

**С.М. Зи**

# **Физика полупроводниковых приборов**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 030  
ББК 92  
С11

С11 **С.М. Зи**  
Физика полупроводниковых приборов / С.М. Зи – М.: Книга по Требованию, 2023. – 656 с.

**ISBN 978-5-458-38949-5**

В книге изложены физические принципы и описаны рабочие характеристики полупроводниковых приборов. приведено большое количество справочных данных (номограммы, графики и таблицы) для расчета различных приборов. подробно рассмотрены новые приборы, такие, как диоды Шоттки, ЛпД, полупроводниковые лазеры, диоды Ганна. Книга рассчитана на читателей, имеющих сведения в области физики твердого тела, полупроводников и теории полупроводниковых приборов, а также может служить в качестве учебного пособия для студентов вузов.

**ISBN 978-5-458-38949-5**

© Издание на русском языке, оформление  
«УОУО Media», 2023  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2023

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.



## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

В книге рассматриваются физические принципы действия и рабочие характеристики полупроводниковых приборов. Книга может быть использована в качестве учебного пособия для студентов электротехнических факультетов и факультетов прикладной физики, а также как руководство для специалистов, работающих в области исследования и разработки твердотельных приборов. Предполагается, что читатель уже обладает начальными сведениями по физике твердого тела и теории транзистора.

Полупроводниковый прибор определен в этой книге как устройство, изготовленное частично или целиком из полупроводникового материала, которое может выполнять необходимые функции в электронной аппаратуре. После изобретения транзистора в 1948 г. появилось множество различных полупроводниковых приборов, что явилось результатом применения новых материалов, успехов в области технологии и физики приборов.

Объем книги не позволяет рассмотреть все эти приборы. Однако была сделана попытка включить в книгу наиболее важные из них, особенно сверхвысокочастотные приборы, приборы, использующие свойства границы раздела металл — полупроводник, и оптоэлектронные приборы, и дать по возможности единообразное описание их. Автор надеется, что книга может служить основой для понимания принципов действия других приборов, которые здесь не рассмотрены и которых, возможно, даже пока не существует.

Эта книга была задумана как лекторские заметки по факультативному курсу «Физика полупроводниковых приборов», а позднее она вылилась в полный курс лекций по полупроводниковым приборам в Стивенсоновском технологическом институте.

Количественные данные о свойствах полупроводников взяты в основном из каталогов, составленных информационным центром «Хьюз Эйркрафт Ко». При подготовке книги было использовано более 2 тыс. статей по полупроводниковым приборам. В начале каждой главы даются краткий исторический обзор и краткое содержание главы. Физика приборов и ее математический аппарат излагаются

в последующих разделах в определенной логической последовательности без ссылок на первоисточники. Ряд данных и многие иллюстрации заимствованы из источников, указанных в конце каждой главы.

В гл. 2 собраны обширные сведения по трем важнейшим полупроводниковым материалам: германию, кремнию и арсениду галлия. Эти данные использованы при анализе характеристик приборов. В гл. 3—14 рассмотрены приборы специального применения и группы приборов с аналогичными характеристиками, причем каждый рассматривается независимо от других. Например, если читателя интересуют приборы, основанные на объемном эффекте, то он может обращаться непосредственно к последней главе, минуя предыдущие.

## ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Обозначение	Наименование	Единица измерения
$a$	Постоянная решетки	Å
$\mathcal{B}$	Магнитная индукция	вб/м <sup>2</sup>
$c$	Скорость света в вакууме	см/сек
$C$	Емкость	ф
$\mathcal{D}$	Электрическое смещение	к/см <sup>2</sup>
$D$	Коэффициент диффузии	см <sup>2</sup> /сек
$E$	Энергия	эв
$E_C$	Энергия дна зоны проводимости	эв
$E_F$	Уровень Ферми	эв
$E_g$	Ширина запрещенной зоны	эв
$E_V$	Энергия верха валентной зоны	эв
$\mathcal{E}$	Напряженность электрического поля	в/см
$\mathcal{H}$	Напряженность магнитного поля	э
$\mathcal{E}_c$	Критическая напряженность электрического поля	в/см
$\mathcal{E}_m$	Максимальная напряженность электрического поля	в/см
$f$	Частота	гц
$F(E)$	Функция распределения Ферми-Дирака	
$\hbar$	Постоянная Планка	дж·сек
$h_\nu$	Энергия фотона	эв
$I$	Ток	а
$I_C$	Коллекторный ток	а
$J$	Плотность тока	а/см <sup>2</sup>
$J_t$	Пороговая плотность тока	а/см <sup>2</sup>
$k$	Постоянная Больцмана	дж/°К
$kT$	Тепловая энергия частицы	эв
$L$	Длина	см или м·см
$m_0$	Масса свободного электрона	кг
$m^*$	Эффективная масса	кг
$\bar{n}$	Коэффициент преломления	—
$n$	Концентрация свободных электронов	см <sup>-3</sup>
$n_i$	Собственная концентрация	см <sup>-3</sup>
$N$	Концентрация легирующей примеси	см <sup>-3</sup>
$N_A$	Концентрация акцепторов	см <sup>-3</sup>

## Продолжение

Обозначение	Наименование	Единица измерения
$N_C$	Эффективная плотность состояний в зоне проводимости	$см^{-3}$
$N_D$	Концентрация доноров	$см^{-3}$
$N_V$	Эффективная плотность состояний в валентной зоне	$см^{-3}$
$p$	Концентрация свободных дырок	$см^{-3}$
$P$	Давление	$дин/см^2$
$q$	Величина заряда электрона	к
$Q_{ss}$	Плотность поверхностных состояний	$заряд/см^2$
$R$	Сопротивление	ом
$t$	Время	сек
$T$	Абсолютная температура	$^{\circ}К$
$v$	Скорость носителей	$см/сек$
$v_{sl}$	Скорость, ограниченная рассеянием	$см/сек$
$v_{th}$	Тепловая скорость ( $\sqrt{3kT/m}$ )	$см/сек$
$U$	Напряжение	в
$U_{bi}$	Контактная разность потенциалов	в
$U_{EB}$	Напряжение эмиттер—база	в
$U_B$	Пробивное напряжение	в
$W$	Толщина	$см$ или $мкм$
$W_B$	Толщина базы	$см$ или $мкм$
$x$	Направление по оси $x$	—
$\nabla$	Оператор дифференцирования	
$\nabla T$	Температурный градиент	$^{\circ}К/см$
$\epsilon_0$	Диэлектрическая проницаемость вакуума	$ф/см$
$\epsilon_s$	Диэлектрическая проницаемость полупроводника	$ф/см$
$\epsilon_i$	Диэлектрическая проницаемость изолятора	$ф/см$
$\epsilon_s/\epsilon_0$ или $\epsilon_i/\epsilon_0$	Диэлектрическая постоянная	
$\tau$	Время жизни или время затухания	сек
$\theta$	Угол	рад
$\lambda$	Длина волны	$мкм$ или $\text{Å}$
$\nu$	Частота электромагнитных колебаний	гц

Обозначение	Наименование	Единица измерения
$\mu_0$	Магнитная проницаемость вакуума	гн/см
$\mu_n$	Подвижность электронов	см <sup>2</sup> /в·сек
$\mu_p$	Подвижность дырок	см <sup>2</sup> /в·сек
$\rho$	Удельное сопротивление	ом·см
$\Phi$	Высота барьера	в
$\Phi_{Вn}$	Высота барьера Шоттки в полупроводнике <i>n</i> -т па	в
$\Phi_{Вp}$	Высота барьера Шоттки в полупроводнике <i>p</i> -типа	в
$\Phi_m$	Работа выхода металла	в

# ЧАСТЬ I

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

### ГЛАВА ПЕРВАЯ

#### ВВЕДЕНИЕ

##### 1. Краткое содержание

Книга состоит из пяти частей.

Часть 1. Обзор физики и свойств полупроводников.

Часть 2. Приборы с  $p$ - $n$  переходом.

Часть 3. Приборы, использующие свойства границы раздела металл — полупроводник, и тонкопленочные приборы.

Часть 4. Оптоэлектронные приборы.

Часть 5. Приборы на основе объемного эффекта.

Глава 2 части 1 содержит описание общих свойств материалов, используемое в данной книге в качестве основы для понимания и расчета характеристик приборов. Кратко рассматриваются распределение носителей и свойства переноса применительно к трем важнейшим материалам: германию, кремнию и арсениду галлия. Последняя и наиболее точная информация по этим полупроводникам дается в таблицах и графиках гл. 2.

Часть 2 (гл. 3—7) касается приборов с одним или более взаимодействующими  $p$ - $n$  переходами. Классический  $p$ - $n$  переход со средней величиной поля рассматривается в гл. 3 как самостоятельно, так и в качестве составной части приборов.

Когда  $p$ - $n$  переход с обеих сторон легирован достаточно сильно, внутреннее поле возрастает и начинается процесс туннелирования, в результате переход приобретает новые свойства — становится туннельным диодом (гл. 4). Когда  $p$ - $n$  переход работает в области лавинного пробоя, он при соответствующих условиях начинает действовать как лавинно-пролетный диод, который может использоваться в качестве СВЧ-генератора (гл. 5).

В гл. 6 описывается плоскостной транзистор — полупроводниковый прибор, основанный на взаимодействии между двумя близко расположенными  $p$ - $n$  переходами. Другие приборы с  $p$ - $n$  переходами рассматриваются в гл. 7, среди них  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  прибор с тремя переходами и полевой транзистор с  $p$ - $n$  переходом; последний использует поле на переходе для управления током, текущим параллельно переходу.

Часть 3 (гл. 8—11) посвящена явлениям, происходящим на границе раздела между полупроводником и другими материалами. Граница раздела с металлом, в частности барьер Шоттки, рассмотрена

в гл. 8. Электрические свойства диода с барьером Шоттки аналогичны свойствам асимметричного диода с резким  $p-n$  переходом, однако он может работать как прибор, основанный на принципе использования основных носителей, с присущим ему большим быстродействием.

Приборам на основе структур металл — изолятор — полупроводник и соответствующим вопросам физики поверхности посвящены гл. 9 и 10. Знание «поверхностных состояний» важно не только применительно к приборам данного класса, но также и потому, что они определяют надежность и стабильность других полупроводниковых приборов. В гл. 11 описаны некоторые тонкопленочные приборы и приборы на основе «горячих» электронов, которые также принадлежат к семейству приборов, использующих свойства границы раздела металл — полупроводник.

Часть 4 (гл. 12, 13) рассматривает оптоэлектронные приборы, которые могут детектировать, генерировать и преобразовывать световую энергию в электрическую и наоборот.

Различным фотодетекторам и солнечным элементам посвящена гл. 12, гл. 13 — одному из важнейших оптоэлектронных приборов — полупроводниковому лазеру.

Часть 5 (гл. 14) рассматривает некоторые так называемые «объемные» приборы, в первую очередь те, которые основаны на механизме междолинного перехода (генератор Ганна и генератор в режиме с ограниченным накоплением объемного заряда ОНОЗ). Эти приборы не связаны непосредственно ни с  $p-n$  переходами, ни с явлениями на границе раздела, но они работают в области достаточно сильных полей, так что обсуждение зависимости дрейфовой скорости от напряженности поля и режимов работы подобных приборов составляет основную часть гл. 14.

В начале каждой главы по приборам дается краткая предыстория создания и развития данного прибора или группы родственных приборов.

Затем следует рассмотрение характеристик прибора и физических принципов действия. Это вызвано желанием сделать каждую главу более или менее обособленной от других глав, с тем чтобы лектор или читатель мог выбирать их и располагать по своему усмотрению. Чтобы упростить систему обозначений, простые символы были использованы по несколько раз с разным значением для различных приборов. Так, например, символ  $\alpha$  обозначает коэффициент усиления по току для плоскостных транзисторов в схеме с общей базой, коэффициент оптического поглощения для фотодетекторов и коэффициент ударной ионизации электронов для лавинно-пролетных диодов. Это намного удобнее, чем использовать  $\alpha$  только 1 раз, в результате чего пришлось бы вводить более сложные обозначения для других применений. Но в каждой главе данный символ используется лишь в одном значении и с самого начала ему дается определение.

Многие символы имеют одинаковое или сходное значение на протяжении всей книги, они собраны в перечне обозначений.

## 2. Классификация полупроводниковых приборов

В предыдущем разделе мы классифицировали полупроводниковые приборы в зависимости от используемых материалов (только полупроводники или сочетание металла, полупроводника и изолятора) и

Таблица 1-1

## Приборы на основе объемного эффекта

Внешние воздействия		Число электродов	Основные особенности	Наименование прибора (где применяется)
Число одноэлементно воздействующих факторов	Вид воздействия			
1	$h\nu$	0	Пропускание света выше определенной частоты Оптическая и электроннолучевая накачка	Оптический фильтр Лазеры
	$\mathcal{E}$	2	$I = \sigma \mathcal{E}$ Отрицательное сопротивление, управляемое напряжением Отрицательное сопротивление, управляемое током $I = \cos t$ для $\mathcal{E} > \mathcal{E}$ порогов	Резистор Генератор Ганна Криозар Ограничитель тока
	$\Delta T$	2	Эффект Зеебека $\mathcal{E} \approx \Delta T$	
2	$h\nu, \mathcal{E}$	2	$I = \sigma (h\nu) \mathcal{E}$	Фотосопротивление
	$\mathcal{E}, \mathcal{H}$	2	$I = \sigma (\mathcal{H}) \mathcal{E}$	Резистор, управляемый магнитным полем
		4	Эффект Холла $V = f(\mathcal{H}, \mathcal{E})$	Генератор Холла
	$\mathcal{E}, T$	2	$I = \sigma (T) \mathcal{E}$	Термистор
	$\mathcal{E}, \Delta T$	2	Эффект Томсона $\Delta T$	
	$\mathcal{E}, P$	2	Пьезорезистивный эффект	Тензодатчик
3	$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{H}$	3	Эффект Суля	

Таблица 1-2

## Однопереходные приборы

Внешние воздействия		Число электродов	Основные особенности	Наименование прибора (где применяется)
Число одновременно воздействующих факторов	Вид воздействия			
1	$h\nu$	2	Фотоэлектрический эффект	Фотоэлемент, солнечная батарея
	$\mathcal{E}$	2	<p><i>p-n</i> переход</p> <p><i>p-n</i> переход в качестве переменного резистора</p> <p><i>p-n</i> переход в качестве переменной емкости</p> <p><i>p-n</i> переход в качестве источника света</p> <p>Сильно легированный с двух сторон <i>p-n</i> переход</p> <p>Умеренно легированный <i>p-n</i> переход с отражающими поверхностями</p> <p>Ограничение напряжения лавинным пробоем или туннелированием</p> <p>СВЧ-генерация, связанная с лавинным умножением и задержкой на время пролета</p> <p>Униполярный прибор, используемый в качестве ограничителя тока</p> <p><i>p-n</i> переход между полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны</p>	<p>Диод, выпрямитель</p> <p>Варистор</p> <p>Варактор</p> <p>Электролюминесцентный диод</p> <p>Туннельный диод</p> <p>Инжекционный лазер</p> <p>Стабилизатор напряжения</p> <p>Лавинно-пролетный диод</p> <p>Полевой диод</p> <p>Гетеропереход (<i>n-n</i>, <i>p-n</i> и <i>p-p</i>)</p>

Внешние воздействия		Число электродов	Основные особенности	Наименование прибора (где применяется)
Число одновременно действующих факторов	Вид воздействия			
		2	Контакт металл—полупроводник	Диод с барьером Шоттки, диод Мотта, точечный диод
2	$\Delta T$	2	Эффект Зеебека	Термопара, термогенератор
	$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$	3	Инжекция неосновных носителей в нитевидный образец	Однопереходный транзистор
	$\mathcal{E}, \Delta T$	2	Эффект Пельтье	Холодильник Пельтье
	$\mathcal{E}, h\nu$	2	$I = f(\mathcal{E}, h\nu)$	Фотодиод

свойств этих материалов (таких, как оптические свойства или свойства междолинных переходов). Эта классификация позволяет упорядочить последовательность рассмотрения приборов.

В данном разделе будет рассмотрен более подробный метод классификации полупроводниковых приборов, использованный в [Л. 1]. Эта система может быть использована для классификации приборов, как существующих в настоящее время, так и тех, которые, возможно, появятся в будущем, причем эта система может послужить также основой и для размышлений о путях создания новых приборов.

Система начинается перечислением всех свойств полупроводников и всех видов внешних воздействий (таких, как приложенное напряжение), которые могут изменять его свойства. Приборы располагаются в порядке усложнения: управляемые одним, двумя и т. д. воздействиями. Мы начнем с гомогенных полупроводников (объемный эффект без  $p-n$  переходов) и одного внешнего воздействия. Приборы с объемным эффектом следующей степени сложности будут характеризоваться наличием двух, трех и более внешних воздействий. Один  $p-n$  переход будет исключением из приборов с объемным эффектом, и внешние воздействия будут прикладываться порознь, попарно и т. д. Наконец, мы рассмотрим многопереходные (или переходы с не-