

№ 111

Физика фотопреобразователей

Курс лекций

№ 111

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра полупроводниковой электроники
и физики полупроводников

Физика фотопреобразователей

Курс лекций

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2011

УДК 537

Ф48

Рецензент

д-р техн. наук, проф. *Г.В. Кузнецов*

Физика фотопреобразователей: Курс лекций / В.Н. Мурашев,
Ф48 С.А. Леготин, А.С. Корольченко, М.Н. Орлова. – М.: Изд. Дом
МИСиС, 2011. – 120 с.

ISBN 978-5-87623-401-8

Полупроводниковые фотопреобразователи – приемники излучений относятся к отдельному классу полупроводниковых приборов, поскольку конструкции приемников излучений весьма специфичны и предусматривают наличие чувствительных к излучению материалов. В курсе лекций описываются физические процессы, происходящие в материале полупроводниковых фотопреобразователей (приемников излучений). Приводятся математические уравнения и методы их решений. На примерах полупроводниковых приемников излучений, таких как фотодиоды, фототранзисторы, солнечные элементы, ПЗС-приборы, матричные детекторы и т.д., изучаются вольт-амперные и спектральные характеристики. Рассматриваются физические, конструкционные и технологические методы повышения эффективности приемников излучений. Оцениваются перспективы развития новых типов приемников излучений с конструкцией пикселей микро- и нанометрового топологического диапазона.

Курс лекций предназначен для студентов, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и нанoeлектроника», 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

УДК 537

ISBN 978-5-87623-401-8

© В.Н. Мурашев,
С.А. Леготин,
А.С. Корольченко,
М.Н. Орлова, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках	5
1.1. Основные понятия	5
1.2. Фотоэлектрические явления в твердых телах. Поглощение света	10
1.2.1. Собственное поглощение света	13
1.2.2. Экситонное поглощение	15
1.2.3. Поглощение света носителями заряда	17
1.2.4. Примесное поглощение света	17
1.2.5. Поглощение света кристаллической решеткой	18
1.3. Фотопроводимость. Релаксация фотопроводимости	18
1.4. Фотогальванический эффект в $p-n$ переходе и его применение	23
2. Приемники оптического излучения	27
2.1. Фотоприемники. Параметры и характеристики. Классификация	27
2.2. Основные виды фотоприемников излучения	30
2.2.1. Фоторезисторы	30
2.2.2. Фотодиоды	32
2.2.2.1. Фотодиоды с барьером Шоттки	34
2.2.2.2. Гетерофотодиоды	35
2.2.2.3. МДП-фотодиоды	36
2.2.2.4. $P-i-n$ -фотодиоды и лавинные фотодиоды	37
2.3. Фотоэлементы	38
2.4. Фототранзисторы	40
2.4.1. Полевые фототранзисторы	41
2.4.2. Гетерофототранзисторы	42
2.5. Фототиристоры	42
3. Солнечные элементы	44
3.1. Кремниевые солнечные батареи (СБ)	44
3.1.1. Кремниевые монокристаллические СБ	44
3.1.2. СБ с применением аморфного кремния	46
3.1.3. Конструкция фотопреобразователя его зонная диаграмма	48
3.1.4. Этапы изготовления солнечного элемента	51
3.2. Солнечные элементы на основе многопереходных гетероструктур	52
3.2.1. Каскадные солнечные элементы	58
3.2.2. Повышение эффективности преобразования солнечной энергии	67
3.3. Радиационная деградация солнечных батарей в космической среде	69
4. Приемники оптических изображений	76
4.1. Приемники оптических изображений на основе приборов с зарядовой связью	76
4.2. Принцип действия приборов с зарядовой связью	76
4.3. Разновидности ПЗС	77
4.3.1. ПЗС с поверхностным каналом	78
4.3.2. ПЗС с объемным каналом	79
4.3.3. ПЗС на основных носителях	82
4.3.4. Интегральные приборы типа пожарных цепочек	83

4.3.4.1. Пожарная цепочка на МОП-структурах	83
4.3.4.2. Пожарные цепочки на канальных транзисторах	83
4.3.4.3. Пожарные цепочки на биполярных транзисторах	85
4.4. Основные способы ввода информации в ПЗС	85
4.5. Считывание информации в ПЗС	86
5. Детекторы – приемники радиационных квантов и излучений	87
5.1. Принцип действия и основные характеристики полупроводниковых детекторов	87
5.2. Классификация полупроводниковых детекторов	96
5.2.1. Монолитные детекторы.....	96
5.2.1.1. Стриповые (полосковые) детекторы.....	96
5.2.1.2. Полупроводниковые дрейфовые камеры	97
5.2.1.3. Дрейфовые фотодиоды	98
5.2.2. Пиксельные полупроводниковые детекторы.....	101
5.2.2.1. Приборы с зарядовой связью	101
5.2.2.2. Интегральные полупроводниковые детекторы	103
5.2.2.2.1. Интегральный детектор на основе SSJFET (односторонний полевой транзистор с управляющим <i>p-n</i> переходом)	105
5.2.2.2.2. Обедненный МОП-транзистор (DEPMOS-транзистор)	106
5.2.2.2.3. Детекторы на основе функционально- интегрированных биполярных структур.....	110
5.2.2.3. Гибридные полупроводниковые детекторы.....	117
Библиографический список	119

1. ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

1.1. Основные понятия

Свет – электромагнитное излучение, испускаемое нагретым или находящимся в возбужденном состоянии веществом в диапазоне частот, воспринимаемых человеческим глазом от фиолетового до красного (380...780 нм).

Свет может рассматриваться и как электромагнитная волна, и как поток фотонов: частиц, обладающих определенной энергией и нулевой массой покоя.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные колебания определенного диапазона частот, распространяющихся в пространстве со скоростью c , которая для вакуума составляет $3 \cdot 10^8$ м/с. Основной характеристикой электромагнитного излучения является частота ν или длина волны электромагнитных колебаний $\lambda = c/\nu$. Частотный состав электромагнитного излучения называется его спектром.

Свойства электромагнитного излучения сильно различаются в зависимости от частотного диапазона. Наиболее высокочастотная область колебаний (спектра), характеризующаяся длиной волны $\lambda < 0,05$ нм ($5 \cdot 10^{-11}$ м), соответствует космическим лучам, пронизывающим земную атмосферу, и γ -излучению, возникающему при ядерных реакциях.

Область колебаний (спектра) с длинами волн от долей нанометра до нескольких десятков нанометров относится к рентгеновскому излучению. «Мягкое», т.е. наиболее длинноволновое и наименее проникающее рентгеновское излучение, примыкает к ультрафиолетовому излучению оптического диапазона.

Оптическим диапазоном электромагнитного излучения называется средняя область спектра с длиной волны от нескольких десятков нанометров (сотых долей микрона) до величины порядка сотни микрометров (долей миллиметра). Оптический диапазон включает: невидимое ультрафиолетовое излучение с длиной волны до 380 нм, область видимого излучения – свет – с длиной волны от 380 до 780 нм и невидимое инфракрасное излучение с длиной волны больше 780 нм.

Объединение ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения в общее понятие оптический диапазон оправдывается как

однотипностью принципов возбуждения этих излучений, так и общностью методов их индикации и преобразования. Учитывая это, мы будем употреблять термин «свет» (т.е. видимое оптическое излучение) вместо «оптическое излучение» для облегчения понимания некоторых оптических явлений.

Оптическое излучение возникает либо в результате возбуждения атомов или кристаллов, сопровождающегося энергетическими переходами наименее связанных (валентных) электронов, либо в результате тепловых колебаний самих атомов и молекул, испускающих инфракрасное излучение. Рентгеновское излучение отличается от оптического тем, что возникает при возбуждении электронов с внутренних оболочек атома, радиоизлучение – при колебаниях свободных зарядов.

Со стороны более длинных волн к оптическому диапазону примыкает область радиоволн. Наиболее длинноволновое электромагнитное излучение ($\lambda > 10^4$ м) создают промышленные установки (генераторы переменного тока).

На рис. 1.1 изображен в логарифмическом масштабе полный спектр электромагнитных излучений. В табл. 1.1 приведены источники электромагнитных волн.



Рис. 1.1. Шкала электромагнитных волн

Таблица 1.1

Источник электромагнитных волн

Частота ν , Гц	Длина волны λ , м	Диапазон	Источник. Основные методы возбуждения
10^3	$3 \cdot 10^4$	Радиоволны	Переменные токи в проводниках и электронных потоках (генераторы радиочастот, генераторы сверхвысоких частот)

Частота ν , Гц	Длина волны λ , м	Диапазон	Источник.
			Основные методы возбуждения
$3,75 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7}$	ИК излучение	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
$7,5 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{-7}$	Видимый свет	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
$3 \cdot 10^{17}$	10^{-9}	УФ излучение, мягкий рентген	Излучение атомов при воздействии ускоренных электронов
$3 \cdot 10^{20}$	10^{-12}	Рентген, γ -излучение	Атомные процессы при воздействиях ускоренных заряженных частиц
10^{23}	$3 \cdot 10^{-15}$	γ -излучение	Ядерные процессы, радиоактивный распад, космические процессы

Одной из характеристик света является его цвет, который определяется длиной волны. Физические величины, связанные со светом: яркость, освещенность, световой поток, световая отдача.

Понятие излучения связано, прежде всего, с переносом в пространстве некоего количества энергии – энергии излучения. Для оценки этой энергии был введен аналог понятия мощности – поток энергии.

Поток энергии – это величина, равная отношению энергии, переносимой излучением, к интервалу времени, за который эта энергия переносится. Если обозначить это время как dt , а энергию, переносимую излучением, как dQ_e , то поток энергии Φ_e можно определить как

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}. \quad (1.1)$$

Свет представляет собой, как правило, сложное излучение, т.е. совокупность (спектр) простых (монохроматических) излучений с определенной длиной волны. Для оценки вклада каждого монохроматического излучения в общий спектр вводят еще одно понятие – *спектральная плотность потока излучения* (спектральная мощность излучения) Φ_λ . Эта величина есть функция длины волны и определяется как отношение потока энергии в бесконечно малом диапазоне около некоторого значения длины волны к этому диапазону.

Известно, что человеческий глаз воспринимает разное излучение по-разному. В зависимости от длины волны излучение одинаковой мощности вызывает различную реакцию. Например, излучение с длиной волны 300 нм мы вообще не увидим, а излучение той же мощности, но с длиной волны 555 нм будет видно лучше, чем любое дру-

гое. Чтобы учесть все эти особенности, Международной комиссией по освещению (МКО) была введена функция $V(\lambda)$ – *относительная спектральная световая эффективность излучения* для стандартного фотометрического наблюдателя МКО (для дневного зрения).

Функция эта не равна нулю во всем диапазоне видимого света, а максимум функции $V(\lambda)$ приходится на длину волны 555 нм, которой соответствует наиболее сильная реакция среднестатистического глаза.

Для вычисления величины светового потока необходимо проинтегрировать в видимом диапазоне частот спектральную плотность потока излучения Φ_λ :

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda, \quad (1.2)$$

где K_m – фотометрический эквивалент излучения ($K_m = 683 \text{ лм/Вт}$).

Для оценки излучения по его действию на глаз человека ввели новую систему – систему световых величин, основной единицей которой стал люмен.

Люмен (лм, lm) – единица измерения *светового потока* в системе СИ. Излучение с длиной волны 555 нм и потоком (мощностью) 1 Вт эквивалентно 683 лм светового потока.

Один люмен равен световому потоку, испускаемому точечным изотропным источником, с силой света равной одной канделе, в телесный угол, величиной в один стерадиан (1 лм = 1 кд·ср). Полный световой поток, создаваемый изотропным источником, с силой света одна кандела, равен 4π люменам.

Важным понятием является *сила света*. Сила света в заданном направлении – это отношение светового потока, распространяющегося равномерно в бесконечно малом телесном углу, к величине этого угла. Другими словами – это пространственная плотность светового потока.

Сила света по различным направлениям – это очень важная характеристика любого светильника и светового прибора: она показывает, каким образом прибор «светит» в пространство вокруг себя. Единица силы света – *кандела* (обозначение: кд, cd). Она является одной из основных единиц системы СИ и численно равна силе света светового потока, испускаемого в заданном направлении источником монохроматического излучения частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц мощностью 1/683 Вт/ср.

Ранее кандела определялась как сила света, излучаемого черным телом перпендикулярно поверхности площадью $1/60 \text{ см}^2$ при температуре плавления платины (2042,5 К). В современном определении коэффициент $1/683$ выбран таким образом, чтобы новое определение соответствовало старому.

Выбранная частота соответствует зеленому цвету. Человеческий глаз обладает наибольшей чувствительностью в этой области спектра. Если излучение имеет другую частоту, то для достижения той же силы света требуется бóльшая энергетическая интенсивность.

Сила света некоторых типичных источников:

- свеча – 1 кд;
- современная лампа накаливания (100 Вт) – 100 кд;
- светодиод – 0,001 кд.

Светимость – плотность светового потока по поверхности излучателя, т.е. отношение потока, излучаемого бесконечно малым участком излучателя, к площади этого участка.

Освещенность – плотность светового потока по освещаемой поверхности. Освещенность измеряется в *люксах* (лк). Один люкс – это освещенность, которую имеет поверхность площадью 1 м^2 с падающим на нее световым потоком в 1 лм.

Освещенность прямо пропорциональна силе света источника света. При удалении его от освещаемой поверхности ее освещенность уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния.

Когда лучи света падают наклонно к освещаемой поверхности, освещенность увеличивается пропорционально косинусу угла падения лучей.

Освещенность E находят по формуле

$$E = \frac{I}{r^2} \cos i, \quad (1.3)$$

где I – сила света, кд;

r – расстояние до источника света;

i – угол падения лучей света.

1.2. Фотоэлектрические явления в твердых телах. Поглощение света

Электрические явления, происходящие в веществах под действием электромагнитного излучения, называются *фотоэлектрическими*. Фотоэлектрические явления возникают, когда энергия поглощенного

фотона затрачивается на 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 фотоэлектрические явления.

Если энергия облучения достаточно велика для ионизации атомов и молекул газа, то происходит *фотоионизация*, когда электрон выходит за пределы атома или молекулы. Если такая энергия поглощается электронами жидкости или твердого тела, возникает фотоэлектронная эмиссия. *Фотоэлектронную эмиссию* часто называют внешним фотоэффектом.

В отличие от внешнего фотоэффекта, все фотоэлектрические явления, обусловленные переходами электронов из связанных состояний в квазисвободные внутри твердого тела, объединяются термином *фотоэффект внутренний*.

Поглощение света. Свет, проникая в полупроводник, вступает с кристаллической решеткой во взаимодействие, связанное с обменом энергией (рис. 1.2).

Обозначим через I_0 (или Φ_0) – световой поток, лм, интенсивность света, т.е. количество световой энергии, проходящей в единицу времени через нормальное к световому потоку единичное сечение полупроводника. Часть светового потока отражается от границы раздела. Доля отраженной энергии характеризуется коэффициентом отражения.

Интенсивность света, проходящего через полупроводник, ослабляется вследствие процесса поглощения:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{\Phi_R}{\Phi_0}. \quad (1.4)$$

Выделим на глубине x от поверхности полупроводника бесконечно тонкий слой dx .

Количество световой энергии dI (или $d\Phi$), поглощенное слоем dx , пропорционально интенсивности света, падающего на этот слой, и толщине слоя (см. рис. 1.2):

$$\begin{aligned} & \text{или} \\ & dI = -\alpha I dx \\ & d\Phi = -\alpha \Phi dx. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Знак минус указывает на убыль энергии; коэффициент α называется *показателем поглощения*, характеризующий относительное изменение интенсивности излучения на единицу длины.

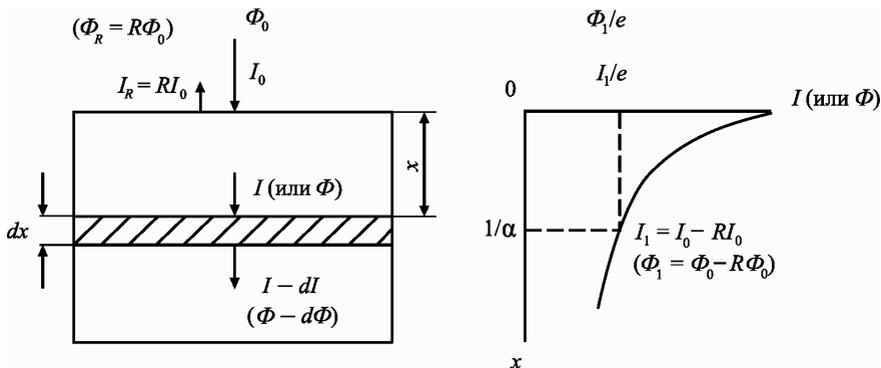


Рис. 1.2. Иллюстрация поглощения света

Интегрируя (1.5), получаем

$$I(x) = I_1 e^{-\alpha x}, \quad (1.6)$$

где $I_1 = I_0(1 - R)$ – интенсивность света, входящего через поверхность образца.

Формула (1.6) известна как закон *Бугера–Ламберта*. Из нее следует, что величина, обратная показателю поглощения ($\alpha^{-1} = 1/\alpha$), численно равна толщине слоя, на который интенсивность проходящего света уменьшается в e раз. Таким образом, показатель поглощения α имеет размерность $\text{м}^{-1} = 1/\text{м}$.

При нормальном падении световых лучей для слабо поглощающих сред (например, для полупроводников) коэффициент отражения может быть рассчитан по формуле

$$R = \frac{(n_{\text{п/пр}} - 1)^2}{(n_{\text{п/пр}} + 1)^2}, \quad (1.7)$$

где $n_{\text{п/пр}}$ – показатель преломления света для полупроводника.

Для большинства полупроводников $n = 3 \dots 4$. Отсюда $R = 25 \dots 36 \%$.

Зависимость поглощения α от длины волны λ , мкм, или энергии фотонов $h\nu = hc/\lambda$, Дж, называют спектром поглощения вещества.

Оптическое излучение характеризуется длинами электромагнитных волн в диапазоне:

$$\lambda = 0,005 \dots 1000 \text{ мкм.}$$