

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УЛЬЯНОВСКОЕ ВЫСШЕЕ АВИАЦИОННОЕ УЧИЛИЩЕ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (ИНСТИТУТ)»**

ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

Ульяновск 2014

УДК 53

ББК В3я7

П75

Прикладная физика: учеб. пособие / сост. Н. Ю. Громова, С. С. Самохина, редактирование Л. В. Макушкина, комп. верстка Н. П. Красильниковой. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2014. – 116 с., тираж 200 экз.

Содержит теоретический материал практического использования основных законов и понятий физики в технике. Рассмотрены принципы работы необходимых теоретических устройств и приборов, используемых в авиации. Даны задачи по темам и вопросы для самопроверки.

Рекомендовано курсантам и студентам заочной формы обучения направлений подготовки 162001.65 – Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного пространства, 161000.62 – Аэронавигация, 280700.65 – Техносферная безопасность, а также может быть полезно обучающимся других специализаций и направлений подготовки.

Печатается по решению Редсовета института.

УДК 53

ББК В3я7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Элементы механики газов и жидкостей.....	6
§ 1. Давление в жидкости и газе.....	6
§ 2. Уравнение неразрывности.....	11
§ 3. Уравнение Бернулли и следствия из него.....	12
§ 4. Вязкость (внутреннее трение). Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкостей.....	20
§ 5. Методы определения вязкости.....	23
§ 6. Движение тел в жидкостях и газах.....	25
Вопросы для самопроверки.....	27
Задачи.....	28
Глава 2. Электрические, оптические и тепловые свойства твердых тел.....	31
§ 7. Основы зонной теории кристаллов.....	31
§ 8. Электрические свойства металлов.....	33
§ 9. Электрические свойства полупроводников.....	36
§ 10. Примесные полупроводники.....	39
§ 11. Применение полупроводников.....	42
§ 12. Контактные явления в полупроводниках. Электронно-дырочный переход и его свойства. Образование <i>p-n</i> -перехода.....	43
§ 13. Прямое и обратное смещение <i>p-n</i> -перехода.....	45
§ 14. Полупроводниковые диоды.....	47
§ 15. Биполярные транзисторы.....	49
§ 16. Оптические свойства полупроводников.....	52
§ 17. Другие типы полупроводниковых приборов.....	59
§ 18. Наноэлектроника.....	62
§ 19. Термоэлектрические явления в металлах и полупроводниках.....	63
Вопросы для самопроверки.....	70
Задачи.....	71
Глава 3. Источники и приемники различных видов излучений.....	74
§ 20. Тепловое излучение и его характеристики.....	74
§ 21. Применение теплового излучения.....	78
§ 22. Внешний фотоэффект.....	82

§ 23. Радиоактивность.....	86
§ 24. Закон радиоактивного распада	89
§ 25. Виды радиоактивного излучения	91
§ 26. Проникающая радиация. Дозы излучения и поглощения.....	96
§ 27. Защита от γ -излучения. Закон поглощения	100
Вопросы для самопроверки	103
Задачи	104
Рекомендуемая литература.....	108
Библиографический список.....	108
Приложения	Ошибка! Закладка не определена.

ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс органически связан с физикой. В радиоэлектронике, ядерной энергетике, ракетной и полупроводниковой технике, автоматике и телемеханике, вычислительной и контрольно-измерительной и других областях техники широко применяются достижения физики. Причем, если в прошлом между открытием нового физического явления и его практическим использованием проходили многие десятилетия, то современное развитие физики и техники характеризуется резким сокращением этого промежутка времени.

Физика является базовой общенаучной дисциплиной для любой специализации технического направления. Цель ее изучения: обеспечить необходимые знания для успешного освоения естественно-научных, общепрофессиональных и специальных дисциплин. Знание основополагающих законов физики поможет молодому специалисту быстрее освоить специальность, грамотно эксплуатировать авиационную технику, а в случае необходимости – принимать обоснованные и грамотные решения по ее совершенствованию и модернизации.

Знать физику – значит уметь применять полученные сведения о физических явлениях и закономерностях для решения практических задач.

Современная практическая деятельность людей очень разнообразна. Изучить все многообразные практические применения физических знаний не представляется возможным хотя бы из-за ограниченности учебного времени. Поэтому в данном учебном пособии рассматриваются вопросы применения физических знаний, важных для авиационных специалистов по направлению подготовки – Аэронавигация. Эти области являются, вместе с тем, наиболее универсальными. Физические явления и процессы данных разделов в настоящее время применяются на транспорте, в промышленности, сельском хозяйстве, науке и быту.

ГЛАВА 1. ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

§ 1. Давление в жидкости и газе

Молекулы газа, совершая беспорядочное, хаотическое движение, не связаны или весьма слабо связаны силами взаимодействия, поэтому они движутся свободно и в результате соударений стремятся разлететься во все стороны, заполняя весь предоставленный им объем, т. е. объем газа определяется объемом того сосуда, который газ занимает.

Жидкость же, имея определенный объем, принимает форму того сосуда, в который она заключена. Но в жидкостях в отличие от газов среднее расстояние между молекулами остается практически постоянным, поэтому жидкость обладает практически неизменным объемом.

Свойства жидкостей и газов во многом отличаются, однако в ряде механических явлений их поведение определяется одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Поэтому **гидроаэромеханика** – раздел механики, изучающий равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами, – использует *единый подход* к изучению жидкостей и газов.

В механике с большой степенью точности жидкости и газы рассматриваются как сплошные, непрерывно распределенные в занятой ими части пространства. Плотность же газов от давления зависит существенно. Из опыта известно, что сжимаемостью жидкости во многих задачах можно пренебречь и пользоваться единым понятием несжимаемой жидкости – жидкости, плотность которой всюду одинакова и не изменяется со временем.

Если в покоящуюся жидкость поместить тонкую пластинку, то частицы жидкости, находящиеся по разные стороны от нее, будут действовать на каждый ее элемент ΔS с силами ΔF , которые независимо от того, как пластинка ориентирована, будут равны по модулю и направлены перпендикулярно площадке ΔS , т. к. наличие касательных сил привело бы частицы жидкости в движение (рис. 1).

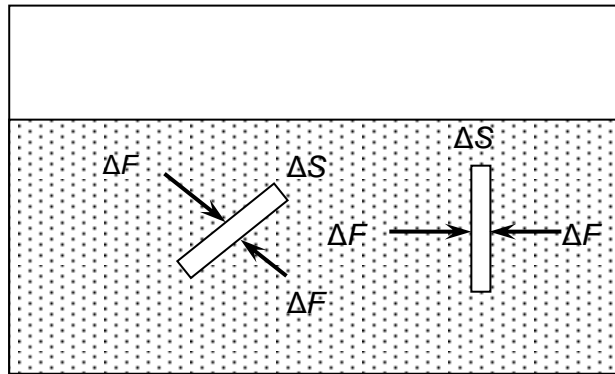


Рис. 1. Действие сил внутри жидкости

Физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади, называется давлением p жидкости:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}. \quad (1)$$

Единица давления – паскаль (Па): 1 Па равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м² (1 Па = 1 Н/м²).

Давление при равновесии жидкостей (газов) подчиняется *закону Паскаля* (Б. Паскаль (1623–1662) – французский ученый): давление в любом месте покоящейся жидкости одинаково по всем направлениям, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью.

Закон Паскаля позволяет объяснить действие распространенного в технике устройства – гидравлического пресса. Гидравлический пресс состоит из двух цилиндров разных диаметров, снабженных поршнями и соединенных трубкой (рис. 2).

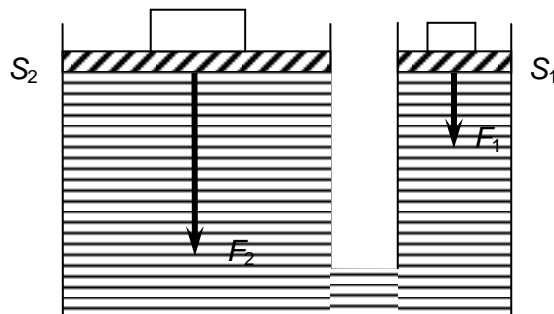


Рис. 2. Схема гидравлического пресса

Пространство под поршнями и трубка заполняются жидкостью. Обозначим площадь малого поршня через S_1 , а большого поршня – через S_2 . Пусть к малому поршню приложена сила F_1 , найдем, какую силу F_2 необходимо

приложить ко второму поршню, чтобы сохранить равновесие, т. е. для того, чтобы жидкость не была вытеснена из первого цилиндра во второй или обратно через соединяющую их трубку.

Если пренебречь силой тяжести, действующей на жидкость, то давление во всех точках жидкости должно быть одним и тем же. Но давление под первым поршнем равно $\frac{F_1}{S_1}$, а под вторым – $\frac{F_2}{S_2}$, следовательно, $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$, откуда находим,

$$F_2 = \frac{S_2}{S_1} F_1, \quad (2)$$

т. е. сила F_2 во столько раз больше силы F_1 , во сколько раз площадь второго поршня S_1 больше площади первого S_2 . Таким образом, при помощи гидравлического пресса можно малой силой уравновесить большую силу.

Для получения больших сил гидравлический пресс конструктивно удобнее рычажного или винтового пресса. Поэтому мощные прессы (например, для штамповки металла, выжимания масла из семян растений и прочее) делаются гидравлическими. В качестве жидкости употребляются вода или масло. Гидравлический пресс с горизонтально расположенным большим поршнем применяют для сдвигания с места (сообщения начального толчка) судна, спускаемого со стапелей в воду.

На законе Паскаля основано действие и других гидростатических машин. Закон нашел огромное применение в современном мире. Были созданы суперпрессы с давлением свыше 750 000 кПа. Закон лег в основу гидравлического привода, который в свою очередь обусловил появление гидроавтоматики, управляющей современными реактивными лайнерами, космическими кораблями, станками с числовым программным управлением, могучими самосвалами, горными комбайнами, прессами, экскаваторами и т. п.

Особую роль играют законы гидромеханики в таких сооружениях, как судоходные шлюзы (рис. 3).

Судоходный шлюз – гидротехническое сооружение на судоходных и водных путях для обеспечения перехода судов из одного водного бассейна (бьефа) в другой с различными уровнями воды в них (прил. 1). С двух сторон судоходный шлюз ограничен затворами, между которыми располагается смежная камера, позволяющая варьировать уровень воды в ее пределах.

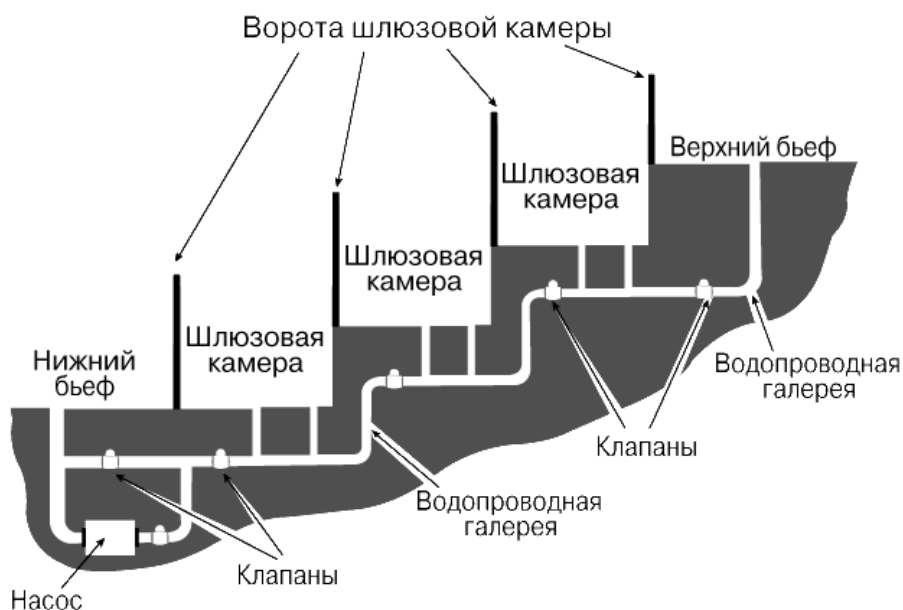


Рис. 3. Схема системы шлюзов

Процесс пропускания через шлюз называется **шлюзованием**. Перевод судов посредством судоходного шлюза осуществляется последовательным переводом в смежную камеру после выравнивания в них уровня воды. Использование шлюзов главным образом направлено на то, чтобы сделать водные пространства с различными уровнями воды в них более пригодными для судоходства.

Каждый шлюз имеет три главных элемента:

1. *Герметичная камера*, соединяющая верхнюю и нижнюю головные части канала и имеющая объем, достаточный для включения в себя одного или нескольких судов. Положение камеры фиксированное, однако, уровень воды в ней может изменяться.

2. *Ворота* – металлические щиты, расположенные на обоих концах камеры и служащие для впускания и выпуска судна из камеры перед началом шлюзования и герметизирующие камеру во время шлюзования.

3. *Водопроводное устройство* – устройство, предназначенное для наполнения либо опустошения камеры. Как правило, в качестве такого устройства используется плоский щитовой затвор. В крупных шлюзах могут использоваться перекачные насосы.

Принцип работы шлюза следующий (см. рис. 3):

1. Входные ворота открываются, и судно заходит внутрь камеры.
2. Входные ворота закрываются.
3. Открывается перепускной клапан, вызывая падение уровня воды в камере с находящимся в ней судном.

4. Впускные ворота открываются, судно выходит из камеры.

Шлюзование длится, как правило, от 10 до 20 минут в зависимости от размера камеры и перепада уровня воды. В случае если судно движется вверх по течению, процесс реверсируется: судно входит в полупустую камеру, затем открывается клапан, наполняя камеру водой и поднимая судно.

При шлюзовании, как правило, стараются чередовать направление пропускания судов: после того, как судно, идущее, к примеру, вниз по течению, завершило шлюзование, в камеру уже пониженным уровнем воды в ней может сразу же зайти судно, движущееся в обратном направлении. Таким образом, не требуется выполнять лишнее заполнение либо слив воды из камеры.

Рассмотрим, как влияет вес жидкости на распределение давления внутри покоящейся несжимаемой жидкости. При равновесии жидкости давление по горизонтали всегда одинаково, иначе не было бы равновесия. Поэтому свободная поверхность покоящейся жидкости всегда горизонтальна вдали от стенок сосуда. Если жидкость несжимаема, ее плотность не зависит от давления. Тогда при поперечном сечении S столба жидкости, его высоте h и плотности ρ вес $P = \rho gSh$, а давление на нижнее основание:

$$p = P/S = \rho gSh/S = \rho gh, \quad (3)$$

т. е. давление изменяется линейно с высотой. Давление ρgh называется **гидростатическим давлением**.

Согласно формуле (3), сила давления на нижние слои жидкости будет больше, чем на верхние, поэтому на тело, погруженное в жидкость, действует сила, определяемая *законом Архимеда*: на тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости выталкивающая сила, направленная вверх и равная весу вытесненной телом жидкости (газа):

$$F_A = \rho gV, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости, V – объем погруженного в жидкость тела.

Действие архимедовой силы позволяет поднимать затонувшие корабли (рис. 4). Заполненные водой резервуары закрепляют под днищем корабля (см. рис. 4, *а*), затем в них с помощью насосов нагнетают воздух. Сила тяжести судна с закрепленными резервуарами уменьшается, по сравнению с архимедовой силой ($G < F$), и корабль начинает всплывать (см. рис. 4, *б*).

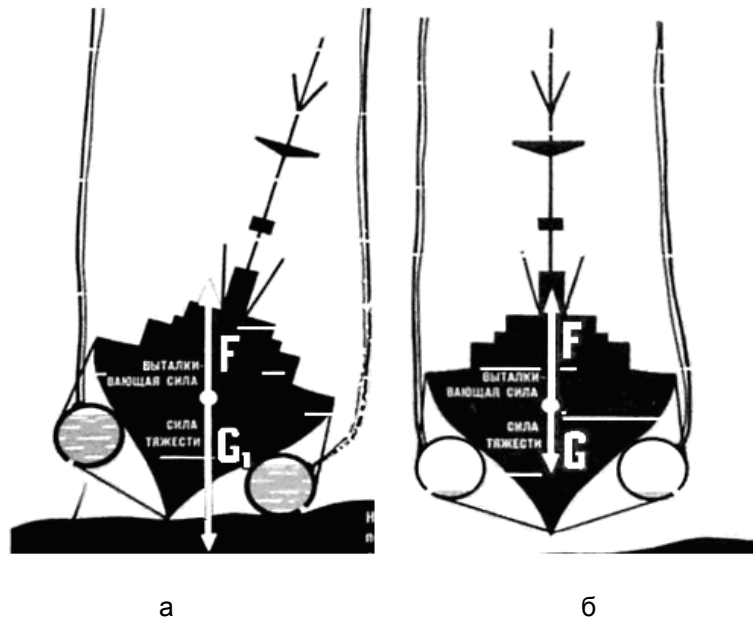


Рис. 4. Подъем затонувших кораблей

§ 2. Уравнение неразрывности

Движение жидкостей называется **течением**, а совокупность частиц движущейся жидкости – **поток**. Графически движение жидкостей изображается с помощью **линий тока**, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с вектором скорости жидкости в соответствующих точках пространства (рис. 5). Линии тока проводятся так, чтобы густота их, характеризуемая отношением числа линий к площади перпендикулярной им площадки, через которую они проходят, была больше там, где больше скорость течения жидкости, и меньше там, где жидкость течет медленнее. Таким образом, по картине линий тока можно судить о направлении и модуле скорости в разных точках пространства, т. е. можно определить состояние движения жидкости. Линии тока в жидкости можно «проявить», например, подмешав в нее какие-либо заметные взвешенные частицы.

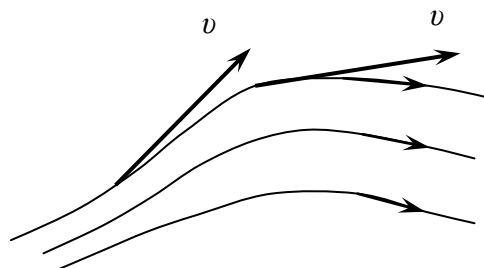


Рис. 5. Линии тока

Часть жидкости, ограниченную линиями тока, называют **трубкой тока**. Течение жидкости называется установившимся (или стационарным), если форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются.

Рассмотрим какую-либо трубку тока. Выберем два ее сечения S_1 и S_2 , перпендикулярные направлению скорости (рис. 6).

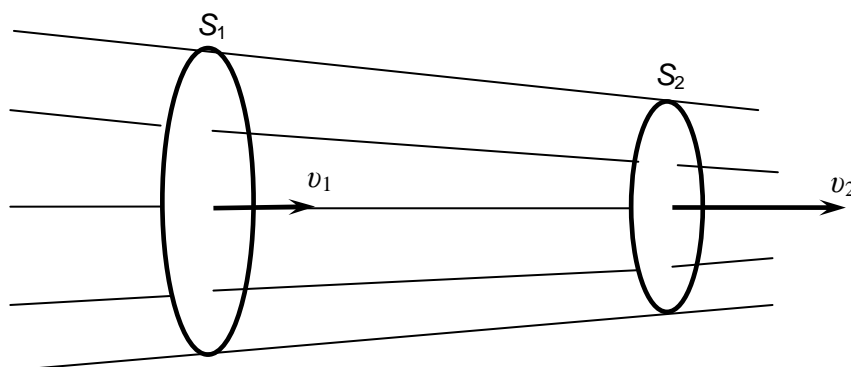


Рис. 6. Трубка тока

За время Δt через сечение S проходит объем жидкости $Sv\Delta t$, следовательно, за 1 с через S_1 пройдет объем жидкости S_1v_1 , где v_1 – скорость течения жидкости в месте сечения S_1 . Через сечение S_2 за 1 с пройдет объем жидкости S_2v_2 , где v_2 – скорость течения жидкости в месте сечения S_2 . Здесь предполагается, что скорость жидкости в сечении постоянна. Если жидкость несжимаема ($\rho = \text{const}$), то через сечение S_2 пройдет такой же объем жидкости, как и через сечение S_1 , т. е.

$$S_1v_1 = S_2v_2 = \text{const.} \quad (5)$$

Следовательно, произведение скорости течения несжимаемой жидкости на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная для данной трубки тока. Величина $Q_v = Sv$, равная объему, протекающей жидкости в единицу времени, называется *расходом жидкости*. Соотношение (5) называется *уравнением неразрывности* для несжимаемой жидкости.

§ 3. Уравнение Бернулли и следствия из него

Выделим в стационарно текущей идеальной жидкости трубку тока, ограниченную сечениями S_1 и S_2 , по которой слева направо течет жидкость (рис. 7). Пусть в месте сечения S_1 скорость течения v_1 , давление p_1 и высота,

на которой это сечение расположено, h_1 . Аналогично, в месте сечения S_2 скорость течения v_2 , давление p_2 и высота сечения h_2 . За малый промежуток времени Δt жидкость перемещается от сечения S_1 к сечению S'_1 , от S_2 к S'_2 .

Согласно закону сохранения энергии, изменение полной энергии $E_2 - E_1$ идеальной несжимаемой жидкости должно быть равно работе A внешних сил по перемещению массы m жидкости:

$$E_2 - E_1 = A, \quad (6)$$

где E_1, E_2 – полные энергии жидкости массой m в местах сечений S_1 и S_2 соответственно.

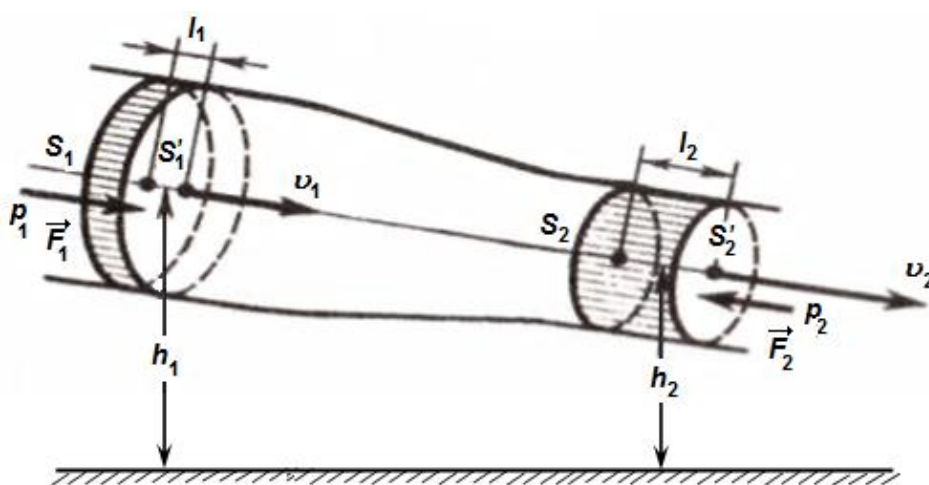


Рис. 7. Трубка тока в потенциальном поле

С другой стороны, A – это работа, совершаемая при перемещении всей жидкости, заключенной между сечениями S_1 и S_2 , за рассматриваемый малый промежуток времени Δt . Для перенесения массы m от S_1 до S'_1 жидкость должна переместиться на расстояние $l_1 = v_1 \Delta t$ и от S_2 до S'_2 – на расстояние $l_2 = v_2 \Delta t$. Отметим, что l_1 и l_2 настолько малы, что всем точкам объемов, закрасенных на рис. 7, приписывают постоянные значения скорости v , давления p и высоты h . Следовательно,

$$A = F_1 l_1 + F_2 l_2, \quad (7)$$

где $F_1 = p_1 S_1$ и $F_2 = -p_2 S_2$ (отрицательна, т. к. направлена в сторону, противоположную течению жидкости; см. рис. 7).

Полные энергии E_1 и E_2 будут складываться из кинетической и потенциальной энергий массы m жидкости:

$$E_1 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1, \quad (8)$$

$$E_2 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (6) и приравнявая (6) и (7), получим

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 + p_1 S_1 v_1 \Delta t = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2 + p_2 S_2 v_2 \Delta t. \quad (10)$$

Согласно уравнению неразрывности для несжимаемой жидкости (5), объем, занимаемый жидкостью, остается постоянным, т. е.

$$\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t.$$

Разделив выражение (10) на ΔV , получим

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2,$$

где ρ – плотность жидкости. Но т. к. сечения выбирались произвольно, то можем записать

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}. \quad (11)$$

Выражение (11) выведено швейцарским физиком Д. Бернулли ((1700–1782), опубликовано в 1738 г.) и называется *уравнением Бернулли*. Как видно из его вывода, уравнение Бернулли – выражение закона сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости. Оно хорошо выполняется и для реальных жидкостей, внутреннее трение которых не очень велико.

Величина p в формуле (11) называется **статическим давлением** (давление жидкости на поверхность обтекаемого ею тела), величина $\rho v^2/2$ – **динамическим давлением**. Как уже указывалось выше (см. § 1), величина ρgh представляет собой **гидростатическое давление**.

Для горизонтальной трубки тока ($h_1 = h_2$) выражение (11) принимает вид

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}. \quad (12)$$

где $p + \rho v^2/2$ называется **полным давлением**.

Из уравнения Бернулли (12) для горизонтальной трубки тока и уравнения неразрывности (5) следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах, т. е. там, где скорость меньше. Это можно продемонстрировать, установив вдоль трубы ряд манометров (рис. 8). В соответствии с уравнением Бернулли опыт показывает, что в манометрической трубке *B*, прикрепленной к узкой части трубы, уровень жидкости ниже, чем в манометрических трубках *A* и *C*, прикрепленных к широкой части трубы.

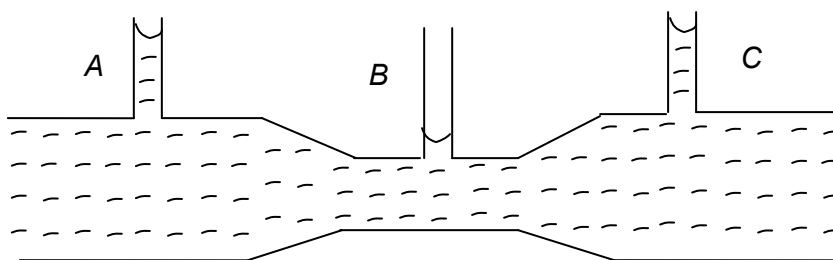


Рис. 8. Труба различного сечения с манометрическими трубками

Уравнение Бернулли используется для нахождения скорости истечения жидкости через отверстие в стенке или дне сосуда. Рассмотрим цилиндрический сосуд с жидкостью, в боковой стенке которого на некоторой глубине ниже уровня жидкости имеется маленькое отверстие (рис. 9).

Рассмотрим два сечения (на уровне h_1 свободной поверхности жидкости в сосуде и на уровне h_2 выхода ее из отверстия) и напишем уравнение Бернулли:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2.$$

Так как давления p_1 и p_2 в жидкости на уровнях первого и второго сечений равны атмосферному, т. е. $p_1 = p_2$, то уравнение будет иметь вид

$$\frac{v_1^2}{2} + g h_1 = \frac{v_2^2}{2} + g h_2.$$

Из уравнения неразрывности (5) следует, что $\frac{v_2}{v_1} = \frac{S_1}{S_2}$, где S_1 и S_2 – пло-

щади поперечных сечений сосуда и отверстия. Если $S_1 \gg S_2$, то членом $\frac{v_1^2}{2}$ можно пренебречь и

$$v_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh,$$
$$v_2 = \sqrt{2gh}.$$

Это выражение получило название *формулы Торричелли*.

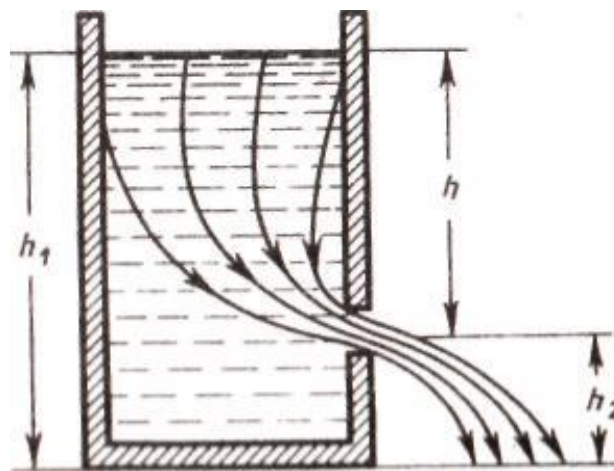


Рис. 9. Цилиндрический сосуд с боковым отверстием

Рассмотрим несколько приборов, работу которых можно объяснить уравнением Бернулли.

Трубка Пито – Прандтля (рис. 10) позволяет одновременно определить величину динамического и статического давления в определенной точке потока. Через отверстие A происходит измерение динамического давления. Через отверстия M измеряется статическое давление жидкости. Жидкость под действием давления поднимается по соответствующим пьезометрическим трубкам до точек A' и M' .

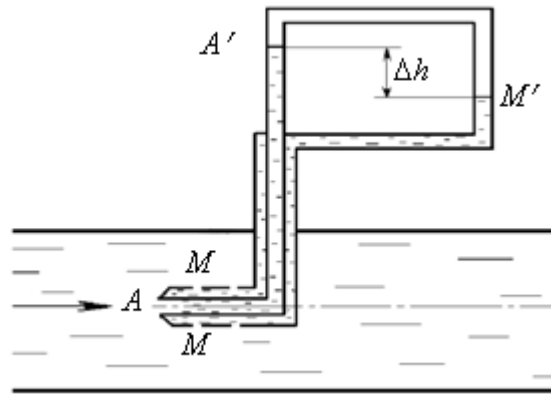


Рис. 10. Трубка Пито – Прандтля

Так как плотность газа (воздуха) значительно меньше плотности жидкости, то давлением воздуха можно пренебречь. Разность давлений в точках A' и M' будет $\Delta p = \rho gh$. Разность давлений Δp зависит от динамического давления на входе в трубку Пито – Прандтля, что следует из уравнения Бернулли для точек A и M :

$$p_M = p_A + \frac{\rho v^2}{2},$$

где v – скорость потока на входе в трубку Пито – Прандтля. Таким образом,

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2},$$

откуда получаем

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (13)$$

Дадим несколько замечаний:

1. Трубка Пито – Прандтля измеряет местную скорость в данной точке, поэтому для определения расхода по формуле $Q_v = vS$ необходимо измерить местную скорость в нескольких точках сечения для нахождения v .

2. Для того чтобы учесть потери на трение, в формулу вводится коэффициент ϕ . Коэффициент ϕ определяется экспериментально для каждой трубки и вносится в паспорт измерительного прибора. Обычно $\phi = 0,97-0,98$.

3. Трубка Пито – Прандтля позволяет измерить довольно большие значения скоростей, при малых скоростях увеличивается погрешность измерения из-за погрешностей манометра ($\pm 0,1$ см).

На современных летательных аппаратах эти устройства получили новое, более простое и правильное название: приемники воздушного давления (ПВД). Они дают первичные данные в сложный комплекс системы воздушных сигналов. Трубки Пито сейчас практически не применяются. Хотя кое-где в малой авиации они еще встречаются. В комплекте к ним обязательно идут приемники статического давления в виде плиты с рядом отверстий на обшивке летательного аппарата.

Все данные, выдаваемые ПВД, в итоге передаются на стрелки специальных приборов – указателей скорости полета. Они довольно разнообразны, как разнообразны и определения для скоростей полета летательного аппарата. Ведь он передвигается не только относительно земли, но и относительно атмосферы, которая сама по себе среда очень нестабильная.

Чаще используются, так называемые, комбинированные ПВД. Они по конструкции представляют собой типичные трубки Прандтля. Эти устройства обязательно снабжаются мощной системой электрического обогрева, т. к. небольшие отверстия для замера давлений при обледенении самолета вполне могут быть закупорены льдом, что, конечно, может помешать их корректной работе. На стоянках ПВД закрываются специальными заглушками или чехлами для исключения попадания в них посторонних предметов и грязи в отверстия.

Расходомер Вентури (рис. 11) служит для измерения расхода жидкости и представляет собой плавную сходящуюся расходящуюся вставку, к которой подключается дифференциальный манометр. Для вывода расчетной формулы применим уравнение Бернулли для сечения 1-1 перед сужением и сечения 2-2 в сужении.

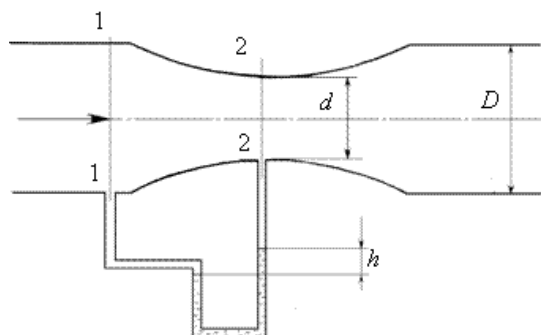


Рис. 11. Расходомер Вентури

$$\Delta p = \rho \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) = \rho \frac{v_2^2}{2} \left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2} \right). \quad (14)$$

С учетом уравнения неразрывности (4)

$$\Delta p = \rho \frac{v_2^2}{2} \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right).$$

Откуда

$$v_2 = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho} \frac{1}{1 - (d^4 - D^4)}}, \quad Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho} \frac{1}{1 - (d^4 - D^4)}}.$$

Зная перепад давления по дифференциальному манометру, можно для данного диаметра вставки и трубы определить расход жидкости, протекающей через трубу.

Для ртутного манометра

$$\Delta p = (\rho_{рт} - \rho_{ж})gh,$$

где $\rho_{рт}$ – плотность ртути, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости.

Обычно расходомеры выпускаются для определенных диаметров труб, и их диаметры d и D известны.

В этом случае формула упрощается

$$Q = S\mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (15)$$

где μ – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности прибора, в частности $\frac{d^4}{D^4}$, который вносится в паспорт прибора.

Ротаметры (рис. 12) используются для измерения расхода жидкостей, имеющих слабые коррозионные свойства. Для измерений их всегда устанавливают вертикально. Ротаметр состоит из сужающейся стеклянной трубки и металлического конусообразного измерителя. На измеритель действуют следующие силы: сила тяжести G , архимедова сила F_A , сила динамического давления жидкости F . Для измерителя, находящегося в покое, можно записать

$$G = F + F_A \quad \text{или} \quad mg = \rho_{ж} Vg + \frac{\rho_{ж} v^2}{2} S, \quad (16)$$

где ρ – плотность жидкости; V – объем измерителя; v – скорость течения жидкости; S – площадь сечения измерителя.

Сила тяжести и архимедова сила – величины постоянные, поэтому сила динамического давления жидкости при любом расходе будет также постоянной.

При уменьшении расхода измеритель опускается, уменьшается сечение для прохождения жидкости, соответственно скорость увеличивается, сохраняя постоянным значение силы динамического давления. Если проградуировать стеклянную поверхность ротаметра в единицах измерения расхода, то в зависимости от высоты поднятия измерителя можно определять расход.

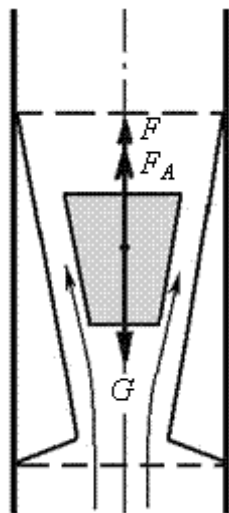


Рис. 12. Ротаметр

§ 4. Вязкость (внутреннее трение). Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкостей

Вязкость (внутреннее трение) – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила.

Сила внутреннего трения F тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоя S (рис. 13), и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою. На рис. 13 представлены два слоя, отстоящие друг от друга на расстоянии Δx и движущиеся со скоростями v_1 и v_2 . При этом $v_1 - v_2 = \Delta v$. Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, перпендикулярно скорости

течения слоев. Величина $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении x , перпендикулярном направлению движения слоев, и называется градиентом скорости. В результате оказывается, что модуль силы внутреннего трения

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S, \quad (17)$$

где коэффициент пропорциональности η , зависящий от природы жидкости, называется **динамической вязкостью** (или просто **вязкостью**).

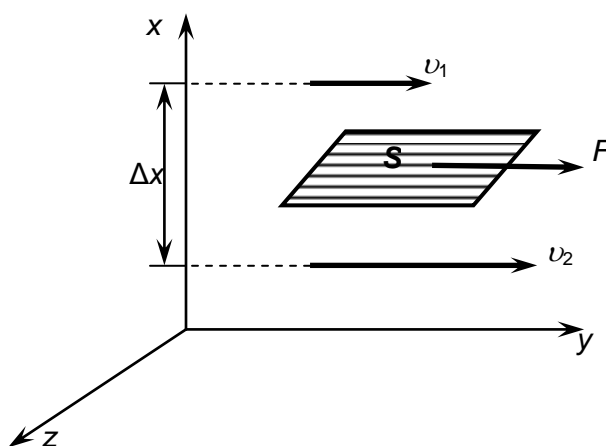


Рис. 13. Слой текущей жидкости

Единица вязкости – паскаль-секунда (Па·с): 1 Па·с равен динамической вязкости среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости с модулем, равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев (1 Па·с = 1 Н·с/м²).

Чем больше вязкость, тем сильнее жидкость отличается от идеальной, тем бóльшие силы внутреннего трения в ней возникают. Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен (для жидкостей с увеличением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается), что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения. Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел. Например, вязкость касторового масла в интервале 18...40 °С падает в четыре раза. Российский физик П. Л. Капица (1894–1984; Нобелевская премия 1978 г.) открыл, что при температуре 2,17 К жидкий гелий переходит в сверхтекучее состояние, в котором его вязкость равна нулю.

Существует два режима течения жидкостей. Течение называется **ламинарным** (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и **турбулентным** (вихревым), если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа).

Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорость последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидко переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.



Рис. 14. Режимы течения жидкости:
а – ламинарное; б – турбулентное

Профиль усредненной скорости при турбулентном течении в трубах (рис. 14) отличается от параболического профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубы и меньшей кривизной в центральной части течения. Характер течения зависит от безразмерной величины Re , называемой *числом Рейнольдса* (О. Рейнольдс (1842–1912) – английский ученый):

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta} = \frac{\langle v \rangle d}{\nu}, \quad (18)$$

где $\nu = \eta/\rho$ – кинематическая вязкость, ρ – плотность жидкости, $\langle v \rangle$ – средняя по сечению трубы скорость жидкости; d – характерный линейный размер, например диаметр трубы.

$$v_{\max} = 2\langle v \rangle, v_{\max} = 1,23\langle v \rangle$$

При малых значениях числа Рейнольдса ($Re \leq 1000$) наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области $1000 \leq Re \leq 2000$, а при $Re = 2300$ (для гладких труб) течение – турбулентное. Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей (газов) в трубах разных сечений одинаков.

§ 5. Методы определения вязкости

1. Метод Стокса (Дж. Стокс (1819–1903) – английский физик и математик). Этот метод определения вязкости основан на измерении скорости медленно движущихся в жидкости небольших тел сферической формы.

На шарик, падающий в жидкости вертикально вниз, действуют три силы (рис. 15): сила тяжести $G = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{ш}} g$ ($\rho_{\text{ш}}$ – плотность шарика), сила Архимеда

$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{ж}} g$ ($\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости) и сила сопротивления, эмпирически установленная Дж. Стоксом:

$F_c = 6\pi\eta rv$, где r – радиус шарика, v – его скорость, η – вязкость жидкости. При равномерном движении шарика

$P = F_A + F_c$ или $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{ш}} g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{ж}} g + 6\pi\eta rv$, откуда

$$v = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})gr^2}{9\eta}. \quad (19)$$

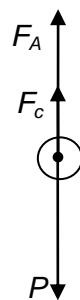


Рис. 15. Действие сил на падающий в жидкости шарик

Измерив скорость равномерного движения шарика, можно определить вязкость жидкости (газа).

2. Метод Пуазейля (Ж. Пуазейль (1799–1868) – французский физиолог и физик). Этот метод основан на ламинарном течении жидкости в тонком капилляре. Рассмотрим капилляр радиусом R и длиной l . В жидкости мысленно выделим цилиндрический слой радиусом r и толщиной dr (рис. 16). Сила внутреннего трения (см. формулу (13)), действующая на боковую поверхность этого слоя,

$$dF = -\eta \frac{dv}{dr} dS = -\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr},$$

где боковая dS – поверхность цилиндрического слоя; знак минус означает, что при возрастании радиуса скорость уменьшается.

Для установившегося течения жидкости сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность цилиндра, уравновешивается силой давления, действующей на его основание:

$$-\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr} = \Delta p \pi r^2, \quad dv = -\frac{\Delta p}{2\eta l} r dr.$$

После интегрирования, полагая, что у стенок имеет место прилипание жидкости, т. е. скорость на расстоянии R от оси равна нулю, получаем

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (20)$$

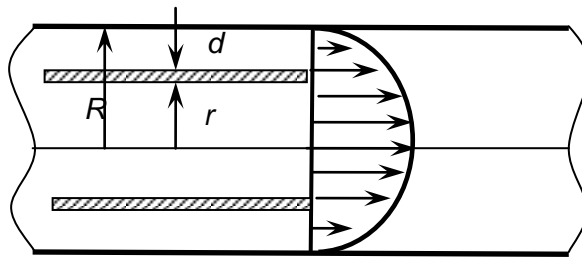


Рис. 16. Сечение трубы при ламинарном течении жидкости

Отсюда видно, что скорости частиц жидкости распределяются по параболическому закону, причем вершина параболы лежит на оси трубы (см. также рис. 14).

За время t из трубы вытечет жидкость, объем которой

$$V = \int_0^R vt \cdot 2\pi r dr = \frac{2\pi \Delta p t}{4\eta l} \int_0^R r(R^2 - r^2) dr = \frac{\pi \Delta p t}{2\eta l} \left[\frac{r^2 R^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8\eta l},$$

откуда вязкость

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p l}{8 V l}. \quad (21)$$

§ 6. Движение тел в жидкостях и газах

Одной из важнейших задач аэро- и гидродинамики является исследование движения твердых тел в газе и жидкости, в частности изучение тех сил, с которыми среда действует на движущееся тело. Эта проблема приобрела особенно большое значение в связи с бурным развитием авиации и увеличением скорости движения морских судов. На тело, движущееся в жидкости или газе, действуют две силы (равнодействующую их обозначим R), одна из которых (F_c) направлена в сторону, противоположную движению тела (в сторону потока), – лобовое сопротивление (скоростной напор), а вторая (Q) перпендикулярна этому направлению – подъемная сила (рис. 17).

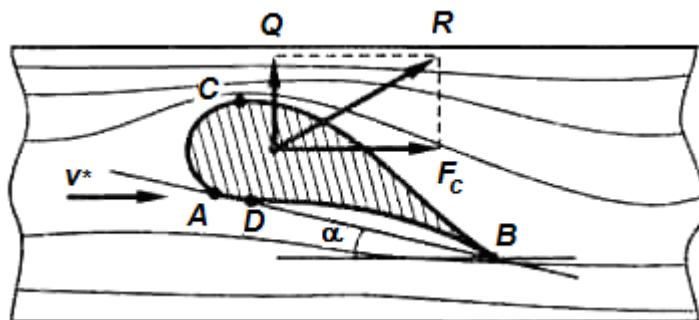


Рис. 17. Действие сил на тело, движущееся в жидкости или газе

Лобовое сопротивление F_c при малых числах Рейнольдса (ламинарный режим) оказывается линейным по скорости, т. к. основной вклад дают силы вязкого трения.

Для плохо обтекаемого тела, а также при больших числах Рейнольдса, лобовое сопротивление F_c определяется преимущественно характером распределения давления в потоке текучей среды (газа или жидкости). В этом случае в хвостовой части тела возникает интенсивное вихреобразование, следствием которого как раз и является значительное снижение давления в хвостовой части по отношению к лобовой части тела, поэтому сила сопротивления при турбулентном режиме оказывается пропорциональной динамическому давлению $\rho v^2/2$.

Лобовое сопротивление зависит от формы тела и его положения относительно потока, что учитывается безразмерным коэффициентом сопротивления C_x , определяемым экспериментально,

$$F_c = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (22)$$

где ρ – плотность среды; v – скорость движения тела; S – наибольшее поперечное сечение тела.

При движении со сверхзвуковыми скоростями или близкими к скорости звука сила сопротивления пропорциональна кубу скорости.

Следует отметить, что для модели идеальной жидкости сила лобового сопротивления при любой скорости движения тела равна нулю. Это так называемый парадокс *Д'Аламбера – Эйлера*, который формально согласуется с законом Стокса при $\eta = 0$. В случае реальных жидкостей и газов формула для силы сопротивления (силы Стокса) положена в основу одного из лабораторных методов определения коэффициента вязкости η по экспериментальным данным, которые получены при измерении скорости падения маленьких шариков в вязкой среде (см. *метод Стокса* §5).

Возникновение подъемной силы Q удобно объяснить, если под движущимся в среде телом (см. рис. 17) понимать крыло самолета. Форма крыла выбирается таким образом, что при обтекании его потоком воздуха скорость над крылом больше, чем под ним. В результате в соответствии с законом Бернулли давление под крылом больше, чем над ним. Эта разность давлений и создает подъемную силу крыла Q , пропорциональную динамическому давлению $\rho v^2/2$. Составляющую Q можно значительно уменьшить, подобрав тело такой формы, которая не способствует образованию завихрения.

Подъемная сила может быть определена формулой, аналогичной (22):

$$Q = C_y \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (23)$$

где C_y – безразмерный коэффициент подъемной силы.

Для крыла самолета требуется большая подъемная сила при малом лобовом сопротивлении (это условие выполняется при малых *углах атаки* α (угол к потоку); см. рис. 17). Крыло тем лучше удовлетворяет этому условию, чем больше величина $k = C_y/C_x$, называемая **качеством крыла**. Большие заслуги

в конструировании требуемого профиля крыла и изучении влияния геометрической формы тела на коэффициент подъемной силы принадлежат «отцу русской авиации» Н. Е. Жуковскому (1847–1921).

Если тело симметрично и его ось симметрии совпадает с направлением скорости, то на него действует только лобовое сопротивление, подъемная же сила в этом случае равна нулю. Можно доказать, что в *идеальной жидкости* равномерное движение происходит без лобового сопротивления. Если рассмотреть движение цилиндра в такой жидкости (рис. 18), то картина линий тока симметрична как относительно прямой, проходящей через точки *A* и *B*, так и относительно прямой, проходящей через точки *C* и *D*, т. е. результирующая сила давления на поверхность цилиндра будет равна нулю.

Иначе обстоит дело при движении тел в вязкой жидкости (особенно при увеличении скорости обтекания). Вследствие вязкости среды в области, прилегающей к поверхности тела, образуется пограничный слой частиц, движущихся с меньшими скоростями. В результате тормозящего действия этого слоя возникает вращение частиц и движение жидкости в пограничном слое становится вихревым. Если тело не имеет обтекаемой формы (нет плавно утончающейся хвостовой части), то пограничный слой жидкости отрывается от поверхности тела. За телом возникает течение жидкости (газа), направленное противоположно набегающему потоку. Оторвавшийся пограничный слой, следуя за этим течением, образует вихри (рис. 19), вращающиеся в противоположные стороны.

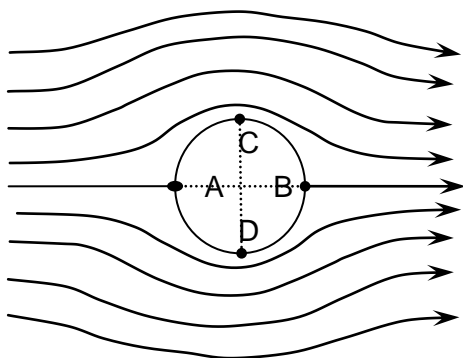


Рис. 18. Ламинарное обтекание

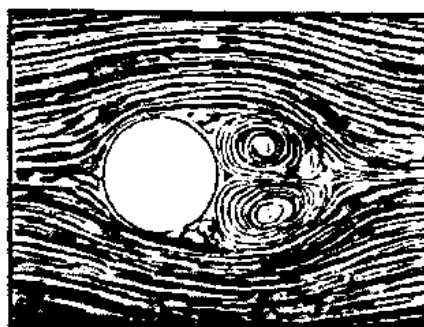


Рис. 19. Турбулентное обтекание

Вопросы для самопроверки

1. Закон Паскаля и его применение.
2. Принцип работы гидравлического пресса.

3. Принцип работы судоводных шлюзов.
4. Возникновение выталкивающей силы.
5. Понятия линии тока, трубки тока, потока.
6. Уравнение неразрывности.
7. Уравнение Бернулли.
8. Трубка Пито – Прандтля.
9. Расходомеры и ротаметры.
10. Возникновение подъемной силы.
11. Зависимость подъемной силы от внешних факторов. Величина лобового сопротивления.
12. Движение тел в жидкостях и газах. Сопротивление движению.
13. Понятие пограничного слоя.
14. Формула Стокса.
15. Метод Пуазейля.

Задачи

1. Вода течет в горизонтально расположенной трубе переменного сечения. Скорость воды v_1 в широкой части трубы равна 20 см/с. Определить скорость v_2 в узкой части трубы, диаметр d_2 которой в 1,5 раза меньше диаметра d_1 широкой части.

2. В широкой части горизонтально расположенной трубы нефть течет со скоростью $v_1 = 2$ м/с. Определить скорость v_2 нефти в узкой части трубы, если разность Δp давлений в широкой и узкой частях ее равна 6,65 кПа.

3. В горизонтально расположенной трубе с площадью S_1 поперечного сечения, равной 20 см^2 , течет жидкость. В одном месте труба имеет сужение, в котором площадь S_2 сечения равна 12 см^2 . Разность Δh уровней в двух манометрических трубках, установленных в широкой и узкой частях трубы, равна 8 см. Определить объемный расход Q_v жидкости.

4. Горизонтальный цилиндр насоса имеет диаметр $d_1 = 20$ см. В нем движется со скоростью $v_1 = 1$ м/с поршень, выталкивая воду через отверстие диаметром $d_2 = 2$ см. С какой скоростью v_2 будет вытекать вода из отверстия? Каково будет избыточное давление Δp воды в цилиндре?

5. К поршню спринцовки, расположенной горизонтально, приложена сила $F = 15$ Н. Определить скорость v истечения воды из наконечника спринцовки, если площадь S поршня равна 12 см^2 .

6. Давление p ветра на стену равно 200 Па. Определить скорость v ветра, если он дует перпендикулярно стене. Плотность ρ воздуха равна $1,29$ кг/м.

7. Струя воды диаметром $d = 2$ см, движущаяся со скоростью $v = 10$ м/с, ударяется о неподвижную плоскую поверхность, поставленную перпендикулярно струе. Найти силу F давления струи на поверхность, считая, что после удара о поверхность скорость частиц воды равна нулю.

8. Бак высотой $h = 1,5$ м наполнен до краев водой. На расстоянии $d = 1$ м от верхнего края бака образовалось отверстие малого диаметра. На каком расстоянии l от бака падает на пол струя, вытекающая из отверстия?

9. Струя воды с площадью S поперечного сечения, равной 4 см^2 , вытекает в горизонтальном направлении из брандспойта, расположенного на высоте $H = 2$ м над поверхностью Земли, и падает на эту поверхность на расстоянии $l = 8$ м (рис. 20). Пренебрегая сопротивлением воздуха движению воды, найти избыточное давление p воды в рукаве, если площадь S_2 поперечного сечения рукава равна 50 см^2 ?

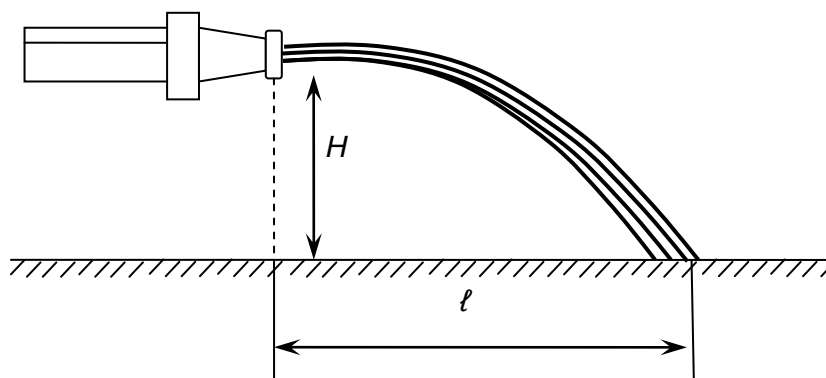


Рис. 20

10. Бак высотой $H = 2$ м до краев заполнен жидкостью. На какой высоте h должно быть проделано отверстие в стенке бака, чтобы место падения струи, вытекающей из отверстия, было на максимальном от бака расстоянии?

11. Вода течет по круглой гладкой трубе диаметром $d = 5$ см со средней по сечению скоростью $\langle v \rangle = 10$ см/с. Определить число Рейнольдса Re для потока жидкости в трубе и указать характер течения жидкости.

12. По трубе течет машинное масло. Максимальная скорость v_{\max} , при которой движение масла в этой трубе остается еще ламинарным, равна 3,2 см/с. При какой скорости v движение глицерина в той же трубе переходит из ламинарного в турбулентное?

13. В трубе с внутренним диаметром $d = 3$ см течет вода. Определить максимальный массовый расход Q_v воды при ламинарном течении.

14. Площадь соприкосновения слоев текущей жидкости $S = 10$ см², коэффициент динамической вязкости жидкости $\eta = 10^{-3}$ Па·с, а возникающая сила трения между слоями $F = 0,1$ мН. Определить градиент скорости.

15. Шарик всплывает с постоянной скоростью в жидкости, плотность которой в три раза больше плотности материала шарика. Определить отношение силы трения, действующей на всплывающий шарик, к его весу.

16. Смесь свинцовых дробинок (плотность $\rho = 11,3$ г/см³) диаметром 4 мм и 2 мм одновременно опускают в широкий сосуд глубиной $h = 1,5$ м с глицерином (плотность $\rho = 1,26$ г/см³, динамическая вязкость $\eta = 1,48$ Па·с). Определить, на сколько больше времени потребуется дробинок меньшего размера, чтобы достичь дна сосуда. С самого начала движения дробинок движение считать равномерным.

17. В широком сосуде, наполненном глицерином (плотность $\rho = 1,26$ г/см³, динамическая вязкость $\eta = 1,48$ Па·с), падает свинцовый шарик (плотность $\rho = 11,3$ г/см³). Считая, что при числе Рейнольдса $Re \leq 0,5$ выполняется закон Стокса (при вычислении Re в качестве характерного размера берется диаметр шарика), определить предельный диаметр шарика.

18. Стальной шарик (плотность $\rho' = 9$ г/см³) диаметром $d = 0,8$ см падает с постоянной скоростью в касторовом масле ($\rho = 0,96$ г/см³, динамическая вязкость $\eta = 0,99$ Па·с). Учитывая, что критическое значение числа Рейнольдса $Re_{кр} = 0,5$, определить характер движения масла, обусловленный падением в нем шарика.

19. Пробковый шарик (плотность $\rho = 0,2$ г/см³) диаметром $d = 6$ мм всплывает в сосуде, наполненном касторовым маслом ($\rho = 0,96$ г/см³) с постоянной скоростью $v = 1,5$ см/с. Определить для касторового масла: 1) динамическую вязкость η ; 2) кинематическую вязкость ν .

20. Определить наибольшую скорость, которую может приобрести свободно падающий в воздухе ($\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$) свинцовый шарик ($\rho' = 11,3 \text{ г/см}^3$) массой $m = 12 \text{ г}$. Коэффициент C_x принять равным 0,5.

21. Парашют ($m_1 = 32 \text{ кг}$) пилота ($m_2 = 65 \text{ кг}$) в раскрытом состоянии имеет форму полусферы диаметром $d = 12 \text{ м}$, обладая коэффициентом сопротивления $C_x = 1,3$. Определить максимальную скорость, развиваемую пилотом, при плотности воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$.

22. Автомобиль с площадью миделя (наибольшая площадь сечения в направлении, перпендикулярном скорости) $S = 2,2 \text{ м}^2$, коэффициентом лобового сопротивления $C_x = 0,4$ и максимальной мощностью $P = 45 \text{ кВт}$ может на горизонтальных участках дороги развивать скорость до 140 км/ч . При реконструкции автомобиля уменьшают площадь миделя до $S_1 = 2 \text{ м}^2$, оставляя C_x прежним. Принимая силу трения о поверхность дороги постоянной, определить, какую максимальную мощность должен иметь автомобиль, чтобы он развивал на горизонтальных участках дороги скорость до 160 км/ч . Плотность воздуха принять равной $1,29 \text{ кг/м}^3$.

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 7. Основы зонной теории кристаллов

Электропроводность металлов, диэлектриков и полупроводников объясняется с позиций квантовой механики. С точки зрения классической теории, система частиц (например, электронов) может находиться в состояниях с любыми значениями энергии в пределах некоторого интервала энергий. С точки зрения квантовой механики, система частиц может находиться лишь в определенных «дискретных» энергетических состояниях. С квантовой точки зрения, переход системы из одного возможного состояния в другое происходит скачкообразно с изменением энергии на конечную величину ΔW .

Кристалл – это совокупность большого количества атомов. При образовании твердого тела из отдельных атомов и молекул состояние электронов, движущихся вокруг отдельных ядер на внутренних электронных оболочках, не меняется. Внешние электронные оболочки в результате сближения атомов и

взаимодействия между электронами перестраиваются. В одних случаях внешние валентные электроны освобождаются и становятся свободными (металл). В других случаях электроны сильно связаны, подвижность электронов ограничена (диэлектрики). Наличие большого числа слабосвязанных, почти свободных электронов соответствует полупроводнику.

Пусть число атомов, образующих кристаллическую решетку, равно N . Из-за взаимодействия атомов уровень каждого валентного электрона расщепляется на N отдельные, близко расположенные друг к другу, подуровни, количество которых равно числу однородных атомов (рис. 21). Так как в реальных кристаллах число атомов N велико, в кристалле возникает полоса или **зона разрешенных состояний** из N подуровней.

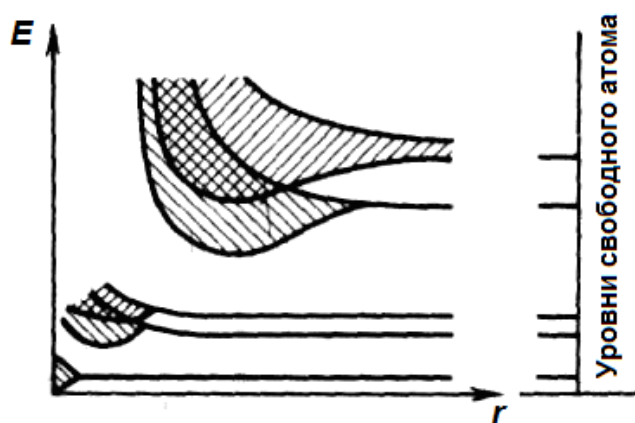


Рис. 21. Расщепление энергетических уровней

Энергетические уровни валентных электронов при расщеплении образуют **валентную зону**. Энергетические зоны, в которых заключены разрешенные уровни энергий электронов, называются **разрешенными зонами**; полосы, в которых разрешенные уровни отсутствуют, называются **запрещенными зонами**. Разрешенные энергетические уровни, которые свободны от электронов в невозбужденном состоянии, образуют **зону проводимости**. От степени заполнения и расположения валентной зоны и зоны проводимости электронами зависят электрические, оптические и другие свойства твердых тел.

При приложении к веществу электрического поля валентные электроны могут, ускоряясь полем, приобретать дополнительную энергию и переходить на более высокие свободные энергетические уровни либо внутри зоны (например, в металлах первой группы таблицы Менделеева), либо на свободные уровни следующей разрешенной зоны – **зоны проводимости**.

Таким образом, с точки зрения зонной теории к металлам относятся вещества, у которых валентная зона либо заполнена частично (металлы первой группы, рис. 22, а), либо валентная зона полностью заполнена, но перекрывается со свободными уровнями зоны проводимости (рис. 22, б). В полупроводниках и диэлектриках валентная зона отделена от зоны проводимости интервалом запрещенных для электронов энергий – запрещенная зона (рис. 22, в). Ширина запрещенной зоны диэлектриков больше 3эВ (рис. 22, г).

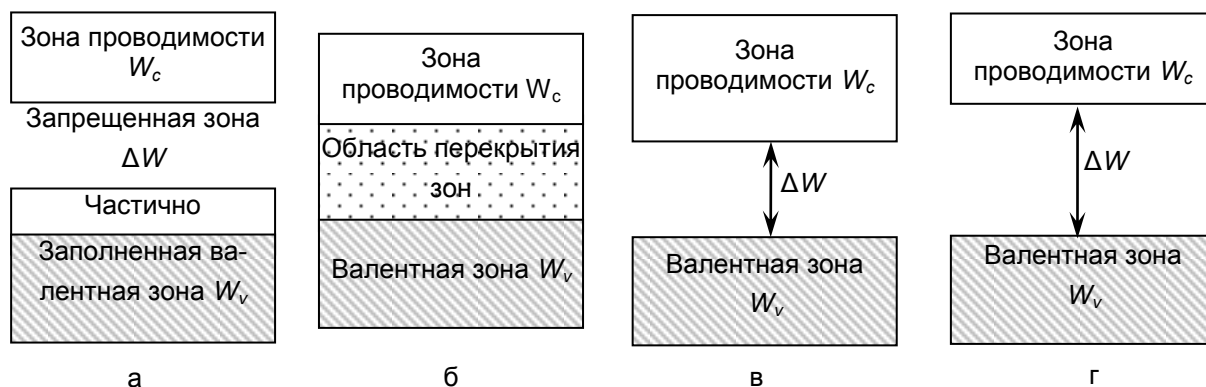


Рис. 22. Зонные диаграммы твердых тел:
 а – металл; б – металл; в – полупроводник; г – диэлектрик

§ 8. Электрические свойства металлов

По электрическим свойствам твердые тела делятся на металлы, полупроводники и диэлектрики. Эти классы веществ имеют различные удельные сопротивления (ρ) и удельные электрические проводимости (σ).

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (24)$$

где ρ – удельное сопротивление; σ – удельная электропроводность.

К металлам относятся вещества, у которых удельное сопротивление порядка $10^{-8} \dots 10^{-6}$ Ом·м. Низкое удельное сопротивление металлов обусловлено высокой концентрацией свободных электронов. В диэлектриках концентрация свободных электронов мала, их удельное сопротивление порядка $10^8 \dots 10^{13}$ Ом·м. Промежуточное положение занимают полупроводники – вещества, для которых удельное сопротивление $10^{-5} \dots 10^8$ Ом·м и сильно зависит от температуры. Наиболее типичными, широко применяемыми на практике

полупроводниками являются углерод (C), кремний (Si), германий (Ge), селен (Se), теллур (Te).

Металлы имеют атомный или металлический тип кристаллической решетки: в узлах находятся положительные ионы, между которыми при отсутствии электрического поля хаотически перемещаются свободные валентные электроны. Концентрации свободных электронов составляют величину порядка $10^{28} \dots 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Поэтому при любой температуре металлы обладают высокой электропроводностью. Согласно классической теории, электрическое сопротивление металлов объясняется столкновением свободных электронов с ионами кристаллической решетки.

Единица измерения сопротивления в СИ называется Ом. Электропроводность или проводимость – величина, обратная сопротивлению:

$$G = \frac{1}{R}. \quad (25)$$

Единица измерения проводимости – сименс (См).

Сопротивление цилиндрического проводника определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (26)$$

где ρ – удельное сопротивление, l – длина проводника, S – площадь поперечного сечения.

Удельная электропроводность σ – величина, обратная удельному сопротивлению (ρ). Удельное сопротивление измеряется в Ом·м, удельная электропроводность – в См/м.

Подвижность носителей заряда b численно равна средней скорости упорядоченного движения носителей заряда при напряженности электрического поля, равной 1 В/м:

$$b = \frac{v}{E}. \quad (27)$$

Удельная электропроводность σ зависит от подвижности носителей заряда b , их концентрации n и величины заряда носителя q :

$$\sigma = qnb. \quad (28)$$

Концентрация свободных электронов в металлах практически не зависит от температуры. Подвижность нелинейно связана с изменением температуры,

но в определенном интервале температур, особенно от 0 до 100 °С, уменьшается при увеличении температуры вследствие увеличения числа столкновений носителей заряда с ионами кристаллической решетки. Таким образом, с ростом температуры сопротивление металлов увеличивается линейно (рис. 23):

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (29)$$

где R_0 – сопротивления проводника при 0 °С, R_t – сопротивления проводника при t °С, α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

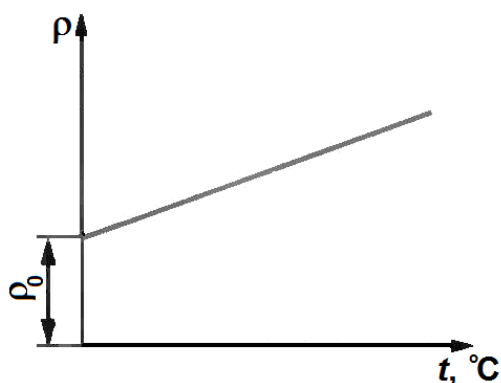


Рис. 23. График зависимости удельного сопротивления металла от температуры

Температурный коэффициент численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании его на один градус.

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}. \quad (30)$$

ТКС измеряется в K^{-1} .

Температурные коэффициенты чистых металлов примерно одинаковы и равны $\approx 1/273 \text{ K}^{-1} \approx 0,0036 \text{ K}^{-1}$. Температурные коэффициенты сплавов, как правило, значительно меньше, чем у чистых металлов. Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании, например, константан и манганин.

Для экспериментального определения ТКС достаточно измерить сопротивление металла при двух известных температурах (при этом нет необходимости иметь значение сопротивления при 0 °С):

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1), \quad (31)$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2). \quad (32)$$

Тогда

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}. \quad (33)$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}. \quad (34)$$

Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры используют в различных измерительных и автоматических устройствах, например, в термометрах сопротивления, которые представляют собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки. Наиболее распространенный тип термометров сопротивления – платиновые, медные и никелевые термометры. Главным достоинством таких термометров является большой температурный диапазон измерений и высокая точность, линейная зависимость сопротивления от температуры. Авиационные термометры сопротивления (рис. 24) относятся к группе дистанционных приборов, позволяющих измерять температуру жидких и газообразных сред: топлива, масла, охлаждающих жидкостей, воздуха внутри и снаружи кабины.

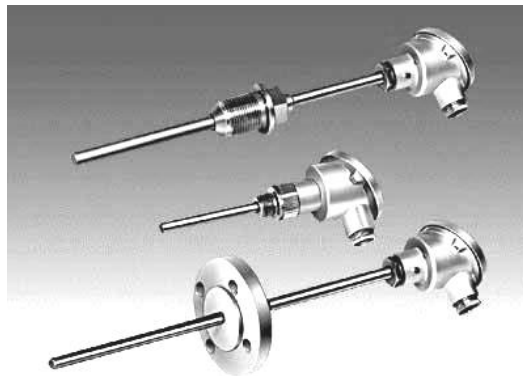


Рис. 24. Авиационные термометры сопротивления

§ 9. Электрические свойства полупроводников

Полупроводники представляют собой вещества, которые по удельной электрической проводимости занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Для изготовления полупроводниковых приборов используют германий, кремний, арсенид галлия, антимонид индия,

фосфид индия, карбид кремния и др. Существенным отличием полупроводников от металлов является двойственная природа носителей заряда в полупроводниках. В полупроводниковом кристалле IV группы таблицы Менделеева (кремний и германий) между атомами в соседних узлах кристаллической решетки существует ковалентная связь. Если все ковалентные связи заполнены, свободных электронов нет (при низких температурах полупроводник является диэлектриком).

Собственными полупроводниками являются химически чистые вещества с правильной кристаллической решеткой. В собственном полупроводнике при температуре абсолютного нуля отсутствуют свободные носители заряда, так как валентная зона полностью заполнена электронами (это означает, что в валентной зоне нет дырок, а в зоне проводимости нет электронов).

Для того чтобы электрон мог выйти из связи и образовалась электронно-дырочная пара, атом должен получить энергию. Это означает, что для возникновения собственной электропроводности чистого полупроводника необходимо электрон перебросить из валентной зоны в зону проводимости. При повышении температуры, при освещении полупроводника, под действием сильного электрического поля, ионизирующего излучения происходит генерация носителей. Для этого необходимо затратить минимальную энергию, которая называется **энергией активации** собственной проводимости и определяется шириной запрещенной зоны (ΔW_0 , рис. 25).

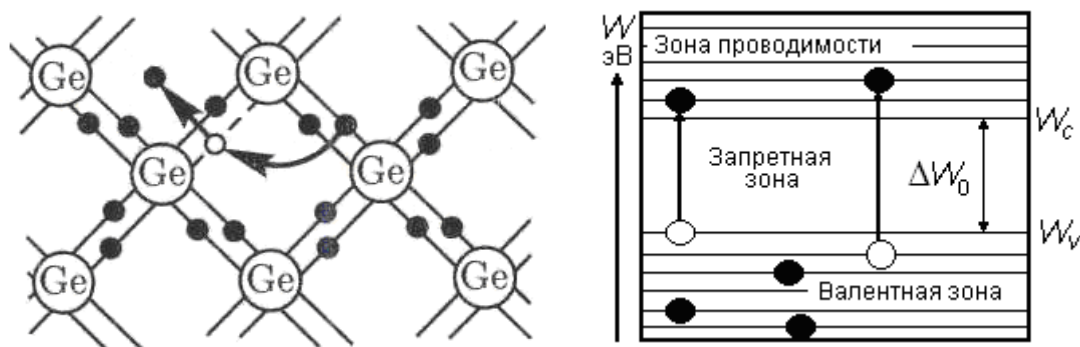


Рис. 25. Образование пары носителей электрон-дырка в собственном полупроводнике

Приведем значения величины энергии активации для некоторых полупроводников: германий (Ge) – 0,72 эВ; антимонид индия (InSb) – 0,17 эВ; кремний (Si) – 1,1 эВ; фосфид галлия (GaP) – 2,3 эВ.

Кроме свободных электронов в зоне проводимости в валентной зоне появляются вакантные места после освобождения электронов из ковалентной связи – «дырки», имеющие положительный заряд. На вакантные места могут

переходить другие электроны валентной зоны. Дырки эквивалентны появлению в данном месте положительного заряда и перемещаются в электрическом поле как положительный заряд.

Таким образом, в собственных полупроводниках имеется равное количество носителей заряда (электронов и дырок проводимости):

$$n_i = p_i.$$

Кроме процесса генерации (образования носителей заряда) идет и обратный процесс – рекомбинация (заполнение ковалентной связи электронами), который сопровождается выделением энергии. В полупроводнике электроны перемещаются против поля, а дырки – по полю, то есть ток будет обеспечиваться движением как электронов проводимости – **электронный ток**, так и дырок – **дырочный ток**. Плотность тока определяется следующим выражением:

$$j = env = en\mu E, \quad (35)$$

где n – концентрация носителей заряда (электронов или дырок), v – средняя скорость упорядоченного движения носителей заряда, μ – подвижность носителей заряда, E – напряженность электрического поля.

Подвижность электронов и дырок в разных полупроводниках различна и при температурах, близких к комнатным, с повышением температуры уменьшается, т. к. увеличивается число столкновений электронов с атомами кристаллической решетки.

Полный ток проводимости складывается из электронного и дырочного тока:

$$j_{\text{пр}} = j_{n_{\text{пр}}} + j_{p_{\text{пр}}}. \quad (36)$$

Зависимость концентрации носителей заряда в собственных полупроводниках от температуры выражается формулой

$$n_e = n_p = n_0 \cdot \exp(-\Delta W_0 / 2kT), \quad (37)$$

где n_0 – коэффициент, величина которого для различных полупроводников лежит в пределах от 10^{17} до 10^{19} см⁻³; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Сильная зависимость концентрации свободных носителей от температуры приводит к аналогичной зависимости проводимости полупроводника. В полупроводниках при повышении температуры концентрация свободных носителей заряда увеличивается значительно быстрее, чем уменьшается подвижность,

поэтому электропроводность растет, сопротивление уменьшается. Уменьшение сопротивления полупроводника с ростом температуры происходит по закону

$$R_T = R_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right). \quad (38)$$

§ 10. Примесные полупроводники

Для изменения характера проводимости в чистый полупроводник вводят примеси – атомы других веществ, которые внедряют в кристаллическую решетку исходного полупроводника. В качестве примесей для германия и кремния используют элементы третьей и пятой группы таблицы Менделеева.

Рассмотрим, как изменяются свойства полупроводника с внесением примесей. Если в чистый кристалл кремния внести атом с пятью валентными электронами (мышьяк, фосфор, сурьму), то четыре электрона войдут в ковалентные связи с четырьмя атомами основного кристалла и создадут устойчивую электронную оболочку из восьми валентных электронов. Пятый электрон атома примеси слабо связан с ядром атома и при сообщении небольшой энергии становится свободным без разрушения ковалентной связи (без образования дырки рис. 26, а). Энергетические уровни электронов примеси находятся в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости (локальные уровни – уровни доноров, рис. 26, б). Под энергией активации донора (ΔW_d) понимают минимальную энергию, необходимую электрону для перехода с локального донорного уровня в зону проводимости (см. рис. 26, б). Энергия активации для них значительно меньше, чем для собственного полупроводника. Например, для кремния энергия активации составляет 0,054 эВ, если примесью является мышьяк.

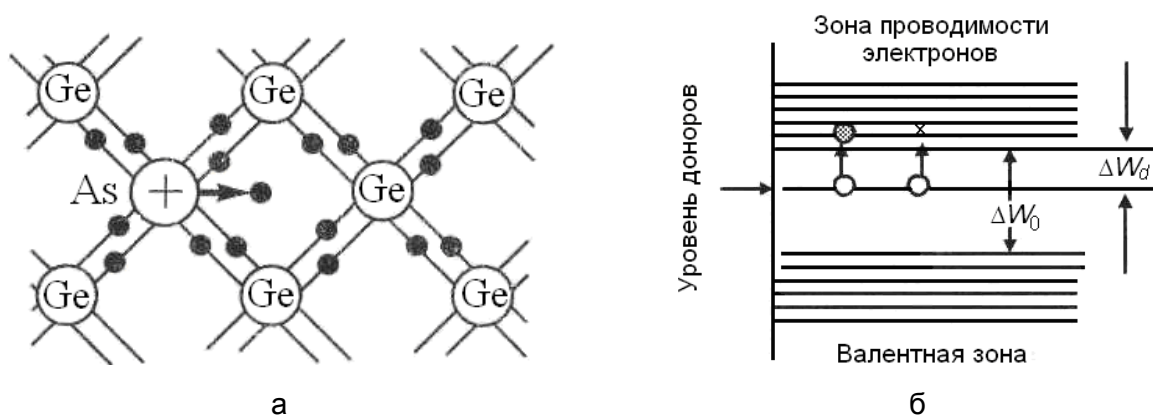


Рис. 26. Энергетическая диаграмма полупроводника *n*-типа

При сообщении энергии, большей энергии активации ΔW_d , электрон переходит в зону проводимости, при этом атом донорной примеси становится положительным ионом (в электропроводности не принимает участия), а дырка в валентной зоне не образуется. Поэтому при низких температурах электропроводность обусловлена электронами атомов примеси. При повышении температуры возникает собственная проводимость вследствие генерации пары электрон-дырка за счет разрушения ковалентной связи и переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости (при этом в валентной зоне образуются дырки).

Таким образом, при любых температурах в донорном полупроводнике концентрация электронов всегда больше концентрации дырок: $n_n > n_p$. Электроны по этой причине называются основными, а дырки – неосновными носителями заряда. Примеси пятой группы по отношению к полупроводнику четвертой группы являются источниками электронов, поэтому такую примесь называют донорной, а примесный полупроводник – донорным или *n*-типа.

Если четырехвалентный кремний содержит примеси трехвалентного вещества (бор, алюминий, индий), то для завершения ковалентных связей с соседними атомами кремния примеси не хватает одного электрона. Недостающий электрон может быть заимствован у соседнего атома кремния, у которого за счет разрушения ковалентной связи образуется положительная дырка в валентной зоне, но не появляется свободный электрон в зоне проводимости (рис. 27, а).

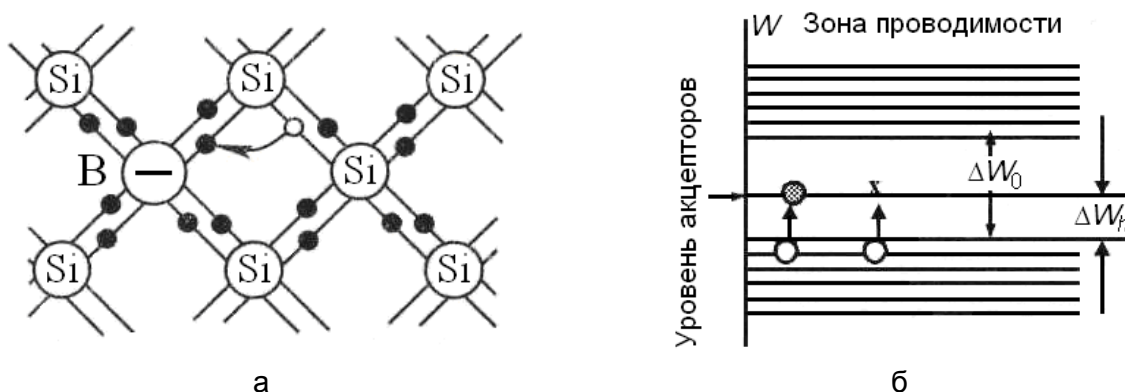


Рис. 27. Энергетическая диаграмма полупроводника *p*-типа

Свободные энергетические уровни примеси (локальные уровни – уровни акцепторов, рис. 27, б) находятся в запрещенной зоне вблизи потолка валентной зоны, отделены от нее небольшим энергетическим интервалом (энергия

активации акцепторов ΔW_a) и называются **акцепторными уровнями**. На них переходят электроны из валентной зоны с образованием в валентной зоне дырок (атом примеси при этом становится отрицательным ионом и не принимает участия в электропроводности).

Например, при внедрении бора в решетку кремния энергия активации акцепторов составляет 0,08 эВ. При любых температурах в таком полупроводнике концентрация дырок всегда больше концентрации свободных электронов: $n_p > n_n$. Дырки являются основными, а электроны неосновными носителями заряда. Полупроводник с преобладанием дырочной проводимости называется дырочным, или акцепторным, или *p*-типа.

Основные носители обусловлены наличием примеси, а неосновные связаны с разрушением ковалентной связи и переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Для экспериментального определения ширины запрещенной зоны достаточно исследовать температурную зависимость сопротивления полупроводника от температуры.

$$R(T) = R_0 \cdot \exp \frac{\Delta W_0}{2kT}. \quad (39)$$

Логарифмируя обе части уравнения (39), получим

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W_0}{2kT}. \quad (40)$$

Нетрудно заметить, что график зависимости логарифма сопротивления от обратной температуры представляет собой прямую (рис. 28), угловой коэффициент которой равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln R_{T_n} - \ln R_{T_m}}{\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_m}} = \frac{\Delta W_0}{2k}. \quad (41)$$

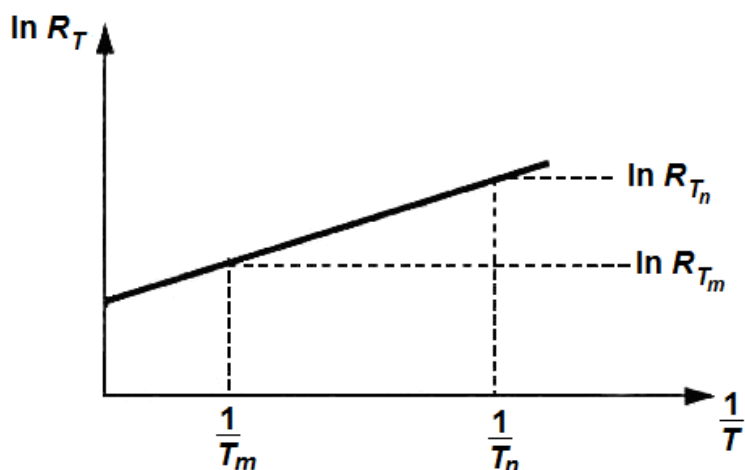


Рис. 28. Зависимости логарифма сопротивления от обратной температуры

Таким образом, можно вычислить энергию активации (ширину запрещенной зоны) полупроводника по формуле

$$\Delta W = \frac{\ln R_{T_n} - \ln R_{T_m}}{\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_m}} \cdot 2k. \quad (42)$$

§ 11. Применение полупроводников

Терморезисторы (термисторы). Изменение электропроводности полупроводников под влиянием температуры позволило применять их в приборах для измерения температуры окружающей среды. Они более чувствительны, чем термометры сопротивления, изготовляемые из металла. У некоторых полупроводников повышение температуры на 1 °С увеличивает электропроводность на 3...6 %, а повышение температуры на 100 °С увеличивает электропроводность в 50 раз. Благодаря высокому удельному сопротивлению полупроводников их применяют в качестве чувствительных термометров при дистанционных измерениях. Размеры полупроводниковых сопротивлений могут быть чрезвычайно малыми (несколько десятых долей миллиметра), это снижает инерционность прибора. Полупроводниковые термометры сопротивления (терморезисторы) широко применяют в технике. Термисторы могут выполнять функции ограничителя времени, стабилизаторов напряжения, бесконтактных реле (рис. 29). Можно подобрать условия так, чтобы это время было от долей секунды до 10 мин. По достижении установленного времени

может производиться автоматическое включение и выключение систем освещения или действующих установок.

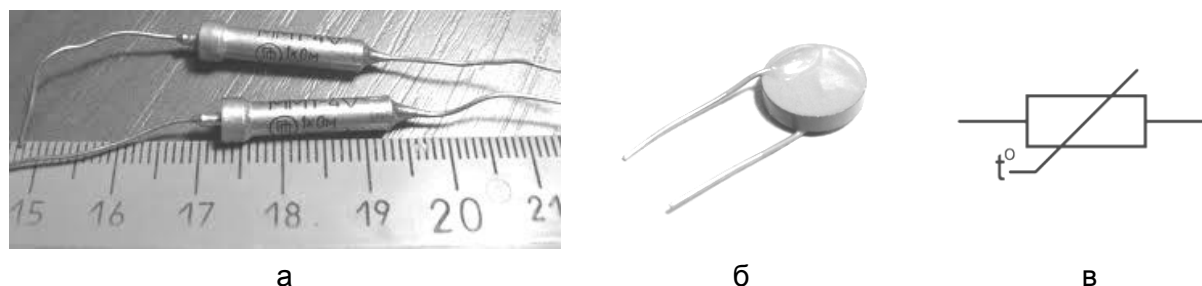


Рис. 29. Терморезисторы:

а, б – внешний вид, в – условное обозначение на электрических схемах

Терморезисторы применяют как индикаторы регуляторы температуры, в том числе в авиационной технике, для дистанционного измерения влажности, для измерения высоких давлений, механических напряжений, для замера малых скоростей движения и теплопроводности газов, жидкостей, скорости или количества протекающей жидкости, скорости движения газов, для измерения больших ускорений.

Вещества, используемые для изготовления термисторов, представляют собой мелкокристаллические порошки. Термисторы изготавливают прессованием полупроводникового порошка с последующим спеканием в твердую компактную массу, а также путем плавки полупроводника для придания ему нужной формы и размеров. Изготавливают их в виде шариков, стержней, дисков, шайб и чешуек.

§ 12. Контактные явления в полупроводниках.

Электронно-дырочный переход и его свойства.

Образование *p-n*-перехода

Особые свойства имеют полупроводники, состоящие из двух областей с различным типом проводимости. Электронно-дырочный переход (*p-n*-переход) – это переходный слой между двумя областями полупроводника с различным типом электропроводности, в котором существует электрическое поле.

Вблизи границы раздела двух областей с разным типом проводимости в *n*-области концентрация электронов (основные носители) преобладает над концентрацией электронов в *p*-области (неосновные носители), а концентрация

дырок в p -области (основные носители) преобладает над концентрацией дырок в n -области (неосновные носители). По этой причине возникает диффузия основных носителей: электроны из n -области переходят в p -область, а дырки переходят в n -область, т. е. возникает диффузионный ток. При этом вблизи границы раздела происходит рекомбинация свободных носителей заряда. Вблизи границы остаются нескомпенсированные ионы положительного знака в n -области (ионы донорной примеси) и отрицательные ионы в p -области (ионы акцепторной примеси). Образуется область пространственного заряда из двух разноименных слоев (рис. 30). Между этими областями возникает электрическое поле (E_k), направленное от n -области к p -области, устанавливается контактная разность потенциалов. Под действием этого контактного поля из пограничной области вглубь областей вытесняются основные носители заряда. В приконтактной области существует тонкий слой, обладающий большим электрическим сопротивлением – **запирающий слой**. Если для основных носителей контактное поле является тормозящим, то для неосновных – ускоряющим. Неосновные носители (электроны из p -области и дырки из n -области) проходят через p - n -переход и создают дрейфовый ток. Равновесное состояние p - n -перехода устанавливается, когда суммарный ток через границу раздела будет равен нулю, т. е. диффузионный ток равен дрейфовому току.

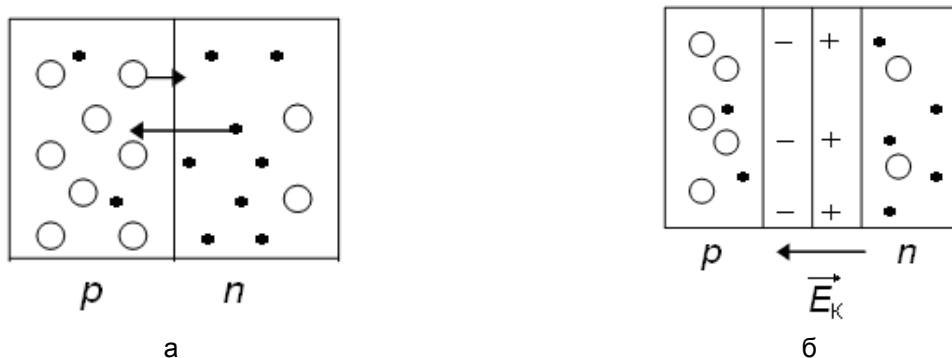


Рис. 30. Образование p - n -перехода:

• – электроны; O – дырки

P - n -переход обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления приложенного к нему внешнего электрического поля и протекающего через него тока. Это свойство называется **вентильным**. Равновесное состояние p - n -перехода нарушается при приложении к нему внешнего напряжения, которое в зависимости от направления

и величины изменяет соотношение между диффузионным током и дрейфовым током через переходную область.

§ 13. Прямое и обратное смещение p - n -перехода

P - n -переход смещен в прямом направлении, если положительный полюс источника питания присоединен к p -области, а отрицательный – к n -области (рис. 31). При прямом смещении контактное и внешнее поле направлены встречно, результирующее поле на p - n -переходе уменьшается. Это приводит к тому, что возобновляется процесс диффузии основных носителей заряда, а ток неосновных носителей немного уменьшается. Через переход течет результирующий ток – прямой ток, направленный от p -области к n -области. При увеличении напряжения ток резко возрастает. Сопротивление p - n -перехода при этом уменьшается. Кроме того, прямое смещение уменьшает ширину p - n -перехода.

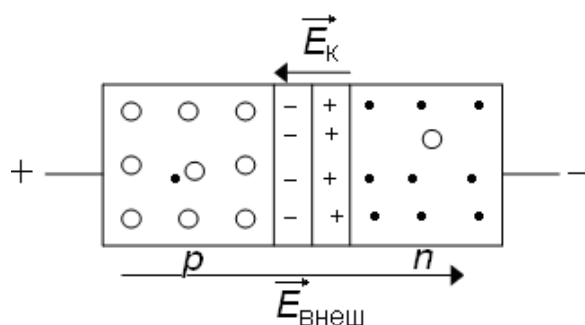


Рис. 31. Прямое смещение p - n -перехода

Обратное смещение возникает при подключении к p -области минуса, а к n -области плюса внешнего источника напряжения (рис. 32). В этом случае внешнее напряжение увеличивает напряженность электрического поля на p - n -переходе (напряженность контактного и внешнего поля совпадают по направлению).

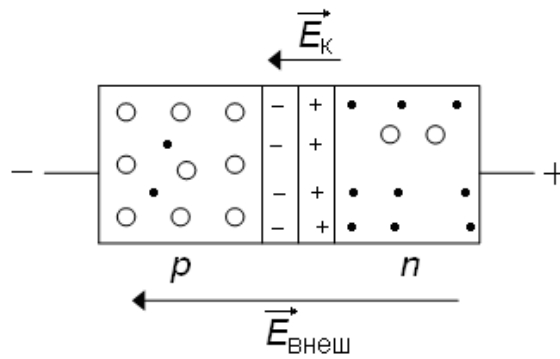


Рис. 32. Обратное смещение p - n -перехода

Диффузионный ток основных носителей заряда практически уменьшается до нуля, а дрейфовый ток неосновных носителей практически не изменяется. Этот ток мал по величине, т. к. концентрация неосновных носителей мала, а сопротивление перехода велико. Обратный ток направлен от n -области к p -области. Обратный ток пропорционален концентрации неосновных носителей и во много раз меньше прямого тока, т. е. p - n -переход хорошо проводит ток только при одной полярности внешнего напряжения (односторонняя проводимость). С ростом температуры и освещенности обратный ток увеличивается. Напряжение такой полярности называется обратным. Толщина p - n -перехода при этом возрастает.

Зависимость величины тока через p - n -переход от приложенного напряжения, т. е. вольт-амперная характеристика (ВАХ), является нелинейной (рис. 33). Сопротивление p - n -перехода зависит от величины и направления приложенного напряжения. Благодаря большому различию сопротивлений в прямом и обратном направлении p - n -переход обладает вентиляльными или выпрямляющими свойствами.

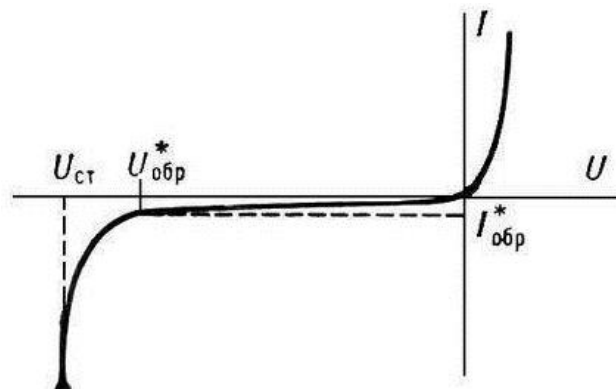


Рис. 33. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

При обратном напряжении диода свыше определенного критического значения ($U_{обр}^*$) наблюдается резкий рост обратного тока – в результате действия сильного электрического поля в $p-n$ -переходе возникает электрический пробой. Пробой может быть туннельным или лавинным. Электрический пробой обратим, т. е. он не приводит к повреждению диода, и при снижении обратного напряжения свойства диода сохраняются. В результате разогрева $p-n$ -перехода при протекании тока большого значения и при недостаточном теплоотводе может возникать необратимый тепловой пробой, разрушающий $p-n$ -переход. Для формирования $p-n$ -перехода наибольшее значение имеют методы сплавления и диффузии примесей.

§ 14. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод (рис. 34) – полупроводниковый прибор, содержащий один $p-n$ -переход и два вывода, использующий свойства выпрямляющего электрического перехода ($p-n$ -перехода, гетероперехода, контакта металл-полупроводник).

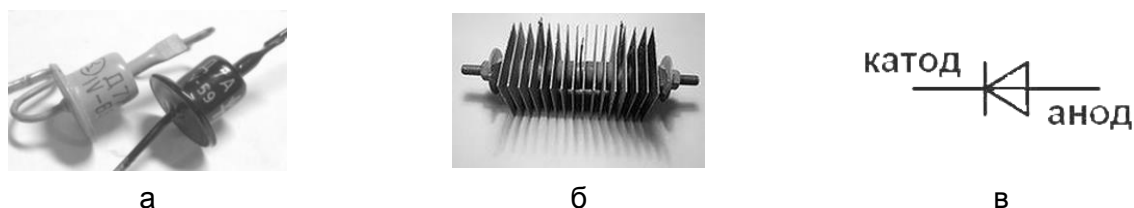


Рис. 34. Полупроводниковые диоды:

а, б – внешний вид; в – условное обозначение полупроводниковых диодов

Выпрямительными или силовыми диодами называют электронные приборы, основным назначением которых является выпрямление переменного тока. Они изготавливаются из кремния, арсенида галлия, германия, предназначены для выпрямления токов промышленной частоты (50 Гц), используются в бортовой авиационной аппаратуре (частота 400 Гц) и других устройствах на частотах не более 100 кГц. Выпрямительные столбы из последовательно соединенных полупроводниковых диодов используются для выпрямления переменных напряжений до нескольких киловольт.

Стабилитрон (рис. 35, б) – полупроводниковый диод, у которого рабочий участок находится на обратной ветви ВАХ и связан с электрическим пробоем

p-n-перехода. Применяется для стабилизации напряжения и защиты элементов электрических цепей от перенапряжения.

Параметрические диоды (варикапы) – полупроводниковые диоды, действие которых основано на зависимости емкости *p-n*-перехода от обратного напряжения. Они представляют собой конденсатор переменной емкости, который управляется изменением обратного напряжения.

Туннельные диоды применяют для усиления и генерации электромагнитных колебаний в переключающих схемах. Они изготавливаются из арсенида галлия и германия, а также из антимонида галлия. Эти диоды работают на частотах до (30...100) ГГц.

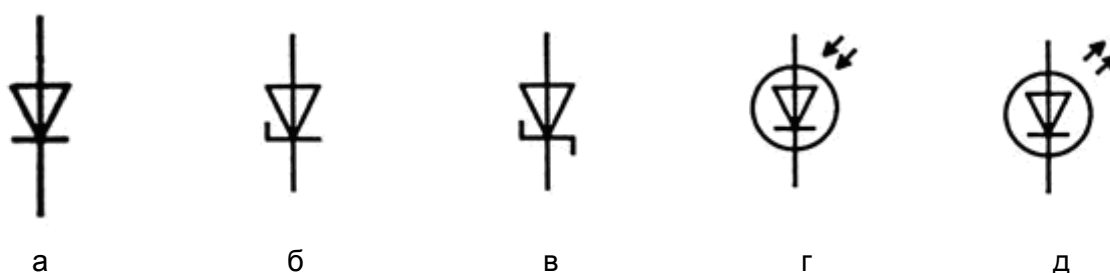


Рис. 35. Условное обозначение диодов на электрических схемах:

а – общее обозначение диода; б – стабилитрон; в – диод Шоттки; г – фотодиод; д – светодиод

Светодиод (рис. 35, д) представляет собой полупроводниковый диод с *p-n*-переходом, протекание тока через который вызывает интенсивное некогерентное излучение. Работа светодиода основана на спонтанной рекомбинационной люминесценции избыточных носителей заряда, инжектируемых в активную область (базу) светодиода.

Между двумя полупроводниками разного химического состава, имеющими разную ширину запрещенной зоны, можно создать гетеропереход. Гетеропереходы используют в оптоэлектронике для создания биполярных и полевых транзисторов, инжекционных лазеров (рис. 36), быстродействующих электронных устройств.



Рис. 36. Инжекционные лазерные диоды

явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей. Транзистор может работать на постоянном токе, малом переменном сигнале, большом переменном сигнале, импульсном сигнале.

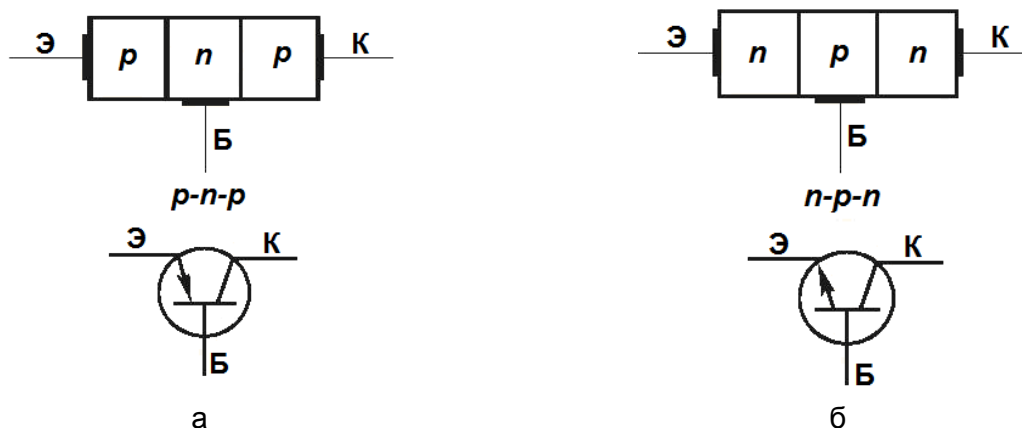


Рис. 38. Биполярный транзистор:
а) p-n-p, б) n-p-n

Основным режимом работы биполярного транзистора является *активный*, при котором эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Принцип действия основан на взаимодействии двух типов носителей заряда (электронов и дырок) с электрическим полем и переносе основных носителей заряда из эмиттерной в коллекторную область. Основные свойства транзистора определяются соотношением токов и напряжений в его цепях и их взаимном влиянии друг на друга. Усиление электрических колебаний основано на том, что входное напряжение на эмиттерном переходе ($U_{э-б}$) управляет током коллектора.

Различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) (рис. 39).

Схема с общей базой не обладает усилением по току, имеет малый коэффициент усиления по мощности, имеет хорошие частотные и температурные свойства, но невысокое входное сопротивление. Схема с общим эмиттером дает усиление по току и по напряжению, имеет наибольший коэффициент усиления мощности, обладает высоким входным сопротивлением, удобна тем, что питание осуществляется от одного источника напряжения, поэтому имеет широкое применение. Схема с общим коллектором обладает наибольшим усилением по току, имеет самое высокое входное сопротивление, но не дает усиления по напряжению. Любая схема дает усиление по мощности, т. е. транзистор является активным (усилительным) прибором.

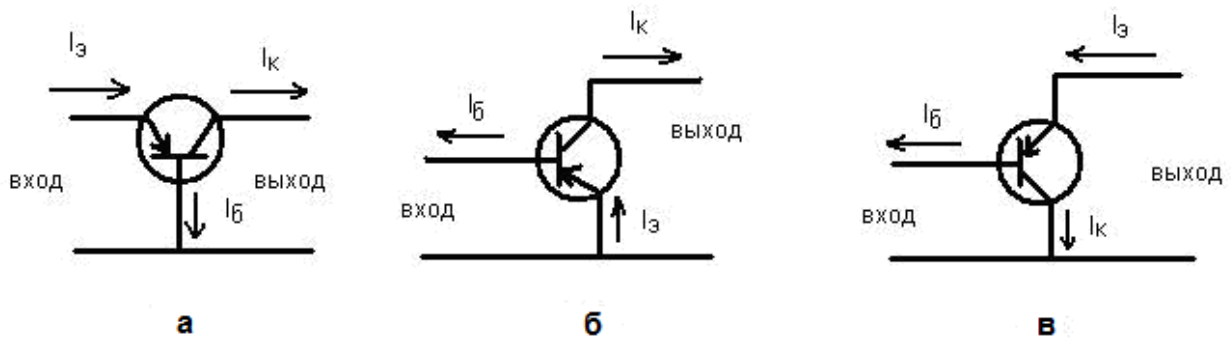


Рис. 39. Схемы включения транзистора:

а – с общей базой (ОБ); б – с общим эмиттером (ОЭ); в – с общим коллектором (ОК)

Рассмотрим физические процессы в транзисторе $p-n-p$ -типа при включении по схеме с общим эмиттером. При подаче прямого входного напряжения на переход эмиттер-база основные носители из эмиттера (дырки) переходят в область базы (инжекция). Встречный поток электронов из базы в эмиттер мал. В базовой области дырки являются неосновными. Так как толщина базы достаточно мала, а концентрация электронов в ней невелика, то дырки проходят базу, не успевая рекомбинировать с электронами. Коллекторный переход, включенный в запирающем направлении, имеет большое по сравнению с базой сопротивление, поэтому падение напряжения на базе невелико. Дырки благодаря явлению диффузии доходят до коллекторного перехода. Электрическое поле коллекторного перехода, включенного в запирающем направлении, способствует переходу (экстракции) неосновных носителей базы (дырок) в область коллектора, что приводит к созданию в его цепи управляемого коллекторного тока.

Одним из важных параметров транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером является статический коэффициент усиления по току (коэффициент передачи тока), который определяется в режиме без нагрузки при постоянном напряжении коллектор-эмиттер:

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \text{ при } U_{к-э} = \text{const.} \quad (43)$$

При этом в данной схеме входным является базовый ток, а выходным – коллекторный. Значение коэффициента β бывает порядка десятков и даже сотен, но в реальных условиях при включении нагрузки он оказывается немного ниже.

Коэффициент усиления по напряжению в схеме с общим эмиттером равен отношению амплитуды выходного напряжения (напряжение между коллектором и базой) и входного напряжения (напряжение эмиттер-база):

$$K_i = \frac{U_{к-э}}{U_{б-э}}. \quad (44)$$

Напряжение база-эмиттер не превышает десятых долей вольта, а выходное при достаточно больших значениях сопротивления нагрузки и напряжения источника питания получается до единиц вольт и более. Поэтому коэффициент усиления по напряжению имеет величину от десятков до сотен.

Отсюда следует, что коэффициент усиления по мощности в схеме с общим эмиттером получается от сотен или тысяч и даже десятков тысяч. Недостатком данной схемы является сильная зависимость работы от температуры.

Статический коэффициент усиления по току для схемы с общей базой равен приращению тока коллектора к приращению тока эмиттера при неизменном напряжении на коллекторном переходе (имеет величину порядка 0,95...0,99):

$$\alpha = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{эб}}, \text{ при } U_{к-б} = \text{const}. \quad (45)$$

Базовый ток стремятся сделать как можно меньшим, так как:

$$I_{к} = I_{э} - I_{б}. \quad (46)$$

Повышение или понижение температуры окружающей среды приводит к изменению характеристик транзистора, т. к. обратный ток коллектора сильно зависит от температуры, что требует температурной стабилизации работы транзисторов.

Биполярные транзисторы классифицируются по материалу, из которого они изготавливаются, способу движения носителей в базовой области, мощности и частоте, назначению, способу изготовления.

§ 16. Оптические свойства полупроводников

Фотоэлектронные приборы, принцип действия которых основан на преобразовании энергии электромагнитного излучения оптического диапазона в электрическую энергию, называются *фотоэлектрическими (фотоэлектронными)*.

Фотоэлектрические явления происходят при взаимодействии электромагнитного излучения оптического диапазона с веществом и состоят в том, что поглощение кванта (фотона) вызывает квантовый переход электрона в состояние с большей энергией. В зависимости от соотношения между энергией фотонов и характерными энергиями вещества (энергией возбуждения атомов и молекул, энергией их ионизации, работой выхода электронов из твердого тела и т. п.) поглощение электромагнитного излучения может вызывать разные виды фотоэффекта.

Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) представляет собой эмиссию (выход) электронов за пределы вещества при поглощении квантов электромагнитного излучения оптического диапазона (более подробно см. § 20).

Электровакуумный фотоэлектронный умножитель (ФЭУ, рис. 40) – прибор, в котором используется внешний фотоэффект и вторичная электронная эмиссия. ФЭУ имеет коэффициент усиления по току до нескольких миллионов, большую световую чувствительность, большую площадь обнаружения, может работать в агрессивных средах и при экстремальных отрицательных температурах. ФЭУ применяются в научных, медицинских и промышленных устройствах для измерения малых световых потоков, для проведения спектрального анализа, обнаружения взрывных устройств или радиоактивных веществ, изотопов и ядерных материалов (таможенный контроль), в качестве нейтринных детекторов в астрономии.

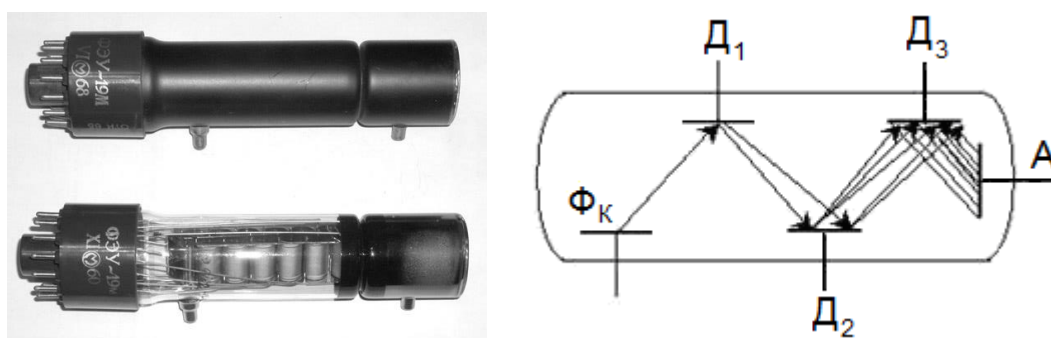


Рис. 40. Внешний вид и принцип действия фотоэлектронного умножителя

Внутренний фотоэффект (фоторезистивный эффект) состоит в том, что при поглощении оптического излучения в полупроводниках происходит генерация пар носителей заряда электрон-дырка (в собственных полупроводниках) или возникновение зарядов одного знака (примесное поглощение). В результате увеличения концентрации свободных носителей заряда внутри

тела увеличивается электропроводность и уменьшается сопротивление полупроводника без нарушения электронейтральности.

Внутренний фотоэффект в собственном полупроводнике возможен, если энергия поглощаемого кванта не меньше ширины запрещенной зоны полупроводника (красная граница): $h\nu \geq \Delta W$, где ΔW – ширина запрещенной зоны. При этом электрон из валентной зоны переходит в зону проводимости, а в валентной зоне образуется свободная дырка (рис. 41, а). В примесных полупроводниках фотоэффект имеет место, если энергия кванта не меньше энергии активации примесных уровней ($h\nu \geq \Delta W_D, h\nu \geq \Delta W_A$): в донорном полупроводнике электроны с локальных уровней в запрещенной зоне переходят в зону проводимости (рис. 41, б); в акцепторном полупроводнике электроны из валентной зоны переходят на локальные уровни, в результате чего в валентной зоне образуются дырки (рис. 41, в).

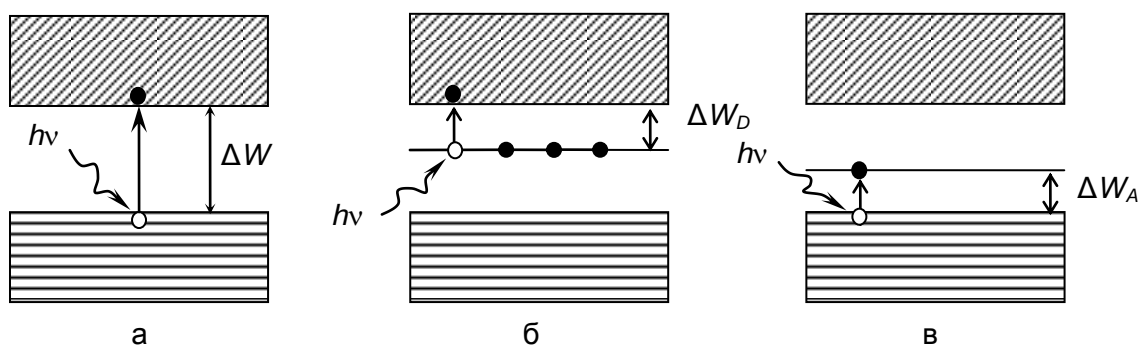


Рис. 41. Внутренний фотоэффект:

а – в собственном полупроводнике; б – в донорном полупроводнике; в – в акцепторном полупроводнике

Наряду с поглощением, приводящим к появлению фотопроводимости, может иметь место экситонный механизм поглощения. Экситоны представляют собой квазичастицы – электрически нейтральные связанные состояния электрона и дырки, образующиеся в случае возбуждения с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны. Уровни энергии экситонов располагаются у дна зоны проводимости. Так как экситоны электрически нейтральны, то их возникновение в полупроводнике не приводит к появлению дополнительных носителей тока, вследствие чего экситонное поглощение света не сопровождается увеличением фотопроводимости.

Фотоэлектронные полупроводниковые приборы (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры, приборы с зарядовой связью (ПЗС)) являются наиболее перспективными преобразователями светового сигнала в

электрический. Они обладают достоинствами полупроводниковых приборов (малые габариты и масса, высокая надежность, малые питающие напряжения, малое потребление энергии), но при этом имеют более высокую чувствительность по сравнению с электровакуумными фотоэлементами.

Фотогальванический или вентильный фотоэффект имеет место при воздействии на p - n -переход, гетеропереход или контакт металл-полупроводник оптическим излучением и состоит в появлении фотоЭДС из-за разделения электрическим полем пар электрон-дырка, возникающих в результате генерации при поглощении оптического излучения.

Фотоэффект в полупроводниках имеет место в узком интервале длин волн (рис. 42)

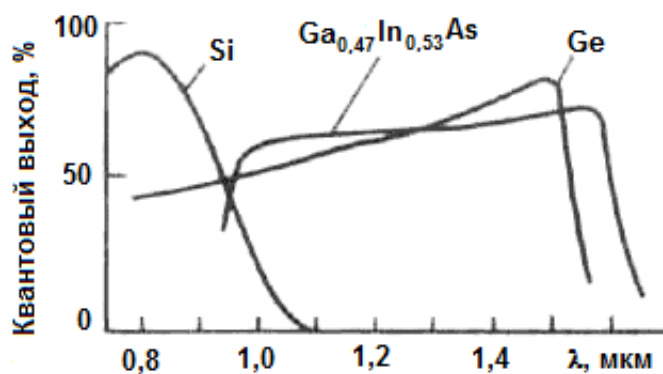


Рис. 42. Спектральная чувствительность различных полупроводниковых материалов

Фоторезистор – полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого зависит от светового потока.

Материалы, из которых изготавливают фоторезисторы – сульфид и селенид кадмия (наибольшая чувствительность в видимом диапазоне), сульфид свинца (наибольшая чувствительность в ИК-диапазоне). Принцип устройства фоторезистора показан на рис. 43. На диэлектрическую пластину 1 нанесен тонкий слой полупроводника 2 с металлическими электродами (контактами) 3. Полярность включения источника питания не играет роли (см. рис. 43, а). Для защиты от внешних воздействий фоторезистор помещен в пластмассовый корпус 4 (см. рис. 43, б) с окном 5 для воздействия оптического излучения. Для включения в электрическую цепь служат штырьки 6.

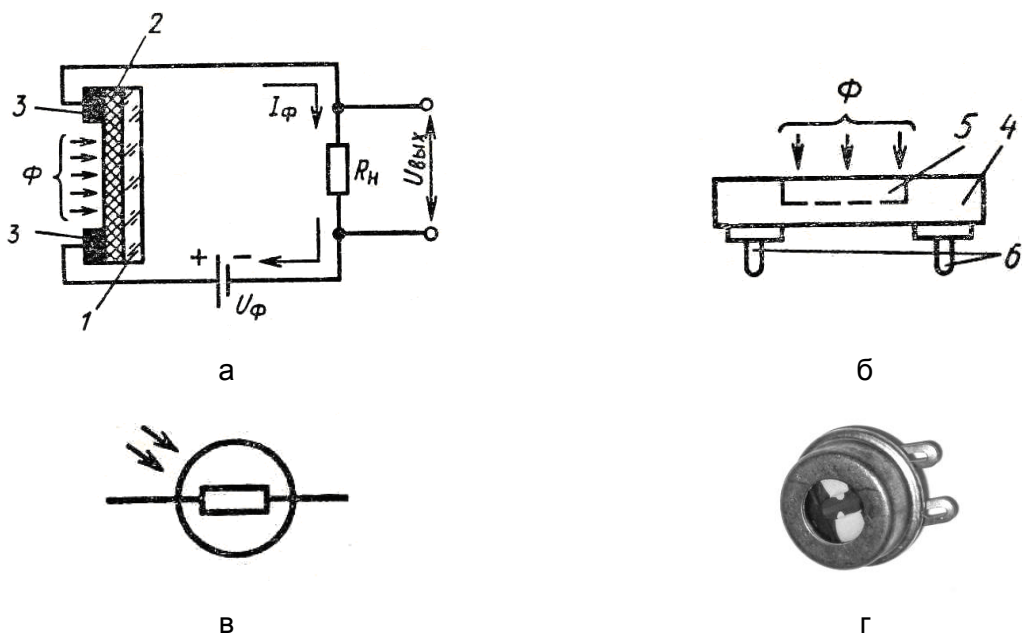


Рис. 43. Фоторезистор

а – структура; б – схема включения; в – обозначение; г – внешний вид

При отсутствии освещения фоторезистор имеет большое темновое сопротивление порядка $10^4 \dots 10^7$ Ом. Главное достоинство фоторезисторов – высокая чувствительность и малые габариты. Чувствительность полупроводниковых фоторезисторов больше чувствительности вакуумных и газонаполненных фотоэлементов, т. к. для получения свободных электронов внутри полупроводника требуется меньшая энергия, чем для выбивания электронов из вещества. Недостатком является большая инерционность – время срабатывания фоторезисторов $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с, что несколько выше других фотоэлектронных приборов. Сильное влияние температуры ограничивает применение фоторезисторов. Фоторезисторы используются в цепях фотоконтроля и фотоэлектронной автоматики, в качестве чувствительных элементов на входе приемников в системах оптической связи обнаружения инфракрасного излучения, датчиков перемещения, скорости движения, задымления и т. д., если это возможно по условиям их быстродействия.

У некоторых фоторезисторов область чувствительности помимо оптического диапазона захватывает рентгеновский и гамма-диапазоны. Поэтому большой интерес представляют собой датчики проникающей радиации (дозиметры рентгеновского и гамма-излучений) на основе сульфида и селенида кадмия. Гамма-датчики просты в применении, имеют высокую чувствительность, малые габариты, низкое напряжение питания. Недостатком является большая инерционность при малых интенсивностях излучения.

Фотодиод – полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности p - n -перехода. В фотодиодном режиме при действии света на запирающий контакт (p - n -переход) происходит генерация носителей заряда электрон-дырка, проводимость диода возрастает и обратный ток увеличивается пропорционально освещенности из-за увеличения концентрации неосновных носителей, которые, достигая p - n -перехода, увлекаются его полем. Чем сильнее световой поток, тем выше концентрация неравновесных носителей, тем больше неосновных носителей захватывается полем p - n -перехода, тем больше обратный ток. Материалами, из которых выполняют фотодиоды, служат Ge, Si, GaAs, HgCdTe. Германиевые фотодиоды наиболее чувствительны в ИК-области ($\lambda = 1,7$ мкм), кремниевые – в видимой и ближней инфракрасной области ($\lambda = 0,8$ мкм). Нитрид галлия используется для работы в ультрафиолетовом диапазоне волн. HgCdTe применяется в инфракрасной части спектра, максимальная длина волны составляет около 14 мкм. Фотодиоды с барьером Шотки имеют повышенное быстродействие. Фотодиоды применяются в тех же случаях, что и фоторезисторы, но имеют малую инерционность и высокую чувствительность. Они используются для регистрации инфракрасного излучения, в тепlopеленгаторах, для ИК-связи на небольших расстояниях, в астрономии (чувствительность в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра), в вычислительной технике в устройствах ввода и вывода информации (скорость считывания информации достигает 2000 знаков в секунду). Широко используют фотодиоды в регистрирующих и измерительных приборах фотометрии, в киноаппаратуре и фототелеграфии, лазерной технике, в матричных фотоприемниках большой площади, датчиках радиации, датчиках координат в радиолокационных станциях (РЛС).

Полупроводниковые фотоэлементы (вентильные или фотогальванические) представляют собой фотодиоды, работающие без источника внешнего напряжения и создающие собственную ЭДС при поглощении оптического излучения (прямое преобразование энергии оптического излучения в электрическую). Наибольшее распространение получили селеновые, сернистоталлиевые и кремниевые фотоэлементы вентильного типа.

Первые вентильные фотоэлементы изготавливались на основе закиси меди (1926 г). В дальнейшем широко использовались селеновые элементы, сделанные на основе селена p -типа, в пластинке селена создавался тонкий слой n -типа, на который воздействовал световой поток. Они имеют спектральную

характеристику, близкую к человеческому глазу, что удобно для фотометрических измерений. Недостаток вентильных фотоэлементов – сильная зависимость свойств от температуры и низкие частотные свойства.

В настоящее время наибольшее распространение получили кремниевые фотоэлементы, используемые для изготовления солнечных батарей, непосредственно преобразующих солнечную энергию в электрическую (рис. 44).

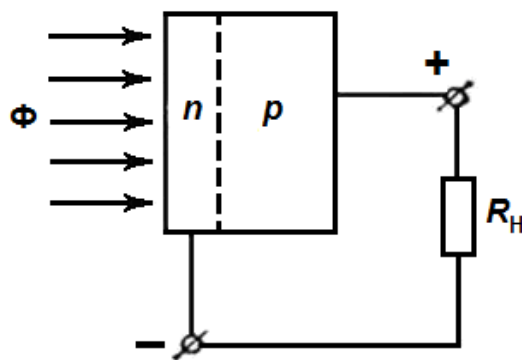


Рис. 44. Солнечный фотоэлемент

Солнечный фотоэлемент состоит из пластины *n*-кремния, на поверхности которой создан тонкий слой полупроводника *p*-типа. Так как его толщина мала (2...3 мкм), то световое излучение легко проникает в зону *p-n*-перехода. Так же как и в полупроводниковом диоде, на границе областей с разным типом проводимости образуется запирающий слой – *p-n*-переход. Фотоны, воздействуя на *p-n*-переход и прилегающие к нему области, вызывают генерацию пар носителей электрон-дырка. Эти носители диффундируют к переходу и разделяются электрическим полем на *p-n*-переходе. Для неосновных носителей заряда (дырки в *n*-области и электроны в *p*-области) поле *p-n*-перехода является ускоряющим, а для основных (электронов в *n*- и дырок в *p*-области) – тормозящим. В результате такого процесса на *p*-переходе образуется избыток основных носителей заряда, которые создают на внешних выводах фотоэлемента разность потенциалов, называемую фотоЭДС. С увеличением светового потока фотоЭДС возрастает и достигает 0,5 В. Максимум интегральной чувствительности солнечных батарей лежит в инфракрасной области. Из таких элементов путем последовательного и параллельного соединения создают солнечные батареи, которые могут развивать мощность до нескольких киловатт. КПД кремниевых фотоэлементов выше, чем у селеновых и других фотоэлементов.

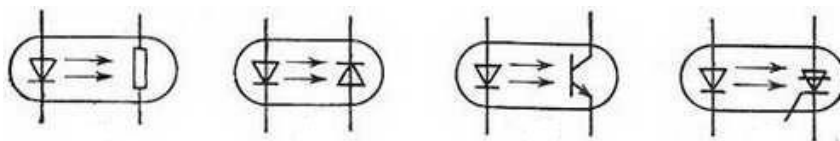
Гетероструктурные солнечные батареи (СБ) имеют более высокий КПД, чем кремниевые и германиевые. КПД гетероструктурных (например, арсенид-галиевых) солнечных батарей доходит до 35...40 %. Их максимальная рабочая температура +150 °С в отличие от + 70 °С, как у кремниевых батарей, что увеличивает возможности концентрирования света на фотопреобразователе из GaAs. СБ – это основные источники электропитания на искусственных спутниках Земли, орбитальных станциях (прил. 2), автоматических метеостанциях, в резервных системах электроснабжения, для энергообеспечения зданий (см. прил. 2), автономных ретрансляторах сотовой связи, дорожных знаков, элементов дорожной разметки и освещения рекламных щитов, уличных и садовых фонарях, на полицейских блокпостах, морских буях, для зарядки аккумуляторов разнообразных мобильных устройств и многое другое.

Фототранзисторы применяются в тех же случаях, что и фотодиоды, но фототранзисторы имеют в десятки раз более высокую световую чувствительность. Биполярный фототранзистор представляет собой транзистор с прозрачным «окном», через которое световой поток воздействует на область базы. На эмиттерном переходе напряжение прямое, на коллекторном – обратное при нулевом токе базы. При этом коллекторный ток зависит от освещенности эмиттерного перехода. Так, например, в фототранзисторе *p-n-p*-типа под действием света в базе возникает генерация пар носителей заряда – электронов и дырок. Они диффундируют к коллекторному переходу, в котором так же, как и в фотодиоде, происходит их разделение. Дырки под действием поля коллекторного перехода переходят из базы в коллектор, что вызывает увеличение тока коллектора. Электроны остаются в базе и повышают прямое напряжение эмиттерного перехода, что увеличивает инжекцию дырок. За счет этого дополнительно увеличивается ток коллектора.

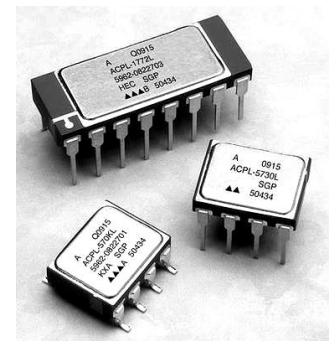
Кроме биполярных фототранзисторов в качестве приемников излучения применяют полевые транзисторы, МДП-фототранзисторы.

§ 17. Другие типы полупроводниковых приборов

Оптоэлектронные приборы. В оптоэлектронных приборах (оптронах) передача электрического сигнала осуществляется не гальванической связью, как в обычных полупроводниковых приборах, а оптической (рис. 45). Носителями сигнала являются фотоны.



а



б

Рис. 45. Оптроны:

а – схематичное изображение; б – внешний вид

Кроме биполярных транзисторов существуют **полевые (униполярные) транзисторы**. Полевые транзисторы с изолированным затвором бывают двух типов: со встроенным (собственным) каналом (рис. 46); с индуцированным (инверсионным) каналом.

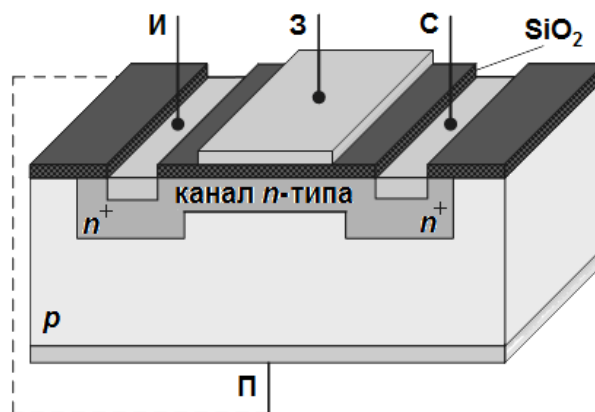


Рис. 46. Структура полевого транзистора с изолированным затвором

со встроенным каналом *n*-типа:

И – исток; З – затвор; С – сток

В отличие от биполярных, полевые транзисторы управляются не током, а напряжением. Их параметры слабо зависят от температуры. Полевые транзисторы могут работать в широком диапазоне токов (от нескольких миллиампер до сотен ампер), имеют высокую частоту переключения (сотни кГц и больше).

Физической основой работы полевого транзистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник является *эффект поля*. Полевые транзисторы в активном режиме могут работать только в области слабой или сильной инверсии. В области инверсии концентрация неосновных носителей заряда в канале выше, чем концентрация основных носителей в объеме полупроводника.

Изменяя величину напряжения на затворе, можно менять концентрацию свободных носителей в инверсионном канале и тем самым модулировать сопротивление канала. Примеры устройств, построенных на полевых транзисторах – наручные кварцевые часы и пульт дистанционного управления для телевизора.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС-структуры) – это интегральные полупроводниковые приборы, в основе работы которых лежит принцип создания, передачи и хранения зарядового пакета в полупроводнике под действием внешнего электрического поля. С физической точки зрения ПЗС интересны тем, что электрический сигнал в них представлен зарядом, а не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборов.

Широкое практическое применение получили фоточувствительные ПЗС-приборы (ФПЗС). Основной областью применения ПЗС является видеотехника: промышленные системы контроля, машинное зрение, медицинское тепловизионное оборудование, бесконтактное оборудование (датчики), системы воздушного базирования (картография, навигация и управление летательными аппаратами), фототелеграфия.

Полевой транзистор с плавающим затвором является основой флеш-памяти. **Флеш-накопитель** – это носитель данных в таких портативных устройствах, как цифровые фото- и видеокамеры, сотовые телефоны, портативные компьютеры, MP3-плееры, цифровые диктофоны и т. п. Существует два основных применения флеш-памяти: как мобильный носитель информации и как хранилище программного обеспечения («прошивки») цифровых устройств.

Интегральная микросхема – микроэлектронное устройство для преобразования сигнала, обработки сигнала и накопления информации, имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов.

Интегральные микросхемы (ИМС) подразделяются:

- по виду обрабатываемого сигнала на аналоговые (непрерывный во времени сигнал) и цифровые (дискретный сигнал);
- по способу изготовления и структуре на гибридные, пленочные и полупроводниковые;
- по степени интеграции на малые (10 элементов на кристалл), средние (100 элементов), большие (1000) и сверхбольшие (>10 000);
- по быстродействию и т. д.

Полупроводниковая интегральная схема (монолитная) представляет собой электронную схему, все элементы которой (диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы) выполнены в объеме на общей полупроводниковой пластине (рис. 47).

Гибридная схема состоит из самостоятельных компонентов (диодов, транзисторов и полупроводниковых интегральных микросхем).

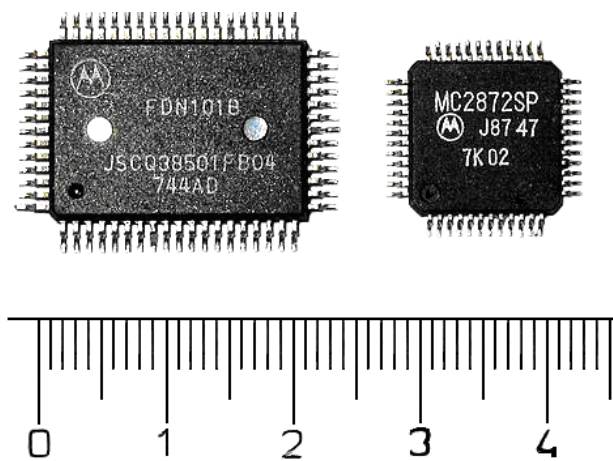


Рис. 47. Интегральные микросхемы

В основе аналоговых схем лежат усилительные каскады. В основе цифровых ИМС лежат транзисторные ключи, которые способны находиться в двух устойчивых состояниях – открытом и закрытом.

Микропроцессор – устройство, реализованное в виде одной микросхемы или комплекта из нескольких специализированных микросхем, отвечающее за выполнение арифметических, логических операций и операций управления, записанных в машинном коде.

§ 18. Нанoeлектроника

Нанoeлектроника – область электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных электронных схем с характерными топологическими размерами элементов менее 100 нм. Основная задача нанoeлектроники – это создание новых миниатюрных электронных устройств и методов их интеграции в практически используемые схемы. Научные исследования в этой области охватывают различные области знаний: материаловедение, электронику, механику, биологию, физику, химию, медицину. Термин «нанoeлектроника» связан с термином «микроэлектроника»

и отражает переход современной полупроводниковой электроники к элементам с размером в нанометровой области. Для элементов таких размеров начинают преобладать квантовые эффекты. Уже сегодня техника приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать 1 бит информации (0 и 1) с помощью одного электрона, локализация которого в пространстве может быть задана одним атомом. Ожидает практического разрешения и идея аналогичных однофотонных элементов. Исследования в области наноэлектроники важны для разработки новых принципов и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации.

§ 19. Термоэлектрические явления в металлах и полупроводниках

Термоэлектрические явления состоят в том, что при определенных условиях возможно взаимное превращение тепловой энергии и энергии электрического тока. К ним относятся явления Зеебека, Пельтье, Томсона.

Электрические явления в контактах. При соприкосновении двух металлов или полупроводников электроны могут переходить из одного материала в другой вследствие теплового движения.

Выходу электронов за пределы металла или полупроводника мешают, главным образом, кулоновские силы притяжения между электронами и положительными ионами кристаллической решетки (силы направлены в объем кристалла). Существует минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он преодолел кулоновское поле и покинул кристалл – *работа выхода* $A_{\text{вых}}$. Работа выхода зависит от вида вещества, чистоты поверхности, температуры (имеет значение от десятых долей эВ до нескольких эВ).

Так как соприкасающиеся материалы имеют различные физические и химические свойства (концентрацию носителей заряда, работу выхода) и (или) температура в разных точках неодинакова, то потоки электронов, перемещающихся в соседний слой, будут неодинаковы. При этом один материал будет заряжаться положительно, а другой отрицательно. В результате этого проводники приобретают электрические заряды противоположных знаков (рис. 48). Это приводит к появлению электрического поля, препятствующего даль-

нейшему перетеканию электронов. При достижении равновесия встречные потоки электронов в обоих направлениях становятся одинаковыми, а на границе раздела и во внешнем пространстве между материалами возникает контактная разность потенциалов. Различают внешнюю и внутреннюю контактную разность потенциалов.

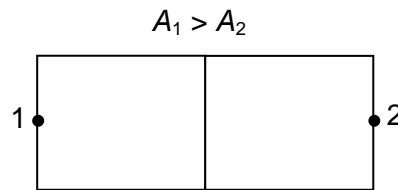


Рис. 48. Возникновение контактной разности потенциалов

Внешняя контактная разность потенциалов φ' зависит от работ выхода контактирующих материалов. Рассмотрим контакт двух металлов с различной работой выхода (пусть $A_2 > A_1$). Между ними происходит обмен электронами, причем преимущественно электроны переходят из проводника с меньшей работой выхода в проводник с большей работой выхода.

$$\Delta\varphi' = \frac{A_2 - A_1}{e}, \quad (47)$$

где φ' – внешняя контактная разность потенциалов; A – работа выхода; e – заряд электрона.

Внутренняя контактная разность потенциалов φ'' связана с различной концентрацией электронов и их диффузией из области с большей концентрацией в соседнюю область. Внутренняя контактная разность зависит от соотношения концентраций контактирующих материалов:

$$\Delta\varphi'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (48)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Если существуют обе причины, вызывающие контактную разность потенциалов, то:

$$\Delta\varphi = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (49)$$

Длина области, в которой действует контактное поле, в металлах $10^8 \dots 10^7$ см, а в полупроводниках колеблется в широких пределах и может достигать величины $10^4 \dots 10^5$ см.

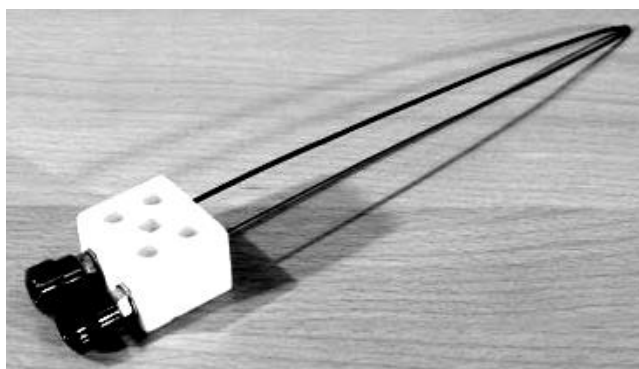
Итальянский ученый А. Вольта в 1797 г. установил, что если металлы Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd привести в контакт в указанной последовательности, то каждый предыдущий при соприкосновении с одним из следующих зарядится положительно (ряд электроотрицательности). Если составить незамкнутую электрическую цепь из нескольких различных проводников, соединенных последовательно и находящихся при одинаковой температуре, разность потенциалов между конечными проводниками не зависит от химического состава промежуточных проводников, а определяется природой крайних (закон Вольта). В замкнутой цепи из проводников при одинаковой температуре всех элементов контактные разности потенциалов не могут вызвать электрического тока (алгебраическая сумма контактных разностей потенциалов равна нулю).

В 1821 г. немецкий физик Зеебек открыл эффект возникновения электродвижущей силы (термоЭДС) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру. Явление Зеебека используется для измерения температуры. Для этого применяются термоэлементы или термопары. **Термопара** (рис. 49) состоит из двух сваренных на одном конце проводников (см. рис. 49, 2, 3), с различными термоэлектрическими свойствами. Спаянный конец (рабочий спай T_1) помещается в измеряемую среду, а свободные концы (холодный спай T_2) присоединяют к электроизмерительному прибору (см. рис. 49, 1). Если температуры рабочего и холодного спаев различны, то на свободных концах термопары возникает разность потенциалов (термоЭДС), пропорциональная разности температур

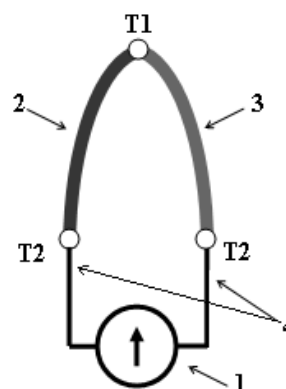
$$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2), \quad (50)$$

где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ – дифференциальная или удельная термоЭДС (численно равна

величине термоЭДС, возникающей при разности температур нагретого и холодного спаев в 1 Кельвин). Для металлов удельная термоЭДС мала и составляет величину порядка $10^{-1} \dots 10^{-2}$ мВ/К; для полупроводников сильно зависит от концентрации примесей и может достигать нескольких мВ/К.



а



б

Рис. 49. Термопара:
а – внешний вид; б – схематичное изображение

Если поддерживать неизменной температуру свободного конца термопары, показания прибора будут зависеть только от температуры рабочего конца термопары. Такой прибор будет показывать непосредственно температуру рабочего спая термопары. Термопары применяются как для измерения ничтожно малых разностей температур, так и для измерения очень высоких (до 2500 °С) и очень низких (–200 °С) температур, например, внутри доменных печей или сжиженных газов. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (до 2200 °С) в агрессивных средах. Они позволяют измерять температуру с помощью дистанционных устройств автоматики и контроля при автоматическом управлении технологическими процессами на производстве, например, на складах горючего. Термопары имеют высокую чувствительность, низкую собственную теплоемкость, просты в обращении, устойчивы к вибрациям, могут выпускаться во взрывозащищенном исполнении. Применяются в термоэлектрогенераторах, сенсорах напряжения, температуры, давления газа, интенсивности света. В настоящее время используют следующие стандартные термопары: платинородий-платиновая, хромель-алюмелевая, хромель-копелевая, железо-копелевая, медь-копелевая. Для измерения высоких температур до 2500 °С используют вольфрам-рениевые термопары. Чувствительность термопар повышается, если их соединять последовательно (термобатареи или термостолбики).

Полупроводниковые термопары (рис. 50) не применяются для измерения температуры из-за сильной зависимости удельной термоЭДС от температуры. Их используют в качестве источников тока – термогенераторов. Полупроводниковые термогенераторы были впервые созданы в Советском Союзе под руководством академика А. Ф. Иоффе. В полупроводниковых термоэлементах

(см. рис. 50), которые дают возможность непосредственно превращать тепловую энергию в электрическую, используют полупроводники с различным типом проводимости (*p*- и *n*-типа), соединенные металлической пластинкой. При нагревании пластинки возникает термоЭДС порядка 0,3 В.

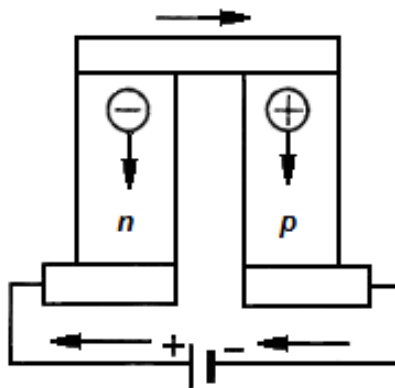


Рис. 50. Полупроводниковая термопара

В термогенераторах для получения значительной термоЭДС последовательно соединяют несколько десятков термоэлементов в виде плоской конструкции. Термогенераторы используются как автономные источники электропитания для космических аппаратов; морских буев; навигационных и метеорологических станций в труднодоступных районах; аппаратов, опускаемых на большие глубины в моря и океаны; систем пожарной сигнализации; для защиты газо- и нефтепроводов от коррозии; получения электроэнергии, питающей радиоустановки, в местах отсутствия электрической энергии. Могут использоваться для тепlopеленгации с самолетов объектов по их тепловому излучению на больших расстояниях (городов, заводов, военной техники, пожаров и т. д.). В качестве источников тепловой энергии в термогенераторах применяют атомные реакторы, источники с радиоактивными изотопами, химическую энергию горения, энергию Солнца.

Эффект Пельтье. Французский физик Ж. Пельтье в 1834 г. обнаружил, что при прохождении через контакт двух различных проводников электрического тока в зависимости от его направления помимо джоулевой теплоты выделяется или поглощается дополнительная теплота, обусловленная работой контактного электрического поля. Таким образом, явление Пельтье является обратным по отношению к явлению Зеебека. В отличие от джоулевой теплоты, которая пропорциональна квадрату силы тока, теплота Пельтье пропорциональна первой степени силы тока и меняет знак при изменении направления тока.

$$Q_{\text{п}} = \Pi q, Q_{\text{п}} = \Pi q = \Pi It, \quad (51)$$

где Π – коэффициент Пельтье; q – заряд, прошедший через спай за время t ; I – сила тока в цепи.

Коэффициент Π зависит от природы находящихся в контакте материалов и температуры. Коэффициент Пельтье для металлов при комнатных температурах имеет величину порядка $10^{-2} \dots 10^{-3}$ В, а для полупроводников – на несколько порядков выше.

Почему один контакт нагревается, другой – охлаждается? При наличии электрического тока происходит не только перенос электрического заряда в цепи, но и перенос энергии, в одном контакте электроны ускоряются контактным полем (рис. 51, контакт B), в другом – тормозятся (рис. 51, контакт A). В первом случае электроны, ускоренные электрическим полем в контакте и получившие кинетическую энергию, при столкновениях с кристаллической решеткой будут передавать ее решетке и нагревать контакт. Во втором случае электроны, потерявшие скорость при торможении, будут, сталкиваясь с кристаллической решеткой, отбирать у нее энергию, т. е. контакт будет охлаждаться. Элементы Пельтье применяются, когда необходимо охлаждение с небольшой разницей температур (в астрономии, радиоэлектронике, медицине, археологии, ядерной физике, приборостроении).

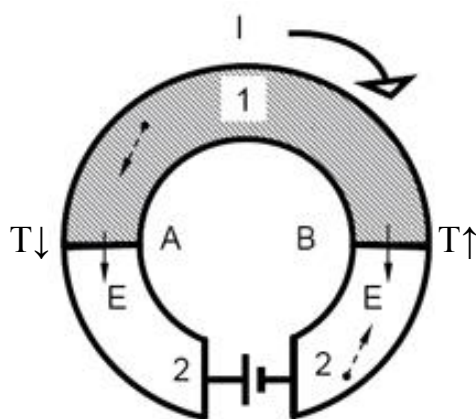


Рис. 51. Эффект Пельтье

Например, элементы Пельтье (рис. 52) применяются в автомобильных холодильниках (не имеют движущихся частей, агрессивных жидкостей, позволяют плавно регулировать температуру), для охлаждения устройств с зарядовой связью в цифровых фотокамерах, в устройствах кондиционирования воздуха, для охлаждения высокопроизводительных процессоров компьютеров (в компьютерных системах, элементы которых установлены и эксплуатируются в

жестких форсированных режимах), высокопроизводительных видеоадаптеров, а в некоторых случаях и модулей памяти, приемников излучения в инфракрасных сенсорах, термостатирования лазерных диодов, медицинского оборудования.



Рис. 52. Применение элементов Пельтье

В настоящее время интенсивно развиваются магнитоэлектроника, криоэлектроника, акустоэлектроника и т. д.

Эффект Томсона. Вильям Томсон (Кельвин) в 1856 г., исследуя термоэлектрические явления, пришел к заключению, подтвердив его экспериментально, что при прохождении тока по проводнику, вдоль которого имеется градиент температуры, должно происходить дополнительное выделение (поглощение) теплоты, аналогичной теплоте Пельтье. Это явление получило название **явление Томсона**. Его можно объяснить следующим образом. Так как в более нагретой части проводника электроны имеют большую среднюю энергию, чем в менее нагретой, то, двигаясь в направлении убывания температуры, они отдают часть своей энергии кристаллической решетке, в результате чего происходит выделение теплоты Томсона. Если же электроны движутся в сторону возрастания температуры, то они, наоборот, пополняют свою энергию за счет энергии решетки, в результате чего происходит поглощение теплоты Томсона. Количество тепла, выделяющееся вследствие явления Томсона в единицу времени в элементе проводника длины dl , равно

$$dQ = \tau I \frac{dT}{dl} dl, \quad (52)$$

где I – сила тока; dT/dl – градиент температуры; τ – коэффициент Томсона.

Эффект Томсона практического применения не имеет.

Вопросы для самопроверки

1. От чего зависит сопротивление цилиндрических проводников?
2. Что называется электропроводностью и удельной проводимостью вещества? Единицы измерения этих величин.
3. Связь удельной проводимости с концентрацией и подвижностью носителей заряда в металлах и полупроводниках.
4. Как зависит удельная проводимость металлов от температуры?
5. Как зависит удельная проводимость полупроводников от температуры?
6. Как графически изображаются температурные зависимости сопротивления металла и полупроводника от температуры?
7. Что называется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС)?
8. В каких единицах измеряется ТКС? Какова величина ТКС для металлов?
9. Какая температура служит для расчета ТКС металла?
10. Как рассчитать ширину запрещенной зоны ΔW полупроводника?
11. Какое различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками с точки зрения зонной теории?
12. Каков механизм собственной проводимости полупроводника?
13. Каков механизм электронной примесной проводимости полупроводника?
14. Каков механизм дырочной примесной проводимости полупроводника?
15. Основные и неосновные носители заряда.
16. Какие процессы происходят при образовании *p-n*-перехода?
17. Какие процессы происходят при прямом включении *p-n*-перехода?
18. Какие процессы происходят при обратном включении *p-n*-перехода?
19. Какой вид имеет вольтамперная характеристика *p-n*-перехода?
20. Что называется полупроводниковым диодом?
21. Для каких целей применяются полупроводниковые диоды? Какие свойства *p-n*-перехода используются при этом?
22. В чем заключается внутренний фотоэффект?
23. В чем заключается вентильный фотоэффект?
24. Что называется красной границей внутреннего фотоэффекта? Чем обусловлено наличие красной границы?
25. Какова связь между красной границей внутреннего фотоэффекта и шириной запрещенной зоны полупроводника?

26. Почему красная граница ($\nu_{кр}$) примесных полупроводников меньше, чем чистых?
27. Почему внутренний фотоэффект наблюдается только у полупроводников и диэлектриков?
28. Принцип действия фоторезистора.
29. Чем обусловлен темновой ток фоторезистора?
30. Принцип действия полупроводникового фотоэлемента.
31. Почему при изменении интенсивности света, падающего на полупроводниковый фотоэлемент, фототок изменяется?
32. Световая и спектральная характеристики фотоприбора.
33. Каковы причины возникновения контактной разности потенциалов?
34. Каков механизм появления контактной разности потенциалов?
35. В чем заключается термоэлектрический эффект?
36. Что называется термоЭДС и от чего она зависит?
37. Что называется коэффициентом термоЭДС и от чего он зависит?
38. В чем заключается эффект Пельтье?
39. Каковы причины выделения и поглощения теплоты в спаев (механизм эффекта Пельтье)?
40. От чего и как зависит теплота Пельтье?
41. Каково практическое применение термопар и термобатарей?
42. Почему термопары имеют разные термоЭДС при одной и той же разности температур спаев?
43. Каково практическое применение эффекта Пельтье?
44. Каковы преимущества измерения температур термопарой по сравнению с жидкостными термометрами?

Задачи

1. Плотность тока в медном проводнике равна 3 А/мм^2 . Найти удельное сопротивление проводника.
2. Определить среднюю скорость упорядоченного движения электронов в медном проводнике при силе тока 10 А и сечении проводника, равном 1 мм^2 . Принять, что на каждый атом меди приходится два электрона проводимости.

3. Плотность тока в алюминиевом проводе равна 1 А/мм^2 . Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов, предполагая, что число свободных электронов в 1 см^3 алюминия равно числу атомов.

4. Сила тока в металлическом проводнике равна $0,8 \text{ А}$, а сечение проводника 4 мм^2 . Принимая, что в каждом кубическом сантиметре металла содержится $2,5 \cdot 10^{22}$ свободных электронов, определить среднюю скорость их упорядоченного движения.

5. Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление $\rho = 0,48 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Определить концентрацию носителей заряда, если подвижности и электронов, и дырок соответственно равны $0,36$ и $0,16 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

6. Определить ЭДС термоэлемента при разности температур спаев 500 К , если термоэлектрическая постоянная его 50 мкВ/К .

7. Какой наибольший заряд может протечь по термопаре медь-платина при поглощении горячим спаем $Q = 4,19 \text{ Дж}$ энергии? Температура горячего спая $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{С}$, холодного $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$, термоЭДС $\varepsilon = 0,76 \text{ мВ}$.

8. Сила тока в цепи, состоящей из термопары с сопротивлением 4 Ом и гальванометра с сопротивлением 80 Ом , равна 26 мкА при разности температур спаев, равной $50 \text{ }^\circ\text{С}$. Определить постоянную α термопары.

9. Термопара висмут-железо с постоянной $\alpha = 92 \text{ мкВ/К}$ и сопротивлением $R = 5 \text{ Ом}$ (при $t = 0 \text{ }^\circ\text{С}$) присоединена к гальванометру внутренним сопротивлением $r = 110 \text{ Ом}$. Какую силу тока покажет гальванометр, если температура одного спая термопары $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{С}$, а другого $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$?

10. Термопара медь-константан с сопротивлением 5 Ом (при $t = 0 \text{ }^\circ\text{С}$) присоединена к гальванометру, сопротивление которого равно 100 Ом . Один спай термопары погружен в тающий лед, другой – в горячую жидкость. Сила тока в цепи равна 37 мкА . Постоянная термопары $\alpha = 43 \text{ мкВ/К}$. Определить температуру жидкости.

11. Определить сопротивление гальванометра с ценой деления шкалы 15 нА/дел , если сопротивление термопары 6 Ом и ею можно измерять минимальное изменение температуры 6 мК . Термоэлектрическая постоянная термопары 50 мВ/К . Отклонение стрелки гальванометра 10 делений.

12. Термопара константан-железо сопротивлением $0,25 \text{ Ом}$ подключена к гальванометру сопротивлением $5,0 \text{ Ом}$ и ценой деления шкалы $0,95 \text{ мкА/дел}$,

который при нагревании спая показывает силу тока $85,0 \text{ мкА}$. На сколько нагрелся спай и на сколько делений шкалы отклонилась стрелка, если постоянная термопары $51,60 \text{ мкВ/К}$?

13. Термопара железо-константан, постоянная которой $\alpha = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ В/К}$ и сопротивление $R = 15 \text{ Ом}$, замкнута на гальванометр. Один спай термопары находится в сосуде с тающим льдом, а второй помещен в среду, температура которой не известна. Определите эту температуру, если ток через гальванометр $I = 0,2 \text{ мА}$, а его внутреннее сопротивление $r = 150 \text{ Ом}$.

14. Термопара с термоЭДС ε_T (железо-константан) и соединенный с нею последовательно гальванометр включены, как показано на рис. 53, где ε – ЭДС батареи, равная $1,5 \text{ В}$. Полное сопротивление потенциометра равно 15 кОм . Холодный спай термопары находится в сосуде с тающим льдом. Постоянная термопары $\alpha = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ В/К}$. Определите температуру горячего спая термопары, если при сопротивлении $R_{AB} = 150 \text{ Ом}$ сила тока в цепи гальванометра равна нулю. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

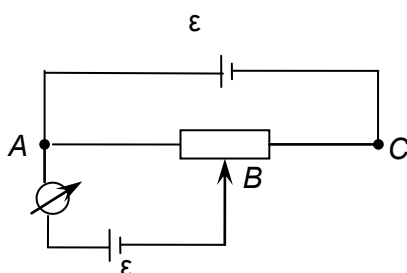


Рис. 53

15. Для измерения температуры среды в нее погружают один спай термопары никель-хром с постоянной $\alpha = 0,5 \text{ мкВ/К}$, которая присоединена к гальванометру внутренним сопротивлением 2 кОм и ценой деления 10 нА/дел . Чему равна температура среды, если при температуре второго спая 15 °С отклонение стрелки гальванометра составляет 25 делений?

16. Работа выхода электронов из меди $4,47 \text{ эВ}$, а из свинца – $3,74 \text{ эВ}$. Какова внешняя контактная разность потенциалов в соединении этих двух металлов? Считать концентрации электронов проводимости одинаковыми.

17. Определить внутреннюю контактную разность потенциалов между медью и калием при температуре 27 °С . Принять, что на каждый атом меди приходится два электрона проводимости, а калия – 1 .

ГЛАВА 3. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗЛУЧЕНИЙ

§ 20. Тепловое излучение и его характеристики

Тепловым излучением называется испускание электромагнитных волн за счет внутренней энергии тел.

Накаленные тела испускают видимый и ультрафиолетовый свет, при более низких температурах они излучают в основном инфракрасные лучи.

Тепловое излучение является одним из видов теплопередачи, наряду с теплопроводностью и конвекцией.

Одной из характеристик теплового излучения является величина, называемая излучательной способностью тела (спектральной плотностью энергетической светимости), $r_{\nu,T}$.

Излучательной способностью тела $r_{\nu,T}$ называется мощность излучения с единицы площади поверхности в единичном интервале частот при температуре тела T . Эта величина зависит от частоты ν (или λ) и температуры T и поэтому записывается с индексами ν или λ и T . Она рассчитывается для единичного интервала частот ($d\nu = 1$)

$$r_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu^{\text{изл}}, \nu+d\nu}^{\text{изл}}}{d\nu}. \quad (53)$$

Электромагнитное излучение с частотой ν часто характеризуют соответствующей длиной волны λ ($\lambda = c/\nu$) и при этом используют излучательную способность $r_{\lambda,T}$ вместо $r_{\nu,T}$ ($r_{\nu,T} = r_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{c}$).

Другой важной характеристикой теплового излучения является энергетическая светимость R_{Σ} (интегральная излучательная способность).

Энергетической светимостью R_{Σ} , называется мощность излучения с единицы поверхности тела на всех частотах (или длинах волн) при данной температуре тела:

$$R_{\Sigma} = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu. \quad (54)$$

Энергетическая светимость зависит от температуры излучающего тела T и физических свойств излучающей поверхности.

Тело не только излучает, но и поглощает энергию электромагнитных волн, падающих на его поверхность.

Если на единицу площади поверхности тела, имеющего температуру T , падает электромагнитная волна мощностью $dP_v^{\text{пад}}$ в интервале частот dv , то часть этой мощности $dP_v^{\text{погл}}$ будет поглощена телом.

Поглощательной способностью тела, которая характеризует долю поглощенной энергии от всего падающего излучения, называется безразмерная величина $a_{v,T}$, определяемая по формуле

$$a_{v,T} = \frac{dP_v^{\text{погл}}}{dP_v^{\text{пад}}}, \quad (55)$$

Поглощательная способность тела зависит от частоты ν и температуры T и изменяется в пределах $0 \leq a_{v,T} \leq 1$.

Если $a_{v,T} = 0$, тело называется *абсолютно белым*, если $a_{v,T} = 1$ на всех частотах ν и при всех температурах T , тело называется *абсолютно черным*.

Абсолютно черное тело поглощает все падающие на него излучение на всех частотах. В природе таких тел не существует. Сажа, платиновая чернь, Солнце имеют $a_{v,T}$, близкую к единице в ограниченной области частот.

Кирхгоф, изучая тепловое излучение опытным путем, в 1859 году установил закон, носящий его имя, который может быть записан следующим образом:

$$\frac{r'_{v,T}}{a'_{v,T}} = \frac{r''_{v,T}}{a''_{v,T}} = f(\nu, T), \quad (56)$$

т. е. отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела и является универсальной для всех тел функцией частоты ν и температуры T .

Сами величины $r_{v,T}$ и $a_{v,T}$, взятые отдельно, могут меняться очень сильно при переходе от одного тела к другому. Отношение же их одинаково для всех тел, как это следует из закона Кирхгофа. Смысл закона Кирхгофа заключается в том, что тело, сильнее поглощающее какие-либо лучи, будет эти лучи сильнее и испускать.

Для абсолютно черного тела поглощательная способность $a_{\nu,T} = 1$, поэтому из закона Кирхгофа имеем $(r_{\nu,T})_{\text{ачт}} = r_{\nu,T}$. Так как поглощательная способность абсолютно черного тела максимальна по сравнению с другими телами, то излучательная способность также будет максимальной по сравнению с любыми другими телами.

Таким образом, закон Кирхгофа вводит в теорию теплового излучения функцию $r_{\nu,T} = f(\nu, T)$. Нахождение этой функции в явном виде явилось основной задачей теории теплового излучения.

Первым этапом в развитии этой задачи явилось нахождение зависимости энергетической светимости абсолютно черного тела от его температуры – закон Стефана – Больцмана, являющегося первым законом излучения абсолютно черного тела.

Австрийский физик Й. Стефан, анализируя экспериментальные данные, и Л. Больцман, применяя термодинамический метод, решили эту задачу лишь частично, установив зависимость энергетической светимости R_{Σ} от температуры. Согласно закону Стефана – Больцмана, энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R_{\Sigma} = \sigma T^4, \quad (57)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}.$$

Закон Стефана – Больцмана, определяя зависимость R_{Σ} от температуры, не дает ответа относительно распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (АЧТ) (рис. 54). Все кривые имеют явно выраженный максимум, который по мере повышения температуры смещается в сторону более коротких волн. Площадь, ограниченная кривой зависимости $r_{\lambda,T}$ от λ с осью абсцисс пропорциональна энергетической светимости R_{Σ} , а следовательно, по закону Стефана – Больцмана, четвертой степени температуры.

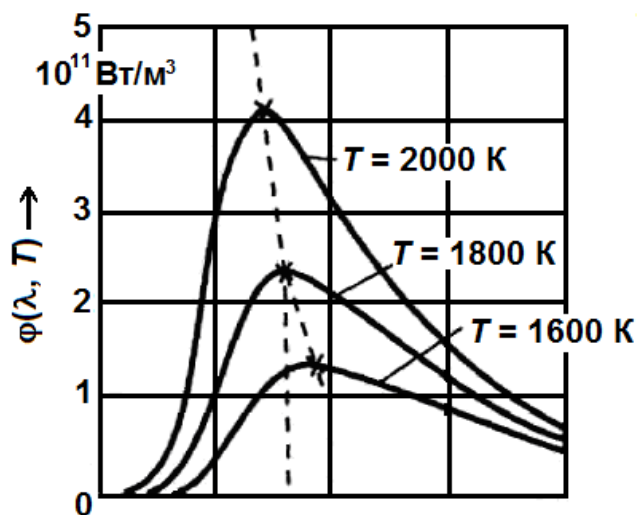


Рис. 54. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела

Немецкий физик В.Вин, опираясь на законы термо- и электродинамики, установил зависимость длины волны λ , соответствующей максимуму функции $r_{\lambda,T}$ от температуры T :

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (58)$$

т. е. длина волны λ_{\max} , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ черного тела, обратно пропорциональна его температуре, где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина. Закон Вина объясняет, почему при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (например, переход белого каления в красное при остывании металла).

Математическое выражение функции $r_{\nu,T} = f(\nu, T)$ было найдено в 1900 г. М. Планком. Для этого ему пришлось отказаться от установившегося положения классической физики, согласно которому энергия любой системы может изменяться непрерывно, т. е. может принимать любые сколь угодно близкие значения. Согласно квантовой гипотезе Планк моделирует реальное твердое тело с помощью системы квантовых осцилляторов, которые излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями – квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебаний:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (59)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

На основе этой гипотезы полученная Планком универсальная функция Кирхгофа

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (60)$$

блестяще подтвердила эмпирические законы Стефана – Больцмана и Вина. Следовательно, формула Планка (59) является полным решением основной задачи теплового излучения, поставленной Кирхгофом. Ее решение стало возможным лишь благодаря революционной квантовой гипотезе Планка.

§ 21. Применение теплового излучения

Лучистое тепло имеет ряд особенностей. Инфракрасное излучение (ИКИ) помимо усиления теплового воздействия среды на организм работающего обладает и специфическим влиянием, зависящим от интенсивности энергии излучения отдельных участков его спектра. Существенное влияние на лучистый теплообмен организма оказывают оптические свойства кожного покрова с его избирательной характеристикой коэффициентов отражения, поглощения и пропускания по отношению к различным участкам спектра инфракрасной радиации.

Воздействие ИКИ на организм человека проявляется как общими, так и местными реакциями. Местная реакция выражается сильнее при длинноволновом облучении, поэтому при одной и той же интенсивности облучения время переносимости при длинноволновом облучении короче, чем при коротковолновой радиации. За счет большой глубины проникновения в ткани тела коротковолновая область спектра ИКИ обладает выраженным общим действием на организм человека, вызывая повышение температуры глуболежащих тканей: например, при длительном облучении глаза может привести к помутнению хрусталика (профессиональная катаракта).

Под влиянием ИКИ в организме человека возникают биохимические сдвиги и изменения функционального состояния центральной нервной системы: образуются специфические биологически активные вещества типа гистамина, холина, повышается уровень фосфора и натрия крови, усиливается секреторная функция желудка, поджелудочной и слюнной желез, в центральной

нервной системе развиваются тормозные процессы, уменьшается нервно-мышечная возбудимость, понижается общий обмен.

При инфракрасном облучении кожи повышается ее температура, изменяется тепловое ощущение. При значительных интенсивностях возникают ощущения жжения, боль. Время переносимости тепловой радиации уменьшается с увеличением длины волны и ее интенсивности (табл. 1)

Таблица 1

Время переносимости инфракрасной радиации в зависимости от ее интенсивности и длины волны, с

Интенсивность радиации, Вт/м ²	Длина волны, мкм	
	3,6	1,07
1400	15,9	30,5
2800	27,3	37,9
4200	12,9	21,2
5600	9,5	14,5

Участки кожи, подвергающиеся инфракрасному облучению, получают большое количество тепла, перегреваются. При сильном перегреве происходит омертвление тканей, так называемый термический ожог. Перегрев сначала носит местный характер, но вследствие циркуляции крови он вскоре охватывает весь организм и самочувствие работающего значительно ухудшается.

При длительном воздействии высокой температуры и лучистой энергии температура тела человека может повыситься на 1...2 °С. Из организма тогда усиливается выделение пота, причем пот содержит значительное количество поваренной соли, вследствие чего происходит обеднение крови солью и самочувствие человека ухудшается. При прекращении работы и переходе в помещение с нормальной температурой спустя 20...30 мин восстанавливается нормальное самочувствие.

Влияние радиационного тепла различно в зависимости от зоны облучения: наибольший эффект наблюдается при облучении шейной области верхней половины туловища, наименьший – при облучении ног (области бедра). Выносливость к облучению возрастает с увеличением периода облучения, при котором наблюдаются процессы приспособления (адаптация), сохраняющиеся довольно долго.

В довольно редких случаях, когда перегрев достигает $40,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше и организм не в состоянии справиться с ним и нарушениями, которые перегрев вызывает, может наступить тепловой удар. Человек тогда впадает в чрезвычайно болезненное состояние, которое при определенных условиях может привести к смерти.

Для защиты от инфракрасного излучения применяются следующие экраны: непрозрачные, полупрозрачные и прозрачные.

Непрозрачные экраны могут быть теплоотражающими, теплопоглощающими и теплоотводящими. В теплоотражающих экранах используется алюминиевая фольга – альфоль в листовой или гофрированной форме. Теплопоглощающие экраны изготавливаются из асбеста, металла, футерованного теплоизоляционным материалом – заслонки, щиты и др. Асбестовые экраны применяются при интенсивности потока до 3500 Вт/м^2 , футерованные – до $10\,000\text{ Вт/м}^2$. Теплоотводящие экраны представляют собой сварные или литые конструкции, охлаждаемые протекающей внутри водой.

Полупрозрачные экраны изготавливают из металлической сетки, цепей, армированного стальной сеткой стекла и применяются: сетки – при интенсивности излучения $350\text{...}1000\text{ Вт/м}^2$, цепные завесы и армированное стекло – $700\text{...}5000\text{ Вт/м}^2$.

Прозрачные экраны могут быть теплопоглощающими и теплоотводящими. Теплопоглощающие экраны изготавливают из силикатных, кварцевых и органических стекол, бесцветных, окрашенных или металлизированных тонкими пленками.

Теплоотводящие экраны – **водяные завесы** – образуются слоем воды или распыленной водой. Водяные завесы применяются при интенсивности излучения $350\text{...}1400\text{ Вт/м}^2$.

ИКИ является низкоэнергетическим и для глаза человека невидимо, поэтому для его изучения созданы специальные приборы – тепловизоры (термографы), позволяющие улавливать это излучение, измерять его и превращать его в видимую для глаза картину. Тепловизоры относятся к оптико-электронным приборам пассивного типа. В них невидимое глазом человека излучение переходит в электрический сигнал, который подвергается усилению и автоматической обработке, а затем преобразуется в видимое изображение теплового поля объекта для его визуальной и количественной оценки.

Общий принцип устройства всех тепловизоров следующий (рис. 55).

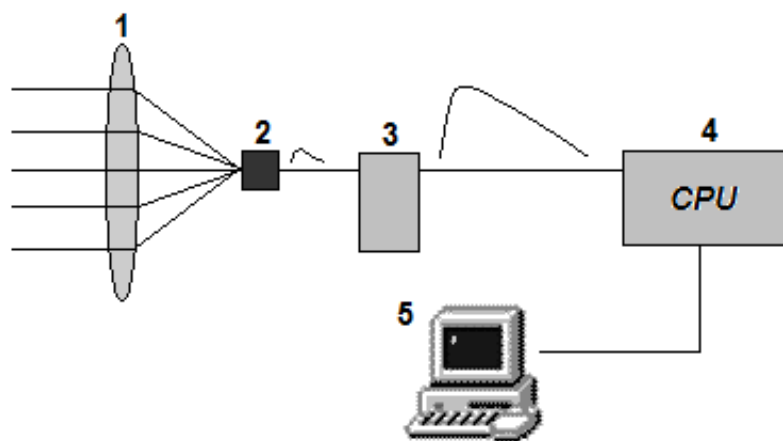


Рис. 55. Принцип работы тепловизора

ИКИ концентрируется системой специальных линз *1* и попадает на фотоприемник *2*, который избирательно чувствителен к определенной длине волны инфракрасного спектра. Попадаемое на него излучение приводит к изменению электрических свойств фотоприемника, что регистрируется и усиливается электронной схемой *3*. Полученный сигнал подвергается цифровой обработке и это значение передается на блок отображения информации *4*. Блок отображения информации имеет цветовую палитру, в которой каждому значению сигнала присваивается определенный цвет. После этого на экране монитора *5* появляется точка, цвет которой соответствует численному значению ИКИ, которое попало на фотоприемник. Сканирующая система (зеркала или полупроводниковая матрица) проводит последовательный обход всех точек в пределах поля видимости прибора, и в результате получается видимая картина ИКИ объекта.

Тепловидение нашло применение во многих сферах человеческой деятельности. Например, тепловизоры применяются в целях военной разведки и охраны объектов. В ручной тепловизионный ночной визир человека можно увидеть в полной темноте на расстоянии 300 м. Объекты обычной военной техники видны на расстоянии 2...3 км. На сегодняшний день созданы *видеокамеры* данного микроволнового диапазона с выводом изображения на экран компьютера, чувствительностью (разрешаемой способностью разницы температур отдельных участков поверхности) в несколько сотых градуса. Таким образом, тепловизор можно использовать как оперативный и, пожалуй, единственный контроллер состояния безопасности многих объектов и предотвращать катастрофы.

В связи с повышенной террористической угрозой воздушные суда (ВС) военной и гражданской авиации снабжаются устройствами защиты

от поражения любыми видами ракет, основанных на наведении на ВС по тепловому излучению. В прил. 3 представлена станция оптико-электронного подавления (СОЭП) «Адрос» КТ-01АВ (масса 20 кг) для круговой защиты вертолетов от поражения всеми типами управляемых ракет с инфракрасными головками самонаведения, а также устройство для снижения тепловой заметности вертолетов Ми-8 и Ми-24 всех модификаций с двигателями ТВЗ-117. Для самолетов предусмотрена станция помех «Клен-М» (прил. 4).

Еще одним из видов защиты от ракет является отстрел ложных целей (прил. 5).

§ 22. Внешний фотоэффект

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием света. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются **фотоэлектронами**, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется **фототоком**.

На рис. 56 показана схема установка для изучения внешнего фотоэффекта в металлах. Свет падает через окно на поверхность катода К, находящегося внутри эвакуированной трубки и называемого **фотокатодом**. Характер зависимости фототока I_{ϕ} в трубке от разности потенциалов U анода А и катода К при разных световых потоках Φ_1 и Φ_2 монохроматического света, падающих на катод изображен на рис. 57.

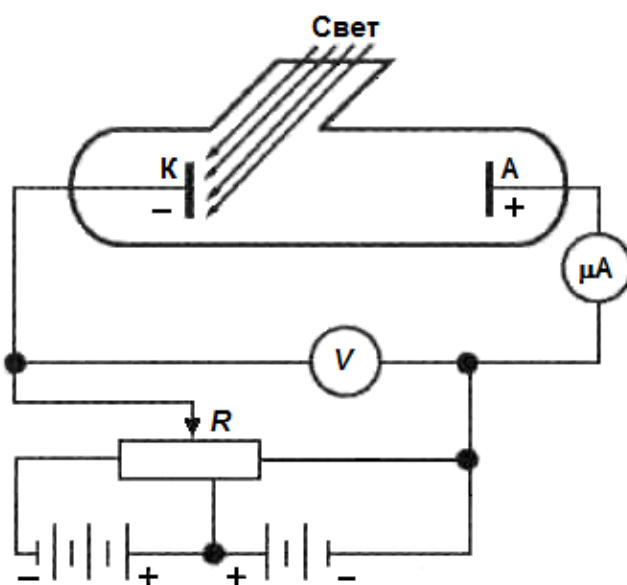


Рис. 56. Схема установка для изучения внешнего фотоэффекта в металлах

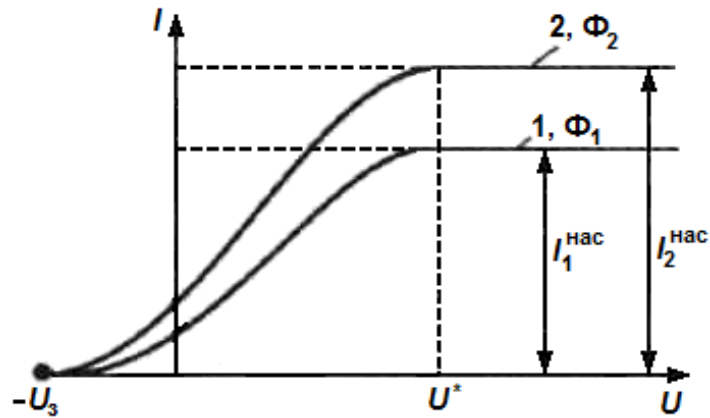


Рис. 57. Вольт-амперная характеристика внешнего фотоэффекта вакуумного фотоэлемента

Существование фототока при отрицательных значениях U от 0 до $-U_3$ свидетельствует о том, что фотоэлектроны выходят из катода, имея некоторую начальную скорость и соответственно кинетическую энергию. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов v_{\max} связана с *задерживающим напряжением* (*задерживающей разностью потенциалов*) U_3 соотношением

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3, \quad (61)$$

где e и m – абсолютная величина заряда и масса электрона.

Фототок увеличивается с ростом U лишь до определенного предельного значения I_n , называемого *фототоком насыщения*. При фототоке насыщения все электроны, вылетающие из катода под влиянием света, достигают анода. Если n – число фотоэлектронов, покидающих катод за 1 с, то

$$I_n = en. \quad (62)$$

Законы внешнего фотоэффекта.

1. *Закон Столетова*: при неизменном спектральном составе света, падающего на фотокатод, фототок насыщения пропорционален световому потоку (Φ_3), падающему на катод:

$$I_n \sim \Phi_3 \text{ и } n \sim \Phi_3.$$

2. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности.

3. Существует **красная граница внешнего фотоэффекта**, т. е. минимальная частота света ν_0 , при которой еще возможен внешний фотоэффект; частота ν_0 зависит от материала фотокатода и состояния его поверхности.

Второй и третий законы внешнего фотоэффекта не удается истолковать на основе классической электромагнитной теории света. Согласно этой теории, вырывание электронов проводимости из металла является результатом их «раскачивания» в электромагнитном поле световой волны, которое должно усиливаться при увеличении интенсивности света и пропорциональной ей энергетической освещенности фотокатода.

Лишь квантовая теория света позволила успешно объяснить законы внешнего фотоэффекта. Развивая идеи Планка о квантовании энергии атомов-осцилляторов, А. Эйнштейн высказал гипотезу о том, что свет не только излучается, но также распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных дискретных квантов электромагнитного излучения – **фотонов**. Все фотоны монохроматического света частоты ν имеют одинаковую энергию $E = h\nu$, где h – постоянная Планка, и движутся в пространстве со скоростью c света в вакууме. В случае поглощения света веществом каждый поглощенный фотон передает всю свою энергию частице вещества. Например, при внешнем фотоэффекте электрон проводимости металла, поглощая фотон, получает его энергию $h\nu$. Для выхода из металла электрон должен совершить работу выхода A . Поэтому уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, выражающее закон сохранения энергии при фотоэффекте, имеет вид

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (63)$$

Из уравнения Эйнштейна непосредственно вытекает второй закон фотоэффекта:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A. \quad (64)$$

Таким образом, v_{\max} и U_3 зависят только от частоты света и работы выхода электрона из фотокатода.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит от частоты света по линейному закону. Она обращается в нуль при частоте ν_0 , соответствующей красной границе внешнего фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (65)$$

Следовательно, красная граница зависит только от работы выхода электрона из металла.

Фотоэффект безынерционен, т. е. испускание фотоэлектронов начинается сразу же, как только на фотокатод падает свет с частотой $\nu \geq \nu_0$. Это свойство внешнего фотоэффекта является еще одним подтверждением квантового характера взаимодействия света с веществом. Согласно классическим волновым представлениям, требуется довольно значительное время для того, чтобы электромагнитная волна заданной интенсивности могла передать электрону энергию, достаточную для совершения им работы выхода.

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* (рис. 58).

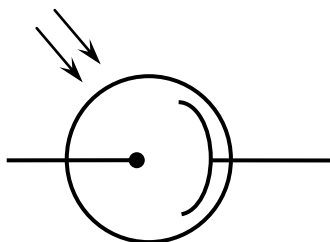


Рис. 58. Вакуумный фотоэлемент

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 ИКИ используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьмяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны, и для них наблюдается строгая пропорциональность фототока интенсивности излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических

приборов, например фотоэлектрические экспонометры, люкметры (измерители освещенности) и т. д.

Для увеличения интегральной чувствительности вакуумных фотоэлементов (фототок насыщения, приходящийся на 1 лм светового потока) баллон заполняется разреженным инертным газом (Ar или Ne при давлении $\approx 1,3 \dots 13$ Па). Фототок в таком элементе, называемом *газонаполненным*, усиливается вследствие ударной ионизации молекул газа фотоэлектронами. Интегральная чувствительность газонаполненных фотоэлементов (≈ 1 мА/лм) гораздо выше, чем для вакуумных (20...150 мкА/лм), но они обладают, по сравнению с последними, большей инерционностью (менее строгой пропорциональностью фототока интенсивности излучения), что приводит к ограничению области их применения.

Для усиления фототока применяются *фотоэлектронные умножители* (§ 15), в которых наряду с фотоэффектом используется явление вторичной электронной эмиссии.

Размеры фотоэлектронных умножителей немного превышают размеры обычной радиолампы, общий коэффициент усиления составляет $\approx 10^7$ (при напряжении питания 1...1,5 кВ), а их интегральная чувствительность может достигать 10 А/лм. Поэтому фотоэлектронные умножители начинают вытеснять фотоэлементы, правда, их применение связано с использованием высоковольтных стабилизированных источников питания, что несколько неудобно.

§ 23. Радиоактивность

Радиация присутствовала на Земле и в космосе всегда. В настоящее время, когда в мире эксплуатируется огромное число ядерных установок различного вида и на вооружении многих армий мира находится ядерное оружие, необходимо иметь комплекс знаний по вопросам действия радиации и методам защиты от нее.

В основу принципа работы ядерных установок положена возможность использования внутриядерной энергии, выделяющейся при цепных реакциях деления тяжелых ядер (урана, плутония) или синтеза легких ядер (дейтерия, трития).

Точные масс-спектроскопические измерения масс ядер элементов показывают, что масса ядра меньше суммы масс его составляющих нуклонов (нейтронов и протонов). Эта разница масс носит название **дефекта массы**

Δm и связана с *энергией связи*, характеризующей работу, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны $\Delta E_{\text{св}} = \Delta mc^2$. Стабильность (прочность) ядра определяет величина энергии связи на один нуклон (удельная энергия связи, рис. 59). Наиболее стабильными с энергетической точки зрения являются ядра с числом нуклонов около 60 (это средняя часть таблицы Менделеева). Более легкие и более тяжелые ядра оказываются менее стабильными. Для ядер начала и конца таблицы Менделеева существует определенная вероятность перехода в более устойчивое состояние путем высвобождения внутриядерной энергии.

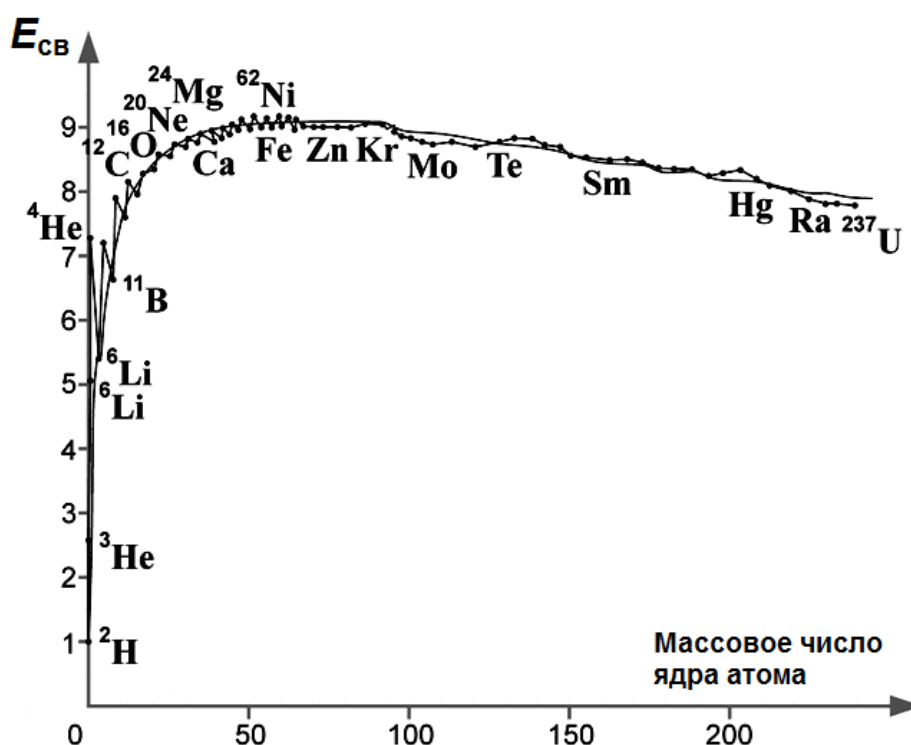


Рис. 59. Зависимость удельной энергии связи от массового числа

В настоящее время под термином **радиоактивность** принято понимать способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц.

Первые исследования по радиоактивности (А. Беккерель, П. Кюри, М. Склодовская) были связаны с естественной радиоактивностью, где в качестве источников работали соединения урана, смоляная урановая руда, а позже полоний и радий. На сегодняшний день получена информация о наличии естественной радиоактивности также у легких и средних ядер, таких как К, Rb, In, La, Sm, Lu, Re.

В 1934 г. было обнаружено явление искусственной (наведенной) радиоактивности, сущность которого заключалась в том, что в результате воздействий α -частиц (или других частиц) на ядра некоторых элементов (алюминий, бор, магний) они становились радиоактивными. Обязательным условием такого процесса является избыток в ядре нейтронов по сравнению с протонами (существуют расчетные формулы для определения стабильного состояния ядра). Этот вид радиоактивности был открыт французскими учеными Ирен и Фредериком Жолио-Кюри.

Создание оружия массового поражения и развитие ядерной энергетики сделало реальной угрозой радиоактивного заражения обширных территорий. В случае применения ядерного оружия или разрушения объектов ядерно-топливного цикла в ходе их промышленной эксплуатации возможно радиоактивное заражение огромных территорий. В таких случаях помощь специалистов, обученных и организованных, будет непременно иметь место.

В качестве ядерных взрывчатых веществ могут быть использованы U-235, Pu-239, U-238, которые делятся под действием тепловых нейтронов (U-238 поглощает эти нейтроны без деления). Тепловые нейтроны – нейтроны малых энергий. При большом количестве ядерного вещества один нейтрон может дать начало цепной ядерной реакции. Если каждое поколение нейтронов рождает новое из такого же количества нейтронов, то масса ядерного вещества называется критической. Например, в одном акте деления ядра U-238 образуется в среднем 2,47 нейтрона, Pu-239 – 3,09 нейтрона, если масса этих веществ будет критической. Если же масса ядерного вещества будет надкритической (больше критической), то вследствие спонтанного деления ядра урана или плутония, наличия блуждающих тепловых нейтронов в атмосфере и других факторов нельзя принять никаких мер для предотвращения взрыва.

Источником радиоактивного излучения являются также и продукты распада, образующиеся в ходе ядерных реакций. Так как периоды полураспада различных продуктов реакций самые разные, то радиоактивное облучение может продолжаться многие годы и распространяться по территории с помощью ветра, движения воды и т. д.

Кроме естественных источников радиации, находящихся в земной коре и космическом пространстве вокруг нее (радиационный фон), на организм человека действуют и источники, попадающие в него с пищей, водой и воздухом. Следует отметить, что в результате широкого использования искус-

ственных радионуклидов (медицине, геологии, производстве и т. д.) техногенное облучение оказывается значительно более интенсивным, нежели облучение от естественных источников. Кроме того, далеко не до конца решены вопросы захоронения и утилизации отработанного ядерного топлива. В результате действия всех этих факторов радиационное облучение земель увеличивается, что неблагоприятно отражается на их здоровье и долголетию.

Несколько слов следует сказать о применении различных радиоактивных изотопов в технике, медицине и т.д. К примеру, при испытании различных материалов широко используются такие, как Co-60, Cs-137, Ir-192 и пр. В медицине для диагностики и терапии некоторых заболеваний применяются изотопы I-131, Cs-137, Ir-192 и Au-198.

§ 24. Закон радиоактивного распада

Процесс распада атомных ядер является спонтанным, а потому подчиняется законам статистики. Отдельные ядра вещества распадаются независимо друг от друга, и можно считать, что за время dt распадается dN ядер. Это число прямо пропорционально числу нераспавшихся ядер N , величине dt и некоторой постоянной распада λ , т. е.

$$dN = -\lambda N dt. \quad (66)$$

Иная запись основного закона радиоактивного распада может быть получена из уравнения (66) методом разделения переменных:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (67)$$

где N – число ядер, не распавшихся в момент времени t ; N_0 – исходное число ядер.

Число распавшихся ядер за время Δt определяется разностью

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}). \quad (68)$$

В случае если промежуток времени Δt очень мал по сравнению с периодом полураспада:

$$\Delta N \approx \lambda N \Delta t. \quad (69)$$

Период полураспада T – промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в два раза. *Постоянная распада λ* определяет

вероятность распада в единицу времени. Обратная ей величина τ носит название *среднее время жизни* радионуклида

$$\tau = 1/\lambda. \quad (70)$$

Величины T , τ , λ связаны между собой и являются характеристиками радионуклидов, зависящими от внутреннего строения и не зависящих от внешних факторов

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2. \quad (71)$$

К примеру, период полураспада калия – 12,4 часов, кобальта – 5,26 лет, стронция – 27,7 лет, цезия – 30 лет, йода – 8 дней.

Еще одной важной характеристикой излучателя является его *активность* A , равная

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (72)$$

Она определяет число ядер, распавшихся в единицу времени, т. е. скорость распада, и измеряется в СИ в беккерелях. Внесистемной единицей является кюри: 1 кюри = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

В произвольный момент времени t активность образца излучателя, а также интенсивность излучения I определяются уравнениями:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau} t\right), \quad (73)$$

$$I = I_0 e^{-\lambda t}. \quad (74)$$

Графически эти зависимости могут быть представлены на рис. 60.

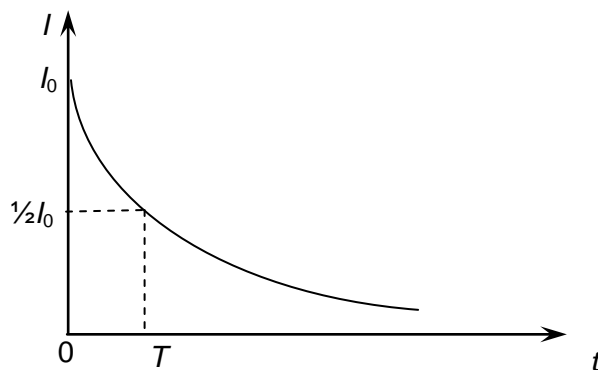


Рис. 60. График зависимости интенсивности γ -излучения (или активности препарата) от времени излучения

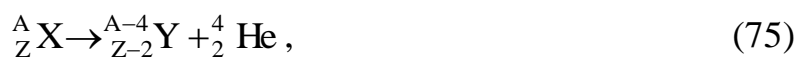
Интенсивность излучения зависит также от расстояния между излучателем и поглотителем. Эта зависимость обратно пропорциональная.

§ 25. Виды радиоактивного излучения

Впервые анализ радиоактивного излучения был сделан М. Склодовской-Кюри. Она применила способ отклонения излучений в магнитном поле. Полученные выводы говорили о том, что радиоактивные излучения могут быть нескольких видов: α , β , и γ . Позже были обнаружены и другие виды излучений (β^+ , нейтронное и т. д.).

Альфа-лучи представляют собой поток ядер атомов гелия ${}^4_2\text{He}$. Альфа-частица не существует в готовом виде в недрах атома, а возникает в момент радиоактивного распада ядра.

Альфа-распад протекает по следующей схеме:



где X – химический символ распадающегося (материнского) ядра; Y – химический символ образующегося (дочернего) ядра; ${}^4_2\text{He}$ – α -частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов, имеющая положительный заряд $+2e$.

Альфа-распад обычно сопровождается испусканием дочерним ядром γ -лучей, т. к. ядро может возникать не только в нормальном, но и в возбужденном состоянии. Время жизни τ возбужденного состояния мало: от 10^{-8} с до 10^{-15} с. За это время дочернее ядро переходит в нормальное или более низкое возбужденное состояние, испуская γ -фотон. Энергия возбуждения дочернего ядра может быть выделена и другими способами.

Альфа-частицы, вылетающие из распавшегося ядра, имеют очень большие скорости ($\sim 10^7$ м/с) и обладают кинетической энергией 4...9 МэВ. У данного радиоактивного элемента выбрасываемые им α -частицы имеют приблизительно равную энергию.

При движении в веществе α -частицы производят на своем пути сильную ионизацию атомов, действуя на них своим электрическим полем. Расстояние, на которое проникает α -частица в вещество до ее полной остановки, называется пробегом частицы или проникающей способностью. В воздухе α -частицы могут пройти путь около 8,5 см, в более плотных веществах пробег α -частицы гораздо короче, чем в газах, и составляет несколько сотых долей миллиметра,

поэтому радиоактивные элементы, запаянные в стеклянные ампулы, не пропускают наружу α -частицы, а обычная одежда людей полностью поглощает α -излучение. Из-за сильной ионизации (30 000 пар ионов на 1 см пути в воздухе при нормальных условиях) α -частицы способны оказывать значительное биологическое воздействие, если они попадают в ткани человека, особенно вместе с пищей и вдыхаемым воздухом.

Бета-распадом называется самопроизвольное превращение ядер, в котором их массовое число A не изменяется, а заряд ядра увеличивается или уменьшается на единицу. Этот заряд уносится электроном или позитроном, покидающим ядро.

При электронном распаде (β^- -распад) кроме электрона испускается антинейтрино $\tilde{\nu}_e$ – частица, не имеющая электрического заряда, масса покоя ее равна нулю.

Такой распад протекает по следующей схеме:



Пример β^- -распада: ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e$.

При позитронном распаде (β^+ -распад) ядро испускает позитрон и другую электрически нейтральную частицу – нейтрино ν_e , также имеющую нулевую массу.

Процесс распада протекает по следующей схеме:



Пример β^+ -распада: ${}^{13}_7\text{Na} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^0_{+1}e + \nu_e$.

Третьим видом β -распада является электронный захват (или K -захват). При электронном захвате ядро поглощает электрон из своей нижележащей атомной оболочки (чаще всего из K -оболочки).

Схема такого процесса выглядит следующим образом:



Пример электронного захвата: ${}^{40}_{19}\text{K} + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + \nu_e$.

Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется из вышележащих слоев, в результате чего возникают рентгеновские лучи (их легко обнаружить).

Все разновидности β -распада сопровождается испусканием γ -лучей, причина их возникновения одна и та же, что и при α -распаде.

Согласно современным представлениям, все частицы, вылетающие при β -распаде, рождаются в процессе распада, а не существуют в ядре заранее. Освобождающаяся при β -распаде энергия $0,02 \dots 13,4$ МэВ делится между дочерним ядром и частицами неравномерно, максимальная часть энергии приходится на β -частицы. β -частицы обладают самой разнообразной энергией от 0 до E_{\max} . При β -распаде наблюдались электроны со скоростями, равными $0,998 c$, следовательно, с энергией около 5 МэВ. При прохождении через вещество β -частицы теряют часть энергии за счет ионизации. Кроме того, часть β -частиц теряют энергию в результате возникновения рентгеновского излучения при торможении их ядрами поглощающего вещества. Так как β -частицы обладают очень малой массой, единичным зарядом и очень большими скоростями, то их ионизирующая способность невелика. Она примерно в $40 \dots 100$ раз меньше, чем у α -частиц. В воздухе пробег β -частиц достигает несколько десятков метров, в свинце примерно 3 мм. Одеждой β -лучи задерживаются почти полностью.

Гамма-лучи представляют собой жесткое электромагнитное излучение малой длины волны ($< 10^{-10}$ м). Гамма-лучи возникают при переходе возбужденных ядер из одного энергетического состояния в другое, более низкое. Энергия γ -квантов обычно заключена между несколькими десятками килоэлектрон-вольт и несколькими миллионами электрон-вольт. Гамма-кванты не имеют электрического заряда, их масса покоя равна нулю. Они обладают огромной проникающей способностью. Для их ослабления требуются значительные по толщине материалы высокой плотности (свинец, бетон, грунт). Для наиболее жестких лучей толщина слоя половинного поглощения (слой поглотителя, при прохождении через который интенсивность γ -излучения уменьшается вдвое) равна в свинце – 1,6 см, в железе – 2,4 см, в алюминии – 12 см, в земле – 15 см.

Рентгеновское излучение (X -лучи) – вид электромагнитного излучения, имеющего меньшую длину волны, чем ультрафиолетовые электромагнитные волны. Длина волны X -лучей колеблется от 70 до 10^{-5} нм. Чем короче длина волны X -лучей, тем больше энергия их фотонов и больше проникающая способность. X -лучи со сравнительно большой длиной волны (более 10 нм) называются *мягкими*. Длина волны $1 \dots 10$ нм характеризует *жесткие* X -лучи.

Они обладают огромной проникающей способностью. Рентгеновские лучи возникают всегда в вакуумной трубке с двумя электродами, когда движущиеся с высокой скоростью электроны тормозятся материалом анода. Большая часть энергии электронов рассеивается в виде тепла. Поэтому анод необходимо искусственно охлаждать. Анод в рентгеновской трубке *A* (рис. 61) должен быть сделан из металла, имеющего высокую температуру плавления, например, из вольфрама.

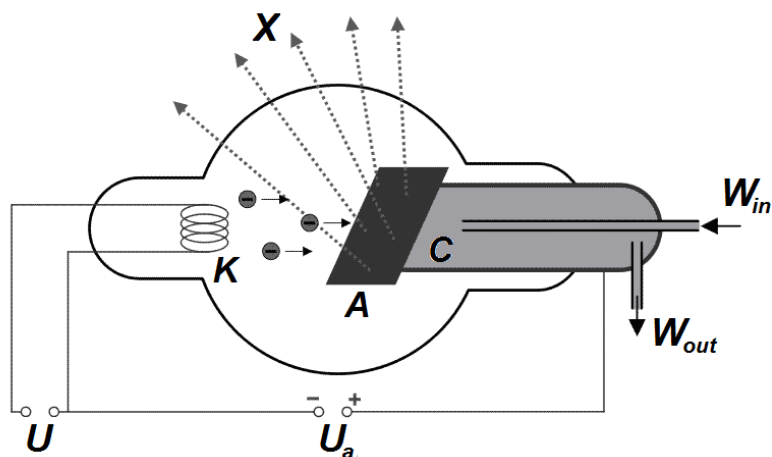


Рис. 61. Рентгеновская трубка

Часть энергии, не рассеивающая в форме тепла, превращается в энергию электромагнитных волн (рентгеновские лучи). Таким образом, рентгеновские лучи являются результатом бомбардировки электронами вещества анода.

Наиболее широкое использование рентгеновского излучения нашло в медицине (для рентгенодиагностики и рентгенотерапии некоторых заболеваний), дефектоскопии металлических изделий и сварных швов, рентгенографии материалов, рентгеноструктурном анализе, определения внутренних механических напряжений, выявления размеров частиц некоторых материалов, в рентгеновской топографии, рентгеномикроскопии, спектроскопии твердых тел и молекул, рентгеноспектральном анализе элементного состава, рентгеноастрономии.

Особую роль рентгеновское излучение играет в службе досмотра в аэропортах, на железнодорожных и автобусных вокзалах для обеспечения безопасности массовых пассажирских перевозок; на охраняемых объектах с целью входного/выходного контроля; в тюрьмах как альтернатива личному досмотру.

В современных условиях электромагнитные рамки металлодетекторов для досмотра человека в комплексе с рентгеновскими системами досмотра багажа

уже не обеспечивают требуемый уровень обеспечения безопасности на контрольно-пропускных пунктах.

Для всех объектов (аэропортов, тюрем, пограничных переходов, правительственных зданий), где требуется повышенный уровень обеспечения безопасности при проведении досмотра человека, создан уникальный сканер персонального досмотра (рис. 62).

Технология основана на получении цифрового проекционного рентгеновского изображения человека в полный рост методом «сканирования плоским пучком».

Данная технология базируется на:

- формировании чрезвычайно узкого (< 2 мм) монохроматического рентгеновского пучка с помощью системы коллиматоров и фильтров, позволяющей минимизировать облучение контролируемого человека;

- перемещении человека на специальной движущейся платформе, расположенной между коллиматором и детектором через рентгеновский пучок, с целью сканирования и личного досмотра; на использовании в качестве приемника рентгеновского излучения сверхвысокочувствительной линейной матрицы полупроводниковых сцинтилляционных детекторов, расположенных вертикально;

- детектировании прошедшего через человека излучения с помощью линейного детектора и формировании двумерной матрицы цифрового изображения на мониторе оператора;

- оптимизации соотношения дозы облучения и разрешающей способности системы в зависимости от специфики решаемой задачи (назначения системы);

Преимущества сканера:

- инновационный рентгеновский метод досмотра человека, основанный на регистрации проходящего через объект рентгеновского излучения низкой интенсивности;

- значительное увеличение эффективности досмотра;



Рис. 62. Сканер персонального досмотра

- возможность увидеть объекты, спрятанные под одеждой, а также проглоченные или спрятанные в естественных полостях тела человека;
- возможность за 7 с определить наличие на человеке или внутри него всех объектов, запрещенных к провозу правилами обеспечения безопасности на авиатранспорте.

§ 26. Проникающая радиация. Дозы излучения и поглощения

Под **проникающей радиацией** понимается поток нейтронов и γ -излучения. Оба эти вида излучения могут распространяться в воздухе на расстояние порядка 2,5...3 км в зависимости от мощности ядерного заряда (тротилового эквивалента). Мгновенные нейтроны и γ -кванты, запаздывающие нейтроны и осколочные γ -кванты, захватные γ -кванты, возникающие в ходе взрыва, могут распространяться на значительные расстояния от места взрыва и охватывать огромные территории. Кроме того, осколки деления являются радиоактивными и составляют значительную цепочку превращений элементов с разными периодами полураспада.

Все виды ионизирующего излучения характеризуются **экспозиционной (X)** и **поглощенной дозой (D)**. Экспозиционная доза излучения определяется суммарным зарядом всех ионов одного знака, созданные свободными электронами в облученном воздухе, к массе этого воздуха:

$$X = \frac{\Delta q}{\Delta m}. \quad (79)$$

Единицей измерения в СИ является кулон на килограмм [Кл/кг]. Внесистемной единицей служит рентген.

$$1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

Экспозиционная доза достаточно надежно характеризует опасность воздействия ионизирующего излучения при общем и равномерном облучении тела. Более точно определить воздействие излучения на биологические ткани, имеющие разную плотность и атомный состав, может другая величина – поглощенная доза.

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m}. \quad (80)$$

Она определяет энергию излучения, отнесенную к массе облучаемого вещества. В СИ единицей измерения служит грей, а внесистемной единицей является рад:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад.}$$

Эквивалентная доза – мера биологического воздействия на живые организмы, рассчитывается как поглощенная доза, умноженная на коэффициент качества (КК), показывающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма. Единицами измерения является бэр или зиверт (Зв). КК для рентгеновских, β - и γ -лучей равен 1, для протонов и быстрых нейтронов – 3...10, для α -излучения – 20. Отсюда видно, что α -излучение, хоть и имеет низкую проникающую способность, но при попадании внутрь несет наибольшую опасность. При этом при КК = 1 можно считать, что 1 бэр соответствует поглощенной дозе в 1 рад. Также для упрощения расчетов можно считать, что экспозиционная доза 1 рентген для биологической ткани соответствует поглощенной дозе в 1 рад и эквивалентной дозе в 1 бэр (при КК = 1), т. е., грубо говоря, $1 \text{ Р} = 1 \text{ рад} = 1 \text{ бэр}$. Также $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр}$ (при КК = 1).

Эффективная эквивалентная доза применяется при расчете индивидуальной дозы облучения и представляет собой эквивалентную дозу, умноженную на коэффициент радиационного риска для разных органов человека. Другими словами, органы и ткани человека имеют разную восприимчивость к радиационному облучению. Наиболее восприимчивы к радиации красный костный мозг, легкие, гонады. Менее подвержены излучению щитовидная железа, мышцы и другие органы. Просуммировав эквивалентные дозы, умноженные на соответствующие коэффициенты радиационного риска органов (табл. 2), получим эффективную эквивалентную дозу, измеряемую также в бэрах и зивертах. При этом $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$.

Таблица 2

Коэффициенты радиационного риска органов

Органы человека	Коэффициент
Гонады (половые железы)	0,2
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Желудок	0,12

Органы человека	Коэффициент
Легкие	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Головной мозг	0,025
Остальные ткани	0,05
Организм в целом	1

Коллективная эффективная эквивалентная доза рассчитывается для группы людей.

Рассмотрим естественное радиационное облучение (природная радиация). Его можно разделить на внешнее облучение и внутреннее. Внешнему радиационному облучению мы подвергаемся при перелетах на самолете из-за воздействия космических лучей. Например, при походах в горы люди подвергаются более сильному воздействию естественного радиационного фона, нежели над уровнем моря. Другими словами, где бы мы не находились, мы все равно подвергаемся воздействию небольшого радиационного фона (0,08...0,3 мкЗв/ч). Такой уровень радиации считается допустимым. На внутреннее облучение приходится примерно $2/3$ эквивалентной эффективной дозы, получаемой человеком от естественных источников радиации, поступаемых в организм с пищей, водой и воздухом.

Наиболее весомым вкладом в естественное облучение человека вносит радиоактивный газ радон, на долю которого приходится $3/4$ годовой эквивалентной эффективной дозы радиационного облучения человека. Радон высвобождается из недр повсеместно, но неравномерно, накапливаясь в непроветриваемых помещениях; также он содержится в некоторых строительных материалах и некоторых глубоких артезианских источниках воды. Очень большую опасность представляет попадание паров воды с содержанием радона в легкие, например в ванной комнате – там его количество может в 3 раза превышать содержание радона в кухне и в 40 раз выше, чем в комнате. Необходимо чаще проветривать жилые помещения.

К искусственным источникам радиации относятся атомная энергетика, рентгенологические процедуры. В табл. 3 приведены основные источники радиационного облучения и эффективные эквивалентные дозы, мкЗв/год.

Воздействие радиационного излучения на живой организм вызывает в нем различные обратимые и необратимые биологические изменения.

Таблица 3

Годовые эффективные эквивалентные дозы, мкЗв/год

Космическое излучение	32
Облучение от стройматериалов и на местности	37
Внутреннее облучение	37
Радон-222, радон-220	126
Медицинские процедуры	169
Испытания ядерного оружия	1,5
Ядерная энергетика	0,01
Всего	400

Эти изменения делятся на две категории – соматические изменения, вызываемые непосредственно у человека, и генетические, возникающие у потомков. Тяжесть воздействия радиации на человека зависит от того, как происходит это воздействие – сразу или порциями. Большинство органов успевает восстановиться в той или иной степени от радиации, поэтому они лучше переносят серию кратковременных доз, по сравнению с той же суммарной дозой облучения, получаемую за один раз. Выше было отмечено, что реакция различных органов на радиацию не одинакова – красный костный мозг и органы кроветворной системы, репродуктивные органы и органы зрения наиболее сильно подвержены воздействию радиации. Также, стоит заметить, что дети сильнее подвержены воздействию радиации, чем взрослый человек. Большинство органов взрослого человека менее подвержены радиации – это почки, печень, мочевого пузыря, хрящевые ткани. Далее для примера показан вред организму от однократного воздействия гамма-излучения (табл. 4).

Дозы гамма-излучения и реакция человеческого организма на эти дозы

Доза, Зв	Реакция человеческого организма на однократное воздействие гамма-излучения
100	Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы
10-50	Смерть наступает через одну-две недели вследствие внутренних кровоизлияний
4-5	50 % облученных умирает в течение одного-двух месяцев вследствие поражения клеток костного мозга
1	Нижний уровень развития лучевой болезни
0,75	Кратковременные незначительные изменения состава крови
0,30	Облучение при рентгеноскопии желудка (разовое)
0,25	Допустимое аварийное облучение персонала (разовое)
0,1	Допустимое аварийное облучение населения (разовое)
0,05	Допустимое облучение персонала в нормальных условиях за год
0,005	Допустимое облучение населения в нормальных условиях за год
0,0035	Средняя годовая эквивалентная доза облучения за счет всех источников излучения в среднем для жителя России

Для людей, работающих с источниками ионизирующего излучения, установлена среднегодовая эффективность дозы, равная 0,02 зиверта (0,02 Зв/год). Эту дозу определил Федеральный закон № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» от 01.01.96 и она дана в методических указаниях «Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем», введенных с 1 марта 2007 г.

Территорию, на которой уровень радиации будет более 2 рад/год, считают непригодными для обитания. При оценке степени заражения обычно исходят из связи между плотностью заражения Q [расп/(мин·см²)] и уровнем радиации P [рад/час] на высоте 1 м от поверхности:

$$Q = 2 \cdot 10^6 P. \quad (81)$$

§ 27. Защита от γ -излучения. Закон поглощения

В зависимости от степени заражения местности и длительности пребывания в этих зонах у людей может развиваться лучевая болезнь I, II, III и IV степени. Тяжесть поражения зависит не только от дозы, но и от состояния организма до облучения и его индивидуальных особенностей (переутомление,

голод, болезни, травмы, ожоги повышают чувствительность организма к воздействию радиации). Вначале человек теряет физическую работоспособность, а затем и умственную. Летальные дозы однократного облучения некоторых живых организмов представлены в табл. 5, где $1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Таблица 5

Летальные дозы однократного облучения некоторых живых организмов

Организм	Летальная доза, Кл/кг	Летальная доза, P
Собака	0,084...0,103	325...400
Человек	0,103...0,155	400...600
Обезьяна	0,129...0,142	500...550
Кролик	0,206...0,258	800...1000

На работоспособность специалистов ремонтно-эвакуационных подразделений, на элементы радиоэлектроники и автоматики, на фотоматериалы и оптические приборы оказывает влияние и наведенная радиация (воздействие нейтронов). Для защиты от излучений используются материалы, в той или иной степени поглощающие излучения.

При взаимодействии излучения с веществом защиты интенсивность излучения уменьшается по экспоненциальному закону (для моноэнергетического излучения):

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (82)$$

где I – интенсивность γ -лучей в веществе на глубине d ; I_0 – интенсивность лучей, падающих на поглотитель; μ – линейный коэффициент ослабления (поглощения), измеряемый в м^{-1} .

Иногда вместо линейного коэффициента используют массовый коэффициент ослабления $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$, учитывающий плотность вещества защиты. Поглощение γ - и рентгеновского излучения различными веществами можно также охарактеризовать **толщиной слоя половинного ослабления** $d_{1/2}$. При прохождении через такой слой интенсивность излучения уменьшается в 2 раза.

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (83)$$

Величины $d_{1/2}$, μ являются характеристиками материала защиты. Для некоторых материалов они представлены в табл. 6.

Таблица 6

Толщина слоя половинного ослабления для различных материалов и излучений

Материал	Плотность, г/см ³	Слой половинного ослабления, см	
		по нейтронам	по γ -излучению
Вода	1	3...6	12...14
Полиэтилен	0,92	3...6	15...25
Броня	7,8	5...12	2...3
Свинец	11,3	9...20	1,4...2
Грунт	1,6	11...14	10...14
Бетон	2,3	9...12	6...12
Дерево	0,7	10...15	15...30

Различные сооружения и техника ослабляют дозы излучения от зараженной местности с определенной степенью вероятности. В табл. 7 приведены некоторые данные о коэффициенте ослабления излучения определенной защитой.

Таблица 7

Коэффициенты ослабления γ -излучения определенных объектов

Укрытия	Коэффициент ослабления
Автомобили	2
Убежища	1000
Подвалы многоэтажных домов	400
Подвалы одноэтажных домов	40
Дома каменные многоэтажные	70
Перекрытия, щели	40
Открытые щели, траншеи, окопы (не дезактивированные)	3

В качестве средств, ослабляющих действие ионизирующего излучения на организм человека, используются противорадиационные препараты (радиопротекторы). Они способствуют выводу радиоактивных веществ из организма и усиливают обменные процессы в клетках.

В табл. 8 приведено описание современных приборов, используемых для обнаружения радиации.

Измерители радиоактивности

Название	Описание
Система радиационного контроля СРК «Барьер»	Многоканальная система радиационной безопасности и дозиметрического контроля на базе сцинтилляционного радиометра спектрометра. Назначение: обеспечение радиационной безопасности на контролируемом объекте; радиационный и дозиметрический контроль. Применение: ядерно-физические лаборатории, в которых производится работа с открытыми и закрытыми источниками ионизирующего излучения; полигоны для складирования и хранения отходов; склады и хранилища; специальные задачи (личная безопасность, радиационный контроль денежных знаков и т. д.)
Монитор α -, β -, γ -излучения «МКС1117»	Назначение: Обеспечение радиационной безопасности; дозиметрический контроль. Применение: службы, контролирующие радиационную безопасность населения (ЦГСЭН, МЧС); аккредитованные испытательные лаборатории; отраслевые службы радиационного контроля и мониторинга (Минсельхоз, лесное хозяйство, Росгидромет, охрана природы); службы внешней дозиметрии АЭС
GPS-система для мониторинга радиационной обстановки ДКГ01 «Сталкер»	Дозиметр с устройством определения геодезических координат. Назначение: мониторинг радиационного фона и гамма-съемка территорий. Создание карт радиационной обстановки. Сбор информации для геоинформационных систем (ГИС). Применение: территориальные службы радиационного контроля (ЦГСЭН); ведомственные службы радиационного контроля (лесное хозяйство, сельское хозяйство); спецслужбы (МВД, ФАПСИ, ФСО, ФСБ, МЧС). Внесена в Государственный реестр средств измерений РФ
Передвижной пост радиационного контроля ТППРК «Топаз»	Передвижная лаборатория для контроля за делящимися и радиоактивными материалами (таможенный подвижной пост радиационного контроля). Назначение: контроль за делящимися и радиоактивными материалами; поверка приборов; ремонт и техническое обслуживание приборов. Применение: государственный таможенный комитет РФ, МВД, МЧС. Сертифицирована и принята на вооружение ГТК РФ

Вопросы для самопроверки

1. Что такое тепловое излучение?
2. Чем отличается тепловое излучение от других видов излучения?

3. Что такое испускательная способность тела и от чего она зависит? В каких единицах она измеряется?
4. Что называется поглотительной способностью тела и от чего она зависит? Какое тело называется абсолютно черным, серым, белым?
5. Что называется энергетической светимостью тела? От чего она зависит? В каких единицах измеряется?
6. В чем заключается сущность закона Кирхгофа?
7. В чем заключается сущность закона Стефана – Больцмана?
8. Закон Вина.
9. Квантовая гипотеза Планка.
10. Внешний фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта.
11. Что называется красной границей фотоэффекта? От чего она зависит?
12. От чего зависит работа выхода электронов из вещества?
13. Как записывается уравнение Эйнштейна?
14. Как устроен и действует вакуумный фотоэлемент?
15. В чем сущность явления радиоактивности?
16. Назовите виды радиоактивного распада.
17. Какова физическая природа α , β , γ -излучений?
18. Каковы механизмы распада, особенности и свойства радиоактивных излучений?
19. Рентгеновское излучение и его применение.
20. Поясните основной закон радиоактивного распада. Изобразите его графически.
21. Запишите закон взаимодействия излучения с веществом.
22. Укажите области применения явления радиоактивности.

Задачи

1. Стальная болванка, температура которой $727\text{ }^{\circ}\text{C}$, излучает за 1 с 4 Дж энергии с поверхности площадью 1 см^2 . Определить отношение энергетических светимостей стальной болванки и абсолютно черного тела при данной температуре, считая, что оно одинаково для всех волн.
2. Пренебрегая потерями на теплопроводность, найти мощность электрического тока, необходимую для накаливания нити диаметром 1 мм и длиной 20 см до температуры 2500 К . Считать, что нить излучает как абсолютно

черное тело и по установлении равновесия все выделяющееся в нити количество теплоты теряется на излучение.

3. Площадь поверхности вольфрамовой нити накала вакуумной лампы мощностью 25 Вт $0,403 \text{ см}^2$, а ее температура накала $2177 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз меньше энергии излучает лампа, чем абсолютно черное тело с поверхности такой же площади при той же температуре? Считать, что по установлении равновесия все выделяющееся в нити количество теплоты теряется на излучение.

4. Железный шар диаметром 10 см, нагретый до температуры $1227 \text{ }^\circ\text{C}$, остывает на открытом воздухе. Через какое время его температура понизится до 1000 K ? При расчете принять, что отношение энергетических светимостей железа и абсолютно черного тела $0,5$. Теплопроводностью воздуха пренебречь.

5. При сжигании в вакууме тонкой вольфрамовой нити сильным электрическим током получается на мгновение весьма высокая температура. Длина волны, при которой излучательная способность этой нити максимальна, 145 нм . Определить температуру нити накала в момент ее сжигания.

6. В какой области спектра лежит длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности Солнца, если температура его поверхности 5800 K ?

7. Температура поверхности звезды $12\,000 \text{ K}$. Можно ли определить эту температуру по закону смещения Вина, если земная атмосфера поглощает все лучи с длиной волны короче 290 нм ?

8. Сколько энергии излучает абсолютно черное тело за 1 с со светящейся поверхности площадью 1 см^2 , если максимум излучательной способности приходится на длину волны 725 нм ?

9. Из отверстия в печи площадью 10 см^2 излучается 250 кДж энергии за 1 мин . В какой области спектра лежит длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности?

10. Длина волны, соответствующая максимуму излучательной способности абсолютно черного тела, 720 нм , площадь излучающей поверхности – 5 см^2 . Определить мощность излучения.

11. Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум излучательной способности переместится от 700 до 600 нм ?

12. При работе электрической лампы накаливания вольфрамовый волосок нагрелся, в результате чего длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от $1,4$ до $1,1 \text{ мкм}$. Во сколько раз

увеличилась при этом максимальная излучательная способность, если его принять за абсолютно черное тело? На сколько изменилась при этом температура волоска?

13. Температура абсолютно черного тела изменилась при нагревании от 1327 до 1727 °С. На сколько изменилась при этом длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, и во сколько раз увеличилась максимальная излучательная способность?

14. Красная граница фотоэффекта для платины лежит около 198 нм. Если платину прокалить при высокой температуре, то красная граница фотоэффекта станет равной 220 нм. На сколько электрон-вольт прокалывание уменьшает работу выхода электронов?

15. На незаряженную металлическую пластинку, присоединенную к электрометру, направили пучок рентгеновских лучей. Когда пластинка зарядилась до потенциала $U = 124$ В, испускание электронов прекратилось. Определить длину волны рентгеновских лучей. Работой выхода электронов можно пренебречь.

16. Красная граница фотоэффекта рубидия 810 нм. Какое задерживающее напряжение нужно приложить к фотоэлементу, чтобы ни одному из электронов, испускаемых рубидием под действием ультрафиолетовых лучей с длиной волны 100 нм, не удалось преодолеть задерживающее поле?

17. Изолированная металлическая пластинка освещается светом с длиной волны 450 нм. Работа выхода электронов из металла 2 эВ. До какого потенциала зарядится пластинка при непрерывном действии света?

18. Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности некоторого металла светом с частотой $2,2 \cdot 10^{15}$ Гц, полностью задерживаются потенциалом 6,6 В, а вырываемые светом с частотой $4,6 \cdot 10^{15}$ Гц – потенциалом 16,5 В. Найти постоянную Планка (этот метод измерения постоянной Планка был предложен П. И. Лукирским).

19. Образец содержит 1000 радиоактивных атомов с периодом полураспада T . Сколько атомов останется через промежуток времени $T/2$?

20. Образец радиоактивного радона ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ содержит 10^{10} радиоактивных атомов с периодом полураспада 3,825 сут. Сколько атомов распадается за сутки?

21. Через какое время в препарате полония ${}_{84}^{210}\text{Po}$ распадается 75 % имеющихся атомов, если непрерывно удалять радиоактивные продукты распада?

22. За какое время произойдет распад полония $^{210}_{84}\text{Po}$ массой 2 мг, если в начальный момент его масса 0,2 г?

23. Определить период полураспада висмута $^{210}_{83}\text{Bi}$, если известно, что висмут массой 1 г выбрасывает $4,58 \cdot 10^{15}$ β -частиц за 1 с.

24. Сколько ядер распадается за 1 с в препарате радиоактивного изотопа иридия $^{192}_{77}\text{Ir}$ и сколько останется атомов этого препарата через 30 сут., если первоначальная его масса равна 5 г?

25. Сколько α -частиц выбрасывает торий $^{232}_{90}\text{Th}$ массой 1 г за 1 с?

26. Больному ввели внутривенно раствор объемом 1 см^3 , содержащий искусственный радиоизотоп натрия $^{24}_{11}\text{Na}$ активностью $a_0 = 2000 \text{ с}^{-1}$. Активность крови объемом 1 см^3 , взятой через 5 ч, оказалась $a = 0,27 \text{ с}^{-1}$. Найти объем крови человека.

27. Элемент торий $^{232}_{90}\text{Th}$ в результате радиоактивного распада превращается в изотоп свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$. Сколько α - и β -частиц выбрасывает при этом каждый атом?

28. Радиоактивный элемент нептуний $^{241}_{93}\text{Np}$, являющийся родоначальником искусственно полученного радиоактивного семейства нептуния, в результате распада превращается в стабильный изотоп висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$. Найти число α - и β -распадов.

29. Радиоактивный изотоп кремний $^{27}_{14}\text{Si}$ распадается, превращаясь в алюминий $^{27}_{13}\text{Al}$. Какая частица при этом выбрасывается?

30. В какой элемент превращается уран $^{238}_{92}\text{U}$ после трех α - и двух β -превращений?

31. Вещество радиоактивного элемента, подвергнувшись ряду превращений, потеряло одну α - и две β -частицы и превратилось в ядро урана $^{235}_{92}\text{U}$. Найти исходный радиоактивный элемент.

32. В какой элемент превращается радий $^{226}_{88}\text{Ra}$ после пяти α - и четырех β -распадов?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова, И. И. Фотоэлектронные умножители / И. И. Анисимова, Б. М. Глуховской. – М. : Сов. радио, 1974. – 64 с.
2. Демидченко, В. И. Физика : учеб. / В. И. Демидченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д. : Феникс, 2012. – 573 с.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика : учеб. пособие для втузов / И. В. Савельев. – 3-е изд., испр. – М. : Наука, 1987. – 432 с.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц : учеб. пособие для втузов / И. В. Савельев. – М. : Астрель : АСТ, 2003. – 368 с.
5. Федотов, В. И. Основы электроники : учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов / В. И. Федотов. – М. : Высшая школа, 1990. – 287 с.
6. DEVICE SEARCH. – Режим доступа: <http://www.devicesearch.ru>. – Загл. с экрана.
7. Авиация, понятная всем. – Режим доступа: <http://www.avia-simply.ru>. – Загл. с экрана.
8. Википедия : свободная энциклопедия. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>. – Загл. с экрана.
9. Выживание в экстремальных условиях. – Режим доступа: <http://www.i-survive.ru>. – Загл. с экрана.
10. Уголок неба : большая авиационная энциклопедия. – Режим доступа: <http://www.airwar.ru>. – Загл. с экрана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурсиан, Э. В. Физические приборы : учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов. – М. : Просвещение, 1984. – 271 с.
2. Волькенштейн, В. С. Сборник задач по общему курсу физики для студ. втузов / В. С. Волькенштейн. – изд. доп. и перераб. – СПб. : СпецЛит, 2002. – 327 с.

3. Наркевич, И. И. Физика : учебник / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск : Новое знание, 2004. – 680 с.
4. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – М. : Академия, 2010. – 560 с.
5. Трофимова, Т. И. Сборник задач по курсу физики для вузов : учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов / Т. И. Трофимова.– 3-е изд. – М. : ОНИКС 21 век ; Мир и Образование, 2005. – 384 с.
6. Чертов, А. Г. Задачник по физике : учеб. пособие для вузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматлит, 2009. – 640 с.

Электронное издание подготовлено редакционно-издательским отделом и отделом дистанционного обучения УВАУ ГА(И) на основе оригинал-макета учебного пособия.

Текст печатного оригинала оставлен без изменения.

Электронное издание разработано в формате PDF, для просмотра формата необходима бесплатная программа Adobe Reader.

Оглавление учебного пособия дополнено предметным указателем, выполненным в виде гиперссылки, что позволяет свободно переходить в нужный раздел.

На панели (области) навигации Adobe Reader в Закладках есть интерактивное оглавление, с помощью которого удобно перейти в нужный раздел.

Автор электронной версии Н. В. Цысс