

Г. И. Епифанов

**Физические основы
микроэлектроники**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Г11

Г11 **Г. И. Епифанов**
Физические основы микроэлектроники / Г. И. Епифанов – М.: Книга по Тре-
бованию, 2021. – 375 с.

ISBN 978-5-458-48601-9

В книге рассмотрены: 1) элементы квантовой механики и статистической физики; 2) основы физики твердого тела, контактные и поверхностные явления в твердом теле, необходимые при изучении курса микроэлектроники. Книга является учебным пособием по курсу «Физические основы микроэлектроники», предназначенным для студентов специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Она будет полезной и студентам других специальностей, а также аспирантам и инженерам, работающим в электронной и радиотехнической промышленности.

ISBN 978-5-458-48601-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

- $F_{из}$ — сила электрического изображения
 G — число состояний
 $g(E)$ — плотность числа состояний
 $g(\omega)$ — функция распределения нормальных колебаний по частотам
 g — скорость генерации
 $I_э$ — ток эмиттера
 $I_{э n}$ — электронная составляющая тока эмиттера
 $I_{э p}$ — дырочная составляющая тока эмиттера
 $I_б$ — ток базы
 $I_{к0}$ — обратный ток коллектора
 I_y — ток утечки
 I — сила света
 I_k — ток коллектора
 $I_{к n}$ — электронная составляющая тока коллектора
 $I_{к p}$ — дырочная составляющая тока коллектора
 $i_э$ — плотность омического тока
 $i_{э n}$ — электронная составляющая плотности омического тока
 $i_{э p}$ — дырочная составляющая плотности омического тока
 i_D — плотность диффузионного тока
 $i_{D n}$ — электронная составляющая плотности диффузионного тока
 $i_{D p}$ — дырочная составляющая плотности диффузионного тока
 i_s — плотность тока насыщения
 k — волновой вектор электрона
 L — линейный размер; «диффузионная длина»; длина экранирования
 L_n — диффузионная длина электронов
 L_p — диффузионная длина дырок
 L_D — дебаевская длина экранирования
 l — орбитальное квантовое число
 $m_{эф}$ — эффективная масса микрочастицы
 m_n — эффективная масса электрона
 m_p — эффективная масса дырки
 m_l — продольная эффективная масса; магнитное квантовое число
 m_t — поперечная эффективная масса
 m_c — эффективная масса плотности состояний
 N — число частиц
 $N(E)$ — полная функция распределения

- $N_{\text{л}}$ — концентрация ловушек
 $N_{\text{с}}$ — эффективное число состояний в зоне проводимости
 $N_{\text{в}}$ — эффективное число состояний в валентной зоне
 $N_{\text{в}}$ — равновесное число вакансий в решетке
 N_{i} — равновесное число дислоцированных атомов в решетке
 $N_{\text{д}}$ — концентрация донорных атомов
 $N_{\text{а}}$ — концентрация акцепторных атомов
 n — концентрация частиц; концентрация электронов в зоне проводимости
 n_{i} — равновесная концентрация электронов в собственном полупроводнике
 n_{n_0} — равновесная концентрация основных носителей в полупроводнике n -типа
 n_{p_0} — равновесная концентрация неосновных носителей в полупроводнике p -типа
 $n_{\text{л}}$ — концентрация ловушек, заполненных электронами
 $n_{\text{ф}}$ — концентрация фононов
 p — импульс; давление; концентрация дырок
 p_{i} — концентрация дырок в собственном полупроводнике
 p_{p_0} — равновесная концентрация дырок в полупроводнике p -типа
 p_{n_0} — равновесная концентрация дырок в полупроводнике n -типа
 p_{F} — импульс электрона, обладающего энергией Ферми
 P_{n} — вероятность рекомбинации электрона
 P_{p} — вероятность рекомбинации дырок
 P — поверхностный уровень; мощность
 Q — количество тепла; заряд
 Q_{sc} — заряд подвижных носителей в поверхностном слое
 Q_{ss} — неподвижный заряд, захваченный поверхностными состояниями
 R — скорость рекомбинации; коэффициент отражения; электрическое сопротивление
 $R_{\text{с}}$ — емкостное сопротивление
 R_{H} — постоянная Холла
 S — энтропия; площадь

- s — скорость поверхностей рекомбинации; смещение частицы при колебаниях
- s_n — скорость поверхностной рекомбинации электронов
- s_p — скорость поверхностной рекомбинации дырок
- T_e — температура электронного газа
- T_i — температура перехода к собственной проводимости
- T_s — температура истощения примеси
- U — потенциальная энергия; потенциальный барьер
- $U_{из}$ — энергия сил электрического изображения
- u_n — подвижность электронов
- u_p — подвижность дырок
- V — потенциал; разность потенциалов; напряжение; смещение; объем,
- $V_{кр}$ — критическое напряжение
- V_k — контактная разность потенциалов; напряжение на коллекторе
- V_B — напряжение пробоя
- $V_э$ — напряжение на эмиттере
- W — термодинамическая вероятность
- w — вероятность; толщина базы
- Y — изгиб зон на поверхности полупроводника; полная проводимость перехода
- α — коэффициент усиления по току
- α^* — эффективность коллектора
- β — квантовый выход; коэффициент переноса
- γ — коэффициент рекомбинации; коэффициент инжекции; эффективность эмиттера
- ε — диэлектрическая проницаемость, энергия кванта
- ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума
- η — коэффициент поглощения света
- θ — характеристическая температура Дебая
- λ — длина волны, длина свободного пробега
- μ — химический потенциал (уровень Ферми)
- μ_n — химический потенциал (уровень Ферми) электронов
- μ_p — химический потенциал (уровень Ферми) дырок
- ν — частота; число столкновений
- ν_α — предельная частота усиления
- $\nu_{ген}$ — максимальная частота генерирования
- ρ — удельное сопротивление
- σ — удельная электропроводность

- σ_i — собственная проводимость
- $\sigma_{\text{п}}$ — примесная проводимость
- $\sigma_{\text{д}}$ — дифференциальная удельная проводимость
- $\sigma_{\text{ф}}^0$ — стационарная фотопроводимость
- $\sigma_{\text{б}}$ — удельная проводимость базы
- $\sigma_{\text{з}}$ — удельная проводимость эмиттера
- $\Delta\sigma_s$ — поверхностная проводимость полупроводника
- τ — время жизни, время релаксации
- τ_n — время жизни электронов
- τ_p — время жизни дырок
- Φ — разность потенциалов между уровнем Ферми и уровнем электростатического потенциала, световой поток
- Φ_s — значение Φ на поверхности полупроводника
- Φ_b — значение Φ в объеме полупроводника
- $\varphi(x)$ — потенциальная энергия электронов
- φ_0 — равновесный потенциал барьера в переходе
- χ — работа выхода
- χ_0 — термодинамическая работа выхода
- ψ — волновая функция, электростатический потенциал
- ψ_0 — электростатический потенциал в объеме полупроводника
- ψ_s — электростатический потенциал на поверхности полупроводника
- $\omega_{\text{д}}$ — характеристическая частота Дебая

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной науки и техники требует создания эффективно действующих сложных радиотехнических устройств, которые могут содержать сотни тысяч элементов, объединенных в схему сотнями тысяч соединений.

На электронное оборудование приходится основная часть затрат, расходуемых на производство современных машин и летательных аппаратов. Подсчитано, например, что более 70% стоимости современного управляемого снаряда и свыше 50% стоимости современного бомбардировщика падает на электронное оборудование.

Создание столь сложных и дорогостоящих радиотехнических устройств потребовало резкого уменьшения веса, размеров и потребляемой мощности, увеличения надежности и уменьшения стоимости этих устройств.

Если бы современные радиотехнические устройства монтировались из дискретных деталей, то вес таких устройств измерялся бы тоннами, объем — кубическими метрами, потребляемая мощность — сотнями киловатт. Уже одно это делало бы их почти совершенно непригодными для практического использования во многих областях народного хозяйства.

Но дело не только в весе, размерах и потребляемой мощности. По мере увеличения функциональной сложности радиотехнических устройств падает их надежность, которая во многих случаях (особенно в сложных автоматических линиях, в военной технике, вычислительных машинах и т. д.) играет первостепенную роль.

Немаловажным является также вопрос о *стоимости* электронной аппаратуры. Снижение стоимости можно достичь путем широкой автоматизации производственных процессов, которая требует разработки соответствующей технологии изготовления этой аппаратуры.

Изыскание путей решения этих проблем привело к созданию *миниатюрных* электронных элементов и узлов на основе твердого тела и к *микроминиатюризации* радиоэлектронной аппаратуры. Это привело к развитию

новой области электроники — *микрoeлектроники*, основной задачей которой является создание высоконадежных, экономичных микроминиатюрных электронных схем и устройств.

В настоящее время определились следующие основные направления в создании микрoeлектронных схем.

Интегральные тонкопленочные схемы. Эти схемы получают путем нанесения на подложку чередующихся слоев тонких пленок, выполняющих функции сопротивлений, емкостей и управляемых элементов. Основная трудность здесь состоит в изготовлении активных пленочных элементов. До сих пор еще не создано такой технологии, которая позволяла бы в едином цикле получать высокостабильные пленочные активные элементы, без которых невозможно создание полностью пленочных схем.

Интегральные гибридные пленочные схемы. В гибридных микросхемах пассивные компоненты и соединения выполняются так же, как и в пленочных схемах. В качестве же активных компонентов используются навесные полупроводниковые приборы.

Интегральные полупроводниковые схемы. Они изготавливаются в объеме полупроводника путем локального введения различных примесей. Таким способом удается создавать транзисторы, диоды, резисторы и т. д. Соединение между ними осуществляется частично в объеме полупроводника, а частично на его поверхности путем напыления токопроводящих металлических полосок.

Интегральные совмещенные схемы. В этих схемах активные компоненты изготавливаются в объеме полупроводника, а пассивные и основные соединения — на защищенной его поверхности путем нанесения пленок.

Функциональные схемы. Они представляют собой полупроводниковые схемы, выполняющие определенную законченную функцию, и не делимые на отдельные компоненты. В качестве примера можно привести преобразователь переменного тока в постоянный. Обычная схема такого преобразователя состоит из трансформатора, выпрямителя и фильтра. Функциональный полупроводниковый преобразователь состоит из резистивной области, в которой энергия переменного тока переходит в тепло, центральной электрически изолированной, но теплопроводящей области и из термоэлектрической области, в которой приходящее тепло преобразуется в постоянный ток. В такой схеме невозможно выделить участки, равноцен-

ные дискретным элементам обычной схемы. В ней кристалл в целом выполняет сложную функцию преобразователя переменного тока в постоянный.

Ниже приведены данные, показывающие, к каким результатам может привести развитие указанных направлений.

Конструкция	Число элементов в 1 м ²	Ожидаемая интенсивность отказов, ч ⁻¹
С элементами выпуска до 1941 г.	$35 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-5}$
Микромодульная	$21 \cdot 10^6$	10^{-7}
На интегральных тонкопленочных схемах	$87 \cdot 10^6$	10^{-7}
На интегральных полупроводниковых схемах	$30 \cdot 10^6$	Преенебрежимо мала

Повышение надежности при переходе к интегральным тонкопленочным и полупроводниковым схемам достигается путем уменьшения числа ненадежных элементов и соединений, снижения рассеиваемой мощности и облегчения режимов работы и т. д. Кроме того, микроминиатюризация отдельных узлов и схем и автоматизация их производства делают экономически целесообразным *резервирование* элементов аппаратуры, что резко повышает надежность сложных электронных устройств.

Развитие микроэлектроники в настоящее время происходит исключительно быстро. В печати почти ежедневно появляются сообщения о новых типах приборов и электронных устройств. Для понимания принципа работы этих приборов, возможности их использования в новых разработках радиоэлектронной аппаратуры студент должен овладеть необходимым комплексом физических знаний. Попытке изложения такого комплекса и посвящено данное учебное пособие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стафеев В. И. Некоторые проблемы микроэлектроники. В сб. «Микроэлектроника», под ред. Ф. В. Лукина, вып. 1. Изд-во «Советское радио», 1967.
2. Белевцев А. Т. Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во «Энергия», 1965.
3. Гальперин Е. И. Микроминиатюризация электронной аппаратуры. В сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», под ред. Я. А. Федотова, вып. 10. Изд-во «Советское радио», 1963.
4. Левин С. Н. Основы полупроводниковой микроэлектроники. Пер. с англ., под ред. Маслова. Изд-во «Советское радио», 1966.
5. «Микроэлектроника». Пер. с англ., под ред. Н. П. Богородицкого. Изд-во «Советское радио», 1966.
6. Степаненко И. П. Современная микроэлектроника и ее применение. «Известия вузов», Радиоэлектроника, 1968, № 7.

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Используемые в данном руководстве сведения из квантовой механики по своему объему не выходят за рамки программы курса физики высших технических учебных заведений. Однако, чтобы избавить читателя от многочисленных ссылок, мы сочли целесообразным привести эти сведения здесь в краткой конспективной форме.

§ 1. Волновые свойства микрочастиц

Свет обладает, как известно, волновыми и корпускулярными свойствами. В явлениях интерференции, дифракции, поляризации и других свет ведет себя как волна с частотой ν и длиной λ . В фотоэлектрических явлениях, эффекте Комптона и многих других свет ведет себя как частицы (корпускулы), имеющие энергию

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (2.1)$$

и импульс

$$p = h/\lambda = \hbar/\lambda, \quad (2.2)$$

где h — постоянная Планка, $\hbar = h/2\pi$, $\lambda = \lambda/2\pi$, $\omega = 2\pi\nu$. Частицы света получили название *фотонов*.

В 1924 г. де Бройль высказал гипотезу, что двойственность волн и корпускул, свойственная свету, должна существовать и у других микрочастиц — у электронов, протонов, атомов и т. д. Микрочастице, обладающей энергией E и импульсом p , должна соответствовать волна с частотой

$$\nu = E/h \text{ или } \omega = E/\hbar \quad (2.3)$$

и длиной

$$\lambda = h/p = h/mv \text{ или } \lambda = \hbar/p = \hbar/mv, \quad (2.4)$$

где v — скорость движения частиц. Эти волны называют часто волнами де Бройля, а соотношения (2.3) и (2.4) — соотношениями де Бройля.

Гипотеза де Бройля подвергалась многократной экспериментальной проверке. В качестве примера на рис. 2.1 показана дифракционная картина, возникающая при пропускании через тонкую металлическую фольгу пучка рентгеновских лучей и пучка электронов. Полное сходство этих картин свидетельствует о том, что пучок электронов обладает такими же волновыми свойствами, как и пучок рентгеновских лучей. Вычисление длин электронных волн, произведенное из дифракционных картин, по-

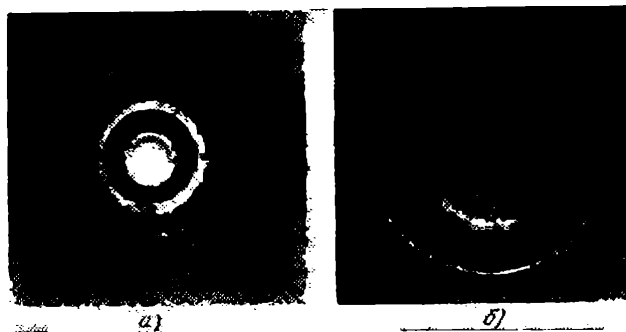


Рис. 2.1. Дифракционная картина, полученная при прохождении через тонкую металлическую фольгу рентгеновских лучей (а) и пучка электронов (б).

казало хорошее согласие формулы де Бройля с опытом. На волновых свойствах электронов основывается электронная микроскопия.

Интересный опыт был поставлен в 1948 г. Фабрикантом, Биберманом и Сушкиным. Они пропускали через дифракционный прибор настолько слабый пучок электронов, что промежуток времени между двумя последовательными актами пропускания электронов примерно в 30 000 раз превышал время, необходимое для прохождения электронов через прибор. Это давало полную уверенность в том, что на поведение электрона, проходящего через прибор, другие электроны никакого влияния не оказывали. Опыт показал, что при длительной экспозиции на фотопластинке возникала такая же дифракционная картина, какую дает пучок электронов. Это свидетельствует о том, что *волновыми свойствами обладает каждый отдельно взятый электрон.*

§ 2. Волновое уравнение Шредингера

Качественное своеобразие микрочастиц, резко отличающее их от частиц классической физики, требует и качественно нового подхода к описанию их движения по сравнению с методами классической механики. Из наличия у микрочастиц волновых свойств следует, что закон движения их должен определяться законом распространения волн де Бройля, связанных с этими частицами. Так как распространение любого волнового процесса описывается *волновым уравнением*, то следует ожидать, что и движение микрочастиц должно описываться волновым уравнением. Такое уравнение было найдено впервые Шредингером и носит его имя. Для микрочастицы, движущейся в силовом поле и обладающей потенциальной энергией $U(x, y, z, t)$, уравнение Шредингера имеет следующий вид:

$$-i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) - U(x, y, z, t) \Psi. \quad (2.5)$$

Функция $\Psi(x, y, z, t)$, являющаяся решением этого уравнения, называется *волновой функцией*. Непосредственной подстановкой можно убедиться, что уравнение Шредингера удовлетворяется только *комплексными* волновыми функциями. Поэтому физический смысл имеет не сама функция Ψ , а произведение Ψ на функцию Ψ^* , комплексно сопряженную с Ψ . Это произведение действительно и пропорционально *вероятности* того, что в момент времени t микрочастица находится в выделенном элементе объема dV . Обозначим эту вероятность через $\omega(x, y, z, t)dV$. Тогда:

$$\omega(x, y, z, t) dV = \Psi(x, y, z, t) \Psi^*(x, y, z, t) dV. \quad (2.6)$$

В соответствии с таким смыслом волновой функции, она должна быть *непрерывной* и иметь непрерывную первую производную, *однозначной* и *конечной* во всех точках пространства, ибо вероятность нахождения микрочастицы в том или ином элементе объема не может быть величиной неоднозначной, бесконечной или скачкообразно меняющейся от точки к точке. Интеграл $\int_V \omega dV$, взятый по всему пространству, равен единице, так как он