

Цель работы: изучить спектральную зависимость стационарной фотопроводимости полупроводникового фоторезистора.

Приборы и принадлежности: лампа накаливания (источник света), монохроматор УМ-2, фоторезистор, источник постоянного напряжения, микроамперметр.

Элементы теории и метод эксперимента

Электропроводимость полупроводников определяется концентрацией свободных носителей заряда (электронов n и дырок p), а также их подвижностью (μ_n и μ_p):

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (1)$$

Рис.1. Электронные переходы в полупроводниках: а – собственная проводимость; б, в – примесная

В полупроводниках энергетический спектр разрешенных состояний, находящихся в валентной зоне (E_v) и зоне проводимости (E_c) разделен так называемой запрещенной зоной, ширина которой равна E_g (рис. 1,а). Приложение электрического поля не вызывает появления тока, несмотря на то, что концентрация электронов в валентной зоне может

быть достаточно большой. Это объясняется тем, что все энергетические состояния валентной зоны уже заняты, поэтому находящийся в электрическом поле электрон не может покинуть свое энергетическое состояние и перейти на более высокий уровень. Для появления электропроводности необходимо, чтобы часть электронов каким-то образом повысила свою энергию на величину, равную или более ширины запрещенной зоны, и попала в зону проводимости, где они могут свободно перемещаться в электрическом поле. Эту энергию можно сообщить носителям, нагревая полупроводник. При этом свободные носители заряда будут находиться в тепловом равновесии с кристаллической решеткой. Такие носители называются равновесными. Энергию, необходимую носителям заряда для преодоления запрещенной зоны, можно также сообщить с помощью квантов света. Энергия квантов должна быть больше ширины запрещенной зоны.

Изменение электропроводности полупроводника при воздействии на него света называется фотопроводимостью. Это явление выражается в уменьшении электрического сопротивления полупроводника при его освещении.

Рассмотрим механизм собственной фотопроводимости. При воздействии на полупроводник квантов света с энергией $h\nu$ в нем возникают избыточные пары носителей (электронов и дырок) за счет их переходов из валентной зоны в зону проводимости. При этом энергия квантов в основном затрачивается на создание избыточных носителей, в то время как средняя тепловая энергия решетки практически не изменяется. Следовательно, нарушается тепловое равновесие между кристаллической решеткой и носителями заряда, поэтому такие избыточные носители называются неравновесными. При этом общая концентрация носителей будет равна сумме концентраций равновесных (n_0 и p_0) и неравновесных (n и p) носителей:

$$n = n_0 + n \quad (2)$$

$$p = p_0 + p \quad (3)$$

Таким образом, учитывая (1) – (3), для полной проводимости полупроводника имеем:

$$\sigma = e(n_0 + n)\mu_n + e(p_0 + p)\mu_p \quad (4)$$

Фотопроводимость определяют как разность между значениями удельной проводимости при освещении и в темноте:

(5)

Формулу для стационарной фотопроводимости можно записать в следующем виде:

(6)

где α – коэффициент поглощения, η – квантовая эффективность (число электронно-дырочных пар, образуемых одним квантом света), Φ_0 – поток фотонов, падающих на поверхность полупроводника (см

-2

\times с

-1

), и τ_n – средние времена жизни неравновесных электронов и дырок. Под временем жизни понимают промежуток времени, который каждый неравновесный носитель заряда проводит в свободном состоянии с момента генерации и до рекомбинации. Если одно из слагаемых в скобках выражения (6) больше другого (за счет большой разницы τ_n и τ_p и или τ_n и τ_p), то реализуется монополярная фотопроводимость.

Временное изменение концентрации неравновесных носителей заряда можно представить следующим образом:

(7)

поэтому для τ_n применяют также и другое определение: временем жизни неравновесных носителей заряда называется время, в течение которого их концентрация уменьшается в e раз.

Спектральная зависимость фотопроводимости определяется зависимостью от длины волны облучающего света коэффициента поглощения и квантовой эффективности. Как уже упоминалось ранее, собственная фотопроводимость возникает только тогда, когда энергия кванта будет равна или больше ширины запрещенной зоны полупроводника:

$$(8)$$

Отсюда можно определить граничное условие возникновения фотопроводимости:

$$(9)$$

учитывая, что c – скорость света, а λ – длина волны. Тогда граничная длина волны фотопроводимости

$$(10)$$

Если λ выражать в мкм, а E_g в эВ, то (10) запишется следующим образом:

$$(11)$$

Величина λ_{gr} из (11) определяет так называемую красную границу собственной фотопроводимости полупроводников, в литературе ее также называют длинноволновой границей фотопроводимости. Значение λ_{gr} для собственной фотопроводимости определяется шириной запрещенной зоны полупроводника. Значения λ_{gr} для некоторых полупроводников приведены в таблице.

Ширина запрещенной зоны некоторых полупроводниковых

материалов при комнатной температуре

Материал

CdS

CdSe

Si

Ge

PbS

InAs

PbTe

PbSe

InSb

, эВ

2.4

1.8

1.1

0.7

0.37

0.35

0.27

0.22

0.18

График спектральной зависимости собственной фотопроводимости приведен на рис. 2 (кривая 1). Если полупроводник содержит примеси, то они значительно изменяют как величину, так и характер проводимости. Энергетические уровни валентных электронов примеси могут располагаться вблизи зоны проводимости (рис. 1,б) либо вблизи валентной зоны (рис. 1,в).

Рис.2. Спектральная зависимость фотопроводимости: 1 – собственная; 2 – примесная

Рис.3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения

В первом случае проводимость возникает за счет перехода электронов с энергетического уровня примеси (донорный уровень) в зону проводимости полупроводника при преодолении энергетического барьера. Во втором случае – в результате образования свободных дырок в валентной зоне за счет ухода электронов из валентной зоны на энергетический уровень примеси (акцепторный уровень), преодолевая при этом энергетический барьер. Полупроводники с донорной примесью называют электронными или полупроводниками *n*-типа, а с акцепторной примесью — дырочными или *p*-типа.

Фотопроводимость, возникающая в таких полупроводниках, называется примесной. В первом случае основными носителями заряда являются электроны, во втором – дырки, концентрация основных носителей заряда много больше концентрации неосновных носителей.

Поскольку для примесных полупроводников и (рис. 1), то для возбуждения фотопроводимости носителям заряда необходимо сообщить значительно меньше энергии, чем для собственных полупроводников. Поэтому примесная фотопроводимость характеризуется более высокими значениями красной границы фотопроводимости (рис. 2).

Для определения примесной фотопроводимости можно также пользоваться формулами (10) и (11), однако вместо E_g следует использовать $E_g - E_i$ – энергии ионизации донорной и акцепторной примеси, соответственно. Таким образом, контролируемое введение примесей в полупроводник позволяет управлять спектральными характеристиками фотоприемников.

Следует также отметить, что фотопроводимость наблюдается не во всей области, где $\lambda > \lambda_0$, а только в ее длинноволновой части. Одна из причин, объясняющих это явление, состоит в том, что по мере уменьшения λ быстро растет коэффициент поглощения полупроводника (рис. 3) и основная доля энергии поглощается в приповерхностном слое, в результате чего за счет поверхностной рекомбинации резко снижается концентрация носителей. Указанные обстоятельства приводят к тому, что фоторезисторы обладают селективной чувствительностью по длине волны.

В данной работе для определения спектральной зависимости фотопроводимости используется метод измерения стационарного фототока в зависимости от длины волны света. Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. Выходная щель монохроматора УМ-2 выделяет узкий пучок монохроматического света с определенной длиной волны λ , который в свою очередь освещает фоторезистор. Фоторезистор включен в цепь последовательно с источником постоянного напряжения и микроамперметром. В зависимости от λ меняется сопротивление фоторезистора, что приводит к изменению тока в цепи. При достижении λ_0 ток в цепи становится близким к темновому I_0 и с дальнейшим ростом длины волны не меняется.

Порядок выполнения работы

1. При выключенном тумблере «Сеть» установить ширину входной щели монохроматора около 0.73 мм, ширину выходной щели не более 0.33 мм. Установить барабан монохроматора на деление 3500.

2. Включить: питание установки тумблером «Сеть», освещение образца тумблером «Лампа».

3. Вращая барабан монохроматора (в сторону меньших делений), измерить зависимость тока в цепи фоторезистора от длины волны света. Для пересчета делений барабана в длины волн необходимо использовать график, находящийся на рабочем месте.

4. Результаты занести в таблицу:

| | |
|-----|------------------|
| N | деления барабана |
|-----|------------------|

| | | |
|-------------|-----------|-------|
| Длина волны | λ | , мкм |
|-------------|-----------|-------|

| | |
|-----------|-------|
| Сила тока | , мкА |
|-----------|-------|

| |
|---|
| 1 |
|---|

| |
|--|
| |
|--|

| |
|--|
| |
|--|

| |
|---|
| 2 |
|---|

| |
|--|
| |
|--|

5. Построить кривую .

6. Экстраполируя длинноволновый край полученной кривой к значению темнового тока, найти . Для данной измерительной системы темновой ток находится в пределах 1.0 – 2.0 мкА.

7. Пользуясь формулой (11), определить величину и сделать вывод о характере фотопроводимости (собственная или примесная).

8. Если установлено, что фотопроводимость собственная, то по полученному значению , пользуясь таблицей, определить материал полупроводника.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электропроводимость и от чего она зависит?

2. В чем заключается явление собственной и примесной фотопроводимости и чем они различаются?

3. Что такое стационарная фотопроводимость?

4. Что понимают под красной границей собственной и примесной фотопроводимости?

5. Дайте понятие времени жизни носителей заряда, от чего оно зависит?
6. с какими характеристиками наиболее предпочтительно использовать полупроводники для изготовления фоторезисторов?

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1987. С. 200-207.
2. Аксененко М.Д., Красовский Е.А. Фоторезисторы. М.: Сов. радио, 1973. С. 5-13.
3. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / Под ред. В.И. Стафеева. М.: Радио и связь, 1984. С. 19-26.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир, 1984. С. 54-56.