Оглавление

1. Классификация фотоэлектрических эффектов и оптоэлектронных приборов

. Оптические свойства полупроводников

.1 Оптическое поглощение

.2 Фотопроводимость

.3 Фотовольтаические эффекты

.3.1 Эффект Дембера

.3.2 Вентильный фотоэффект

Список литературы

1. Классификация фотоэлектрических эффектов и оптоэлектронных приборов

На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая классификацию фотоэлектрических эффектов.



Фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называют процесс взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества.

Фотоэлектрические эффекты делятся на внешний и внутренний фотоэффекты.

Внешний фотоэффект связан с вырыванием электронов из кристаллов под действием электромагнитного излучения.

При внутреннем фотоэффекте электрон вырывается из атома под действием электромагнитного излучения, но остается внутри кристалла.

Внутренний фотоэффект лежит в основе фотопроводимости и фотовольтаических эффектов. Увеличение электропроводности полупроводника под действием электромагнитного излучения называется фотопроводимостью. Кроме фотопроводимости электромагнитное излучение в полупроводниках вызывает появление фотоЭДС. Эффекты, приводящие к появлению фото-ЭДС в полупроводниках, называются фотовольтаическими. Приборы на основе фотоэлектрических эффектов называются оптоэлектронными. Оптоэлектронные приборы делятся на три группы:

приборы, преобразующие электрическую энергию в оптическое излучение (светодиоды, полупроводниковые лазеры);

приборы, детектирующие оптические сигналы за счет протекающих под действием электромагнитного излучения электронных процессов (фотодетекторы);

приборы, осуществляющие преобразование оптического излучения в электрическую энергию (фотовольтаические приборы, солнечные батареи).

2. Оптические свойства полупроводников

.1 Оптическое поглощение

При действии электромагнитного излучения с полупроводником, происходит взаимодействие квантов энергии в обеими подсистемами - атомной и электронной, составляющими кристалл.

Изменение интенсивности электромагнитного излучения, падающего на полупроводник, можно описать законом Бугера-Ламберта:

,(1)

где J - интенсивность электромагнитного излучения на расстоянии x от поверхности; J0 - интенсивность падающего на полупроводник излучения; α - коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения показывает вероятность поглощения кванта энергии на расстоянии в единицу длины [α] = [м-1].

Под действием электромагнитного излучения в полупроводниках образуются неравновесные носители заряда вследствие электронно-дырочных переходов, приведенных на рисунке 2. Переход типа 1 соответствует собственному поглощению вещества, в результате которого образуется пара свободных носителей заряда, а именно, электрон и дырка. Такое возбуждение называется биполярным. Электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне, возбужденные электромагнитным излучением, переходят на уровни с более высокими энергиями (2, 2а рисунок 2). Данное поглощение называется поглощением на свободных носителях заряда. В результате поглощения фотонов примесными атомами и несовершенствами кристаллической решетки, которые образуют энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника, происходят переходы типа 3 и 4. Переходы электронов с примесного уровня в зону проводимости (3) или из валентной зоны на примесный уровень (3а) представляют собой примесное поглощение. Переходам 5, 5а на рисунке 2 соответствует поглощению на экситонах.

Возбужденные светом избыточные электроны и дырки участвуют в процессе электропроводности полупроводника до тех пор, пока не рекомбинируют или не будут захвачены на локальный энергетический уровень.

Спектр оптического поглощения полупроводника зависит от многих факторов, таких как длина волны, частота излучения, концентрация центров поглощения.



Под центрами поглощения понимают свободные и связанные носители заряда, дефекты кристаллической решетки, примесные и собственные атомы.

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость коэффициента поглощения полупроводника от длины волны излучения.Собственное поглощение. Собственное поглощение соответствует переходу электрона из валентной зоны в зону проводимости область 1. Для реализации такого перехода необходимо, чтобы энергия поглощенных квантов была бы равна или больше ширины запрещенной зоны полупроводника . На энергетической зонной диаграмме полупроводника, рисунок 4, показана реализация этого процесса.



Область собственного поглощения полупроводников находится либо в видимой области, либо в инфракрасной области спектра поглощения. Граничная длина волны, соответствующая собственному поглощению, определяется по формуле:

,(2)

где h - постоянная Планка; с - скорость света в вакууме;  в эВ.

Следовательно, граничная частота, соответствующая собственному поглощению, определяется шириной запрещенной зоны полупроводника. Коэффициент поглощения αна прямых переходах примерно равен 108 м-1.

При собственном поглощении различают прямые и непрямые переходы электронов, показанные на рисунке 5.

Прямые переходы электронов называются вертикальными переходами. Для таких переходов необходимы энергии квантов большая или равная ширине запрещенной зоны.



Непрямые переходы осуществляются между максимумом валентной зоны и минимумом зоны проводимости, область 2 на рисунке 5. Для реализации таких переходов необходимы дополнительные затраты энергии, которые черпаются из энергии кристаллической решетки - фононов. Таким образом, для осуществления поглощение на непрямых переходах электронов необходимо совместное участие квантов тепловой и световой энергий, поэтому поглощение на непрямых переходах смещается в коротковолновую область спектра по отношению к поглощению на прямых переходах. Вероятность непрямых переходов мала, так как для их реализации необходимо, чтобы фонон и электрон оказались бы в одной точке пространства, поэтому коэффициент поглощения α на непрямых переходах невелик и составляет 105 м-1.Поглощение на примесях. Данному поглощению соответствует область 3 на рисунке 3. Оно реализуется за счет перехода электронов с донорных уровней в зону проводимости или из валентной зоны на акцепторные уровни. Граничная длина волны поглощения соответствует энергии примесного уровня (αгр~Eпр). Учитывая, что энергия примесного уровня много меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, то область примесного поглощения смещается в инфракрасную область спектра. При этом плотность состояний на примесных уровне много меньше эффективной плотности состояний в зоне проводимости (в валентной зоне) по абсолютной величине, поэтому коэффициент поглощения на примесях на несколько порядков меньше собственного. В спектре поглощения могут присутствовать отдельные полосы, связанные с возбуждением примесных атомов (область 4 на рисунке 3).II Поглощение на экситонах. Возбужденное состояние основного атома также реализуется, когда электрон не отрывается от него, а лишь переходит на один из незаполненных уровней. Такое состояние получило название экситонного (от английского слова exitation - возбуждение). Отличие экситонного состояния от возбужденного состояния примесного атома заключается в том, что энергия кристалла не зависит (в силу трансляционной симметрии, т.е. эквивалентности одинаковых точек разных ячеек) от того, какой из атомов возбужден, поэтому возбужденное состояние может перемещаться по всему кристаллу. В результате этого образуются зоны экситонных состояний. Движение экситонов не создает электрического тока, так как перемещается не электрон, а лишь возбужденное состояние атома. Экситон можно представить как совместное движение электрона и дырки, связанных кулоновскими силами и вращающихся вокруг общего центра тяжести; кроме этого, такая пара может поступательно перемещаться по всему кристаллу.

На образование экситона - возбуждение атома требуется меньшая энергия, чем на его ионизацию, поэтому экситонные линии лежат в спектре поглощения справа от основной полосы, т. е. в области меньших частот и энергий. Экситонновому поглощению соответствует область 2 на рисунке 3.Поглощение кристаллической решеткой, область 5 на рисунке 3. Часть поглощенной энергии может тратиться на увеличение колебательной энергии кристаллической решетки. В результате появляются узкие полосы в инфракрасной области спектра. Для ионных кристаллов наблюдается сильное поглощение в далекой инфракрасной области.Поглощение на носителях заряда. Данному виду поглощения соответствует область 6 на рисунке 3. Он реализуется при переходе электронов с одних энергетических уровней на другие в пределах энергетической зоны. Спектр поглощения свободными носителями заряда сплошной и находится в длинноволновой инфракрасной области спектра.

.2 Фотопроводимость

Явление фотопроводимости заключается в увеличении электропроводности полупроводников под действием электромагнитного излучения.

В основе фотопроводимости лежит внутренний фотоэффект: увеличение концентрации свободных носителей заряда за счет их оптического возбуждения.

Следует отметить, что увеличение электропроводности при действии электромагнитного излучения может быть связано с изменение подвижности носителей заряда вследствие их перераспределения на более высокие энергетические уровни, что приводит к изменению эффективной массы носителей заряда. Однако изменение подвижности носителей заряда вносит существенный вклад в фотопроводимость только в слабо легированных полупроводниках с малой эффективной массой носителей заряда при низких температурах и малых энергиях квантов электромагнитного излучения.

Увеличение концентрации носителей заряда в полупроводниках под действием электромагнитного излучения реализуется следующим образом:

) электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости, при этом образуются как дырки, так и электроны (переход 1, рисунок 2);

) электроны из валентной зоны переходят на свободные акцепторные уровни; при этом возрастает дырочная проводимость (переход 3а, рисунок 2);

) электроны переходят с донорных уровней в зону проводимости полупроводника, что приводит к увеличению электронная проводимость (переход 3, рисунок 2).

При поглощении фотона электронно-дырочная пара получает избыточную энергию и квазиимпульс. Равновесное распределение фотоносителей по энергиям и квазиимпульсам устанавливается за время, меньшее времени нахождения в соответствующих зонах. Поэтому они успевают "термализоваться", т.е. распределение их по энергиям и квазиимпульсам становится таким же, как для равновесных электронов и дырок.

Полная электропроводность полупроводника определяется:

,(3)

где ,  - равновесные концентрации электронов и дырок; ,  - неравновесные концентрации электронов и дырок (информация об электропроводности полупроводников приведена в приложении).

Она складывается из темновой электропроводности , определяемой равновесными носителями заряда, и электропроводности при действии электромагнитного излучения

.(4)

Пусть под действием электромагнитного излучения в полупроводнике образуются носители заряда, определяемые скоростью генерации носителей заряда .Тогда с момента начала действия электромагнитного излучения концентрация носителей заряда в полупроводнике начнет расти по закону:

.(5)

Процесс роста концентрации носителей заряда не может продолжаться бесконечно из-за конкурирующего процесса - рекомбинации носителей заряда. Через некоторое время скорости генерации и рекомбинации окажутся равными, и концентрация носителей заряда будет стационарной . Обозначим время жизни фотоносителя, т.е. время, которое в среднем проводит носитель, созданный светом, в зоне проводимости или в валентной зоне, . Тогда число фотоэлектронов, рекомбинирующих в 1 сек, будет равно . В результате уравнение (5) с учетом рекомбинации преобразуется к виду:

;(6)

решением этого уравнения является:

,(7)

где .

Из уравнения (7) следует, что с течением времени неравновесная концентрация носителей заряда стремится к своему стационарному значению . Поэтому величину  в этом случае называют временем релаксации фотопроводимости. Общая концентрация электронов, включающая равновесные и неравновесные носители заряда равна:

.(8)

Для стационарной фотопроводимости, когда , в собственном полупроводнике, где концентрации неравновесных электронов и дырок равны, получаем:

.(9)

Таким образом, стационарная фотопроводимость определяется скоростью генерации, временем жизни неравновесных носителей заряда, их подвижностью. Время жизни зависит от структуры полупроводника, степени его чистоты и температуры. Оно изменяется в пределах от 10-1 до 10-3с.

Скорость генерации носителей заряда зависит от расстояния , измеряемого от поверхности полупроводника, так как плотностью потока фотонов , (с-1Чм-2), падающих на поверхность образца, согласно закону Бугера-Ламберта экспоненциально убывает. Для полупроводника толщиной плотность потока фотонов, поглотившихся в полупроводнике:

.(10)

В случае тонкого полупроводника или малого коэффициента поглощения, , получаем:

.(11)

Число электронно-дырочных пар , образуемых поглощенными фотонами:

.(12)

Коэффициент пропорциональности  называется квантовым выходом внутреннего фотоэффекта. Он равен числу носителей (пар носителей), рождаемых в среднем каждым поглощенным фотоном. Он может быть больше единицы, если при поглощении одного фотона высокой энергии рождается две и более электронно-дырочных пары, и меньше единицы, если часть фотонов поглощается свободными носителями заряда. Разделив  на толщину пластины, получим скорость генерации электронно-дырочных пар в единичном объеме:

.(13)

Подставляя (13) в (9), получим:

.(14)

Выразим плотность потока фотонов  через освещенность , :

,(15)

где  - частота электромагнитного излучения.

Преобразуем уравнение (14) с учетом (15):

.(16)

Плотность фототока , протекающего через полупроводник длиной , под действием напряжения согласно закону Ома определяется:

,

где  - напряженность электрического поля. Следует отметить, что на практике зависимость  носит более сложный характер, так как при выводе уравнения (17) рассматривалась упрощенная картина процессов в полупроводниках. После прекращения действия электромагнитного излучения процесс генерация носителей заряда прекращается и уравнение (6) преобразуется к виду:

.(18)

Решение данного уравнения с начальным условием при  и  имеет вид:

(19)

или для общей концентрации носителей заряда:

.(20)

Следовательно, прекращение действия электромагнитного излучения приводит к уменьшению концентрации носителей заряда, которая стремится к своему исходному значению. По закону аналогичному уравнению (19) будет происходить спад фототока полупроводника (рисунок 6):

,(21)

где  - стационарное значение фототока. Из уравнения (21) видно, что чем больше время жизни неравновесных носителей заряда, тем медленнее происходит спад фототока.



На рисунке 6 представлена кривая релаксации фототока полупроводника и основные ее характеристики. Данную зависимость используют для экспериментального определения среднего времени жизни неравновесных носителей заряда.

фотоэлектрический оптический вентильный полупроводник

2.3 Фотовольтаические эффекты

Под фотовольтаическими (фотогальваническими) эффектами понимают возникновение электродвижущей силы (фотоЭДС) в полупроводнике в результате пространственного разделения оптически возбужденных носителей заряда противоположного знака. Для возникновения фотоЭДС необходимо выполнение следующих условий:

а) электромагнитное излучение должно быть неоднородным, т.е. в различных элементах объема полупроводника должно поглощаться различное количество фотонов и соответственно появляется различное количество фотоносителей. Наличие градиента концентрации фотоносителей вызывает диффузию и возникновение фотоЭДС при условии, что коэффициенты диффузия дырок и электронов отличаются друг от друга;

б) освещаемый полупроводник должен быть неоднородным, в этом случае распределение концентрации фотоносителей по объему полупроводника будет неравномерным и вследствие этого возникает фотоЭДС.

2.3.1 Эффект Дембера

Если на поверхности полупроводника падает электромагнитное излучение (свет), энергия квантов которого достаточна для генерации фотоносителей, при этом коэффициент поглощения достаточно велик, то электромагнитное излучение будет поглощаться в основном в приповерхностном слое полупроводника, где и будут создаваться фотоносители. Данное явление относится к случаю неоднородного освещения полупроводника. Электроны и дырки будут диффундировать в область с меньшей концентрацией носителей заряда, которая характеризуется минимальной освещенностью. В результате возникает фотоЭДС, пропорциональная разности коэффициентов диффузии носителей заряда противоположного знака. В состоянии термодинамического равновесия фотоЭДС компенсирует разность коэффициентов диффузии электронов и дырок.

Выражение для фотоЭДС Дембера имеет вид:

,(22)

где  - удельная электропроводность полупроводника в непосредственной близости от поверхности, т.е. сумма темновой электропроводности и фотопроводимости:

. (23)

Следует, что фотоЭДС Дембера тем больше, чем больше разность подвижностей электронов и дырок. Данное уравнение может быть применимо к примесной фотопроводимости. Эффект Дембера в определенной степени аналогичен явлению термоЭДС.

2.3.2 Вентильный фотоэффект

Вентильным фотоэффектом называют фотоЭДС, возникающую при освещении вентильного, т.е. выпрямляющего контакта. Выпрямляющими свойствами обладают контакты полупроводников различного типа электропроводности, металла с полупроводником. Полупроводниковые приборы, основанные на вентильном фотоэффекте и предназначенные для превращения световой энергии в электрическую или световых сигналов в электрические, называют фотоэлементами. Рассмотрим образование вентильной фотоЭДС при освещении с p-n-перехода.

Пусть n-p-переход освещается светом со стороны полупроводника р-типа электропроводности с энергией квантов больше энергии запрещенной зоны, что соответствует образованию электронно-дырочных пар. На рисунке 7 показан процесс генерации под действием квантов света носителей заряда в р-области р-п-перехода с последующей их диффузией.



Генерируемые носители заряда будут диффундировать к р-п-переходу. Электроны зоны проводимости полупроводника р-типа электропроводности под действием контактного поля переходят в зону проводимости полупроводника n-типа, при этом дырки задерживаются контактным полем и остаются в p-области. В результате происходит пространственное разделение оптически генерированных электронов и дырок, при этом акцепторный полупроводник приобретает положительный, а донорный - отрицательный заряд, что эквивалентно возникновению фотоЭДС . Последняя называется напряжением холостого хода при разомкнутой внешней цепи.

Таким образом, под действием квантов света через p-n-переход протекает  фототок, который создает на n-p-переходе разность потенциалов в пропускном направлении, уменьшающую на свою величину контактную разность потенциалов, и как вследствие этого через р-п-переход потечет ток , называемый током утечки, в обратном направлении:

,(24)

где  - ток насыщения, обусловленный тепловой генерацией носителей заряда. Состояние термодинамического равновесия устанавливается при равенстве тока утечки и фототока, протекающих через р-п-переход

.(25)

Выразим из этого уравнения напряжение холостого хода:

.(26)

При подключении к фотоэлементу на основе р-п-перехода внешней нагрузки , рисунок 8, фотоЭДС в р-п-переходе создается только частью носителей заряда, а другая часть носителей заряда обеспечивает ток через нагрузку.



Напряжение на нагрузке равно:

.(27)

Вольт-амперная характеристика вентильного фотоэлемента описывается уравнением вида:

.(28)

На рисунке 9 представлено семейство вольт-амперных характеристик р-п-перехода для различных значений светового потока.

Видно, что увеличение светового потока приводит к росту фототока.

Р-п-переход, смещенный в обратном направлении посредством внешнего источника питания, также может работать в фотодиодном режиме. При поглощении квантов света в р-п-переходе или в прилегающих к нему областях полупроводников образуются неравновесные электронно-дырочные пары. Неосновные носители заряда, образующиеся в р-п-переходе или прилегающих к нему областям, находящихся на расстоянии не превышающим диффузионной длины, диффундируют к р-п-переходу и проходят через него под действием электрического поля, рисунок 10. В результате под действием электромагнитного излучения обратный ток через р-п-переход возрастает на величину фототока.

Преимуществами фотодиодного режима являются высокая чувствительность и малая инерционность порядка 10-9 с, при этом вентильный режим характеризуется низким уровнем шумов и отсутствием источника питания.





На рисунке 11 приведена электрическая схема для исследования фото-ЭДС р-п-перехода, работающего в фотодиодном режиме. Напряжение источника питания приложено в обратном направлении к р-п-переходу.

В фотодиодном режиме уравнение вольт-амперной характеристики р-п-перехода имеет вид:

.(31)



Задавая напряжение источника питания достаточно большим, можно сделать темновой ток фотодиода равным току насыщения. На фототок величина  почти не влияет и даже несколько его увеличивает, т.к. увеличивается тянущее поле и уменьшается, таким образом, потери на рекомбинацию. В этом и состоит большое преимущество фотодиодов перед фоторезисторами.

Список литературы

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 392 с.

. Павлов П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. - М.: Высш. шк., 1985. - 370 с.

. Епифанов Г.И. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА / Г.И. Епифанов, Ю.А. Мома. - М.: Сов. радио, 1979. - 352 с.

. Бонч-Бруевич Л.В. - Физика полупроводников / Л.В. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. - М.: Наука, 1972. - 670 с.

. Пасынков В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. - М.: Высш. шк., 2003. - 368 с.

. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. - М.: Мир, 1984. - Т. 2. - 455 с.

. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел / Р. Бьюб. - М.: Иностранная литература, 1962. - 558 с.

. Верещагин И.К. Введение в оптоэлектронику / И.К. Верещагин, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин. - М.: Высш. шк., 1991. - 191 с.