



Настоящей книгой издательство «ТЕХНОСФЕРА» открывает новую серию, посвящённую увлекательному миру квантовых технологий. Такие технологии представляют собой междисциплинарную область науки и техники, в основе которой лежит возможность управления отдельными квантовыми состояниями объектов в целях создания принципиально новых методов вычислений, передачи информации, сверхточных измерений и др. Квантовые технологии опираются на результаты и достижения в области атомной физики, квантовой оптики, физики конденсированного состояния, физики и техники измерений, информатики и теории алгоритмов, технологий микроэлектроники и наноэлектроники, наук о материалах и ряда других областей. Квантовые технологии, безусловно, относятся к числу направлений, успехи в развитии которых будут в ближайшие десятилетия определять мировое лидерство. Надеюсь, что книги этой новой серии будут мотивировать молодёжь на освоение точных наук и высоких технологий, а также способствовать развитию междисциплинарных связей специалистов различных отраслей науки и техники.

*Президент Российской академии наук,
академик Г.Я. Красников*

Редакционный совет серии книг «Мир квантовых технологий»

Красников Геннадий Яковлевич,

президент Российской академии наук – председатель редсовета, академик

Горбачев Александр Алексеевич,

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН,

заместитель председателя, академик

Холмогоров Александр Семёнович,

Математический институт имени В.А. Стеклова РАН,

заместитель председателя, академик

Члены совета:

Аблаев Фарид Мансурович,

Казанский (Приволжский) федеральный университет, д.ф.-м.н.

Богданов Юрий Иванович,

НИЦ «Курчатовский институт» – ФТИАН им. К.А. Валиева, д.ф.-м.н.

Глейм Артур Викторович,

ОАО «Российские железные дороги», к.т.н.

Калачёв Алексей Алексеевич,

ФИЦ «Казанский научный центр РАН», чл.-корр. РАН

Колачевский Николай Николаевич,

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, чл.-корр. РАН

Кулик Сергей Павлович,

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н.

Лукичёв Владимир Фёдорович,

НИЦ «Курчатовский институт» – ФТИАН им. К.А. Валиева, чл.-корр. РАН

Моисеев Сергей Андреевич,

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, д.ф.-м.н.

Печень Александр Николаевич,

Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, д.ф.-м.н.

Погосов Вальтер Валентинович,

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, д.ф.-м.н.

Рябцев Игорь Ильич,

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, чл.-корр. РАН

Фёдоров Алексей Константинович,

Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий,
НИТУ МИСИС, к.ф.-м.н.

Фельдман Эдуард Беняминович,

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, д.ф.-м.н.





*В.П. Пономаренко,
В.С. Попов*

Нульмерная сенсорика. Квантовые точки

**ТЕХНОСФЕРА
Москва
2025**

УДК 621.383+535.14

ББК 32.86

П56

Рецензенты:

Профессор, доктор физико-математических наук,

*член-корреспондент РАН **В.В. Иванов***

*Институт квантовых технологий Московского физико-технического
института (национального исследовательского университета)*

*Профессор, доктор физико-математических наук **А.Г. Витухновский***

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

П56 Пономаренко В.П., Попов В.С.

Нульмерная сенсорика. Квантовые точки

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 268 с. ISBN 978-5-94836-733-0

Нульмерная сенсорика – новое направление фотосенсорики, основанное на использовании квази-нульмерных (англ. zero dimensional или 0D) нано-объектов – нанокристаллов полупроводников, полученных химическими методами, так называемых коллоидных квантовых точек.

В книге представлен обзор современного состояния исследований и разработок в области фотоэлектрических явлений в различных структурах на основе коллоидных квантовых точек. Основное внимание уделено гетероструктурам с энергетическими барьерами, как элементной базе матричных фотодиодов для ближнего (1-3 мкм) и средневолнового (3-5 мкм) диапазонов электромагнитного излучения. Представлен обзор свойств, разработанных к настоящему времени архитектур много- и малоэлементных фотосенсоров на основе халькогенидов свинца и ртути PbS, PbSe, PbTe, HgTe, HgSe, HgS, включая фоторезисторные структуры, а также фотодиоды и фототранзисторы с энергетическими барьерами. Изложены основы физики энергетического строения квазиуменьмерных материалов, оптических свойств квантовых точек. Рассмотрены свойства массивов квантовых точек и влияние беспорядка. Описаны модели транспорта носителей зарядов в массивах квантовых точек, существенно отличающиеся от механизмов проводимости в трехмерных 3D-материалах. Описаны зародышеобразование и дальнейшие фазы роста нанокристаллов в процессе коллоидного синтеза квантовых точек. Рассмотрены способы замены лигандов и легирования массивов коллоидных квантовых точек.

Книга адресована студентам, аспирантам и исследователям, занимающимся вопросами фотоники, оптоинформатики, нанохимии и нанотехнологий, а также преподавателям соответствующих разделов физики и химии.

УДК 621.383+535.14

ББК 32.86

© Пономаренко В.П., Попов В.С., 2025

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2025

ISBN 978-5-94836-733-0

Содержание

Предисловие	7
Литература	11
Глава 1. Естественные и искусственно созданные источники электромагнитного излучения	13
1.1. Диапазоны электромагнитного излучения. Свет и цвет	13
1.2. Природа электромагнитного излучения. Формулы Планка, Стефана-Больцмана, Вина	18
1.3. Излучение Солнца. Строение и влияние земной атмосферы	23
1.4. Излучение Луны, звезд. Зодиакальный свет. Ночное свечение атмосферы. Оптические характеристики атмосферы в областях 0,4—0,9 и 1,4—1,8 мкм ...	32
1.5. Чувствительность фотосенсора. Излучение искусственно созданных инфракрасных источников	39
1.6. Человек и инфракрасное излучение	46
Дополнительная литература к гл. 1	51
Глава 2. Фотосенсорика. Очерк развития	54
2.1. Рождение фотосенсорики, фото- и оптоэлектроники	54
2.2. Эмиссионная фотосенсорика	60
2.3. Твердотельная полупроводниковая фотосенсорика	73
2.4. Фотосенсорика структур ограниченной размерности. Квантовая инженерия ..	92
Дополнительная литература к гл. 2	101
Глава 3. Квазинульмерные материалы	107
3.1. Квантовые точки. Размерное квантование. Конфайнмент	107
3.2. Оптические свойства квантовых точек	113
3.3. Массивы квантовых точек. Диэлектрическая постоянная. Зонные диаграммы. Влияние беспорядка	128
3.4. Зарядовый транспорт в массивах квантовых точек.	137
Дополнительная литература к гл. 3	139
Глава 4. Получение 0D-нанокристаллов и формирование фоточувствительных структур на их основе	144
4.1. Общие требования к материалам на основе коллоидных квантовых точек для создания фоточувствительных структур.	144
4.2. Синтез коллоидных квантовых точек для фотосенсорики	150
4.3. Химия поверхности и электрофизические свойства слоёв ККТ	161
4.4. Применение ККТ со структурой ядро@оболочка для повышения характеристик фотосенсоров	169
Дополнительная литература к гл. 4	172

Глава 5. Фотосенсорика на основе квазиульмерных структур	180
5.1. Многофазные гетеросистемы. Энергетические барьеры	183
5.2. Матричная фотосенсорика	187
5.3. Малоэлементные фотосенсоры	200
5.3.1. Фоторезисторы.	202
5.3.2. Фотодиоды.	209
5.3.3. Фототранзисторы.	231
5.4. Новые архитектуры матричных фотосенсоров на основе ККТ из PbS и HgTe	239
Дополнительная литература к гл. 5	249
Глава 6. Перспективы развития нульмерной фотосенсорики	259
6.1. Развитие применений фотосенсоров на основе ККТ	259
6.2. Приборы с прямым преобразованием ИК излучения в видимое	260
Дополнительная литература к гл. 6	263
Приложения	264
Приложение 1. Часто встречающиеся акронимы и обозначения	264
Приложение 2. Размерности используемых величин	266

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интерес к материалам и структурам ограниченной размерности, начавшись во второй половине XX века и особенно возросший после открытия в 2004 году лауреатами Нобелевской премии по физике К.С. Новоселовым и А.К. Геймом двумерной аллотропной формы графита (графена), в последнее десятилетие продолжал активно нарастать. К исследованиям и разработкам в различных областях физики 0D-, 1D- и 2D-материалов начали подключаться не только ведущие университеты и исследовательские центры многих стран, но и крупные высокотехнологические компании, такие как IBM, Samsung, Sony и др.

Особенно заметен прогресс в создании нового поколения телевизионной техники с использованием квазинульмерных материалов в виде квантовых точек (QD), позволивший компании Samsung в 2018 году создать первый в мире QLED-телевизор со сверхвысоким разрешением 7680×4320 пикселей, что в 16 раз превзошло разрешение телевизионных приемников, выпускавшихся в 2000-х годах. Исключительный уровень яркости, создаваемый квантовыми точками, позволил с абсолютной точностью воспроизводить в изображении самые мельчайшие детали. Возможности использования квантовых точек в качестве элементной базы цветных дисплеев были продемонстрированы в 2011 году, когда разработчики из Samsung представили первый 4-дюймовый дисплей, где каждый трехцветный пиксел с квантовыми точками включался и выключался тонкопленочным транзистором.

Кремниевая микроэлектроника, без которой невозможно развитие таких важнейших областей науки и техники как связь, информатика, оборона и др., уже в 1993 году перешагнула нанометровый рубеж, когда транзисторы для микропроцессоров “Pentium” начали изготавливаться с проектной нормой менее 1 микронметра (800 нм). Стремительный взлет микропроцессорной техники постоянно сопровождался необходимостью использовать все более тонкие слои металлов, диэлектриков и полупроводников, позволяющих увеличивать плотность размещения активных и пассивных элементов в СБИС, которые по свойствам стали быстро приближаться к 2D-материалам. Крупнейший в мире производитель кремниевых СБИС компания TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) на конференции IEDM (International Electron Devices Meeting — ежегодная международная конференция по микро- и нанoeлектронике) в 2023 году заявила о своем намерении начать мелкосерийное производство СБИС по 2-нм техпроцессу в 2025 году и в 2024 году завершить строительство двух заводов по их выпуску. По планам TSMC, в 2030 году должны появиться микросхемы, содержащие 1 триллион транзисторов, построенные по 1-нм техпроцессу. Главными требованиями, предъявляемыми к транзисторам, являются быстродействие и низкое энергопотребление, поэтому, помимо нанометровой толщины, материалы для них должны обладать максимально высокой подвижностью зарядов. Другое требование — высокая теплопроводность, необходимая для эффективного



Панорама производства фирмы Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC). Фирма — крупнейший в мире производитель кремниевых СБИС, обладает технологиями производства кремниевых микросхем с нормами 90, 65, 45, 40, 28, 20, 16/12, 10, 7, 5 нм



Один из производственных участков фирмы Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)

отвода тепла, выделяющегося при работе СБИС. Многие двумерные 2D-материалы с толщиной всего в один атомный слой по своим структурным и электрофизическим параметрам близки к вышеперечисленным требованиям [1—3].

Современная полупроводниковая фотосенсорика основана на многофазных гетеросистемах, содержащих энергетические барьеры для носителей зарядов.

Идея использования гетеропереходов, впервые выдвинутая лауреатом Нобелевской премии У. Шокли (W. Shockley) и получившая блестящее развитие в работах академика Ж.И. Алферова (Россия) и профессора Г. Кремера (Н. Кроммер, США), послужила отправной точкой развития не только нового направления фотосенсорики, но и полупроводниковых лазеров, светоизлучающих диодов и др. Базируясь на традиционных полупроводниковых трехмерных 3D-материалах, фотосенсорика гетеропереходов обеспечила создание многочисленных фотосенсорных устройств с чувствительностью, охватывающей важнейшие диапазоны электромагнитного излучения от ультрафиолета до терагерцевого [4]. В 2000 году академик

РАН Ж.И. Алферов и профессор Г. Кремер за выдающийся вклад в разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокочастотных схемах и оптоэлектронике, были удостоены Нобелевской премии по физике.

Гетероструктуры, построенные с использованием материалов и структур пониженной размерности, открыли совершенно новые перспективы создания фотосенсоров с необычными и уникальными свойствами [5—8]. В основе их работы лежит эффект размерного квантования энергии носителей зарядов, теоретически исследованный в 1950—1960-х годах в работах академика АН СССР И.М. Лифшица, члена-корреспондента АН Украины А.М. Косевича, докторов физико-математических наук В.Б. Сандомирского, В.Я. Демиховского, Б.А. Тавгера и экспериментально обнаруженный Ю.Ф. Огриным в 1966 году в ИРЭ АН СССР.

Наиболее значимых результатов в последнее пятилетие достигла фотосенсорика гетероструктур на основе коллоидных квантовых точек (ККТ), спектральные свойства которых задаются средним размером ККТ. Обзоры основных результатов, достигнутых к настоящему времени по фотосенсорике на основе ККТ, содержатся в работах [9—13]. Среди них особенно значимыми выглядят результаты, продемонстрированные фирмой SWIR Vision Systems (США, Сев. Каролина) на различных выставках оптоэлектроники, по созданию неохлаждаемых матричных фотосенсоров на основе гетеропереходов, возникающих на контакте *слой фуллерита C₆₀ / слой ККТРbS* с фоточувствительностью в диапазоне 0,4—2,0 мкм. Максимальный достигнутый формат матриц — 3064×2040 при шаге 7×7 мкм. Кроме того, фирма располагает технологиями по созданию таких матриц с форматами 640×512, 1280×1024, 1920×1080 и шагом 15×15 мкм для области спектра 0,4—1,7 мкм, технологиями по созданию матриц с форматами 2040×2040 и 3064×2040 и шагом 7×7 мкм с расширенной областью чувствительности от 0,4 до 2,0 мкм. Фирма разработала и производит на собственном заводе в Северной Каролине (США) инфракрасные камеры на основе описанных матричных фотосенсорных устройств, в том числе быстродействующие для приема импульсного излучения в указанных областях спектра.

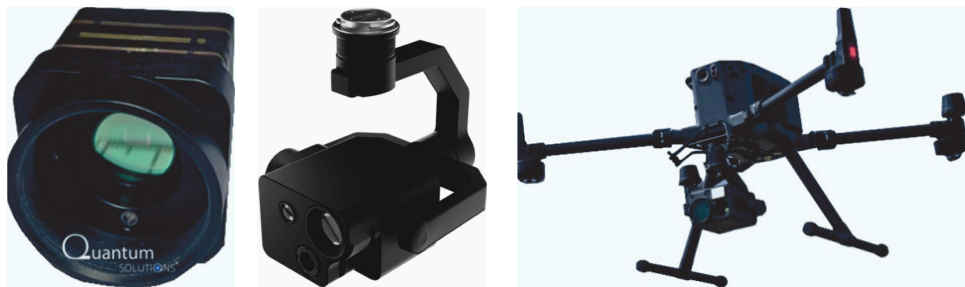


Производство фирмы SWIR Vision Systems в Северной Каролине (США) и выпускаемые фирмой инфракрасные камеры на основе коллоидных квантовых точек

В 2024 году фирмой Quantum Solutions (UK) на конференции CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) демонстрировались фотосенсоры с использованием коллоидных квантовых точек формата 640×512 с шагом 5×5 мкм для области спектра 0,4—1,7 мкм. Этот шаг пока является наименьшим среди промышленно выпускаемых приемников на основе ККТ. Фирмой также разработан приемник на основе ККТ с минимальным размером пикселей 3,8×3,8 мкм (диагональ 4,1 мкм).

В 2024 году компанией Quantum Solutions совместно с компанией TOPODRONE — производителем геодезических БПЛА и лазерных сканеров из Швейцарии — демонстрировалась инфракрасная камера на основе матрицы 640×512 из ККТ с чувствительностью в диапазоне 0,4—1,7 мкм и БПЛА с ее использованием.

Вышеизложенное наглядно подтверждает технологический прорыв, происходящий в становлении нового направления инфракрасной фотосенсорики — нульмерной сенсорики, основанного на использовании квази-нульмерных (англ. zero dimensional или 0D) нанообъектов (коллоидных квантовых



Тепловизионная камера фирмы Quantum Solutions с матрицей 640×512 на область спектра $0,4\text{--}1,7$ мкм, подвеска для БПЛА с тремя камерами (кремниевая, болометрическая и SWIR матрицы) и БПЛА с такой подвеской фирмы TOPODRONE

точек). Из сферы чисто академических исследований коллоидные квантовые точки начинают быстрый переход в область промышленного освоения. Одновременно происходит рождение новых идей и подходов, открывающих дальнейшие перспективы развития и использования квантовых точек.

К настоящему времени опубликовано значительное число статей, посвященных различным физическим и технологическим аспектам коллоидных квантовых точек, в том числе несколько книг [14—18].

В настоящей работе представлен обзор современного состояния исследований и разработок в области фотоэлектрических явлений в различных структурах на основе коллоидных квантовых точек. Основное внимание уделено гетероструктурам с энергетическими барьерами как элементной базе матричных фотодиодов для ближнего ($1\text{--}3$ мкм) и средневолнового ($3\text{--}5$ мкм) диапазонов электромагнитного излучения.

Первая глава посвящена описанию естественных освещенностей, создаваемых в дневное время солнечным излучением, Луной и звездами в ночное время, а также ночным свечением атмосферы. Интенсивность и спектральный состав этих освещенностей определяют условия, в которых будут работать фотосенсоры пассивного типа.

Во второй главе дан краткий очерк развития мировой фотосенсорики, включая сенсорику структур ограниченной размерности и эмиссионную фотосенсорику.

В третьей главе изложены основы физики энергетического строения квазиульмерных материалов, оптических свойств квантовых точек. Рассмотрены свойства массивов квантовых точек и влияние беспорядка. Описаны модели транспорта носителей зарядов в массивах квантовых точек, существенно отличающиеся от механизмов проводимости в трехмерных 3D-материалах.

Получению 0D-нанокристаллов и формированию из них фоточувствительных структур посвящена четвертая глава. Описаны зародышеобразование и дальнейшие фазы роста нанокристаллов в процессе коллоидного синтеза квантовых точек. Рассмотрены способы замены лигандов и легирования массивов коллоидных квантовых точек.

В заключительной пятой главе представлен обзор свойств разработанных к настоящему времени архитектур много- и малоэлементных фотосенсоров на основе халькогенидов свинца и ртути PbS, PbSe, PbTe, HgTe, HgSe, HgS, включая фоторезисторные структуры, а также фотодиоды и фототранзисторы с энергетическими барьерами.

Сейчас фотосенсорика на основе коллоидных квантовых точек становится одним из наиболее динамично развивающихся направлений физики полупроводников и коллоидной химии. Использование коллоидных квантовых точек существенно упрощает технологию фотосенсоров, снижает их стоимость и способствует внедрению таких приборов в различные технические системы. Признанием значимости этого направления исследований и разработок послужило присуждение в 2023 году Нобелевской премии по химии за открытие и синтез квантовых точек.

Книга адресована студентам, аспирантам и исследователям, занимающимся вопросами фотоники, оптоинформатики, нанохимии и нанотехнологий, а также преподавателям соответствующих разделов физики и химии.

Литература

1. Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В., Чепурнов Е.Л. Фото- и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов: Обзор. Часть I. 2D-материалы: свойства и синтез // *Успехи прикладной физики*, 2019, том 7, № 1. — С. 10–48.
2. Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В. Фото- и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов: Обзор. Часть II. 2D-нанотранзисторы // *Успехи прикладной физики*, 2020, том 8, № 1. — С. 33–66.
3. Попов В.С., Пономаренко В.П., Попов С.В. Фото- и наноэлектроника на основе двумерных 2D-материалов: Обзор. Часть III. Фотосенсоры на основе графена, графеноподобных и родственных моноатомных 2D-наноматериалов // *Успехи прикладной физики*, 2022, том 10, № 2. — С. 144–169.
4. Пономаренко В.П. *Квантовая фотосенсорика*. — М.: АО «НПО «Орион», 2018. — 648 с.
5. Попов В.С., Егоров А.В., Пономаренко В.П. Получение фоточувствительных элементов на основе двумерного теллурида висмута и их вольт-амперные характеристики // *Прикладная физика*, 2020, № 5. — С. 50–55.
6. Kim V.V., Bundulis A., Popov V.S., Lavrentyev N.A., Lizunova A.A., Shuklov I.A., Ponomarenko V.P., Grube J., Ganeev R.A. Third-order optical nonlinearities of exfoliated Bi₂Te₃ nanoparticle films in UV, visible and near-infrared ranges measured by tunable femtosecond pulses. *Optics Express*, 2022, **30** (5). Pp. 6971–6980.
7. Ganeev R.A., Popov V.S., Zvyagin A.I., Lavrentyev N.A., Mirofyanchenko A.E., Mirofyanchenko E.V., Shuklov I.A., Ovchinnikov O.V., Ponomarenko V.P., Razumov V.F. Exfoliated Bi₂Te₃ nanoparticle suspensions and films: morphological and nonlinear optical characterization. *Nanophotonics*, 2021, **10** (15). Pp. 3857–3870.
8. Попов В.С., Пономаренко В.П., Попов С.В. Квантовая фотосенсорика на основе двумерных структур // *Вестник РФФИ*, 2023, **1** (17). — С. 73–87.
9. Пономаренко В.П., Попов В.С., Попов С.В. Фотоэлектроника на основе квазиульмерных структур: Обзор // *Успехи прикладной физики*, 2021, том 9, № 1. — С. 25–67.

10. Попов В.С., Пономаренко В.П., Демкин Д.В., Шуклов И.А., Гадомская А.В., Бричкин С.Б., Лаврентьев Н.А., Гак В.Ю., Мирофьянченко А.Е., Мирофьянченко Е.В., Кацаба А.В., Арсенов П.В., Иванов В.В., Разумов В.Ф. Фоточувствительность наноструктур с энергетическим барьером на основе коллоидных квантовых точек PbS // *Доклады Российской Академии наук. Технические науки. Физика*, 2023, том 511. — С. 78–82.
11. Разумов В.Ф., Бричкин С.Б. ИК-фотодетекторы на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца и ртути // *Вестник РФФИ*, 2023, **1** (17). — С. 89–94.
12. Попов В.С., Пономаренко В.П., Попов С.В. Гибридно-монолитные ИК-матрицы на основе коллоидных квантовых точек и 2D-материалов // *Прикладная физика*, 2023, № 6. — С. 45–53.
13. Пономаренко В.П., Попов В.С., Шуклов И.А., Иванов В.В., Разумов В.Ф. Фото-сенсоры на основе коллоидных квантовых точек // *Успехи химии*, 2024, **93** (4). — С. 5–56.
14. *Colloidal Quantum Dot: Optoelectronics and Photovoltaics*. Eds. Konstatatos G. and Sargent E.H. — Cambridge Press, 2013.
15. *Cadmium Telluride Quantum Dots*. Eds. Donegan J.F. and Rakovich Y.P. — CRC Press, 2013.
16. *Quantum Dot Solar Cells*. Eds. Jiang Wu and Zhiming M. Wang. — Springer Science + Business Media, New York, 2014.
17. *Photoactive Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots*. Ed. Alberto Credi. — Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
18. Разумов В.Ф. *Фотоника коллоидных квантовых точек*. — Иваново: Иван. гос. ун-т, 2017. — 272 с.

ГЛАВА I

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Диапазоны электромагнитного излучения. Свет и цвет

Существование электромагнитных волн предсказал в 1832 году английский физик Майкл Фарадей (Michael Faraday, 1791—1867). В 1865 году Джеймс Максвелл (James Clerk Maxwell, 1831—1879) создал теорию электромагнитного поля, на основе которой было получено строгое научное обоснование существования электромагнитного излучения.

Электромагнитное излучение, порожденное движущимися зарядами, в зависимости от длины волны λ (частоты ν) можно отнести к одному из спектральных диапазонов, показанных в таблице 1.1. Между этими диапазонами нет точно фиксированных границ, которые в определенной степени можно считать условными.

7 мая 1895 года русский ученый-радиофизик А.С. Попов (1859—1905) впервые в мире продемонстрировал возможность приема-передачи электромагнитных колебаний на расстояние около 60 метров [1]. К сожалению, устройство приема-передатчика тогда не было запатентовано. В 1896 году итальянский ученый-радиотехник, предприниматель и дипломат, лауреат Нобелевской премии (1909) Гульельмо Джовани Мария Маркони (Guglielmo Giovanni Maria Marconi, 1874—1937) продемонстрировал в Великобритании аналогичное устройство и запатентовал его, став обладателем патента Великобритании с приоритетом от 2 июня 1896 года. В СССР и Российской Федерации ежегодный День радио установлен 7 мая в честь открытия А.С. Поповым принципа беспроводной передачи информации и использования электромагнитных волн.

Открытие инфракрасного излучения относится к 1800 году и было осуществлено английским ученым-астрономом, первооткрывателем планеты Уран Уильямом Гершелем (Frederick William Herschel, 1738—1822) [2]. В 1920 году профессор Московского государственного университета А.А. Глаголева-Аркадьева своими исследованиями полностью устранила следы гипотетичности и подтвердила электромагнитную природу инфракрасного излучения [3].

Ультрафиолетовое излучение открыл Иоганн Вильгельм Риттер (Johann Wilhelm Ritter, 1776—1810) в 1801 году при исследованиях химического воздействия различных участков светового спектра на хлорид серебра [4].

Таблица 1.1. Диапазоны электромагнитного излучения

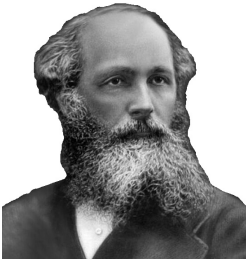
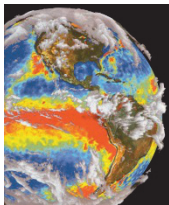
 М. Фарадей  Д. Максвелл				
Название диапазона	Поддиапазон	Длины волн (км, м, мм, мкм, нм, пм)	Частоты (Гц)	
Радиоизлучение (радиоволны) 	сверхдлинные	более 10 км	менее $3 \cdot 10^4$	 Г. Маркони  А.С. Попов
	длинные	10—1 км	$3 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^5$	
	средние	1 км — 100 м	$3 \cdot 10^5$ — $3 \cdot 10^6$	
	короткие	100—10 м	$3 \cdot 10^6$ — $3 \cdot 10^7$	
	ультракороткие	10 м — 1 мм	$3 \cdot 10^7$ — $3 \cdot 10^{11}$	
Микроволновое излучение		1 м — 1 мм	$3 \cdot 10^8$ — $3 \cdot 10^{11}$	
Децимиллиметровое излучение		1 мм — 100 мкм	$3 \cdot 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{12}$	
Инфракрасное излучение 	0,78—1,0 NIR 1,0—3,0 SWIR 3—5 MWIR 8—14 LWIR 14—30 VLWIR 30—100 ULWIR	100—0,78 мкм	$3 \cdot 10^{12}$ — $4,3 \cdot 10^{14}$	 У. Гершель  А.А.Глаголева- Аркадьева
Видимое излучение		0,78—0,38 мкм	$4,3 \cdot 10^{14}$ — $7,5 \cdot 10^{14}$	
Ультрафиолетовое излучение		0,38 мкм — 10 нм	$7,5 \cdot 10^{14}$ — $3 \cdot 10^{16}$	

Таблица 1.1. (Окончание)

Название диапазона	Поддиапазон	Длины волн (км, м, мм, мкм, нм, пм)	Частоты (Гц)	
Рентгеновское излучение 		10 нм — 5 пм	$3 \cdot 10^{16}$ — $6 \cdot 10^{19}$	 В. Рентген
Гамма-излучение 		менее 5 пм	более $6 \cdot 10^{19}$	 П. Виллар

Первооткрывателем гамма-излучения стал французский физик и химик Поль Ульриш Виллар (Paul Ulrich Villard, 1860—1934), установивший существование в потоке радиации новой компоненты, не отклонявшейся магнитным полем [5]. Эту новую компоненту в 1903 году Резерфорд, в отличие от уже известных к тому времени альфа- и бета-лучей, предложил назвать гамма-лучами.

В настоящей книге основное внимание уделяется инфракрасному диапазону электромагнитного излучения. Попытки создания устройств, позволяющих обнаруживать и визуализировать источники инфракрасного излучения, особенно активно начавшиеся после Второй мировой войны, привели к становлению нового научного направления, названного оптоэлектроникой, основные этапы развития которой описаны в работах [6—8]. Устройства оптоэлектроники составляют основу приборов ночного видения, систем тепловидения, тепловизионной, лазерной локации, оптических средств передачи информации и др. Особый интерес представляют исследования и разработки элементной базы современной оптоэлектроники — фотосенсорных устройств, чувствительных в ближней инфракрасной (NIR, 0,78—1,0 мкм), коротковолновой инфракрасной (SWIR, 1,0—3,0 мкм), средневолновой инфракрасной (MWIR, 3—5 мкм), длинноволновой инфракрасной (LWIR, 8—14 мкм), дальней инфракрасной (VLWIR, 14—30 мкм) и сверхдальней инфракрасной (30—100 мкм) областях электромагнитного излучения. Диапазон длин волн 0,1—1 мм относят к диапазону децимиллиметровых волн, лежащему между инфракрасным и микроволновым диапазонами и считающемуся диапазоном гипервысоких частот.

Ультрафиолетовый диапазон также принято делить на несколько поддиапазонов: экстремальный (0,01—0,121 мкм), коротковолновой С (Far UV: 0,1—0,28 мкм), средневолновой В (Middle UV: 0,280—0,315 мкм), длинно-

волновой А (Near UV: 0,315—0,4 мкм). Главным для всего живого, безусловно, является видимый диапазон электромагнитного излучения 0,38—0,78 мкм (рис. 1.1), лежащий в основе нескольких фундаментальных природных процессов. Важнейшим из таких процессов в природе является фотосинтез, благодаря которому живые организмы получают для дыхания кислород, а растения синтезируют органические вещества (углеводы), необходимые для своей жизнедеятельности. Упрощенное уравнение фотосинтеза, происходящего в растениях, имеет вид [9]

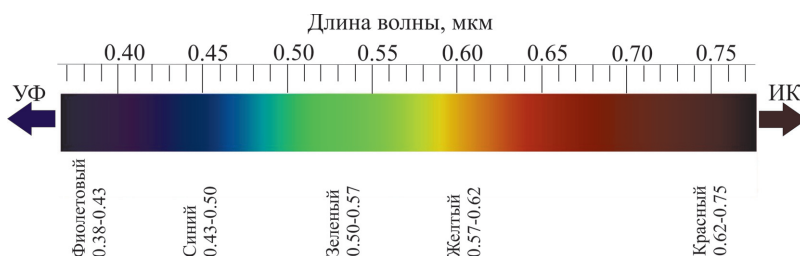
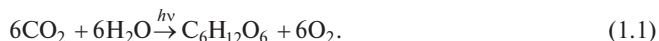


Рис. 1.1. Спектр электромагнитного излучения видимого диапазона

В основе фотосинтеза, как это видно из уравнения (1), лежит процесс поглощения фотонов видимого света (в некоторых случаях инфракрасного излучения) в светособирающих комплексах (молекулах хлорофила), содержа-

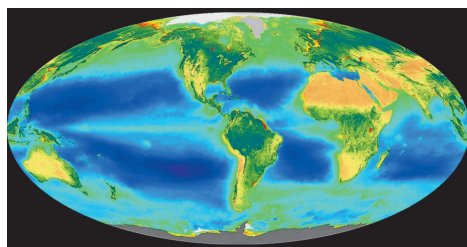


Рис. 1.2. Распределение фотосинтеза в Мировом океане (синий цвет) и на поверхности Земли (зеленый цвет)

щихся преимущественно в листьях растений. В результате процесса фотонного поглощения образуются углеводы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) и кислород. Кроме наземных растений фотосинтез совершается в зеленых водорослях, которые выделяют около $3,6 \cdot 10^{11}$ тонн кислорода в год (рис. 1.2). Без растений и кислорода, выделяющегося в процессе фотосинтеза, жизнь на Земле была бы просто невозможна.

Другой важнейшей функцией, которая обеспечивается видимым

диапазоном, является зрение. Посредством зрения человек получает более 70% информации об окружающем мире. Однако, несмотря на уникальные характеристики человеческого глаза как оптического фотосенсора [10], он способен воспринимать только предметы, изображение которых лежит в сравнительно узком интервале длин волн электромагнитного излучения — от ~0,38 мкм до ~0,72 мкм (видимая область), оставляя за пределами видимости объекты из остальных диапазонов электромагнитных колебаний. Впрочем, в научной литературе нередко встречаются описания

экспериментов, подтверждающих способность человека при определенных условиях видеть излучение с длиной волны более 0,9 мкм. Такое явление наблюдалось и описано в работе [11]. Эффект проявляется, когда два фотона с длиной волны, лежащей за пределами видимого диапазона, одновременно поглощаются молекулой пигментного белка в сетчатке глаза и запускают химические изменения, которые мозг интерпретирует как световую вспышку.

Для представителей животного мира зрение за пределами видимого диапазона не является редкостью.

К числу наиболее известных животных, обладающих ИК-зрением, относятся змеи семейств питонов, ложноногих, подсемейства ямкоголовых [12]. У них есть специальные органы, называемые ямками Лоренца (рис. 1.3), которые расположены между глазами и ноздрями. Благодаря этим ямкам змеи обнаруживают ИК-излучение тепловых объектов и способны охотиться даже в полной темноте. Некоторые виды летучих мышей могут на значительных расстояниях обнаруживать места с повышенной температурой, где обитают насекомые, которыми они питаются. Среди насекомых ИК-зрением обладают некоторые виды жуков-долгоносиков, с его помощью они находят недавно сгоревшие деревья, так как им необходим уголь для питания личинок.

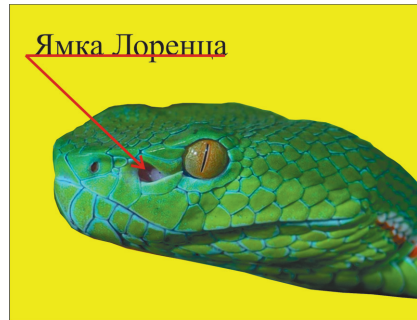


Рис. 1.3. Термочувствительные органы (ямки Лоренца) змеи Куфии Фогеля

Отдельные виды животных, например северные олени, имеют в сетчатке глаз ультрафиолетовые рецепторы, чувствительные к УФ-излучению с длиной волны около 0,38 мкм, которые помогают им находить пищу. Лишайники и мох поглощают ультрафиолет и выглядят темными на фоне снега. УФ-зрением обладают многие насекомые (например, пчелы, некоторые виды комаров и бабочек), рыбы, амфибии.

Спектр видимого света, показанный на рис. 1.1, состоит из трех основных цветов: красного (R, Red), зеленого (G, Green) и синего (B, Blue). То, что мы называем «цветом», является лишь порождением нашего сознания и отражением способности различать электромагнитные волны с разной длиной. Эта способность обеспечивается присутствием в сетчатке глаза особых чувствительных к излучению рецепторов, называемых «колбочками» (их общее количество — около 7 миллионов). С их помощью человеческий мозг по-разному воспринимает электромагнитные волны различной длины. Цветовое восприятие зависит от множества факторов, таких как окружающий фон, степень освещенности наблюдаемого объекта, структура его поверхности и др. [13]. Одним из способов описания цветов является модель RGB (рис. 1.4), названная так в соответствии с английскими названиями трех основных цветов (R — красный, G — зеленый, B — синий). Человеческий

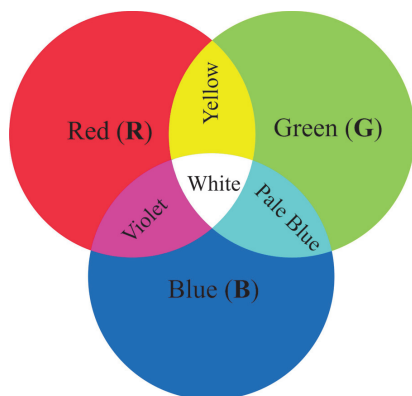


Рис. 1.4. Модель RGB для описания цветов видимого излучения

глаз способен воспринимать любой цвет, появляющийся в результате смешивания этих трех цветов в определенных пропорциях.

В природе нет белого и черного цветов. Белый цвет — это результат суммарного воздействия на глаз световых излучений с различной длиной волны. Отсутствие такого воздействия должно восприниматься как черный цвет. Большинство живых существ, в отличие от человека, обладает ограниченным цветовым зрением: например, собаки видят всё в серо-буро-синем и оранжевом цветах. Для других животных характерно черно-белое зрение.

1.2. Природа электромагнитного излучения. Формулы Планка, Стефана — Больцмана, Вина

Как только возникает волнообразное изменение электрического поля, к нему немедленно добавляется магнитная волна — аналогичное волнообразное изменение магнитного поля [14—15]. Разделить их невозможно. Точное описание электромагнитных волн дают уравнения классической электродинамики, полученные Максвеллом (James Clerk Maxwell, 1831—1879), которые позволяют рассматривать электромагнитные волны, как и заряды, их порождающие, в качестве самостоятельных природных объектов. Именно Максвелл первым пришел к выводу, что переменные электрические и магнитные поля, отделившись от объектов, в которых они были порождены движущимися электрическими зарядами, способны самостоятельно двигаться через вакуум со скоростью, равной $c = 299792458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Считая эту величину по определению точной, за единицу длины (метр) принимают расстояние, которое электромагнитная волна в вакууме проходит за $1/299792458$ долю секунды.



Д. Максвелл

Наиболее полной на сегодня теорией, описывающей взаимодействие электромагнитного излучения с заряженными частицами, является квантовая электродинамика [16], за создание которой С. Томонага (Tomonaga Shinichiro, 1906—1979), Д. Швингеру (Julian Seymour Schwinger, 1918—1994) и Р. Фейнману (Richard Phillips Feynman, 1918—1994) была присуждена Нобелевская премия по физике (1965). Классическая электродинамика является частным случаем квантовой электродинамики.



С. Томонага (Япония)



Д. Швингер (США)



Р. Фейнман (США)

Все нагретые тела испускают электромагнитное излучение. Физическое тело, которое при любой температуре поглощает все падающее на него электромагнитное излучение с любой длиной волны, называется *абсолютно черным телом* (АЧТ, англ. black body — ВВ). Распределение энергии по длине волны в спектре излучения АЧТ при заданной температуре характеризуется излучательной способностью $r(\lambda, T)$, равной мощности излучения с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн и имеющей размерность $[\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}]$. Тогда полный поток $R(T)$ излучения всех длин волн с единицы поверхности АЧТ равен

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T) d\lambda \quad [\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}]. \quad (1.2)$$

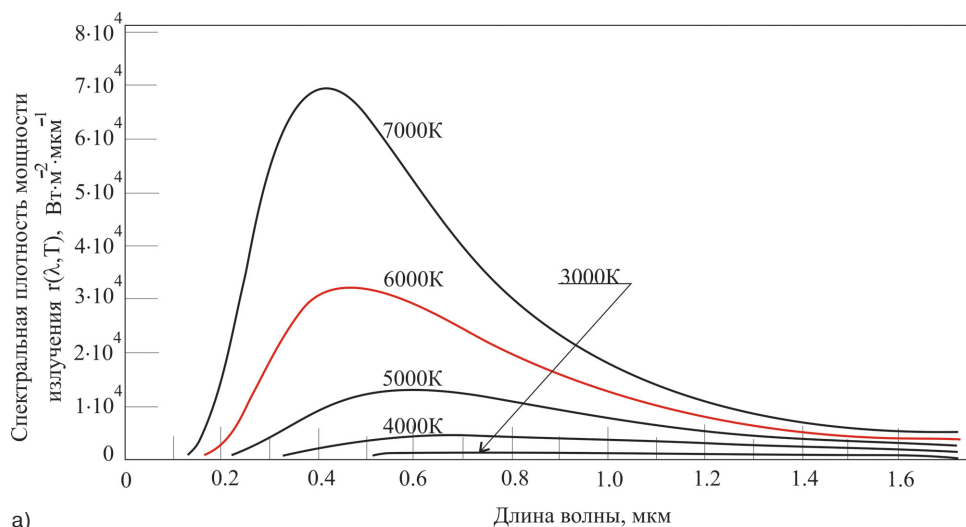
Выражение для излучательной способности АЧТ было получено Максом Планком (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858—1947) в 1900 году:

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad [\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}], \quad (1.3)$$

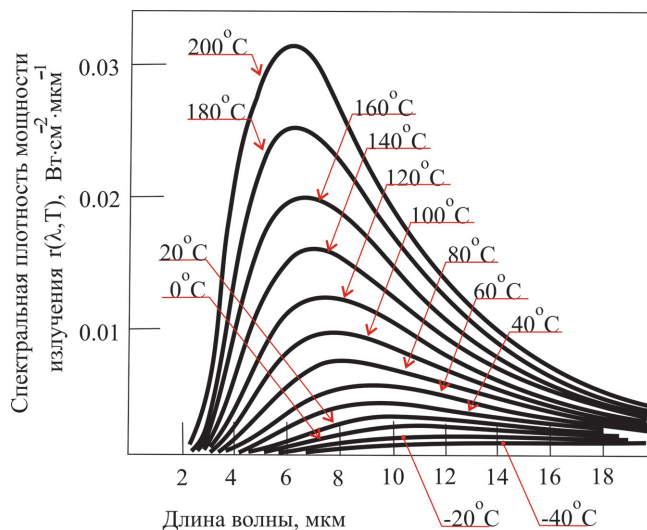
где c — скорость света в вакууме, равная $2,99793 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$; h — постоянная Планка, равная $6,62517 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$; k — постоянная Больцмана, равная $1,38044 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1}$, T — абсолютная температура. Планк вывел формулу (1.3), рассмотрев баланс энергии двумя видами осцилляторов: частицами вещества, испускающими и поглощающими электромагнитное излучение с длиной волны λ , и осцилляторами, представляющими собой поле электромагнитного излучения с той же длиной волны. Макс Планк предположил, что такие осцилляторы могут находиться только в состояниях с дискретной энергией и обмениваются между собой дискретными порциями энергии $\Delta E = hc/\lambda$. Это предположение впоследствии стало основанием для введения понятия кванта электромагнитного излучения (фотона) и лежит в основе квантовой электродинамики, которую Р. Фейнман назвал «жемчужиной физики» [17]. На рис. 1.5 показаны излучательные способности АЧТ, вычисленные в соответствии с формулой Планка для различных температур. В 1919 году Макс Планк получил Нобелевскую премию за открытие квантов энергии и развитие физики.



Макс Планк



а)



б)

Рис. 1.5. Излучательная способность $r(\lambda, T)$ АЧТ с различными температурами: а) из интервала от 3000 до 7000 К; б) из интервала от -40°C до 7000 К

Полный поток излучения всех длин волн с единицы поверхности АЧТ с температурой T в соответствии с законом Стефана — Больцмана вычисляется и записывается через фундаментальные константы путем интегрирования по всем длинам волн формулы Планка (1.3):

$$R(T) = \int_0^\infty \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, \quad (1.4)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$.

Закон Стефана — Больцмана был эмпирически открыт Йозефом Стефаном (Joseph Stefan, 1835—1893) в 1879 году, а в 1884 году был выведен теоретически Людвигом Больцманом (Ludwig Eduard Boltzmann, 1844—1906) в рамках термодинамики. Закон говорит только о полном потоке излучения АЧТ всех длин волн. Распределение же энергии по спектру излучения описывается зависимостью $r(\lambda, T)$, выведенной Планком. Зависимость $r(\lambda, T)$ имеет единственный максимум, положение которого определяется законом Вина:

$$\lambda_{\max} = b \cdot T^{-1}, \quad (1.5)$$

где $b = 2898$ мкм·К. Закон был установлен в 1893 году Вильгельмом Вином (Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien, 1864—1928, лауреат Нобелевской премии 1911 года по физике за работы по тепловому излучению). В соответствии с этим законом максимум излучения человека с температурой 37°C приходится на длину волны 9,5 мкм, а полный поток излучения с поверхности человеческого тела площадью $1,9\text{ м}^2$ составляет примерно 9,9 Вт. Мощность теплового излучения человеческой ладони — 0,075 Вт.



Й. Стефан



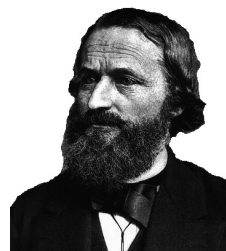
Л. Больцман



В. Вин

Несмотря на то что законы Стефана — Больцмана и Вина были известны до формулы Планка, они являются ее прямым следствием.

Разработка моделей АЧТ как эталонных источников инфракрасного излучения имеет важнейшее значение для фотоники и фотосенсорики. Еще в 1860 году Г. Кирхгоф (Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887) предложил в качестве эталонного источника ИК-излучения использовать полость изотермического сферического сосуда радиуса R с отверстием радиуса r для выхода излучения ($R < r$) и сформулировал требования, необходимые для его конструирования. Основным требованием при выборе материала и конструкции излучающей полости эталонного АЧТ является требование изотермичности.



Г. Кирхгоф

Материал полости должен иметь высокую теплопроводность и минимально возможный коэффициент отражения электромагнитного излучения, то есть поглощать максимальную долю излучения независимо от его спектрального состава. В этом случае спектральная характеристика создаваемого таким АЧТ излучения определяется только температурой полости и не зависит от формы и материала ее стенок. Самым высоким коэффициентом по-

глошения (99,965%) в ИК-области до 2019 года считалось композитное покрытие с названием Vantablack, разработанное в 2014 году английской фирмой SurreyNanoSystems на основе слоя нанотрубок (диаметр 20 нм, длина 14–20 мкм), вертикально расположенных на алюминиевой поверхности (рис. 1.6). Однако в 2019 году Массачусетский технологический институт (MIT) сообщил о создании аналогичного материала с коэффициентом поглощения 99,995% [18]. Стоимость таких покрытий чрезвычайно высока. Для более дешевых моделей АЧТ, работающих в области невысоких температур, чаще всего используются металлические материалы, а для высокотемпературных применяются графит и керамика [19].

Закон Планка для спектрального излучения фотонов, испускаемых АЧТ, принимает вид [20]

$$q(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{\frac{hc}{e^{kT\lambda}} - 1} [\text{фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}], \quad (1.6)$$

где все обозначения имеют то же смысл, что и в формуле (1.3). Закон Стефана — Больцмана для полного числа фотонов, излучаемых с единицы поверхности АЧТ с температурой T в единицу времени, запишется в виде

$$Q(T) = \sigma_q T^3 [\text{фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}], \quad (1.7)$$

где $\sigma_q = 1,5204 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{К}^{-3}$ — постоянная Стефана — Больцмана в фотонных единицах.

Для излучения АЧТ в диапазоне длин волн $\lambda_1 - \lambda_2$ справедлива формула

$$R_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}(T) = 2\pi hc^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 \left[\frac{hc}{e^{kT\lambda}} - 1 \right]} [\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}], \quad (1.8)$$

или в форме, более удобной для применения с использованием табличных значений:

$$R_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}(T) = R_{0 \rightarrow \lambda_2}(T) - R_{0 \rightarrow \lambda_1}(T), \quad (1.9)$$

$$R_{0 \rightarrow \lambda_2} = 2\pi hc^2 \int_0^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 \left[\frac{hc}{e^{kT\lambda}} - 1 \right]}, \quad R_{0 \rightarrow \lambda_1} = 2\pi hc^2 \int_0^{\lambda_1} \frac{d\lambda}{\lambda^5 \left[\frac{hc}{e^{kT\lambda}} - 1 \right]}. \quad (1.10)$$

Полный поток излучения $R(T)$ [Вт·см⁻²] всех длин волн с единицы поверхности абсолютно черного тела описывает скорость передачи энергии с единицы излучающей поверхности [Дж·см⁻²·сек⁻¹], но не дает информации об угловой зависимости испускаемого излучения. Для этого в фотометрии вводится понятие энергетической яркости B (*brightness*), где $B = B(T)$. Между полным потоком излучения $R(T)$ и энергетической яркостью $B(T)$ идеально диффузного излучателя¹, такого как абсолютно черное тело, существует простое соотношение [20]:

$$B(T) = \frac{1}{\pi} R(T) [\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{стер}]. \quad (1.11)$$

¹ Тепловое излучение с поверхности АЧТ представляет собой диффузное излучение, которое распределяется равномерно во всем пространстве полусферы.

1.3. Излучение Солнца. Строение и влияние земной атмосферы

Поверхность земного шара постоянно испытывает воздействие потока электромагнитного излучения. Источниками такого излучения в дневное время суток является Солнце, в ночное время — Луна, звезды, рассеянный солнечный свет от Солнца, находящегося по другую сторону земного шара, ночное свечение атмосферы и др. Кроме того, со стороны космоса Земли достигает электромагнитное излучение космических тел, галактик, слабое реликтовое излучение. Существуют и внутренние источники электромагнитного излучения, которые вносят вклад в общий тепловой баланс Земли. К ним относятся распад долгоживущих радиоактивных элементов (уран-235, уран-238, торий-232, калий-40), приливное трение и др. [21].

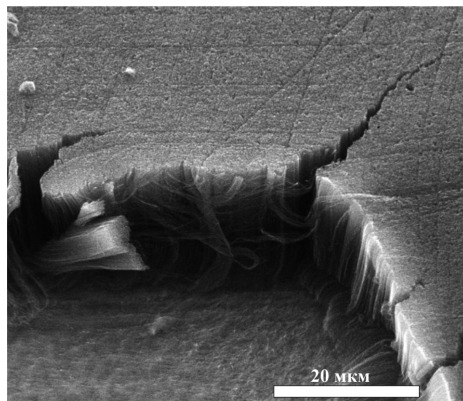


Рис. 1.6. SEM-изображение композитного покрытия на основе углеродных нанотрубок, разработанное фирмой SurreyNanoSystems

Основная доля электромагнитного излучения, поступающего в систему атмосфера — Земля, обеспечивается Солнцем в спектральном диапазоне 0,1—4,0 мкм (рис. 1.7, 1.8). Плотность мощности солнечного излучения на расстоянии 1 астрономической единицы (среднее расстояние от Земли до Солнца равно 149597870700 м) принята равной $S_0 = (1366 \pm 1) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (солнечная постоянная)¹. Освещенность площадки, расположенной перпендикулярно световому потоку на том же расстоянии, принимается равной $1,37 \cdot 10^5$ лк. Перечисленные выше внутренние источники по сравнению с величиной S_0 незначительны и составляют около $80 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. При достижении этим потоком уровня моря из-за потерь на поглощение, отражение и рассеяние его величина уменьшается с $1366 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ примерно до $1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ на экваторе. Смена дня и ночи снижает этот поток еще в 3 раза. Усредненный по времени и по поверхности Земли поток солнечной энергии составляет $341 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ или $1,74 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$ в расчете на полную поверхность земного шара (510065600 км^2). Это означает, что в течение суток поверхность земного шара получает от Солнца в среднем около $4,18 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{час}$ энергии.

Форма спектра солнечного излучения за пределами атмосферы хорошо описывается формулой Планка (1.3) для АЧТ с температурой порядка 6000 К. Непрерывный солнечный спектр излучения, достигающего Земли,

¹Измерения этой величины, проведенные со спутников Земли, показали, что ее вариации за несколько десятков лет могут составлять величину порядка $1,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, а вековые вариации могут достигать $10 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ [22].

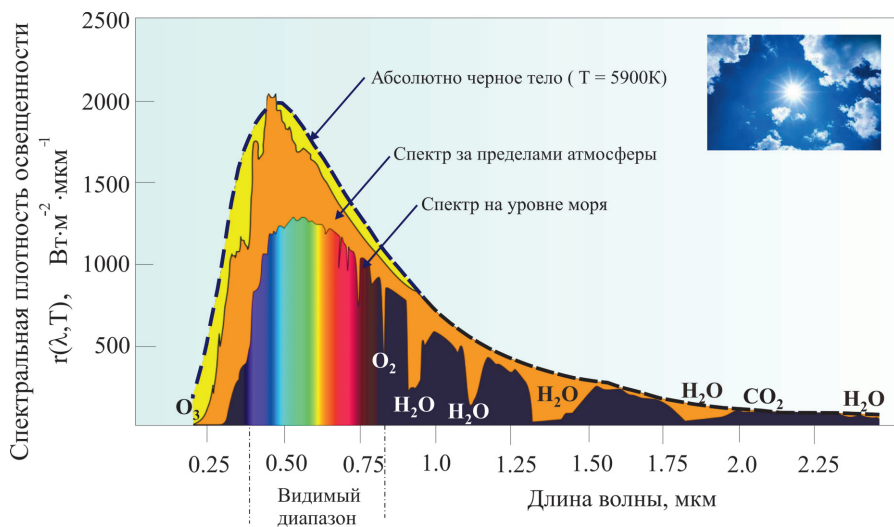


Рис. 1.7. Излучательная способность Солнца за пределами атмосферы и у поверхности Земли. Для сравнения штриховой кривой дана излучательная способность АЧТ с температурой 5900 К

формируется во внешнем слое атмосферы Солнца — фотосфере толщиной примерно 300—400 км. Фотосфера представляет собой сильно разреженный (плотность в среднем порядка 10^{-9} г·см $^{-3}$) раскаленный газ, состоящий из газообразных водорода (74%), гелия (25%) и таких элементов, как кислород, железо, углерод, магний, сера и др., а также свободные радикалы CO, CH, NH, OH и др., на долю которых приходится порядка 1% от общей массы фотосферы. Плотность полной мощности равновесного излучения АЧТ с температурой 6000 К в соответствии с законом Стефана — Больцмана составляет величину $7,4 \cdot 10^7$ Вт·м $^{-2}$. Расположенные над фотосферой хромосфера и корона практически без поглощения пропускают непрерывное электромагнитное излучение фотосферы. Однако для некоторых длин волн хромосферный слой непрозрачен и в спектре появляются линии поглощения, которые часто называют фраунгоферовыми линиями. В солнечном спектре обнаружено более 30000 линий, которые отождествляются с более чем 70 химическими элементами.

Внеатмосферные исследования обнаружили солнечное излучение в рентгеновском, ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и радиоволновом диапазонах (рис. 1.8). Максимум энергии в солнечном спектре соответствует длине волны 0,46 мкм. При этом практически вся энергия излучения Солнца сосредоточена в интервале длин волн от 0,15 мкм до 0,5 см. В этой области фотосферное излучение близко к излучению АЧТ с температурой порядка 6000 К. В рентгеновском и УКВ-диапазонах форма кривых $r(\lambda, T)$ отличается от кривых Планка (1.3).

Солнце представляет собой плазменное образование шаровидной формы с радиусом $6,96 \cdot 10^{10}$ см и массой $1,99 \cdot 10^{33}$ г со сложной внутренней структу-

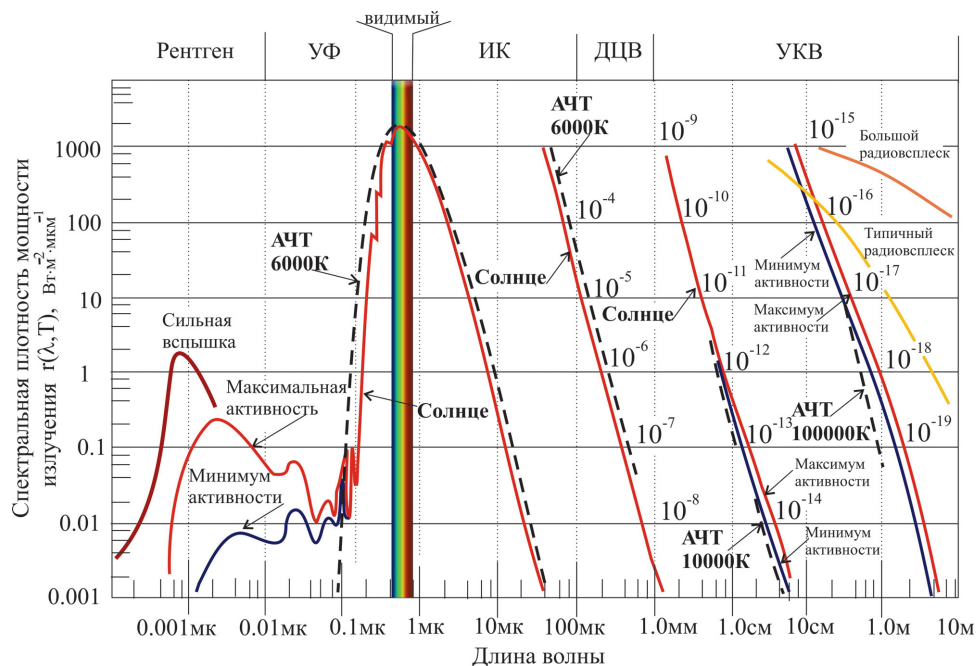


Рис. 1.8. Спектральные зависимости плотности мощности излучения Солнца $r(\lambda, T)$, измеренные в широком спектральном диапазоне, от рентгеновского до ультракоротких волн (сплошные линии). Штриховые линии — расчет по формуле Планка для АЧТ с различными температурами. Для длин волн более 30 мкм порядки величин $r(\lambda, T)$ указаны отдельно рядом с кривыми

рой. Если на поверхности фотосферы эффективная температура близка к 6000 К, то в центре Солнца она достигает значений порядка $(1-1,5) \cdot 10^7$ К и поддерживается ядерными реакциями синтеза атомов гелия из водорода. Из закона Планка следует, что при такой температуре энергия фотонов, пришедших на поверхность фотосферы из недр Солнца, приходится на рентгеновский диапазон. Однако из-за многократных поглощений и переизлучений рентгеновское излучение доходит до поверхностных слоев за значительное время и с существенно измененным спектром. Тем не менее для земного шара Солнце является самым эффективным источником рентгеновского излучения в диапазоне длин волн от $0,1 \text{ \AA}$ до $100 \text{ \AA}$. Усредненный поток рентгеновского излучения от Солнца, достигающий верхней границы земной атмосферы достигает величины порядка $10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Это излучение полностью поглощается атмосферой, но играет заметную роль в околоземном космическом пространстве. Рентгеновское излучение Солнца состоит из двух компонент — излучения солнечной короны, имеющей среднюю температуру порядка 10^5 К, и излучения так называемых активных областей поверхности фотосферы (солнечных пятен). Поток рентгеновского излучения может существенно возрастать во время солнечных вспышек.

В УКВ- и радиодиапазоне излучение Солнца существенно отличается от фотосферного. С увеличением длины волны ($\lambda > 10$ см) солнечное излучение поступает к Земле от все более нагретых уровней солнечной атмосферы с эффективной температурой более 100000 К, так как хромосфера и корона оказываются непрозрачными для излучения из радиодиапазона. Атмосфера Земли пропускает радиоволны из космоса с длинами от нескольких миллиметров до десятков метров.

Наряду с высокотемпературным солнечным излучением со стороны космоса земной шар непрерывно облучается самым «холодным» из известных излучений, имеющих электромагнитную природу, — реликтовым излучением, равномерно заполняющим Вселенную.

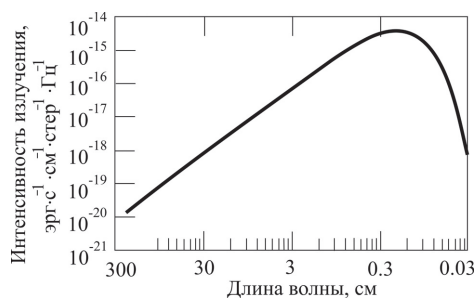


Рис. 1.9. Спектральная зависимость интенсивности реликтового излучения

Спектр реликтового излучения соответствует спектру излучения АЧТ с температурой 2,725 К (рис. 1.9), а среднеквадратичное отклонение температуры составляет примерно 18 мК. Его максимум находится на длине волны 1,9 мм и соответствует частоте 160,4 ГГц. Плотность реликтового излучения составляет примерно $4 \cdot 10^{-14}$ Дж·м⁻³. Реликтовое излучение лежит в основном в диапазоне микроволнового электромагнитного излучения, захватывая на границах

ультракороткие радиоволны и область децимиллиметрового излучения. Теоретически реликтовое излучение было предсказано Г. Гамовым (1904—1968) в 1948 г. в рамках теории Большого взрыва, экспериментально обнаружено в 1965 г. А. Пензиасом (Arno Allan Penzias) и Р. Вильсоном (Robert Woodrow Wilson), получившими за свое открытие Нобелевскую премию (1978).

Достигающий земной поверхности поток электромагнитного излучения и поток на верхней границе атмосферы заметно отличаются вследствие влияния атмосферы (рис. 1.7). Атмосфера состоит главным образом из азота (N₂ — средняя объемная концентрация азота в тропосфере ~78,1 %), кислорода (O₂ — 21 %) и аргона (Ar — 0,92 %). Другие компоненты земной воздушной атмосферы, за исключением водяного пара (H₂O), распределены следующим образом: углекислый газ (CO₂ — $3,3 \cdot 10^{-2}$ %), неон (Ne — $1,82 \cdot 10^{-3}$ %), гелий (He — $5,2 \cdot 10^{-4}$ %), метан (CH₄ — $1,6 \cdot 10^{-4}$ %), криптон (Kr — $1,1 \cdot 10^{-4}$ %), водород (H₂ — $5 \cdot 10^{-5}$ %), закись азота (N₂O — $3,5 \cdot 10^{-5}$ %), окись углерода (CO — $7 \cdot 10^{-6}$ %), озон (O₃ — 10^{-6} %), окись и двуокись азота (NO, NO₂ — от 0 до $2 \cdot 10^{-6}$ %). В атмосфере можно обнаружить и следы многих других газов, которые, однако, не оказывают сколь-нибудь заметного влияния на прохождение электромагнитного излучения.

Усредненная в масштабе земного шара величина давления на уровне моря равна 1013 мбар = 760,3 мм рт. ст. = 1,013 Н/м². Изменения этой величины заключены в интервале 980—1044 мбар, то есть отклонения от средне-