Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках

В современной электронной технике широко используются полупроводниковые приборы, основанные на принципах фотоэлектрического и электрооптического преобразования сигналов. Первый из этих принципов обусловлен изменением электрофизических свойств вещества в результате поглощения в нем световой энергии (квантов света). При этом изменяется проводимость вещества или возникает э. д. с., что приводит к изменениям тока в цепи, в которую включен фоточувствительный элемент. Второй принцип связан с генерацией излучения в веществе, обусловленной приложенным к нему напряжением и протекающим через светоизлучающий элемент током. Указанные принципы составляют научную основу *оптоэлектроники* – нового научно-технического направления, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются как электрические, так и оптические средства и методы.

Все многообразие оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках можно свести к следующим основным:

– поглощение света и фотопроводимость;

– фотоэффект в *p-n* переходе;

– электролюминесценция;

– стимулированное когерентное излучение.

Фотопроводимость. Фоторезистивный эффект

Явлением *фотопроводимости* называется увеличение электропроводности полупроводника под воздействием электромагнитного излучения.

При освещении полупроводника в нем происходит генерация электронно-дырочных пар за счет переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости. Вследствие этого проводимость полупроводника возрастает на величину

Δσ = *e* (μn Δni + μp Δpi), (1)

где e – заряд электрона; μn – подвижность электронов; μp – подвижность дырок; Δni – концентрация генерируемых электронов; Δpi – концентрация генерируемых дырок.

Поскольку основным следствием поглощения энергии света в полупроводнике является перевод электронов из валентной зоны в зону проводимости, т.е. междузонный переход, то энергия кванта света фотона должна удовлетворять условию

hνкр ≥ ΔW, (2)

где h – постоянная Планка; ΔW – ширина запрещенной зоны полупроводника; νкр – критическая частота электромагнитного излучения (красная граница фотопроводимости).

Излучение с частотой ν < νкр не может вызвать фотопроводимость, так как энергия кванта такого излучения hν < ΔW недостаточна для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Если же hν > ΔW, то избыточная относительно ширины запрещенной зоны часть энергии квантов передается электронам в виде кинетической энергии.

Критической частоте νкр соответствует граничная длина волны

λгр = с / νкр, (3)

где с - скорость света (3108 м/с). При длинах волн, больших граничной, фотопроводимость резко падает. Так, для германия граничная длина волны составляет примерно 1.8 мкм. Однако спад фотопроводимости наблюдается и в области малых длин волн. Это объясняется быстрым увеличением поглощения энергии с частотой и уменьшением глубины проникновения падющей на полупроводник электромагнитной энергии. Поглощение происходит в тонком поверхностном слое, где и образуется основное количество носителей заряда. Появление большого количества избыточных носителей только у поверхности слабо отражается на проводимости всего объема полупроводника, так как скорость поверхностной рекомбинации больше объемной и проникающие вглубь неосновные носители заряда увеличивают скорость рекомбинации в объеме полупроводника.

Фотопроводимость полупроводников может обнаруживаться в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой частях электромагнитного спектра в зависимости от ширины запрещенной зоны, которая, в свою очередь, зависит от типа полупроводника, температуры, концентрации примесей и напряженности электрического поля.

Рассмотренный механизм поглощения света, приводящий к появлению свободных носителей заряда в полупроводнике, называют фотоактивным. Поскольку при этом изменяется проводимость, а следовательно, внутреннее сопротивление полупроводника, указанное явление было названо *фоторезистивным эффектом*. Основное применение фоторезистивный эффект находит в светочувствительных полупроводниковых приборах – *фоторезисторах,* которые широко используются в современной оптоэлектронике и фотоэлектронной автоматике.

Фоторезисторы

Конструкция и схема включения фоторезистора. Темновой и световой ток

*Фоторезисторами* называют полупроводниковые приборы, проводимость которых меняется под действием света.

Конструкция монокристаллического и пленочного фоторезисторов показана на рис. 1, 2 приложения. Основным элементом фоторезистора является в первом случае монокристалл, а во втором – тонкая пленка полупроводникового материала.

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (рис. 3 приложения) и не освещен, то в его цепи будет протекать *темновой ток*

Iт = E / (Rт + Rн), (4)

где Е – э. д. с. источника питания; Rт – величина электрического сопротивления фоторезистора в темноте, называемая *темновым сопротивлением*; Rн – сопротивление нагрузки.

При освещении фоторезистора энергия фотонов расходуется на перевод электронов в зону проводимости. Количество свободных электронно-дырочных пар возрастает, сопротивление фоторезистора падает и через него течет *световой ток*

Iс = E / (Rс + Rн). (5)

Разность между световым и темновым током дает значение тока Iф, получившего название *первичного фототока проводимости*

Iф = Iс – Iт. (6)

Когда лучистый поток мал, первичный фототок проводимости практически безынерционен и изменяется прямо пропорционально величине лучистого потока, падающего на фоторезистор. По мере возрастания величины лучистого потока увеличивается число электронов проводимости. Двигаясь внутри вещества, электроны сталкиваются с атомами, ионизируют их и создают дополнительный поток электрических зарядов, получивший название *вторичного фототока проводимости*. Увеличение числа ионизированных атомов тормозит движение электронов проводимости. В результате этого изменения фототока запаздывают во времени относительно изменений светового потока, что определяет некоторую инерционность фоторезистора.

Характеристики фоторезисторов

Основными характеристиками фоторезисторов являются:

*Вольтамперная,* характеризующая зависимость фототока (при постоянном световом потоке Ф) или темнового тока от приложенного напряжения. Для фоторезисторов эта зависимость практически линейна (рис. 4 приложения). Закон Ома нарушается в большинстве случаев только при высоких напряжениях на фоторезисторе.

*Световая (люксамперная),* характеризующая зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава. Полупроводниковые фотрезисторы имеют нелинейную люксамперную характеристику (рис. 5 приложения). Наибольшая чувствительность получается при малых освещенностях. Это позволяет использовать фоторезисторы для измерения очень малых интенсивностей излучения. При увеличении освещенности световой ток растет примерно пропорционально корню квадратному из освещенности. Наклон люксамперной характеристики зависит от приложенного к фоторезистору напряжения.

*Спектральная,* характеризующая чувствительность фоторезистора при действии на него потока излучения постоянной мощности определенной длины волны. Спектральная характеристика определяется материалом, используемым для изготовления светочувствительного элемента. Сернисто-кадмиевые фоторезисторы имеют высокую чувствительность в видимой области спектра, селенисто-кадмиевые – в красной, а сернисто-свинцовые – в инфракрасной (рис. 6 приложения).

*Частотная*, характеризующая чувствительность фоторезистора при действии на него светового потока, изменяющегося с определенной частотой. Наличие инерционности у фоторезисторов приводит к тому, что величина их фототока зависит от частоты модуляции падающего на них светового потока – с увеличением частоты светового потока фототок уменьшается (рис. 7 приложения). Инерционность оганичивает возможности применения фоторезисторов при работе с переменными световыми потоками высокой частоты.

Параметры фоторезисторов

Основные параметры фоторезисторов:

*Рабочее напряжение* Uр – постоянное напряжение, приложенное к фоторезистору, при котором обеспечиваются номинальные параметры при длительной его работе в заданных эксплуатационных условиях.

*Максимально допустимое напряжение фоторезистора* Umax – максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к фоторезистору, при котором отклонение его параметров от номинальных значений не превышает указанных пределов при длительной работе в заданных эксплуатационных условиях.

*Темновое сопротивление* Rт – сопротивление фоторезистора в отсутствие падающего на него излучения в диапазоне его спектральной чувствительности.

*Световое сопротивление* Rс – сопротивление фоторезистора, измеренное через определенный интервал времени после начала воздействия излучения, создающего на нем освещенность заданного значения.

*Кратность изменения сопротивления* KR – отношение темнового сопротивления фоторезистора к сопротивлению при определенном уровне освещенности (световому сопротивлению).

*Допустимая мощность рассеяния* – мощность, при которой не наступает необратимых изменений параметров фоторезистора в процессе его эксплуатации.

*Общий ток фоторезистора* – ток, состоящий из темнового тока и фототока.

*Фототок* – ток, протекающий через фоторезистор при указанном напряжении на нем, обусловленный только воздействием потока излучения с заданным спектральным распределением.

*Удельная чувствительность* – отношение фототока к произведению величины падающего на фоторезистор светового потока на приложенное к нему напряжение, мкА / (лм В)

К0 = Iф / (ФU), (7)

где Iф – фототок, равный разности токов, протекающих по фоторезистору в темноте и при определенной (200 лк) освещенности, мкА; Ф – падающий световой поток, лм; U – напряжение, приложенное к фоторезистору, В.

*Интегральная чувствительность –* произведение удельной чувствительности на предельное рабочее напряжение Sинт = К0Umax.

*Постоянная времени* τф – время, в течение которого фототок изменяется на 63%, т. е. в *e*  раз. Постоянная времени характеризует инерционность прибора и влияет на вид его частотной характеристики.

При включении и выключении света фототок возрастает до максимума (рис. 8 приложения) и спадает до минимума не мгновенно. Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света. При малом уровне инжекции нарастание и спад фототока во времени можно представить экспонентами с постоянной времени τ, равной времени жизни носителей в полупроводнике. В этом случае при включении света фототок iф  будет нарастать и спадать во времени по закону

iф = Iф (1 – *e*– t / τ); iф = Iф *e*– t / τ, (8)

где Iф – стационарное значение фототока при освещении.

По кривым спада фототока во времени можно определить время жизни τ неравновесных носителей.

Изготовление фоторезисторов

В качестве материалов для фоторезисторов широко используются сульфиды, селениды и теллуриды различных элементов, а также соединения типа AIIIBV. В инфракрасной области могут быть использованы фоторезисторы на основе PbS, PbSe, PbTe, InSb, в области видимого света и ближнего ультрафиолета – CdS.

Применение фоторезисторов

В последние годы фоторезисторы широко применяются во многих отраслях науки и техники. Это объясняется их высокой чувствительностью, простотой конструкции, малыми габаритами и значительной допустимой мощностью рассеяния. Значительный интерес представляет использование фоторезисторов в оптоэлектронике.

Регистрация оптического излучения

Для регистрации оптического излучения его световую энергию обычно преобразуют в электрический сигнал, который затем измеряют обычным способом. При этом преобразовании обычно используют следующие физические явления:

– генерацию подвижных носителей в твердотельных фотопроводящих детекторах;

– изменение температуры термопар при поглощении излучения, приводящее к изменению термо-э. д. с.;

– эмиссию свободных электронов в результате фотоэлектрического эффекта с фоточувствительных пленок.

Наиболее важными типами оптических детекторов являются следующие устройства:

– фотоумножитель;

– полупроводниковый фоторезистор;

– фотодиод;

– лавинный фотодиод.

Полупроводниковый фотодетектор

Схема полупроводникового фотодетектора приведена на рис. 9 приложения. Полупроводниковый кристалл последовательно соединен с резистором R и источником постоянного напряжения V. Оптическая волна, которую нужно зарегистрировать, падает на кристалл и поглощается им, возбуждая при этом электроны в зону проводимости (или в полупроводниках *p-*типа – дырки в валентную зону). Такое возбуждение приводит к уменьшению сопротивления Rd полупроводникового кристалла и, следовательно, к увеличению падения напряжения на сопротивлении R, которое при ΔRd / Rd << 1 пропорционально плотности падающего потока. В качестве примера рассмотрим энергетические уровни одного из наиболее распространенных полупроводников – германия, легированного атомами ртути. Атомы Hg в германии являются акцепторами с энергией ионизации 0.09 эВ. Следовательно, для того, чтобы поднять электрон с верхнего уровня валентной зоны и чтобы атом Hg (акцептор) сумел захватить его, необходим фотон с энергией по крайней мере 0.09 эВ (т. е. фотон с длиной волны короче 14 мкм). Обычно кристалл германия содержит небольшое количество ND донорных атомов, которым при низких температурах энергетически выгодно отдавать свои валентные электроны большому количеству NA акцепторных атомов. При этом возникает равное количество положительно ионизированных донорных и отрицательно ионизированных акцепторных атомов. Так как концентрация акцепторов NA >> ND, большинство атомов-акцепторов остается незаряженным.

Падающий фотон поглощается и переводит электрон из валентной зоны на уровень атома-акцептора, как это показано на рис. 10 приложения (процесс А). Возникающая при этом дырка движется под действием электрического поля, что приводит к появлению электрического тока. Как только электрон с акцепторного уровня возвращается обратно в валентную зону, уничтожая тем самым дырку (процесс B), ток исчезает. Этот процесс называется *электронно-дырочной рекомбинацией* или захватом дырки атомом акцептора.

Выбирая примеси с меньшей энергией ионизации, можно обнаружить фотоны с более низкой энергией. Существующие полупроводниковые фотодетекторы обычно работают на длинах волн вплоть до λ ­­≈ 32 мкм.

Из сказанного следует, что главным преимуществом полупроводниковых фотодетекторов по сравнению с фотоумножителями является их способность регистрировать длинноволновое излучение, поскольку создание подвижных носителей в них не связано с преодолением значительного поверхностного потенциального барьера. Недостатком же их является небольшое усиление по току. Кроме того, для того чтобы фотовозбуждение носителей не маскировалось тепловым возбуждением, полупроводниковые фотодетекторы приходится охлаждать.

Список литературы

1 Гершунский Б. С. Основы электроники и микроэлектроники. – К.: Вища школа. 1989. – 423 с.

2 Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам; под ред. К. В. Шалимовой. – М.: Высшая школа. 1968. – 464 с.

3 Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио. 1970. – 591 с.

4 Yariv A. Introduction To Optical Electronics. – М.: Высшая школа. 1983. – 400 с.

5 Kittel C. Introduction To Solid State Physics, 3d Ed. – New York: Wiley, 1967. – p. 38.

6 Kittel C. Elementary Solid State Physics. – New York – London: Wiley, 1962.

Приложение

