



Н. П. Захаров,
С. П. Тимошенко,
Ю. А. Крупнов

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УЗЛЫ
ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СРЕДСТВ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ
АВТОМАТИКИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

Н. П. Захаров, С. П. Тимошенко,
Ю. А. Крупнов

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УЗЛЫ
ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ,
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
И УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ**

Учебное пособие



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2009

УДК 681.782.473
ББК 32.86
3-38

Захаров Н. П.

3-38 Оптико-электронные узлы электронно-вычислительных средств, измерительных приборов и устройств автоматики : учебное пособие / Н. П. Захаров, С. П. Тимошенко, Ю. А. Крупнов. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 335 с. : ил.

ISBN 978-5-94774-906-9

Изложены основные сведения об оптико-электронных узлах (ОЭУ), которые могут быть использованы в составе электронно-вычислительных средств, измерительных приборов и устройств автоматики. Приведены основные соотношения, полезные для расчета и конструирования этих узлов. Представлены электрические схемы включения элементов, входящих в оптико-электронные узлы. Приведены также многочисленные примеры использования ОЭУ в различного рода приборах и устройствах.

Для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей технических вузов, а также инженерно-технических работников, занимающихся проектированием устройств, включающих оптико-электронные узлы.

УДК 681.782.473
ББК 32.86

**По вопросам приобретения обращаться:
«БИНОМ. Лаборатория знаний»
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>**

ISBN 978-5-94774-906-9

© МИЭТ, 2009
© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009

Учебное издание

Захаров Николай Павлович
Тимошенков Сергей Петрович
Крупнов Юрий Анатольевич

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СРЕДСТВ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ
АВТОМАТИКИ**

Учебное пособие

Ведущий редактор *Б. И. Копылов*
Художники *С. Инфантэ, Н. А. Новак*
Художественный редактор *О. Г. Лапко*
Технический редактор *Е. В. Денюкова*
Корректор *Е. Н. Клитина*
Компьютерная верстка: *А. С. Томсон*

Подписано в печать 02.07.09. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 21. Тираж 1000 экз. Заказ

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»
125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3
Телефон: (499) 157-5272
e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

Отпечатано в производственной фирме «Полиграфист»
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3

Оглавление

Предисловие	3
Список аббревиатур.....	6
Глава 1. Основные понятия и законы в фотометрии и геометрической оптике.....	8
1.1. Спектр электромагнитных волн.....	8
1.2. Физические характеристики, используемые в фотометрии.....	11
1.3. Характеристики зрения человека. Связь между энергетическими и световыми характеристиками.	14
1.4. Излучение абсолютно черного тела	17
1.5. Излучение реальных тел. Понятие цветовой температуры.	21
1.6. Основные законы и положения геометрической оптики.	24
Глава 2. Источники излучения	29
2.1. Общие сведения об источниках излучения.....	29
2.2. Лампы накаливания.....	33
2.2.1. Общие сведения о лампах накаливания	33
2.2.2. Технические характеристики ламп накаливания....	37
2.2.3. Лампы накаливания, выпускаемые серийно	42
2.2.4. Схемы стабилизации и регулирования потока излучения	47
2.3. Излучающие диоды.....	53
2.3.1. Общие сведения об излучающих диодах	53
2.3.2. Технические характеристики излучающих диодов	54
2.3.3. Излучающие диоды, выпускаемые серийно. Конструкции излучающих диодов	61
2.3.4. Схемы включения излучающих диодов	64
2.4. Оптические квантовые генераторы – лазеры	71
2.4.1. Общие сведения о лазерах.	71
2.4.2. Газовые лазеры.....	73
2.4.3. Полупроводниковые лазеры	81
2.5. Другие типы источников излучения	89
2.5.1. Источники инфракрасного излучения	89
2.5.2. Источники ультрафиолетового излучения.....	94

2.6. Электронно-лучевые трубки	103
2.6.1. Общие сведения о люминесценции. Люминесцирующие экраны	103
2.6.2. Принцип действия электронно-лучевых трубок. ...	104
2.6.3. Деградационные процессы в ЭЛТ	110
2.6.4. Схемотехнические мероприятия, обеспечивающие высокий срок службы ЭЛТ	111
Глава 3. Приемники излучения	114
3.1. Общие сведения о приемниках излучения	114
3.2. Фотодиоды и фототранзисторы	118
3.2.1. Принцип действия фотодиодов и фототранзисторов.....	118
3.2.2. Чувствительность фотодиодов и фототранзисторов.....	122
3.2.3. Другие характеристики фотодиодов	124
3.2.4. Конструкции фотодиодов и узлов приемников излучения.....	126
3.3. Фоторезисторы	133
3.3.1. Принцип действия фоторезисторов.....	133
3.3.2. Чувствительность фоторезисторов.....	137
3.3.3. Другие свойства фоторезисторов	141
3.3.4. Конструкции фоторезисторов	146
3.3.5. Схемы включения фоторезисторов	148
3.4. Фотоэлектронные умножители	151
3.4.1. Общие сведения о фотоэлектронных приборах	151
3.4.2. Фотоэлектронные умножители	151
3.5. Приемники теплового излучения	170
3.5.1. Общие сведения о приемниках теплового излучения	170
3.5.2. Термоэлементы.....	171
3.5.3. Болометры	176
3.5.4. Пироэлектрические приемники излучения.....	180
Глава 4. Элементы и узлы оптических систем.	186
4.1. Общие сведения об оптических системах	186
4.2. Линзы	198
4.3. Отражательные элементы	208
4.3.1. Зеркала	208
4.3.2. Отражательные призмы	211
4.4. Оптические фильтры.	213
4.4.1. Общие сведения	213
4.4.2. Фильтры из окрашенного стекла	216

4.4.3. Фильтры из полупроводниковых материалов.....	218
4.4.4. Тепловые фильтры	219
4.4.5. Интерференционные полосовые фильтры	220
4.5. Делители потока излучения	224
4.6. Материалы элементов оптических систем.....	227
4.6.1. Материалы, пропускающие поток излучения.....	227
4.6.2 Материалы, отражающие поток излучения.....	236
Глава 5. Зеркально-линзовые узлы	241
5.1. Общие сведения о зеркально-линзовых узлах.....	241
5.2. Особенности формирующих узлов	242
5.3. Облучатели.	247
5.3.1. Облучатели-конденсоры.....	247
5.3.2. Облучатели-коллиматоры	251
5.4. Объективы	247
Глава 6. Световолоконные узлы	269
6.1. Общие сведения о световолоконных узлах	269
6.2. Свойства световолокон.....	271
6.3. Конструкции световолокон и световолоконных узлов	277
6.4. Устройства с использованием световолоконных узлов ...	283
6.4.1. Визуализатор-фоноскоп.	283
6.4.2. Специальные ЭЛТ со световолоконным экраном ...	284
6.4.3. Оптический мембранный манометр	286
6.4.4. Световолоконный преобразователь для считывания контрастных штрихов	288
6.4.5. Устройство со световолоконной головкой для измерения толщины пластин.....	291
6.4.6. Иглового микроскоп.	293
Глава 7. Модуляторы и дефлекторы пучков излучения	295
7.1. Общие сведения о модуляции	295
7.2. Внутренняя модуляция потока излучения.....	297
7.3. Внешняя модуляция потока излучения. Модуляторы.....	300
7.3.1. Классификация модуляторов.....	300
7.3.2. Растровые электромеханические модуляторы	300
7.3.3. Оптико-физические модуляторы	307
7.4. Общие сведения о дефлекторах	313
7.5. Оптико-механические дефлекторы	315
7.6. Оптико-акустические дефлекторы.....	322
7.7. Дефлекторы, основанные на явлении рефракции.....	326
7.8. Дефлекторы, использующие электрооптический эффект	328
Литература	329

Предисловие

Настоящая книга предназначена в первую очередь в качестве учебного пособия для студентов специальности 210200 «Проектирование и технология электронных средств», то есть для студентов, чья дальнейшая практическая деятельность будет связана, прежде всего, с созданием электронных функциональных узлов, блоков и систем электронно-вычислительных средств. Необходимость определенного уровня знаний о функциональных узлах других типов возникает в практике, когда разрабатываемое электронно-вычислительное средство содержит еще ряд составляющих в виде механических, электромеханических, оптико-электронных и других узлов. Такая необходимость может возникать во время курсового и дипломного проектирования, а также на различных этапах работы молодых специалистов.

Книга также может быть полезна студентам других родственных специальностей:

- а) 210100 «Электроника и микроэлектроника»;
- б) 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника»;
- в) 210107 «Электронное машиностроение»;
- г) 210108 «Микросистемная техника»;
- д) 220200 «Автоматизация и управление»;
- е) 220201 «Управление и информатика в технических системах».

По мнению авторов, книга может быть также использована молодыми специалистами, занимающимися разработкой электронно-вычислительных средств, измерительных приборов, систем автоматики и технической кибернетики в качестве одного из первых пособий перед освоением более детальных и углубленных источников информации.

В книге рассмотрены лишь оптико-электронные узлы. Подготовка к изданию именно этого выпуска обусловлена наибольшей степенью готовности материала. Для рассматриваемых узлов при-

ведены краткие сведения о серийно изготавливаемых изделиях. В тех случаях, когда узел является преимущественно встраиваемым, то есть когда необходимо его конструировать, приведены краткие сведения об используемых материалах.

В качестве примеров узлов и устройств во всех разделах приведены узлы и устройства периферийного оборудования ЭВМ; узлы измерительных приборов, используемых в различных областях; узлы автоматических систем управления объектами и процессами.

Авторы отдают себе отчет в том, что в книге со столь ограниченным объемом практически невозможно глубоко осветить все вопросы, связанные с разработкой всего комплекса оптико-электронных узлов. Совокупность сведений, содержащихся в этой книге, нужно наверное считать некоторым введением для тех, кто решил посвятить себя техническому творчеству в этой области. Более подробные сведения, связанные с разработкой оптико-электронных узлов, можно найти в основополагающих источниках информации, приведенных в конце книги. Авторы надеются, что в случае необходимости перечисленными книгами можно будет воспользоваться в ГПНТБ, Российской государственной библиотеке и ВИНТИ. Авторы также считают, что перед использованием этой книги студенты должны изучить раздел «Оптика» курса «Общая физика».

Авторы настоящей книги выражают благодарность авторам практических статей, опубликованных в журналах «Измерительная техника», «Приборы и техника эксперимента», «Оптико-механическая промышленность» и в целом ряде других источников. При этом выражают сожаление, что из-за ограничения объема в книге отсутствуют ссылки на эти источники.

В дальнейшем авторы планируют издать еще ряд книг, названия которых говорят о многообразии функциональных узлов, составляющих современные технические средства, а именно: «Электромагнитные узлы», «Электромеханический привод», «Механические узлы», «Гидро- и пневмопривод», «Пьезоэлектрический и магнитострикционный привод», «Узлы регулирования температуры», «Первичные преобразователи информации (датчики физических величин)», «Конструктивные узлы электронно-вычислительных средств». Наименование книг указаны в порядке, обусловленном степенью готовности излагаемого материала. В отдаленной перспективе авторы планируют подготовить к изданию книгу «Микромеханические приборы и устройства».

Авторы приносят глубокую благодарность студентам МИЭТ специальности 210200 «Проектирование и технология электронных средств» (выпускающая кафедра – «Микроэлектроника»), которые выполнили значительную работу по оформлению рукописи и подготовке иллюстраций в ходе выполнения своих курсовых и дипломных проектов. Особо благодарны авторы сотруднику ИЦНТ Д.М. Миленькому за большую и кропотливую работу по компьютерному набору текста рукописи.

СПИСОК АББРЕВИАТУР

АОД	— акустооптический дефлектор
АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
АЧТ	— абсолютно черное тело
ВАХ	— вольт-амперная характеристика
ВОГ	— волоконный оптический гироскоп
ДМ	— демодулятор
ДПИ	— делитель потока излучения
ЖКИ	— жидкокристаллический индикатор
ЖКЭ	— жидкокристаллический экран
ЗСИ	— знакосинтезирующий индикатор
ИД	— излучающий диод
ИИ	— источник излучения
ИМС	— интегральная микросхема
ИЭ	— излучающий элемент
КИП	— коэффициент использования потока
КПД	— коэффициент полезного действия
ЛН	— лампа накаливания
МДП	— (структура) металл-диэлектрик-полупроводник
МОП	— (структура) металл-оксид-полупроводник
НОД	— накопитель на оптическом диске
ОД	— оптический диск
ОКГ	— оптический квантовый генератор
ОС	— оптическая система
ОФ	— оптический фильтр
ОЭУ	— оптико-электронный узел
ПЗС	— прибор с зарядовой связью
ПИ	— приемник излучения
ППИ	— полупроводниковый индикатор
РТ	— реальное тело
САУ	— система автоматического управления

СВУ	—	световолоконный узел
СИД	—	светоизлучающий диод
СИТ	—	селективно-излучающее тело
СТ	—	серое тело
ТАУ	—	теория автоматического управления
ТКЛР	—	температурный коэффициент линейного расширения
ТПТ	—	тонкопленочный полевой транзистор
УНЧ	—	усилитель низкой частоты
УПТ	—	усилитель постоянного тока
ФД	—	фотодиод
ФПЗС	—	фотоэлектрический прибор с зарядовой связью
ФР	—	фоторезистор
ФЭ	—	формирующий элемент
ФЭУ	—	фотоэлектронный умножитель
ЭВС	—	электронно-вычислительное средство
ЭДС	—	электродвижущая сила
ЭЛТ	—	электронно-лучевая трубка
ЭРЭ	—	электрорадиоэлемент

Глава 1

Основные понятия и законы в фотометрии и геометрической оптике

1.1. Спектр электромагнитных волн

Общие сведения о спектральных областях

Совокупность областей различного рода электромагнитных излучений, расположенных в зависимости от одного из их параметров, называют спектром. Излучению в каждой области соответствует вполне определенный тип молекулярных и ядерных процессов, происходящих в веществе. Следует отметить, что границы между областями достаточно условны. Иногда эти области перекрывают друг друга. Ниже приведен один из вариантов разбиения спектра на области: а) радиочастотная область: частота $3 \cdot 10^7 \dots 3 \cdot 10^{10}$ Гц, длина волны 10 м...1 см; б) микроволновая область: частота $3 \cdot 10^{10} \dots 3 \cdot 10^{11}$ Гц, длина волны 1 см...1000 мкм; в) оптическая область: частота $3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{16}$ Гц, длина волны 1000 мкм...10 нм; г) рентгеновская область: частота $3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{18}$ Гц, длина волны 10 нм...100 пм; д) гамма-лучевая область: частота $3 \cdot 10^{18} \dots 3 \cdot 10^{20}$ Гц, длина волны 100 пм...1 пм.

Графическое изображение спектров

При графическом изображении спектров электромагнитного излучения по оси абсцисс откладывают либо частоту ν электромагнитных колебаний, либо длину волны λ . Связь между этими величинами при распространении излучения в вакууме имеет вид:

$$\nu = c/\lambda, \quad (1.1)$$

где c — скорость распространения излучения в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ км/с). В качестве аргумента используют также и так называемое волновое число $\tilde{\nu}$, определяемое по формуле:

$$\tilde{\nu} = 1/\lambda, \quad (1.2)$$

которое для краткости также иногда именуют частотой. Волновое число измеряют обычно в обратных сантиметрах; длину волны — в метрах, сантиметрах, миллиметрах, нанометрах, микрометрах, ангстремах; частоту — в герцах.

Соотношение между длиной волны λ излучения, распространяющегося в вакууме, и длиной волны λ_c излучения, распространяющегося в какой-либо среде с показателем преломления n_c , имеет вид:

$$\lambda_c = \lambda / n_c. \quad (1.3)$$

Для показателя преломления среды n_c в свою очередь справедлива формула:

$$n_c = c / v, \quad (1.4)$$

где v — скорость распространения излучения в рассматриваемой среде.

Таким образом, при последовательном прохождении пучка излучения через разные среды, длина волны λ_c излучения изменяется обратно пропорционально показателю преломления n_c , а частота колебаний ν остается все время постоянной.

Оптическая область спектра

Оптическая область спектра электромагнитного излучения состоит из трех областей: ультрафиолетовой (УФ) области (0,01...0,38 мкм); видимой области (0,38...0,77 мкм) и инфракрасной (ИК) области (0,77...300 мкм). В свою очередь ультрафиолетовую область делят на далекую или вакуумную область (0,01...0,2 мкм); среднюю область (0,2...0,3 мкм) и ближнюю (0,3...0,38 мкм), а инфракрасную область делят на ближнюю область (0,77...2,5 мкм); среднюю область (2,5...15 мкм) и дальнюю область (15...300 мкм). В некоторых источниках информации длинноволновой границей дальней области считают длину волны, равную 1000 мкм. Такое разделение оптического спектра было обусловлено особенностями используемых оптических материалов, а также особенностями источников и приемников излучения. Следует также отметить, что рабочий интервал большинства оптико-электронных приборов составляет 0,2...20 мкм.

Излучение с длиной волны в диапазоне 0,38...0,77 мкм, действуя на глаз, вызывает у человека световые ощущения — поэтому его и называют видимым излучением (светом). Видимое излучение занимает ничтожную часть в спектре электромагнитных излучений.

Каждой длине волны видимого излучения соответствует свой цвет. Белый пучок излучения является сложным и состоит из множества цветных пучков. Известно, что цветные пучки, составляющие пучок белого излучения, по-разному преломляются при прохождении трехгранной призмы: одни цветные пучки преломляются больше, другие меньше (рис. 1.1). Сами эти цветные пучки не являются сложными, поэтому не разлагаются на составные части. Эти пучки называют монохроматическими т. е. простыми. В табл. 1.1 приведены ориентировочные границы участков наиболее характерных цветов непрерывного спектра.

Таблица 1.1

Границы участков видимой области спектра

Границы участков, мкм	Цвет	Границы участков, мкм	Цвет
0,770 ... 0,620	красный	0,550 ... 0,510	зеленый
0,620 ... 0,585	оранжевый	0,510 ... 0,480	голубой
0,585 ... 0,575	желтый	0,480 ... 0,450	синий
0,575 ... 0,550	желто-зеленый	0,450 ... 0,380	фиолетовый

Весь этот спектр можно разделить по цветовым оттенкам на две части. В одну часть входят красные, оранжевые, желтые и желто-зеленые цвета, а в другую — фиолетовые, синие, голубые и зеленые цвета. Цвета первой части спектра мы связываем с представлением о цвете накаливаемых тел — огня, поэтому называем

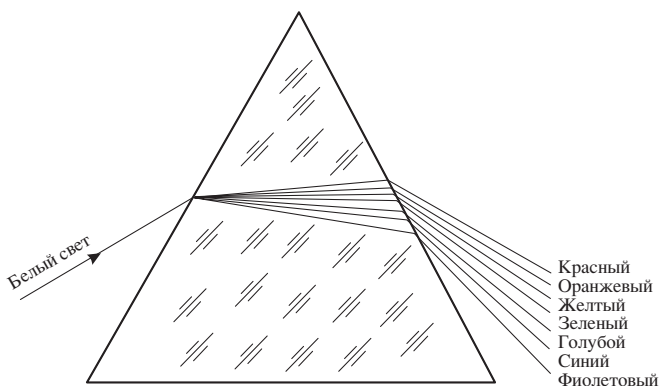


Рис. 1.1. К вопросу о разложении стеклянной призмой белого пучка излучения

их теплыми цветами. Цвета второй части спектра мы связываем с цветом воды, льда, металла и называем холодными цветами. С учетом сведений, изложенных выше, спектр видимой области можно определить как последовательность монохроматических излучений с определенной длиной волны.

Три рода техники лучистой энергии — техника ультрафиолетовых излучений, техника видимого излучения и инфракрасная техника — тесно связаны между собой.

Эта связь обусловлена не только общей физической сущностью излучений оптической области спектра, но и общностью их приложений в практике.

Во многих случаях весьма близки способы генерирования этих излучений. Методы измерения характеристик излучения (фотометрия) и применяемые для этих целей приемники и аппаратура также имеют много общего для всех трех диапазонов оптической области спектра.

Как ультрафиолетовое, так и инфракрасное излучение представляют собой электромагнитные волны, по своей физической природе аналогичные видимому излучению. Для всех трех излучений эти электромагнитные волны являются поперечными к направлению распространения пучка излучения; сам пучок распространяется от источника прямолинейно в любой однородной физической среде — в вакууме, газах, жидкостях и твердых веществах.

Деление инфракрасных излучений на поддиапазоны прежде всего обусловлено различием применяемых в каждом из них физических способов обнаружения и измерения: в ближнем поддиапазоне для этих целей используются те же методы, что и для видимых (световых) излучений, в среднем — лишь некоторые сходные методы, в дальнем — только тепловые методы.

Кроме того, ультрафиолетовое излучение обнаруживает себя в основном по химическому и физиологическому действию, видимое излучение глаз человека воспринимает как свет, а инфракрасное излучение проявляет себя в основном по тепловому действию.

1.2. Физические характеристики, используемые в фотометрии

По полноте оценки воздействия потока излучения на какой-либо объект различают две группы характеристик: энергетические и световые (таб. 1.2).

Таблица 1.2

Физические характеристики, используемые в фотометрии

<i>Энергетические характеристики</i>		
Полный или энергетический поток излучения источника	$\Phi_e = dW_e / dt$	Вт (ватт)
Сила излучения источника излучения	$I_e = d\Phi_e / d\omega$	Вт/ср
Энергетическая яркость или лучистость источника излучения	$L_e = dI_e / dA_{\text{ин}} \cos\theta$	Вт/м ² ·ср
Энергетическая светимость или излучаемость источника излучения	$M_e = d\Phi_e / dA_{\text{ин}}$	Вт/м ²
Энергетическая освещенность или облученность приемника излучения	$E_e = d\Phi_e / dA_{\text{пр}}$	Вт/м ²
<i>Световые характеристики</i>		
Световой поток источника излучения	Φ_v	лм (люмен)
Сила света источника излучения	$I_v = d\Phi_v / d\omega$	кд (кандела) 1кд = 1лм/ср
Световая яркость источника излучения	$L_v = dI_v / dA_{\text{ин}} \cos\theta$	1 нит = 1 кд/м ²
Светимость источника излучения	$M_v = d\Phi_v / dA_{\text{ин}}$	лк (люкс) 1 лк = 1 лм/м ²
Освещенность приемника излучения	$E_v = d\Phi_v / dA_{\text{пр}}$	лк (люкс)
W_e — лучистая энергия; $A_{\text{ин}}$, $A_{\text{пр}}$ — площадь источника и приемника излучения соответственно; θ — плоский угол, задающий направление излучения; ω — пространственный угол.		

Первую группу характеристик используют при действии на объект полного или энергетического потока излучения источника, а вторую — при действии лишь его части, а именно светового

потока. Энергетические характеристики оптического излучения являются универсальными и могут быть использованы для описания процессов как в видимой, так и в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Световые характеристики используют лишь в видимой области спектра. Их использование является необходимым при расчете приборов и устройств, предназначенных для создания излучения, воспринимаемого глазом человека. Все характеристики в первом случае имеют нижний индекс «*e*» (*energy*), а во втором — индекс «*v*» (*visual*).

Любой источник излучения испускает поток с определенным спектральным составом, задаваемым характеристикой спектральной плотности энергетического потока $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ (рис. 1.2, а):

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda) = d\Phi_e/d\lambda. \tag{1.5}$$

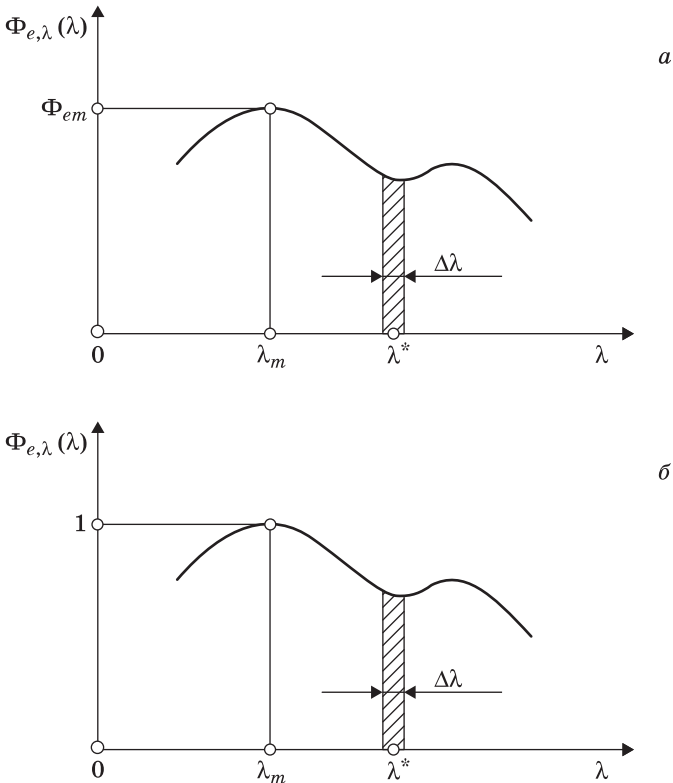


Рис. 1.2. Графики зависимостей абсолютной (а) и относительной (б) спектральной плотности потока излучения источника

Зная распределение $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$, можно определить элементарный поток $d\Phi_e(\lambda^*)$ с определенной длиной волны излучения λ^* :

$$d\Phi_e(\lambda^*) = \Phi_{e,\lambda}(\lambda^*)d\lambda. \quad (1.6)$$

Этот поток практически принимают за монохроматический. Вся совокупность таких монохроматических потоков будет представлять собой полный поток Φ_e , излучаемый источником:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda. \quad (1.7)$$

В практике часто используют характеристику относительной спектральной плотности энергетического потока $\varphi_{e,\lambda}(\lambda)$ (рис. 1.2, б):

$$\varphi_{e,\lambda}(\lambda) = \Phi_{e,\lambda}(\lambda) / \Phi_{em}, \quad (1.8)$$

где Φ_{em} — максимальное значение спектральной плотности энергетического потока $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$. Тогда с учетом формулы (1.8) формулы (1.6) и (1.7) будут иметь вид соответственно:

$$d\Phi_e(\lambda^*) = \Phi_{em} \varphi_{e,\lambda}(\lambda^*)d\lambda, \quad (1.9)$$

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda. \quad (1.10)$$

Если известны распределения спектральных плотностей других физических характеристик таблицы, а именно: $I_{e,\lambda}(\lambda)$, $L_{e,\lambda}(\lambda)$, $M_{e,\lambda}(\lambda)$, $E_{e,\lambda}(\lambda)$ или $I_{v,\lambda}(\lambda)$, $L_{v,\lambda}(\lambda)$, $M_{v,\lambda}(\lambda)$, $E_{v,\lambda}(\lambda)$, то для их вычисления будут справедливы точно такие же по виду формулы.

1.3. Характеристики зрения человека.

Связь между энергетическими и световыми характеристиками

Реакцию человеческого глаза на элементарные монохроматические потоки равной интенсивности с различной длиной волны характеризует абсолютная кривая видности глаза или абсолютная спектральная чувствительность глаза $V(\lambda)$. Относительную спектральную чувствительность глаза $v(\lambda)$ определяют по формуле:

$$v(\lambda) = V(\lambda) / V_m, \quad (1.11)$$

где V_m — максимальная чувствительность глаза, $V_m = 683$ лм/Вт (рис. 1.3, табл. 1.3).

Таким образом, для излучения с заданной конкретной длиной волны λ^* значение $v(\lambda^*)$ является коэффициентом, характеризующим действие этого излучения по сравнению с действием другого излучения, для которого $v(\lambda)$ равно единице.

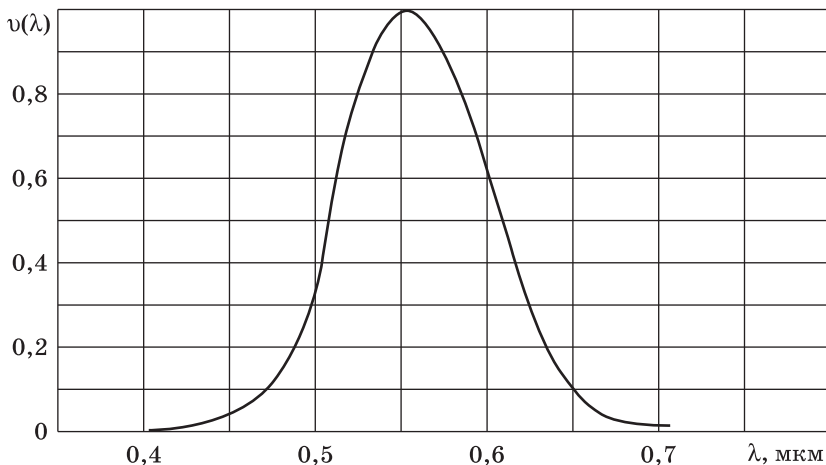


Рис. 1.3. График относительной спектральной чувствительности глаза человека $v(\lambda)$ (яркий свет)

Таблица 1.3

Значения функции относительной спектральной чувствительности глаза человека $v(\lambda)$ (яркий свет)

Длина волны λ , мкм	Функция $v(\lambda)$
0,41	0,0012
0,42	0,0040
0,43	0,0116
0,44	0,023
0,45	0,038
0,46	0,060
0,47	0,091
0,48	0,139
0,49	0,208
0,50	0,323
0,51	0,503
0,52	0,710
0,53	0,862
0,54	0,954
0,55	0,995
0,56	0,995

Длина волны λ , мкм	Функция $v(\lambda)$
0,57	0,952
0,58	0,870
0,59	0,757
0,60	0,631
0,61	0,503
0,62	0,381
0,63	0,265
0,64	0,175
0,65	0,107
0,66	0,061
0,67	0,032
0,68	0,017
0,69	0,0082
0,70	0,0041
0,71	0,0021
0,72	0,00105

Как видно из рис. 1.3, глаз человека обладает максимальной чувствительностью к излучению с длиной волны 0,555 мкм (зеленый свет), а для других более коротких или более длинных волн чувствительность глаза падает. Границами приведенной кривой видности глаза на уровне 0,05 являются: 0,455 мкм (коротковолновая граница) и 0,668 мкм (длинноволновая граница).

Если распределение $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ для источника излучения известно, то его световой поток Φ_v определяют с использованием зависимости $V(\lambda)$ следующим образом:

$$\Phi_v = \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda = V_m \Phi_{em} \int_0^{\infty} v(\lambda) \varphi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (1.12)$$

Световой поток Φ_v можно определить и через полный энергетический поток с использованием арифметического выражения:

$$\Phi_v = \xi \Phi_e, \quad (1.13)$$

где ξ — световая отдача источника излучения, лм/Вт:

$$\xi = V_m \eta, \quad (1.14)$$

где η — коэффициент полезного действия (КПД) глаза или коэффициент использования глазом потока излучения источника:

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} v(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} v(\lambda) \varphi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}. \quad (1.15)$$

Рис. 1.4 иллюстрирует возможность вычисления КПД глаза человека графическим путем. Коэффициент η является безразмерным и всегда меньше единицы.

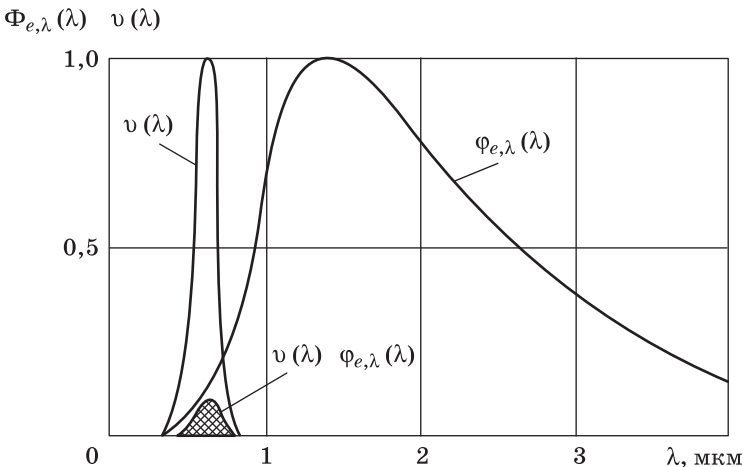


Рис. 1.4. К вопросу о графическом вычислении КПД глаза человека

[. . .]