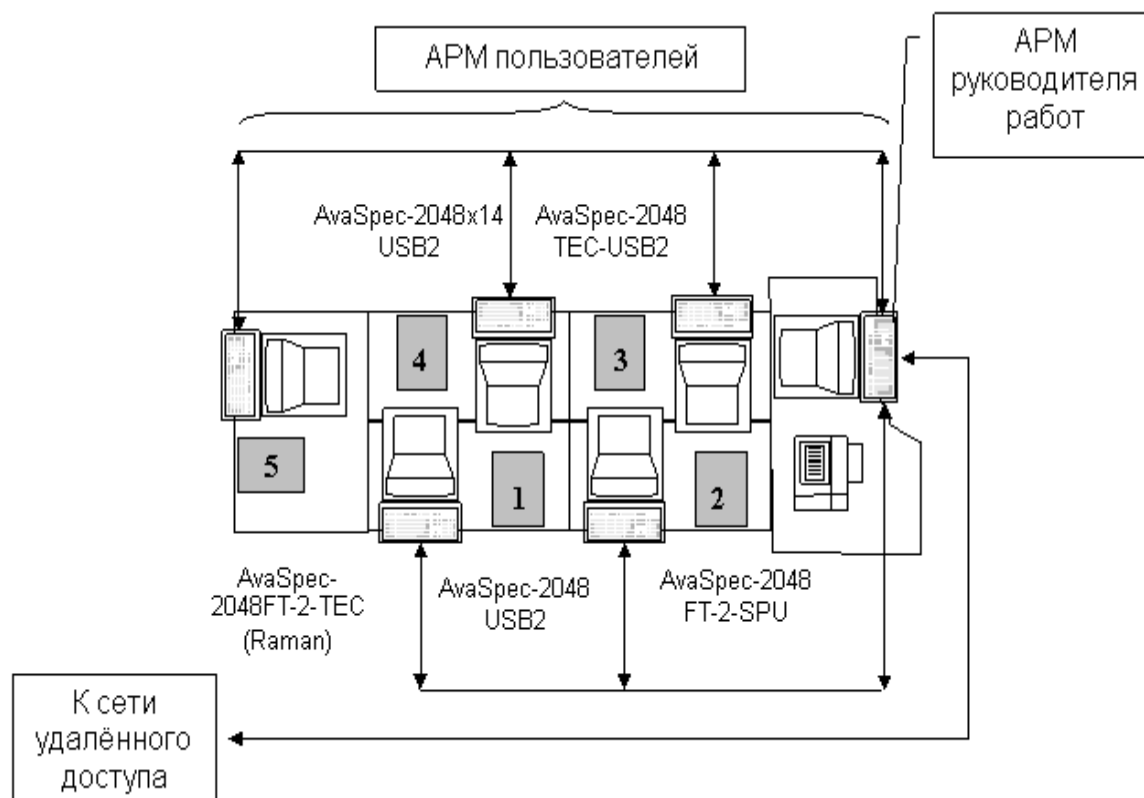


Рис. 2.2.1. Структура комплекса УНИР.

АРМ руководителя работ включает:

- персональный компьютер для дистанционного обучения, проверки знаний, контроля за ходом выполнения работ в режиме реального времени и архивирования результатов их выполнения;

- многоканальный сетевой интерфейс связи с пользовательскими АРМ;
- устройство сопряжения комплекса УНИР с внешними сетями удалённого доступа.

Каждое из учебных АРМ пользователей состоит из:

- спектрометрического волоконно-оптического измерительного модуля;
- персонального компьютера для управления измерениями, отображения, обработки и архивирования экспериментальных данных;
- пакета универсального программного обеспечения AvaSoft-Full и прикладных программ AvaSoft, необходимых для выполнения частных задач;
- сетевого интерфейса.

АРМ пользователей оборудованы пятью спектрометрическими волоконно-оптическими измерительными модулями Avantes на базе спектрометров AvaSpec-2048 разной модификации:

1. AvaSpec-2048 USB2;
2. AvaSpec-2048 FT-2-SPU;
3. AvaSpec-2048 TEC-USB2;
4. AvaSpec-2048x14 USB2;
5. AvaSpec-2048FT-2-TEC (Raman).

Модули 1-5 могут быть частично взаимозаменяемыми для выполнения однотипных лабораторных работ. Так, в частности, на модулях 1-4 могут быть реализованы работы по изучению принципов применения методов спектрофотометрии, нефелометрии и турбидиметрии, колориметрии, радиометрии, фотолюминесценции к исследованию состава, структуры и свойств конденсированных систем и контролю параметров наноразмерных покрытий. На модуле 5 могут проводиться исследования молекулярного состава и надмолекулярной наноструктуры конденсированных систем по колебательным спектрам комбинационного рассеяния света и спектрам люминесценции этих объектов с высоким спектральным разрешением.

Для выполнения этих работ имеется широкий набор унифицированных приставок – интегрирующая сфера, погружной и рефлексометрический оптические пробники, держатели для

оптических кювет, и пр. Каждая из приставок без труда может быть состыкована с любым из спектрометрических модулей посредством оптоволоконных кабелей.

Источники оптического излучения системы оборудованы дейтериево-галогенными и импульсной ксеноновой лампами, диодными лазерами различных длин волн.

Имеются также и стандартизованные источники излучения для калибровки абсолютной радиометрической чувствительности спектрометров и их привязки по шкале длин волн.

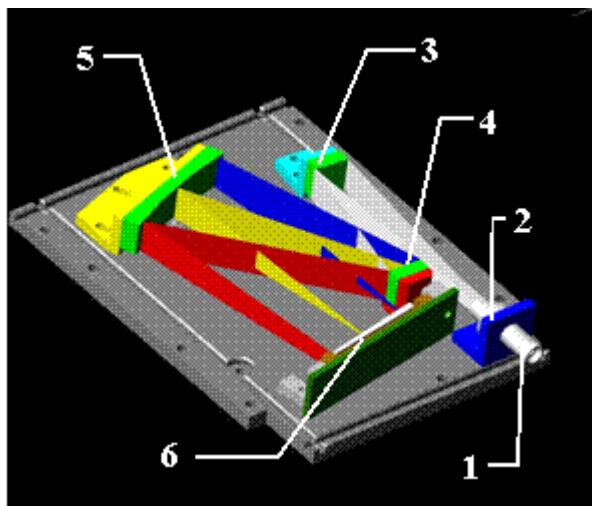
Все управляющие компьютеры оснащены пакетом универсального программного обеспечения AvaSoft-Full и пакетами прикладных программ AvaSoft, необходимыми для выполнения частных задач.

### 2.2.2. Принцип построения модульной оптоволоконной системы.

АРМ пользователей лабораторного комплекса УНИР оборудованы унифицированными спектрально-измерительными модулями на базе высокочувствительных оптоволоконных спектрометров AvaSpec-2048, построенных на оптической платформе AvaBench-75 с симметричной оптической скамьей Черни-Турнера и 2048 элементной CCD детекторной матрицей фотоприёмника.

<b>Оптическая скамья AvaBench-75</b>	<b>Технические характеристики</b>	
	Фокусное расстояние	75 мм
	Числовая апертура	0,07
	Уровень паразитной засветки	< 0.1 %
	Фотодетектор	SONY 2048-CCD
	Габариты, вес	120x91 x 21 мм, 255 гр.

**Принцип функционирования скамьи AvaBench-75:**



Свет на оптическую скамью поступает через стандартный SMA905 соединительный коннектор (1) и, пройдя через входную щель (2), коллимируется первым сферическим зеркалом (3). Плоская дифракционная решётка (4) отбрасывает диспергированные пучки света на второе сферическое зеркало (5), которое фокусирует полосу результирующего спектра на светочувствительную зону линейного многоэлементного фотодетектора (6).

Технические характеристики многоэлементного фотодетектора SONY2048-CCD приведены в нижеследующей таблице 2.1.7.

**Таблица 2.1.7. Технические характеристики матричного фотодетектора SONY2048** [\[3\]](#)

Тип	ПЗС - линейка
Количество пикселей	2048
Размеры пикселя	14 x 56 мкм
Чувствительность	240 V/lx.s
Чувствительность	5000 отсчетов/мкВт
Чувствительность (AvaLight-HAL, 8 мкм оптоволокно) в отсчетах в миллисекунду	5000
Пиковая длина волны	500 нм
Отношение сигнал/шум	250:1
Темновой шум	Са. 10 отсчетов
PNRU*(макс.)	± 5%
Частота	2 МГц

\*PNRU (Photo Response Non-Uniformity) - максимальное различие между выходом от пикселей при однородном освещении, отнесенное к среднему сигналу.

К основным оптическим элементам спектрометров AvaSpec-2048 относятся: входной оптоволоконный SMA коннектор, дифракционная решетка, коллимирующее и фокусирующее зеркала.

Возможность установки любой из 14 типов дифракционных решеток Avantes с различными дисперсионными характеристиками, входной оптической щели, цилиндрической коимирующей линзы для повышения чувствительности, специальных покрытий детектора для оптимизации спектрального диапазона измерений и подавления эффекта волн 2-го порядка позволяет оптимизировать спектрометрическую платформу в соответствии с реальными экспериментальными условиями.

2048 элементный профиль спектрального распределения с CCD детекторной матрицы снимается управляемой микропроцессором электронной платой микроконтроллера спектрометра и по USB/RS-232 интерфейсу передаётся в персональный компьютер.

Спектрометр AvaSpec-2048 существует в двух вариациях, в зависимости от используемого интерфейса USB:

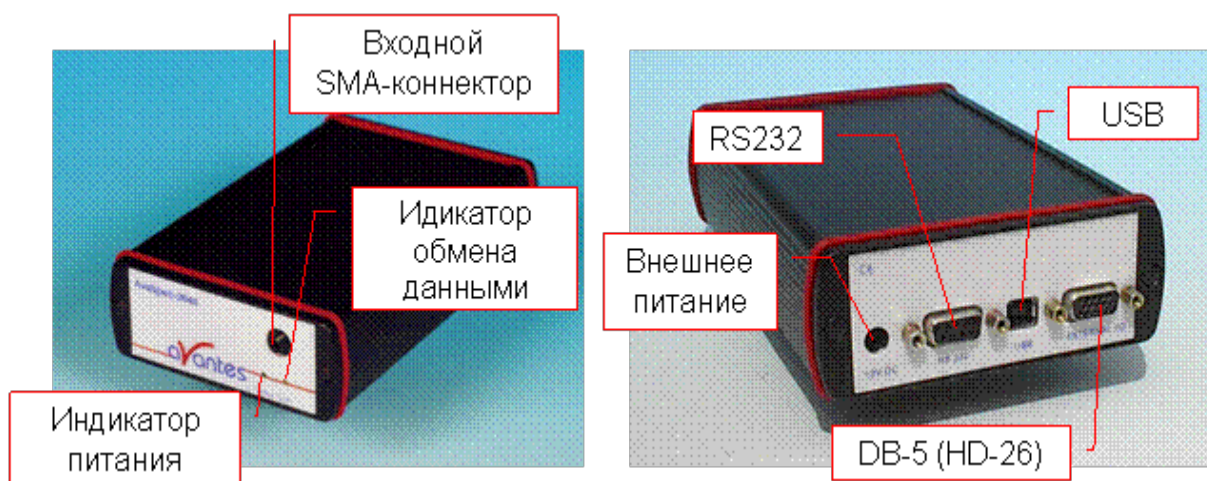
AvaSpec-2048 USB1 на базе электронной платформы AS-161 имеет аналогово-цифровой преобразователь 14 bit, 1.33 MHz и DB-15 коннектор.

AvaSpec-2048 USB2 на базе электронной платформы AS-5216 имеет аналогово-цифровой преобразователь 16 bit, 2 MHz и HD-26 коннектор. Версия USB2 отличается большим диапазоном времени интегрирования регистрируемого сигнала, более высокой скоростью получения и передачи данных, возможностью измерений в триггерном режиме и синхронизации измерений. Более подробная информация о спектрофотометрах на базе USB1 и USB2 изложена на сайте [www.avantes.ru](http://www.avantes.ru) в разделе [технические характеристики](#).

Цифровой коннектор входа/выхода DB-15 (USB1) или HD-26 (USB2) обеспечивает внешний триггерный запуск спектрометров, контроль работы шуттера и импульсного источника излучения в режимах абсорбционных и флуориметрических измерений.

Типовое унифицированное расположение и назначение коммутационных разъёмов и световых индикаторов на передней и задней панелях модулей AvaSpec-2048 проиллюстрировано на рисунке:





Использование унифицированной оптико-электронной платформы обеспечивает многофункциональность имеющихся АРМ и возможность их гибкого перепрофилирования для постановки самых разнообразных спектрально-аналитических приложений, доступных возможностям технического решения оптоволоконных спектрометров серии AvaSpec-2048.

Высококчувствительный оптоволоконный спектрометр AvaSpec-2048 разных модификаций может использоваться как спектрофотометр, фотоколориметр, радиометр, нефелометр, турбидиметр, флуориметр, флуороскан, люминометр или спектрометр комбинационного рассеяния света для аналитических исследований в спектральном диапазоне 200-1100 нм с очень высокой чувствительностью и оптимальным оптическим разрешением. Наличие специальных модификаций спектрометра, таких как AvaSpec-2048-FT, -TEC, -USB2, технические характеристики и специфические особенности которых описаны ниже, существенно расширяет круг экспериментальных возможностей комплекса.

## 2.3. Технические характеристики и назначение измерительных спектрометрических модулей оптоволоконной системы лабораторного комплекса УНИР

### 2.3.1. Модуль высокоскоростной спектрорадиометрии на базе оптоволоконного высокоскоростного спектрометра AvaSpec-2048-USB2



Модуль оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048-USB2 оснащён одним измерительным каналом.

Может использоваться как спектрофотометр, фотоколориметр, радиометр, нефелометр или турбидиметр, флуориметр, флюороскан или люминометр для аналитических исследований в спектральном диапазоне 200-1150 нм с очень высокой чувствительностью.

Измерительный тракт спектрометра откалиброван производителем в абсолютных единицах.

Внешний вид спектрометра AvaSpec-2048-USB2 приведен на рисунке слева.

#### Технические характеристики оптоволоконного высокоскоростного спектрометра AvaSpec-2048-USB2

Число измерительных каналов	1
Интерфейс	USB2
Питание	по шине USB2
Управление измерениями	микропроцессор AS-5216; TTL шуттер
Устройство отображения и обработки информации	Персональный компьютер
Программное обеспечение	<p><b>AvaSoft-Full</b> - универсальное программное обеспечение версия 7,0 Windows 95/.../XP;</p> <p><b>AvaSoft-Chem</b> - хеометрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-Color</b> - колориметрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-Irrad</b> - радиометрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-ThinFilm</b> - программное обеспечение измерения толщины пластин и плёнок</p> <p><b>AvaSoft-XLS</b> - программное обеспечение online переноса данных в Excel формат</p> <p><b>AS-5216-DLL</b> - DLL драйверы автоматизации измерений, включая образцы на C++,</p> <p>Visual basic, Delphi и Labview</p>

#### Характеристики измерительного канала спектрометра

Оптическая скамья	Avabench-75
Фокусное расстояние, мм	75
Дифракционная решетка (штрих/мм)	UA 300
Диапазон длин волн, нм	195-1150

Макс. эффективность светопередачи, нм	300
Ширина щели, мкм	100
Спектральное разрешение, нм	4,3
Оптические фильтры	OSC-UA 350 и 590 нм;
Оптический детектор	ПЗС-матрица Sony 2048 CCD
Покрытие детектора	DUV фильтр-покрытие для работы в диапазоне 190-350 нм; покрытие детектора для подавления 2-го порядка
Калибровка	радиометрическая калибровка канала 200-1100 нм, включая NL коррекцию

В спектрометре используется дифракционная решётка Avantes UA 300 штрих/мм, обеспечивающая эффективный спектральный диапазон эксплуатации прибора 195-1150 нм со спектральным разрешением 4,3 нм. Оптимизация параметров спектрометра обеспечивается цилиндрической коимирующей линзой для увеличения плотности падающего на фотодетектор излучения, специальным покрытием детектора для достижения спектрального диапазона измерений от 195 нм и подавления дифракционных эффектов 2-го порядка.

2048 элементный профиль спектрального распределения с CCD детекторной матрицы снимается управляемой микропроцессором электронной платой микроконтроллера спектрометра AS-5216 и по USB2 интерфейсу передаётся в персональный компьютер.

Спектрометр AvaSpec-2048 USB2 на базе электронной платформы AS-5216 имеет аналогово-цифровой преобразователь 16 bit, 2 MHz и HD-26 коннектор.

Версия USB2 отличается большим диапазоном времени интегрирования, более высокой скоростью получения и передачи данных, возможностью измерений в триггерном режиме и синхронизации измерений.

Коннектор цифрового входа/выхода HD-26 обеспечивает внешний триггерный запуск спектрометра, контроль работы шуттера и импульсного источника излучения в режимах абсорбционных и флуориметрических измерений.

### 2.3.2. Многофункциональный модульный измерительный комплекс на базе двухканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 FT-2-SPU

AvaSpec-2048FT – быстрый триггерный волоконно-оптический спектрометр – является специальной версией спектрометра AvaSpec-2048, которая может начинать накопление экспериментальных данных начиная с одной микросекунды задержки после внешнего запускающего сигнала. В качестве внешнего сигнала, запускающего измерения, служит TTL-сигнал входного цифрового порта пятнадцатиштырькового DB-15 коннектора интерфейса AvaSpec. Выходной TTL-порт служит для выдачи определяемого управляющей программой сигнала запуска лазера и наносекундной

задержки перед началом регистрации спектров. В программе имеется опция 42-наносекундной отрицательной задержки очень удобная для измерения параметров лазерных импульсов.

Эти возможности делают AvaSpec-2048FT эффективным средством для проведения специфических измерений, где требуется быстрый ответ или точная временная привязка к внешнему запускающему импульсу с разбросом всего лишь в  $\pm 21$  наносекунду, например таких, как непрерывный контроль продукции на конвейерных линиях в режиме реального времени. Выходной TTL-порт может использоваться также для Лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (LIBS) и флуоресцентных приложений, где измерения должны начинаться после лазерной вспышки. Модификация AvaSpec-2048FT-8 позволяет проводить LIBS-измерения в диапазоне 200-1000 нм с разрешением  $< 0.1$  нм.



Внешний вид модуля, используемого в комплексе УНИР, приведён на левом рисунке. Модуль оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 FT-2-SPU оснащён двумя измерительными каналами. В одном из каналов установлена дифракционная решётка UB 600 с максимумом отражения в 250 нм, в другом - IB 600 с максимумом в 1000 нм.

Такое решение обеспечивает высокую светопередачу оптического тракта спектрометра во всём допустимом диапазоне чувствительности ПЗС фотоприёмников и одновременное измерение спектров в разных спектральных областях.

#### Технические характеристики оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 FT-2-SPU

Число измерительных каналов	2
Интерфейс	USB1.1/RS-232
Питание	SPU по шине USB1
Управление измерениями	микропроцессор AS-161; TTL шуттер
Устройство отображения и обработки информации	Персональный компьютер
Программное обеспечение	<p><b>AvaSoft-Full</b> - универсальное программное обеспечение версия 7,0 Windows 95/.../XP;</p> <p><b>AvaSoft-Chem</b> - хеометрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-Color</b> - колориметрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-Irrad</b> - радиометрическое программное обеспечение</p>

	<b>AvaSoft-ThinFilm</b> - программное обеспечение измерения толщины пластин и плёнок  <b>AvaSoft-XLS</b> - программное обеспечение online переноса данных в Excel формат  <b>AS-161-DLL</b> - DLL драйверы автоматизации измерений, включая образцы на C++,  Visual basic, Delphi и Labview
--	---

#### Характеристики измерительных каналов спектрометра

Канал	Master	Slave
Оптическая скамья	Avabench-75	Avabench-75
Фокусное расстояние, мм	75	75
Дифракционная решетка (штрих/мм)	UB 600	IB 600
Диапазон длин волн, нм	249-781	625-1135
Макс. эффективность светопередачи, нм	250	1000
Ширина щели, мкм	50	100
Спектральное разрешение, нм	1,2	2,1
Оптические фильтры	OSC-UB 350 и 590 нм;	OSC-590 (для подавления 2-го порядка)
Оптический детектор	ПЗС-матрица Sony 2048 CCD	ПЗС-матрица Sony 2048 CCD
Покрытие детектора	DUV фильтр-покрытие для работы в диапазоне 190-350 нм;  покрытие детектора для подавления 2-го порядка	-
Калибровка	радиометрическая калибровка канала 249-781 нм, включая NL коррекцию	радиометрическая калибровка канала 625-1135 нм, включая NL коррекцию

AvaSpec-2048FT может эксплуатироваться во всех конфигурациях, обеспечиваемых возможностями платформы AvaSpec-2048 и соответствующего набора приставок. Модуль AvaSpec-2048 FT-2-SPU может использоваться во всех режимах, что и вышеописанный модуль AvaSpec-2048-USB2, для аналитических исследований в указанных спектральных диапазонах с одновременной регистрацией сигналов по двум независимым измерительным каналам. Оптико-электронные тракты измерительных каналов спектрометра откалиброваны производителем в абсолютных единицах.

#### 2.3.3. Оптоволоконный спектрометр AvaSpec-2048 TEC-USB2 с термоэлектрическим охлаждением фотодетектора



## Спектрометр AvaSpec-ULS2048x64-TEC-EVO

является специальной версией AvaSpec-ULS2048x64-EVO спектрометра, в котором 2048 CCD детектор оснащён охлаждающим термоэлектрическим элементом Пельтье.

Элемент Пельтье обеспечивает понижение температуры CCD детектора на 30 градусов С. Это позволяет повысить динамический диапазон измерений

спектрометрической системы более чем в десять раз и в 2-3 раза понизить уровень собственных тепловых шумов детектора.

Столь значимое улучшение параметра сигнал/шум позволяет использовать AvaSpec-2048 TEC спектрометры для измерения маломощных излучений в таких исследованиях, когда необходимо длительное накопление (интегрирование) измеряемого сигнала во временных интервалах длительностью более 5 секунд. Термоохлаждаемый спектрометр AvaSpec-2048 TEC особенно эффективен при флюориметрических и Рамановских исследованиях.

Унифицированная оптическая скамья AvaSpec-2048 TEC спектрометра сопрягается со всем набором оптических элементов и дополнительных устройств, разработанных для комплектации AvaSpec-2048 спектрометра.

AvaSpec-2048 TEC спектрометр конструктивно оформлен в настольном варианте. Такая конструкция обеспечивает эффективное охлаждение нагреваемой части элемента Пельтье и внутреннего источника питания.

### Технические характеристики оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 TEC-USB2

Число измерительных каналов	1
Интерфейс	USB2
Питание	по шине USB2
Управление измерениями	микропроцессор AS-5216; TTL шуттер
Устройство отображения и обработки информации	Персональный компьютер
Программное обеспечение	<p><b>AvaSoft-Full</b> - универсальное программное обеспечение версия 7,0 Windows 95/.../XP;</p> <p><b>AvaSoft-Chem</b> - хеометрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-Irrad</b> - радиометрическое программное обеспечение</p> <p><b>AvaSoft-OXY</b> - модуль оксиметрического программного обеспечения</p>



	<b>AvaSoft-XLS</b> - программное обеспечение online переноса данных в Excel формат
	<b>AS-5216-DLL</b> - DLL драйверы автоматизации измерений, включая образцы на C++, Visual basic, Delphi и Labview

#### Характеристики измерительного канала спектрометра

Оптическая скамья	Avabench-75
Фокусное расстояние, мм	75
Дифракционная решетка (штрих/мм)	UA 300
Диапазон длин волн, нм	200-1100
Макс. эффективность светопередачи, нм	300
Ширина щели, мкм	100
Спектральное разрешение, нм	4,3
Оптические фильтры	OSC-UA 350 и 590 нм;
Оптический детектор	ПЗС-матрица Sony 2048 CCD с термоэлектронным холодильником
Покрытие детектора	DUV фильтр-покрытие для работы в диапазоне 190-350 нм; покрытие детектора для подавления 2-го порядка
Калибровка	радиометрическая калибровка канала 200-1100 нм, включая NL коррекцию

### 2.3.4. Модуль абсорбционно-флуоресцентного мониторинга на базе оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048x14-USB2



AvaSpec-2048x14, внешний вид которого приведён на рисунке слева, — оптоволоконный спектрометр просветленного типа с высокой чувствительностью и высоким разрешением в ультрафиолетовом (UV) диапазоне длин волн.

Спектрометр AvaSpec-2048x14 специально разработан для измерений слабых источников света, для приложений и задач, требующих измерения флуоресценции и пропускания света.

Спектрометр оснащён специализированным фотодетектором, освещаемым с обратной стороны (обратно освещенным детектором),

Спектрометр AvaSpec-2048x14 построен на базе AvaBench-75 платформы с симметричной оптической скамьёй Czerny-Turner и 2048x14 элементной CCD детекторной матрицы освещенной с обратной стороны для измерений с высокой чувствительностью в ультрафиолетовом (UV) диапазоне длин волн. Оптический детектор построен на основе 2048 элементной детекторной матрицы, включающей 14 элементов в вертикальном направлении для оптимизации эффективности измерений.

Спектрометр AvaSpec-2048x14 специально разработан для измерений слабых источников света, для приложений и задач, использующих измерения флуоресценции и ультрафиолета (UV). Спектрометр имеет цифровой коннектор входа/выхода обеспечивающий внешний триггерный запуск спектрометра, контроль работы шуттера (заслонки) и импульсного источника излучения в линии инструментов Avantes. Спектрометр AvaSpec-2048x14 оснащен высокоскоростным интерфейсом USB2, позволяющим осуществлять манипуляции с данными в режиме получения 450 полноразмерных спектров за одну секунду и перенос данных за 2.24 мс как на вход спектрометра, так и на выгрузку данных. Питание AvaSpec-2048x14-USB2 осуществляется от внешнего компьютера по USB-кабелю.

#### Технические характеристики оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048x14-USB2

Число измерительных каналов	1
Интерфейс	USB2, RS-232
Питание	по шине USB2
Управление измерениями	микропроцессор AS-5216; TTL шуттер; двухканальный оптоволоконный переключатель, включая 4 COL-UV/VIS
Устройство отображения и обработки информации	Персональный компьютер
Программное обеспечение	AvaSoft-Full - универсальное программное обеспечение версия 7,0 Windows 95/.../XP;  AvaSoft-Chem - хеометрическое программное обеспечение  AS-5216-DLL - DLL драйверы автоматизации измерений, включая образцы на C++, Visual basic, Delphi и Labview

#### Характеристики измерительного канала спектрометра

Оптическая скамья	Avabench-75
Фокусное расстояние, мм	75
Дифракционная решетка (штрих/мм)	UA 300
Диапазон длин волн, нм	180-1160
Макс. эффективность светопередачи, нм	250
Ширина щели, мкм	50
Спектральное разрешение, нм	2,4
Оптические фильтры	OSC-UA 350 и 590 нм;
Уровень паразитного рассеянного света	< 0.1%
Оптический детектор	просветленная ПЗС матрица Sony 2048x14 CCD с обратным освещением
Покрытие детектора	DUV фильтр-покрытие для работы в диапазоне 190-350 нм;  покрытие детектора для подавления 2-го порядка
Эффективность детектора в UV диапазоне (200-300nm)	35-65%
Чувствительность (AvaLight-HAL, 8 μm кабель)	16000 единиц при накоплении сигнала за период интегрирования 1 мсек
Отношение сигнал / шум	500 : 1
Скорость передачи данных	< 2.24 мсек/измерение (зависит от числа передаваемых пикселей)
Аналого-цифровой преобразователь	16 bit, 1.5 MHz
Диапазон времён интегрирования	2.24 мсек - 10 мин



### 2.3.5. Модуль спектрометрии комбинационного рассеяния на базе оптоволоконного двухканального спектрометра AvaSpec-2048FT-2-TEC



Основное назначение спектрометра AvaSpec-2048FT-2-TEC – измерение с высоким спектральным разрешением (8-10 смР-1Р) тонкоструктурных спектров испускания объектов при возбуждении зелёной (532 нм) и красной (785 нм) линиями излучения лазерных источников.

К таким спектрам, в частности, относятся спектры комбинационного (Рамановского) рассеяния света веществ, а также некоторые виды люминесценции конденсированных систем в специфических условиях.

Модуль спектрометра AvaSpec-2048FT-2-TEC имеет два независимых измерительных канала с индивидуальными термостабилизированными диодными лазерными источниками оптического возбуждения с длиной волны 532 и 785 нм и выполнен в настольном моноблочном исполнении.

Оба канала регистрации спектрометра оснащены малошумящими детекторами Sony 2048 CCD с термоэлектронными холодильниками на элементах Пельтье.

**Технические характеристики оптоволоконного двухканального спектрометра AvaSpec-2048FT-2-TEC**

Число измерительных каналов	2
Интерфейс	USB1.1/RS-232
Питание	SPU по шине USB1
Управление измерениями	микропроцессор AS161;
Устройство отображения и обработки информации	Персональный компьютер
Программное обеспечение	AvaSoft-Full программное обеспечение версия 7,0 Windows 95/.../XP AvaSoft-Raman*, AvaSoft-Basic, и AvaSoft-Irrad программное обеспечение

\* Программные особенности AvaSoft-Raman, дополнительные к стандартным опциям AvaSoft-full:

- Отображение оси длины волны в см<sup>-1</sup>.

- Подпрограмма автокалибровки для определения пика возбуждения лазера (необходим тефлоновый (PTFE) калибровочный диск)
- Шкала выполнения времени интеграции, указывающая состояние времени интеграции
- Представление сигнала в нормированном виде
- Программное исправление по базовой линии для подавления флюоресценции
- Полезная особенность программного обеспечения AvaSoft-Raman — **функции хронологии (History)**, позволяющие отслеживать пиковые значения или значения концентрации против шкалы времени.

#### Характеристики измерительных каналов спектрометра

Канал	1 (Ava-Raman-532)	2 (Ava-Raman-785)
Оптическая скамья	Avabench-75	Avabench-75
Фокусное расстояние, мм	75	75
Дифракционная решетка (тип)	NC	NC
Диапазон длин волн, нм	531-750	784-963
Наблюдаемый диапазон рамановских сдвигов (см <sup>-1</sup> )	100-5000	100-2100
Ширина щели, мкм	25	25
Спектральное разрешение, нм	0.25 (12 см <sup>-1</sup> )	0.28 (8 см <sup>-1</sup> )
Оптический детектор	термоэлектрически охлаждаемый детектор Sony 2048 CCD	термоэлектрически охлаждаемый детектор Sony 2048 CCD
Отношение сигнал / шум	200:1 (для бензола)	300:1 (для бензола)
Источник возбуждения	термостабилизированный диодный лазер	термостабилизированный диодный лазер
Длина волны возбуждения (нм)	532	785
Ширина пика (нм)	< 0,2	< 0,2
Выходная мощность (mW)	50	500
Оптоволоконный зонд	3/8" стандартный экономичный оптоволоконный рамановский пробник Ava-Raman-PRB-532	оптоволоконный кабель FC-UV 200-1-SMA-PK (диаметр волокна 200 мкм);  бифуркационный оптоволоконный кабель FCB-UV200-2-ME (200 мкм )
Оптические фильтры	Широкополосный фильтр 532 нм; дихроичный фильтр; notch-фильтр 532 нм	-
Защитные очки	Ava-Raman-GL-532 нм	Ava-Raman-GL-785 нм
Держатель образца	Ava-Raman-SH-3/8" массивный держатель образца для 3/8" Раман пробника;  CUV-FL-UV/VIS флуориметрический кюветодержатель 10 мм оптический путь	

## 2.4. Технические характеристики источников света лабораторного комплекса УНИР

### 2.4.1. Компактные комбинированные AvaLight-DH-S, AvaLight-DHc и сбалансированный AvaLight-DH-S-BAL дейтериево-галогенные источники света

Комбинированные дейтериево-галогеновые источники света AvaLight-DHc широко используются в UV/VIS/NIR приложениях. Источники обеспечивают непрерывный спектр излучения с

высокой эффективностью и стабильностью в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах (215-2500 нм – см. рис. 2.2.2).

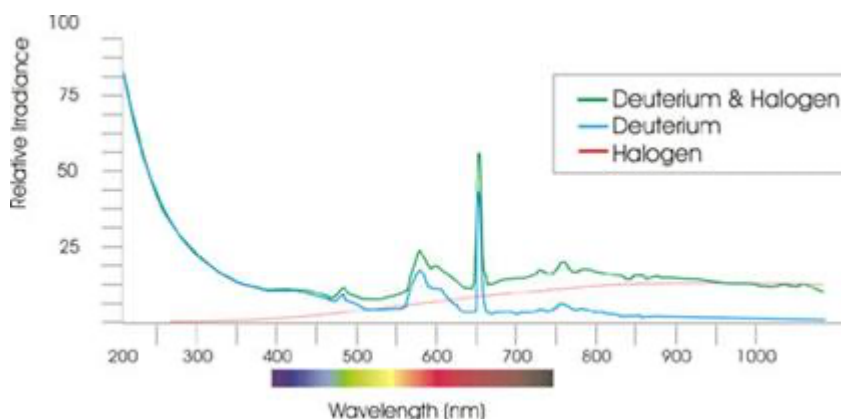


Рис. 2.4.1. Спектральные характеристики дейтериево-галогенных источников света AvaLight

## Технические характеристики

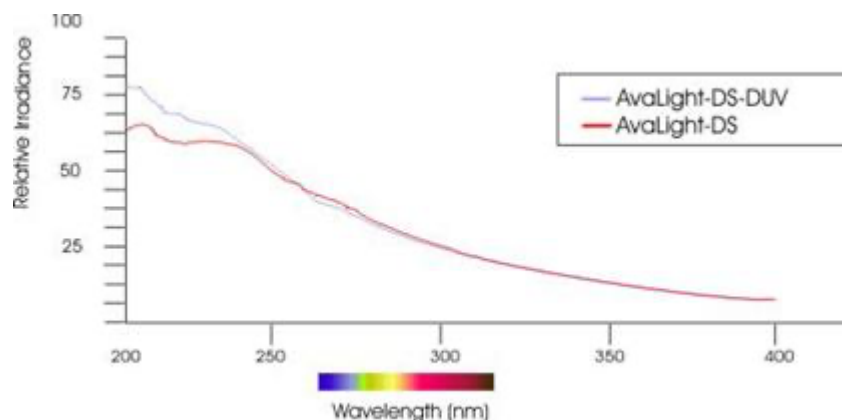
	Дейтериевый источник	Галогенный источник
<b>Спектральный диапазон</b>	200 - 400 нм	400 - 2500 нм
<b>Стабильность</b>	< 1 mAU	< 1 mAU
<b>Время выхода на рабочий режим</b>	8 мин	1 мин
<b>Дрейф</b>	< 0.25% / час	< 0.25% / час
<b>Оптическая мощность на выходе оптокабеля 600 мкм</b>	0.2 $\mu$ Watt	7 $\mu$ Watt
<b>Долговечность</b>	1000 часов	2000 часов
<b>Температурный диапазон</b>	5°C - 35°C	
<b>Потребляемая мощность</b>	12VDC / 450mA	

Излучатель источника AvaLight-DH-S сконструирован таким образом, что свет галогеновой лампы фокусируется через отверстие с небольшим диаметром в электроде дейтериевой лампы. Излучатель источника AvaLight-DH-S-BAL имеет дихроичный делитель лучей света от галогеновой и дейтериевой ламп, что обеспечивает гораздо более сбалансированный спектр в диапазоне 200-2500 нм.

Источники света AvaLight-DH оснащены TTL-затвором, управляемым программной оболочкой AvaSoft, обеспечивающим автоматизированный режим регистрации и сохранения значений темнового тока без выключения лампы.

Источники света AvaLight-DH стыкуются с оптоволоконным датчиком с помощью SMA-коннектора. Энергия излучения источника света AvaLight-DHc относительно невысока и для обеспечения достаточного уровня освещённости образца обычно используется кабель из оптического волокна большого диаметра.

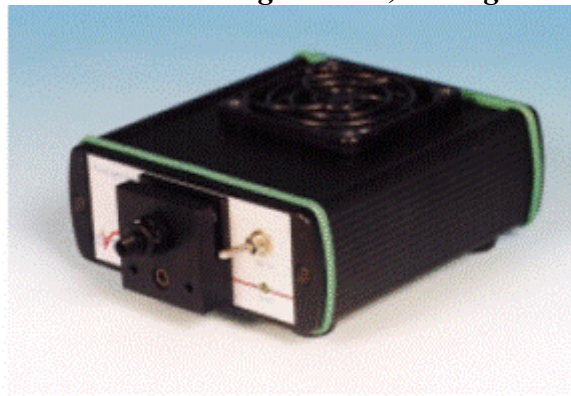
Стандартный источник света AvaLight-DH-S имеет специальный УФ фильтр ( $>220$  нм), предназначенный для защиты оптоволокну от засвечивания. Для использования в спектральном диапазоне ниже 220 нм предназначены лампы Deep UV, не содержащие такого УФ фильтра. Вариант источника света AvaLight-D(H)S-DUV предназначен для измерений от 190 нм. Для этих целей может использоваться также и более стабильная и долгоживущая дейтериевая лампа (AvaLight-D-B-DUV-LL). Сравнительные кривые распределения интенсивности в спектрах этих источников приведены на нижнем рисунке.



*Рис. 2.4.2. Спектральные характеристики дейтериево-галогенных источников света AvaLight-DS и AvaLight-DS-DUV*

Источники света AvaLight-DH, входящие в комплект лабораторного комплекса УНИР, выполнены в виде автономных модулей. Их внешний вид представлен на нижеприведённых рисунках:

***Источники AvaLight-DH-S, AvaLight-DHc***



***Источник AvaLight-DH-S-BAL***



Корпуса источников света оборудованы специальным держателем для квадратных светофильтров 50x50 мм толщиной до 6.5 мм.

## 2.4.2. Импульсный ксеноновый источник оптического излучения Avalight-XE

Импульсный ксеноновый источник оптического излучения Avalight-XE, в основном, предназначен для измерений люминесценции.

Для синхронизации вспышек импульсного источника света с принимаемыми спектрометром данными, блок источника Avalight-XE соединяется с измерительным модулем спектрометра AvaSpec 15-ти полюсным интерфейсом. Через этот интерфейс осуществляется и связь импульсного источника света с внешним генератором импульсов вспышек в электронном тракте модуля спектрометра AvaSpec. Блок Avalight-XE-2000 собственного генератора вспышек не имеет.

<i>Внешний вид источника Avalight-XE-2000</i>	<i>Технические характеристики</i>	
	Потребляемая мощность	12 VDC/10000 mA (12 W)
	Выходная мощность (max.)	45 mJ в импульсе
	Выходная мощность (средняя)	9.9 W
	Длительность вспышки	5 мкс (на 1/3 высоты)
	Время задержки	6 мкс
	Частота вспышек (max.)	220 Hz
	Долговечность излучателя	10 <sup>9</sup> импульсов
	Спектральный диапазон	200 - 1000 нм (см. рис. 2.2.3)
	Оптоволоконный коннектор	SMA-905
	Габаритные размеры	100 x 120 x 40 мм

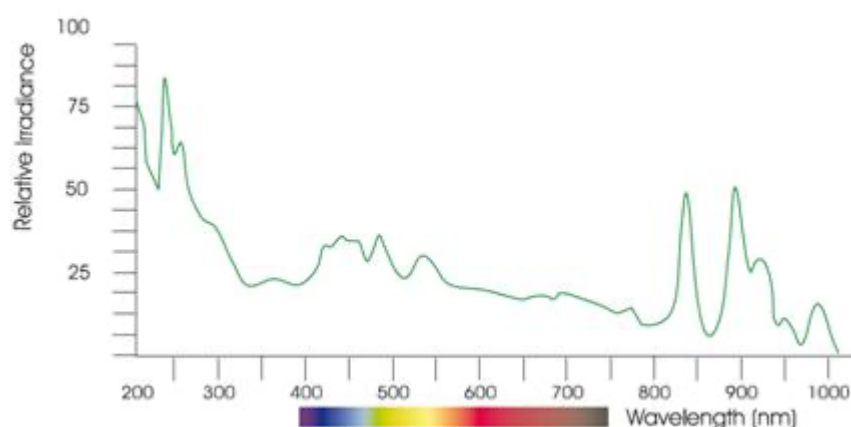


Рис. 2.2.3. Относительное распределение интенсивности в спектре излучения импульсного ксенонового источника света **Avalight-XE-2000**

### 2.4.3. Узкополосный источник излучения AvaLight-LED470

Узкополосный источник света предназначен для возбуждения люминесценции в ограниченном диапазоне видимой области спектра при решении частных прикладных задач, например таких как определение содержания растворённого кислорода в жидкостях и пр.

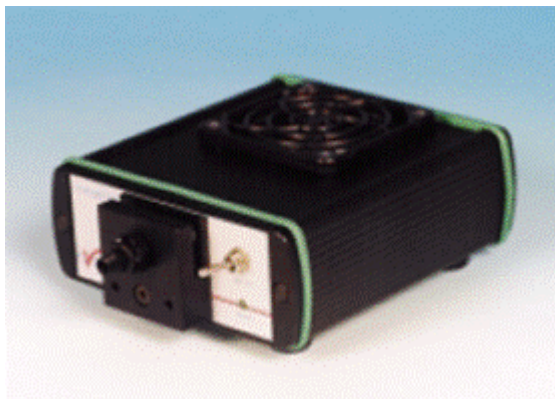
Источник света AvaLight-LED470 смонтирован в унифицированном корпусе, оборудованном разъёмом для стыковки светоизлучающего элемента с оптоволоконным кабелем с помощью стандартного SMA-коннектора. Светоизлучающим элементом в AvaLight-LED470 служит светодиод. Внешний вид и технические характеристики источника AvaLight-LED470 приведены ниже:

<i><b>Внешний вид AvaLight-LED 470</b></i>	<i><b>Технические характеристики</b></i>	
	Максимум полосы излучения, нм	475
	Полуширина (FWHM), нм	30
	Оптическая мощность	25 мкВт
	Коннектор	SMA-905
	Параметры электропитания	12 В, 40 мка
	Габариты, мм	175x110x40

### 2.4.4. Калибровочный источник излучения AvaLight-HAL-CAL

Калибровочный источник излучения AvaLight-HAL-CAL предназначен для калибровки чувствительности и абсолютной светопередачи оптико-электронного тракта спектрометров AvaSpec. AvaLight-HAL-CAL – компактный и дешевый источник света, калиброванный для VIS/NIR спектрального диапазона (350-1095 нм). В AvaLight-HAL-CAL используется специальная калибровочная галогеновая лампа и специальный калиброванный источник электропитания PS-24V/1.25A. Радиометрические характеристики лампы и электрические параметры источника электропитания AvaLight-HAL-CAL откалиброваны в соответствии с рекомендациями Национального института стандартных технологий США (NIST).





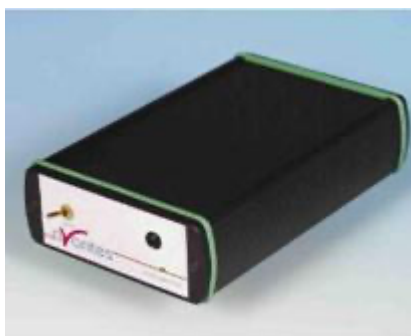
Конструктивное исполнение модуля калибровочного источника AvaLight-HAL-CAL (см. левый рисунок) обеспечивает возможность его использования при калибровке спектрометров AvaSpec, необходимой для обеспечения возможности измерения абсолютной спектральной интенсивности.

Несмотря на внешнее сходство конструктивного оформления модуля AvaLight-HAL-CAL с модулями AvaLight-DH-S и AvaLight-DHc, AvaLight-HAL-CAL не может использоваться как источник освещения для рутинных измерений.

AvaLight-HAL-CAL комплектуется встроенным светорассеивателем, косинусным корректором CC-UV/VIS-CAL с SMA адаптером и дискетой с файлом калибровки в формате ASCII. Файл калибровки AvaLight-HAL-CAL совместим и может читаться AvaSoft-IRRAD – пакетом программ, обеспечивающим превращение используемого спектрометра AvaSpec в спектрорадиометр.

Для калибровки оптических трактов спектрометров, использующих интегрирующую сферу AvaSphere-50-IRRAD, требуется специальная модификация калибровочного источника AvaLight-HAL-CAL-ISP.

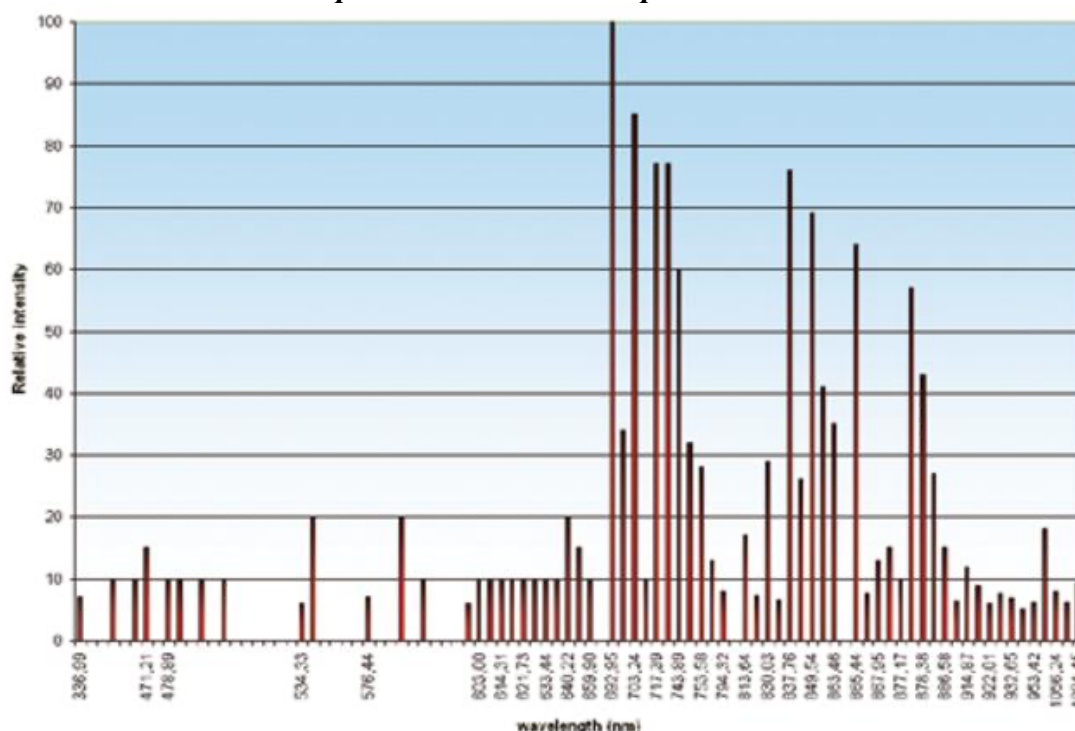
#### 2.4.5. Калибровочный источник излучения AvaLight-CAL



Калибровочный источник излучения AvaLight-CAL предназначен для калибровки шкалы длин волн спектрометров AvaSpec. В качестве калибровочного источника света в AvaLight-CAL применяется простая в использовании спектральная калибровочная лампа, излучающая линии эмиссионных спектров неона в диапазоне от 340 до 1100 нм. Большая часть линий в соответствии с собственной интенсивностью возбуждения находится непосредственно над уровнем фона.

Калибровочный источник света AvaLight-CAL имеет стандартный SMA 905 коннектор для оптоволоконного подсоединения спектрометрических систем. Внешний вид и внутреннее устройство модуля AvaLight-CAL и вид спектра ртутно-аргоновой лампы приведены на рисунках.

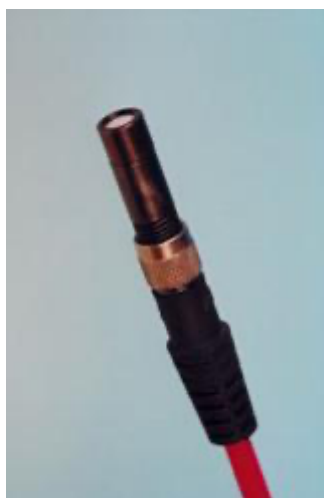
### *Положение спектральных линий калибровочной неоновой лампы*



## 2.5. Технические характеристики и назначение приставок и дополнительных устройств

Для обеспечения широких многофункциональных возможностей спектрометрических модулей, комплекс УНИР оснащён набором приставок и дополнительных устройств, технические характеристики и назначение которых описаны ниже.

### 2.5.1. Косинусный UV/VIS корректор



Косинусоидальный (косинусный) корректор CC-UV/VIS представляет собой спектрометрический датчик для радиометрических и фотоколориметрических исследований, созданный для сбора излучения (света) при апертуре 180 градусов, что исключает ряд проблем оптико-геометрического согласования.

Косинусный корректор CC-UV/VIS исполнен из диффузного материала оптимизированного для применения в диапазоне 200-1100нм. Корректор может быть подсоединён к любому оптоволоконному кабелю с SMA адаптером. При соединении с оптоволоконным спектрометром, косинусоидальный корректор может использоваться для измерения солнечной

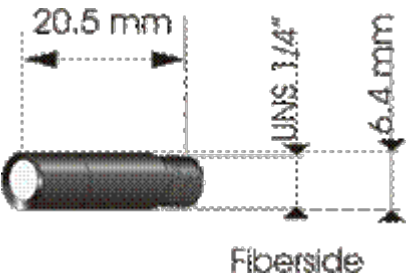


УФ - А и УФ - В радиации, световых и цветовых полей света окружающей среды, осветительных ламп, светоизлучающих фотодиодов и других источников света.

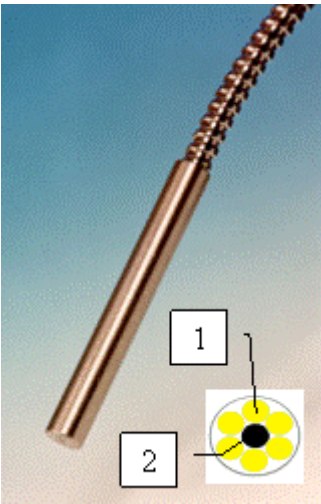
Косинусный корректор монтируется в цилиндре с внешним диаметром 0.25 дюйма и гладкой, покрытой черной оксидной пленкой, внутренней поверхностью. Диффузно рассеивающий тефлоновый материал представляет собой диск толщиной 1 мм в светоприёмном торце цилиндра.

Технические характеристики

Материал рассеивателя	Тефлон (200-1100 нм), толщина 1мм
Геометрия образца	Допустима выходная апертура до 180°
Коннектор	SMA 905
Температура эксплуатации	-60°C to 200°C



2.5.2. Стандартный рефлектометрический датчик (пробник)



Стандартный рефлектометрический датчик FCR-7xx200-2 позволяет получать спектральные характеристики света, рассеянного или отражённого исследуемой поверхностью.

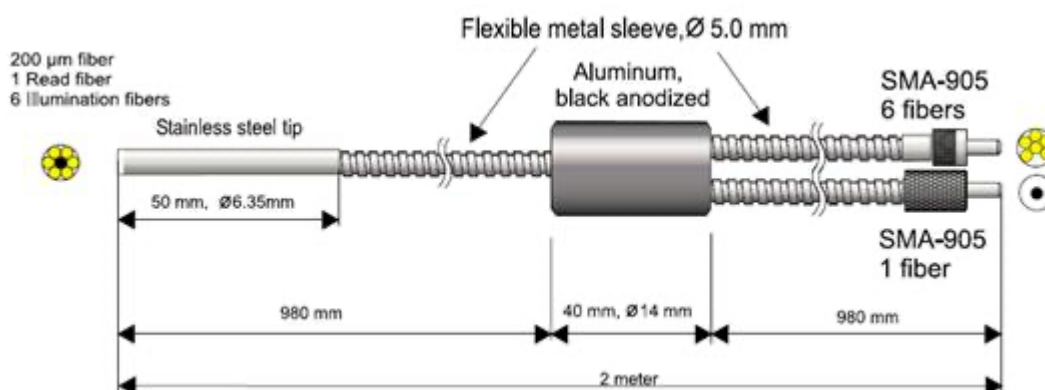
Рефлектометрический датчик FCR-7xx200-2 соединяется с источником света при помощи стандартного SMA905 коннектора, причем свет поступает к окончанию датчика по 6 оптоволоконным жилам 1. Отражённый или рассеянный поверхностью свет принимается седьмым волокном оптоволоконного кабеля 2, заканчивающимся самостоятельным SMA905 коннектором, который присоединяется к спектрометру или анализатору спектра.

Такая конструкция улучшает поступление излучения от источника света и увеличивает уровень полезного сигнала.

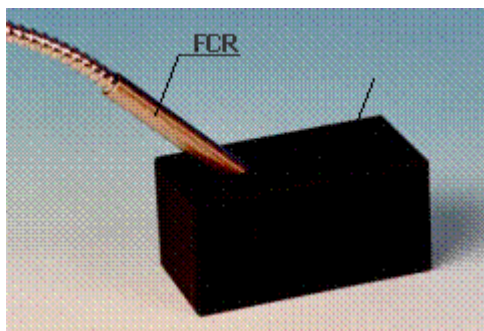
## Технические характеристики

<b>Оптоволоконный кабель</b>	7 или 19 волокон, центральное – 200 или 400 мкм, 6 или 17 светоподающих волокон, 1 или 2 – считывающих, Стандартная длина кабеля 2м, расщепление в середине.
<b>Численная апертура</b>	0,22
<b>Спектральный диапазон</b>	200-800 нм (UV/VIS) или 350-2000 (VIS/NIR)
<b>Коннекторы</b>	2 SMA905 коннектора
<b>Окончание пробника</b>	Коррозионно-стойкий стальной цилиндр длиной 50 мм, диаметр 6,35 мм .
<b>Температура эксплуатации</b>	-30°C to 100°C. (высокотемпературный пробник – FCR-7UV200-2-ME-HTX)
<b>Изгиб</b>	Наименьший допустимый радиус изгиба кабеля: долговременный – 60 мм, кратковременный (несколько секунд) – 20 мм

## Конструкция оптоволоконного кабеля рефлектометрического датчика



### 2.5.3. Держатель рефлектометрического датчика



Держатель рефлектометрического датчика RPH-1 предназначен для фиксирования стандартного рефлектометрического датчика (пробника) FCR под углом 90 или 45 градусов. Главным образом используется для цветовых измерений.

Угол 45 градусов используется для измерений диффузного отражения. Угол 90 градусов используется для измерений зеркального отражения.

В держателе имеются отверстия диаметром 6,5 мм для установки рефлексометрического датчика (пробника) и фиксирования его в требуемом положении. Держатель RPH-1 имеет размеры 60 x 30 x 30 мм. Изготовлен из черного анодированного алюминия.

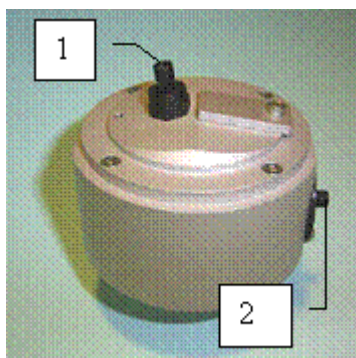


#### 2.5.4. Штатив рефлектометрического датчика Thinfilm Stage

Штатив Thinfilm Stage Предназначен для фиксирования стандартного рефлектометрического датчика (пробника) RPH-1 на требуемом расстоянии от поверхности анализируемого объекта.

Используется при измерения толщины тонкоплёночных покрытий. Может быть использован и в других приложениях, где требуется подобная геометрия расположения датчика относительно объекта.

#### 2.5.5. Интегрирующая сфера



Основная функция интегрирующей сферы – собирание света. Собранный свет может использоваться как распределённый источник освещения или как источник измерения. Интегрирующие сферы Avantes главным образом используются как источник измерения.

Принцип действия интегрирующей сферы заключается в том, что свет, входящий в сферу через входной порт (1), испытывает многократные диффузные отражения и однородно распределяется во внутреннем объёме сферы. Приёмный оптоволоконный кабель присоединяется к SMA-разъёму (2), расположенном под углом 90 градусов относительно входного порта (1) в участке сферы, отделённом световым экраном (перегородкой). Это обеспечивает независимость освещённости входной апертуры приёмного кабеля от углового

распределения света. Перегородка предотвращает попадание первых отражений в приёмное оптоволокно.

Интегрирующие сферы AvaSphere имеют диаметр 30, 50 или 80 мм и оснащаются 90-градусным SMA портом для измерений отражения и свечения. AvaSphere-30 имеет диаметр входного окна 6 мм, AvaSphere-50 оснащается 10 мм входным окном. Сферы диаметра 80 мм имеют входное окно диаметром 15 мм. Все входные окна имеют профилированное опорное ребро, обеспечивающее 180-градусный угол обзора.

Интегрирующие сферы AvaSphere выпускаются в двух модификациях:

- Irradiance integrating sphere (рис. 2.2.3) – для исследования параметров свечения источников света;
- Reflection integrating sphere (рис. 2.2.4) – для измерений интегральной и спектральной отражательной способности различных поверхностей и флуоресцентной спектроскопии.

Модификация радиометрической интегрирующей сферы для измерения плотности световых потоков (Irradiance integrating sphere) – рис. 2.4, предназначена для исследований параметров световых источников (лазеры, светодиоды, галогенные и др. лампы).

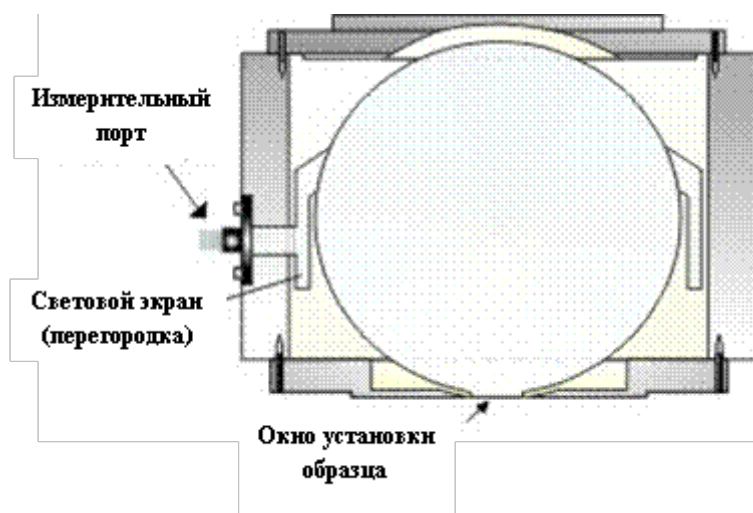
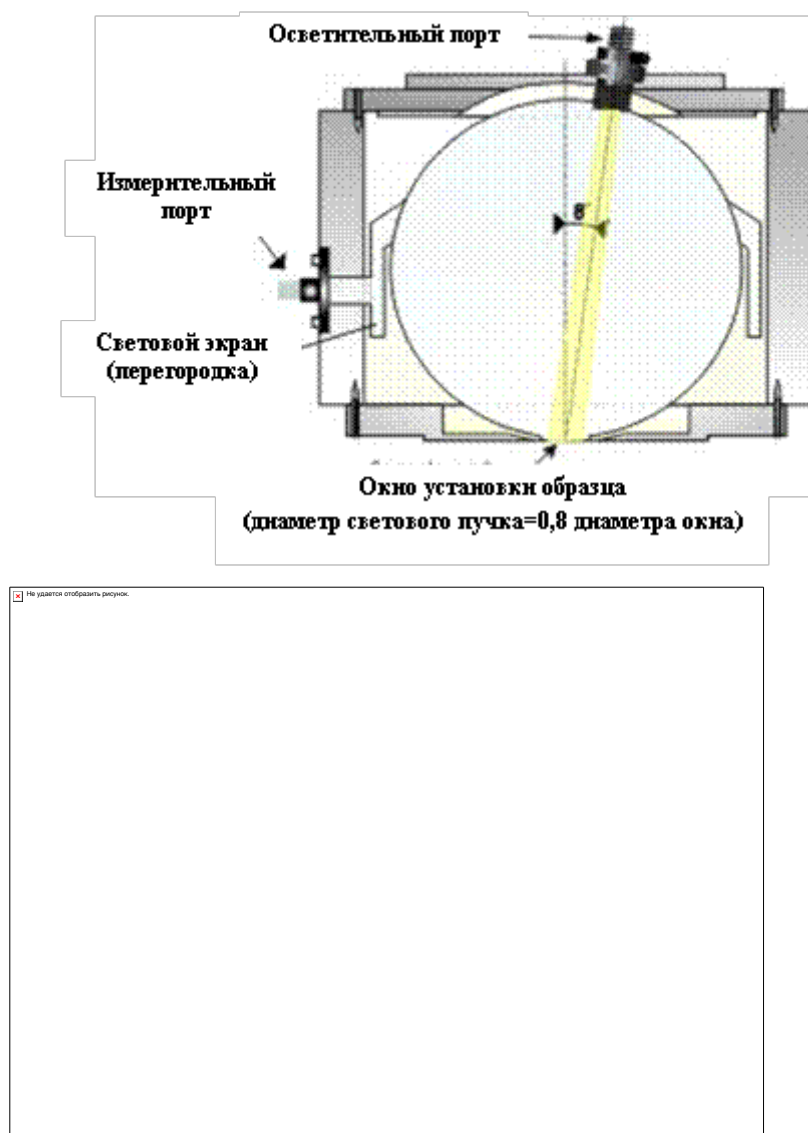


Рис. 2.5.1. Устройство радиометрической интегрирующей сферы *Irradiance integrating sphere*.

Для исследования свечения диодных лазеров (LED'S) разработан специальный адаптер, входящий в комплект сферы AvaSphere-50-IRRAD. Адаптер обеспечивает закрепление 3, 5 и 8 мм LED'S внутри сферы в правильном и воспроизводимом положении.

«Отражательная» сфера (Reflection integrating sphere) – рис. 2.2.4, используется для измерений общей интегральной отражательной способности различных поверхностей, для цветовых измерений и для флуоресцентной спектроскопии. Принцип измерения основан на прямом освещении и многократном диффузном отражении.



*Рис. 2.5.2. Устройство отражательной интегрирующей сферы Reflection integrating sphere*

Отражательная сфера (Reflection integrating sphere) имеет дополнительный осветительный SMA-порт, смещённый на 8 градусов относительно прямого освещения, устройство сопряжения сферы с оптоволоконном и COL-UV/VIS коллиматорную линзу, сопрягающуюся с источником света.

Источник света может быть подключён к 8-градусному SMA-коннектору чрез волоконно-оптическое сопряжение, что делает интегрирующую сферу идеальным источником однородного (равномерного) освещения.

Внутренняя поверхность интегрирующей сферы изготовлена из материала, обеспечивающего высокие характеристики диффузного отражения. Этот материал обеспечивает высокую эффективность диффузного отражения света ( $> 96\%$ ) в широком диапазоне длин волн (250-2500 нм). Спектральные отражательные характеристики материала отражающих покрытий сферы и отражателя приведены на рис. 2.2.5. Технические характеристики интегрирующих сфер AvaSphere содержатся в таблице.

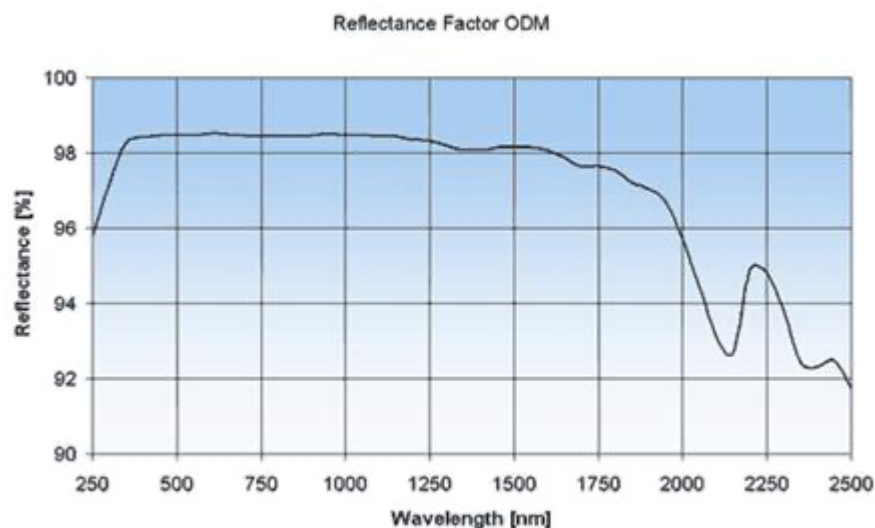


Рис. 2.5.3. Кривая спектрального распределения отражающего покрытия AvaSphere

#### Технические характеристики интегрирующих сфер AvaSphere

	AvaSphere-30	AvaSphere-50	AvaSphere-80
<b>Внутренний диаметр (мм)</b>	30	50	80
<b>Диаметр входного окна (мм)</b>	6	10	15
<b>Внешние габариты (мм):</b> диаметр высота	49.5 40	69.5 60	109 95

#### Характеристики отражающего покрытия (см. рис.2.5.3)

<b>Отражательная способность</b>	98%	98%	98%
350-1800 нм	92%	92%	92%
250, 2500 нм			
<b>Макс. температура эксплуатации</b>	280 °C	280 °C	280 °C

### 2.5.6. Референсный белый отражатель



Референсный белый отражатель WS-2 представляет собой пластину, изготовленную из белого диффузно отражающего материала на полимерной основе из политетрафторэтилена (ПТФЭ). Обеспечивает самые высокие требования к диффузному отражению.



WS-2 главным образом используется в колориметрии и таких приложениях, где в ходе измерений необходимо получать значения стандартного опорного (референсного) сигнала от белой диффузной поверхности.

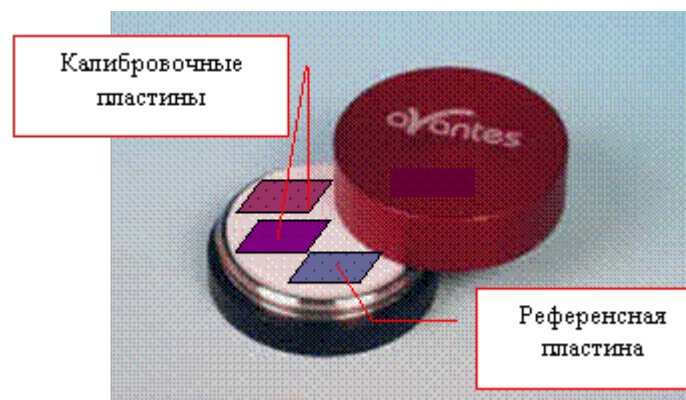
Благодаря тончайшей подготовке ПТФЭ и технологии получения его в аморфной структуре, пластина отражает свет с эффективностью около 98% в спектральном диапазоне 350-1800 нм, а в диапазонах около 250 и 2500 нм – более 92%. Материал отражателя WS-2 имеет практически те же спектральные характеристики, что и внутреннее покрытие интегрирующей сферы (рис. 2.2.5). ПТФЭ – гидрофобный и химически инертный полимерный материал, обладает долговременной стабильностью даже при облучении в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Технические характеристики диффузного отражателя WS-2 приведены в таблице.

#### Технические характеристики белого диффузного отражателя WS-2

Отражательная способность (см. рис. 2.2.5)		Макс. температура эксплуатации	Размеры пластины (мм)		Размеры футляра (мм)
350-1800нм	250, 2500нм		диаметр	толщина	диаметр
98%	92%	280 °C	32	10	38

#### 2.5.7. Стандартный набор тонкослойных пластин Thinfilm Standard

Thinfilm Standard используется при интерференционных измерениях толщины тонких плёнок и покрытий, где в ходе измерений необходимо получать значения стандартного опорного (референсного) сигнала и проводить юстировку и калибровку измерительного тракта.



Стандартный набор представляет собой набор кремниевых (Si) пластин с нанесённым на них тонкослойным покрытием из двуокиси кремния (SiO<sub>2</sub>). Набор состоит из одной референсной пластины, используемой в процессе измерений для получения опорного сигнала, и двух калибровочных пластин с покрытием известной толщины.

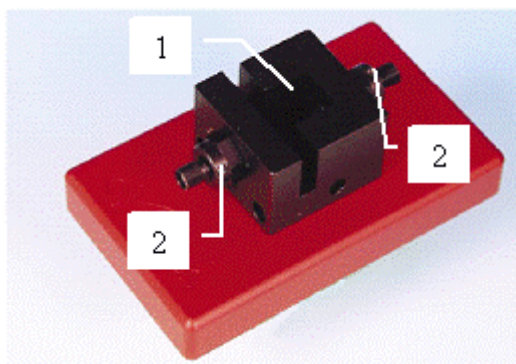
#### Технические характеристики калибровочных пластин

	Номер образца		
	1	2	3 (референсный)

Контрольная толщина	814,6 нм	334,7 нм	-
Точность измерений	$\pm 0,1$ нм	$\pm 0,1$ нм	-
Материал плёнки	SiOB2B	SiOB2B	-
Материал подложки	Si	Si	Si
Диапазон измерений	235 нм – 1001 нм	235 нм – 1001 нм	235 нм – 1001 нм

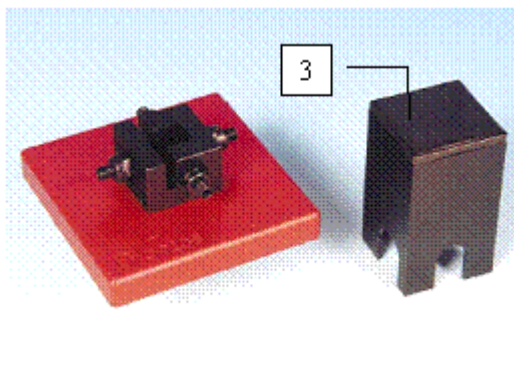
### 2.5.8. Держатели жидкостных кювет

Держатели CUV-UV/VIS, CUV-ALL-UV/VIS и CUV-FL-UV/VIS предназначены для проведения исследований светопропускания, рассеяния и (или) люминесценции жидких объектов в оптических кюветах с наружным поперечным сечением 10x10 мм. Все держатели оборудованы коллимационными линзами COL-UV/VIS (200-2000 нм) для оптимизации светосбора и сопряжения с оптоволоконными кабелями через SMA-коннекторы; специальный 5 мм паз предназначен для размещения оптических фильтров, светоослабителей и пр.



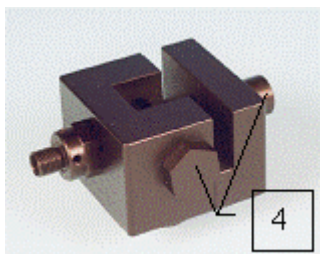
**Держатель CUV-UV/VIS** предназначен для измерений светопропускания. Кювета с исследуемым образцом при этом располагается в специальном окне держателя (1) между торцами двух коллимационных линз COL-UV/VIS (2), к корпусам которых присоединяются SMA-коннекторы светоподающего и светоприёмного оптоволоконных кабелей.





Держатель CUV-ALL-UV/VIS имеет в оптическом тракте 4 коллимационные линзы, расположенные под прямым углом, и защитный кожух (3) для уменьшения внешней паразитной засветки. Предназначен для проведения измерений характеристик исследуемых объектов при разном расположении светоподающего и светоприёмного

оптоволоконных кабелей.

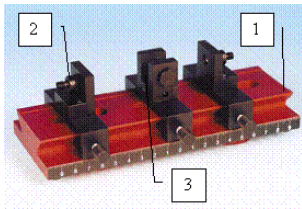


Держатель CUV-FL-UV/VIS, предназначенный для флуоресцентных измерений, имеет две расположенные под прямым углом коллимационные линзы. Противоположные им торцы оптической ячейки держателя оборудованы алюминиевыми зеркалами CUV-FL-MIRROR (4) с защитным покрытием из  $\text{SiO}_2$ .

## Технические характеристики

	CUV-UV/VIS	CUV-ALL-UV/VIS	CUV-FL-UV/VIS
Размер кюветы, мм	10x10		
Сопряжение оптоволоконном с	2xCOL-UV/VIS, SMA	4xCOL-UV/VIS, SMA	2xCOL-UV/VIS, SMA, 2 зеркала
Паз для светофильтра, мм	5		
Оптическая ячейка	Чёрный анодированный алюминий, 45x45x80 мм		
Общие габариты, мм	100x60x40	100x100x40	

Держатель переменной длины CUV-VAR-UV/VIS размещён на оптическом рельсе CLH-VAR-UV/VIS (1). Коллимационные линзы оптического тракта (2) и держатель оптической ячейки (3) размещены на съёмных подвижных кронштейнах, что обеспечивает размещение объектов шириной 10 мм с длиной оптического пути до 160 мм.

Внешний вид CUV-VAR-UV/VIS	Технические характеристики	
	Сопряжение оптоволоконном	с 2xCOL-UV/VIS, SMA
	Оптическая длина, мм	0-160
	Держатель ячейки (внутр.)	10x20 мм
	Фокусное расстояние коллимационной линзы, мм	26
	Габариты рельса, мм	200x80x25
	Общие габариты, мм	200x96x62

### 2.5.9. Проточная оптическая кювета Flowcell

Проточная оптическая кювета предназначена для измерений спектров пропускания в непрерывно сменяющемся потоке жидкости в режиме реального времени. Исследуемый образец в оптической ячейке кюветы (1) непрерывно протекает между торцами коллимационных линз (2) светоподающего и светоприёмного оптоволоконных кабелей, стыкующихся с ячейкой SMA-коннекторами. Резьбовые фланцы (3), диаметром 1/4", 1/2" или 1", обеспечивают герметичное подключение кюветы к проточному трубопроводу.

Внешний вид	Технические характеристики			
	Диаметр фланца	1/4"	1/2"	1"
	Оптическая длина, мм	5	10	20
	Объём образца, мкл	62	124	248
	Внешние габариты	55x45x15	72x50x22	98x60x38
	Спектральный диапазон, нм	200-2000		
	Сопряжение с оптоволоконном	2xSMA-905		
	Фок. расстояние линз, мм	8,7		
	Макс. температура	80° C (спец. заказ – 200° C)		
	Макс. Давление, бар	10		
	Материал	Нерж. сталь		

Проточная оптическая кювета может использоваться при мониторинге технологических процессов. В частности – в контроле качества и безопасности воды магистральных систем водоснабжения и экологическом мониторинге водных систем.

### 2.5.10. Оптоволоконный лабораторный лазерный зонд AvaRaman-PRB (-FP/FIP)

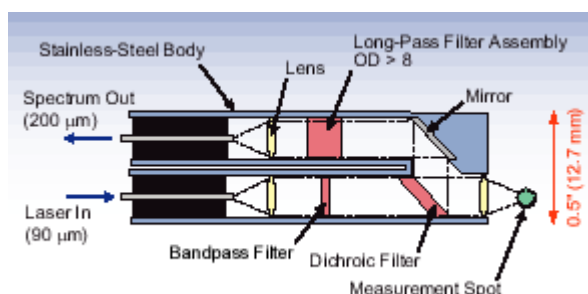
Предназначен для измерения спектров комбинационного рассеяния. На верхней панели кожуха зонда AvaRaman-PRB (левый рисунок) имеется кнопка управления шторкой 1, перекрывающей поток лазерного излучения, и её индикатор 2.

Внутри кожуха зонда (правый рисунок) размещаются специальные фильтры лазерного излучения и светофокусирующая оптика. Оптические элементы пробника обеспечивают фокусирование лазерного излучения и сбор сигнала вторичной эмиссии из центра 10-ти миллиметровой оптической кюветы (на расстоянии ~5 мм от торца зонда), располагающейся в держателе образцов AvaRaman-SH (см. 2.2.3.10 – нижний рисунок).

*Внешний вид AvaRaman-PRB*



*Внутреннее устройство*

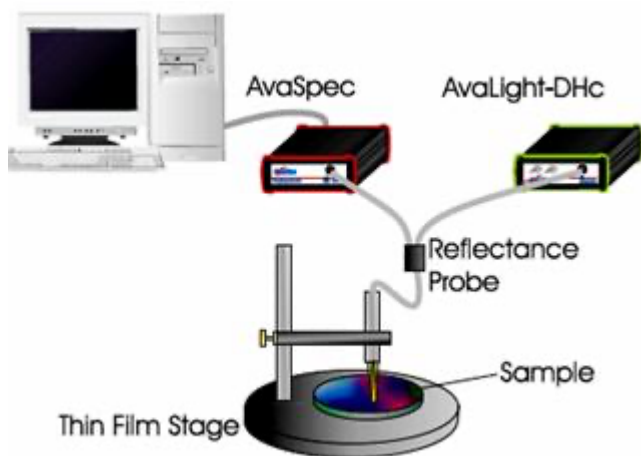


### 2.5.11. Лабораторный держатель образцов AvaRaman-SH.

Держатель образцов AvaRaman-SH предназначен для размещения исследуемого образца и закрепления лабораторного лазерного зонда AvaRaman-PRB в фиксируемом положении. Держатель снабжён светозащитным кожухом, снижающим уровень паразитной засветки исследуемого объекта и экранирующим лазерное излучение с целью снижения риска его воздействия на оператора и персонал лаборатории.

## 2.6. Конфигурации модульных узлов AvaSpec для практических измерений

### 2.6.1. Измерение толщины тонких пленок



Система измерения толщины тонких пленок Thin Film базируется на измерении параметров интерференции света для определения оптических параметров толщины слоя. Паттерн интерференции света при помощи математической функции преобразуется в характеристики толщины пленки. В случае системы с одиночным слоем толщина этого слоя (пленки) может быть вычислена, если известны оптические характеристики материала пленки и

подложки.

Типичный измерительный комплекс Avantes для измерения толщины плёнок приведён на рисунке. Необходимые для проведения измерений толщины плёнок компоненты перечислены в таблице.

*Компоненты системы для измерения толщины тонких пленок*

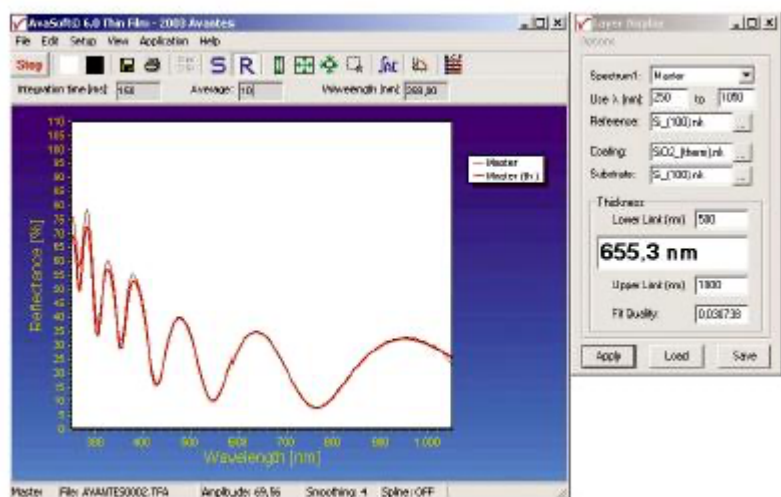
Спектрометр	AvaSpec- 2048 Дифракционная решетка UA (200-1100nm), DCL-UV/VIS, 100µm входная щель , DUV покрытие, OSC-UA
Толщина слоя	10 nm- 50 µm, разрешение 1nm
Программное обеспечение	AvaSoft-ThinFilmU
Источник света	TUAvaLight-DHcUT компактный дейтериево-галогеновый источник света
Оптоволоконные компоненты	Датчик отражения FCR-7UV200-2-ME UV/VIS, 2m, SMA
Принадлежности	Держатель датчика ThinFilm
	Комплект калибровочных эталонов ThinFilm-standard - 2 калибровочных слоя SiO <sub>2</sub> различной толщины и референсный слой.

Программное обеспечение AvaSoft-ThinFilm имеет расширяемую встроенную базу данных по оптическим характеристикам наиболее часто применяемым материалам подложки и пленки.

Система измерения толщины тонких пленок AvaSpec Thin Film может измерять толщину пленки в диапазоне **10 нм – 50 мкм** с разрешением **1 нм**.

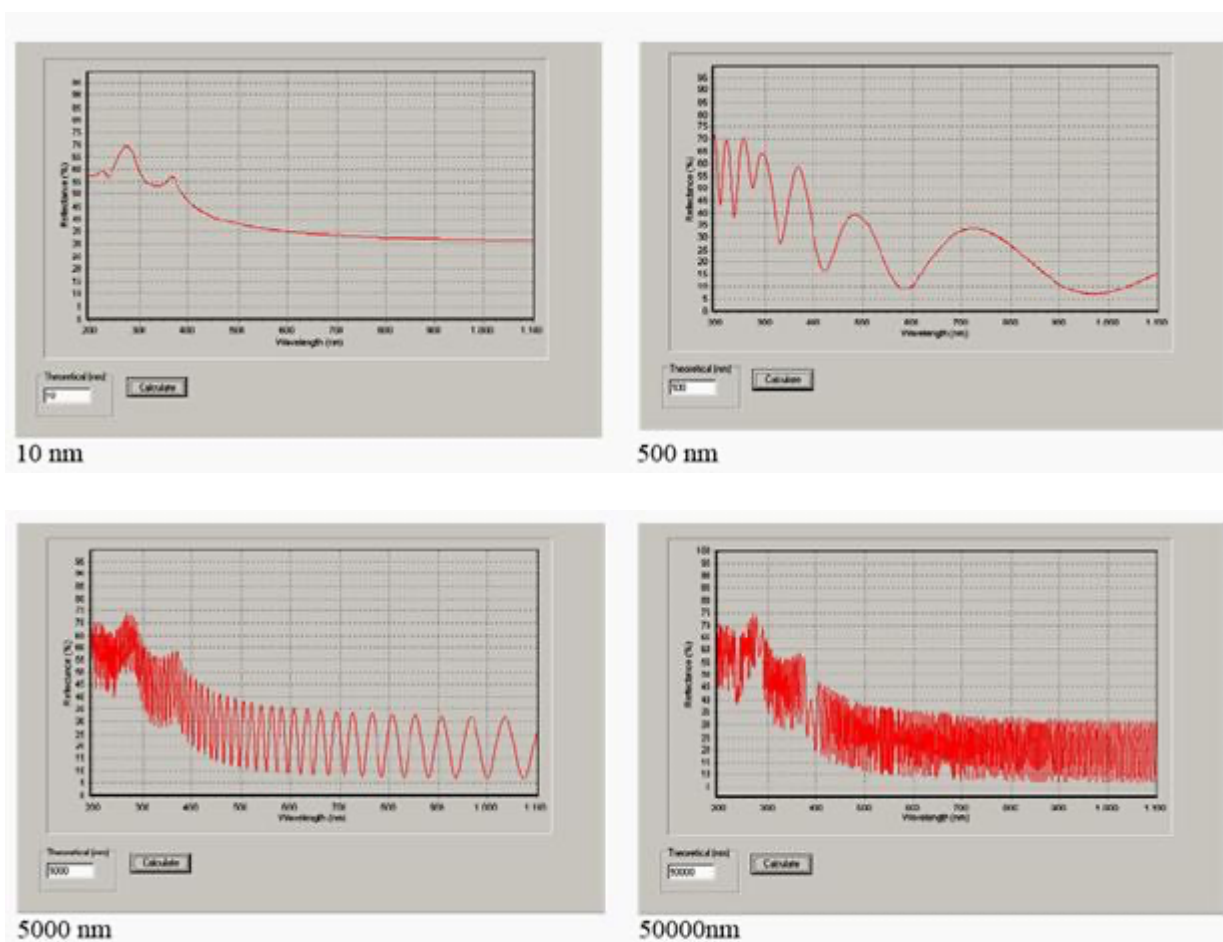
Измерение толщины тонких пленок AvaSpec Thin Film часто применяется в технологиях травления, в случаях, когда необходим контроль и измерение процессов вытравливания плазмой и отложения слоя. Измерение толщины тонких пленок производят также в областях, где определяют характеристики оптически прозрачных пленок на металлах или стекле.

Программное обеспечение AvaSoft Thin film применяется для мониторинга толщины тонкой пленки в режиме реального времени может быть расширено при помощи дополнений [Спектрометрический мониторинг](#) и [Экспорт в Excel](#).



Комплект для настройки точности измерений и калибровки системы содержит 2 калибровочных слоя  $\text{SiO}_2$  различной толщины и референсный слой. Типичная интерференционная картина, полученная при измерении калибровочного слоя приведена на рисунке справа.

Эффекты, наблюдающиеся в изменении характера интерференционной картины при измерении слоёв разной толщины, проиллюстрированы на нижеследующих рисунках:

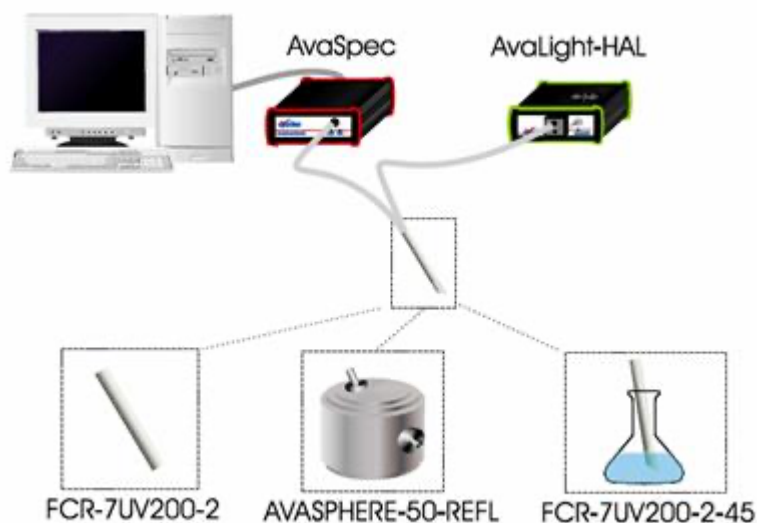


## 2.6.2. Колориметрические измерения

Колориметрические (цветовые) измерения различных окрашенных объектов и жидкостей могут проводиться в различных конфигурациях с использованием рефлексометрических детекторов или с применением интегрирующей сферы. Для колориметрических измерений требуется спектрометр,

оптимизированный для спектрального диапазона 380-780 нм со спектральным разрешением порядка 5 нм. Кроме того необходим источник «белого» света и белый референсный образец (стандарт белого цвета).

Для различных прикладных целей, таких как исследование окрашенных текстильных изделий, бумаги, фруктов, вин и пр. требуется применение различных измерительных детекторных устройств.



Типичный состав измерительного комплекса для многофункциональных колориметрических исследований приведён на рисунке.

Компоненты и принадлежности комплектации комплексов для решения разных прикладных задач приведены в таблице.



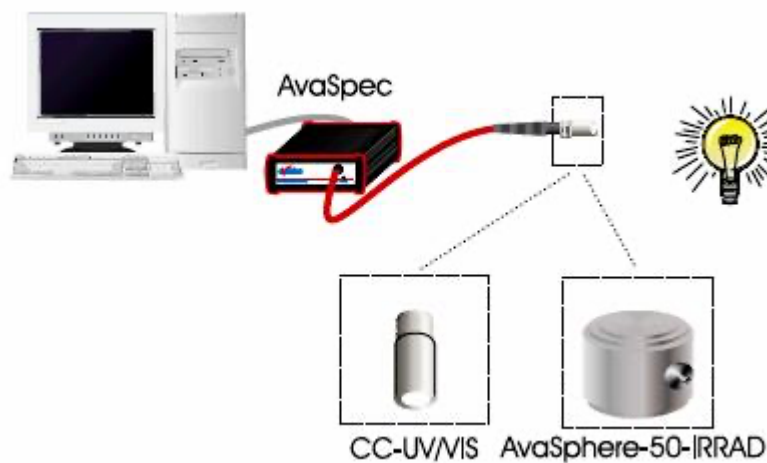
### Компоненты, используемые в разных методиках колориметрических измерений

	Методика измерений		
	Измерение цветового отражения с рефлектометрич. датчиком	Измерение цветового отражения с интегрирующей сферой	Измерение цветового отражения в окрашенных жидкостях
Спектрометры	AvaSpec-102, решётка VA (360-780 нм), щель 100 мкм  AvaSpec-256, решётка VA (360-780 нм), щель 50 мкм  AvaSpec-2048, решётка BB (360-780 нм), щель 200 мкм		
Программное обеспечение	AvaSoft-full и AvaSoft-Color		
Источник света	AvaLight-Hal с источником электропитания PS-24V-1.25A		
Волоконная оптика	Рефлектометрический пробник FCR-7UV200-2 с 6x200 мкм осветительными волокнами и 1x200 мкм считывающим волокном, 2 м, UV/VIS, SMA	1 зсю AC-ГМ600-2 осветительное волокно 600 мкм UV/VIS, 2 м, SMA	Рефлектометрический пробник FCR-7UV200-2-45 с наклонным под 45PoP 2 м, UV/VIS, SMA окном, с 6x200 мкм осветительными волокнами и 1x200 мкм считывающим волокном,
Принадлежно-сти	Держатель пробника RPH-1  Референсная пластина WS-2	Интегрирующая сфера AvaSphere-50-REFL  Референсная пластина WS-2	Референсная пластина WS-2

### 2.6.3. UV/VIS/NIR радиометрические исследования

Радиометрические измерения могут проводиться на различных длинах волн, с использованием косинусного корректора или интегрирующей сферы в УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах

Спектральные радиометрические измерения могут проводиться в различных экспериментальных конфигурациях и широком диапазоне дли волн с использованием косинусного корректора или интегрирующей сферы. Аппаратура Avantes обеспечивает проведение радиометрических измерений в ультрафиолетовом (УФ), видимом (Вид) и ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах.



Типичный измерительный комплекс Avantes для радиометрических исследований приведён на рисунке. Необходимые для проведения радиометрических измерений компоненты перечислены в таблице.

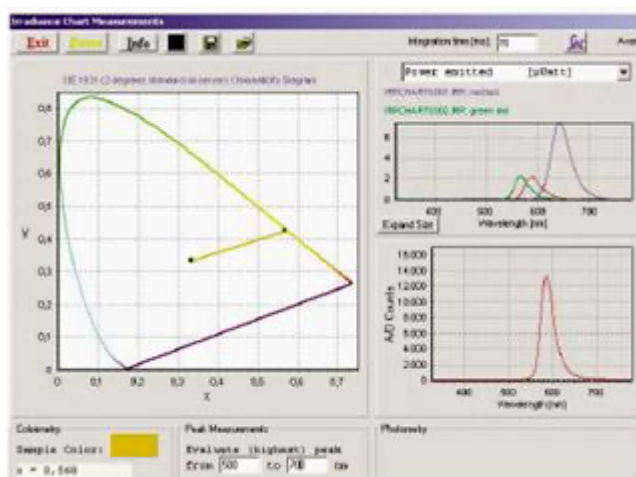
Компоненты измерительной системы для радиометрических исследований

	UV радиометрия	VIS радиометрия	NIR Irradiance
Спектрометр	AvaSpec- 2048		AvaSpec-NIR256-2.5
	решетка UC (200-400 нм), DUV, щель 50 μm	решетка VA (360-1100 нм), щель 50μm, OSC	решетка NIRY (1100-2500 нм), щель 50μm, OSF1000

	решетка UA (200-1100 нм), DUV, щель 50µmt, OSC-UA		
Программы	AvaSoft-full и AvaSoft-IRRAD		
Калибровка	IRRAD-CAL-UV (200-400 nm)	IRRAD-CAL-VIS (360-1100nm)	IRRAD-CAL-NIR (1100-2500nm)
	IRRAD-CAL-UV/VIS (200-1100nm)		
Источники света*	AvaLight-DH-CAL калибровочная дейтериево-галогенная лампа с косинусным корректором CC-UV/VIS	AvaLight-HAL-CAL калибровочная галогенная лампа с косинусным корректором CC-UV/VIS	AvaLight-HAL-CAL экстра NIR калибровочная галогенная лампа с косинусным корректором CC-UV/VIS
Волоконная оптика	UV/VIS кабель 1 pcs. FC-UV200-2 200µm, 2m, SMA		VIS/NIR кабель FC-IR200-2 200µm, 2m, SMA
Дополнительные принадлежности	Косинусный корректор CC-UV/VIS или интегрирующая сфера AvaSphere-IRRAD-CAL		CC- VIS/NIR

\* необходимы при самостоятельной перекалибровке измерительной системы (см. ниже)

При изготовлении спектрометры калибруются в лаборатории Avantes для абсолютных радиометрических измерений в диапазонах 200-400 нм, 350-1100 нм (объединённый УФ/Вид диапазон) или 1100-2500 нм. Эта калибровка проводится для каждого конкретного оптоволоконного измерительного комплекса и заносится в стандартный набор установок в памяти измерительной системы. Набор калибровочных установок впоследствии не может быть произвольно изменён.



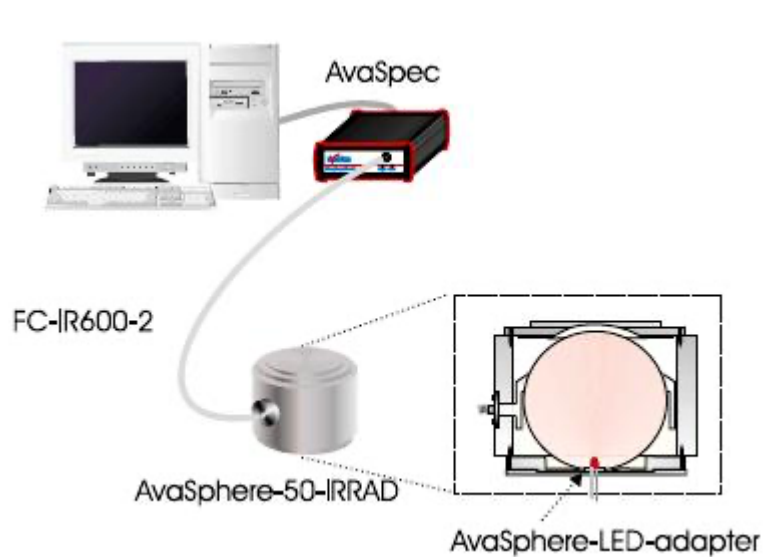
Для расширения возможностей стандартного набора калибровочных установок, процедура калибровки может быть выполнена пользователем самостоятельно с использованием калибровочного УФ/Вид источника света на базе галогенной лампы AvaLight-HAL-CAL или калибровочного источника УФ/Вид/БИК на базе дейтериево-галогенной лампы AvaLight-DH-CAL.

Универсальное программное обеспечение AvaSoft-IRRAD позволяет загружать и использовать калибровки для получения абсолютных значений радиометрических характеристик исследуемых объектов.

## 2.6.4. Исследования радиометрических параметров светоизлучающих диодов

Производство светоизлучающих диодов с разнообразными характеристиками цветовых параметров и яркости требует контроля их спектральных характеристик.





Типичный измерительный комплекс Avantes для спектрально-радиометрических исследований светоизлучающих диодов приведён на рисунке. Необходимые для проведения радиометрических измерений компоненты перечислены в таблице.

## Компоненты измерительной системы для спектрально-радиометрических исследований светодиодов

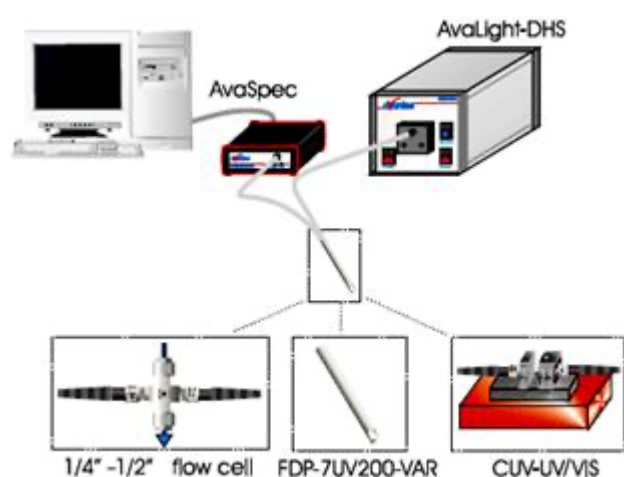
Спектрометр	AvaSpec- 2048, решетка VA (360-1100 нм), щель 25µm, DCL-UV, OSC
Программы	AvaSoft-full и AvaSoft-IRRAD
Калибровка	IRRAD-CAL-VIS 360-1100 нм (AvaLight-HAL-CAL-ISP калибровочная галогенная лампа с интегрирующей сферой)
Волоконная оптика	UV/VIS кабель 1 pcs. FC-UV600-2 600µm UV/VIS, 2m, SMA
Принадлежности	интегрирующая сфера AvaSphere-50-IRRAD-CAL

### 2.6.5. Фотоабсорбционные измерения в УФ и видимом диапазоне



Фотоабсорбционные измерения в жидкостях могут проводиться с разными конфигурациями аппаратуры и в различных спектральных диапазонах с использованием волоконно-оптических погружных пробников, проточных ячеек для контроля за изменениями фотоабсорбционных параметров в реальном времени или с применением кюветодержателей для проведения исследований характеристик жидких систем в фотометрических измерительных

кюветах.



Спектрометр может быть оптимизирован для измерений в УФ и видимом диапазоне спектра в области 200-1100 нм со спектральным разрешением 1,4 нм. Для фотоабсорбционных измерений в этом диапазоне используется комбинированный дейтериево-галогенный источник света. При этом возможно использование различных пробников для решения специфических прикладных задач. Состав спектрометрического комплекса для

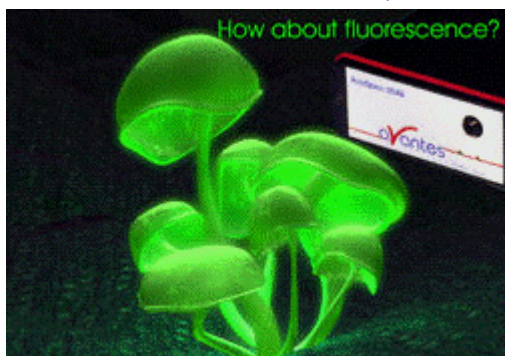
многофункциональных фотоабсорбционных измерений проиллюстрирован на рисунке. В таблице

приведена комплектация измерительной системы и принадлежностей для разных методических приложений.

#### Компоненты комплектации спектрометра для фотоабсорбционных измерений

	In-line фотометрия с проточной кюветой	In-line фотометрия с погружным пробником	In-line фотометрия с кюветодержателем
<b>Спектрометр</b>	AvaSpec-2048, решётка UA (200-1100 нм), 25 мкм щель, DCL-UV, OSC		
<b>Прогр. обеспечение</b>	AvaSoft-full и AvaSoft-CHEM		
<b>Источники излучения</b>	Комбинированный дейтериево-галогенный источник		
<b>Волоконная оптика</b>	соляризованное детекторное волокно 2psc. FC-UV200-2SR 200мкм, 2 м, SMA	FDP-7UV200-2-VAR фотометрический пробник с переменной базой 6x200 мкм осветительных, 1 считывающее волокно, 2 м, SMA	соляризованное детекторное волокно 2psc. FC-UV200-2SR 200мкм, 2 м, SMA
<b>Принадлежности</b>	Ячейка ¼” или ½”		Кюветодержатель CUV-UV/VIS

#### 2.6.6. Фотолюминесцентные измерения



Люминесцентные измерения являются одним из наиболее информативных источников аналитических данных в биологических и биомедицинских исследованиях, в промышленном и экологическом мониторинге.

В то же время регистрация люминесценции является более сложной задачей, по сравнению с фотометрией источников света.

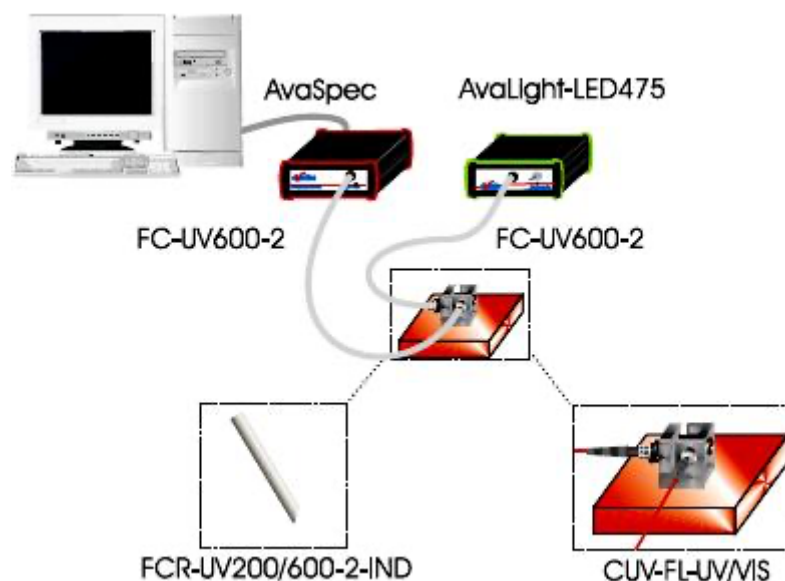
В значительной степени это связано с тем, что интенсивность люминесцентного сигнала относительно невелика. Интенсивность люминесценции обычно составляет не более 3 % от интенсивности падающего светового потока возбуждающего излучения.

Для регистрации таких слабых сигналов требуются высокочувствительные спектрометрические системы, к которым относятся матричные спектрометры, обеспечивающие накопление сигнала за большие отрезки времени и специальные меры по предотвращению смешения потоков возбуждающего света и люминесцентного свечения на входе регистрирующего люминесцентное излучение спектрометра.

Для этих целей применяются различные, не исключаяющие совместное использование, технические решения:

- Использование узкополосных светодиодных источников света AvaLight-LED, спектр излучения которых далёк от спектрального диапазона люминесценции.
- Использование узкополосных интерференционных или коротковолновых пропускающих фильтров, выделяющих узкополосный поток возбуждающего излучения из спектров источников широкополосного излучения, таких как AvaLight-HAL или AvaLight-XE.
- Создание перпендикулярно направленных путей потоков возбуждения по отношению к направлению регистрации люминесценции (обеспечивается, в частности при использовании держателей кювет CUV-DA или CUV-ALL-UV/VIS).
- Использование линии задержки для разделения во времени возбуждающего светового импульса и периода регистрации люминесцентного сигнала. Для этого требуется импульсный ксеноновый источник света XE-2000 и высокоскоростной триггерный спектрофотометр AvaSpec-2048FT.

Некоторые варианты комплектации оборудования для люминесцентных измерений приведены на рисунке и представлены в таблице.



#### Компоненты комплектации спектрометра для люминесцентных измерений

<b>Спектрометр</b>	AvaSpec-2048-TEC, решётка VA (360-1100 нм), 200 мкм щель, DCL-UV или AvaSpec-2048-FT, решётка VA (360-1100 нм), 200 мкм щель, DCL-UV
<b>Программное обеспечение</b>	AvaSoft-full и AvaSoft-XLS
<b>Источники излучения</b>	интерференционным фильтром
<b>Волоконная оптика</b>	флуориметрический пробник FCR-UV200/600-2-IND с отражателем FCR-FLTIP-IND

	2 FC-UV600-2 оптоволоконный кабель, 600 мкм, 2 м, SMA адаптер
<b>Принадлежности</b>	Кюветодержатель CUV-DA или CUV-HAL или CUV-FL-UV/VIS

\* - Имеется несколько модификаций светодиодных источников с шириной полосы излучения 10-20 нм в разных участках видимого диапазона.

При оптимизации комплектации измерительной установки следует учитывать, что для времени интегрирования измеряемого сигнала  $> 5$ сек рекомендуется термоохлаждаемый спектрометр типа AvaSpec-2048-TEC, а для разделения во времени возбуждающего импульса и периода регистрации люминесцентного сигнала требуется импульсный ксеноновый источник света типа ХЕ-2000 и высокоскоростной триггерный спектрометр типа AvaSpec-2048FT.

### 2.6.7. Система Рамановской спектроскопии AvaRaman для измерения спектров комбинационного рассеяния света

Система для Рамановской спектроскопии AvaRaman состоит из диодного лазера, спектрометра AvaSpec-2048 с CCD матрицей и набора оптоволоконных устройств для снятия измерений (зондов). Система AvaRaman используется с лазерами различных типов (помимо стандартного 785 нм) – такими как аргоновый (Ar) 514 нм, 50 или 100 мкВ, зеленый 532 нм лазер, и гелиево-неоновый лазер (HeNe) 633 нм.

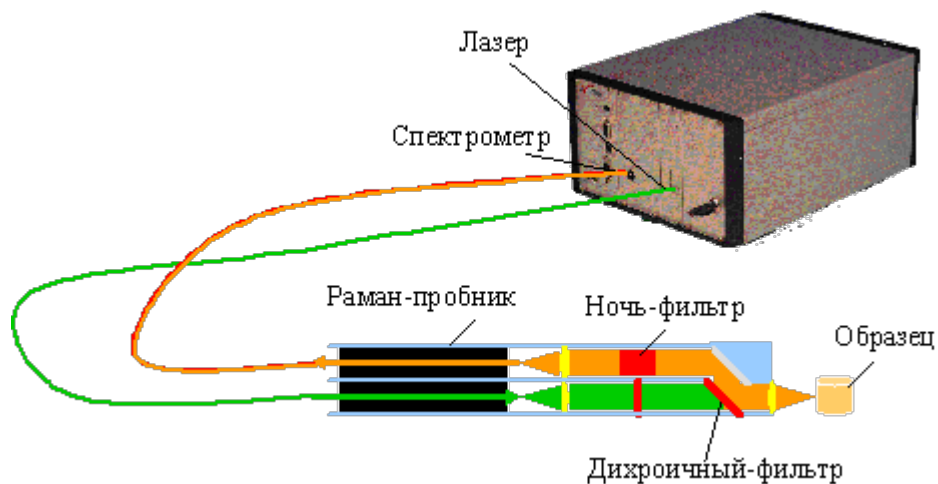
Измерительные системы для Рамановской спектроскопии выпускаются компанией Avantes B.V. в двух модификациях:

- Дешёвая версия со спектрометром с неохлаждаемым фотодетектором и стандартным твердотельным возбуждающим лазером, обеспечивающая регистрацию спектров комбинационного рассеяния со спектральным разрешением  $25 \text{ см}^{-1}$ .
- Высокоэффективная система, оснащённая спектрометром с термоохлаждаемым детектором и стабилизированным возбуждающим лазерным источником, обеспечивающая спектральное разрешение порядка  $8 \text{ см}^{-1}$ .

Обе системы поставляются вместе со специальным программным обеспечением [AvaSoft-Raman](#).

Система AvaRaman с термоохлаждаемым детектором на базе спектрометров AvaSpec-2048-TEC оптимизирована для максимальной чувствительности и обеспечивает время интегрирования измеряемого сигнала до 60 секунд.

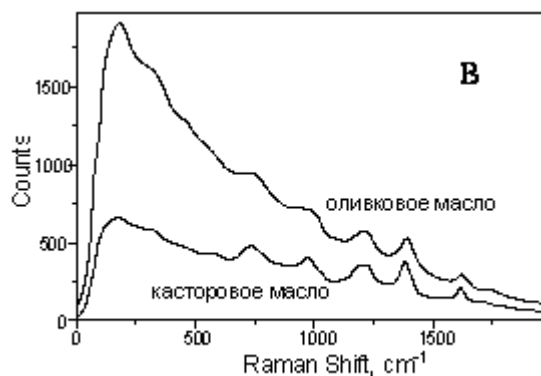
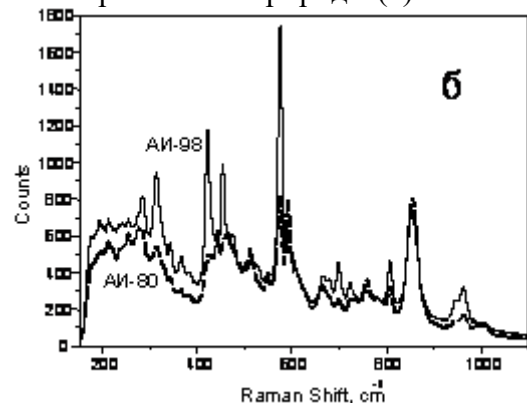
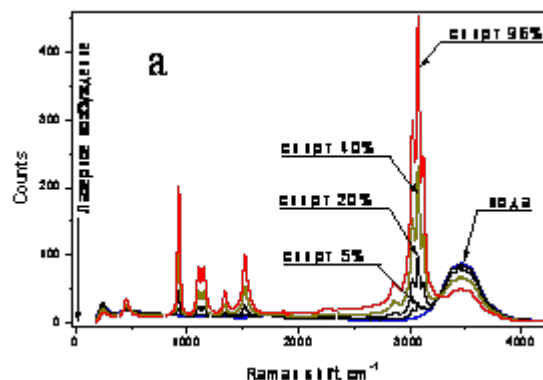
Типичный измерительный комплекс Avantes для измерения спектров комбинационного (рамановского) рассеяния света приведён на рисунке:



Применение спектроскопии комбинационного рассеяния света эффективно для таких аналитических приложений, как мониторинг реакций, определение химического состава и идентификация продуктов, определение характеристик рассеяния взвесей в водных растворах, гелях и других средах.

Примеры спектров комбинационного (Рамановского) рассеяния света для некоторых практически значимых систем приведены на рисунке:

Спектры комбинационного (Рамановского) рассеяния воды и водно-спиртовых смесей разного относительного состава (а), бензина разной марки (б) и минерального масла различной природы (в).

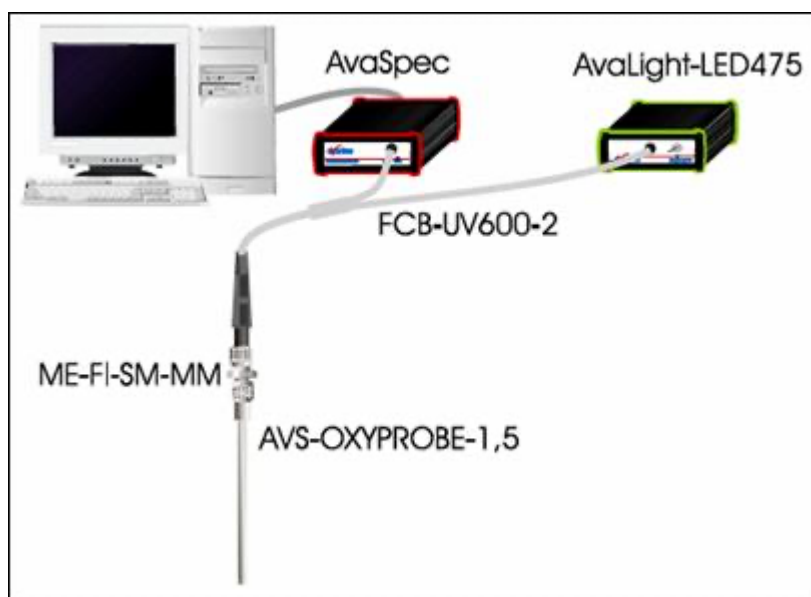


## 2.6.8. Волоконно-оптический кислородный сенсор

Волоконно-оптический кислородный сенсор предназначен для определения содержания кислорода в жидких и газообразных средах в режиме реального времени.

Кислородный сенсор состоит из волоконно-оптического флуоресцентного пробника, наконечник которого снабжён специальным тонкоплёночным покрытием. В качестве источника возбуждения служит голубой светодиод. Завершает сенсорную систему миниатюрный высокочувствительный AvaSpec-спектрометр.

Для измерения абсолютной концентрации кислорода используется техника флуоресценции. Оптическое волокно передаёт возбуждающее флуоресценцию излучение синего светодиодного источника к тонкому покрытию наконечника пробника. Генерируемая материалом покрытия наконечника флуоресценция улавливается приёмной частью оптоволоконного пробника и передаётся на детектор спектрометра. Кислород, проникающий из газовой или жидкой среды в плёночное покрытие, тушит его флуоресценцию. Степень тушения коррелирует с концентрацией кислорода.



Для мониторинга концентрации кислорода, равно как и для калибровки сенсора, используется прикладной программный пакет AvaSoft-OXY.

Типичная компоновка сенсора для кислородного мониторинга приведена на рисунке. Необходимые для комплектации кислородного сенсора компоненты приведены в таблице.

#### Компоненты комплектации кислородного сенсора

<b>Спектрометр</b>	AvaSpec-2048, Решётка VA (360-1100 нм), щель 200 мкм, DCL-UV, OSC
<b>Программное обеспечение</b>	AvaSoft-full и AvaSoft-OXY
<b>Источник света</b>	AvaLight-LTD-470-P14
<b>Волоконная оптика</b>	Бифуркационный кабель FCB-UV600-2, 2 м, SMA Волоконный переходник ME-FI-SM-MM
<b>Кислородный пробник</b>	Возможны различные оригинальные конфигурации, оптимизирующиеся под конкретные задачи Заказчика

#### 2.6.9. Геммологический аналитический комплекс

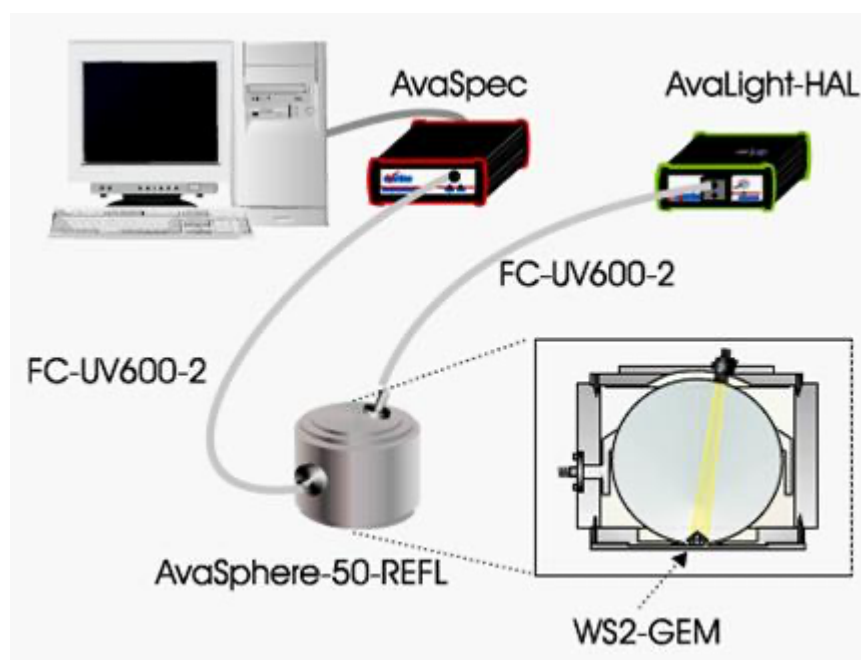
Геммологический аналитический комплекс предназначен для экспресс-контроля качества драгоценных камней по их специфической окраске (цвету).

Цвет – один из основных показателей, определяющих ценность драгоценных камней – рубинов, alexandritов, сапфиров, бриллиантов и пр.

Характеристики природных и искусственных (обогащенных) бриллиантов, например, проявляются в спектральном диапазоне 400-750 нм. Характерные полосы в спектрах поглощения в области 415 и 478 нм являются признаком натурального бриллианта. Искусственные бриллианты не имеют полос поглощения в этой области. Искусственная окраска обогащённых (протравленных) бриллиантов контролируется на длинах волн 593 или 741 нм. Ценность обогащённых бриллиантов более чем в 10 раз ниже природных.

Типичная компоновка геммологического аналитического комплекса приведена на рисунке. Необходимые для его комплектации компоненты приведены в таблице.





**Компоненты комплектации геммологического аналитического комплекса**

<b>Спектрометр</b>	AvaSpec- 2048 решётка VA (360-1100 нм), щель 25 мкм, DCL-UV
<b>Программное обеспечение</b>	AvaSoft-FULL
<b>Источник света</b>	Галогенный источник света HL-2000
<b>Волоконная оптика</b>	2 pcs. FC-UV600-2, UV/VIS, 2 м, SMA
<b>Принадлежности</b>	Интегрирующая сфера AvaSphere-50-IRRAD или AvaSphere-50-REFL белая референсная пластина WS-2-GEM со специальным углублением для размещения исследуемого драгоценного камня

## 2.6.10. Измерительная система для растениеводства



Измерительная система HortiSpec разработана для измерений интенсивности и спектрального распределения света в видимом и ближнем ИК диапазонах внутри оранжерей и теплиц.

Рост растений и деятельность их фотосинтетического аппарата очень сильно зависит от интенсивности и спектрального распределения светового освещения. Интенсивность освещения может измеряться откалиброванной в абсолютных радиометрических единицах системой HortiSpec в фотонах или других единицах, принятых в растениеводстве.

Система HortiSpec может питаться от автономного источника электропитания и взаимодействовать с удалённым компьютером по Блютус-сопряжению.



Оснащённый такой системой компьютер может использоваться для дистанционного управления экранными фильтрами в теплицах или для контроля режимов осветительных ламп, что обеспечивает автоматическое поддержание оптимальных режимов освещённости культивируемых растений.

#### Компоненты комплектации измерительной системы для растениеводства

<b>Спектрометр</b>	AvaSpec- 2048 с фокусирующей линзой и специальным покрытием детектора решётка VA (360-1100 нм), щель 200 мкм
<b>Входная апертура</b>	Диффузор диаметром 3,9 мм
<b>Программное обеспечение</b>	HortiSpec Irradiance software  Единицы измерения: поток фотонов в мкМоль/см <sup>2</sup> .  Параметры: Lux, PAR, Blue, Yellow/Green, Red, Far red
<b>Обмен данными</b>	Параллельный адаптер Via Bluetooth, дистанция до 250 м, USB-1
<b>Автономное электропитание</b>	12 В, 1500 мА час.  10 NiMn элементов на 4 часа автономной работы спектрометра

## Часть II

### Практические лабораторные работы

## Введение

Настоящее пособие посвящено описанию лабораторного практикума, построенного на основе модульной многофункциональной оптоволоконной системы, и теоретических предпосылок для его использования.

Пособие состоит из двух частей. Излагаемая ниже вторая часть пособия содержит описание разработанных авторами оригинальных лабораторных работ, охватывающих разные методические направления спектрального анализа, и способствующих как углублённому знакомству с принципами проведения измерений на современной спектрально-аналитической аппаратуре и её возможностями, так и пониманию связи наноструктуры вещества с его макроскопическими свойствами.

Каждая лабораторная работа содержит разделы, содержащие краткое изложение теории, практические рекомендации по работе с пользовательским интерфейсом системы и контрольные вопросы для проверки усвоения материала. Более подробное изложение теории приведено в первой части пособия. В Приложении 1 к первой части пособия изложено подробное руководство по структуре и практическому использованию пакета универсального программного обеспечения и некоторых специализированных прикладных программных модулей.

# Измерение толщины наноразмерных объектов

## Цель работы:

- освоение принципов интерференционных измерений толщины наноразмерных объектов на оптоволоконных спектрометрах;
- освоение принципов количественных измерений измерения толщины наноразмерных покрытий, пластин и плёночных материалов.

## Введение

Развитие нанотехнологий стимулирует развитие методов исследования тонких плёнок и плёночных покрытий. При этом интерес представляют плёнки, толщины которых составляют несколько нанометров (сверхтонкие плёнки). Такие плёнки широко используются в микроэлектронике, нанофотонике, вычислительной технике и промышленности, оптике и оптоэлектронике, космической и бытовой промышленности, в разнообразных технических отраслях. Особое внимание уделяется в силу специфичности их свойств проводящим плёнкам.

Хорошо разработанные технологии получения сверхтонких плёнок имеют ряд недостатков: качество полученной плёнки зависит от выбранного метода создания плёнки; недостаточная воспроизводимость результатов во всех существующих технологиях и нестабильность свойств плёнок во времени, что обусловлено особенностями фазовых и структурных состояний вещества в тонких плёнках.

Это выдвигает на первый план задачу мобильного и точного измерения параметров наноразмерных плёнок. При этом методы исследования должны относиться к методам оперативного и неразрушающего контроля, данные которого могут быть получены в цифровом виде для быстрой обработки.

Решение этой задачи обеспечивают оптоволоконные спектрометры компании Avantes B.V., оснащённые специализированной системой измерения толщины тонких плёнок AvaSpec Thin Film в диапазоне от 10 нм до 50 мкм.

**Принцип измерения толщины тонких пленок *AvaSpec Thin Film*** базируется на анализе параметров интерференции света, определяемых в процессе измерений фотометрических характеристик анализируемого объекта. Результаты интерференции света при помощи математической функции преобразуется в характеристики толщины пленки. В случае системы с одиночным плёночным слоем (покрытием)

толщина этого слоя (пленки) может быть вычислена, если известны оптические характеристики материала плёнки и подложки.

## Краткое изложение теории

**Интерференцией** называется наложение двух или более волн, в результате чего происходит перераспределение энергии колебаний в пространстве. Интерференцией света называется наложение световых волн.

Для получения устойчивой интерференционной картины необходимы когерентные источники света.

**Когерентностью двух волновых процессов** называется их согласованное протекание.

Колебания называются **когерентными**, если разность их фаз остаётся постоянной (или закономерно изменяется) во времени и при сложении колебаний определяет амплитуду суммарного колебания.

Строго монохроматические волны одной и той же частоты всегда интерферируют между собой, т.е. когерентны.

Длина волны, частота и фазовая скорость распространения волны связаны друг с другом:  $\lambda \nu = V_{\text{фаз}}$ , поэтому у когерентных источников равны и длины волн ( $\lambda_1 = \lambda_2$ ).

Волновое число равно  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , поэтому у когерентных волн равны и их волновые числа ( $k_1 = k_2$ ).

Различают **пространственную** и **временную** когерентность.

Две волны будут когерентны во времени, если средняя разность их полных фаз остаётся постоянной относительно времени. В случае временной когерентности важной характеристикой является время когерентности. Поскольку когерентность двух волн связывается с возможностью наблюдения интерференционной картины, то под **временем когерентности** понимают время, в течение которого интерференционная картина этих волн может наблюдаться. Возможность наблюдения интерференционной картины является субъективным фактором. Критерием служит т.н. **видность** интерференционной картины (**видимость** интерференционных полос):

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} . \quad (1)$$

Человек различает полосы при значениях  $V \geq 0,1$ , что соответствует соотношению между интенсивностями максимумов и минимумов  $I_{\text{min}} < 0,82 \times I_{\text{max}}$ .

В случае интерференции двух одинаково поляризованных когерентных монохроматических волн, амплитуды и интенсивности которых, соответственно, равны  $A_1, I_1$  и  $A_2, I_2$ , видность равна

$$V = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2} = \frac{2\sqrt{I_1I_2}}{I_1 + I_2} . \quad (2)$$

Видность максимальна ( $V = 1$ ) при интерференции волн с равными амплитудами ( $A_1 = A_2$ ).

Понятие времени когерентности ( $\tau$ ) имеет смысл при наблюдении интерференции света от источников, длины волн которых не очень сильно отличаются друг от друга, т.е. в том случае, когда  $\Delta\lambda \ll \lambda$  (или  $\Delta\nu \ll \nu$ ).

С понятием времени когерентности связано понятие **длины когерентности**  $l$ , которая определяется длиной пути, проходимым светом за время когерентности  $\tau$ :

$$l = c\tau = \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (3)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  - скорость света в вакууме.

Волны, испускаемые источниками **естественного света**, несогласованные, т.е. имеют произвольные частоты и фазы.

Результатом интерференции когерентных источников света является **интерференционная картина** – чередование светлых и тёмных областей пространства, форма которых зависит от формы источника света. Если источниками света являются щели, то на экране наблюдается чередование светлых и тёмных полос. Если интерферируют лучи от точечного источника, а наблюдение ведётся через собирающую линзу, то результат интерференции - светлые и тёмные кольца (кольца Ньютона).

Результатом наложения некогерентных волн является равномерное увеличение освещённости поверхности.

**Получим условия наблюдения областей максимумов и минимумов интерференции.**

Для этого сложим две когерентные волны с колебаниями вдоль одного направления:

$$S_1 = S_{01} \cos(\omega t - kl_1 + \varphi_{01}) \quad \text{и} \quad S_2 = S_{02} \cos(\omega t - kl_2 + \varphi_{02}) \quad (4)$$

$$\vec{S}_0 = \vec{S}_{01} + \vec{S}_{02} \quad (5)$$

Используем метод векторных амплитуд.

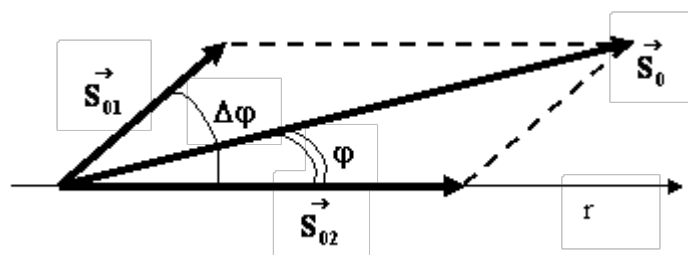


Рис. 4.1.1. Метод векторных амплитуд

Направление опорной оси  $r$  совпадает с направлением вектора  $\vec{S}_{02}$ .

$\Delta\varphi$  - разность фаз колебаний в обеих волнах, равная

$$\Delta\varphi = (\omega t - kl_1 + \varphi_{01}) - (\omega t - kl_2 + \varphi_{02}) = k(l_2 - l_1) + (\varphi_{01} - \varphi_{02}), \quad (6)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число,  $\lambda = \frac{\lambda_{\text{ВАК}}}{n}$  - длина волны в среде;  $n$  - абсолютный показатель преломления среды.

Результирующая волна описывается общим уравнением вида

$$S = S_0 \cos(\omega t - kl + \varphi_0). \quad (7)$$

По теореме косинусов можно выразить её амплитуду через амплитуды складываемых волн

$$S_0^2 = S_{01}^2 + S_{02}^2 + 2S_{01}S_{02} \cos \Delta\varphi. \quad (8)$$

Таким образом, максимальное и минимальное значение амплитуды результирующей волны зависит от значения косинуса разности фаз складываемых волн.

При этом начальные фазы волн  $(\varphi_{01}, \varphi_{02})$  и разность начальных фаз  $(\varphi_{01} - \varphi_{02})$  оказываются пренебрежимо малыми величинами уже через несколько колебаний и малые интервалы времени.

Запишем условия максимального и минимального значений  $\cos \Delta\varphi$ :

<i>Условие максимальной амплитуды результирующей волны</i>	<i>Условие минимальной амплитуды результирующей волны</i>
--	---

$$\cos \Delta\varphi = -1$$

$$\Delta\varphi = \pi + 2\pi m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$$\cos \Delta\varphi = 1$$

$$\Delta\varphi = 2\pi m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

$$\Delta\varphi = k(l_2 - l_1) + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) \approx k(l_2 - l_1)$$

$$k(l_2 - l_1) = \pi + 2\pi m$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \pi + 2\pi m$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_{\text{ВВК}}} \Delta l = \pi + 2\pi m$$

$$n \Delta l = \frac{\lambda_{\text{ВВК}}}{2} (2m + 1)$$

$$k(l_2 - l_1) = 2\pi m$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = 2\pi m$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_{\text{ВВК}}} \Delta l = 2\pi m$$

$$n \Delta l = \frac{\lambda_{\text{ВВК}}}{2} 2m$$

$n \Delta l$  - оптическая разность хода интерферирующих волн.

Если обе волны шли в средах с разными показателями преломления, то оптическая разность ход будет равна  $\Delta = n_1 l_1 - n_2 l_2$ , тогда

Условие наблюдения интерференции имеет вид:

максимума

Условие наблюдения интерференции имеет вид:

минимума

$$\Delta = \frac{\lambda_{\text{ВВК}}}{2} 2m, \quad (9)$$

$$\Delta = \frac{\lambda_{\text{ВВК}}}{2} (2m + 1), \quad (10)$$

т.е. оптическая разность хода равна чётному числу длин полуволен.

т.е. оптическая разность хода равна нечётному числу длин полуволен.

Традиционными современными источниками когерентного излучения являются лазеры.

Другим способом получения когерентных волн (с меньшей степенью когерентности) являются методы разделения светового потока от одного источника света. К ним относятся:

**Зеркала Френеля.** Это система двух зеркал, между которыми расположен точечный источник света. В каждом из зеркал создается мнимое изображение источника. Образовавшиеся два мнимых источника испускают когерентные волны. На некотором расстоянии от зеркал расположен экран, на котором и наблюдается результат сложения когерентных волн (интерференция).

**Бипризма Френеля.** Устройство представляет собой совмещённые основаниями две трёхгранные призмы. В плоскости совмещения расположен точечный источник света. В результате преломления лучей в верхней и нижней частях призмы создаются мнимые источники. Они когерентны, поэтому на экране, расположенной за бипризмой можно наблюдать интерференционную картину.

**Билинза Бийе.** Устройство представляет собой две половины собирающей линзы, разрезанные по диаметру. Обе половины немного разведены, поэтому они создают два не совпадающих мнимых изображения точечного источника, расположенного на оси линз. Интерференция наблюдается на экране за линзами.

**Метод Юнга.** Свет от точечного источника падает в виде сферической волны на непрозрачный экран с тонкой щелью. Эта щель является точечным вторичным источником в соответствии с теорией Гюйгенса-Френеля. Следующий экран расположен параллельно первому и на относительно большом (по сравнению с длиной волны) расстоянии от щели в первом экране, поэтому падающую на второй экран волну можно считать плоской. Тонкие щели во втором экране рассматриваются как вторичные уже когерентные источники света. На третьем экране можно наблюдать результат интерференции этих двух источников.

### ***Основные методы наблюдения интерференции***

К основным методам наблюдения интерференции относятся:

интерференция в тонких плёнках (полосы равного наклона),

интерференция в клине (полос равной толщины),

кольца Ньютона,

опыт Юнга,

интерферометры.

### ***Интерференция в тонких плёнках***

Рассмотрим ход монохроматического луча, падающего на плоскопараллельную тонкую плёнку. Над тонкой плёнкой находится воздух ( $n_{\text{возд}} = 1$ ). Материал плёнки имеет показатель преломления, равный  $n$ . Под плёнкой находится среда с показателем преломления  $n_1$ .  $d$  - толщина плёнки.



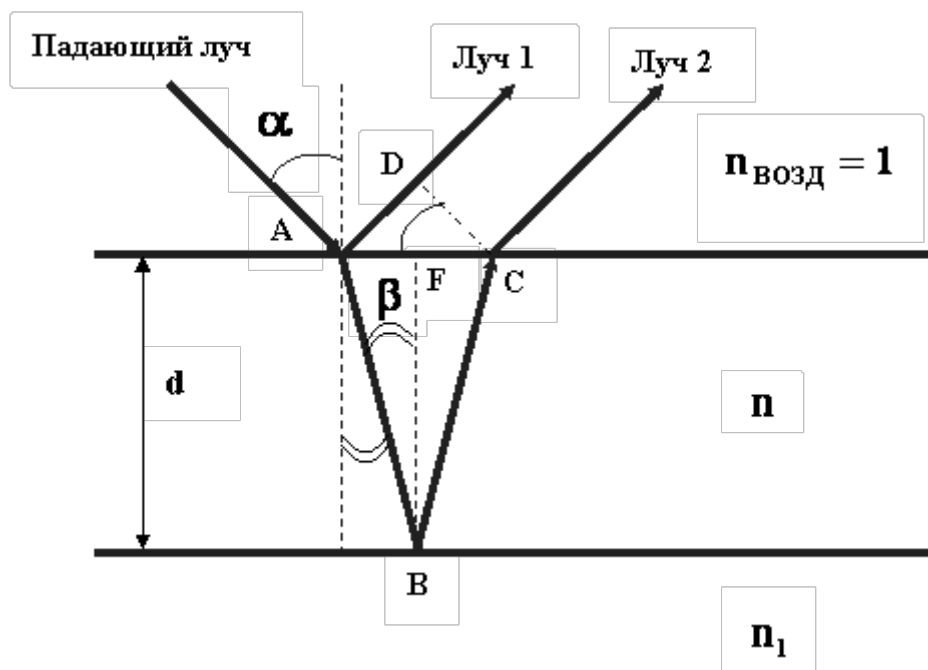


Рис. 4.1.2. Интерференция в тонкой плёнке

Интерференция может наблюдаться на экране, помещённом между точками D и C или в любой параллельной им плоскости.

Луч монохроматического света падает на тонкую плёнку в точке A. Он частично отражается (луч 1) и частично преломляется (луч 2).

При отражении от более оптически плотной среды (луч 1) у луча появляется дополнительная разность хода, равная  $\frac{\lambda}{2}$ . Ей соответствует сдвиг по фазе  $\Delta\varphi = \pi$ . Это происходит из-за того, что отражение луча произошло от более плотной среды ( $n > n_{\text{возд}}$ ).

Луч 2 отражается от границы раздела двух сред в точке B. При этом дополнительной разности хода не появляется, если луч отражается от менее оптически плотной среды ( $n_1 < n$ ). Если луч отражается от оптически более плотной среды ( $n_1 > n$ ), то и у луча 2 появляется дополнительная разность хода в  $\frac{\lambda_0}{2}$ .

Далее луч 2 преломляется в точке C, снова выходя в воздух.

Результат интерференции лучей 1 и 2 зависит от их оптической разности хода.

Пусть луч 2 отражается от оптически менее плотной среды ( $n_1 < n$ ).

Рассчитаем оптическую разность хода двух интерферирующих лучей:

$$\begin{aligned}
\Delta &= (AB + BC)n - \left(AD - \frac{\lambda_0}{2}\right) = 2\frac{dn}{\cos \beta} - AC \sin \alpha + \frac{\lambda_0}{2} = \\
&= \frac{2dn}{\cos \beta} - 2AF \sin \alpha + \frac{\lambda_0}{2} = \frac{2dn}{\cos \beta} - 2d \operatorname{tg} \beta \sin \alpha + \frac{\lambda_0}{2} = \\
&= \left[ \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \Rightarrow \sin \alpha = n \sin \beta \right] = \\
&= \frac{2dn}{\cos \beta} - \frac{2dn \sin \beta \sin \beta}{\cos \beta} + \frac{\lambda_0}{2} = \frac{2dn}{\cos \beta} (1 - \sin^2 \beta) + \frac{\lambda_0}{2} = \\
&= \frac{2dn \cos^2 \beta}{\cos \beta} + \frac{\lambda_0}{2} = 2dn \cos \beta + \frac{\lambda_0}{2} = 2dn \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda_0}{2}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Максимум интерференции в данной точке наблюдается, если выполнено условие:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} . \tag{12}$$

Следовательно, в случае тонкой плёнки это условие запишется так:

$$2dn \cos \beta + \frac{\lambda_0}{2} = 2m \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow 2dn \cos \beta = (2m - 1) \frac{\lambda_0}{2} , \tag{13}$$

т.е. удвоенное произведение толщины плёнки на показатель преломления вещества плёнки и на косинус угла преломления равно нечётному числу длин полуволн.

То же для минимума интерференции:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow 2dn \cos \beta + \frac{\lambda_0}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow 2dn \cos \beta = 2m \frac{\lambda_0}{2} , \tag{14}$$

т.е. удвоенное произведение толщины плёнки на показатель преломления вещества плёнки и на косинус угла преломления равно чётному числу длин полуволн.

Теперь получим условия наблюдения максимумов и минимумов при отражении луча 2 от более плотной среды ( $n_1 > n$ ).

Рассчитаем оптическую разность хода двух интерферирующих лучей:

$$\Delta = \left(AB + BC - \frac{\lambda_2}{2}\right)n - \left(AD - \frac{\lambda_0}{2}\right) . \tag{15}$$

Здесь  $\lambda_2$  - длина волны в среде с показателем преломления  $n$ .  $\lambda_0$  - длина волны в воздухе

(вакууме). Длина волны в оптической среде в  $n$  раз меньше, чем длина волны в воздухе:  $\lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n}$ .

$$\begin{aligned}\Delta &= \left( AB + BC - \frac{\lambda_2}{2} \right) n - \left( AD - \frac{\lambda_0}{2} \right) = (AB + BC)n - \frac{\lambda_2}{2}n - AD + \frac{\lambda_0}{2} = \\ &= (AB + BC)n - \frac{\lambda_0}{2n}n - AD + \frac{\lambda_0}{2} = (AB + BC)n - AD = 2dn \cos \beta.\end{aligned}\quad (16)$$

Максимум интерференции в данной точке наблюдается, если выполнено условие:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2}.$$
(17)

Следовательно, в случае тонкой плёнки это условие запишется так:

$$2dn \cos \beta = 2m \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow 2dn \cos \beta = 2m \frac{\lambda_0}{2}, \quad (18)$$

т.е. удвоенное произведение толщины плёнки на показатель преломления вещества плёнки и на косинус угла преломления равно чётному числу длин полуволен.

То же для минимума интерференции:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow 2dn \cos \beta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \Rightarrow 2dn \cos \beta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad (19)$$

т.е. удвоенное произведение толщины плёнки на показатель преломления вещества плёнки и на косинус угла преломления равно нечётному числу длин полуволен.

Таким образом, оптическая разность хода, а, следовательно, и условия максимума и минимума при интерференции зависят от длины волны  $\lambda_0$ , толщины плёнки  $d$  и абсолютного показателя преломления вещества плёнки  $n$ .

Уравнения (13, 14, 18, 19) являются расчётными при выполнении данной работы – толщина плёнки автоматически рассчитывается по исходным данным, а итоговый результат выводится на экран.

Интерференционные полосы, возникающие в результате наложения лучей, падающих на плоскопараллельную пластину (плёнку) под одинаковыми углами, называются **полосами равного наклона**.

Интерференционные полосы, возникающие в результате интерференции от мест одинаковой толщины (например, пластинка переменной толщины), называются **полосами равной толщины**.

При интерференции белого света на тонкой пластинке положения максимумов и минимумов будут разнесены в пространстве, поскольку положения экстремумов зависят от длины волны.

Обычно в природе наблюдаются интерференционные картины смешанного типа: полосы равного наклона и равной толщины.

Интерференцию в тонких плёнках можно наблюдать во многих явлениях (рис. 4.1.3). Например, результатом интерференции в тонкой плёнке являются разноцветные разводы бензина на поверхности

воды, что – увы! – можно иногда наблюдать в лужах. Красивая расцветка крыльев бабочек, CD, мыльные пузыри, цвета побежалости – это тоже результат интерференции в тонких плёнках. Очень редкое природное явление – интерференция Солнца (рис. 4.1.3-б).



**а**



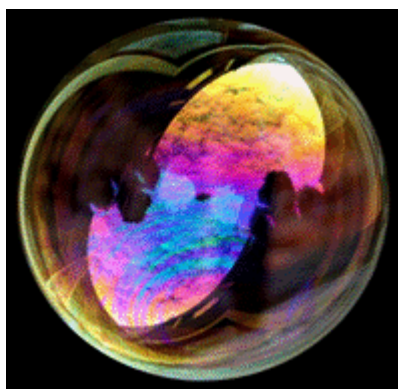
**б**



**в**



**г**



**д**



**е**

*Рис.2.1.3. Проявление интерференции вокруг нас:*

*а – бензиновая плёнка; б – солнечная интерференция; в – крылья бабочки; г – CD; д – мыльный пузырь; е – цвета побежалости на лезвии бритвы*

***Области применения тонких плёнок***

В последнее время наблюдается тенденция все более быстрого перехода разработок различного рода из научно-исследовательской сферы в промышленность. Не последнее место в этом плане занимают и пленочные технологии. Широкое применение тонкие пленки получили в качестве биопокрытий, благодаря торможению анодно-катодных процессов, а также как защитные покрытия металла. Аморфные пленки применяются в качестве катализаторов (в частности для двигателей внутреннего сгорания), а также электретов. Защитные свойства тонких пленок различной структуры и состава крайне важны. Отдельного внимания заслуживают оксидные пленки. Этот класс наиболее интересен не столько благодаря своим уникальным механическим свойствам (высокая твердость при достаточно большой упругости), а потому, что при нормальных условиях они уже имеются на поверхности металла или сплава.

В связи с применением пленочных покрытий в современной технике довольно остро стала проблема определения их физических свойств для различных материалов. Разница между механическими, электрическими, магнитными, оптическими и многими другими свойствами между тонкими пленками и массивными образцами появляется, в основном при проявлении размерных эффектов, кроме того, такие свойства могут иметь место при использовании различных подложек, на которые наносится сама пленка.

### ***1. Наноиндустрия. Электронная техника***

При тонкопленочных переходах металл-изолятор наблюдаются резкие, обратимые и значительные изменения электрических и оптических свойств материала (изолятора), что даёт уникальную возможность для разработки электронных и оптоэлектронных устройств. Резкое изменение электропроводности при тонкопленочных переходах металл-изолятор используется при разработке критических терморезисторов. Освоен промышленный выпуск критических терморезисторов на основе  $\text{VO}_2$  и  $\text{V}_2\text{O}_3$  (для последнего при  $T=150\text{ K}$ ). Подобные терморезисторы можно создавать на основе других материалов с тонкопленочными переходами металл-изолятор на другие критические температуры. Такие терморезисторы могут применяться в схемах тепловой защиты, стабилизации температуры, термических реле, ограничителей тока. Наличие на вольт-амперной характеристике материалов с тонкопленочными переходами металл-изолятор участка отрицательного дифференциального сопротивления обуславливает широкие возможности применения переключающих элементов в микроэлектронике.

Тонкие плёнки используются в интегральных микросхемах, СВЧ устройствах, при создании дискретных электронных элементов.



*Рис.2.1.4. Тонкопленочные технологии при изготовлении печатных плат.  
(Рисунок взят с сайта <https://www.lpkf.ru/applications/index.htm>)*

### ***2. Способы фиксации информации***

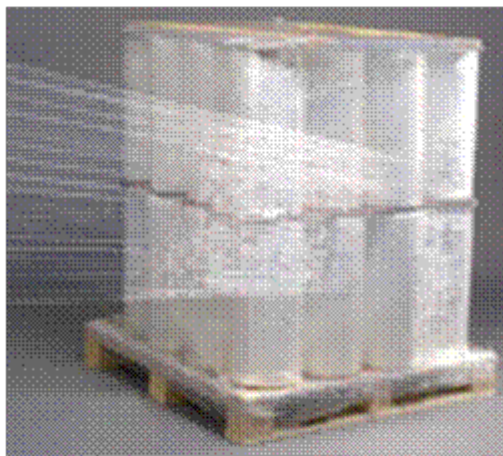


Магнитная тонкая плёнка представляет собой поли- или монокристаллический слой ферромагнитного металла, сплава или магнитного окисла (феррита и др.) толщиной от 0,01 до 10 мкм. Она находит применение в качестве запоминающих элементов и логических устройства в вычислительной технике и индикаторов при физических исследованиях. Металлические плёнки получают вакуумным напылением или электролитическим осаждением металла на подложку (сплошным слоем или отдельными «пятнами»), окисные - с помощью химических реакций и другими методами. Толщины магнитной тонкой плёнки сравнимы с равновесными размерами магнитных доменов. Малая толщина магнитных плёнок препятствует возникновению в них при перемагничивании значительных токов индукции (вихревых токов). Перечисленные и другие особенности магнитной тонкой плёнки приводят к отличию их физических свойств от свойств массивных образцов магнитных материалов.

В устройствах электроники широко применяются и сегнетоэлектрические тонкие плёнки и наноструктуры.

### **3. Промышленность**

**Стрейч пленка** (это современный упаковочный материал), обладающий способностью обратимо растягиваться с большим удлинением, имеющий, по сравнению с другими пленочными материалами, повышенную прочность, стойкость к разрыву, проколу, удару, продавливанию. Величина «удерживающей» силы зависит от сырья, из которого изготовлена пленка. Используя стрейч пленку низкого качества, потребитель рискует сохранностью своих грузов, стоимость которых несравнима со стоимостью упаковки. Немаловажным фактором, который учитывают предприятия, использующие



тонкие пленки в качестве упаковочных материалов, является снижение отходов. Это особенно важно для крупных заводов с точки зрения защиты окружающей среды. Благодаря уменьшению толщины, количество плёнки, затраченное на единицу продукции, существенно снижается и, соответственно, снижаются расходы на утилизацию.

*Рис. 2.1.5. Упаковочный материал – стрейч-плёнка.*

*Рисунок с сайта*

*<http://www.merpasa.ru/catalog.php?catID=2.2.12>*



*Рис.2.1.б.*

*Литьё, полученное при вакуумно-плёночном формовании.*

*Рисунок с сайта*

*<http://www.sharspb.ru/ind/vakuum-phorm/index.php>*

позволяющий цвету поверхности влиять на конечное изображение (не просвечивает). Покрытие разработано для печати экосольвентными, сольвентными и УФ-отверждаемыми чернилами и позволяет получать высококачественные фотографические изображения.

Разработаны и выпускаются пленки из сэвилена. Они используются для упрочения поверхности различных изделий при **литье металлов** методом вакуумно-плёночного формования.

Сэвиленовые пленки характеризуются: низкой температурой плавления; высокой степенью растяжения; высокой прочностью; малыми величинами остаточной деформации; незначительным газообразованием. Разработаны и выпускаются плёнки: с разной способностью к деформации в условиях процесса литья; с различными коэффициентами трения; с различной степенью усадки в продольном и поперечном направлениях.

Белая полимеризованная **самоклеющаяся полихлорвиниловая пленка** для сольвентной, экосольвентной и УФ-отверждаемой печати со специальным клеевым слоем широко используется в современных технологиях печати и декорирования. Такая плёнка обладает уникальным клеевым слоем, специально разработанным для более лёгкого нанесения на поверхность, без использования специального оборудования. Такую плёнку можно переразмещать до 7 раз при нанесении на поверхность, что существенно облегчает работу с данным материалом. Клеевой слой – серый, что в свою очередь позволяет использовать пленку на цветных поверхностях, не

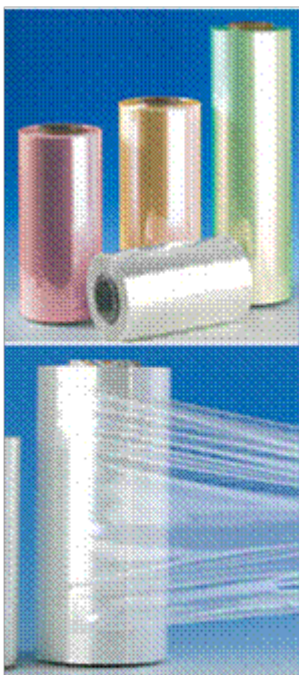


Рис. 2.1.7. Пищевая плёнка  
Рисунок с сайта  
<http://www.allpack.ru/>

Пищевые стрейч-плёнки используются для пищевой упаковки на всех без исключения предприятиях розничной торговли. Полиолефиновые термоусадочные плёнки – высокотехнологичный продукт, используемый во всём мире в качестве основного материала для пищевой и непищевой упаковки. Основные особенности полиолефиновых плёнок, отличающие их от традиционных поливинилхлоридных, заключаются в абсолютной безвредности при контакте с продуктами питания, значительно более высоком сопротивлении на разрыв и прокол (данная характеристика позволяет использовать более тонкие плёнки там, где ранее применялись более толстые), высокой прочности сварного шва, отличных оптических характеристиках (глянец, прозрачность). В процессе упаковки не происходит выделение вредных газов, осаждение углерода на сварочных элементах, коррозии оборудования.

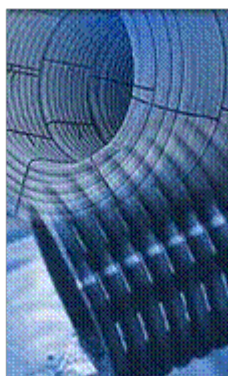


Рис. 2.1.8. Тефлоновая плёнка на  
литых пластиковых изделиях.

Рисунок с сайта  
<http://rcc.ru/Rus/Plastics/?ID=468784>

Компания Quadrant Creative Moulding&Systems (г. Тилт, Бельгия) разработала и запатентовала технологию нанесения тонкой плёнки из политетрафторэтилена (тефлона) на термопластичный носитель в процессе формовочного литья. Полученный продукт имеет низкий коэффициент трения поверхности и высокую химическую стабильность.

## Практические измерения толщины тонких плёнок

### Приборы и принадлежности:

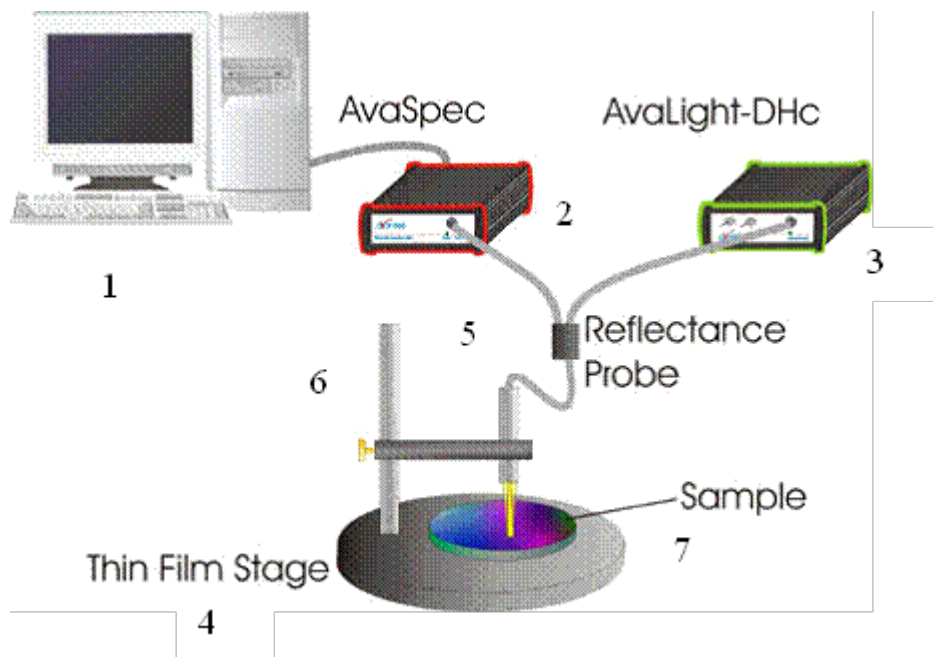
1. Персональный компьютер с установленным программным обеспечением AvaSoft-Thinfilm;
2. Оптоволоконный спектрометр AvaSpec 2048- USB-2 или AvaSpec 2048- FT-2-SPU;
3. Блок-источников излучения – AvaLight-DHc или AvaLight-DH-S-BAL;



4. Световодный рефлектометрический пробник FCR-7UV200-2;
5. Стабилизированный источник питания PS – 12VDC/1.25A;
6. Соединительный кабель питания HL – 2000;
7. Приспособление для установки исследуемого образца - держатель датчика Thinfilm;
8. Комплект калибровочных образцов Thinfilm-standard Tile (2 калибровочных слоя  $\text{SiO}_2$  различной толщины и отражающий слой Si);
9. Образцы для исследований (выдаются преподавателем).

### Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.1.9.



*Рис. 4.1.9. Схема установки для измерения толщин тонких плёнок:*

*1 - Персональный компьютер; 2 – Спектрометр; 3 - Блок с источниками света; 4 – Держатель для установки образца; 5 - Оптоволоконная линия связи; 6 - Держатель оптического щупа; 7 – Исследуемый образец.*

Все составные части установки показаны на приведённых ниже фотографиях:

Внешний вид спектрометра спектрометра приведен на рис. 4.1.10.



*Рис. 4.1.10. Спектрометр 2048- USB-2*

Блок с источниками света (рис. 4.1.11) содержит 2 источника с взаимно перекрывающимися непрерывными спектрами излучения:

- галогенную лампу, излучающую свет в видимом и инфракрасном диапазонах;
- дейтериевую лампу, излучающую свет, в основном, ультрафиолетового и частично в видимом диапазона.

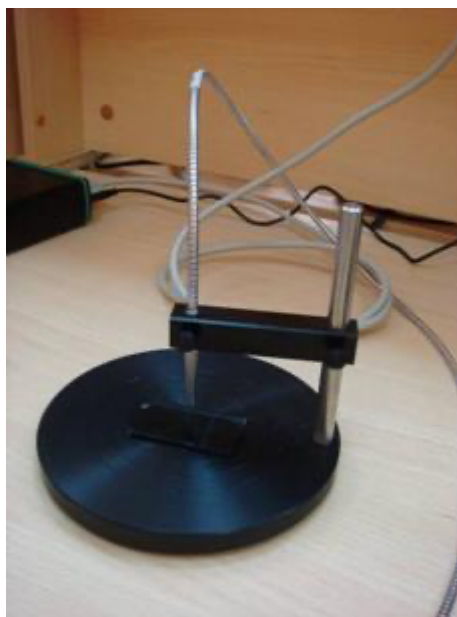


*Рис. 4.1.11. Блок с источниками света*

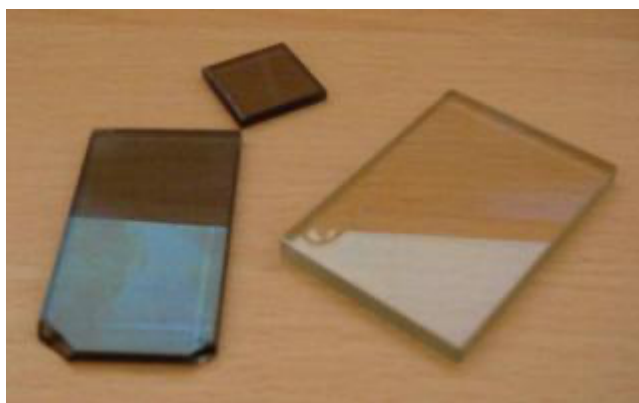
Оба источника могут включаться независимо друг от друга или одновременно тумблером (1), расположенным на передней панели блока источников света.

В левом положении тумблера (1) включена дейтериевая лампа (D); в правом положении тумблера включена лампа накаливания (H); в среднем положении тумблера включены обе лампы (DH). В последнем случае спектр снятия интерференционной картины оказывается широким – от коротковолнового ультрафиолетового излучения до длинноволнового инфракрасного излучения. Тумблер (2), также расположенный на передней панели блока, управляет общим включением-выключением электропитания.

На рис.4.1.12 приведена фотография подставки для установки образца, держатель оптического щупа и подведённая оптоволоконная линия связи, а на рис. 4.1.13 – фотография типичных образцов для исследования..



*Рис. 4.1.12. Держатель оптического щупа с установленным образцом*



*Рис. 4.1.13. Образцы для исследования*

Линия волоконно-оптической связи состоит из двух волноводов. Они объединены в единый кабель, который соединён перед держателем оптического щупа, и расходятся для подсоединения к блоку источников света и спектрометру (рис. 4.1.14).



*Рис. 4.1.14. Делитель оптоволоконного кабеля*

### **Программное обеспечение**

Программное обеспечение AvaSoft-Thinfilm - автономный пакет программ, который поставляется с спектрометрической системой определения толщины пленок [AvaThinfilm](#).

Программное обеспечение AvaSoft-Thinfilm вычисляет толщину слоя при помощи анализа интерференции отраженного спектра от оптически прозрачных пленок с известными оптическими параметрами.

В программном обеспечении AvaSoft-Thinfilm реализованы два метода вычислений толщины тонкой пленки: быстрое преобразование Фурье (FFT) и алгоритм оптимизации наилучшего приближения (спектр соответствия). Метод FFT главным образом используется для определения толщины толстых пленок. Метод оптимизации наилучшего приближения определяет толщину с использованием различных путей вычисления толщины пленок. Соответствующие параметры толщины могут передаваться и использоваться для контроля качества тонких пленок и ускорения обработки данных о характеристиках толщины пленок.

Обширная база данных оптических параметров подложек и покрытий включена в программное обеспечение и содержит параметры продуктов важных областей производства, например, оптические характеристики для вычисления толщины полупроводниковых слоёв и напыляемых покрытий. Программное обеспечение AvaSoft-

ThinFilm содержит расширяемую встроенную базу данных по оптическим характеристикам наиболее часто применяемым материалам подложки и пленки.

Система измерения толщины тонких плёнок AvaSpec Thin Film может измерять толщину плёнки в диапазоне 10 нм – 50 мкм с разрешением 1 нм.

AvaSoft-Thinfilm поддерживает множественные каналы и позволяет одновременно отслеживать характеристики образцов по 8 временным рядам измерений для оценки толщины тонких пленок и мониторинга качества.

### Порядок выполнения работы

1. Прежде, чем начать измерения, необходимо удостовериться, что все элементы установки соединены в соответствии со схемой.

2. Далее необходимо подготовить образцы для измерений. Для получения результата (толщины плёнки), необходимо знать показатели преломления вещества самой плёнки и вещества подложки, на которую плёнка нанесена. При работе с образцами нельзя трогать поверхность плёнки руками, чтобы не запачкать поверхность плёнки жиром или грязью.

3. Подготовить эталон. Эталонном служит подложка без нанесённой плёнки.

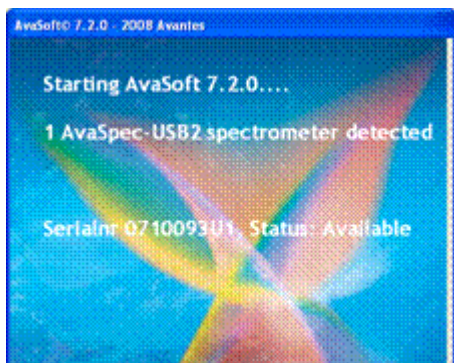
4. Включить все приборы. При этом на передних панелях приборов загораются индикаторы. На блоке источников света выбрать положение «DH» - среднее положение тумблера.

5. Вызвать программу, дважды щёлкнув мышью по иконке (на рабочем столе ПК) с названием AvaSoft 7.2 Thinfilm USB2:



*Рис. 4.1.15. Иконка вызова программы на рабочем столе*

6. При загрузке программы на рабочем столе появляется заставка с логотипом фирмы Avantes



*Рис. 4.1.16.  
Рисунок на рабочем столе  
– индикация загрузки программы*

После загрузки программы на мониторе появляется первый экран (рис. 4.1.18). Экран пуст, поскольку измерения пока не проведены.

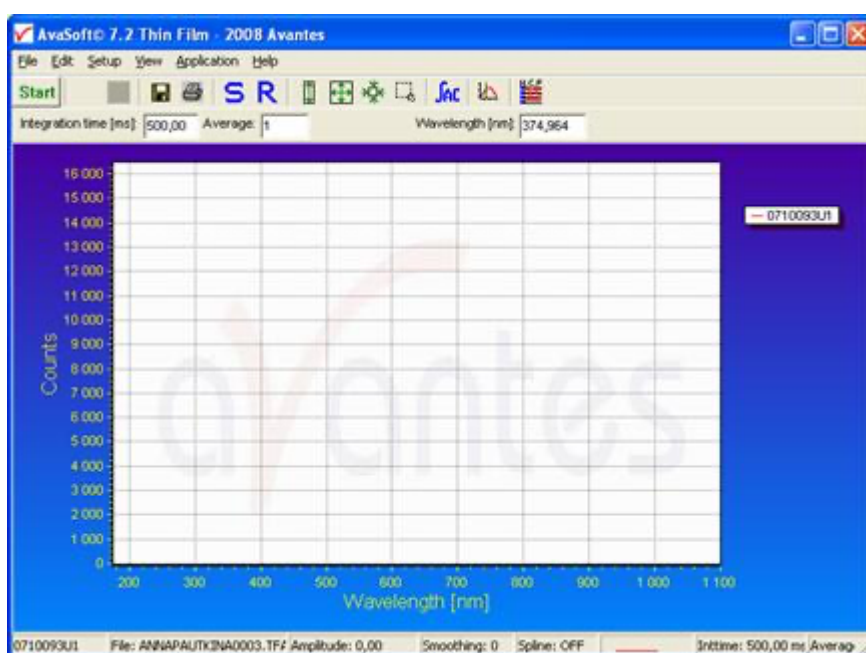


Рис. 4.1.17. Первый экран при работе с программой

7. Перед проведением измерений необходимо задать значения эталона (подложка) и «чёрного» света (темновой сигнал спектрометра).

7 а. Измерение значений эталонной подложки:



Поставить под оптический щуп эталон (подложку). В верхнем меню нажать кнопку S. Нажать кнопку Start. Через несколько секунд нажать кнопку Stop. На экране появится результат измерений.

Нажать белый квадратик. Программа предложит сохранить данные, на что надо согласиться.

#### 7 б. Измерение значений темнового сигнала:

Закрыть (или выключить) световой поток, идущий по оптическому световоду. Нажать кнопку S. Нажать кнопку Start. Через несколько секунд нажать кнопку Stop. На экране появится результат измерений темнового сигнала (рис. 4.1.18).

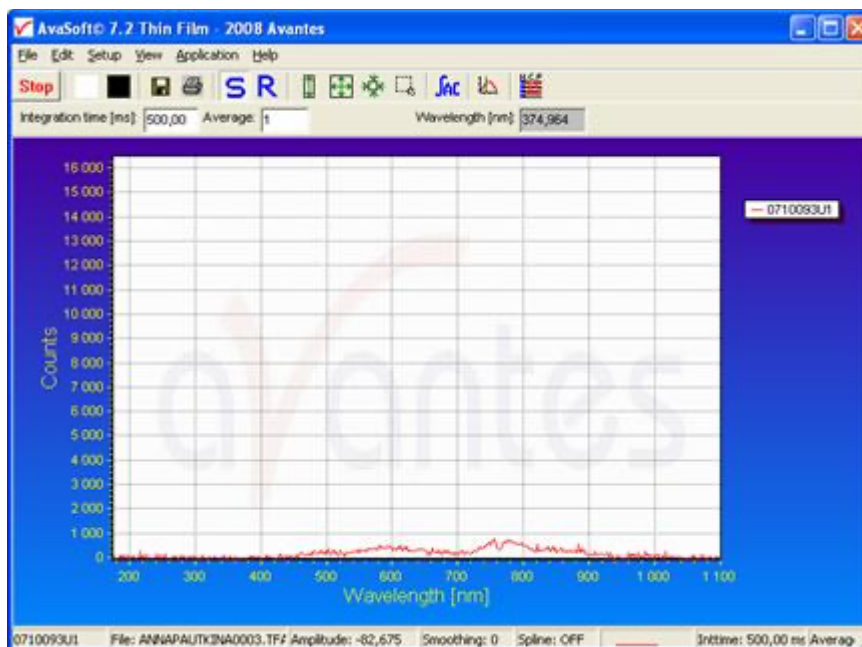


Рис. 4.1.18. Измерение темнового сигнала спектрометра

Нажать чёрный квадратик. Программа предложит сохранить данные, на что надо согласиться, нажав кнопку «ОК» в появившемся окне (рис. 4.1.19).

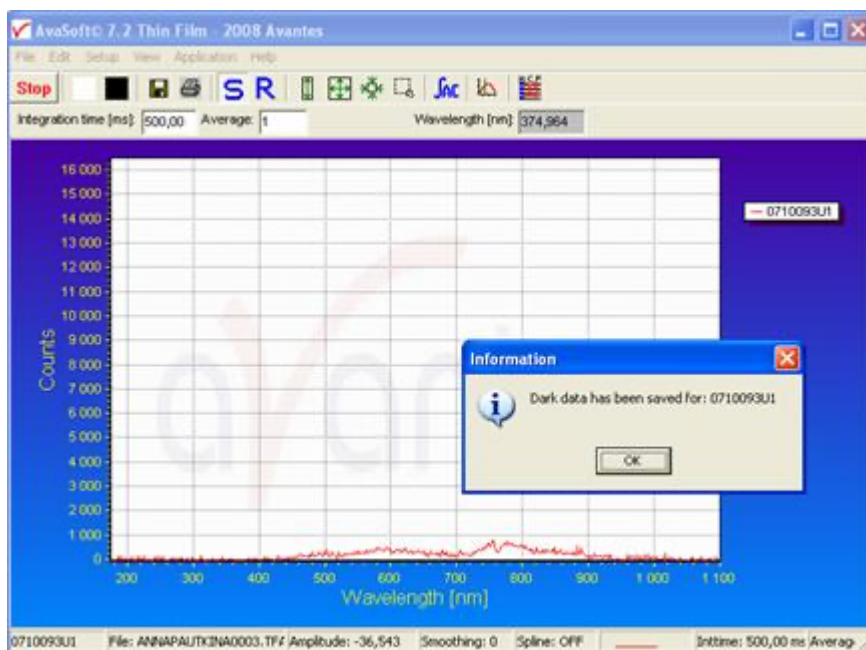


Рис. 4.1.19. Сохранение значений темнового сигнала

При проведении измерений отражения подложки и темнового сигнала максимально уменьшить внешнее освещение или светоизолировать подставку с оптическим щупом.

8. Выставить обозначения материалов подложки и плёнки, выбрав из базы данных (рис. 4.1.20):

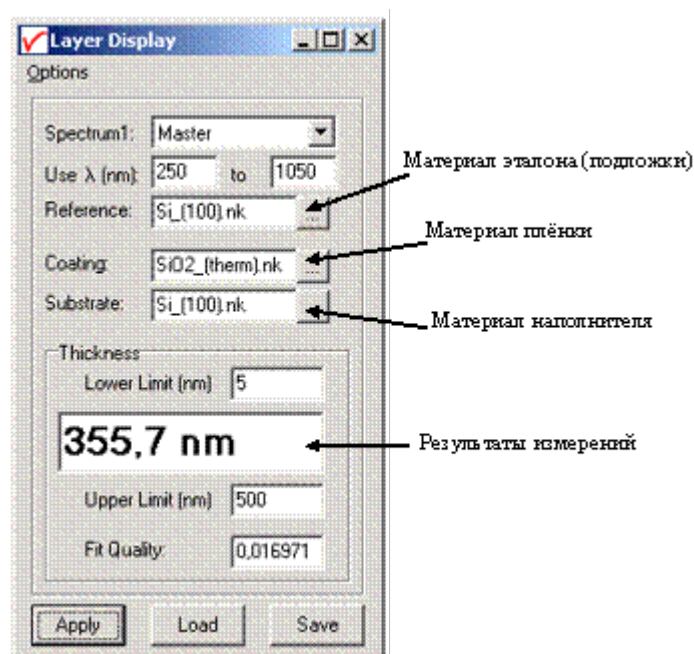


Рис. 4.1.20. Выставление значение параметров исследуемого образца



Материалы подложки и плёнки выбираются из базы данных, расположенной в директории с базой данных

C:/Thinfilm7USB2/materials. Экран с базой данных приведён на рис. 4.1.21.

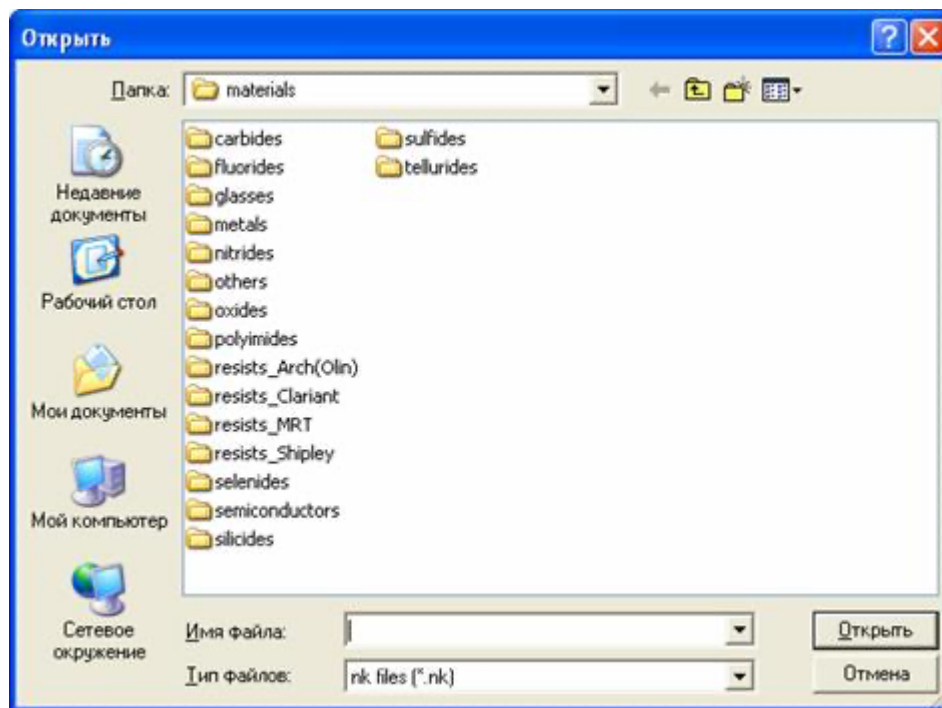


Рис. 4.1.21. Экран с базой данных по используемым материалам

9. Установить образец. При этом торец оптоволоконного щупа, закреплённого в держателе, приблизить к образцу [1], следя при этом, чтобы не было касания поверхности.

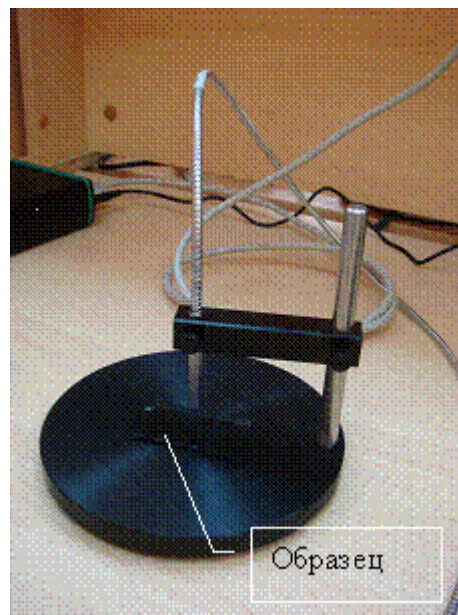


Рис. 4.1.22. Образец установлен

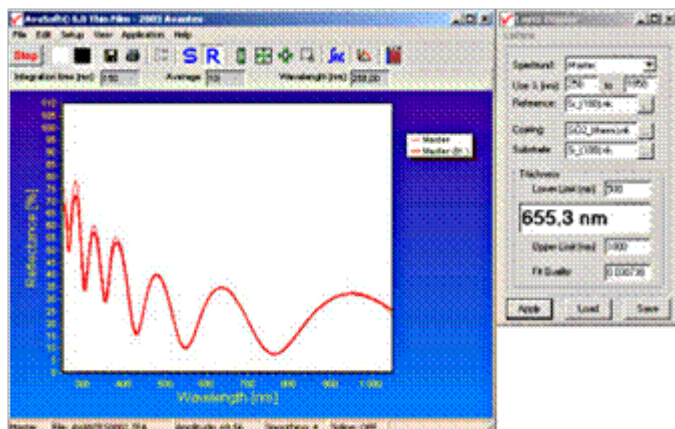
10. В верхнем меню нажать кнопку R.

Выставить время проведения измерений (Integration time) в мс. Время проведения одного измерения (одного сканирования) порядка 30 мс.

Выставить количество проходов сканирования (Average).

Затем нажать Start для начала проведения измерений.

Установка начала проведение измерений. Данные отображаются на экране.



На экране появится результат измерений (рис. 4.1.23).

Через несколько секунд остановить измерения, нажав на кнопку Stop.

На маленьком экране выводится значение толщины плёнки. На рис. 4.1.23 толщина плёнки равна 655,3 нм.

Рис. 4.1.23. Результат измерений толщины плёнки

Результаты проделанных измерений толщины занести в таблицу 4.1.1

Таблица 4.1.1. Значения толщин плёнок

	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
№ изм.	$d_1$ , нм	$\Delta d_1$ , нм	$d_2$ , нм	$\Delta d_2$ , нм	$d_3$ , нм	$\Delta d_3$ , нм
1						
2						
3						
...						
10						
$d_{cp}$ , нм						
$\Delta d_{cp}$ , нм						
$\Delta d_{cl}$ , нм						
$\Delta d$ , нм						

Здесь  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  – толщины плёнок образцов с номерами 1, 2 и 3;

$\Delta d_1$ ,  $\Delta d_2$ ,  $\Delta d_3$  – приборные погрешности измерений (на рис. 4.1.25 погрешность определена автоматически в красном окошке);

$\Delta d_{сл}$  – случайная погрешность измерений;

$\Delta d$  – полная погрешность измерений, учитывающая приборную и случайную погрешности.

12. Данные измерений можно сохранить. Для этого необходимо создать директорию, в которую предполагается сохранить данные. Далее, после окончания текущего измерения выбрать эту директорию следующим образом: в верхнем меню выбрать File → Start New Experiment, далее с помощью обозревателя найти ранее созданную папку, далее задать имя данной серии экспериментов. В ходе дальнейших записей программа автоматически будет присваивать номер текущему измерению под заданным именем (рис. 4.1.24).

Данные будут сохранены в формате программы, т.е. их можно вызвать только при работающей программе.



Рис. 4.1.24. Сохранение данных в формате программы

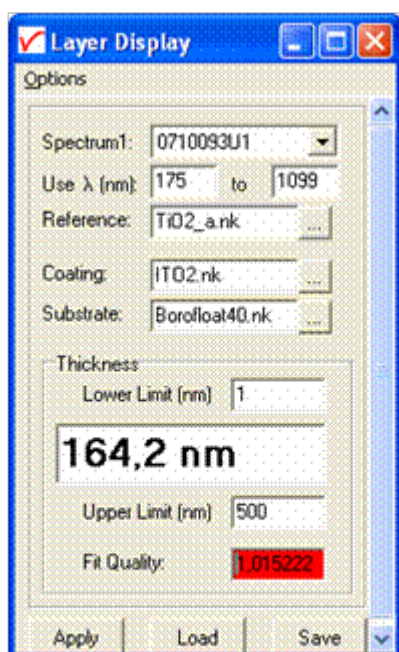


Рис. 4.1.25.

*Результат измерений толщины плёнки*

В программе предусмотрен автоматический расчёт погрешности измерений (Рис. 4.1.25.). Для каждого измерения в окошке, выделенном на рис. 4.1.25. красным цветом, выводится значение погрешности измерений толщины в нанометрах (нм).

Записать значение погрешности для каждого из измерений в таблицу 4.1.1. Рассчитать среднее арифметическое погрешности для каждого образца:

$$\Delta d_{\text{ф}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta d_i}{10}$$

Данная погрешность может считаться приборной погрешностью.

Рассчитать случайную погрешность измерений методом Стьюдента.

Рассчитать среднее арифметическое значение измеренной величины

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$x_i$  - результат измерения с номером  $i$ ;  $n$  - число измерений данной величины.

Данные также можно сохранить в формате Excel или ASCII. Для этого необходимо выбрать файлы для конвертирования: File → Conver Graph, далее с помощью обозревателя найти ранее созданную папку, выделить файлы и дать команду выполнить операцию.

13. Записать ответ в виде

Образец 1:  $d_1 = d_{1\text{cp}} \pm \Delta d_1$

Образец 2:  $d_2 = d_{2\text{cp}} \pm \Delta d_2$

Образец 3:  $d_3 = d_{3\text{cp}} \pm \Delta d_3$

### Расчёт ошибок измерений

Выбрать коэффициент Стьюдента из таблицы 2.1.3, приведённой в приложении 2, соответствующее доверительной вероятности 0,95 и проведённому числу измерений.

Рассчитать выборочное стандартное отклонение среднего арифметического (или среднеквадратичную погрешность среднего арифметического):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}},$$

где  $x_i$  - результат измерения с номером  $i$ ;  $\langle x \rangle$  - среднее арифметическое;  $n$  - число измерений данной величины.

Перемножить коэффициент Стьюдента  $\alpha$  и выборочное стандартное отклонение среднего арифметического  $S$  и таким образом найти случайную погрешность  $\Delta x = \alpha S$ .

Полная погрешность измерений рассчитывается

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta d_{\text{ср}})^2 + (\Delta d_{\text{ин}})^2}.$$

Значение  $\Delta d$  приводится в окончательной записи результатов измерений (пункт 13 порядка выполнения работы). Точность ответа – десятые доли нм.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение явления интерференции.
2. Дать определение когерентных волн.
3. Описать методы получения когерентных волн.
4. Перечислит и кратко охарактеризовать методы наблюдения интерференции.
5. Описать метод наблюдения интерференции в тонких плёнках.
6. Привести примеры наблюдения интерференции в тонких плёнках в природных явлениях.
7. Привести примеры использования тонких плёнок.
8. Перечислить основные элементы установки и схему их соединения.
9. Что служит источниками света в установке?
10. Как выбрать уровень светового сигнала для проведения измерений?
11. Как световой сигнал передаётся на измерительное устройство?

12. Принцип передачи световых сигналов оптоволоконной линией.
13. Какие данные о материалах образцов необходимо знать для проведения измерений используемым методом?
14. Для чего используются эталон материала подложки и чёрного цвета?
15. Как выставить значения показателей преломления вещества плёнки и подложки, на которую плёнка нанесена?
16. Как рассчитать погрешность измерений?

### Список литературы

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003 . – 720 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2004 – 544 с.
3. Сивухин Д.В. Оптика. Т.4. – М.: Физматлит, 2006. – 731 с.
4. Степанов Б.И. Введение в современную оптику. – Минск: Наука и техника, 1989. – 254 с.
5. Физическая энциклопедия. Т.4. Под редакцией А.М. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 704 с.

## Исследование фотометрических параметров светоизлучающих диодов

### Цель работы:

- практическое освоение методики экспериментального определения фотометрических параметров источников света (на примере светоизлучающих диодов) на автоматизированном оптоволоконном спектрометрическом оборудовании;
- освоение принципов измерений спектральных характеристик излучения, определение длин волн максимальной интенсивности и полуширины пиков излучения;
- освоение принципов количественных радиометрических измерений.

### Введение

**Фотометрия** – раздел физической оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения (испускаемого источниками, распространяющегося в



различных средах и взаимодействующего с веществом). При этом энергия электромагнитных колебаний оптического диапазона усредняется по малым интервалам времени, которые, однако, значительно превышают период рассматриваемых оптических колебаний. Фотометрия охватывает как экспериментальные методы и средства измерений фотометрических величин, так и относящиеся к этим величинам теоретические положения и расчёты. Основным энергетическим понятием фотометрии является поток излучения  $\Phi$ , имеющий физический смысл средней мощности, переносимой электромагнитным излучением. Пространственное распределение  $\Phi$  описывается энергетическими фотометрическими величинами, производными от потока излучения по площади и (или) телесному углу. Световые величины – это фотометрические величины, обычно приведённые в соответствие со спектральной чувствительностью среднестатистического человеческого глаза (важнейшего для человека приёмника света) адаптированного на дневное освещение. Изучение зависимостей фотометрических величин от длины волны излучения и спектральных плотностей энергетических величин составляет предмет спектрофотометрии и, если шире, спектрорадиометрии.

Точная фотометрия излучательных устройств и последующая правильная интерпретация получаемых результатов обычно представляют собой достаточно сложную задачу и требуют от исследователя большой изобретательности и терпения. Рассматриваемые здесь величины так многочисленны и тесно связаны между собой, что неопытный исследователь легко может впасть в заблуждение даже при использовании хороших измерительных приборов. Большое число единиц измерения, встречающихся в литературе, представляет значительные трудности также из-за того, что в практических измерениях разные исследователи используют как метрическую, так и английскую системы единиц.

Для дальнейшего весьма существенно понять разницу между радиометрией и фотометрией. Радиометрия представляет собой методику количественного измерения потоков электромагнитного излучения, в частности в спектральном диапазоне от радиоволн до рентгеновских лучей. При этих измерениях в основном используются энергетические единицы. Единицы энергии излучения измеряются в Джоулях, мощность потока излучения в Ваттах, поверхностная плотность потока излучения (облучённость) в Вт/см<sup>2</sup> и так далее. К радиометрическим световым единицам относится также и световой поток, выражаемый в люменах, освещённость – в люксах или люменах на квадратный метр и т.д. Переход от световых единиц к энергетическим приведён разделе 1.7. (глава 1 Части I настоящего пособия). Хотя исторически фотометрия сложилась первой, в настоящее время она рассматривается как отдельная область радиометрии, в которой характеристика устройства, измеряющего излучения (обычно называемого чувствительным элементом), зависит от длины волны измеряемого излучения некоторым четко определенным образом. Визуальная (субъективная) фотометрия имеет дело со сравнительно узкой областью электромагнитного спектра, в котором заключены излучения с длинами волн от  $3.8 \cdot 10^{-7}$  м до  $7.6 \cdot 10^{-7}$  м. В настоящее время наиболее часто используемая единица длины световой волны называется «**нанометр**» (нм), который равен  $10^{-9}$  м. Видимая область спектра, выраженная в этих единицах, простирается в этом случае от 380 нм (фиолетовый цвет) до 760 нм (красный цвет). Выражают длины волн и в ангстремах (Å) ( $1 \text{ Å} = 10^{-10}$  м или 0,1 нм). Видимая область спектра, выраженная в ангстремах, лежит в пределах от 3800 Å до 7600 Å. Видимым этот диапазон назван потому, что за его пределами (в области рентгеновских лучей, в ультрафиолетовом и в инфракрасном диапазонах) визуальная фотометрия простым человеческим глазом невозможна.

Довольно часто при измерениях в видимой области спектра, если хотят получить достаточно четкие ответы при решении проблем зрительного восприятия, необходимо, чтобы чувствительный элемент имел спектральную характеристику, соответствующую определенным стандартам фотометрии. Такая, точно определенная, спектральная характеристика чувствительного элемента называется «**функцией видности**» глаза или «**функцией спектральной чувствительности**». В отчете Международной комиссии по освещению (МКО) этот термин был заменен термином «**функция спектральной световой эффективности**», которая обозначается и записывается как  $V(\lambda)$ .

Весьма важным, ограничивающим фотометрическую точность фактором является степень соответствия спектральной характеристики чувствительного элемента заданной характеристике, соответствующей «**функции спектральной чувствительности**».

Так, например, ватты (Вт) можно количественно связать с фотометрическими единицами только при заданной длине волны. Например, в области максимума чувствительности среднестатистического человеческого глаза к дневному свету, которая находится вблизи волны длиной 555 нм, коэффициент перевода составляет 680 лм/вт, где люмен (лм) – единица измерения светового потока. По мере удаления по спектру от этой соответствующей зеленому цвету области в любую из сторон глаз становится все менее и менее чувствительным, так что каждый Ватт энергии оказывает на него все меньшее и меньшее воздействие, пока в пределе зрительное ощущение не исчезает совершенно. Число фотонов, приходящихся на люмен, также зависит от длины волны, однако иным образом, поскольку «синие» фотоны обладают большей энергией, чем «красные».

Рис. 4.2.1 иллюстрирует соотношения, с помощью которых излучённую оптическую энергию можно скоррелировать с кривой видности человеческого зрения и оценить число световых квантов (фотонов) на ватт или ватт на люмен в любой точке видимого диапазона.

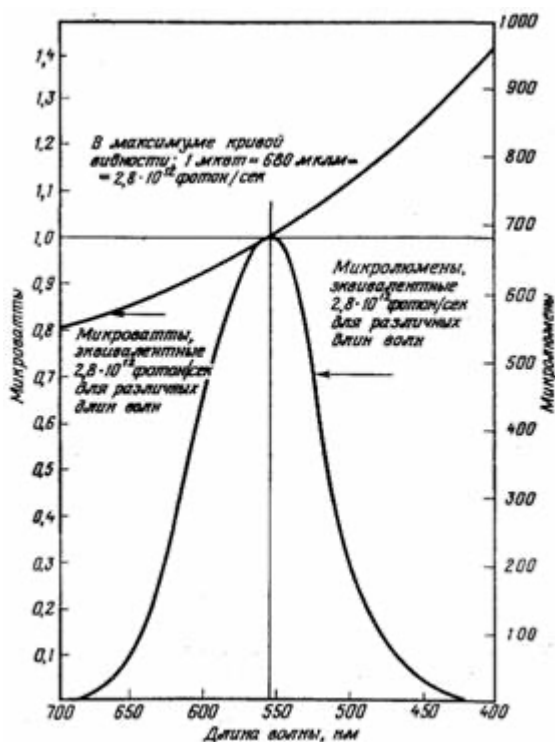


Рис. 4.2.1. Взаимосвязь между длиной волны, энергией и люменами.

**Функция видности** человеческого глаза, принятая теперь официально во всех странах, представляет собой результат усреднения данных нескольких исследователей. Эти данные были получены различными, не всегда эквивалентными путями. Глаза отдельных наблюдателей могут несколько отличаться друг от друга. В связи с этим идеальный объективный фотометр (чувствительный элемент, имеющий функцию спектральной чувствительности, идентичную по форме функции видности глаза может и не дать в точности то же самое значение для отношения интенсивностей двух спектрально различных источников, что и конкретный человек-наблюдатель, использующий свой глаз в качестве нуля-индикатора в визуальном фотометре. Это обстоятельство, однако, в общем случае не вызывает затруднений, поскольку действительное назначение системы фотометрических единиц и заключается в



том, чтобы обеспечить твердый физический базис для количественных измерений. Некоторая несогласованность системы с каждым отдельным наблюдателем определяется индивидуальными различиями зрительного аппарата у разных людей.

**Механический эквивалент света** равный  $1/680$  Вт/лм. представляет собой масштабный коэффициент, посредством умножения на который нормируются функция видности и функция спектральной интенсивности излучения стандартного излучателя. Чаще всего функция видности изображается в линейном масштабе (по оси ординат). На рис. 4.2.2 она представлена для среднестатистического глаза адаптированного на дневное и ночное освещение. Эта функция называется функцией относительной видности глаза. На приведённом рисунке она показана для глаза, адаптированного на дневное освещение (сплошная кривая) и на ночное освещение (пунктирная кривая). Обе кривые нормированы по максимумам к 100%.

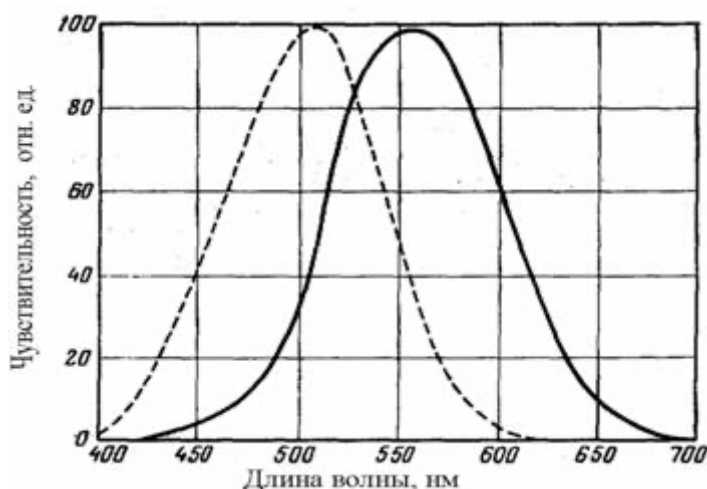


Рис. 4.2.2. Чувствительность человеческого глаза к оптическому излучению различных длин волн.

Исторически первоначально при фотометрических измерениях чувствительным элементом служил человеческий глаз. Для выполнения таких измерений было создано большое число различных устройств. Однако общей чертой всех этих устройств является то, что в них глаз и мозг наблюдателя используются в качестве нуль-индикатора правильности установки некоторой шкалы или измерителя. Даже при работе с невизуальными чувствительными элементами, такими, как фотографическая эмульсия и телевизионные устройства, существует широко распространенная тенденция к использованию привычных фотометрических единиц, основанных на свойствах человеческого глаза. Хотя часто и утверждают, что в этом случае возникает путаница в единицах измерения и вся система единиц оказывается непригодной, подобные мнения обычно проистекают от недопонимания простоты основных положений, лежащих в основе фотометрических единиц измерения. Рассмотрим подробно существо этих единиц.

**Сила света.** Основной единицей, из которой в дальнейшем выводятся все остальные световые единицы, является единица силы света - свеча. Свеча определяется как  $1/60$  фотометрической силы света с  $1 \text{ см}^2$  поверхности абсолютно черного тела при температуре затвердевания платины и наблюдении излучения в направлении, нормальном к излучающей поверхности.

Платина затвердевает при температуре  $2046,5\text{K}$ . Эта температура носит название фотометрической стандартной цветовой температуры.

По самому определению стандарты любых единиц должны быть такими, чтобы их легко могли понять и воспроизвести работники любой области науки или промышленности во всех частях света. Хотя этот стандарт и обладает подобным достоинством, в технической практике обычно изготавливают и используют вторичные стандарты — в форме вольфрамовых ламп накаливания. Сила света такого стандарта должна наблюдаться вполне определенным образом. Требование наблюдения по нормали к поверхности подразумевает в неявной форме изотропность потока излучения, что немедленно приводит к определению единицы светового потока — люмена.

**Световой поток.** Все вопросы, связанные с определением световых величин, просто решаются в том случае, когда источник излучает свет равномерно во всех направлениях. Такой источник называется изотропным, а примером может служить раскалённый металлический шарик. Изотропный источник излучения с силой света  $I$  св излучает  $I$  лм светового потока в каждом стереadiane телесного угла. Таким образом, источник с силой света  $I$  св излучает световой поток  $4\pi I$  лм.

**Анизотропные излучатели.** В действительности большинство излучателей света не изотропно или анизотропно, поэтому требуется очень большая осторожность при использовании и измерении характеристик стандартных источников, а также и любых других источников излучения.

Пусть мощность лучистой энергии, приходящейся на телесный угол  $\omega$ , равна  $\Phi$  лм, а сила света источника составляет  $I$  св (предполагается изотропность излучения), тогда

$$I = \Phi / \Omega \text{ св} \quad (1)$$

Эту величину весьма часто называют силой света в данном направлении. У большинства реальных источников сила света в данном направлении изменяется с изменением направления весьма сильно и характер ее пространственного распределения, как правило, никак не связан с действительной полной силой света источника. Полная сила света источника (такого, например, как лампочка) обычно определяется путем помещения его в интегрирующую сферу, имеющую почти равный единице коэффициент отражения от внутренней поверхности и последующих измерений через небольшое окно в этой поверхности (глава 1, Часть I). Полный световой поток сравнивается с известным стандартом.

**Яркость.** Количественно яркость может быть определена как сила света, излучаемого с единицы светящейся поверхности. Термин *brightness* (блеск) часто неправильно используется вместо термина *luminance* (яркость). Термин «блеск», согласно определению, применяется для оценки интенсивности точечных источников, таких, как звезды. Этот термин также используется специалистами в области физиологической оптики. При измерении яркости с помощью идеального точечного чувствительного элемента обычно не имеет значения, будет ли поверхность самосветящейся или отражающей внешние излучения. В нормальном к светящейся поверхности направлении сила света определяется следующим выражением:

$$I = L \cdot S, \quad (2)$$

где  $S$  - площадь светящейся поверхности и  $L$  - яркость. Если яркость по поверхности объекта неравномерна, тогда сила света  $I$  задается следующим интегралом:

$$I = \int L(x,y) dS, \quad (3)$$

а средняя по площади (габаритная) яркость при этом будет равна

$$L_{cp} = I/S = 1/S \int L(x,y) dS \quad (4)$$

Яркость излучающей или отражающей свет поверхности может весьма сильно зависеть от направления наблюдения. Это, конечно справедливо для металлизированных и зеркально – растровых отражающих проекционных экранов, рассеивающих световой поток в желательных направлениях. Для сравнения таких отражающих поверхностей, а также для определения их фотометрических свойств в качестве эталона применяют некоторую идеализированную поверхность, отражающие свойства которой весьма просты и легко описываются математически. Такой поверхностью является так называемая ламбертовская поверхность (или излучатель, И.Ламберт – известный немецкий учёный), которую сравнительно легко воспроизвести приближенно как в лабораторных, так и в полевых условиях. Если яркость исследуемой поверхности в заданном направлении больше яркости ламбертовской поверхности, коэффициент отражения которой в любом направлении равен единице, то отношение этих яркостей называют коэффициентом яркости в заданном направлении.

**Ламбертовский излучатель света.** Ламбертовский излучатель обычно называют также ламбертовской или равномерно рассеивающей поверхностью. Особенностью такой математически идеализированной поверхности является характер зависимости силы света от направления его излучения (по отношению нормали к поверхности). Эта зависимость подчиняется так называемому закону косинуса, согласно которому сила света, излучаемого с единицы поверхности, пропорциональна косинусу угла, заключенного между направлением излучения и нормалью к поверхности.

Такой несколько парадоксальный результат можно легко объяснить, рассмотрев регистрирующий элемент, чувствительность которого в пределах некоторого телесного угла не зависит от направления. Когда такой чувствительный элемент воспринимает свет в нормальном к излучающей поверхности направлении, «наблюдаемый» участок поверхности представляет собой круг. Если же свет воспринимается в направлении, отличном от нормального, то «наблюдаемый» участок становится эллипсом, а его площадь возрастает в  $(1/\cos \varphi)$  раз ( $\varphi$  — угол между указанным направлением и нормалью к поверхности). При этом возрастание «наблюдаемой» площади в точности компенсирует снижение интенсивности излучаемого света от каждой точки поверхности. Правильно спроектированные измерители освещенности имеют косинусную характеристику в предположении, что обычные отражающие поверхности (как, например, белая бумага) по своим свойствам близки к равномерно рассеивающей поверхности. Такой измерительный прибор позволяет хорошо оценивать зрительную эффективность освещения рабочей поверхности независимо от того, падает ли на нее свет по нормали или под некоторым углом. При использовании специальных методов может быть получено превосходное приближение к идеальной ламбертовской поверхности.

**Геометрические законы освещения.** Все обычно применяемые фотометрические единицы освещенности основаны на использовании *свечи* в качестве эталона силы света удаленного источника. Единицей светового потока является люмен, равный заключенной в телесном угле **1 стер** части светового потока, создаваемого изотропным точечным источником с силой света **1 св**. В соответствии с законом освещения, который может быть выведен геометрически, освещенность поверхности (выраженная в люменах на единицу площади), освещаемой нормально падающим светом, определяется выражением

$$E = I/R^2 \quad (5)$$

где  $R$  — расстояние от источника света до поверхности.

В международной системе единиц измерения единица освещенности определяется как люмен на квадратный метр, которая равна люксу. В практической фотометрии при использовании реальных (неточечных) источников света указанное выше простое соотношение справедливо лишь тогда, когда наибольший поперечный размер источника не превышает  $1/10$  расстояния от источника до освещаемой поверхности. В более сложных случаях освещенность определяется суммированием элементарных

освещенностей, создаваемых на освещаемой поверхности бесконечно малыми элементами светоизлучающей площади источника (с учетом угла падения света  $\theta$ ). Элементарная освещенность определяется следующим выражением:

$$dE = (dI/R^2) \cos \theta = \{L(R, \theta)/R^2\} \cos \theta dS \quad (6)$$

где  $L(R, \theta) = dI/dS$  – функция распределения яркости по светоизлучающей площади источника, выраженная через расстояние  $R$  и угол падения света  $\theta$ . В этом случае полная освещенность равна

$$E = \int dE = \int \{L(R, \theta)/R^2\} \cos \theta dS =, \quad (7)$$

где  $dS$  – элемент светоизлучающей площади, выражаемой обычно через  $R$  и  $\theta$ .

Рассмотренные выше соображения обычно достаточны для решения большинства задач по расчету освещенности. Однако основную роль среди измеряемых характеристик отображаемой информации играет не собственно освещенность, а яркость — характеристика, определяющая уровень зрительного ощущения.

**Единицы яркости.** В конечном счете, основной вопрос, на который необходимо ответить при решении любой технической задачи, связанной с фотометрическими измерениями, формулируется следующим образом: какова зрительно ощущаемая яркость (светлота) объекта наблюдения или каков яркостный контраст между объектом и фоном? Обычно для измерения яркости используют такие единицы, как свеча на квадратный метр, которая называется кандела на квадратный метр и обозначается – кд/м<sup>2</sup>.

При определении воспринимаемого светового потока функция спектральной интенсивности излучения умножается на некоторую весовую функцию, характеризующую приемник излучения (например, на функцию видности  $V(\lambda)$ ). Число люменов, излучаемых любым светящимся объектом, определяется путем интегрирования произведения функции видности на функцию спектральной интенсивности излучения  $P(\lambda)$  объекта, т. е.:

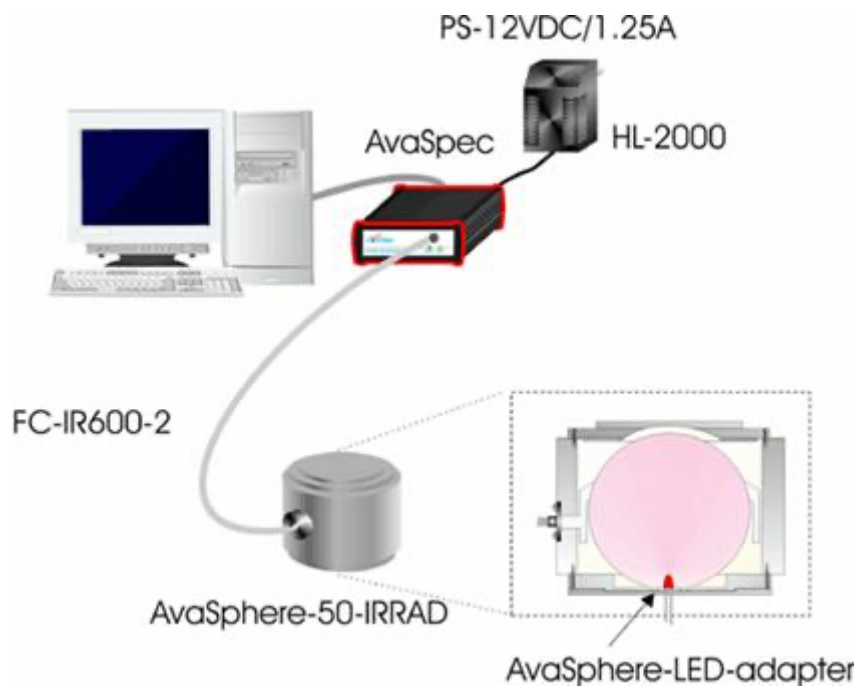
$$\Phi = K \int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

## Практические фоторадиометрические измерения

В настоящее время оптические методы исследования и контроля с использованием фотометрии и радиометрии нашли широкое применение в астрономии для исследования далёких звёзд, в биологии, медицине, сельском хозяйстве, аналитической химии и в технике отображения информации.

### Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.2.3.



*Рис. 4.2.3 Примерный набор оборудования и приспособлений для исследования фотометрических параметров излучающих объектов*

#### **Приборы и принадлежности:**

1. Персональный компьютер с установленным программным обеспечением AvaSoft – 7.2;
2. Оптоволоконный спектрометр AvaSpec 2048- FT-2-SPU;
3. Стабилизированный источник питания PS – 12VDC/1.25A;
4. Соединительный кабель питания HL – 2000;
5. Приспособление для установки излучающего образца AvaSphere – LED – adapter;
6. Оптоволоконный кабель FS – IR600 - 2;
7. Интегрирующая сфера AvaSphere – 50 – IRRAD;
8. Излучающий образец для исследований (электролюминесцентный конденсатор, светоизлучающий диод);

#### **Порядок сборки и запуска измерительной системы**

1. Проверить и удостовериться, что все элементы установки, приборы и приспособления находятся в наличии и пригодны для выполнения работы.

2. Подготовить исследуемые образцы для измерений, с помощью соединительных проводов подсоединить к источнику электропитания, вставить в держатель и закрепить в интегрирующей сфере.
3. Собрать электрическую и оптическую схему для проведения экспериментальных измерений согласно рис. 4.2.3.
4. Включить тумблер электрического питания на панели блока розеток, после включения должна загореться сигнальная лампочка.
5. Включить тумблеры питания на блоке источников питания, блоке оптической обработки сигналов, нажать кнопку включения компьютера и подождать загрузки программного обеспечения. После загрузки программного обеспечения на экране появится изображение с пиктограммой AvaSoft-7.2.
6. Войти в программу AvaSoft, щёлкнув два раза по пиктограмме AvaSoft-7.2. В появившемся окне информации (рис. 4.2.4) нажать кнопку ОК.



*Рис. 4.2.4. Окно информации о готовности работы спектрометра.*

7. Появляется главное окно основного меню программы (Рис. 4.2.5).

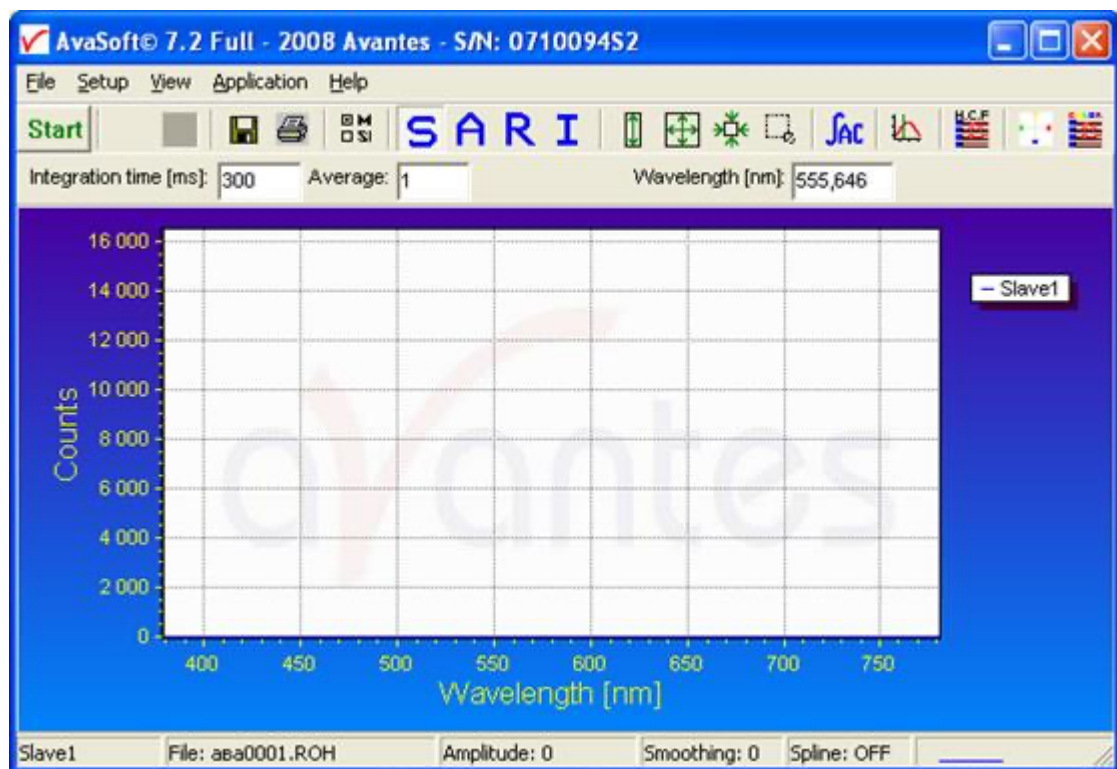


Рис. 4.2.5. Главное окно основного меню программы

### Задание №1. Экспериментальное измерение спектра излучения

- 1.1. После запуска программы AvaSoft щелкните кнопку Start в главном окне.
- 1.2. Настройте параметры сглаживания в меню Setup для того, чтобы оптимизировать сглаживание для используемого диаметра световода или спектральной щели.
- 1.3. Спектр излучения можно снимать или с помощью оптоволоконного зонда или с использованием интегрирующей сферы. Если спектр снимается с помощью зонда, то его нужно жёстко закрепить на источнике света. Обычно на экране сразу можно увидеть какой-то спектр, но, возможно, света будет или слишком много, или слишком мало при установленных настройках. То, что света слишком много означает, что в соответствующей спектральной области сигнал перегрузки выглядит как прямая линия на произвольной высоте, даже вблизи нуля. Эту проблему обычно можно решить выбором более короткого времени интегрирования. Время интегрирования может быть изменено в главном окне в белом боксе, расположенном ниже кнопки **start/stop**. Если AvaSoft накапливает данные, то кнопка **start/stop** выглядит как красная 'stop', а бокс времени интегрирования серый. Это означает, что оно не может быть изменено. После щелчка кнопки 'stop' поступление данных останавливается, и время интегрирования может быть изменено. Результат изменения времени интегрирования может быть виден после щелчка зеленой кнопки 'start'. Попробуйте настроить время интегрирования так, чтобы максимальная амплитуда во всей спектральной области была бы примерно 14000. Когда при минимальном времени интегрирования сигнал все равно слишком велик, используйте световод меньшего диаметра. Если в спектрометр поступает недостаточно света время интегрирования должно быть увеличено.

1.4. После получения спектра, развёртка которого расположена на всё поле координатной сетки экрана, выключите исследуемый источник света. Теперь сохраните темновые (Dark) данные. Это делается при помощи File-Save Dark из меню или щелчком мыши на черном квадрате в левом верхнем углу экрана.

После сохранения или загрузки опорных темновых данных режим измерения излучения может быть выбран щелчком кнопки start/stop. После появления на экране спектра излучения нажать на кнопку stop.

### Измерения Пика (Peak Measurements)

На рис. 4.2.6 показано типичное спектральное распределение энергии зеленого светоизлучающего диода (СИД).

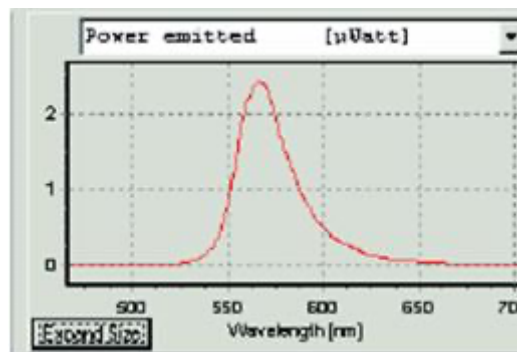


Рис. 4.2.6. Спектральное распределение излучения зелёного светодиода.


Из этого спектра может быть рассчитано и получено некоторое количество параметров пика:

**Полуширина пика** (The Full Width Half Maximum) - это ширина (в нанометрах), для которой интенсивность больше, чем половина максимальной интенсивности этого пика.

**Центральная длина волны** (Center Wavelength). – это длина волны середины между длинами волн слева и справа, для которых интенсивность равна половине максимальной.

**Длина волны Пика** (Peak Wavelength) – длина волны максимума спектрального распределения энергии.

**Длина волны центроида** (Centroid Wavelength) – длина волны, для которой полная спектральная энергия (интеграл) справа и слева одинаковы.

Для анализа полученного на экране спектра нажать на кнопку  в окне главного меню программы, на экране появляется визирная линия с помощью которой необходимо найти максимальную амплитуду в спектре излучения и определить длину волны, которая отображается на экране, рис. 4.2.6. Измерения повторить 10 раз. Результаты измерений занести в таблицу 4.2.1.

**Таблица 4.2.1.** Результаты измерения длины волны при максимальной амплитуде.



	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
№ изм.	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda_1$ , нм	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda_2$ , нм	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda_3$ , нм
1						
2						
3						
...						
10						
$\lambda_{\text{ср, нм}}$						
$\Delta\lambda$ , нм						

### 1.5 Обработка результатов.

Рассчитать длину волны  $\lambda_{\text{мах}}$ , соответствующую максимальной интенсивности излучения для определённого исследуемого образца. Для этого для каждого исследуемого образца рассчитать среднюю величину длины волны с максимальной интенсивностью:

$$\lambda_{\text{ср.мах}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} = (\lambda_{1\text{мах}} + \lambda_{2\text{мах}} + \dots + \lambda_{10\text{мах}}) / 10, \quad (9)$$

где  $\Delta\lambda_i$  – результат измерения с номером  $i$ , который в нашем случае изменяется от 1 до  $n$ ;  $n$  – число измерений данной величины (в нашем случае  $n = 10$ ).

Затем найти абсолютную погрешность каждого измерения по формуле:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_{i.\text{мах}} - \lambda_{\text{ср.мах}}. \quad (10)$$

Нахождение доверительного интервала производится по формуле:

$$\Delta\lambda = \sum_{i=1}^n |\Delta\lambda_i| / n. \quad (11)$$

Результат записать в виде: – длина волны, соответствующая максимальной энергии излучения равна среднему значению  $\pm$  доверительный интервал.

Например, для образца № 1:  $\lambda_{1\text{мах}} = \lambda_{1\text{ср.мах}} \pm \Delta\lambda_1$ .

### Задание № 2. Определение координат цветности излучателя

После снятия спектральных характеристик можно определить координаты цветности, а также цветовую температуру исследуемого источника освещения, которые могут быть отражены в режиме реального времени, как это показано на рис. 4.2.7.

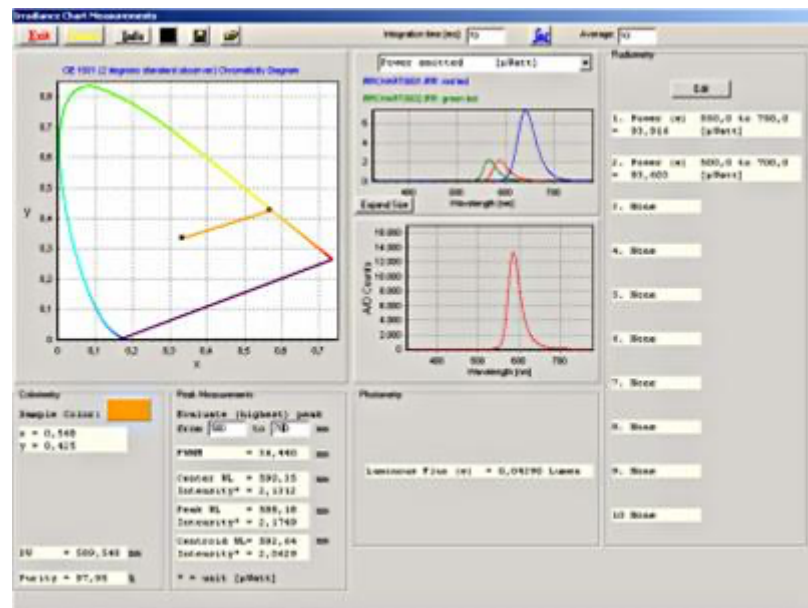


Рис. 4.2.7. Вид экрана монитора при цветовых измерениях излучателей

Из спектра излучения (в  $\mu\text{Watt}/\text{cm}^2$ ) может быть вычислено большое количество световых параметров: колориметрических, фотометрических и радиометрических.

Ниже дается краткая информация о колориметрических, радиометрических и фотометрических параметрах и описана процедура определения доступных для измерения параметров.

### Колориметрия (Colorimetry)

Цвет света может быть выражен хроматическими координатами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Эти хроматические координаты получаются выбором отношений величин ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) к их сумме:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (12)$$

Величины  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  рассчитываются как:

$$x = k \times \sum I_{\lambda} x_{\lambda}; \quad y = \sum I_{\lambda} y_{\lambda}; \quad z = \sum I_{\lambda} z_{\lambda}, \quad (13)$$

где:

$I_{\lambda}$  = интенсивность излучения на длине волны  $\lambda$ ,

$x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$  – величины принятые МКО в 1931 и 1964 годах для стандартного наблюдателя под углом зрения 2 или 10 градусов соответственно на длине волны  $\lambda$ .

$$k = \text{const} = (1 / \sum y_\lambda) = 0,00934 \quad (14)$$

X, Y и Z и спектральное излучение рассчитываются для области длин волн от 380 нм до 780 нм, при величине интервала в 1 нм.

Международным комитетом по освещению (МКО) в 1960г. принято, что цветовые координаты  $u$  и  $v$  рассчитываются, как:

$$u = 4x / (-2x+12y+3) \text{ и } v = 6y / (-2x+12y+3) \quad (15)$$

Для расчета цветовой температуры используется уравнение, которое является эмпирическим и имитирует излучатель абсолютно черного тела:

$$p = ((x-0.332) / (y-0.1858)) \quad (16)$$

### Цветовая Температура (Color Temp)

$$T_{\text{цв}} = 5520.33 - (6823.3 * p) + (3525 * p^2) - (449 * p^3). \quad (17)$$

При измерениях светоизлучающих диодов (СИД) и других излучающих объектов для описания цвета часто используется Основная Длина волны (Dominant Wavelength) и Спектральная Чистота (Purity) (также известные, как координаты (Helm Holz).

**Основная длина волны** может быть получена для измеренной точки образца S с хроматическими координатами цветности ( $S(x), S(y)$ ). Для этого нужно провести прямую линию из середины хроматической диаграммы (ахроматическая точка E при  $x=y=0.333$ , точка белого цвета) и измеренную точку  $S(x,y)$  к краю хроматической диаграммы (линии локуса) на треугольнике цветности рис. 4.2.8.

Точка пересечения прямой проходящей через точки E и S со спектральной линией локуса соответствуют основной (доминантной) длине волны. Метод, описанный выше, пригоден для всех цветов, где основная длина волны, лежит в области от 380 до 699 нанометров. Если координаты  $x, y$  находятся в области треугольника, ограниченного точками E, A и B, то основная длина волны не может быть рассчитана, потому что точка пересечения прямой, проходящей через E и S между A и B не соответствует длине волны. В этом случае пользуются дополнительным способом и находят сопряжённую длину волны (Complementary) Dominant Wavelength (CDW). Линия из E в  $S(x,y)$  направляется в другую, (обратную) сторону, чтобы определить сопряжённую длину волны (CDW).

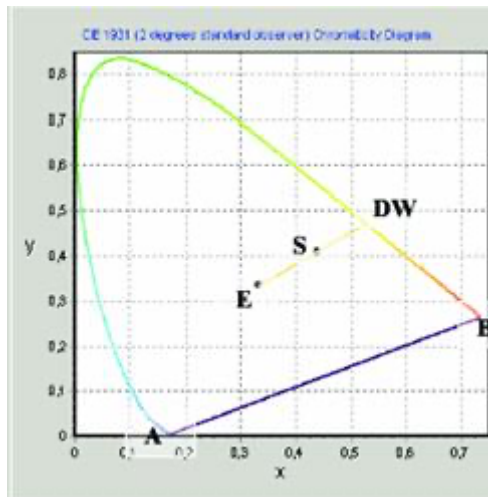


Рис. 4.2.8. К нахождению основной длины волны излучения.

**Чистота цвета (Purity)** – есть отношение расстояния от ахроматической точки (E) до точки образца (S), деленное на расстояние от точки S до точки пересечения прямой с линией локуса DW.

$$\text{Чистота цвета (Purity)} = (E-S) / (E-DW).$$

### Задание №3. Радиометрические измерения (дополнительное задание)

Количественные значения радиометрических параметров могут быть сгруппированы в трех категориях и выражены в соответствующих абсолютных единицах измерения:

- **Радиационный поток (Radiant)** [мкВт]:– полная излучаемая источником энергия во всех направлениях. Наилучший способ измерять энергию, излученную источником, - проводить измерения с источником, помещенным внутри интегрирующей сферы. Это часто делают при измерениях светоизлучающих диодов (СИД). Также возможно рассчитать поток от источника при измерениях излучения на поверхности диффузора (косинусный корректор или порт для образца интегрирующей сферы) на таком же расстоянии, что и до источника света. Важным предположением в этом расчете является то, что источник должен быть изотропным и расстояние между диффузором и источником должно быть в пять раз больше, чем наибольшее линейное расстояние источника (приближение точечного источника).

- **Энергетическая Сила Света (Radiant Intensity)** [мкВт/стер]: Энергетическая сила света – оптическая мощность в единичном телесном угле. Она используется для определения оптической мощности, излучаемой источником, в определенном направлении. Энергетическая сила света вычисляется по результатам измерений излучения умножением на квадрат расстояния между источником и поверхностью диффузора. При этом предполагается, что источник является точечным.

- **Поверхностная плотность потока излучения (Irradiance)** [мкВт/см<sup>2</sup>]: - используется для измерения мощности, получаемой поверхностью.

Радиометрические измерения могут быть выполнены двумя способами – с оптическим косинусным корректором или с интегрирующей сферой. Оба способа могут быть использованы для измерения спектра излучения от поверхности диффузора (косинусный излучатель или порт образца интегрирующей сферы) для того же расстояния, что и до источника света. В случае, когда измерения проводятся на том же расстоянии от источника, могут быть вычислены энергетическая сила света (Radiant Intensity) и световой поток (Flux), как было описано выше. Когда измеряемый источник находится внутри сферы, может быть измерен световой поток, но энергетическая сила света (radiant intensity) и поверхностная плотность (irradiance parameters) измерены быть не могут.

**Радиометрические параметры, рассчитанные по распределению мощности** (Radiometric parameters calculated from the power distribution).

Распределение мощности может быть легко преобразовано в **распределение энергии (energy distribution)** умножением мощности на время интегрирования. Результатом является величина энергии, которая была излучена или поступила за время одного цикла интегрирования. Другим радиометрическим параметром, который может быть рассчитан по спектру излучения, является **число фотонов (number of photons)**, которое падает на поверхность. Так как число фотонов на нанометр очень велико (даже при очень низких интенсивностях света), для удобства выражают число фотонов в молях (в нашем приложении в микромолях), используя для этого число Авогадро ( $N_A=6,02 \times 10^{23}$  частиц) учитывая, что один микромоль (мкмоль) составляет  $10^{-3}$  моля. Число фотонов на нанометр может быть рассчитано из зависимости энергии фотона от длины волны и из измеряемой абсолютной световой энергии. Распределение числа фотонов (мкмоль / с м<sup>2</sup> нм) [ $\mu\text{Mol}/(\text{s.m}^2.\text{nm})$ ] показывает поток фотонов, падающий на квадратный метр за секунду. Далее даются другие характеристики числа фотонов, которые могут быть рассчитаны:

- (мкмоль/с нм) [ $\mu\text{Mol}/(\text{s.nm})$ ] поток фотонов, получаемый поверхностью диффузора за секунду;
- (мкмоль/м<sup>2</sup> нм) [ $\mu\text{Mol}/(\text{m}^2 \text{ nm})$ ] фотоны, падающие на квадратный метр за один цикл интегрирования
- (мкмоль/нм) [ $\mu\text{Mol}/\text{nm}$ ] фотоны, падающие на поверхность диффузора за один цикл интегрирования.

### Порядок выполнения работы.

Имеется два способа контроля радиометрических параметров.

Первый способ контроля – посредством выбора (назначения) до десяти различных параметров или участков длин волн в радиометрическом боксе окна chart window рис 4.2.9.

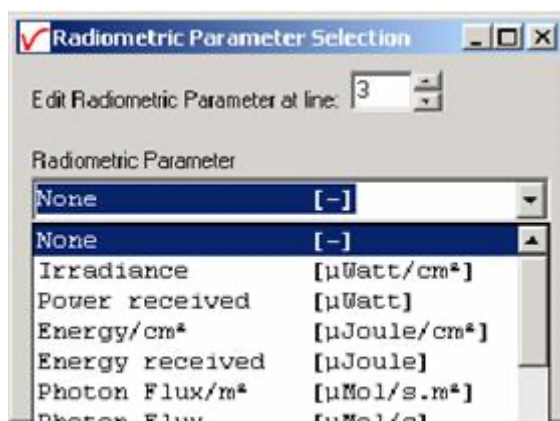


Рис. 4.2.9 Таблица (бокс) выбора радиометрических параметров.

Второй способ контроля – посредством выбора радиометрического параметра на графике, после чего для этого параметра будет показан спектр (см. рис. 4.2.10.).

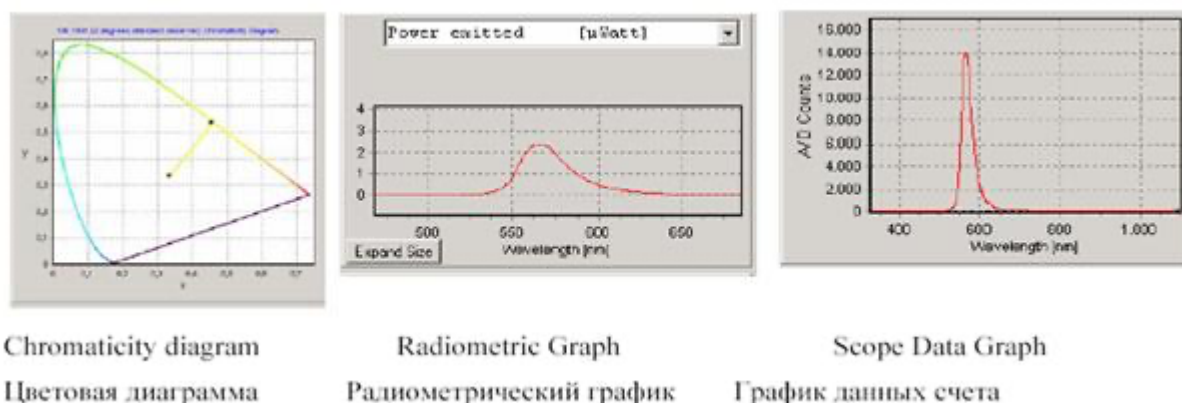


Рис. 4.2.10. Выбор радиометрического параметра с помощью графика.

Для выбора выходного параметра на одной или десяти строках в радиометрическом боксе нужно просто дважды щелкнуть на строке, или в окошке сверху ввести номер строки. Появится диалог, в котором радиометрический параметр и область длин волн можно уточнить. Область длин волн, это спектральный диапазон, по которому радиометрические выходные данные будут проинтегрированы. Например, точным определением UV-C для источника типа “C”, UV-B для источника типа “B” и UV-A для источника типа “A” областей длин волн на трех различных строчках излучение в этих трех спектральных диапазонах может быть измерено одновременно (предполагая, что область длин волн спектрометра включает в себя эти три выбранных участка и для этих участков была сделана калибровка). Заметьте, что достижимые параметры зависят от настроек в установочном диалоге irradiance chart. Например, для того, чтобы иметь возможность измерять энергетическую силу света “radiant intensity, должна быть использована опция “Calculate Power and/or Energy emitted by a source”.

Цветовая диаграмма используется для визуализации данных колориметрических измерений. В соответствие с тем, что было выбрано в установочном диалоге irradiance chart, будет показано геометрическое место точек стандартного наблюдателя для 2 или 10 градусов. Измеренные координаты (x,y) будут высвечены на диаграмме. Затем можно провести линию из ахроматической точки ( $x=y=1/3$ )

через измеренную точку  $S(x,y)$  до пересечения с линией локуса диаграммы треугольника цветности, (пересечение) которого соответствует доминантной длине волны. График данных счета показывает необработанные данные А/Д счета, которые поступают со спектрометра. Этот график может быть использован для того, чтобы определить, оптимальное ли время интегрирования было выставлено. Если время интегрирования слишком мало, то радиометрический спектр будет в шумах, если оно слишком велико, то детектор спектрометра может быть насыщен и в этом случае в Scope Data Graph появится табличка с сообщением о насыщении.

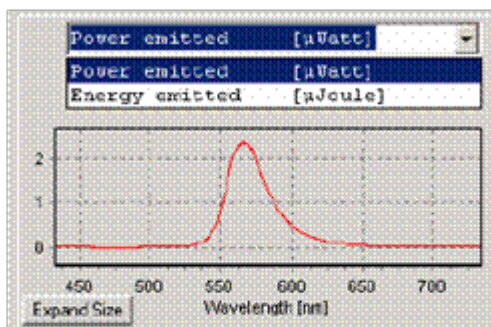


Рис. 4.2.11.  
Спектр излучения светодиода.

Радиометрический график рис. 4.2.11. показывает спектр для выбранного радиометрического параметра.

Точно так же, как и при выборе радиометрического параметра в радиометрическом боксе, доступные для измерения параметры зависят от установок в диалоге irradiance chart. На рисунке 4.2.11 измеряется светоизлучающий диод, помещенный внутрь интегрирующей сферы, - случай, при котором могут быть выбраны только излученная мощность в мкВт (Radiant Flux) и излученная энергия за один цикл интегрирования (в мкДж). Выбранный параметр на радиометрическом графике используется также для определения пиков.

Радиометрический спектр может быть сохранен и загружен кнопками “Save” и “Open Saved Graph”(см. ниже линейку кнопок).

Линейка кнопок (Button bar)



Кнопка Exit закроет irradiance chart и вернет главное окно AvaSoft.

Кнопка Pause остановит обработку данных, чтобы дать возможность сделать моментальный снимок спектра и/или выходных параметров.

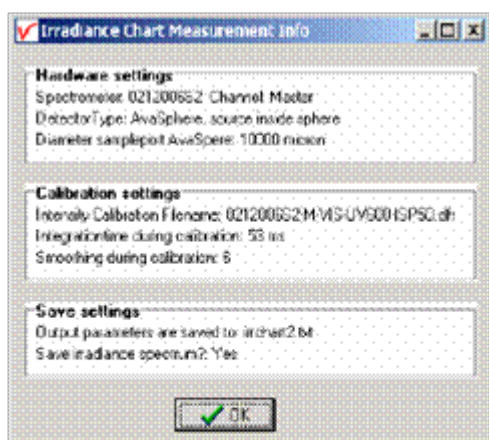


Рис. 4.2.12.

Информационный бокс текущих установок

Кнопка Info показывает информацию о текущих установках, как показано на рис. 4.2.12:

Последняя строка в этом диалоге: “Save irradiance spectrum?”:

Если выбирается эта опция, то затем все параметры (которые показаны) будут сохранены, в данном примере, в файле irrchart2.txt и спектр для выбранного на радиометрическом графике параметра будет сохранен в irrchart2xxxx.irr, где xxxx представляет порядковый номер. Если опция “Save irradiance spectrum” не выполнена, то будут сохранены только показанные выходные параметры.

Щелчок кнопки save data (справа от черной) добавит измеренные данные к текстовому файлу. К



сохраненным данным может быть добавлен комментарий пользователя. Если радиометрический спектр был сохранен с выходными параметрами, то имя этого файла также сохраняется в текстовом файле.

### Контрольные вопросы

1. Какие величины измеряются в радиометрии электромагнитных волн?
2. Как называется зависимость чувствительности человеческого глаза к оптическим излучениям различных длин волн?
3. Что называется ламбертовским излучателем света?
4. Назовите основные единицы измерения при фотометрии?
5. Как связаны между собой такие единицы измерения как *нанометр* и *ангстрем*?
6. Как выглядит график зависимости энергии фотонов от длины волны?
7. Что называется локусом спектрально чистых цветов?

### Список литературы

1. Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 431 с.
2. Техника систем индикации. / Перевод с англ. Под ред. Шеманина А. Н и Иванова Н. И.. - М: Изд. «Мир», 1970. – 520 с.
3. Крашение пластмасс. / Пер. с нем. Под ред. Парамонковой Т. А.. - Ленинград: Изд. “Химия” 1980.– 319 с.
4. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.А. Основы оптики. – С.Петербург: Техническая книга, 2006. – 336 с.

### Экспериментальная фотоколориметрия

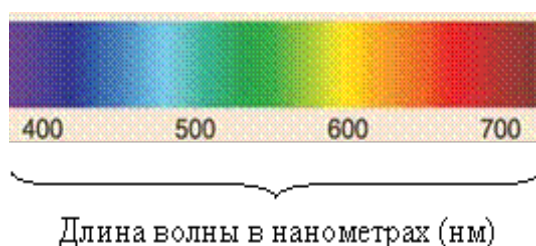
**Цель работы:** практическое освоение методики проведения колориметрических (цветовых) измерений на оптоволоконных спектрометрах фирмы “*Avantes*”. Приобретение навыков в экспериментальном определении спектральных характеристик и координат цветности различных образцов в диффузно-отраженном свете с применением рефлектометрического пробника и интегрирующей сферы.



## Введение

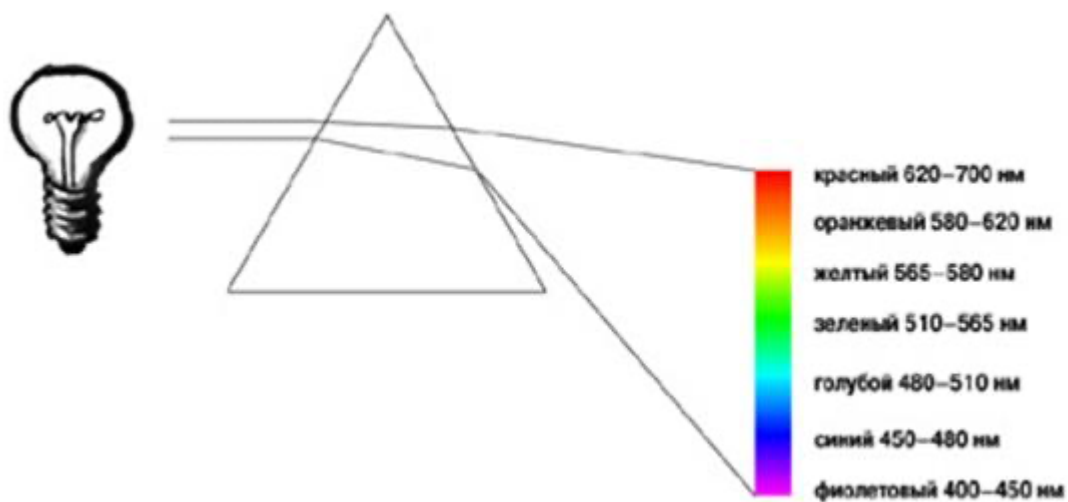
Фотоколориметрия – учение о цвете, о количественных выражениях цветов и их измерении. Цвет это основной показатель качества нашего восприятия многокрасочного мира. Ощущение цвета при визуальном наблюдении различных тел, воспринятое сознанием, передаётся глазом. Цвет – одно из свойств материальных объектов, воспринимаемое как осознанное зрительное ощущение. Человек, зрительно воспринимая окружающие его предметы, способен обнаружить их различия и сходство не только по форме, определяемой их контуром и рельефом, но также и по цвету. Без света цвет не воспринимается; слишком слабый свет объясняет нецветное восприятие окружающих предметов.

Рассмотрим свет как предпосылку цветового восприятия. Видимый свет представляет собой лишь относительно небольшую часть спектра электромагнитных волн Рис. 4.3.1.



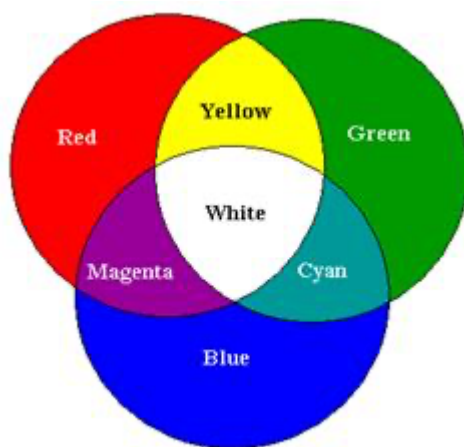
*Рис. 4.3.1. Наблюдаемый спектр видимого диапазона электромагнитных волн*

Наиболее известный способ разложения света осуществляется с помощью призмы. Проходя через призму, белый (ахроматический) свет разлагается на спектр монохроматических (индивидуальных) цветов – рис. 4.3.2.



*Рис. 4.3.2. Спектральное разложение света призмой*

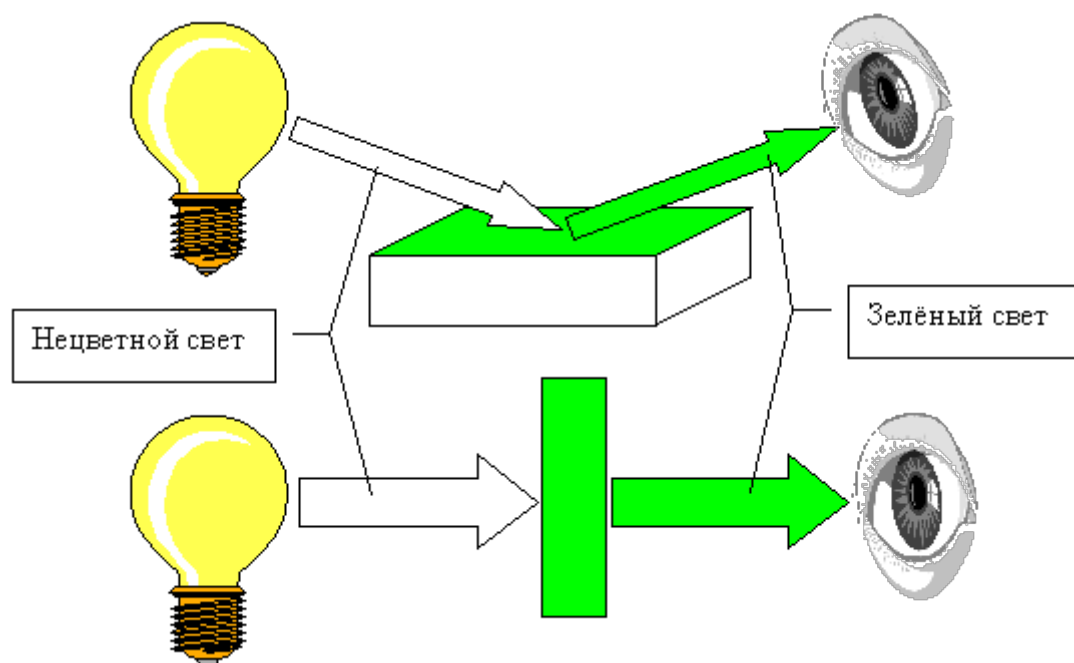
Совмещение отдельных цветов в пропорциональных количествах снова дает белый цвет. Смесь нескольких различных цветов воспринимается как новый цвет. Такое суммирующее смешение цветов на отдельном примере показано на (рис. 4.3.3).



*Рис. 4.3.3. Аддитивное смешение цветов*

В реальной жизни наблюдателю приходится иметь дело с телами и поверхностями, которые могут светиться, блестеть, отражать свет и быть прозрачными. Если большая часть цветовых ощущений исходит от несветящихся тел, в этом случае говорят о цвете предмета.

На рис. 4.3.4 приведены два типичных случая цветовых ощущений от цветных предметов.



*Рис. 4.3.4. Схема восприятия цвета при отражении (вверху) и пропускании (внизу) света окрашенными объектами*

В первом случае естественный (неокрашенный, строгий термин для обозначения которого — «ахроматический») свет падает на цветной образец, рассматриваемый наблюдателем под некоторым углом. Во втором случае источник света отделен от наблюдателя цветным предметом (светофильтром), который частично пропускает свет. В первом случае говорят о цвете поверхности предмета, который возникает в результате избирательного отражения света, во втором — о прозрачном цвете, вызванном избирательным пропусканием.

Для объяснения ощущения цветового тона предмета необходимо рассмотреть два физических понятия: поглощение и рассеяние.

При пропускании белого света через светофильтр определенная область длин волн избирательно поглощается (абсорбируется). Оставшаяся часть прошедшего через светофильтр спектра обязательно будет цветной. Поглощённая энергия, в основном, превращается в тепло. Мы называем такой образец, пропускающий цветной свет, – светофильтром.

При рассмотрении цветных образцов в отраженном свете цвет, например – красный, тоже выделяется из спектра в результате поглощения остальной его части. При этом наблюдатель не получил бы цветового ощущения, если бы оставшийся непоглощенным монохроматический свет при рассеянии не отклонялся бы от направления падения и обратного ему направления во все стороны, в том числе и в направлении наблюдателя. Цветной предмет в этом случае содержит мелкие частицы, неразличимые простым глазом, которые отражают свет во все стороны. Частицы могут иметь показатель преломления, сильно отличающийся от показателя преломления окружающей среды, чаще всего они рассеивают свет по всем направлениям, в том числе и в глубину тела, а при определенных условиях и сквозь него. Непрозрачность слоя, называемая также укывистостью, может быть достигнута в результате сильного поглощения или рассеяния или одновременно и того и другого. Смешение различных поглощающих красящих веществ дает новые цветовые тона. Такое явление называется субтрактивным (вычитательным) смешением цветов и проиллюстрировано на рис. 4.3.5.



Рис. 4.3.5. Субтрактивное смешение цветов

### О роли люминесценции в формировании зрительного восприятия цвета объектов

Рассмотрим вкратце понятия, объединенные собирательным термином «**люминесцентность**». В определенном смысле явления люминесценции можно понимать как переход от отраженного к самостоятельному свечению. М. Видеман сформулировал определение этого явления как избытка над тепловым излучением тела. Подчеркивался тот факт, что для возбуждения люминесценции не требуется нагревания тела, хотя подведение энергии в том или другом виде необходимо.

Современное определение люминесценции таково «**Люминесценцией называется избыток над тепловым излучением тела в данной спектральной области, если этот избыток обладает длительностью, значительно превышающей период световых колебаний**». В зависимости от того, в каком виде подводится энергия, возбуждающая люминесценцию, различают фото-, катодо-, электро-, хеми-, трибо-, и другие виды люминесценции (более подробно смотрите Главу 1).

Во всех случаях видимый свет или коротковолновое излучение используются для возбуждения определенного красителя. При флуоресценции в длинноволновое излучение немедленно превращается УФ-излучение или коротковолновая часть видимого спектра. Краски дневного света сами по себе цветные. Дополнительную яркость они приобретают в результате флуоресценции, то есть возбуждения от УФ-излучения или коротковолновой части видимого спектра.

Фосфоресценция представляет собой возбуждение посредством видимого или коротковолнового излучения с медленной отдачей энергии, так называемое «ночное» свечение.

Особый случай составляет возбуждение радиоактивным излучением.

Оптические отбеливатели являются бесцветными веществами, преобразующими УФ-излучение в ахроматическое или слабоокрашенное (чаще всего — фиолетовое или синее) излучение. Незначительный цветовой оттенок используется для подавления желтого тона.

Цветовое воздействие на наблюдателя зависит не только от цвета рассматриваемой поверхности и вида освещения. Оценка цветового восприятия происходит при участии еще и окружающего цветового фона. Так, один и тот же серый цвет на черном фоне выглядит «светлым», а в белом окружении выглядит темнее. Оранжевая поверхность на белой или желтой подложке кажется слабой и неинтересной, а на синем или черном фоне воспринимается как светящийся, «живой» тон. Необходимо отметить, что одинаковое отклонение тонов двух окрашенных поверхностей различными наблюдателями может оцениваться по-разному и даже один и тот же наблюдатель в разное время может давать разные оценки — в зависимости от своего состояния.

Для определения цветового ощущения помимо самого цветного образца решающее значение имеют освещение, а также физические и психологические особенности наблюдателя. Для сравнения результатов измерений, полученных в разных условиях, даже при визуальной оценке необходимы определенные методики.

В тех случаях, когда для объективного определения применяются физические приборы, следует также учитывать методические указания. Систему взаимосвязи физического измерения цвета и нормального цветного зрения среднестатистического наблюдателя описывает колориметрия (цветометрия).

Прежде всего, следует отметить значительный прогресс, достигнутый в последние годы в области собственно измерения цвета. Наряду с постоянным совершенствованием измерительных приборов, широкому распространению методов цветометрии способствует использование компьютерных технологий и программных продуктов, позволяющих оперативно обрабатывать данные в режиме реального времени.

Одной из наиболее важных причин, определяющих целесообразность измерения цвета, является возможность получения не только качественных, но и количественных характеристик. Для этой цели служат специальный класс приборов – колориметры.

Колориметр – цветометрический прибор, который дает возможность объективного определения цвета. При визуальном сравнении это удастся лишь крупным специалистам, и то не всегда с достаточной точностью.

Измерение цвета является предметом международного сотрудничества по стандартизации (в рамках CIE — Международной комиссии по освещению [МКО]).

При измерении цвета образец, так же как и при визуальном сопоставлении, должен быть соответствующим образом освещён. Место глаза на рис. 4.3.4. занимает светочувствительный прибор. В случае оптически плотных образцов измеряют преимущественно диффузное или зеркальное отражение, а для прозрачных – светопропускание проходящего света. Для освещения образцов при работе в видимой части спектра от 400 до 700 нм достаточно иметь вольфрамовую лампу накаливания. При измерении флуоресцирующих проб для возбуждения используется близкая к дневному свету по спектральному составу ксеноновая или дейтериевая лампы.

Пространственное расположение освещения и фотоэлектрического приемного устройства называют геометрией измерения. Необходимо упомянуть о влиянии блеска. Блестящие поверхности, как известно, зеркально отражают часть падающего на них света, причем угол отражения равен углу падения. Интенсивность  $I_{отр}$  отраженного света связана с интенсивностью  $I_0$  падающего света при малых углах падения равна по Френелю:

$$I_{отр} = I_0(n_{пр} - n_в)^2 / (n_{пр} + n_в)^2, \quad (1)$$

где  $n_{пр}$  и  $n_в$  — показатели преломления предмета и воздуха соответственно. Если для полимера или стекла принять  $n_{пр} = 1,5$  и для воздуха  $n_в = 1$ , получим 0,04, то есть 4% падающего света независимо от цвета образца отражается от поверхности. Наблюдатель, рассматривая образец в направлении угла отражения, воспринимает дополнительное отражение ахроматического (белого) источника освещения, т. е., по расчету, дополнительно еще 4% белого цвета. Для особо светлых образцов это не имеет большого значения, но при рассмотрении черного образца (в идеальном случае  $I_{отр} = 0\%$ ) наблюдается уже серый цвет. Это же относится и к другим темным тонам.

Общее цветовое ощущение наблюдателя или реакция светочувствительного прибора всегда складываются из хроматического отражения и дополнительной доли отражения ахроматического света. Отношение долей зависит от степени блеска и направления наблюдения. Поэтому в колориметрии используется понятие «чистота цвета». Количественно смесь спектрально-чистого цвета с белым определяется выражением

$$p = L_\lambda / (L_w + L_\lambda), \quad (2)$$

где  $L_\lambda$  — яркость спектрально-чистого цвета, а  $L_w$  — яркость белого цвета, с которым он смешивается. Из выражения следует, что между различными цветами спектра и различными значениями чистоты цвета соответствия нет, так как вполне очевидно, что для всех спектрально-чистых цветов величина  $p$  становится равной единице всякий раз, когда  $L_w = 0$ .

Таким образом, образцы одного и того же цвета с одинаковой степенью блеска со всех направлений наблюдения будут оцениваться как идентичные. Образцы с разной степенью блеска, хроматически идентичные, могут совпадать по цветовому восприятию лишь при определенных условиях измерения. Они *гониометрически метамерны*. Дополнительные явления осветления, связанные со структурой (в случае сильной ориентации частиц пигмента), могут возникать также от присутствия пузырьков воздуха в массе связующего полимера или стеклообразной матрицы. В субмикроскопической области пузырьки воспринимаются как белые пигменты.

Перечисленные погрешности измерений цвета указывают на то, что для выполнения всех условий недостаточно лишь геометрии освещения. В связи с этим предлагаются различные способы определения цветовых показателей: с блеском и с ловушкой для блеска.

В одном случае предлагается геометрия, объединяющая практически все возможные направления наблюдения и исключая, таким образом, характерные явления блеска. Для

человеческого глаза такой возможности не существует, получаемая информация при этом фиксируется не визуально, а с применением фотоприёмного устройства.

В другом случае наблюдатель, выбирая соответствующее направление наблюдения, исключает блеск. При сравнении нескольких образцов удастся определить общее хроматическое отклонение и степень блеска.

Все измерения цвета проводятся в сравнении с белым эталоном, который измеряется последовательно, а лучше, путем определенных конструктивных приемов, одновременно с образцом. Для этой цели в комплект оснастки лабораторного комплекса входит идеально белый стандарт WS – 2.

Обращаться с рабочими эталонами следует особенно осторожно. Для чистки ни в коем случае нельзя применять моющие средства, содержащие оптические осветлители (например, мыла): это искажает результат измерения. Поверхность исследуемого образца должна быть чистой и без царапин. Прибором при измерении фиксируется и неомогенность окраски, тогда как глаз при сравнении упускает пятна и другие элементы нерегулярности окраски. Практикой установлено, что в большинстве случаев весьма желательно изготавливать образцы с высоким блеском, при этом повышается надежность результатов как при измерении прибором, так и при визуальном сравнении.

Толщина образца должна быть по возможности настолько большой, чтобы дополнительное ее увеличение не вызывало изменения цвета. В процессе исследования измеряют зеркальное отражение (или диффузное отражение  $R_{\infty}$ ) образца бесконечной толщины.

Наиболее точный, хотя и самый дорогостоящий способ, использующийся в практике измерения цвета, - спектральный анализ. Он позволяет определить коэффициенты диффузного отражения или пропускания образца в зависимости от длин волн в сравнении с идеально белым эталоном.

Спектрофотометр имеет устройство цифровой регистрации измеряемых значений. Величины, измеренные на разных длинах волн, преобразуются в числовые значения и передаются на электронный носитель информации, с которого полученные величины поступают для обработки на ЭВМ.

Это, хотя и сложная, комплексная операция, но с помощью программного обеспечения осуществляется взаимосвязь измеряемых физических величин, их обработка и расшифровка, недоступные обычному наблюдателю. В такой расчет должны будут входить особенности источника освещения, самого образца и, наконец, приемного устройства, т. е. человеческого глаза, нормированные условия и коэффициенты которого согласованы и утверждены в материалах Международной комиссии по освещению (МКО).

Относительное спектральное распределение энергии излучения определяется стандартными источниками освещения принятыми МКО.

В данной работе для колориметрических измерений применяется блок излучателей, который оснащён двумя источниками излучения – галогенной лампой накаливания и дейтериевой газоразрядной лампой. Эти два источника излучения позволяют программными методами моделировать стандартные источники излучения типа А, В или С или один из D50, D55, D65, или D75, которые могут быть выбраны нажатием одной из кнопок на экране монитора. По умолчанию устанавливается источник излучения D65, который был введён вместо источника С, относительное спектральное распределение энергии которого соответствует рассеянному дневному свету, т.е. дневному свету хмурого неба. Это излучение соответствует распределению усреднённого дневного света с корреляцией на цветовую температуру 6500K.

Стандартный нормированный источник А имеет относительное спектральное распределение энергии диффузного излучения лампы накаливания с приведённой температурой абсолютно черного тела 2854К. Источник В – имитатор дневного солнечного света. Источники D50, D55 и D75 имеют цветовую температуру с корреляцией на цветовую температуру 5000К, 5500К и 7500К соответственно.

### Координаты цветности

Учёные на протяжении веков пытались проникнуть в тайны цвета путём анализа и эксперимента. Философы и физики, математики, физиологи и врачи, психологи, лингвисты и инженеры – все на протяжении столетий обращались к проблемам цвета и пытались их решать каждый по-своему.

Решающий шаг в направлении современных цветовых измерений сделали Гельмгольц, Грассман и Максвелл. Именно они открыли и доказали законы аддитивного синтеза цветов, которые относятся исключительно к цветовым ощущениям (стимулам), а не к пигментам и красителям, и поэтому имеют основополагающее значение для цветовых измерений.

Согласно теории Гельмгольца, человек с нормальным восприятием цвета имеет по три нервных центра, каждый из которых воспринимает раздражение, соответствующее определённой ширине спектра. Максимум возбуждения каждого из них хроматическим возбудителем соответствует основным цветам спектра: синему, зеленому и красному.

Рис. 4.3.6 иллюстрирует чувствительность трех центров к волнам различной длины, что представлено в форме нормальных спектральных кривых. В начале и конце видимой области спектра чувствительность каждого нервного окончания невысока и их области перекрываются. Чувствительность к красному спектру имеет небольшой дополнительный пик в синей области.

Если бы три центра раздражения реагировали одинаково на волны различной длины, наблюдатель имел бы ощущение белого цвета, а не цветное восприятие. Отсутствие возбуждения соответствовало бы ощущению черного цвета. Слабые раздражения в равном отношении будут также нецветными.

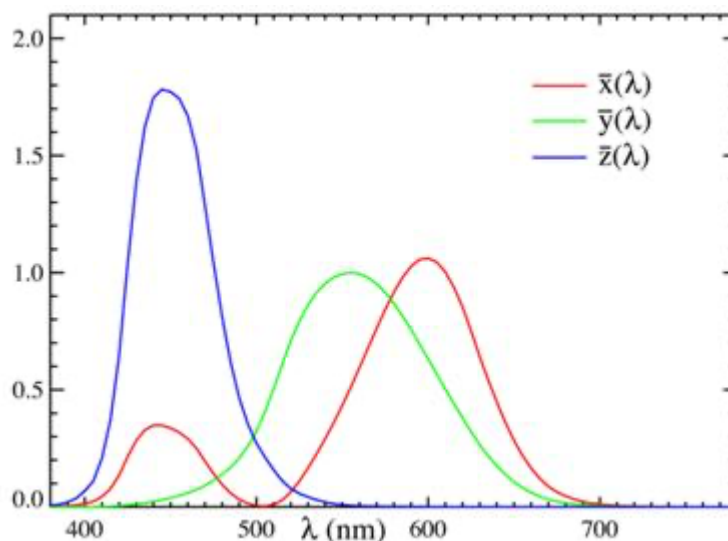


Рис. 4.3.6 Нормальные кривые спектральной чувствительности глаза.

Воспринимаемый цвет излучения зависит от длины волны света. Какой-либо участок спектра видимого излучения, характеризуемый известным интервалом длин волн, соответствует определённому цвету. Цветовой тон обусловлен длиной волны монохроматического излучения, **энергия которого**

*преобладает в данном излучении.* Любая красочная композиция, поглощая, отражая и преломляя падающий свет, играет роль своеобразного светофильтра, «убирая» часть спектра падающего света, и создаёт окрашенность или цветовой тон.

Грассман сформулировал свои знаменитые три закона, которые могут быть сведены к одному предложению – основному цветиметрическому закону: «Светоадаптированный трихроматический глаз оценивает падающее на него излучение по трём независимым друг от друга спектральным функциям воздействия линейно и постоянно, причём синтезирует эти отдельные воздействия в неразрывное суммарное воздействие».

**Первый закон** – закон трёхмерности: любой цвет однозначно выражается тремя линейно независимыми цветами. Максвелл экспериментально доказал, что необходимо и достаточно трёх линейно независимых цветов, каждый из которых нельзя получить сложением двух остальных, чтобы воспроизвести всё цветовое многообразие путём сложения этих трёх в различных количественных пропорциях.

**Второй закон** – закон непрерывности – утверждает, что при непрерывном изменении излучения цвет смеси также меняется непрерывно.

**Третий закон** – закон аддитивности: цвет смеси основных излучений зависит только от их цветов, а не от их спектрального состава.

Колориметрический метод оценки цвета основан на трёхцветном механизме зрения: излучение любого цвета может быть получено смешением трёх основных цветов – красного, зелёного и синего (R, G, B – заглавные буквы указанных цветов в английском языке).

Пусть мы имеем две совершенно идентичные равномерно рассеивающие белые поверхности Р и Q. Поверхность Р освещается белым источником света W произвольной яркости. Эта яркость  $L_w$  *определяется как единичная*. Затем с помощью монохроматических источников R, G, и B их яркости регулируются до тех пор, пока поверхности Р и Q не будут казаться наблюдателю одинаковыми. Полученные яркости R, G, B также *определяются как единичные*.

Можно, представив основные цвета в виде векторов, написать

$$L_w = R + G + B. \quad (3)$$

Теперь поверхность Р освещают одной исследуемой лампой С, цвет свечения которой необходимо определить. Если можно подобрать такие *относительные* значения яркостей  $r_c$ ,  $g_c$  и  $b_c$  монохроматических источников R, G, и B, при которых поверхности Р и Q воспринимаются одинаковыми, то числа  $r_c$ ,  $g_c$  и  $b_c$  называются координатами цвета (трёхцветными коэффициентами – они показывают, сколько единиц каждого единичного цвета надо взять, чтобы получить данный цвет) источника С *по отношению* к источникам R, G, B и W, при этом можно записать

$$L_c = r_c R + g_c G + b_c B. \quad (4)$$

Было установлено, что воспроизводимость результатов измерений для одного и того же наблюдателя чрезвычайно высока и что результаты измерений, полученные при участии различных наблюдателей со сходным цветовым зрением, также хорошо согласуются между собой.

Пусть  $S=S(\lambda)$  есть монохроматический (спектрально чистый) цвет, светимость которого на плоскости Р равна светимости, создаваемой на плоскости лампой W при калибровке. Тогда, для каждого



$S(\lambda)$ , пользуясь вышеописанным методом, можно подобрать совокупность чисел  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  и  $b(\lambda)$ , при которых

$$S(\lambda) = r(\lambda)\mathbf{R} + g(\lambda)\mathbf{G} + b(\lambda)\mathbf{B}. \quad (5)$$

Если  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  и  $b(\lambda)$  представляют собой средние значения, найденные для группы наблюдателей при использовании стандартной установки, то тогда эти величины можно рассматривать как координаты цвета для  $S(\lambda)$  по отношению к  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{W}$  для «стандартного наблюдателя». В этом случае для проведения колориметрических измерений и описания цветов не требуется участия наблюдателя, смешивающего цвета, поскольку цвет каждого окрашенного объекта определяется конкретным распределением энергии  $E_c(\lambda)$  в спектре света, который отражается, пропускается, рассеивается или излучается этим объектом. Если  $E_c(\lambda)$  – измеренное распределение энергии в спектре света  $S$ , то можно написать

$$\mathbf{L}_c = r_c\mathbf{R} + g_c\mathbf{G} + b_c\mathbf{B}, \quad (6)$$

где

$$r_c = \int E_c(\lambda)r(\lambda)d\lambda$$

$$g_c = \int E_c(\lambda)g(\lambda)d\lambda$$

$$b_c = \int E_c(\lambda)b(\lambda)d\lambda$$

Поскольку цвет свечения любого источника определяется тройкой чисел ( $r_c$ ,  $g_c$  и  $b_c$ ), то для представления цветов естественно воспользоваться трёхмерным пространством, в котором различным цветам будут соответствовать точки некоторого цветового тела. При таком представлении форма цветового тела будет зависеть не только от выбора векторов  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{B}$  (как основных цветов) и  $\mathbf{W}$  (как одного из нескольких возможных вариантов «белого»), но и от принятой ориентации этих векторов в пространстве; при этом вектора  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{B}$  необязательно должны быть взаимно ортогональными.

Для стандартной колориметрической системы RGB, которая была принята МКО в 1931 году в качестве основных цветов  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{B}$  и белого цвета  $\mathbf{W}$  выбраны источники однородных излучений с длинами волн 700 нм, 546,1 нм, 435,8 нм и источник  $\mathbf{W}$  соответственно. Используя эти цвета, можно построить некоторое цветовое тело, где  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{B}$  представляются тремя любыми независимыми векторами, исходящими из начала координат (причем не требуется, чтобы они были ортогональны и имели равную длину).

Локусом (геометрическим местом концов) векторов  $r(\lambda)\mathbf{R} + g(\lambda)\mathbf{G} + b(\lambda)\mathbf{B}$  является незамкнутая, расположенная в пространстве кривая. Соединим концы этой кривой прямой линией. Тогда в области пространства, ограниченной радиус-векторами, проходящими через начало координат и замкнутую кривую, будут заключены все реальные (физически реализуемые) цвета рис. 4.3.7.

Возьмем любую произвольную яркость  $L_w$  и будем считать, что она соответствует единичной яркости. Измерим затем яркости каждого из цветов  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{B}$ , которые при смешении дают яркость  $L_w$ , и обозначим их через  $\rho$ ,  $\gamma$  и  $\beta$ . Исходя из допущения о единичности яркости  $L_w$ , можно написать

$$\rho + \gamma + \beta = 1 \quad (7)$$

Тогда яркость  $L_c$  любого цвета  $S$ , имеющего координаты цвета  $r_c$ ,  $g_c$  и  $b_c$ , определится выражением

$$L_c = \rho r_c + \gamma g_c + \beta b_c \quad (8)$$

Каждому реальному цвету соответствует некоторая совокупность координат цвета ( $r_c$ ,  $g_c$ ,  $b_c$ ), однако не каждой тройке чисел ( $r$ ,  $g$  и  $b$ ) будет соответствовать некоторый реальный цвет. Для определенных троек чисел ( $r$ ,  $g$ ,  $b$ ) значение яркости может быть отрицательным или равным нулю.

Геометрическое место точек в пространстве, где значения троек чисел ( $r$ ,  $g$ ,  $b$ ) удовлетворяют уравнению

$$\rho r + \gamma g + \beta b = 0 \quad (9)$$

представляет собой плоскость, проходящую через начало координат "О" (рис. 4.3.7).

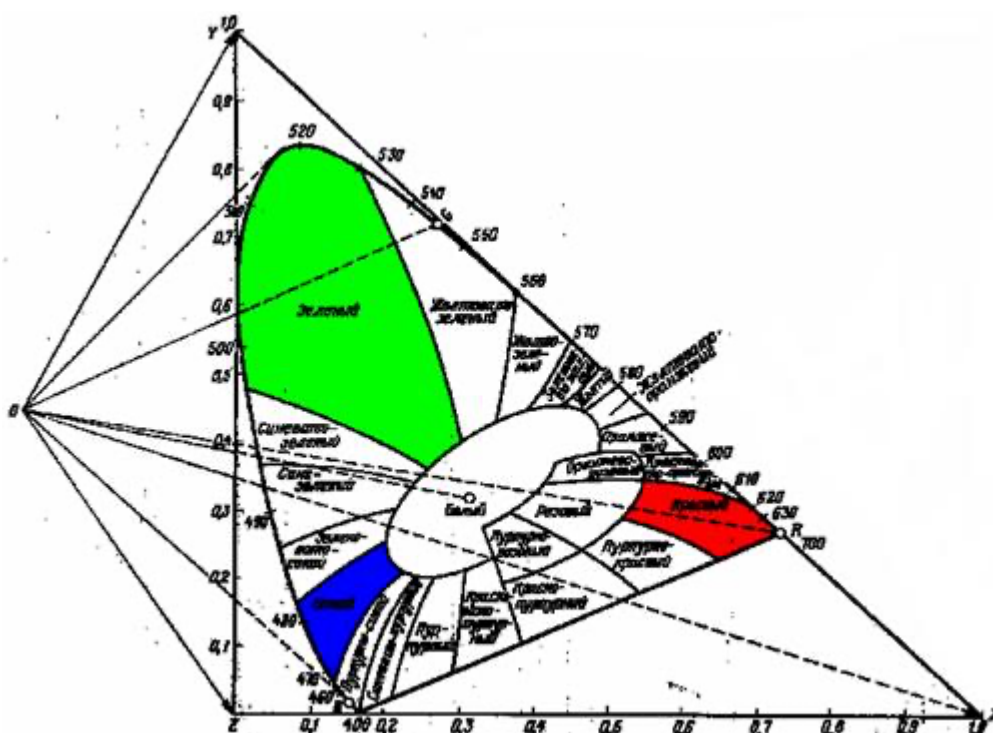


Рис. 4.3.7 Цветовое тело и цветовой график МКО.

На рис. 4.3.7. эта плоскость обозначена  $XOZ$ . Плоскость, обозначенная  $ZOY$ , выбрана касательной к цветовому телу, причем касание имеет место вдоль вектора спектрально-чистого цвета с длиной волны 504 нм. Плоскость  $YOX$  выбрана касательной к цветовому телу, причем так, что касание происходит вдоль относительно плоской его части с длинами волн от 570 до 700 нм.

Выбор именно двух из этих плоскостей объясняется тем, что они достаточно хорошо аппроксимируют границы цветового тела; третья плоскость является плоскостью «нулевой яркости». Единичные векторы  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  выбраны вдоль линий пересечения этих плоскостей. Отметим, что точкам этих линий соответствуют физически нереализуемые цвета, несмотря на то, что они характеризуются строго определенными значениями координат цвета, т. е. существуют такие наборы чисел  $r_x$ ,  $g_x$ , ...,  $b_z$ , для которых

$$X = r_x R + g_x G + b_x B,$$

$$Y = r_y R + g_y G + b_y B, \quad (10)$$

$$\mathbf{Z} = r_z \mathbf{R} + g_z \mathbf{G} + b_z \mathbf{B}.$$

Эту систему уравнений можно решить относительно R, G и B:

$$\begin{aligned}\mathbf{R} &= x_r \mathbf{X} + y_r \mathbf{Y} + z_r \mathbf{Z} \\ \mathbf{G} &= x_g \mathbf{X} + y_g \mathbf{Y} + z_g \mathbf{Z}, \\ \mathbf{B} &= x_b \mathbf{X} + y_b \mathbf{Y} + z_b \mathbf{Z}\end{aligned}\quad (11)$$

Поскольку R, G и B определяются через X, Y и Z в соответствии с системой уравнений, то любой цвет C можно выразить через физически нереализуемые основные цвета X, Y и Z, т. е. для C можно написать

$$\mathbf{L}_c = x_c \mathbf{X} + y_c \mathbf{Y} + z_c \mathbf{Z}. \quad (12)$$

Использование координат цвета ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ) вместо ( $r_c$ ,  $g_c$ ,  $b_c$ ) имеет два преимущества. Одно заключается в том, что величины  $x_c$ ,  $y_c$  и  $z_c$  положительны для всех реальных цветов. Другое, и, пожалуй, более важное, преимущество состоит в том, что яркость цвета зависит только от величины координаты цвета  $y_c$ , так как векторы X и Z имеют нулевую яркость (как отмечалось выше, они выбраны так, что лежат в плоскости нулевой яркости).

Для колориметрических расчетов удобнее пользоваться нормированными яркостями каждого цвета. Под этим понимаются такие яркости каждого цвета, при которых координаты цвета удовлетворяют равенству

$$x_c + y_c + z_c = 1. \quad (13)$$

Если каждую из координат цвета  $x_c$ ,  $y_c$  и  $z_c$  разделить на их сумму,  $x_c + y_c + z_c$  то получатся числа  $x$ ,  $y$  и  $z$ , которые называют «координатами цветности» цвета C.

На рис.2.3.7. показана единичная плоскость, для которой

$$x + y + z = 1. \quad (14)$$

Поскольку форма цветового тела не имеет существенного значения, исходное произвольное цветовое тело можно путем проективного преобразования превратить в прямоугольный треугольник YZX, показанный на рис. 4.3.7. Так как в этой единичной плоскости величины  $x$ ,  $y$  и  $z$  не являются, согласно их определению, независимыми, то для определения нормированных количеств цветов можно пользоваться лишь двумя из них ( $x$ ,  $y$ ).

Единичная плоскость, изображенная на рис. 4.3.8., обычно приводится без вспомогательных линий, показывающих, каким образом ее можно получить из цветового тела. Эта диаграмма называется цветовым графиком МКО, на котором все реальные цвета представлены точками, лежащими в пределах замкнутой криволинейной области. Координаты цветности других источников получаются путем прямых измерений с помощью соответствующих приборов.

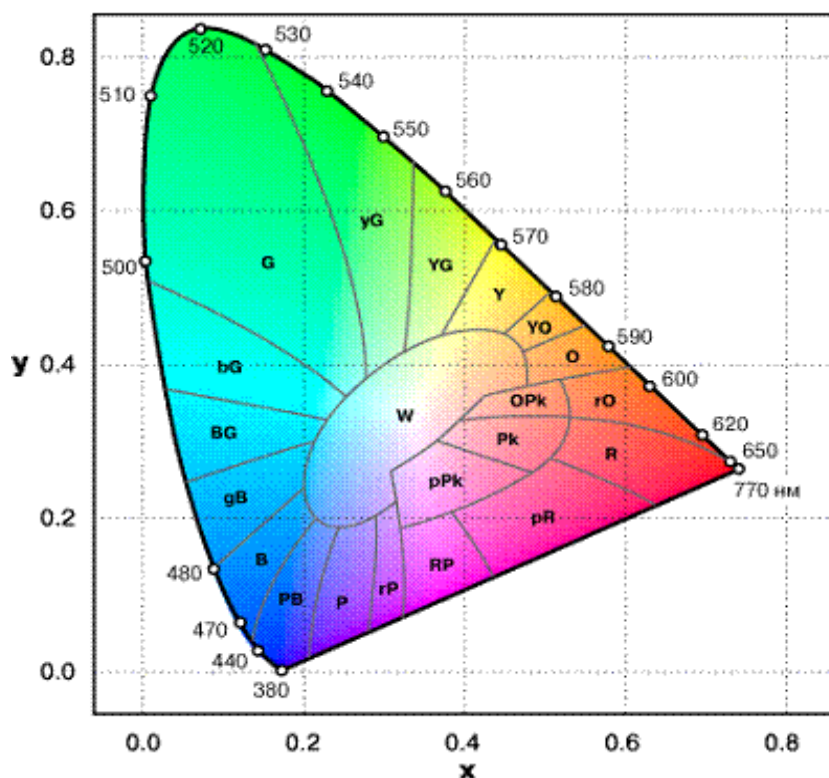


Рис. 4.3.8. Характер кривой (локуса) спектрального состава с пурпурной линией.

Определение цвета заключается в измерении количественного соотношения основных цветов, необходимых для воспроизведения данного. Эти три величины основных цветов —  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — однозначно характеризуют цвет.

Поскольку из трёх относительных координат цвета только две являются независимыми, все возможные значения цветности занимают на плоскости  $x$ ,  $y$  определённую область, называемую цветовым треугольником. Количественная характеристика цвета полностью характеризуется одной координатой цвета  $y$ .

Графическое изображение величин  $x$  и  $y$  в одной плоскости даёт известную кривую цветов спектра с пурпурной линией (рис. 4.3.9). Ахроматическая точка относится одинаково как к чёрному, так и белому цвету. Третий параметр, определяющий количественную характеристику цвета  $y$  — цветность, образует трёхмерность цветового пространства.

В системе цветов (рис. 4.3.9) в таком изображении в качестве определяющих величин даются цветовой тон (лучи из ахроматической точки), степень насыщенности (концентрические линии вокруг ахроматической точки) и степень затемнения (функция цветности  $Y$ ). Таким образом, треугольник цветности изображает равномерное по восприятию деление. Обращаться с такой разбивкой цветов нагляднее и легче, чем, например, с долями нормальных координат цвета. Это позволяет систематизировать расположение различных эталонов цвета.

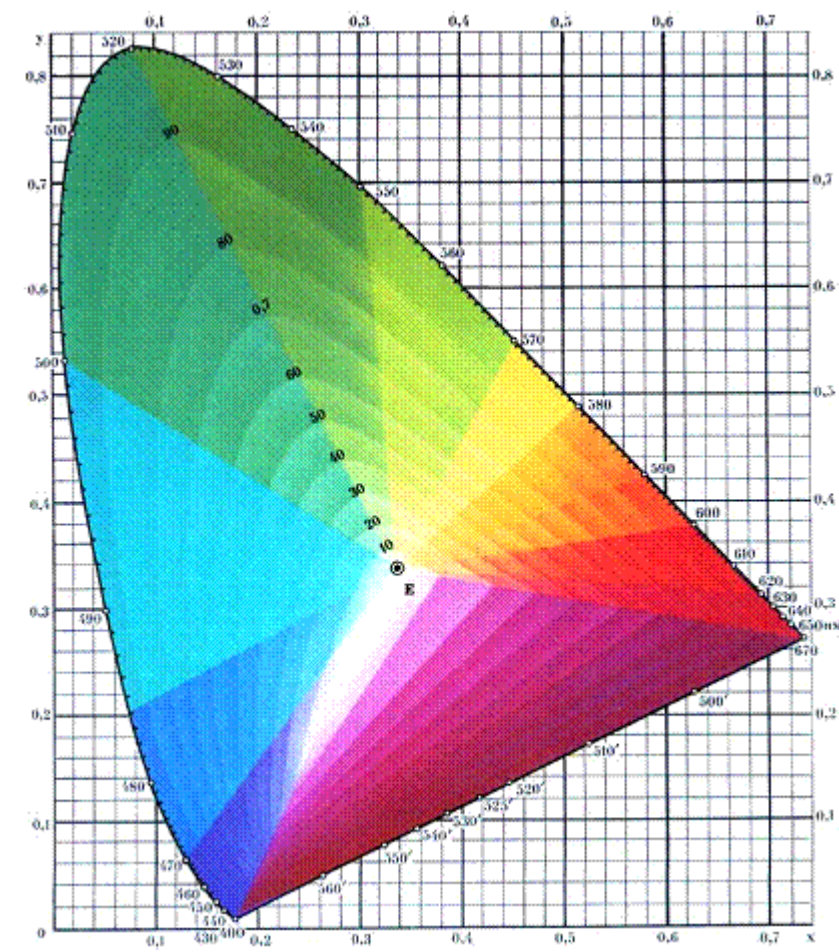


Рис. 4.3.9 Колористическая система по МКО.

Имеются и другие способы описания цветов. В 1976 году МКО были предложены в качестве рекомендуемых другие модели цветовых пространств, из которых на практике чаще всего используется пространство CIELAB. Прямоугольная координатная система ограничивается тремя осями: чёрно-белой осью ( $L^*$ ), хроматической зелёно-красной осью ( $a^*$ ) и хроматической жёлто-синей осью ( $b^*$ ) рис. 4.3.10.

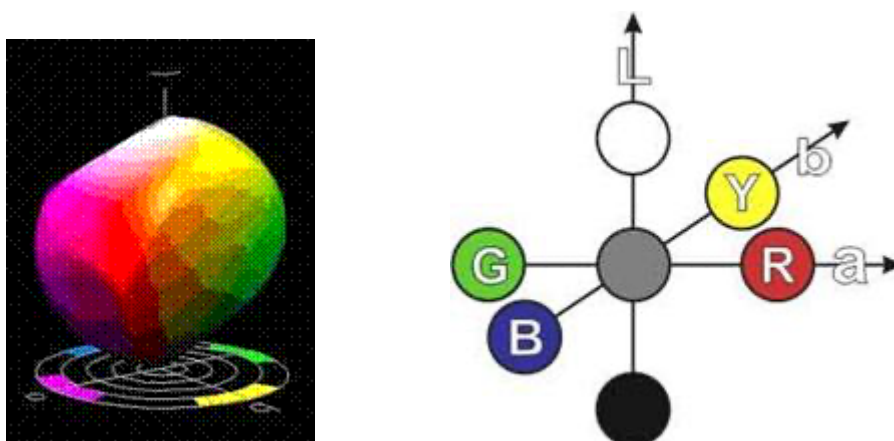


Рис. 4.3.10. Цветовое тело CIELab (слева) и его координаты (справа)

Координаты  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  однозначно определяют цвет: координата ( $L^*$ ) - его светлоту, а рассчитанные по ( $a^*$ ) и ( $b^*$ ) координаты  $C^*$  и  $h^*$  - насыщенность и угол цветового тона

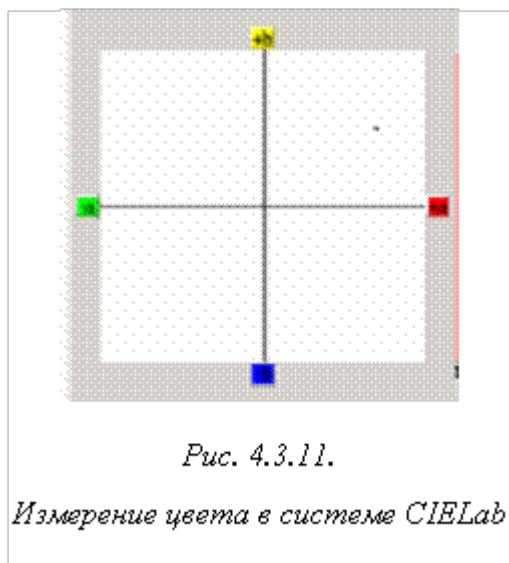
$$C = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}; \quad \text{и} \quad y = \arctg(b^*/a^*).$$

На практике часто бывает так, что нам нет необходимости знать абсолютные значения координат цвета соответствующего оттенка, а интересует цветовое отличие двух объектов.

Для объективной оценки цветового соответствия стандарта и испытуемого образца введено понятие цветового различия  $\Delta E^*$ , определяемого по разности значений отдельных координат цвета двух сравниваемых образцов. По сути величина  $\Delta E^*$  показывает, насколько сильно отличаются два цвета, но не показывает, в каком направлении они отличаются. Другими словами мы не знаем, как отличается один цвет от другого: более зелёный он или менее светлый, а может быть более синий. Эту информацию нам дают разности значений отдельных координат цвета,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  и  $\Delta L^*$ . Если цвета стандартного образца и исследуемого различаются по координате  $L^*$ , и аналогично для двух оставшихся координат разность будет равна  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  и  $\Delta b^*$ . Тогда полное цветовое различие  $\Delta E^*$  рассчитывается как длина прямой, соединяющей две точки в цветовом пространстве:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}.$$

В системе CIELab измерение цвета отображается на плоскости (белый квадрат) с пересекающимися линиями «а» и «b», где точка пересечения является началом координат. Измеряемый цвет отображается тёмной точкой (рис. 4.3.11). Начало координат соответствует ахроматическому цвету (белому или чёрному).



Положительная величина (а) описывает «красноту» цвета, а отрицательная — «зелёность». «Желтизна» и «голубизна» описываются величиной (b), которая положительна для жёлтого и отрицательна для синего оттенков цвета.  $L^*$  — описывает яркость цвета. Значения  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  получаются из значений координат цветности  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  образца, и стандартных значений освещенности идеально белого эталона  $X_n$ ,  $Y_n$  и  $Z_n$ , которые являются константами для идеально белого эталона.

Координаты цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  пересчитывают в координаты системы ( $L^*a^*b^*$ ) по формулам:

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16;$$

$$a^* = 500\{(X/X_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}\};$$

$$b^* = 200\{(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}\}, \quad (15)$$

где, например,  $X_n = X_c = 98,04$ ;  $Y_n = Y_c = 100,0$ ;  $Z_n = Z_c = 118,10$  (это координаты цвета идеально белого эталона с источником C).

Цветовые различия  $\Delta E$  рассчитываются по формуле:

$$\Delta E_{Lab} = \{(\Delta L)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2}. \quad (16)$$

## Колориметрические измерения

Измерение цвета является очень важным моментом в различных областях науки техники и промышленности. Без измерения цвета невозможно было бы изготавливать красители для лакокрасочной промышленности с повторяющимися характеристиками, для окраски тканей или полимеров в химической и текстильной промышленности.

Очень важным является не только измерение цвета, но и правильное его цветоразделение. Без этого невозможно было бы воспроизвести и напечатать цветные репродукции, а также невозможно было бы существование цветного телевидения, кино и фотографии, создание цветных мониторов и всевозможных дисплеев и систем индикации.