

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»  
(СПбГУТ)

---

**Е. В. Полякова**

# **ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИЮ**

## ***ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА***

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**СПб ГУТ)))**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2017**

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.86я73

П 54

Рецензенты:

доктор технических наук,

доцент кафедры электрической связи Петербургского  
государственного университета путей сообщения Императора Александра I

*А. К. Канаев,*

кандидат технических наук, доцент кафедры СС и ПД СПбГУТ

*И. В. Гришин*

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ  
в качестве учебного пособия*

**Полякова, Е. В.**

П 54 Введение в профессию. Фотоника и оптоинформатика : учебное  
пособие / Е. В. Полякова ; СПбГУТ. – СПб., 2017. – 64 с.

Даны основные термины и определения фотоники и оптоинформатики, перечислены важнейшие исторические этапы зарождения теории света. Приведены основы квантовой теории света, фотометрии и колориметрии. Рассмотрены принципы работы некоторых устройств фотоники.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

**УДК 621.38(075.8)**

**ББК 32.86я73**

© Полякова Е. В., 2017

© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ФОТОНИКА – ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ПРЕДМЕТ, ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ОБЛАСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ .....	4
1.1. Фотоника. Термины и определения .....	7
1.2. История развития фотоники .....	9
1.3. Оптическое излучение .....	12
2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТА .....	15
2.1. Функция видности и ее зависимость от длины электромагнитной волны .....	16
2.2. Световой поток .....	17
2.3. Освещенность поверхности .....	19
2.4. Светимость .....	19
2.5. Яркость .....	20
2.6. Световая экспозиция .....	21
2.7. Энергетическая экспозиция .....	21
2.8. Поток излучения .....	22
2.9. Энергетическая светимость (интегральная излучательная способность) .....	22
2.10. Облученность поверхности .....	22
3. ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ГЛАЗА .....	23
3.1. Оптическая система глаза .....	23
3.2. Понятие аккомодации .....	25
3.3. Аберрации оптической системы глаза .....	27
4. КВАНТОВАЯ И ВОЛНОВАЯ ТЕОРИИ СВЕТА .....	28
4.1. История квантовой теории света .....	28
4.2. Свойства фотонов. Масса и импульс фотона. Давление света .....	28
4.3. Виды фотоэлектрического эффекта. Законы внешнего фотоэффекта .....	31
4.4. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта .....	35
4.5. Эффект Комптона и его элементарная теория .....	38
4.6. Устройства на основе фотоэффекта .....	40
4.7. Волновая теория света .....	43
4.8. Единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения .....	45
5. КОЛОРИМЕТРИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	47
5.1. Понятия цвета .....	47
5.2. История научных представлений о цвете .....	49
5.3. Цвета спектра .....	51
6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФОТОНИКИ В РОССИИ .....	54
Приложение .....	56
Список литературы .....	64

# 1. ФОТОНИКА – ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ПРЕДМЕТ, ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ОБЛАСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ

Фотоника – наука о способах генерации и практического использования света и других форм энергии излучений, квантовой единицей которых является фотон.

Фотоника изучает физические принципы использования света в системах передачи, приема, хранения, переработки и отображения информации, в том числе в виде оптических изображений. Составными частями фотоники являются оптоэлектроника, иконика<sup>1</sup>, тепловидение и ночное видение, квантовая электроника, отдельные разделы геометрической и физической оптики и ряд других дисциплин.

Фотоника – область науки и техники, связанная с использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах, в которых генерируются, усиливаются, модулируются, распространяются и детектируются оптические сигналы, а также производится их запись или отображение.

В этом определении важным пунктом является тот факт, что фотон является главным действующим информационным носителем.

Фотоника также может быть охарактеризована как область физики и технологии, связанная с излучением, детектированием, поведением и последствиями существования фотонов. Это означает, что фотоника занимается контролем и преобразованием оптических сигналов и имеет широкое поле для своего применения: от передачи информации через оптические волокна до создания новых сенсоров, которые модулируют световые сигналы в соответствии с малейшими изменениями окружающей среды. Перспективные информационные технологии основываются на принципах фотоники.

Фотоника охватывает широкий спектр оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств и их разнообразных применений. Коренные области исследований фотоники включают волоконную и интегральную оптику, в том числе нелинейную оптику, физику и технологию полупроводниковых соединений, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронные устройства, высокоскоростные электронные устройства.

Термин «оптика» постепенно заменяется новым обобщенным названием – «фотоника», которая в настоящее время охватывает огромную область наук и технологий, в том числе:

- лазерное производство;
- биологические и химические исследования;

---

<sup>1</sup> Наука об изображении.

- контроль климата и экологический мониторинг;
- медицинскую диагностику и терапию;
- технологию показа и проекции;
- оптическое вычисление.

Темпы роста мирового рынка фотоники составляют сегодня 7–8 % в год. Ключевые данные по распределению сегментов рынка фотоники представлены на рис. 1.

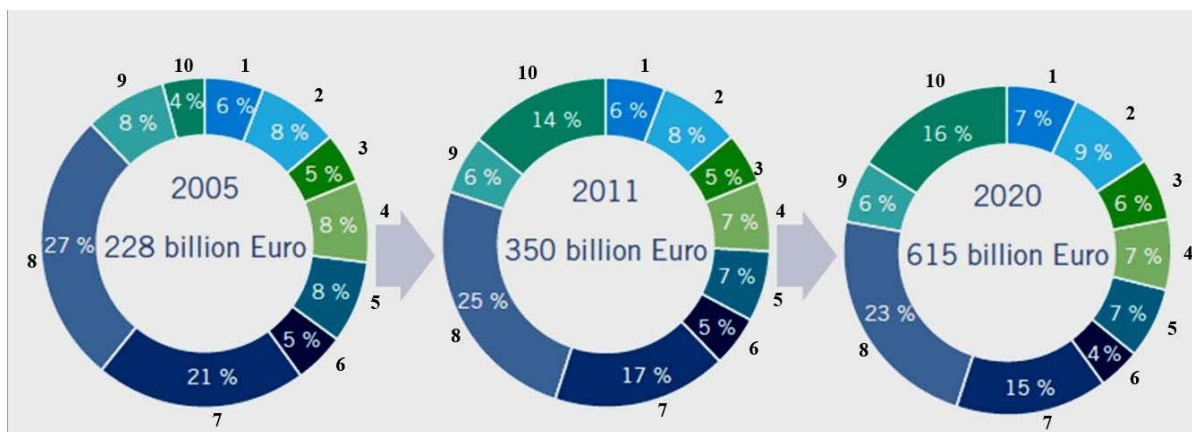


Рис. 1. Данные по рынку фотоники:

- 1 – производственное оборудование; 2 – измерения и диагностика;  
 3 – оптические компоненты и системы; 4 – оборудование для обеспечения безопасности и обороны; 5 – оборудование для медицины; 6 – оборудование для инфокоммуникационных технологий; 7 – информационное оборудование;  
 8 – дисплеи; 9 – источники света; 10 – фотовольтаика<sup>2</sup>

Фотоника, как перспективная высокотехнологичная отрасль отечественной экономики, играет важную роль в процессе модернизации промышленности России. Наша страна, бывшая одним из двух пионеров в создании квантовой электроники и лазерной техники, а также изучении вопросов распространения лазерного излучения и его взаимодействия с веществом, имеет в области фотоники мощный научный потенциал, большой опыт в проведении разработок и большое число предприятий и организаций, ведущих исследования и создающих оборудование и технологии.

За последние 25 лет произошел революционный скачок в оптической науке и технике. Созданы новые поколения лазеров, светодиодов, приемников излучения, оптических материалов, устройств и систем. Возникли целые направления в оптике – лазерная, интегральная, волоконная, адап-

<sup>2</sup> Раздел науки на стыке физики, фотохимии и электрохимии, изучающий процесс возникновения электрического тока в различных материалах под действием падающего на него света. Этот процесс известен как фотоэлектрический или фотовольтаический эффект.

тивная и нелинейная оптика, микро- и нанооптика, волноводная оптоэлектроника. Термин «фотоника» охватывает области науки и техники, связанные с использованием светового излучения (или потока фотонов) – самых быстрых из всех частиц материи.

Новое направление в фотонике – оптоинформатика. Под ней понимаются области науки и техники, связанные с исследованием, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий и устройств для передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации на основе оптических технологий. По существу, без оптоинформатики немислим современный Интернет.

Основные области приложения фотоники:

- информационные и телекоммуникационные технологии;
- медицина;
- безопасность и оборона;
- энергетика.

В настоящее время современная фотоника ориентирована на решение таких задач, как:

- миниатюризация оптических элементов, устройств и систем;
- интеграция оптических элементов, устройств и систем на единой базе;
- сверхбыстродействие оптических систем;
- сверхскоростная передача больших массивов информации;
- низкий уровень энергии управляющих сигналов;
- многофункциональность оптических материалов.

К перспективным системам оптоинформатики можно отнести:

- оптические телекоммуникационные системы со скоростью передачи данных до 40 Тбит/с по одному каналу;
- оптические голографические запоминающие устройства сверхбольшой емкости до 1,5 Тбайт на диск стандартных размеров;
- многопроцессорные компьютеры с оптической межпроцессорной связью;
- оптический компьютер, в котором свет управляет светом (максимальная тактовая частота такого компьютера может составлять  $10^{12}$ – $10^{14}$  Гц, что на 3–5 порядков выше существующих электронных аналогов);
- фотонные кристаллы – новые искусственные кристаллы, имеющие гигантскую дисперсию и рекордно низкие оптические потери (0,001 дБ/км).

Указанные выше тенденции привели к потребности подготовки специалистов нового профиля в областях фотоники и оптоинформатики, волоконной и интегральной оптики, телекоммуникации, оптических систем безопасности, способных участвовать в научно-исследовательской работе.

## 1.1. Фотоника. Термины и определения

Термин «фотоника» впервые появился в середине 60-х гг., его ввел академик А. Н. Теренин (рис. 2), который работал в Государственном оптическом институте им С. И. Вавилова и Ленинградском государственном университете (ЛГУ). Академик А. Н. Теренин основал новое направление, названное им фотоникой, находящееся на стыке физики и химии. Уже в 1964 г. под руководством А. Н. Теренина на физическом факультете ЛГУ была создана кафедра биомолекулярной и фотонной физики, а затем – кафедра фотоники. Точного определения термина «фотоника» А. Н. Теренин не приводил. В своей книге «Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений», изданной в 1967 г., он определял фотонику как «...совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов».



Рис. 2. Академик А. Н. Теренин

Наибольшую популярность термин «фотоника» стал приобретать в середине 80-х гг. XX в. в связи с бурным развитием лазерной техники, волоконной и интегральной оптики. К этому времени появилось много направлений в современной оптике и много названий:

- электрооптика;
- магнитооптика;
- акустооптика;
- волоконная оптика;
- интегральная оптика;
- микрооптика;
- нелинейная оптика;

- голография;
- иконика.

Разнообразие терминов привело к необходимости введения названия, которое бы объединило новые направления оптики. Таким названием стала «фотоника».

Некоторые основные термины и обозначения, используемые в теории фотоники:

- световые волны – электромагнитные волны оптического диапазона;
- оптическое излучение – электромагнитное излучение оптического диапазона;

– монохроматическое излучение – оптическое излучение, характеризующееся какой-либо одной частотой (одной длиной волны) световых колебаний;

– квантовая электроника – область науки и техники, исследующая и применяющая квантовые явления для генерации, усиления и преобразования электромагнитных волн;

– оптоэлектроника – область науки и техники, исследующая и применяющая процессы взаимодействия оптического излучения с веществом для передачи, приема, переработки, хранения и отображения информации;

– вынужденное излучение – электромагнитное излучение, возникающее в результате вынужденного испускания;

– вынужденное испускание – когерентное испускание фотона при квантовом переходе системы в результате взаимодействия с внешним электромагнитным полем;

– квантовый усилитель – усилитель электромагнитных волн, основанный на использовании вынужденного излучения;

– квантовый генератор – источник когерентного излучения, основанный на использовании вынужденного излучения;

– лазер (оптический квантовый генератор) – квантовый генератор оптического излучения;

– когерентность – согласованное протекание во времени и в пространстве колебательных или волновых процессов;

– волноводная фотоника – область науки и техники, связанная с использованием светового излучения (или потока фотонов) в волноводных (волоконных или планарных) оптических элементах, устройствах и системах, в которых генерируются, усиливаются, модулируются, распространяются и детектируются оптические сигналы, а также производится их запись или отображение. Волноводная фотоника охватывает и объединяет такие направления, как волоконная оптика и интегральная оптика (интегральная оптоэлектроника).



## 1.2. История развития фотоники

Оптика является одной из древнейших наук. Освоение оптического излучения можно подразделить на два больших исторических этапа.

1. Наблюдение излучения непосредственно глазом, познание свойств видимого света способствовали развитию классической оптики.

Великие мыслители древности считали, что световые лучи исходят из глаз (Платон). На основе учения о зрительных лучах, исходящих из глаз, Эвклид, Птоломей и другие создали теорию отражения света от плоских и сферических зеркал и положили начало геометрической оптике. Затем появилась корпускулярная концепция, поддерживаемая вначале Декартом, а затем Ньютоном. Согласно этой теории, свет представляет собой совокупность мельчайших частиц – корпускул, движущихся вдоль определенной траектории – светового луча. Этой теорией наглядно и естественно объяснялись такие явления, как прямолинейность распространения света в однородных средах, отражение света от поверхности зеркал, преломление светового луча на границе двух сред, а также его искривление при распространении света в неоднородных средах. Одновременно Х. Гюйгенсом была предложена интерпретация оптических явлений на основе понятий световой волны и волновой поверхности, согласно которой свет представляет собой волны, распространяющиеся в пространстве. Лучи света являются чисто абстрактным понятием и определяются как кривые, ортогональные волновым поверхностям.

Главным доводом Ньютона против волновой теории было отсутствие вещественной среды («эфира») в мировом пространстве. Явления, связанные с периодичностью (кольца Ньютона), в корпускулярной теории объяснялись тем, что частицы вращаются. Пространство, пробегаемое такой частицей за один оборот, сопоставлялось с некой «длиной волны». Полярность (в современной терминологии – поляризацию) Ньютон считал свойством только твердых частиц. Огибание, дифракцию он пытался истолковать «отталкивательным» и «притягательным» действием вещества на световые корпускулы. Вслед за Ньютоном в XVIII в. большинство ученых стали склоняться к корпускулярной теории, и волновая теория, развитая Гюйгенсом, сохранила немногих последователей.

Только на рубеже XVIII–XIX вв. англичанином Томасом Юнгом были начаты серьезные исследования интерференции и дифракции, а французом О. Френелем дано их полное теоретическое объяснение на основе волновой теории Гюйгенса. Кроме того, Френель показал, что представления о волновой природе не противоречат факту прямолинейности распространения света в однородной среде. К концу XIX в. Максвелл дал электромагнитную интерпретацию и показал, что всякая световая волна является электромагнитным возмущением особого рода. Опыты Г. Герца и А. С. Попова экспериментально подтвердили это.

Электромагнитная теория, обобщенная в виде системы дифференциальных уравнений Максвелла, явилась вершиной первого «классического» этапа развития оптики и представлений о природе света.

2. Изучение оптических спектров поглощения и испускания привело к необходимости введения понятий о квантовых скачках и кванте действия  $h$  как минимальном действии, которые ввел в 1900 г. М. Планк для объяснения спектра излучения черного тела. Впоследствии постоянная  $h$ , имеющая размерность Дж·с, была названа постоянной Планка. В 1905 г. А. Эйнштейн на основе теории Планка возродил в новой форме корпускулярную теорию света, предположив, что планковские кванты энергии  $E = h\nu$  существуют в виде реальных частиц, названных им световыми квантами или фотонами. Таким образом, Эйнштейну удалось объяснить открытый ранее фотоэффект. Применяя эти понятия к атому, Нильс Бор в 1913 г. объяснил простую связь частоты излучения  $\nu$  с разницей энергий между уровнями  $E_n$  и  $E_m$ :

$$\nu_{nm} = \left( \frac{E_n - E_m}{h} \right).$$

Фундаментальную роль для последующего развития квантовой электроники сыграла работа А. Эйнштейна 1917 г., в которой он на основании рассмотрения термодинамического равновесия системы молекул ввел понятие об индуцированном излучении. На возможность использования индуцированного излучения для наблюдения отрицательного поглощения (усиления) впервые указал в 1940 г. В. А. Фабрикант.

В 1954 г. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров разработали проект, а Ч. Таунс создал действующий мазер на пучке молекул аммиака. Это был первый прибор, работавший на квантовых принципах, в основе которого лежало явление усиления электромагнитных колебаний с помощью индуцированного излучения. За эти работы советским ученым Н. Г. Басову и А. М. Прохорову была присуждена Ленинская премия, а затем совместно с американским физиком Ч. Таунсом – Нобелевская премия. Таким образом, 1954-й считается годом рождения квантовой электроники как самостоятельной науки.

Методы, развитые первоначально в радиодиапазоне (первый аммиачный мазер работал на длине волны 1,25 см), затем были перенесены в оптический диапазон, и в 1960 г. был создан рубиновый лазер, а в 1961 г. – газовый гелий-неоновый лазер, который является когерентным источником световых волн. Это дало начало развитию новых областей науки: нелинейной оптики, голографии и др. основополагающие работы по голографии были выполнены Д. Габором и Ю. Н. Денисюком.

Быстрыми темпами развивалась физика полупроводников и полупроводниковая электроника. Успехи в этих областях привели к созданию эффективных полупроводниковых фотоприемников и генераторов света, т. е. приборов, составляющих основу полупроводниковой оптоэлектроники. В 1873 г. В. Смит обнаружил в слоях селена фотопроводимость, т. е. изменение сопротивления под действием освещения, открыв тем самым внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект был открыт в 1888 г. А. Г. Столетовым. В 1923 г. О. В. Лосев наблюдал свечение кристаллов карбида кремния под действием электрического тока и дал правильное объяснение этому явлению, которое легло в основу действия современных электролюминесцентных источников света. В 1960 г. в Физическом институте АН СССР в Москве был рассмотрен принцип работы полупроводникового инжекционного лазера, а в 1962 г. в Физико-техническом институте АН СССР в Ленинграде было обнаружено эффективное рекомбинационное излучение и наблюдалось вынужденное излучение в кристаллах арсенида галлия. Ж. И. Алферовым с сотрудниками успешно проводились работы по получению гетеропереходов и созданию на их базе эффективных приемников и источников света. В 1968–1970 гг. ими были созданы низковольтные полупроводниковые лазеры, в том числе работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре. Важным моментом в развитии оптической электроники явилось получение оптических волокон с низкими потерями ( $< 1$  дБ/км), что обеспечило возможность их применения в качестве эффективных оптических волноводов. Разработка эффективных полупроводниковых лазеров, работающих в непрерывном режиме, и создание оптических волокон с малыми потерями привели к рождению и быстрому развитию новой системы передачи информации через волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и созданию волоконно-оптических систем передачи (ВОСП).

Можно выделить пять поколений ВОСП:

- первое поколение (1977–1980) – использовались диапазон длины волн 0,8–0,9 мкм, цифровые потоки со скоростью 45 Мбит/с;
- второе поколение (1980–1983) – в качестве рабочей использовалась длина волны 1,31 мкм, скорость цифровых потоков составляла 500 Мбит/с;
- третье поколение (1983–1990) – использовались лазеры с длинами волн 1,31 и 1,55 мкм, цифровые потоки 2 Гбит/с;
- четвертое поколение (1989–1994) – использовалась длина волны 1,55 мкм, скорость цифровых потоков составляла 10 Гбит/с. В состав ВОСП четвертого поколения входили волоконные оптические усилители;
- пятое поколение (с 1994) – широкополосные. Рабочие длины волн находятся в диапазоне 1,53–1,61 мкм. Системы используют спектральное уплотнение и несколько источников света. Предусматривается объединение

каналов со скоростями обработки цифровых потоков 10 Гбит/с. В многоканальных ВОСП пятого поколения достигается производительность 1 Тбит/с. Работы по повышению скорости передачи продолжаются.

Создание лазеров стимулировало в начале 60-х гг. прошлого века большой интерес к оптическим системам связи. К концу 60-х гг. были созданы как пригодные для оптической связи волоконные световоды (потери меньше 20 дБ/км), так и удобные источники света – светодиоды и лазеры, работающие на основе арсенида галлия (GaAs) при комнатных температурах в непрерывном режиме. Появились теоретические и экспериментальные работы, показывающие возможность реализации тонкопленочных оптических устройств, выполняющих функции пассивных оптических элементов (волноводов, линз, призм и т. д.), управляющих элементов (электрооптических, акустооптических модуляторов и т. д.). Эти работы положили начало новой области, известной сейчас как интегральная оптоэлектроника.

В настоящее время оптоэлектроника возглавляет список полупроводниковых приборов с наибольшим объемом продаж. СИД, выполненный на основе гетероэпитаксиальных структур, обеспечивает световую отдачу более 25 лм/Вт. Перспективным является использование СИД на основе органических и полимерных материалов (OLED).

### 1.3. Оптическое излучение

Оптическое излучение появляется в результате перехода электронов из возбужденных валентных состояний в основные валентные состояния.

По принципам генерации электромагнитное излучение делится на следующие виды:

- гамма-излучение;
- рентгеновское;
- синхротронное;
- радиоизлучение;
- оптическое.

Перечисленные виды излучений различаются энергией квантов излучения  $E = h\nu = hc/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны излучения,  $\nu$  – частота). Поэтому часто виды излучений разделяют по спектральным областям (табл. 1).

Излучение в спектральной области от 1 нм до 1 мм называется оптическим излучением. Весь диапазон оптического излучения делится на три области:

- ультрафиолетовую (УФ);
- видимую;
- инфракрасную (ИК).

Таблица 1

Излучение	Длина волны $\lambda$	Частота $\nu$	Энергия фотонов $h\nu$
Гамма-излучение	< 5 пм	> $6 \cdot 10^{19}$ Гц	> $10^5$ эВ
Рентгеновское	10 нм – 5 пм	30000 ТГц – $6 \cdot 10^{19}$ Гц	100 эВ – 250 кэВ
Ультрафиолетовое	380–10 нм	750–30000 ТГц	3,1–124 эВ
Видимое	780–380 нм	429–750 ТГц	1,68–3,26 эВ
Инфракрасное	1 мм – 780 нм	300 ГГц–429 ТГц	12,4 мэВ – 1,68 эВ
Радиоволны	>10 км – 1 мм	< 30 кГц – 300 ГГц	12,4 фэВ – 12,4 мэВ

Ультрафиолетовый диапазон излучения в свою очередь делится на диапазоны:

- УФ-А (315–400 нм);
- УФ-В (280–315 нм);
- УФ-С (100–280 нм).

Излучение, способное вызвать зрительное ощущение, называется видимым. Видимое излучение представляет собою узкую спектральную область (380–780 нм) оптического излучения, соответствующую области чувствительности глаза человека. Цветам спектра видимого излучения соответствуют следующие диапазоны:

- фиолетовый – 400...455 нм;
- синий – 455...485 нм;
- сине-зеленый – 485...505 нм;
- зеленый – 505...550 нм;
- желто-зеленый – 550...575 нм;
- желтый – 575...585 нм;
- оранжевый – 585...610 нм;
- красный – 610...700 нм.

Инфракрасное излучение в спектре занимает область от 780 нм до 1 мм и делится на диапазоны:

- ИК-А (760–1400 нм);
- ИК-В (1400–3000 нм);
- ИК-С (3000– $10^6$  нм).

С потоком оптического излучения, распространяющимся в любой среде, могут происходить следующие количественные изменения (рис. 3):

- пропускание части потока через среду;
- поглощение части потока излучения средой с преобразованием в другие виды энергии (тепло, генерация носителей тока, эмиссия электронов и ионов);

- рассеяние части потока в результате отражения от частиц, имеющих показатель преломления, отличающийся от показателя преломления среды;
- поглощение части потока излучения средой с преобразованием в излучение другого спектрального состава (люминесценция);
- изменение спектрального состава излучения, что является следствием селективного поглощения энергии излучения средой;
- могут иметь место изменение поляризации отраженного и пропущенного потоков, а также изменение направления распространения.

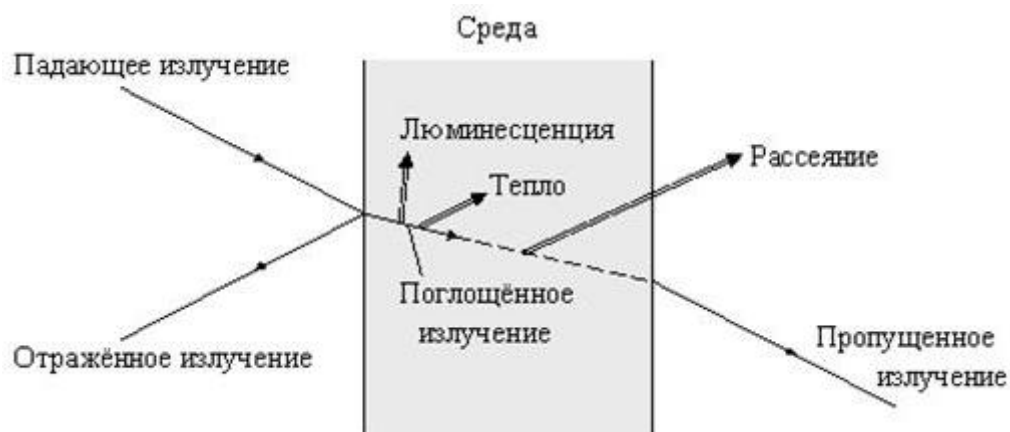


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая оптические процессы, происходящие на поверхности среды и внутри

## 2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТА

Энергетические параметры характеризуют излучение безотносительно к его действию на какой-либо приемник излучения и связаны с переносимой излучением энергией.

С помощью световых параметров оценивают излучение в случае, если приемником излучения служит человеческий глаз.

Чувствительность глаза к свету с различными длинами волн не одинакова. Она имеет максимум при  $\lambda = 555$  нм и быстро снижается при удалении от этого максимума. На границах видимого диапазона ( $\lambda = 380$  и  $780$  нм) чувствительность глаза падает практически до нуля.

На рис. 3 показана относительная спектральная световая эффективность глаза  $V(\lambda)$ , адаптированного к дневному свету. Энергетические и световые параметры излучения по смыслу одинаковы, но характеризуют излучение в различных диапазонах волн и имеют различные единицы измерения. Количественные характеристики видимого света связывают со зрительным ощущением, которое отсутствует в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах.

Световые и энергетические параметры связаны пропорциональной зависимостью. Для количественного описания оптического излучения, а также источников и приемников излучения используют пять основных энергетических параметров:

- поток излучения и сила излучения – параметры, характеризующие излучение;
- энергетическая светимость и энергетическая яркость – эти параметры характеризуют источник излучения с учетом площади излучаемой поверхности;
- энергетическая освещенность (облученность) – этим параметром характеризуют облучаемую, т. е. принимающую излучение поверхность.

Для видимого излучения применяются соответственно пять световых параметров:

- световой поток;
- сила света;
- светимость;
- яркость;
- освещенность.

## 2.1. Функция видности и ее зависимость от длины электромагнитной волны

Глаза большинства людей, не страдающих дефектами зрения, обладают максимальной чувствительностью к оптическому излучению с длиной волны  $\lambda = 555$  нм (зеленый свет).

Интенсивность нервного раздражения, возникающего в нервных окончаниях сетчатки глаза под воздействием света принято характеризовать функцией видности  $F(\lambda)$ :

- $F = F_{\max}$  при  $\lambda = 555$  нм;
- $F = F_{\min}$  при  $\lambda = 380$  нм и  $\lambda = 780$  нм.

Аналитический вид функции  $F(\lambda)$  достаточно сложен. Поэтому для практических целей достаточно воспользоваться относительной функцией видности (рис. 4)

$$V(\lambda) = \frac{F_x}{F_{\max}}$$

Функция  $V(\lambda)$  безразмерна и позволяет установить взаимосвязь между энергетическими и фотометрическими параметрами оптического излучения.

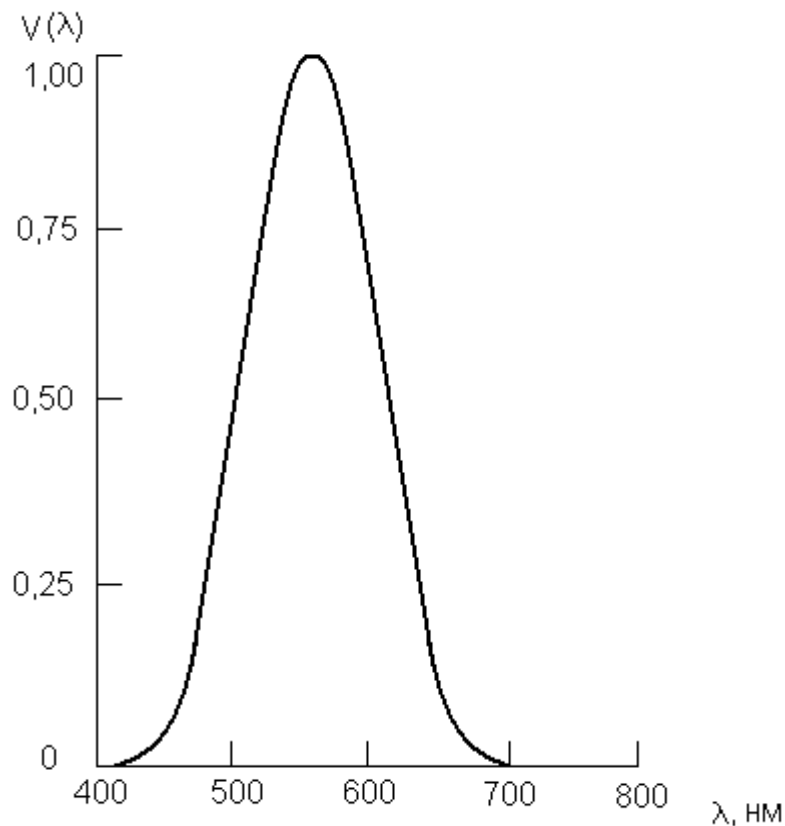


Рис. 4. Экспериментальная зависимость относительной функции видности «среднего» человеческого глаза



В табл. 2 приведены числовые значения  $V(\lambda)$  для некоторых длин электромагнитных волн.

Таблица 2

$\lambda$ , нм	$V(\lambda)$	$\lambda$ , нм	$V(\lambda)$
380	0,002	580	0,870
400	0,004	590	0,757
410	0,0012	600	0,631
420	0,004	610	0,503
430	0,012	620	0,381
440	0,023	630	0,265
450	0,038	640	0,175
460	0,060	650	0,107
470	0,091	660	0,061
480	0,139	670	0,032
490	0,208	680	0,017
500	0,323	690	0,008
510	0,503	700	0,004
520	0,710	710	0,002
530	0,862	720	0,001
540	0,954	730	0,0005
550	0,995	740	0,0002
555	1,000	750	0,0001
560	0,995	760	0,00006
570	0,952	780	0,00003

## 2.2. Световой поток

Телесный угол – часть пространства, ограниченная некоторой конечной поверхностью. Телесный угол измеряется отношением площади  $\Delta S_c$  той части сферы с центром в вершине конической поверхности  $i$ , которая вырезается этим телесным углом, к квадрату радиуса  $R$  сферы.

На рис. 5 показан источник света  $i$ , который испускает свет равномерно во все направления трехмерного пространства и световой конус с углом  $\alpha$  в его вершине, совпадающий с источником света  $i$ .

Рассмотренный световой конус принято характеризовать величиной телесного угла  $\Delta\Omega$ :

$$\Omega = \frac{\Delta S_c}{R^2},$$

который измеряется в стерadianах (ср). Телесному углу в 1 ср соответствует условие  $\Delta S_c = R^2$ . «Полному» телесному углу, при котором точечный источник  $i$  излучает свет в сферу радиуса  $R$ , соответствует величина  $\Delta S_n = 4\pi R^2$  и телесный угол  $\Omega = 4\pi$ .

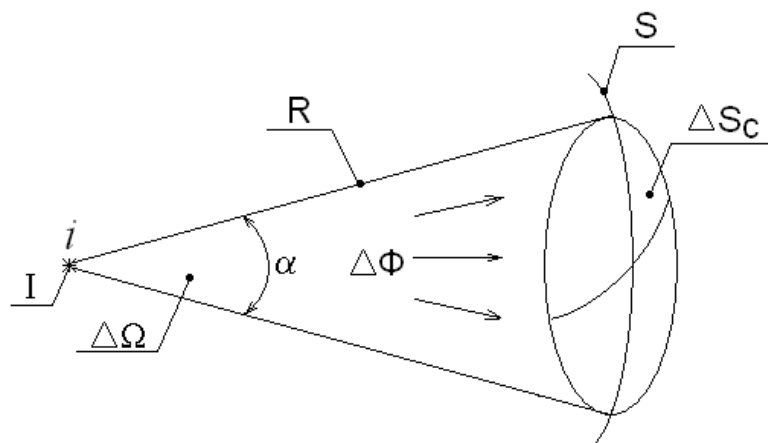


Рис. 5. Определение телесного угла

Если монохроматическое излучение с длиной волны  $\lambda = 555$  нм переносит через площадку  $\Delta S$  за 1 с энергию 0,0016 Дж, то в данном случае внутри телесного угла  $\Delta\Omega$  распространяется световой поток  $\Delta\Phi = 1$  лм (люмен).

Указанное соотношение является международным стандартом для 1 лм при  $\lambda = 555$  нм:

$$0,0016 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 0,0016 \text{ Вт} \sim 1 \text{ лм}. \quad (1)$$

Пропорциональность (1) является связующим звеном между фотометрическими и энергетическими характеристиками оптического излучения.

Величину  $A_3 = 0,0016$  Вт/лм принято называть механическим эквивалентом света. При  $\Delta\Phi = 1$  лм величина  $A_3 = 0,0016$  Вт для  $\lambda = 555$  нм.

Относительная функция видности позволяет рассчитать необходимую мощность излучения  $P_\lambda$ , соответствующую световому потоку в 1 лм, для любой длины волны из диапазона  $\lambda = 380 \dots 780$  нм по формуле

$$P_\lambda = \frac{A_3}{V(\lambda)}.$$

*Пример.* Световому потоку в 1 лм при длине волны  $\lambda = 490$  нм соответствует значение  $V(\lambda) = 0,208$ . Для обеспечения такого светового потока необходима мощность  $P_{490 \text{ нм}} = 7,6 \cdot 10^{-3}$  Вт.

Если внутри телесного угла  $\Delta\Omega$  распространяется световой поток  $\Delta\Phi$ , то величина  $I_v$  носит название силы света источника:

$$I_v = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}.$$

Сила света – это величина, численно равная световому потоку, распространяющемуся в телесном угле 1 ср. Единицей силы света является 1 кд (кандела). Сила света  $I_v$  является в настоящее время основным фотометрическим параметром системы СИ. Согласно международному стандарту, 1 кд равна силе света в заданном направлении, излучаемого монохроматическим источником с частотой  $5,4 \cdot 10^{14}$  Гц, энергетическая сила света которого в указанном направлении составляет 1/683 Вт/ср.

### 2.3. Освещенность поверхности

Освещенностью поверхности называют отношение светового потока  $\Delta\Phi$ , падающего на поверхность площади  $\Delta S$  (рис. 6):

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}.$$

*Пример.* Если  $\Delta\Phi = 1$  лм и  $\Delta S = 1$  м<sup>2</sup>, то  $E = 1$  лк.

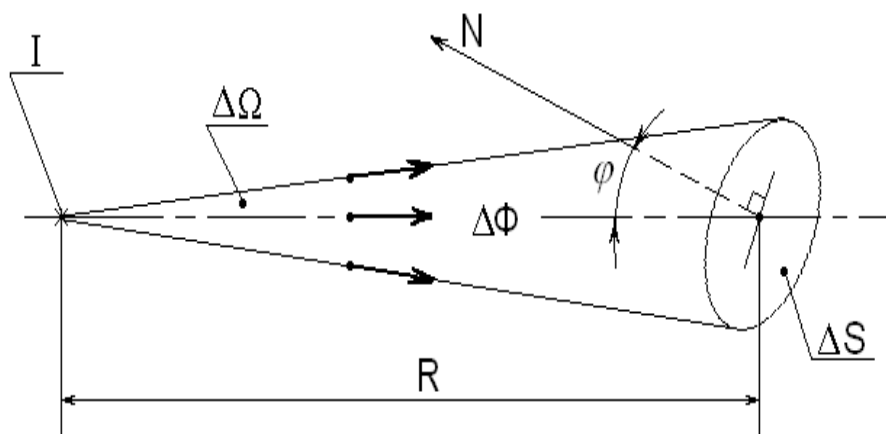


Рис. 6. Определение освещенности

Закон освещенности устанавливает взаимосвязь освещенности  $E$  поверхности с расстоянием  $R$  и углом падения света  $\varphi$  на поверхность:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \varphi.$$

### 2.4. Светимость

Всякий реальный источник имеет конечные размеры. Светящаяся площадка площадью  $\Delta S$  излучает свет в полусферу (рис. 7), которой соответствует телесный угол  $\Delta\Omega = 2\pi$  (ср). Величина светового потока  $\Delta\Phi_{\text{пс}}$ ,

излучаемого площадью  $\Delta S$  в полусфере, называется светимостью излучающей площади:

$$M = \frac{\Delta\Phi_{\text{пс}}}{\Delta S}.$$

Светимость  $M$  численно равна световому потоку, излучаемому с единицы площади светящейся поверхности в телесный угол  $2\pi$  (ср).

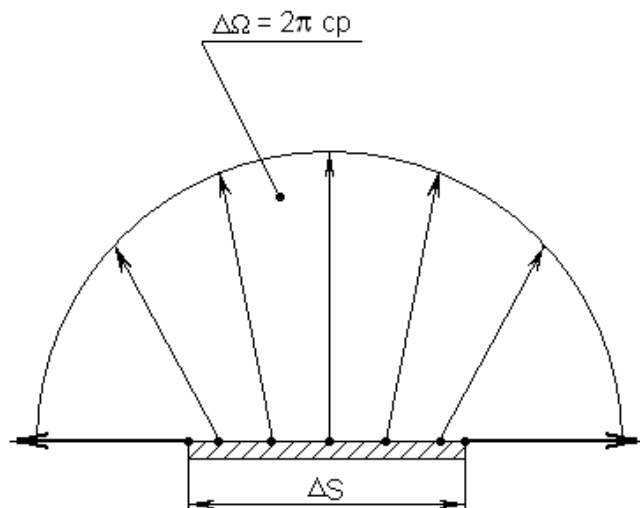


Рис. 7. Определение светимости

## 2.5. Яркость

Светящаяся поверхность площади  $\Delta S$  излучает световой поток  $\Delta\Phi$  в телесный угол  $\Delta\Omega$ , ось симметрии которого составляет угол  $\theta$  с нормалью  $N$  к излучающей поверхности (рис. 8).

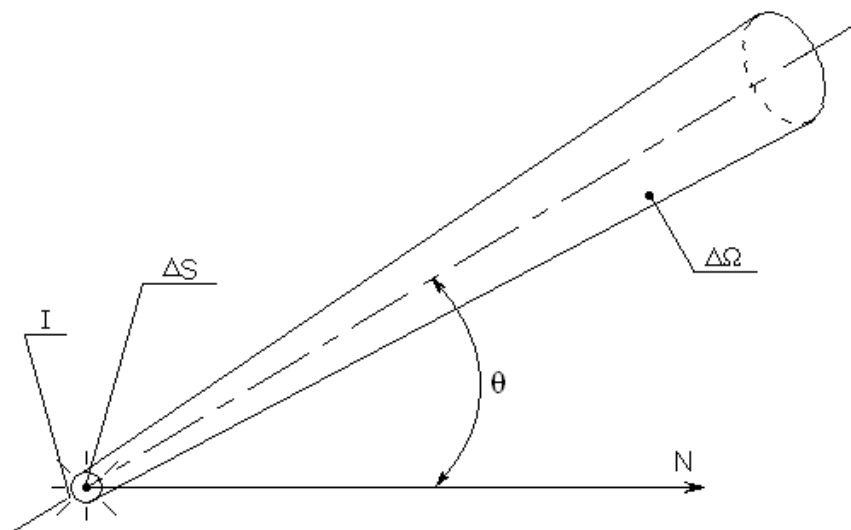


Рис. 8. Определение яркости

Яркость светящейся поверхности определяется выражением

$$L = \frac{I}{\Delta S \cdot \cos \theta}.$$

В 1760 г. немецким ученым Ламбертом было показано, что, если площадь  $\Delta S$  не только излучает свет, но еще идеально равномерно рассеивает его по всем направлениям, яркость излучения  $L$  не зависит от угла  $\theta$ . Согласно закону Ламберта  $L_V = \text{const}$ .

Для ламбертовского источника взаимосвязь между светимостью излучающей поверхности  $M$  и ее яркостью  $L$  имеет вид

$$M = L\pi.$$

## 2.6. Световая экспозиция

Световой экспозицией  $H$  называется произведение освещенности поверхности  $E$  на время  $t$ , в течение которого производится облучение поверхности (лк·с):

$$H = Et.$$

Основные фотометрические характеристики сведены в табл. 3.

Таблица 3

Наименование фотометрических величин	Выражение	Размерность
Сила света	$I$	Кандела (кд)
Световой поток	$\Delta\Phi = I \cdot \Delta\Omega$	Люмен (лм)
Освещенность поверхности	$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$	Люкс (лк)
Светимость излучающей поверхности	$M = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$	Люмен на квадратный метр (лм/м <sup>2</sup> )
Яркость светящейся поверхности	$L = \frac{I}{\Delta S \cdot \cos \theta}$	Кандела на квадратный метр (кд/м <sup>2</sup> )

## 2.7. Энергетическая экспозиция

Величина, равная отношению энергии излучения  $\Delta E$ , падающего на поверхность, к площади этой поверхности  $\Delta S$ , называется энергетической экспозицией:

$$H_e = \frac{\Delta E}{\Delta S}.$$

## 2.8. Поток излучения

Величина, равная отношению энергии излучения  $\Delta E$ , переносимой излучением, к времени переноса этого излучения  $\Delta t$ , называется потоком излучения:

$$\Phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t}.$$

## 2.9. Энергетическая светимость (интегральная излучательная способность)

Интегральная излучательная способность равна отношению потока излучения  $\Phi_e$  к площади  $\Delta S_{\text{и}}$ , с которой этот поток испускается:

$$M_e = \frac{\Phi_e}{\Delta S_{\text{и}}}.$$

## 2.10. Облученность поверхности

Величина, равная отношению потока излучения  $\Phi_e$  к площади  $\Delta S_{\text{п}}$ , на которую этот поток падает:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{\Delta S_{\text{п}}}.$$

### 3. ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ГЛАЗА

#### 3.1. Оптическая система глаза

На рис. 9 показаны основные детали глаза.

Глаз представляет собой шаровидное тело, почти полностью покрытое непрозрачной твердой оболочкой (склерой). В передней части глаза оболочка переходит в выпуклую и прозрачную роговицу. Склера и роговица обуславливают форму глаза, защищают его и служат местом крепления глазодвигательных мышц. Диаметр всего глазного яблока около 22–24 мм, масса 7–8 г.

Тонкая радужная оболочка является диафрагмой, ограничивающей проходящий пучок лучей. Через отверстие в радужной оболочке (зрачок) свет проникает в глаз. В зависимости от величины падающего светового потока диаметр входного зрачка может изменяться от 1 до 8 мм.

Хрусталик представляет собой двояковыпуклую эластичную линзу, которая крепится на мышцах ресничного тела, обеспечивающего изменение формы хрусталика. Хрусталик разделяет внутреннюю поверхность глаза на две камеры: переднюю камеру, заполненную водянистой влагой, и заднюю камеру, заполненную стекловидным телом.

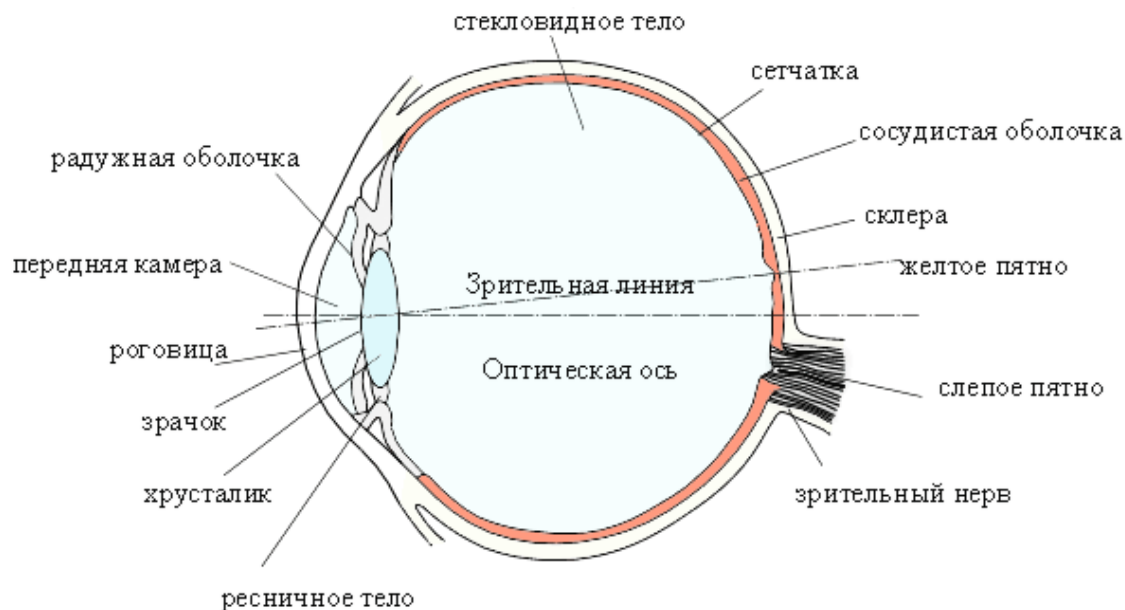


Рис. 9. Структура глаза

Внутренняя поверхность задней камеры покрыта сетчаткой, представляющей собой светочувствительный слой. Получаемое светочувствительными элементами сетчатки раздражение передается волокнам зрительного нерва и по ним достигает зрительных центров мозга.

Место входа зрительного нерва представляет собой слепое пятно. Немного выше расположено желтое пятно – участок наиболее ясного видения. Линия, проходящая через центр желтого пятна и центр хрусталика, называется зрительной осью. Она отклонена от оптической оси глаза на угол около  $5^\circ$ .

Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза – сетчатой оболочке, образуя на ней обратное и уменьшенное изображение (мозг «переворачивает» обратное изображение, и оно воспринимается как прямое). Оптическую систему глаза составляют роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело (рис. 10). Особенностью этой системы является то, что последняя среда, проходимая светом непосредственно перед образованием изображения на сетчатке, обладает показателем преломления, отличным от единицы. Вследствие этого фокусные расстояния оптической системы глаза во внешнем пространстве (переднее фокусное расстояние) и внутри глаза (заднее фокусное расстояние) неодинаковы.

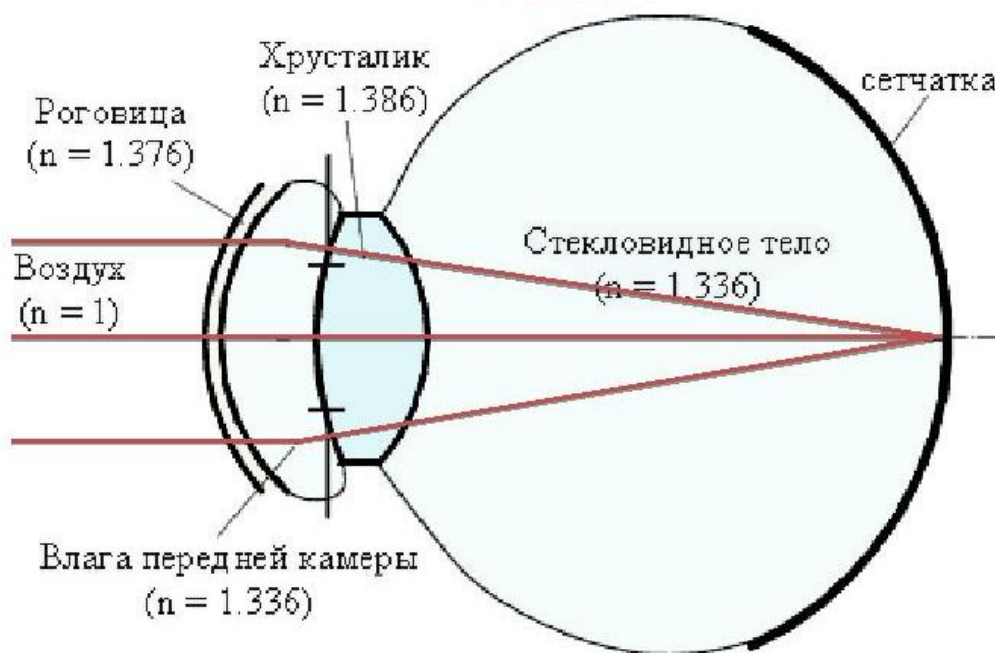


Рис. 10. Оптическая структура глаза

Преломление света в глазном яблоке происходит главным образом на его внешней поверхности – роговице, а также на поверхностях хрусталика.

Оптическая система глаза чрезвычайно сложна, поэтому при расчетах хода лучей обычно пользуются упрощенными, эквивалентными истинному глазу «схематическими глазами».



В табл. 4 приведены данные для аккомодированного и не аккомодированного глаза.

Таблица 4

Поверхность	Глаз в состоянии покоя – неаккомодированный			Глаз в состоянии наибольшей аккомодации		
	Радиус кривизны, мм	Расстояние от вершины роговицы, мм	Показатель преломления (рис. 9)	Радиус кривизны, мм	Расстояние от вершины роговицы, мм	Показатель преломления (рис. 9)
Передняя поверхность роговицы	7,7	0	1,376	7,7	0	1,376
Задняя поверхность роговицы	6,8	0,5	1,336	6,8	0,5	1,336
Передняя поверхность хрусталика	10,0	3,6	1,386	5,33	3,2	1,386
Задняя поверхность хрусталика	-6,0	7,2	1,336	-5,33	7,2	1,336
	Ф = 58 дптр			Ф = 70 дптр		

Оптическая сила (в диоптриях) глаза вычисляется как обратное фокусное расстояние (в метрах).

Оба глаза человека работают как согласованная система, формируя единый зрительный образ видимого предмета. Способность создавать такой образ из изображений, формирующихся в двух глазах, называется бинокулярным зрением.

### 3.2. Понятие аккомодации

Аккомодация – это способность глаза приспособливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза.

Аккомодация происходит путем изменения кривизны поверхностей хрусталика при помощи натяжения или расслабления ресничного тела. Когда ресничное тело натянуто, хрусталик растягивается и его радиусы кривизны увеличиваются. При уменьшении натяжения мышцы хрусталик под действием упругих сил увеличивает свою кривизну.

В свободном, ненапряженном состоянии нормального глаза на сетчатке получают ясные изображения бесконечно удаленных предметов, а при наибольшей аккомодации видны самые близкие предметы.

Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют дальней точкой глаза. При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке при наибольшем возможном напряжении глаза, называют ближней точкой глаза (рис. 11).

Разность обратных величин расстояний между ближней и дальней точками называют диапазоном аккомодации глаза (измеряется в дптр). Расстояние наилучшего зрения – это расстояние, на котором нормальный глаз испытывает наименьшее напряжение при рассматривании деталей предмета.

В среднем расстояние наилучшего зрения составляет около 25–30 см, хотя для каждого человека оно может быть индивидуальным. Самый широкий диапазон возможен до 14 дптр.

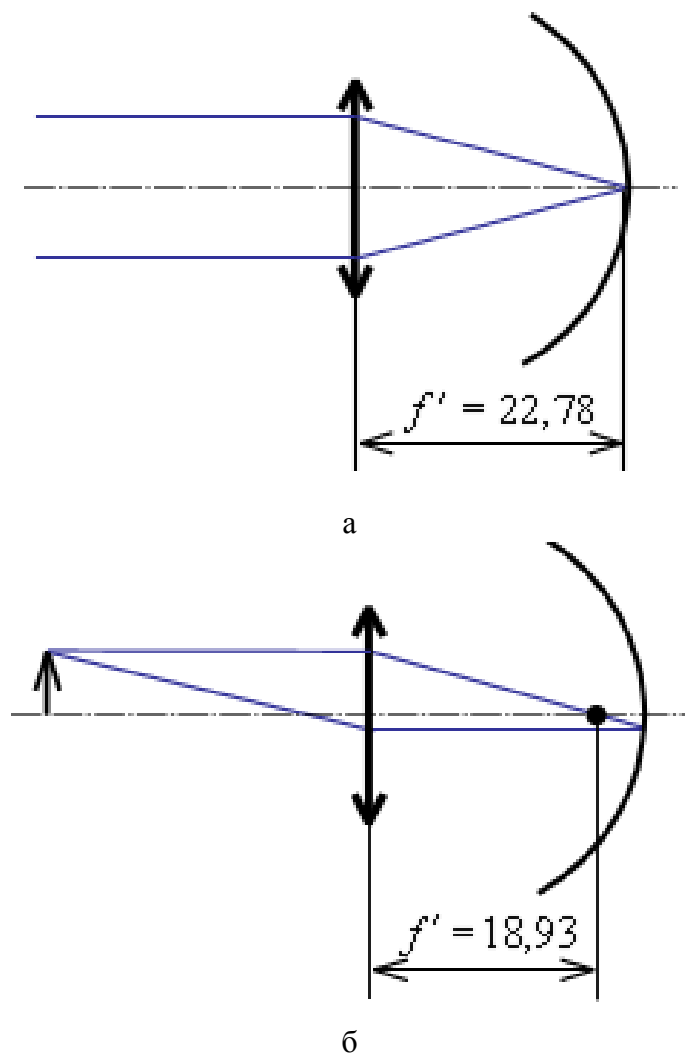


Рис. 11. Изображение дальней (а) и ближней (б) точек глаза

### 3.3. Аберрации оптической системы глаза

Как и другим оптическим системам, глазу свойственны различные аберрации (от лат. aberratio – отклонение) – дефекты оптической системы глаза, приводящие к снижению качества изображения объекта на сетчатке.

Вследствие сферической аберрации лучи, исходящие из точечного источника света, собираются не в точке, а в некоторой зоне на оптической оси глаза. В результате этого на сетчатке образуется круг светорассеяния. Глубина этой зоны для «нормального» человеческого глаза колеблется от 0,5 до 1,0 дптр.

В результате хроматической аберрации лучи коротковолновой части спектра (сине-зеленые) пересекаются в глазу на меньшем расстоянии от роговицы, чем лучи длинноволновой части спектра (красные). Интервал между фокусами этих лучей в глазу может достигать 1,0 дптр.

Практически во всех глазах имеется еще одна аберрация – астигматизм, обусловленная отсутствием идеальной сферичности преломляющих поверхностей роговицы и хрусталика. Небольшой астигматизм встречается довольно часто и не приводит к снижению зрения, однако значительная его степень может вызвать существенное снижение зрения за счет возникающих при этом искажений. Астигматизм исправляют с помощью корректирующей цилиндрической линзы.

## 4. КВАНТОВАЯ И ВОЛНОВАЯ ТЕОРИИ СВЕТА

### 4.1. История квантовой теории света

Вплоть до конца XIX столетия наблюдения, касающиеся различных явлений, относящихся к электромагнитному излучению, вызывали вопросы, ответить на которые классическая физика была не в состоянии. Немецкий физик Макс Планк предположил, что электромагнитное излучение, включая свет, распространяется не в виде постоянных волн, но как отдельные импульсы энергии, названные квантами. Планк связал энергию каждого кванта с частотой волновых колебаний.

Одним из наиболее интересных феноменов был фотоэлектрический эффект, когда при воздействии на определенные металлы светом или некоторыми другими видами электромагнитного излучения возникает электронная эмиссия. В 1905 г. Альберт Эйнштейн высказал предположение, что данный эффект может получить объяснение, только если квантовая теория света, сформулированная Планком, верна. В случае фотоэлектрического эффекта свет ведет себя не как явление волновой природы, но как поток частиц, в настоящее время называемых фотонами. Два десятилетия позднее французский физик Луи де Бройль выдвинул идею, что электроны обнаруживают то же двойственное поведение «волны-частицы».

Идея Планка натолкнула в 1913 г. датского физика Нильса Бора на мысль о том, что внутри атомного ядра электроны способны двигаться только по строго определенным орбитам – каждый на своем энергетическом уровне. Как только электрон переходит с более высокого на более низкий энергетический уровень, происходит высвобождение излучения в виде квантов.

В 1927 г. немецкий физик Вернер Гейзенберг открыл принцип неопределенности. Ньютоновская механика утверждала, что положение тела в пространстве и количество движения (скорость) этого тела могут быть измерены с абсолютной точностью в один и тот же момент времени. Согласно принципу неопределенности, на уровне атомной и субатомной шкал измерений подобная точность нереализуема.

В поддержку квантовой теории свидетельствуют бесчисленные случаи практического приложения ее законов, открытие природы полупроводников, составивших базис современной компьютерной технологии.

### 4.2. Свойства фотонов. Масса и импульс фотона. Давление света

При объяснении квантовых оптических явлений чаще всего используют только одну характеристику фотона – его энергию  $E = h\nu$ . Помимо энергии фотон обладает также массой и импульсом (количеством движения).

Формула для массы фотона может быть непосредственно выведена из формулы Эйнштейна, выражающей взаимосвязь массы и энергии в теории относительности:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (2)$$

Фотон – элементарная частица, которая движется со скоростью света  $c$  и имеет массу покоя, равную нулю. Следовательно, масса фотона отличается от массы таких элементарных частиц, как электрон, протон и нейтрон, которые обладают отличной от нуля массой покоя и могут находиться в состоянии покоя.

Импульс фотона  $p_\gamma$  получен из связи импульса с энергией:

$$p_\gamma = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (3)$$

Значит, фотон, как и любая другая частица, характеризуется энергией, массой и импульсом. Выражения (2) и (3) связывают корпускулярные характеристики фотона (массу, импульс и энергию) с волновой характеристикой света (частотой).

Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. Согласно квантовой теории, давление света на поверхность обусловлено тем, что каждый фотон при соударении с поверхностью передает ей свой импульс.

С точки зрения квантовой теории можно рассчитать световое давление, оказываемое на поверхность тела потоком монохроматического излучения (с частотой  $\nu$ ), падающего перпендикулярно поверхности. Если в единицу времени на единицу площади поверхности тела падает  $N$  фотонов, то при коэффициенте отражения  $\rho$  света от поверхности тела  $\rho N$  фотонов отразится, а  $(1 - \rho) N$  – поглотится. Каждый поглощенный фотон передает поверхности импульс (3), а каждый отраженный –  $2p_\gamma$ . Давление света на поверхность равно импульсу, который передает поверхности в одну секунду  $N$  фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1 - \rho) N = (1 + \rho) \frac{h\nu}{c} N.$$

Энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т. е. энергетическая освещенность поверхности может быть выражена формулой:  $Nh\nu = E_e$ .

Объемная плотность потока излучения определяется выражением

$$w = \frac{E_e}{c}.$$

Следовательно, давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность, можно определить как

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho). \quad (4)$$

Формула (4), выведенная на основе квантовых представлений, совпадает с выражением, получаемым из электромагнитной (волновой) теории Максвелла. Таким образом, давление света одинаково успешно объясняется и волновой и квантовой теориями.

Доказательство существования светового давления на твердые тела и газы было дано в опытах П. Н. Лебедева, сыгравших в свое время большую роль в утверждении теории Максвелла.

В эксперименте использован легкий подвес на тонкой нити, по краям которого прикреплены легкие крылышки, одни из которых зачернены, а поверхности других зеркальные (рис. 12). Использовалась подвижная система зеркал, позволяющая направлять свет на обе поверхности крылышек, подвес помещался в откачанный баллон, для равенства температур крылышки подбирались очень тонкими. Световое давление на крылышки определялось по углу закручивания нити подвеса и совпадало с теоретическим. Давление света на зеркальную поверхность вдвое больше, чем на зачерненную.

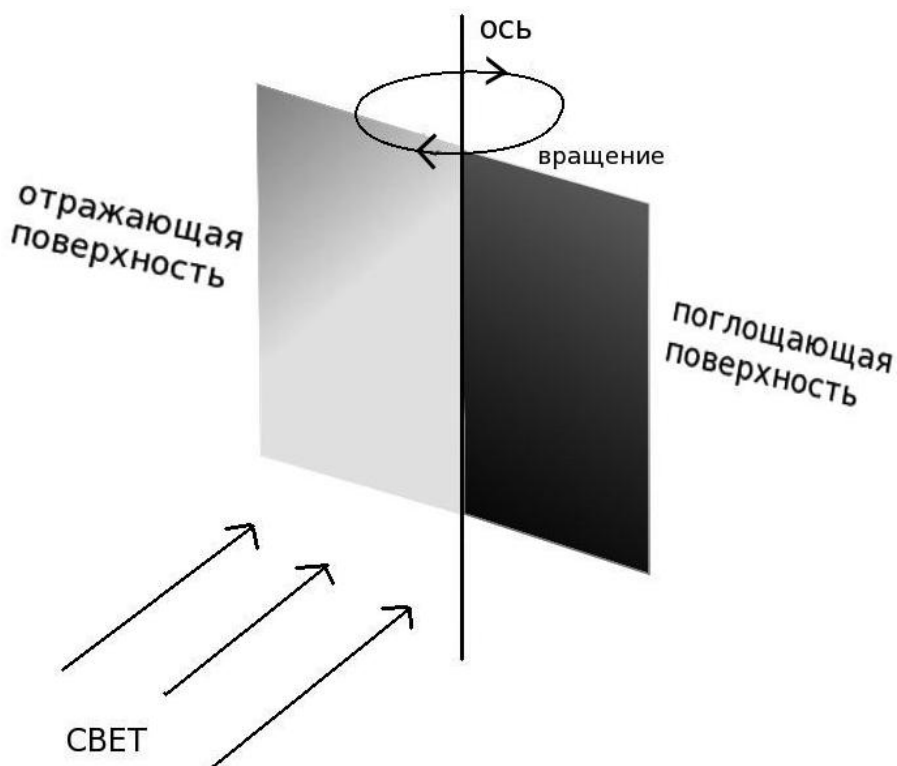


Рис. 12. Схема опыта П. Н. Лебедева

### 4.3. Виды фотоэлектрического эффекта. Законы внешнего фотоэффекта

Гипотеза Планка получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта – явления, открытие и исследование которого сыграло важную роль в становлении квантовой теории. Различают фотоэффекты:

- внешний;
- внутренний;
- вентильный.

Внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению ЭДС.

Вентильный фотоэффект, являющийся разновидностью внутреннего фотоэффекта, – возникновение ЭДС (фото ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект, например, открывает пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

В 1900 г. Планк показал, что способность нагретого тела к лучеиспусканию можно правильно количественно описать, предположив, что лучистая энергия испускается и поглощается телами не непрерывно, а дискретно, т. е. отдельными порциями – квантами.

При этом энергия  $E$  каждой такой порции связана с частотой излучения  $\nu$  соотношением, получившим название уравнения Планка:

$$E = h\nu.$$

Здесь коэффициент пропорциональности  $h$  – постоянная Планка, универсальная константа, равная  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Сам Планк долгое время полагал, что испускание и поглощение света квантами есть свойство излучающих тел, а не самого излучения, которое способно иметь любую энергию и поэтому могло бы поглощаться непрерывно. Однако в 1905 г. А. Эйнштейн пришел к выводу, что электромаг-

нитная (лучистая) энергия существует только в форме квантов, и, следовательно, излучение представляет собой поток неделимых материальных «частиц» (фотонов), энергия которых определяется уравнением Планка.

Явление фотоэффекта было подробно изучено в 1888–1890 гг. А. Г. Столетовым. Схема установки для измерения фотоэффекта изображена на рис. 13.

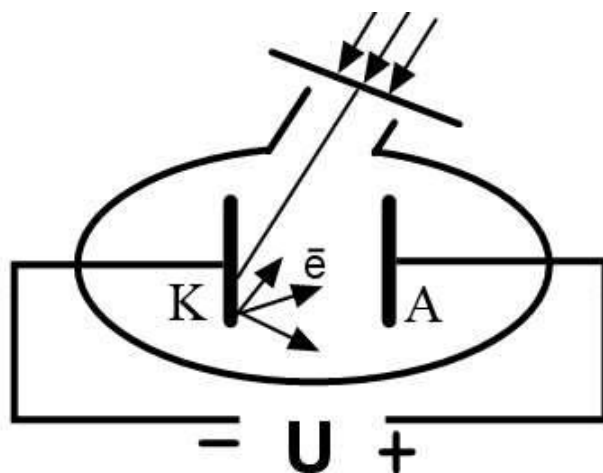


Рис. 13. Установка для демонстрации явления фотоэффекта

Если поместить установку в вакуум и подать на пластинку  $K$  отрицательный потенциал, то тока в цепи наблюдаться не будет, поскольку в пространстве между пластинкой и сеткой нет заряженных частиц, способных переносить электрический ток. Но при освещении пластинки источником света гальванометр обнаруживает возникновение тока (называемого фотоком), носителями которого служат электроны, вырываемые светом из металла (рис. 14).

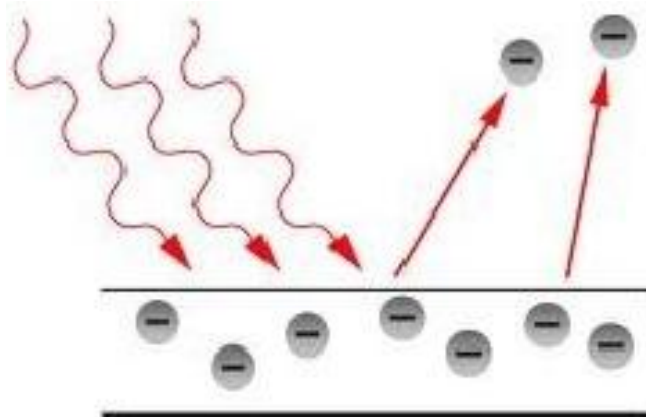


Рис. 14. Явление фотоэффекта



Оказалось, что при изменении интенсивности освещения изменяется только число испускаемых металлом электронов, т. е. сила фототока. Но максимальная кинетическая энергия каждого вылетевшего из металла электрона не зависит от интенсивности освещения, а изменяется только при изменении частоты падающего на металл света. Именно с увеличением длины волны (т. е. с уменьшением частоты) энергия испускаемых металлом электронов уменьшается, а затем при определенной для каждого металла длине волны фотоэффект исчезает и не проявляется даже при очень высокой интенсивности освещения.

Облучая катод светом различных длин волн, Столетов установил следующие закономерности:

- наиболее эффективное действие оказывает ультрафиолетовое излучение;
- под действием света вещество теряет только отрицательные заряды;
- сила тока, возникающего под действием света, прямо пропорциональна его интенсивности.

Эти свойства фотоэлектрического эффекта совершенно необъяснимы с позиций классической волновой теории света, согласно которой эффект должен определяться только количеством энергии, поглощаемой поверхностью в единицу времени, но не должен зависеть от типа падающего излучения. Эти свойства можно объяснить, если считать, что излучение состоит из отдельных порций, фотонов, обладающих определенной энергией.

Электрон в металле связан с атомами металла, так что для его вырывания необходима затрата определенной энергии. Если фотон обладает нужным запасом энергии (а энергия фотона определяется частотой излучения), то электрон будет вырван, фотоэффект будет наблюдаться. В процессе взаимодействия с металлом фотон полностью отдает свою энергию электрону, так как не может дробиться на части. Энергия фотона будет израсходована частично на разрыв связи электрона с металлом, частично на сообщение электрону кинетической энергии движения. Поэтому максимальная кинетическая энергия выбитого из металла электрона не может быть больше разности между энергией фотона и энергией связи электрона с атомами металла. Следовательно, при увеличении числа фотонов, падающих на поверхность металла в единицу времени (т. е. при повышении интенсивности освещения), будет увеличиваться только число вырываемых из металла электронов, что приведет к возрастанию фототока, но энергия каждого электрона возрастет не будет. Если же энергия фотона меньше минимальной энергии, необходимой для вырывания электрона, фотоэффект не будет наблюдаться при любом числе падающих на металл фотонов, т. е. при любой интенсивности освещения.

Квантовая теория света смогла объяснить не только свойства фотоэлектрического эффекта, но и закономерности химического действия света, температурную зависимость теплоемкости твердых тел и ряд других явлений. Она оказалась чрезвычайно полезной и в развитии представлений о строении атомов и молекул.

Из квантовой теории света следует, что фотон не способен дробиться:

- он взаимодействует как целое с электроном металла, выбивая его из пластинки;

- как целое он взаимодействует и со светочувствительным веществом фотографической пленки, вызывая ее потемнение в определенной точке.

В этом смысле фотон ведет себя подобно частице, т. е. проявляет корпускулярные свойства. Однако фотон обладает и волновыми свойствами; это проявляется в волновом характере распространения света, в способности фотона к интерференции и дифракции. Фотон отличается от частицы тем, что его точное положение в пространстве, как и точное положение любой волны, не может быть указано. Но он отличается и от «классической» волны – неспособностью делиться на части. Объединяя в себе корпускулярные и волновые свойства, фотон не является ни частицей, ни волной – ему присуща корпускулярно-волновая двойственность.

В 1926 г. российские физики П. И. Лукирский и С. С. Прилежаев для исследования фотоэффекта применили метод вакуумного сферического конденсатора. Анодом служили посеребренные стенки стеклянного сферического баллона, а катодом – шарик ( $R \approx 1,5$  см) из исследуемого металла, помещенного в центр сферы. Такая форма электродов позволяла увеличить наклон ВАХ и тем самым более точно определить задерживающее напряжение (и постоянную Планка). Значение постоянной Планка  $h$ , полученное

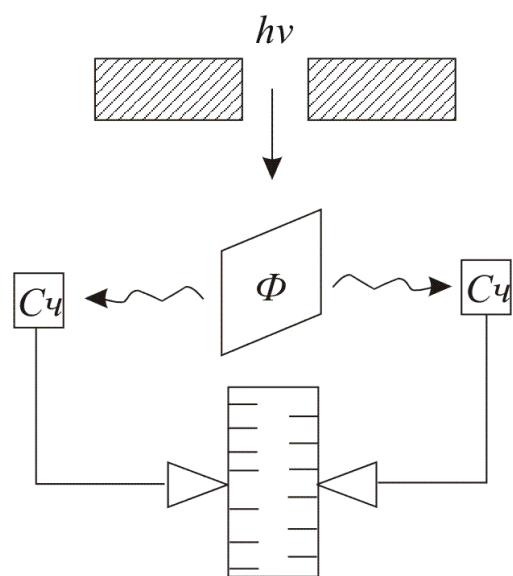


Рис. 15. Опыт Боте

из этих опытов, согласуется со значениями, найденными другими методами (по излучению черного тела и по коротковолновой границе сплошного рентгеновского спектра). Все это является доказательством правильности уравнения Эйнштейна, а вместе с тем и его квантовой теории фотоэффекта, где квант световой энергии – это фотон.

Подтверждение гипотезы Эйнштейна дал опыт Боте, в котором использовался метод совпадения (рис. 15).

Тонкая металлическая фольга  $\Phi$  помещалась между двумя газоразрядными счетчиками  $Cч$ . Фольга освещалась слабым

пучком рентгеновских лучей, под действием которых она сама становилась источником рентгеновских лучей (явление рентгеновской флуоресценции). Вследствие малой интенсивности первичного пучка количество квантов, испускаемых фольгой, невелико. При попадании квантов на счетчик механизм срабатывал, и на движущейся бумажной ленте делалась отметка. Если бы излучаемая энергия распространялась равномерно во все стороны, как это следует из волновых представлений, оба счетчика должны были бы срабатывать одновременно и отметки на ленте приходились бы одна против другой. В действительности же наблюдалось совершенно беспорядочное расположение отметок. Это можно объяснить лишь тем, что в отдельных актах испускания возникают световые частицы, летящие то в одном, то в другом направлении. Так было экспериментально доказано существование особых световых частиц – фотонов.

#### 4.4. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта.

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (1-й закон фотоэффекта). Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода  $A$  из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии  $mv_{\max}^2/2$ . По закону сохранения энергии

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (5)$$

Уравнение (5) называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Именно за эту теорию А. Эйнштейну в 1927 г. была присуждена Нобелевская премия.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (числа фотонов), так как  $A$  и  $\nu$  от интенсивности света не зависят (2-й закон фотоэффекта<sup>3</sup>). С уменьшением частоты света ки-

---

<sup>3</sup> Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .

нетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла  $A = \text{const}$ ), поэтому при некоторой достаточно малой частоте  $\nu = \nu_0$  кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю, и фотоэффект прекратится (3-й закон фотоэффекта<sup>4</sup>), т. е. существует красная граница фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A}{h},$$

которая зависит лишь от работы выхода электрона, т. е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

При значительной интенсивности света (опыты с фокусируемыми лазерными пучками) плотность фотонов очень большая и возможен многофотонный (нелинейный) фотоэффект, при котором испускаемый электрон может одновременно получить энергию не от одного, а от  $N$  фотонов ( $N = 2 \dots 7$ ). Запишем уравнение Эйнштейна для многофотонного фотоэффекта:

$$Nh\nu = A + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

При этом электрон может приобрести энергию, необходимую для выхода из вещества, даже под действием света с частотой, меньшей красной границы – порога однофотонного фотоэффекта. В результате красная граница смещается в сторону более длинных волн.

Если свет представляет собой поток фотонов, то каждый фотон, попадая в регистрирующий прибор (глаз, фотоэлемент), должен вызывать действие независимо от других фотонов. При регистрации слабых световых потоков наблюдаются флуктуации их интенсивности. Глаз, адаптированный к темноте, обладает довольно резким порогом зрительного ощущения, т. е. воспринимает свет, интенсивность которого не меньше некоторого порога. Для света с  $\lambda = 525$  нм порог зрительного ощущения соответствует 100–400 фотонам, падающим на сетчатку за одну секунду. С. И. Вавилов («Визуальные измерения квантовых флуктуаций») наблюдал периодически повторяющиеся вспышки света одинаковой длительности. С уменьшением светового потока некоторые вспышки не воспринимались глазом, чем слабее был световой поток, тем больше было пропусков вспышек. Это объясняется флуктуациями интенсивности света, т. е. число фотонов оказывалось по случайным причинам меньше порогового значения. Таким образом, опыт Вавилова явился наглядным подтверждением квантовых свойств света.

---

<sup>4</sup> Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота  $\nu_0$  света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

На явлении фотоэффекта основано действие фотоэлектронных приборов, получивших разнообразное применение в различных областях науки и техники. В настоящее время практически невозможно указать отрасли производства, где бы не использовались фотоэлементы – приемники излучения, работающие на основе фотоэффекта и преобразующие энергию излучения в электрическую.

Простейшим фотоэлементом с внешним фотоэффектом является вакуумный фотоэлемент. Он представляет собой откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого (за исключением окошка для доступа излучения) покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещаемая в центре баллона. Фотоэлемент включается в цепь батареи, ЭДС которой выбирается такой, чтобы обеспечить фототок насыщения. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьмяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны, и для них характерна строгая пропорциональность фототока интенсивности излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических приборов (например, фотоэкспонометр, люксметр – измеритель освещенности и т. д.).

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, называемые полупроводниковыми фотоэлементами или фотосопротивлениями (фоторезисторами), обладают гораздо большей интегральной чувствительностью, чем вакуумные. Для их изготовления используются PbS, CdS, PbSe и некоторые другие полупроводники. Если фотокатоды вакуумных фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей имеют красную границу фотоэффекта не выше 1,1 мкм, то применение фотосопротивлений позволяет производить измерения в далекой инфракрасной области спектра (3–4 мкм), а также в областях рентгеновского и гамма-излучений. Кроме того, они малогабаритны и имеют низкое напряжение питания. Недостаток фотосопротивлений – их заметная инерционность, поэтому они непригодны для регистрации быстропеременных световых потоков.

Фотоэлементы с вентильным фотоэффектом, называемые вентильными фотоэлементами (фотоэлементами с запирающим слоем), обладая, подобно элементам с внешним фотоэффектом, строгой пропорциональностью фототока интенсивности излучения, имеют большую по сравнению с ними интегральную чувствительность (примерно 2–30 мА/лм) и не нуждаются во внешнем источнике ЭДС. К числу вентильных фотоэлементов относятся германиевые, кремниевые, селеновые, купроксные, сернисто-серебряные и др.

Кремниевые и другие вентильные фотоэлементы применяются для создания солнечных батарей, непосредственно преобразующих световую энергию в электрическую. Эти батареи уже в течение многих лет работают на космических спутниках. КПД этих батарей составляет ~10 % и, как показывают теоретические расчеты, может быть доведен до ~22 %, что открывает широкие перспективы их использования в качестве источников электроэнергии для бытовых и производственных нужд.

Рассмотренные виды фотоэффекта используются также в производстве для контроля, управления и автоматизации различных процессов, в военной технике для сигнализации и локации невидимым излучением, в технике звукового кино, в различных системах связи и т. д.

#### 4.5. Эффект Комптона и его элементарная теория

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комpton, исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также более длинноволновое излучение.

Схема опыта Комптона показана на рис. 16. Выделяемый диафрагмами  $S$  узкий пучок монохроматического рентгеновского излучения, находящегося в трубке  $Tr$ , направлялся на рассеивающее вещество  $M$ . Спектральный состав рассеянного излучения исследовался с помощью рентгеновского спектрографа  $D$ , состоящего в эксперименте из кристалла и ионизационной камеры.

Опыты показали, что разность  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  не зависит от длины волны  $\lambda_0$  падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния  $\varphi$ :

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

где  $\lambda$  – длина волны рассеянного излучения;  $\lambda_c$  – комптоновская длина волны (при рассеянии фотона на электроне  $\lambda_c = 2,426$  пм).

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и  $\gamma$ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны. Этот эффект не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны при рассеянии изменяться не должна: под действием периодического поля световой волны электрон колеблется с частотой поля и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.

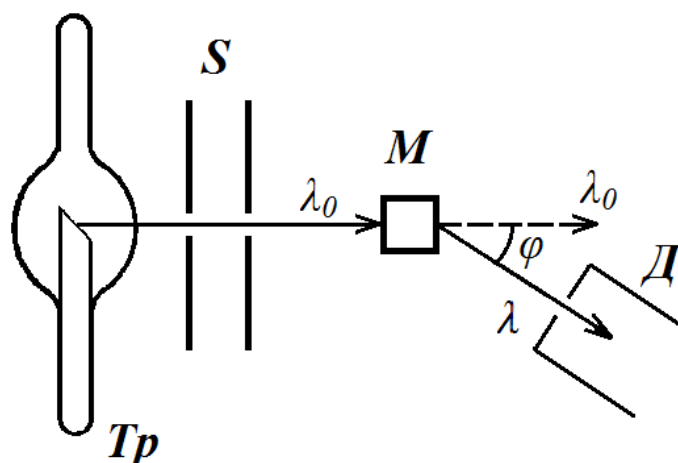


Рис. 16. Схема опыта Комптона

Объяснение эффекта Комптона дано на основе квантовых представлений о природе света. Если считать, что излучение имеет корпускулярную природу, т. е. представляет собой поток фотонов, то эффект Комптона – результат упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества (для легких атомов электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными). В процессе этого столкновения фотон передает электрону часть своей энергии и импульса в соответствии с законами их сохранения.

При упругом столкновении двух частиц – налетающего фотона, обладающего импульсом и энергией, с покоящимся свободным электроном – фотон передает ему часть своей энергии и импульса и изменяет направление движения (рассеивается). Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны рассеянного излучения. При каждом столкновении выполняются законы сохранения энергии и импульса.

Наличие в составе рассеянного излучения несмещенной линии (излучения первоначальной длины волны) не противоречит квантовой теории. При рассмотрении механизма рассеяния предполагалось, что фотон соударяется лишь со свободным электроном. Однако если электрон сильно связан с атомом, как это имеет место для внутренних электронов (особенно в тяжелых атомах), то фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Так как масса атома по сравнению с массой электрона очень велика, то атому передастся лишь ничтожная часть энергии фотона. Поэтому в данном случае длина волны  $\lambda$  рассеянного излучения практически не будет отличаться от длины волны  $\lambda_0$  падающего излучения.

Из приведенных рассуждений следует, что эффект Комптона не может наблюдаться в видимой области спектра, поскольку энергия фотона видимого света сравнима с энергией связи электрона с атомом и внешний электрон нельзя считать свободным.

Можно показать, что при столкновении фотона со свободным электроном не может произойти поглощения фотона, так как это находится в противоречии с законами сохранения импульса и энергии. Поэтому при взаимодействии фотонов со свободными электронами может наблюдаться только их рассеяние, т. е. эффект Комптона.

#### 4.6. Устройства на основе фотоэффекта

Люксметр – это специальный прибор для измерения степени освещенности (рис. 17). Работа устройства основывается на таком явлении, как фотоэлектрический эффект. При воздействии квантов света на полупроводниковый фотоэлемент (пластинка, поверхность которой покрыта веществом, способным преобразовывать световую энергию в электрический ток) происходит передача энергии световых квантов электронам. В результате этого осуществляется высвобождение электронов в полупроводниковом объеме, а затем через фотоэлемент наблюдается прохождение тока. Показатель силы тока пропорционален освещенности фотоэлемента. Освещенность измеряется в люксах.

Как правило, при эксплуатации люксметра в бытовых условиях (измерение освещенности в жилом помещении<sup>5</sup> и т. д.) не возникает нужды в использовании дополнительных устройств. Если необходимо измерить очень высокую освещенность с показателями свыше 100 тыс. лк, то применяют специальную светопоглощающую и светорассеивающую насадку. В таких условиях показания люксметра нужно умножать на поправочный коэффициент.

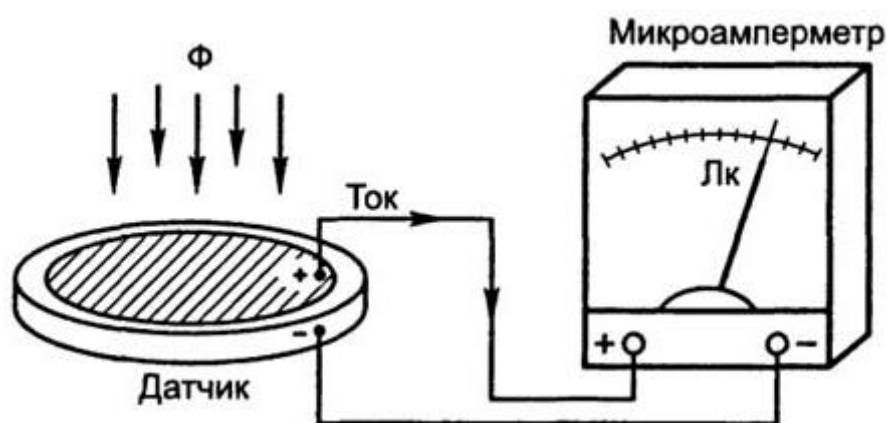


Рис. 17. Люксметр

<sup>5</sup> Наиболее часто люксметр используется с целью измерения степени освещенности в жилом помещении или на рабочем месте. В соответствии с СНиП России норма искусственного освещения для офисных помещений должна быть в пределах 200–300 лк.



Люксометры используются там, где есть острая необходимость в грамотном распределении освещения и формировании комфортных условий для пребывания человека – учебные и медицинские учреждения, музеи, библиотеки и т. д.

Солнечная батарея – несколько объединенных фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов, рис. 18) – полупроводниковых устройств, преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток.

Это устройство состоит из совокупности соединенных определенным способом фотоэлектрических преобразователей, в состав которых входят два слоя полупроводников с различными типами проводимости –  $p$  и  $n$ . В качестве вещества, обладающего такими свойствами, чаще всего используется кремний с определенными примесями. При добавлении к нему фосфора в полученной структуре возникает избыток электронов (отрицательных зарядов) и образуется полупроводник  $n$ -типа, а при подмешивании бора –  $p$ -типа, характеризуемый недостатком электронов или наличием дырок. Если разместить эти слои между двумя электродами, как показано на рис. 19, и обеспечить к верхнему электроду доступ света, получится фотоэлектрический преобразователь.

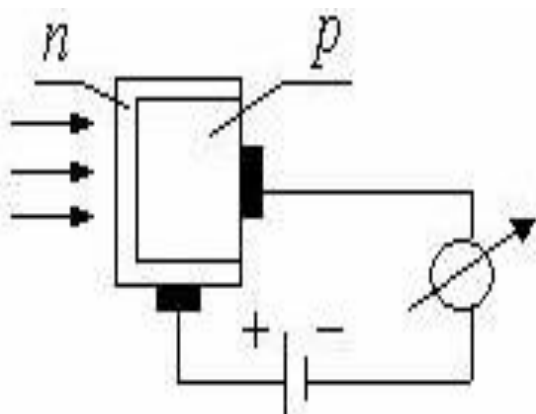


Рис. 18. Принципиальная схема фотоэлемента на основе  $p$ - $n$ -перехода

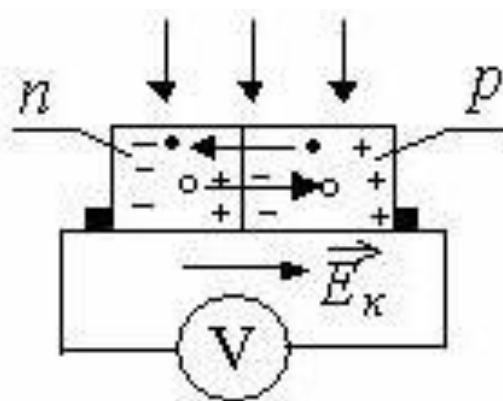


Рис. 19. Схема возникновения фотоЭДС при освещении  $p$ - $n$ -перехода

При освещении элемента им поглощается часть падающей энергии, в результате чего происходит дополнительная генерация дырок и электронов. Электрическим полем, существующим в  $p$ - $n$ -переходе, первые перемещаются в  $p$ -область, а вторые – в  $n$ -область. При этом на одном электроде скапливаются положительные заряды, на другом – отрицательные, т. е. возникает разность потенциалов – постоянное напряжение. Таким образом, фотоэлектрический преобразователь работает как источник электродвижущей силы (ЭДС). Если к ней подсоединить нагрузку, в цепи возникнет ток  $I$ , значение которого будет зависеть от вида фотоэлемента, его размеров, интенсивности солнечного излучения и сопротивления подключенных

потребителей. ЭДС батареи снижается с повышением температуры приблизительно на 0,4 % на 1 °С. Поэтому для эффективной и долговременной работы панель (рис. 21) необходимо охлаждать с помощью вентиляторов или водяных систем.

Важнейшим параметром солнечного источника энергии является мощность  $P = UI$ . Естественно, что ток и напряжение, получаемые в результате работы одного фотоэлемента, невелики, поэтому в батарее они комбинируются определенным образом для увеличения указанных показателей. Если соединить преобразователи последовательно, то общее выходное напряжение будет пропорционально их количеству. Параллельное подключение отдельных элементов приводит к увеличению тока. Сочетая определенным образом оба типа соединений так, как показано на рис. 20, получают требуемые выходные параметры батареи, а следовательно, и ее мощность. Важно, что солнечная батарея преобразует в электричество не только видимую, но и ультрафиолетовую часть солнечного спектра, поэтому стекло, покрывающее батарею, обязательно должно пропускать ультрафиолет.

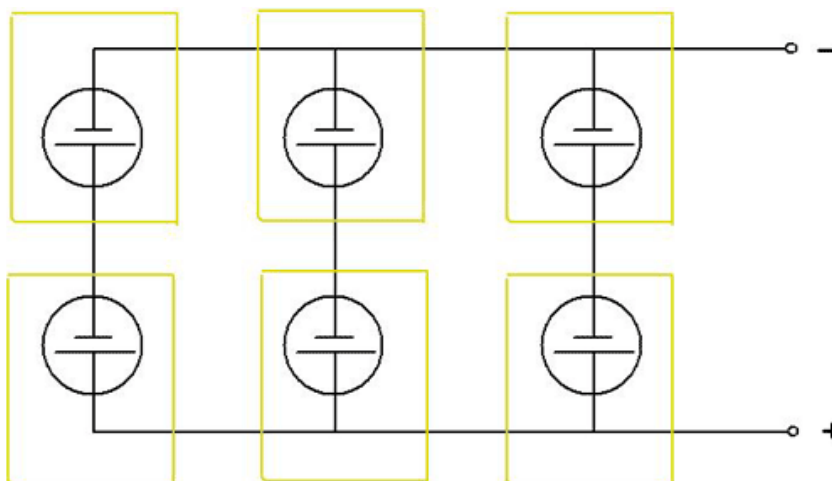


Рис. 20. Соединение фотоэлементов

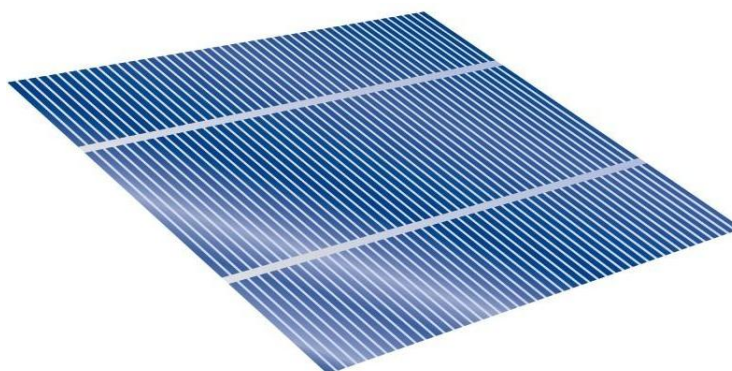


Рис. 21. Внешний вид пластины фотоэлемента

Недостатком данного устройства является тот факт, что при освещении батареи не вся энергия солнечного излучения преобразуется в электричество – часть ее отражается, а также тратится на нагрев элементов.

## 4.7. Волновая теория света

К волновой оптике относят круг явлений, проявляющих волновые свойства электромагнитного излучения: дифракцию, интерференцию, поляризацию.

### *Дифракция*

Если световая волна распространяется в пространстве, в котором имеются резкие неоднородности (например, непрозрачные препятствия, отверстия в непрозрачных экранах и т. п.), то первоначальное направление распространения света и распределение интенсивности светового потока изменяется. В этом случае распространение света не может быть описано с помощью законов геометрической оптики. Явления, связанные с отступлением от законов прямолинейного распространения света (огибание волнами препятствий, проникновение их в область геометрической тени и т. п.), называются дифракцией света. Механизм распространения света и основные закономерности дифракции света установлены с помощью принципа Гюйгенса–Френеля. В соответствии с принципом Гюйгенса–Френеля каждая точка фронта волны (каждая точка поверхности среды, до которой в данный момент времени доходит световая волна) является источником сферических волн (лучи света от этой точки идут во всех направлениях от фронта волны) – рис. 22. Эти сферические волны называют вторичными. Вторичные волны когерентны. Интенсивность света в какой-либо точке пространства, лежащей за волновой поверхностью (точка  $P$  на рис. 22), может быть рассчитана как результат интерференции всех вторичных волн. Расчет дифракционной картины сводится к расчету интерференции вторичных волн.

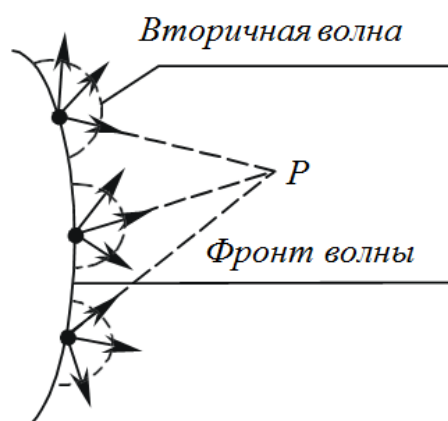


Рис. 22. Образование вторичных волн

Дифракция света наглядно проявляется тогда, когда размеры препятствий или отверстий сравнимы с длиной световой волны.

### *Интерференция*

Явление интерференции света состоит в том, что при наложении световых волн происходит перераспределение энергии волн. В результате этого в одних местах пространства возникают максимумы, в других –

минимумы интенсивности. Два возможных способа наблюдения интерференции света – с помощью зеркал (рис. 23) и бипризмы Френеля (рис. 24).

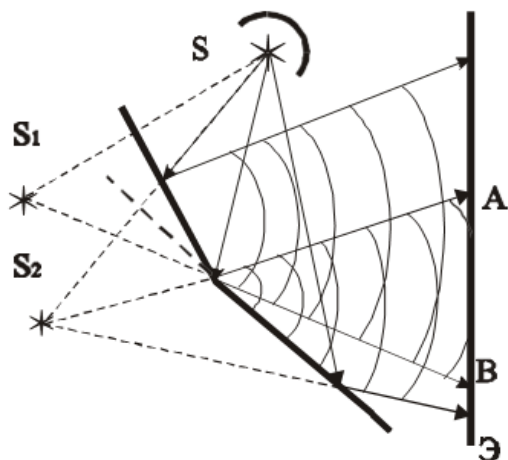


Рис. 23. Схема наблюдения интерференции с помощью зеркал Френеля

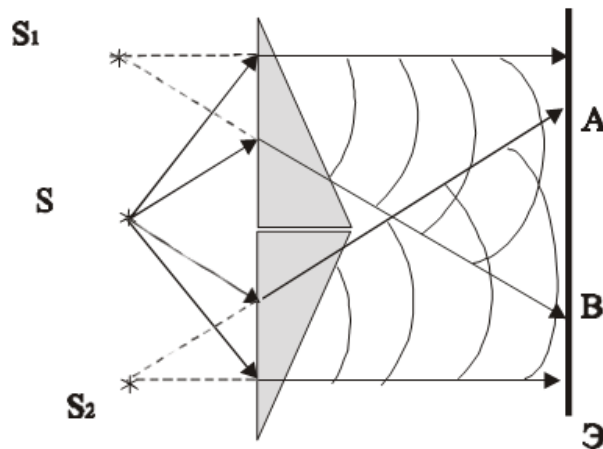


Рис. 24. Схема наблюдения интерференции с помощью бипризмы Френеля

В обеих схемах в области наложения двух волн на экране Э будет наблюдаться интерференционная картина (участок AB) в виде чередующихся светлых и темных полос.

### *Поляризация*

Свет, в котором направления колебаний упорядочены каким-либо образом, называется поляризованным. Если колебания вектора  $E$  происходят только в одной плоскости, то свет называется поляризованным, например – линейно-поляризованным. Возможна частичная поляризация света.

Свет, падающий на границу раздела двух прозрачных сред, испытывает отражение и преломление, причем отраженная и преломленная волны оказываются частично поляризованными. Прибор, с помощью которого из естественного света можно получить плоскополяризованный свет, называют поляризатором.

Из закона Брюстера следует, что для любого прозрачного вещества можно подобрать угол падения, при котором отраженный свет полностью поляризован. В общем случае в отраженный луч переходит малая часть падающей световой энергии. Для усиления эффекта берут ряд параллельных пластин и располагают их стопкой. Лучи, отраженные от поверхностей пластин, поляризованы одинаково. При достаточно большом количестве пластин в совокупность отраженных лучей переходит до половины энергии падающего света (рис. 25).

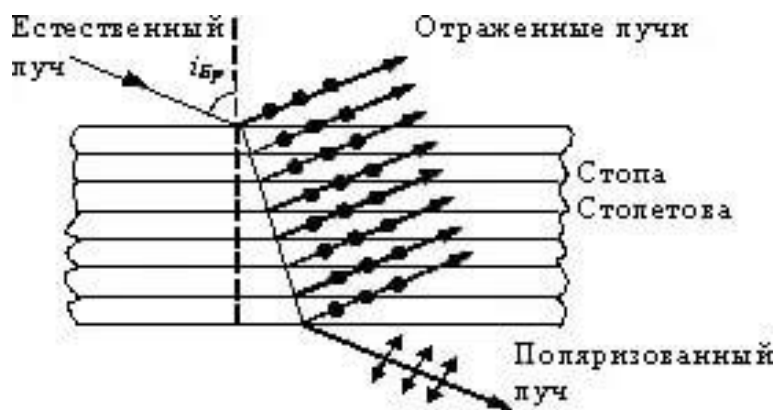


Рис. 25. Стопа Столетова

#### 4.8. Единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения

Явления фотоэффекта и эффекта Комптона служат доказательством квантовых (корпускулярных) представлений о свете как о потоке фотонов. С другой стороны, интерференция, дифракция и поляризация света подтверждают волновую (электромагнитную) природу света. Давление и преломление света объясняются как волновой, так и квантовой теориями. Таким образом, электромагнитное излучение обнаруживает единство свойств – непрерывных (волны) и дискретных (фотоны), которые взаимно дополняют друг друга.

Основные уравнения связывают корпускулярные свойства электромагнитного излучения (энергия и импульс фотона) с волновыми свойствами (частота или длина волны).

Более детальное рассмотрение оптических явлений приводит к выводу, что свойства непрерывности, характерные для электромагнитного поля световой волны, не следует противопоставлять свойствам дискретности, характерным для фотонов. Свет, обладая одновременно корпускулярными и волновыми свойствами, обнаруживает определенные закономерности в их проявлении. Так, волновые свойства света проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные – в процессах взаимодействия света с веществом. Чем больше длина волны, тем меньше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются квантовые свойства света. Чем меньше длина волны, тем больше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются волновые свойства света (например, волновые свойства (дифракция) рентгеновского излучения обнаружены лишь после применения в качестве дифракционной решетки кристаллов), для  $\gamma$ -излучения дифракция не наблюдается.

Взаимосвязь между двойственными корпускулярно-волновыми свойствами света можно объяснить, если использовать статистический подход к рассмотрению закономерностей распространения света. Например, дифракция света на щели состоит в том, что при прохождении света через щель происходит перераспределение фотонов в пространстве. Так как вероятность попадания фотонов в различные точки экрана неодинакова, то и возникает дифракционная картина. Освещенность экрана пропорциональна вероятности попадания фотонов на единицу площади экрана. С другой стороны, по волновой теории, освещенность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны в той же точке экрана. Следовательно, квадрат амплитуды световой волны в данной точке пространства является мерой вероятности попадания фотонов в данную точку.

## 5. КОЛОРИМЕТРИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### 5.1. Понятия цвета

Цвет – субъективная качественная характеристика электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании физиологического зрительного ощущения и зависящая от ряда физических, физиологических и психологических факторов. Это оптическое явление, ощущение, создаваемое глазом и мозгом. Цвет не является физической переменной и, следовательно, не имеет физических единиц измерения. Сами по себе предметы не являются цветными: ощущение цветности возникает как результат воздействия световых излучений. Видимый солнечный свет, который воспринимается как белый, освещает предмет и частично отражается. Объект, полностью отражающий излучение всего видимого спектрального диапазона, как правило, кажется белым, а объект, полностью поглощающий излучение, – черным.

Ощущение цвета возникает в мозгу при возбуждении и торможении цветочувствительных клеток – рецепторов глазной сетчатки человека или животного – колбочек. Существует три вида колбочек, различающихся по спектральной чувствительности, т. е. реагирующих на определенные диапазоны длин волн оптического спектра:

- $\rho$  (условно красные);
- $\gamma$  (условно зеленые);
- $\beta$  (условно синие).

Светочувствительность колбочек невысока, поэтому для хорошего восприятия цвета необходима достаточная освещенность или яркость. Каждое цветовое ощущение у человека может быть представлено в виде суммы ощущений этих трех цветов (трехкомпонентная теория цветового зрения). При достижении необходимой для восприятия цвета яркости наиболее высокочувствительные рецепторы сумеречного зрения – палочки – автоматически отключаются.

Видимое излучение – электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом. Чувствительность человеческого глаза к электромагнитному излучению зависит от длины волны (частоты) излучения, при этом максимум чувствительности приходится на 555 нм (540 ТГц), в зеленой части спектра. Поскольку при удалении от точки максимума чувствительность спадает до нуля постепенно, указать точные границы спектрального диапазона видимого излучения невозможно. Обычно в качестве коротковолновой границы принимают участок 380–400 нм (750–790 ТГц), а в качестве длинноволновой – 760–780 нм (385–395 ТГц). Электромагнитное излучение с такими длинами волн также называется видимым светом или просто светом (в узком смысле этого слова). В спектре содержатся

не все цвета, которые различает человеческий мозг. Многих оттенков, например, оттенков пурпурной гаммы, нет в спектре видимого излучения, они образуются от смешения других цветов. Видимое излучение также попадает в оптическое окно – область спектра электромагнитного излучения, практически не поглощаемую земной атмосферой. Чистый воздух рассеивает голубой свет сильнее, чем свет с большими длинами волн (красная сторона спектра), поэтому полуденное небо выглядит голубым.

Белый свет – это комбинация всех длин волн видимого спектра. Когда свет попадает на несветящийся объект (такой как бумага или краска), волны некоторых длин поглощаются материалом, а других – отражаются от него, и поглощенные и отражаемые волны создают видимость цвета. Проходя через прозрачный материал (например, фотопленку), свет больше фильтруется, чем поглощается, но результат получается такой же. Длины волн видимого света изменяются, и возникает впечатление создания нового цвета.

Различные источники света, который отражается от объекта, определяют различные длины волн, получающиеся в результате отражения, и, следовательно, различное восприятие цвета. Например, один и тот же предмет, имеющий конкретный цвет, перед двумя разными источниками света будет выглядеть по-разному. Предмет один и тот же, и он поглощает от каждого источника одни и те же световые волны. Но так как первоначальные световые волны разные, отраженные волны тоже разные, в результате чего создается впечатление, что предмет во втором случае будет иметь другой цвет. Белый цвет все отражает; черный – все поглощает. Различный спектральный состав света может давать одинаковый отклик в зрительных рецепторах (эффект метамерии цвета – два предмета имеют один цвет при одном освещении, но могут оказаться разных цветов при изменении освещения).

Основная классификация цветов:

- хроматические – все цвета видимого спектра от красного до фиолетового и их оттенки, а также коричневый (его нет на цветовом круге);
- ахроматические – это белый, черный и вся гамма оттенков серого. Наиболее ярким ахроматическим цветом является белый, наиболее темным – черный.

Характеристиками цвета являются:

- цветовой тон;
- насыщенность или интенсивность;
- чистота;
- светлота.

Цветовой тон – совокупность цветовых оттенков, сходных с одним и тем же цветом спектра. Любой хроматический цвет может быть отнесен к какому-либо определенному спектральному цвету. Оттенки, сходные



с одним и тем же цветом спектра (но различающиеся, например, насыщенностью и яркостью), принадлежат к одному и тому же тону. При изменении тона, к примеру, синего цвета в зеленую сторону спектра он сменяется голубым, в обратную – фиолетовым.

Насыщенность – это интенсивность определенного тона, т. е. степень визуального отличия хроматического цвета от равного по светлоте ахроматического (серого) цвета. Насыщенный цвет можно назвать сочным, глубоким, менее насыщенный – приглушенным, приближенным к серому. Полностью ненасыщенный цвет будет оттенком серого.

Под чистотой цвета в цветоведении понимают отсутствие в том или ином цвете примесей других цветов или их оттенков. Чистота цвета – это скорее психологическое понятие, нежели физическое: «не чистый» оранжевый тоже может быть представлен в спектре волнами определенной длины.

Светлота – качество, присущее как хроматическим, так и ахроматическим цветам. Это свойство, выражающее близость хроматических и ахроматических цветов к белому или черному цвету, относительная яркость цвета по отношению к образцу. Черно-серо-белая (т. е. ахроматические цвета) краска имеет только светлоту, а цветные – и светлоту, и цвет.

Любой хроматический цвет можно сравнить по светлоте с ахроматическим цветом. Цветные краски можно сравнивать по светлоте друг с другом. Уровень светлоты окрашенных объектов определяется при сравнении их с ахроматическими (серыми) объектами и при выявлении степени их приближения к белому цвету.

Одинаково насыщенные оттенки, относимые к одному и тому же цвету спектра, могут отличаться друг от друга степенью яркости. К примеру, при уменьшении яркости синий цвет постепенно приближается к черному.

## **5.2. История научных представлений о цвете**

Первые объяснения спектра видимого излучения дали Исаак Ньютон в книге «Оптика» и Иоганн Гёте в работе «Теория цветов». Ньютон первый использовал слово спектр (лат. spectrum – видение, появление) в печати в 1671 г., описывая свои оптические опыты.

Благодаря наблюдениям Ньютон заметил, что, когда луч света падает на поверхность стеклянной призмы под углом к поверхности, часть света отражается, а часть проходит через стекло, образуя разноцветные полосы. Ученый предположил, что свет состоит из потока частиц (корпускул) разных цветов и что частицы разного цвета движутся с различной скоростью в прозрачной среде. По его предположению, красный свет двигался быстрее, чем фиолетовый, поэтому и красный луч отклонялся на призме не так сильно, как фиолетовый. Из-за этого и возникал видимый спектр цветов.

Ньютон разделил свет на семь цветов (рис. 26):

- красный;
- оранжевый;
- желтый;
- зеленый;
- голубой;
- индиго<sup>6</sup>;
- фиолетовый.

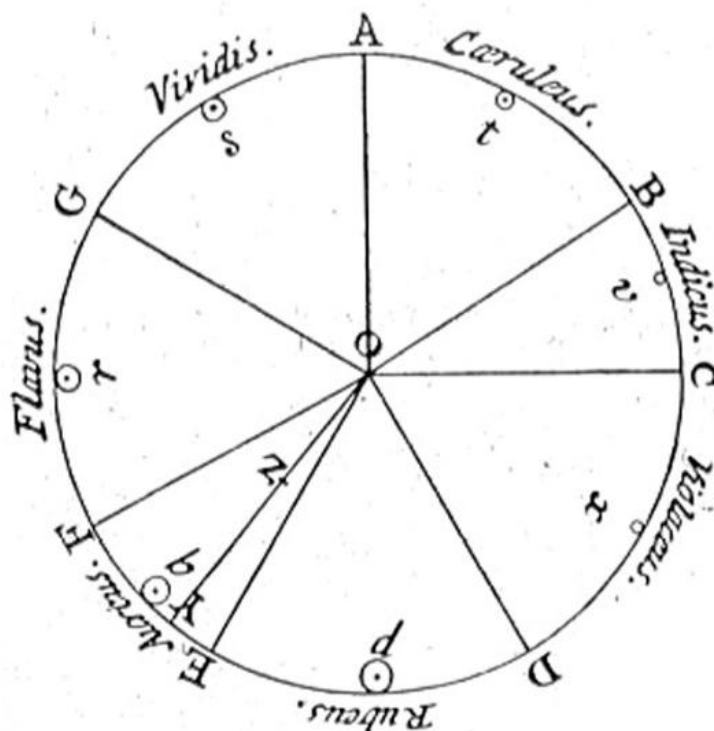


Рис. 26. Круг цветов Ньютона  
из книги «Оптика», 1704 г.

Число семь он выбрал из убеждения (происходящего от древнегреческих софистов), что существует связь между цветами, музыкальными нотами, объектами Солнечной системы и днями недели. Человеческий глаз относительно слабо воспринимает частоты цвета индиго, и некоторые люди не могут отличить его от голубого или фиолетового цвета. Поэтому после Ньютона часто предлагалось считать индиго не самостоятельным цветом, а лишь оттенком фиолетового или голубого. В русской традиции индиго соответствует синему цвету.

---

<sup>6</sup> Индиго – разновидность синего цвета, средний между темно-синим и фиолетовым. В электромагнитном спектре располагается между 420 и 450 нм. Название произошло от растения индиго, произрастающего в Индии, из которого добывали соответствующий краситель.

Гёте, в отличие от Ньютона, считал, что спектр возникает при наложении разных составных частей света. Наблюдая за широкими лучами света, он обнаружил, что при проходе через призму на краях луча проявляются красно-желтые и голубые края, между которыми свет остается белым, а спектр появляется, если приблизить эти края достаточно близко друг к другу.

Длины волн, соответствующие различным цветам видимого излучения, были впервые представлены в 1801 г. Томасом Юнгом. Они получены путем перевода в длины волн параметров колец Ньютона, измеренных самим ученым. Эти кольца Ньютон получал пропусканием через линзу, лежащую на ровной поверхности, разложенного призмой в спектр света, повторяя эксперимент для каждого из цветов. В 1821 г. Йозеф Фраунгофер положил начало измерению длин волн спектральных линий, получив их от видимого излучения Солнца с помощью дифракционной решетки, действие которой основано на явлении дифракции волн. Фраунгофер измерил углы дифракции теодолитом<sup>7</sup> и вычислил длины волн.

Таким образом, еще в начале XIX в. стало возможным измерять длины волн видимого излучения с точностью до нескольких нанометров. В XIX в., после открытия ультрафиолетового и инфракрасного излучений, понимание видимого спектра стало более точным.

Джеймс Максвелл в 1861 г. предложил аддитивный синтез цвета как способ получения цветных изображений и ввел систему RGB (красный – зеленый – синий).

### 5.3. Цвета спектра

Цвета спектра, начинаясь с красного и проходя через оттенки, противоположные, контрастные красному (зеленый, циан<sup>8</sup>), переходят в фиолетовый цвет, снова приближающийся к красному. Близость видимого восприятия фиолетового и красного цветов связана с тем, что частоты, соответствующие фиолетовому спектру, приближаются к частотам, превышающим частоты красного ровно в два раза. Но сами эти последние указанные частоты находятся уже вне видимого спектра. Поэтому мы не видим перехода от фиолетового снова к красному цвету, как это происходит в цветовом круге, в который включены несектральные цвета и где присутствует переход между красным и фиолетовым через пурпурные оттенки.

Основные и дополнительные цвета обычно иллюстрируют с помощью цветового круга (рис. 27).

---

<sup>7</sup> В настоящее время – теодолит – измерительный прибор для измерения горизонтальных и вертикальных углов.

<sup>8</sup> Циан – сине-зеленый, «цвет морской волны» – цветовой диапазон между зеленым и синим, с длиной волны примерно от 485 до 500 нм.

Оптическое смешение некоторых пар цветов может давать ощущение белого цвета.

Дополнительными цветами (взаимодополнительными или противоположными) называют пары цветов, оптическое смешение которых приводит к получению ахроматического цвета (белого, серого или черного). В триаде RGB основных цветов «красный – зеленый – синий» дополнительными являются соответственно «циан – пурпурный – желтый».

Основные и дополнительные цвета в RGB выглядят следующим образом:

- красный цвет и циан (red – cyan);
- зеленый цвет и пурпурный<sup>9</sup> (green – magenta);
- синий и желтый цвета (blue – yellow).



Рис. 27. Цветовой круг

Излучения, составляющие дополнительные цвета, могут иметь различный спектральный состав (явление метамерии). На цветовом круге, который построен по принципу RGB, эти цвета располагают оппозиционно, так что цвета обеих триад чередуются.

Аддитивное смешение цветов – метод синтеза цвета, основанный на сложении аддитивных цветов, т. е. цветов непосредственно излучающих объектов. Смешивая три основных цвета (красный, зеленый и синий) в определенном соотношении, можно воспроизвести большинство воспринимаемых человеком цветов.

<sup>9</sup> Один из группы неспектральных цветов. В колориметрии к пурпурным относят гамму цветов, полученных при смешивании красного цвета с синим или фиолетовым.

Аддитивное смешение цветов происходит непосредственно в зрительной системе человека. На практике такое смешение цветов используют, например, при создании цветной картинки на экране телевизора, монитора, ноутбука, планшета или телефона. Законы аддитивного смешения цветов являются очень важными для понимания механизмов того, как мы воспринимаем цвет окружающих нас предметов.

В противоположность аддитивному смешению цветов существуют схемы субтрактивного синтеза – получение цвета путем вычитания из спектрально-равномерного белого света отдельных спектральных составляющих. Субтрактивное смешение цветов происходит вне зрительной системы. Субтрактивная модель смешения цветов имеет отношение к тому, как мы воспринимаем цвета поверхности. Она связана с учетом того, как падающие на поверхность лучи света с разной длиной волны отражаются от нее. Например, мы воспринимаем цвет стены как зеленый вследствие того, что она отражает от себя лишь ту часть спектра излучения, которая воспринимается нами как зеленая, поглощая целиком или в значительной степени излучения другой части спектра. Аналогичный эффект мы можем получить при смешении желтой и синей красок. Это связано с тем, что желтая краска преимущественно поглощает коротковолновый свет, который должен давать ощущение синего и фиолетового, а синий, напротив, длинноволновый, который должен давать ощущение красного, оранжевого и желтого. В результате отраженным оказывается в такой смеси лишь средневолновый свет, дающий ощущение зеленого. Самая распространенная модель субтрактивного синтеза – CMYK (от англ. Cyan, Magenta, Yellow, Kontur или Key plate – Black, т. е. сине-зеленый (голубой), пурпурный, желтый, черный), широко применяется в полиграфии и цветной фотографии.

Дополнительные цвета являются смешанными цветами, так как их ощущение вызывается совместным действием монохроматических лучей, порознь дающих свои спектральные цвета. При смешении дополнительных цветов получают ахроматические цвета:

- при аддитивном смешении (характерно для смешивания потоков света) результатом является белый цвет;
- при субтрактивном смешении (вычитание спектров, характерное для смешивания различных пигментов) получается серый или черный.

Основные и дополнительные цвета также называют первичными и вторичными цветами.

Существует система цветов RYB, где основная триада «красный – желтый – синий». Понятия и соотношения основных и дополнительных цветов в этом случае:

- красный – зеленый;
- желтый – фиолетовый;
- синий – оранжевый.

## 6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФОТОНИКИ В РОССИИ

В целях поддержки направления фотоники Правительством Российской Федерации 24 июля 2013 г. распоряжением № 1305-р утвержден план мероприятий («дорожная карта») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)», являющийся основой для выработки государственной политики в сфере лазерно-оптических и оптоэлектронных технологий.

Реализация «дорожной карты» (до 2018 г.) призвана ускорить развитие фотоники как отрасли высоких технологий, являющейся базовой для современного развития телекоммуникаций, систем регистрации, хранения, обработки и отображения информации, обработки и диагностики изделий в машиностроении, изготовления и контроля элементов микро- и нанoeлектроники, создания принципиально новых производственных технологий, развития медицины, светотехники, солнечной энергетики, экологического мониторинга, а также создания современных систем контроля пространства, целеуказания и точного наведения, навигации и связи в условиях помех и защиты объектов.

Реализация мероприятий, предусмотренных «дорожной картой», позволит скорректировать действия в поддержку отрасли и создать условия для широкого внедрения технологий фотоники во многие отрасли отечественной промышленности и другие области экономики.

Целями «дорожной карты» являются:

- развитие внутреннего спроса на технологии и оборудование фотоники и расширение экспорта этой наукоемкой продукции;
- увеличение объемов производства продукции фотоники в Российской Федерации и глубокое освоение технологий фотоники в различных областях деятельности;
- создание новых высокотехнологичных рабочих мест;
- расширение географии распространения технологий фотоники в Российской Федерации;
- консолидация и активизация научно-исследовательской и прикладной деятельности в области фотоники; организация подготовки специалистов, умеющих использовать технологии фотоники в различных отраслях промышленности;
- создание системы оснащенных современным оборудованием региональных и отраслевых центров компетенции, сочетающих демонстрационную, консультативную и организационно-методическую деятельность, помогающих предприятиям региона (подотрасли) осваивать лазерно-оптические и оптоэлектронные технологии;

– совершенствование нормативно-правовой базы, в том числе модернизация технологических стандартов, в целях стимулирования использования технологий фотоники и принятия мер экономического стимулирования инновационной деятельности и модернизации предприятий;

– совершенствование правил и практики стимулирования экспорта высокотехнологичной и наукоемкой продукции фотоники.

## Приложение

*Платон (Аристокл)* (428–347 гг. до н. э.) – выдающийся древнегреческий философ-идеалист; его учение представляет собой первую классическую форму объективного идеализма.

*Эвклид или Евклид* (около 300 г. до н. э.) – древнегреческий математик, автор первого из дошедших до нас теоретического трактата по математике. Главная работа «Начала» (в латинизированной форме – «Элементы») содержит изложение планиметрии, стереометрии и ряда вопросов теории чисел; автор работ по оптике и астрономии.

*Клавдий Птолемей или Птолемея* (ок. 100 – ок. 170) – астроном, астролог, математик, механик, оптик. Автор классической античной монографии «Альмагест», которая стала итогом развития античной небесной механики и содержала практически полное собрание астрономических знаний Греции и Ближнего Востока того времени. Оставил глубокий след в оптике, географии, математике.

*Рене Декарт* (1596–1650) – французский философ, математик, механик, физик, создатель аналитической геометрии и современной алгебраической символики.

В приложении «Геометрия» к книге «Рассуждение о методе» (1637) излагались аналитическая геометрия, многочисленные результаты в алгебре и геометрии.

Физические исследования Декарта относятся главным образом к механике, оптике и общему строению Вселенной. Физика Декарта была материалистической: Вселенная целиком заполнена движущейся материей и в своих проявлениях самодостаточна. Основными видами движения Декарт считал движение по инерции, которое сформулировал (1644) так же, как позднее Ньютон, и материальные вихри, возникающие при взаимодействии одной материи с другой. Взаимодействие он рассматривал чисто механически, как соударение. Декарт ввел понятие количества движения, сформулировал (в нестрогой форме) закон сохранения движения (количества движения).

В 1637 г. вышла в свет «Диоптрика», где содержались законы распространения света, отражения и преломления, идея эфира как переносчика света, объяснение радуги. Декарт первый математически вывел закон преломления света (независимо от В. Снеллиуса) на границе двух различных сред. Точная формулировка этого закона позволила усовершенствовать оптические приборы, которые тогда стали играть огромную роль в астрономии и навигации (а вскоре и в микроскопии).

*Исаак Ньютон* (1642–1727) – английский физик, математик, механик и астроном, один из создателей классической физики. Автор фундаментального труда «Математические начала натуральной философии», в котором он



изложил закон всемирного тяготения и три закона механики, ставшие основой классической механики. Разработал дифференциальное и интегральное исчисления, теорию цвета, заложил основы современной физической оптики, создал многие другие математические и физические теории.

Ньютону принадлежат фундаментальные открытия в оптике. Он построил первый зеркальный телескоп (рефлектор), в котором, в отличие от чисто линзовых телескопов, отсутствовала хроматическая аберрация. Он также детально исследовал дисперсию света, показал, что при прохождении белого света через прозрачную призму он разлагается в непрерывный ряд лучей различного цвета вследствие различного преломления лучей разных цветов, тем самым Ньютон заложил основы правильной теории цветов.

В 1704 г. вышла в свет монография «Оптика». При жизни автора «Оптика», как и «Начала», выдержала три издания (1704, 1717, 1721) и множество переводов, в том числе три на латинский язык.

Ньютона часто считают сторонником корпускулярной теории света, но на самом деле он допускал, что свет может быть связан и с волнами в эфире. По существу, Ньютон, ясно сознавая достоинства и недостатки обоих подходов, выдвинул компромиссную, корпускулярно-волновую теорию света. В своих работах Ньютон детально описал математическую модель световых явлений, оставляя в стороне вопрос о физическом носителе света: «Учение мое о преломлении света и цветах состоит единственно в установлении некоторых свойств света без всяких гипотез о его происхождении». Волновая оптика, когда она появилась, не отвергла модели Ньютона, а вобрала их в себя и расширила на новой основе.

*Христиан Гюйгенс ван Зейлихем* (1629–1695) – нидерландский механик, физик, математик, астроном и изобретатель. Один из основоположников теоретической механики и теории вероятностей. Внес значительный вклад в оптику, молекулярную физику, астрономию, геометрию. В 1678 г. он выпустил «Трактат о свете» – набросок волновой теории света. В 1690 г. изложил качественную теорию отражения, преломления и двойного лучепреломления в исландском шпате в том самом виде, как она излагается теперь в учебниках физики. Сформулировал «принцип Гюйгенса», позволяющий исследовать движение волнового фронта, впоследствии развитый Френелем и сыгравший важную роль в волновой теории света. Открыл поляризацию света (1678).

*Иоганн Генрих Ламберт* (1728–1777) – физик, философ, математик и астроном, положил начало фотометрии.

*Томас Юнг* (1773–1829) – английский физик, механик, врач, астроном, один из создателей волновой теории света. В 1793 г. в работе «Наблюдения над процессом зрения» Юнг указал, что аккомодация глаза обусловлена изменением кривизны хрусталика.

Высказался в пользу волновой теории света. Его идеи вызвали возражения английских ученых; под их влиянием Юнг отказался от своего мнения. Однако в трактате по оптике и акустике «Опыты и проблемы по звуку и свету» (1800) ученый вновь пришел к волновой теории света и впервые рассмотрел проблему суперпозиции волн. Дальнейшим развитием этой проблемы явилось открытие Юнгом принципа интерференции (сам термин был введен Юнгом в 1802 г.).

В докладе «Теория света и цветов» Юнг дал объяснение колец Ньютона на основе интерференции и описал первые опыты по определению длин волн света. В 1803 г. в работе «Опыты и исчисления, относящиеся к физической оптике» (опубликована в 1804 г.), рассмотрел явления дифракции. После классических исследований О. Френеля по интерференции поляризованного света Юнг высказал гипотезу о поперечности световых колебаний. Разработал теорию цветного зрения, основанную на предположении о существовании в сетчатой оболочке глаза трех родов чувствительных волокон, реагирующих на три основных цвета.

*Сэр Дейвид Брюстер* (1781–1868) – шотландский физик. Специализировался на изучении оптических явлений, прежде всего спектральных и поляризационных. Открыл закон, носящий его имя.

*Йозеф Фраунгофер* (1787–1826) – немецкий физик, оптик.

Фраунгофером была значительно улучшена технология серийного производства оптических стекол – флинтгов и кронов. Изобрел окулярный микрометр и своеобразный объективный микрометр – гелиометр.

Изучая показатели преломления различных сортов стекла, в 1814 г. открыл (независимо от английского физика У. Волластона) и описал линии поглощения в солнечном спектре (фраунгоферовы линии). В 1821 г. впервые применил дифракционную решетку для изучения спектров. Предложил метод наблюдения дифракции света в параллельных лучах.

*Огюстен Жан Френель* (1788–1827) – французский физик, один из создателей волновой теории света. Основные работы Френеля посвящены физической оптике. В 1815 г. переоткрыл принцип интерференции, проделав по сравнению с Томасом Юнгом несколько новых опытов (в частности, опыт с «бизеркалами Френеля»). В 1816 г. дополнил принцип Гюйгенса, введя представление о когерентной интерференции элементарных волн, излучаемых вторичными источниками (принцип Гюйгенса–Френеля). Исходя из этого принципа, в 1818 г. разработал теорию дифракции света, на основе которой предложил метод расчета дифракционной картины, основанный на разбиении фронта волны на зоны (зоны Френеля). С помощью этого метода рассмотрел задачу о дифракции света на краю полуэкрана и круглого отверстия. В 1821 г. независимо от Т. Юнга доказал поперечность световых волн.

В 1823 г. установил законы изменения поляризации света при его отражении и преломлении (формулы Френеля). Изобрел несколько новых интерференционных приборов (зеркала Френеля, бипризма Френеля, линза Френеля).

*Александр Григорьевич Столетов* (1839–1896) – русский физик, заслуженный профессор Московского университета.

Получил кривую намагничивания железа (1872), систематически исследовал внешний фотоэффект (1888–1890), открыл первый закон фотоэффекта.

*Герих Рудольф Герц* (1857–1894) – немецкий физик. Основное достижение – экспериментальное подтверждение электромагнитной теории света Джеймса Максвелла. Доказал существование электромагнитных волн.

Подробно исследовал отражение, интерференцию, дифракцию и поляризацию электромагнитных волн, доказал, что скорость их распространения совпадает со скоростью распространения света и что свет представляет собой не что иное, как разновидность электромагнитных волн. Построил электродинамику движущихся тел, исходя из гипотезы о том, что эфир увлекается движущимися телами. Результаты, полученные Герцем, легли в основу создания радио.

В 1886–1887 гг. Герц впервые наблюдал и дал описание внешнего фотоэффекта. Разрабатывал теорию резонансного контура, изучал свойства катодных лучей, исследовал влияние ультрафиолетовых лучей на электрический разряд.

*Александр Степанович Попов* (1859–1905) – русский физик и электротехник, профессор, изобретатель, статский советник (1901), Почетный инженер-электрик (1899). Один из изобретателей радио. В 1901 г. Александр Степанович стал профессором Электротехнического института, ему было присвоено почетное звание инженера-электрика.

*Джеймс Клерк Максвелл* (1831–1879) – британский физик, математик и механик. Максвелл заложил основы современной классической электродинамики (уравнения Максвелла), ввел в физику понятия тока смещения и электромагнитного поля, получил ряд следствий из своей теории (предсказание электромагнитных волн, электромагнитная природа света, давление света и др.).

Основатель количественной теории цветов; автор трехцветного принципа цветной фотографии. Среди других работ Максвелла – исследования по механике (фотоупругость, теорема Максвелла в теории упругости, теория устойчивости движения, анализ устойчивости колец Сатурна), оптике, математике.

Идеи Максвелла об устойчивости систем частиц нашли применение и развитие в совершенно иных областях – анализе динамики волн и заря-

женных частиц в кольцевых ускорителях, плазме, нелинейных оптических средах (системы уравнений Власова–Максвелла, Шрёдингера–Максвелла, Вигнера–Максвелла).

*Макс Карл Эрнст Людвиг Планк* (1858–1947) – немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Ввел (1900) квант действия (постоянная Планка) и, исходя из идеи квантов, вывел закон излучения, названный его именем. Оставил труды по термодинамике, теории относительности, философии естествознания. Вывел формулу для распределения энергии в спектре электромагнитного излучения абсолютно черного тела, о чем сделал доклад 19 декабря 1900 г. на заседании Берлинского физического общества. Этот день называют днем рождения квантовой теории. В 1919 г. Планк был удостоен Нобелевской премии по физике за 1918 г. «в знак признания его заслуг в деле развития физики благодаря открытию квантов энергии».

*Луи Виктор Пьер Раймон, 7-й герцог Бройль*, более известный как *Луи де Бройль* (1892–1987) – французский физик-теоретик, один из основоположников квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике за 1929 г., член Французской академии наук (с 1933 г.) и ее неперемный секретарь (с 1942 г.), член Французской академии (с 1944 г.).

Луи де Бройль является автором работ по фундаментальным проблемам квантовой теории. Ему принадлежит гипотеза о волновых свойствах материальных частиц (волны де Бройля, или волны материи), положившая начало развитию волновой механики. Предложил оригинальную интерпретацию квантовой механики (теория волны-пилота, теория двойного решения), развивал релятивистскую теорию частиц с произвольным спином, в частности фотонов (нейтринная теория света).

*Герман Гюнтер Грассман* (1809–1877) – немецкий физик, математик. Приобрел себе почетную известность трудами по геометрии, физике и кристаллографии.

*Вернер Карл Гейзенберг* (1901–1976) – немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике (1932), член ряда академий и научных обществ мира.

Являлся автором ряда фундаментальных результатов в квантовой теории: заложил основы матричной механики, сформулировал соотношение неопределенностей, применил формализм квантовой механики к проблемам ферромагнетизма, аномального эффекта Зеемана и пр. Активно участвовал в развитии квантовой электродинамики (теория Гейзенберга–Паули) и квантовой теории поля.

*Лукирский Петр Иванович* (1894–1954), физик-экспериментатор, один из создателей эмиссионной электроники, академик АН СССР (1946). С 1945 г. профессор Ленинградского политехнического института. Основные труды – по физической электронике, рентгеновским лучам и ядерной физике.

*Сергей Сергеевич Прилежаев* (1903–1979) – доктор физико-математических наук, профессор.

Опубликовал более 40 научных работ, в которых описаны разные электронные явления, такие как фотоэлектрический эффект, термоэлектронная и вторично-электронная эмиссия. Внес существенный вклад в изучение распределения скоростей в условиях радиального электрического поля в сферическом конденсаторе.

Совместно с академиком П. И. Лукирским разработал метод сферического конденсатора, который определял величину постоянной Планка с максимальной для того времени точностью.

*Петр Николаевич Лебедев* (1866–1912) – русский физик-экспериментатор, первым подтвердивший на опыте вывод Максвелла о наличии светового давления, исследовал отражение, преломление, поляризацию, интерференцию и др.

*Артур Холли Комpton* (1892–1962) – американский физик, удостоенный в 1927 г. Нобелевской премии по физике за открытие эффекта, названного его именем. Дал объяснение эффекта, основываясь на представлении об электромагнитном излучении как потоке фотонов.

*Альберт Эйнштейн* (1879–1955) – физик-теоретик, один из основателей современной теоретической физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1921 г.

Выдвинул тезис, что не только излучение, но и распространение и поглощение света дискретны; позднее эти порции (кванты) получили название фотонов. Этот тезис позволил ему объяснить две загадки фотоэффекта: почему фототок возникал не при всякой частоте света, а только начиная с определенного порога, зависящего только от вида металла, а энергия и скорость вылетающих электронов зависели не от интенсивности света, а только от его частоты. Теория фотоэффекта Эйнштейна с высокой точностью соответствовала опытным данным.

*Нильс Хенрик Давид Бор* (1885–1962) – датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922). Член Датского королевского общества (1917) и его президент с 1939 г. Член более чем 20 академий наук мира, в том числе иностранный почетный член Академии наук СССР.

Известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики. Он также внес значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой.

*Валентин Александрович Фабрикант* (1907–1991) – выдающийся советский физик, доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Академии педагогических наук, лауреат Государственной премии.

В. А. Фабрикант сформулировал принцип усиления электромагнитного излучения при прохождении сред с инверсной населенностью, лежащий в основе квантовой электроники. Крупнейший специалист по физической оптике, физике газового разряда и квантовой электронике. В. А. Фабрикант – автор научного открытия «Явление усиления электромагнитных волн (когерентное излучение)», которое занесено в Государственный реестр открытий СССР под № 12 с приоритетом от 18 июня 1951 г.

*Александр Михайлович Прохоров* (1916–2002) – советский физик, один из основоположников важнейшего направления современной физики – квантовой электроники, лауреат Нобелевской премии по физике за 1964 г. (совместно с Николаем Басовым и Чарлзом Таунсом), один из изобретателей лазерных технологий. Известен как основоположник радиоспектроскопии, лазерной техники и технологии, автор многих фундаментальных трудов, руководитель крупного научного коллектива – Института физики Российской академии наук. Важное, определяющее значение для развития ряда направлений современной физики сыграли его работы по теории нелинейных колебаний, синхротронному излучению, определению магнитных моментов ядер, многофотонным оптическим и нелинейным процессам, волоконной и интегральной оптике, физике твердого тела, оптическому пробою газов и диэлектриков.

А. М. Прохоров – автор большого числа изобретений, многие из которых запатентованы за рубежом. Он инициировал ряд работ по применению лазеров в научных исследованиях, в медицине, химии, биологии, метрологии, неутомимо пропагандирует широкое внедрение лазерной технологии и достижений современной физики во все отрасли промышленности, в особенности в электронику, машиностроение, приборостроение и связь.

*Чарлз Хард Таунс* (1915–2015) – американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1964). Член Национальной академии наук США (1956), иностранный член Российской академии наук (1994).

Известен своей работой по теории и применению молекулярного генератора (мазера), на который получил фундаментальный патент, автор работ в области квантовой электроники, напрямую связанных с мазером и лазером. В 1964 г. Таунс разделил Нобелевскую премию по физике вместе с Николаем Басовым (Nikolay Basov) и Александром Прохоровым (Alexander Prokhorov).

*Николай Геннадиевич Басов* (1922–2001) – советский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (1964). Дважды Герой Социалистического Труда (1969, 1982). Работы Басова посвящены квантовой электронике и ее применению. Вместе с А. М. Прохоровым он установил принцип усиления и генерации электромагнитного излучения квантовыми системами, что позволило в 1954 г. создать первый квантовый генератор (мазер) на пучке молекул аммиака.

Основатель нового направления в физике – квантовой электроники. За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн (создание молекулярных генераторов и усилителей) Н. Г. Басов и А. М. Прохоров в 1959 г. были награждены Ленинской премией. В 1964 г. Н. Г. Басову совместно с Ч. Х. Таунсом за «фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей на лазерно-мазерном принципе», была присуждена Нобелевская премия по физике.

*Денеш Габор* (1900–1979) – венгерский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1971 г. «за изобретение и развитие голографического метода».

*Юрий Николаевич Денисюк* (1927–2006) – советский физик, один из основоположников оптической голографии. Действительный член Российской академии наук (1992), член-корреспондент (с 1970 г.), доктор физико-математических наук (1971), профессор (1980).

*Александр Григорьевич Столетов* (1839–1896) – русский физик, заслуженный профессор Московского университета.

Исследовал внешний фотоэффект (1888–1890), открыл первый закон фотоэффекта. Исследовал газовый разряд, критическое состояние и другие явления. Основал физическую лабораторию в Московском университете.

*Олег Владимирович Лосев* (1903–1942) – советский физик и изобретатель (15 патентов и авторских свидетельств), кандидат физико-математических наук (1938 г., за исследования по электролюминесценции, без защиты диссертации). Получил известность за изобретение генерирующего кристаллического детектора. Автор первых научных трудов, описывающих процессы, происходящие в поверхностных слоях полупроводника. Внес большой вклад в исследование электролюминесценции в твердых полупроводниках.

*Жорес Иванович Алфёров* (1930) – советский и российский физик, единственный ныне здравствующий из проживающих в России, российский лауреат Нобелевской премии по физике (премия 2000 г. за разработку полупроводниковых гетероструктур и создание быстрых опто- и микроэлектронных компонентов). Вице-президент Российской академии наук (РАН) с 1991 г. Председатель Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН.

## Список литературы

1. *Цаплин, А. И.* Фотоника и оптоинформатика. Введение в специальность : учеб. пособие / А. И. Цаплин. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 399 с.
2. *Вильчинская, С. С.* Оптические материалы и технологии : учеб. пособие / С. С. Вильчинская, В. М. Лисицын. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 107 с.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1305-р от 24 июля 2013 г. План мероприятий («дорожная карта») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)».
4. Стратегическая программа на 2015–2025 гг. Технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника» [Электронный ресурс]. – <http://www.cislaser.com/> (дата обращения 20.09.2016).
5. *Недзьведь, О. В.* Оптика глаза. Основы биофизики зрения : учеб.-метод. пособие / О. В. Недзьведь, В. Г. Лещенко. – Минск : БГМУ, 2008. – 35 с.
6. *Никоноров, Н. В.* Волноводная фотоника : учеб. пособие / Н. В. Никоноров, С. М. Шандаров. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008. – 143 с.
7. *Родионов, С. А.* Основы оптики : конспект лекций [Электронный ресурс] / С. А. Родионов ; СПб ГИТМО (ТУ). – [http://aco.ifmo.ru/el\\_books/basics\\_optics/](http://aco.ifmo.ru/el_books/basics_optics/) (дата обращения 15.09.2016).
8. *Савельев, И. В.* Курс общей физики : учебник в 3-х т. Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – 464 с.
9. *Сивухин, Д. В.* Оптика : учеб. пособие / Д. В. Сивухин. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 752 с. – (Общ. курс физики).





**08000539**

**Полякова Елена Валерьевна**

**ВВЕДЕНИЕ В ПРОФЕССИЮ  
ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА**

**Учебное пособие**

Редактор *И. И. Щенсяк*

План издания 2017 г., п. 66

Подписано к печати 04.10.2017

Объем 4,0 усл.-печ. л. Тираж 26 экз. Заказ 807

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ

191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ