

Лабораторная работа № 3

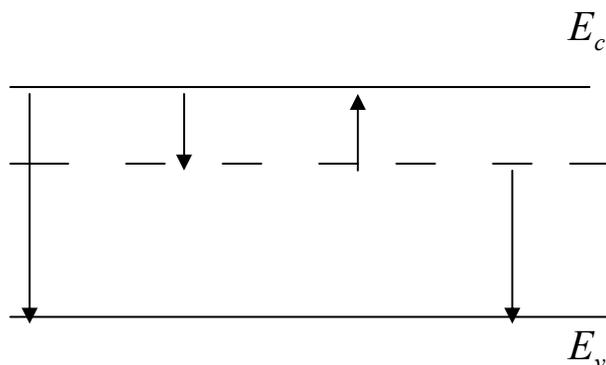
Определение диффузионной длины и времени жизни неравновесных носителей тока в полупроводниках

Основные понятия

Если в полупроводник каким-либо способом (облучение, инжекция) ввести неравновесные носители тока, то система в течение некоторого времени вновь приходит в своё равновесное состояние. Процесс, который возвращает полупроводник в его равновесное состояние, называется *рекомбинацией*.

Действительный механизм рекомбинации ещё не вполне изучен. При рекомбинации в объёме полупроводника основную роль играет механизм безизлучательной рекомбинации, в частности определяющим фактором является рекомбинация через глубокие локальные центры (ловушки).

Общая схема рекомбинации на такой «ловушке» может быть представлена следующим образом:



Пусть в кристалле имеется дефект (примесь, механическое нарушение и т.п.), могущее захватить электрон, если затем дырка оказывается в пределах эффективного сечения центра, захватившего уже электрон, то дырка захватывается электронным дефектом и рекомбинирует с электроном. Вероятность рекомбинации носителей на таких ловушках определяется концентрацией последних, их природой. Количественной характеристикой скорости рекомбинации электронов и дырок служит величина, называемая временем жизни и определяется следующим образом. Если избыточная концентрация электронов или дырок « r » мала по сравнению с концентрацией основных носителей, то скорость уменьшения концентрации $\frac{dn}{dt}$ оказывается пропорциональной избыточной концентрации « n »

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\tau} n \quad (1)$$

где τ – время жизни электрона (дырки).

Интегрирование (1) даёт

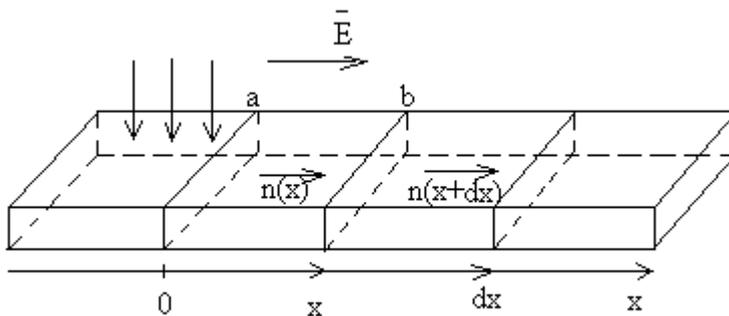
$$n_t = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

где n_0 - концентрация в момент времени t_0 ,

то есть время жизни есть величина времени, через которое концентрация неравновесных носителей уменьшается в $e = 2,7$ раза.

Теория метода.

Рассмотрим нитевидный полупроводник (рис.2), допустим, что под влиянием освещения во внутренней области «а» возникает дополнительных носителей в 1 см^3 в одну секунду.



Рассмотрим слой полупроводника, ограниченный плоскостями x и $(x + dx)$ через сечение x рассматриваемый слой через 1 см^2 в сек. Входит вследствие диффузии $-D \frac{dn}{dx}$ число носителей, а через сечение $(x + dx)$ выходит:

$$-D \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x+dx} = -D \left(\frac{dn}{dx} + \frac{d^2 n}{dx^2} dx \right)_x$$

Следовательно, увеличение числа носителей вследствие диффузии есть:

$$-D \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x+dx} = -D \left(\frac{dn}{dx} + \frac{d^2 n}{dx^2} dx \right)_x$$

Если в полупроводнике имеется электрическое поле E , то носители участвуют ещё в направленном дрейфовом движении.

Число носителей, входящих через сечение X вследствие дрейфа, равно:

$$n(x)\mu E, \text{ где } \mu - \text{ подвижность,}$$

а число носителей, входящих через $(x+dx)$

$$n(x+dx)\mu E = \left(n + \frac{dn}{dx} \right) \mu E$$

Увеличение числа носителей в слое вследствие дрейфа равно:

$$n\mu E - \left(n + \frac{dn}{dx} \right) \mu E = -\mu E \frac{dn}{dx}$$

В стационарном состоянии полное число носителей, вошедших в слой, должно равняться числу носителей, исчезающих вследствие рекомбинации, которое равно

$$-\frac{dn}{dt} dx = \frac{ndx}{\tau}$$

Поэтому уравнение баланса дополнительных носителей будет иметь вид:

$$D \frac{d^2 n}{dx^2} dx - \mu E \frac{dn}{dx} dx - \frac{ndx}{\tau} = 0$$

$$\frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{\mu E}{D} \frac{dn}{dx} - \frac{1}{D\tau} n = 0 \quad (3)$$

Данное уравнение справедливо только для низкого уровня инжекции. Частное решение уравнения с начальными условиями даёт:

$$n_t = n_0 e^{-\frac{x}{l}}, \quad (4)$$

где l – длина затягивания носителей.

В пределах случая

a) $E = 0, l = l_0$ выражение (4) принимает вид

$$n_t = n_0 e^{-\frac{x}{l_0}}, \quad (5)$$

Длина затягивания равна диффузионной длине, это расстояние, на котором концентрация неравновесных носителей уменьшается в e раз, при рассмотрении носителей только вследствие диффузии.

b) $\frac{\mu E}{2D} \gg \frac{l}{l_0}$, тогда выражение (4) принимает вид формулы (2):

$$n_t = n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Полученные результаты лежат в основе экспериментального определения времени жизни τ .

Мы видим, что для этого можно либо исследовать уменьшение концентрации неравновесных носителей с течением времени и найти τ по формуле (2), либо исследовать зависимость от расстояния вдоль образца. В последнем случае определяется диффузионная длина l_0 . Величину τ определяют из соотношения

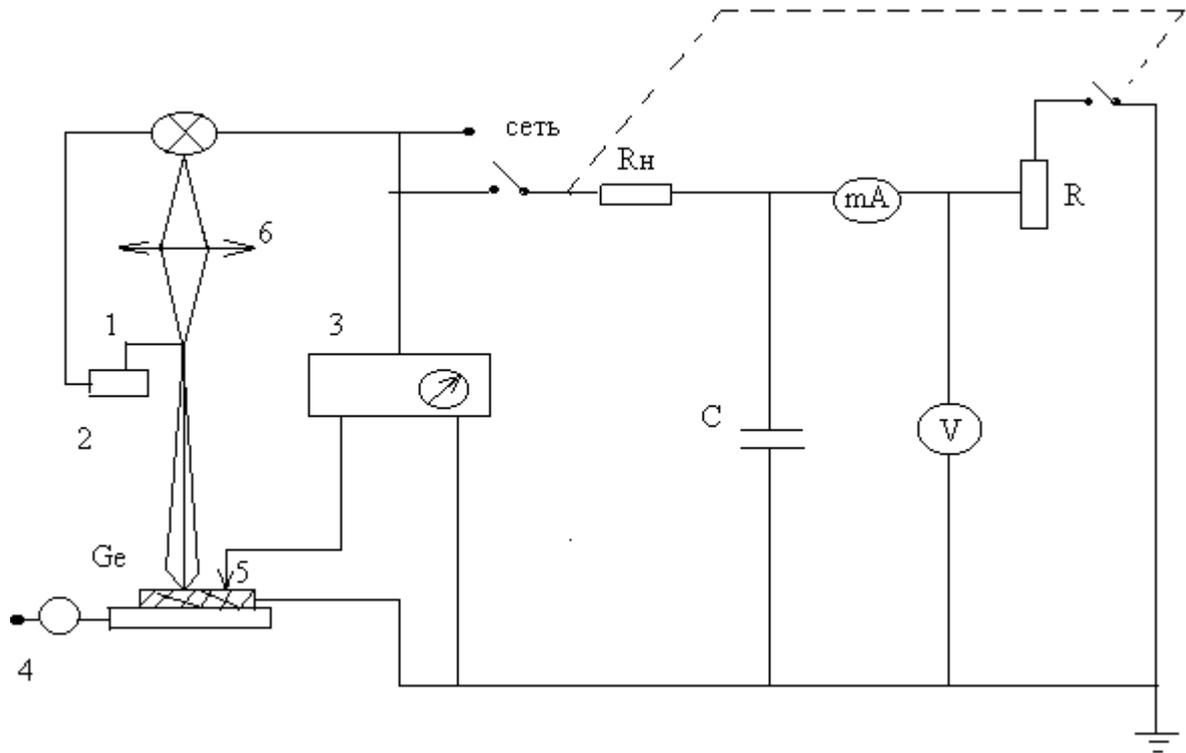
$$D\tau = (l_0)^2 \quad (6)$$

Для измерения концентрации неравновесных носителей пользуются двумя методами. Первый основан на измерении тока коллектора. В случае точечных контактов ток коллектора оказывается пропорциональным концентрации неравновесных носителей. Второй основан на изменении потенциала точечного контакта при повышении концентрации неравновесных носителей.

В данной работе используется первый метод, так как он позволяет проводить измерения l_0 без дополнительного усиления.

Методика измерений

Измерения проводятся на монокристаллическом образце Ge “р” типа проводимости. Схема установки приведена на рисунке:



В данной схеме:

1. Модулятор
2. Мотор модулятора
3. Ламповый вольтметр
4. Индикатор перемещения часового типа
5. Игла
6. Линза

Установка собрана на основе спектропроектора и включает в себя: осветительную систему, подвижный столик с закреплённым на нём образцом, блок питания, модулятор, индикатор часового типа для отсчёта продольного перемещения столика и ламповый вольтметр.

Поверхность образца освещается узким пучком света в виде тонкой прямой линии. Эта световая полоска шириной несколько десятых миллиметра пересекает всю

верхнюю грань образца параллельно его торцам. Такая система освещения упрощает решение задачи диффузии неосновных носителей и на определённом расстоянии от освещаемого участка позволяет свести её к вышерассмотренной одномерной задаче. Пучок света прерывается вращающимся диском (модулятор), это позволяет отделить часть коллекторного тока, связанную с неравновесными носителями, от постоянной составляющей.

Частота прерывания выбирается таким образом, чтобы за время освещения устанавливалось равномерное распределение неосновных носителей, а за время затемнения система приходила в равновесное состояние, то есть длительности освещения и затемнения должны быть намного больше τ .

В нашей установке частота следования импульсов порядка 300 Гц.

Смещение на коллектор подаётся от батареи Б, величина смещения устанавливается потенциометром Р. Коллектор представляет собой электрически заточенную W проволоку. Сопротивление коллектора в запорном направлении обычно достигает 100 кОм, поэтому ток через включенное в цепь коллектора нагрузочное сопротивление R_n определяется в основном сопротивлением коллектора, с R_n снимается переменная составляющая коллекторного тока на ламповый вольтметр. Таким образом, величина "U", измеряемая ламповым вольтметром, прямо пропорциональна концентрации n неосновных носителей, измеряя величину "U" при различных расстояниях коллектора от освещённой полоски, можно определить диффузионную длину l_0 . Для этого строится график зависимости $\ln U = f(x)$. Котангенс угла наклона этой прямой даёт l_0 .

Порядок измерения.

1. Укрепить образец в держателе.
2. Включить осветительную систему и сфокусировать световую полоску, заботясь также о том, чтобы она была параллельна торцам образца.

3.Собрать схему (рисунок) и подать напряжение на коллектор, установить ток коллектора порядка 1 мА.

4.Измерить уровень шумов, вызванный как наводками, так и рассеянным светом. Для этого сместить столик с образцом так, чтобы световое пятно не попадало на образец, измерить величину U .

5.Световая полоска совмещается с коллектором и измеряется U_n по мере удаления коллектора от световой полоски. Расстояние измеряется индикатором часового типа с точностью 0.1 мм. Данные занести в таблицу.

6.Построить график зависимости $\ln U = f(x)$. Из графика определить l_0 , по формуле (6) вычислить τ , считая, что

$$D_p = 44 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}; D_n = 96 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}.$$

Следует снять не менее 3-х кривых и в качестве окончательного результата взять среднее значение из полученных величин.

Примечание:

При выполнении работы необходимо проявлять особую осторожность в обращении с коллекторами и образцом, не следует дотрагиваться до них руками, манипулировать с ними можно только при помощи пинцета.

7.Получить осциллограмму и объяснить её.

Литература:

1.Специальный практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам под редакцией Шалимовой.

2.Шокли В. «Теория электронных полупроводников».

3.Иоффе А. Ф. «Физика полупроводников».