

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова
С.А. Артищев

**ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
«Физические основы микро- и наноэлектроники»

Томск
2022

УДК 538.915
ББК 22.35
С 470

Рецензент

Еханин С.Г., доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

Славникова Марина Михайловна, Артищев Сергей Александрович

Изучение фотопроводимости полупроводников и определение времени жизни неравновесных носителей заряда: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Физические основы микро- и наноэлектроники» / М.М. Славникова, С.А. Артищев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 11с.

В методических указаниях кратко изложена теория фотопроводимости полупроводников при импульсном освещении. Даны понятия генерации, рекомбинации равновесных, неравновесных носителей заряда, их времени жизни. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, изучающих курс «Физические основы микро- и наноэлектроники».

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.915
ББК 22.35

© Славникова М.М., 2022
© Артищев С.А., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	4
1	Фотопроводимость при импульсном освещении.....	4
2	Описание установки для измерения кривых релаксаций фотопроводимости.....	7
3	Методика измерения времени жизни неравновесных носителей заряда.....	9
4	Задание.....	10
5	Контрольные вопросы.....	11
	Список рекомендуемой литературы.....	11

ВВЕДЕНИЕ

Явлением фотопроводимости называется увеличение удельной проводимости вещества под воздействием электромагнитного излучения. На его основе созданы полупроводниковые приборы – фоторезисторы, чувствительные к видимому, инфракрасному и гамма – излучениям.

Фоторезисторы широко применяются в различных областях науки и техники в качестве фотоэлектрических преобразователей, реле, регуляторов и т.д.

В настоящей работе изучается кинетика изменения фотопроводимости германия при импульсном освещении.

1 ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОСВЕЩЕНИИ

1.1. Образование свободных носителей заряда в полупроводниках связано с ионизацией атомов, как основного вещества, так и примесей. Эти процессы происходят обычно за счет тепловой энергии решетки. Носители заряда, созданные термическим возбуждением в состоянии теплового равновесия, называются равновесными.

Наряду с термической ионизацией появление свободных электронов и дырок может быть связано и с другими причинами, например, с ионизацией под действием света или других излучений, ионизацией под действием сильного электрического поля и др. Возникшие таким образом избыточные носители заряда называются неравновесными. Полная концентрация носителей заряда в этом случае равна

$$n = n_0 + \Delta n, \quad (1.1)$$

$$p = p_0 + \Delta p, \quad (1.2)$$

где n_0 и p_0 – концентрации равновесных электронов и дырок соответственно;

Δn , Δp – концентрации неравновесных носителей заряда.

1.2. Наличие неравновесных носителей приводит в первую очередь к изменению проводимости полупроводника, которая в общем случае может быть записана в виде

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p \quad (1.3)$$

С учетом выражений (1.1) и (1.2)

$$\sigma = q \cdot (\mu_n \cdot n_0 + \mu_p \cdot p_0 + \mu_n \cdot \Delta n + \mu_p \cdot \Delta p), \quad (1.4)$$

где q – заряд электрона;

μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно.

Следовательно, избыточная (неравновесная) проводимость равна

$$\Delta \sigma = q \cdot (\mu_n \cdot \Delta n + \mu_p \cdot \Delta p). \quad (1.5)$$

С учетом способа генерации носителей проводимость, возникающая за счет увеличения концентрации свободных носителей заряда при фотовозбуждении, составляет фотопроводимость вещества.

1.3. Рассмотрим характер нарастания и спада (релаксации) фотопроводимости после включения и выключения света. Из выражения (1.5) видно, что изменение $\Delta \sigma$ во времени при постоянных μ_n и μ_p определяется изменением значений Δn и Δp . Эти изменения происходят за счет генерации и рекомбинации и описываются следующими уравнениями непрерывности:

для электронов:
$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial t} = g_n - \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad (1.6)$$

для дырок:
$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p}, \quad (1.7)$$

где τ_n, τ_p – время жизни неравновесных электронов и дырок, соответственно;

g_n, g_p – скорости генерации избыточных электронов и дырок, соответственно;

$-\Delta n/\tau_n, -\Delta p/\tau_p$ – скорости рекомбинации электронов и дырок, соответственно.

В общем случае значения Δn и Δp зависят от механизма рекомбинации в полупроводнике и не равны друг другу. Однако, если отсутствует захват свободных носителей заряда уровнями в запрещенной зоне, а избыточные электроны возбуждаются из валентной зоны (биполярная генерация), то $\Delta n = \Delta p$ и $\tau_n = \tau_p$. Эти условия часто реализуются в германии. Пусть в момент $t = t_n$ (рисунок 1.1, а) образец освещается светом постоянной интенсивности с энергией квантов

$$h\nu \geq \Delta E, \quad (1.8)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Учитывая, что при биполярной генерации $g_n = g_p = g$, и, как отмечалось выше, $\Delta n = \Delta p$, $\tau_n = \tau_p = \tau$ решение уравнений (1.6) и (1.7) можно свести к решению одного уравнения:

$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial t} = g - \frac{\Delta n}{\tau}. \quad (1.9)$$

Разделяя переменные и интегрируя с учетом начального условия $\Delta n = 0$ при $t = t_n = 0$ и $n = n_0$, что соответствует малому уровню инжекции, получим

$$\Delta n = g \cdot \tau \cdot (1 - \exp(-t\tau)). \quad (1.10)$$

Таким образом, концентрация неравновесных носителей заряда после начала возбуждения (рисунок 1.1, б) и соответствующая ей фотопроводимость (рисунок 1.1, в) увеличиваются по экспоненциальному закону. В дальнейшем избыточная концентрация достигает стационарного значения, когда скорость рекомбинации становится равной скорости генерации

$$\Delta n_{cm} = g \cdot \tau, \quad (1.11)$$

а фотопроводимость увеличивается при этом до стационарной величины $\Delta \sigma_{cm}$ (см. рисунок 1.1. б, в). Если образец не освещен, то $g = 0$, и вместо выражения (1.9) можно записать

$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau}. \quad (1.12)$$

Пусть теперь момент времени $t = 0$ соответствует окончанию импульса света, т.е. $t = t_x = 0$. В этот момент в образце в результате предварительного освещения неравновесная концентрация доведена до значения Δn_{cm} . Тогда, из решения уравнения (1.12) следует, что зависимость Δn (а следовательно и $\Delta \sigma$) от времени имеет вид спадающей экспоненты

$$\Delta n = \Delta n_{cm} \cdot \exp(-t/\tau). \quad (1.13.)$$

Следует отметить, что постоянные времени экспоненциальных кривых релаксации $\Delta n(t)$ и $\Delta \sigma(t)$ совпадают со временем жизни неравновесных носителей заряда. Это дает возможность непосредственного определения величины τ . Действительно, из (1.5) следует, что при $\Delta n = \Delta p$

$$\Delta \sigma = q \cdot \Delta n \cdot (\mu_n + \mu_p) \quad (1.14)$$

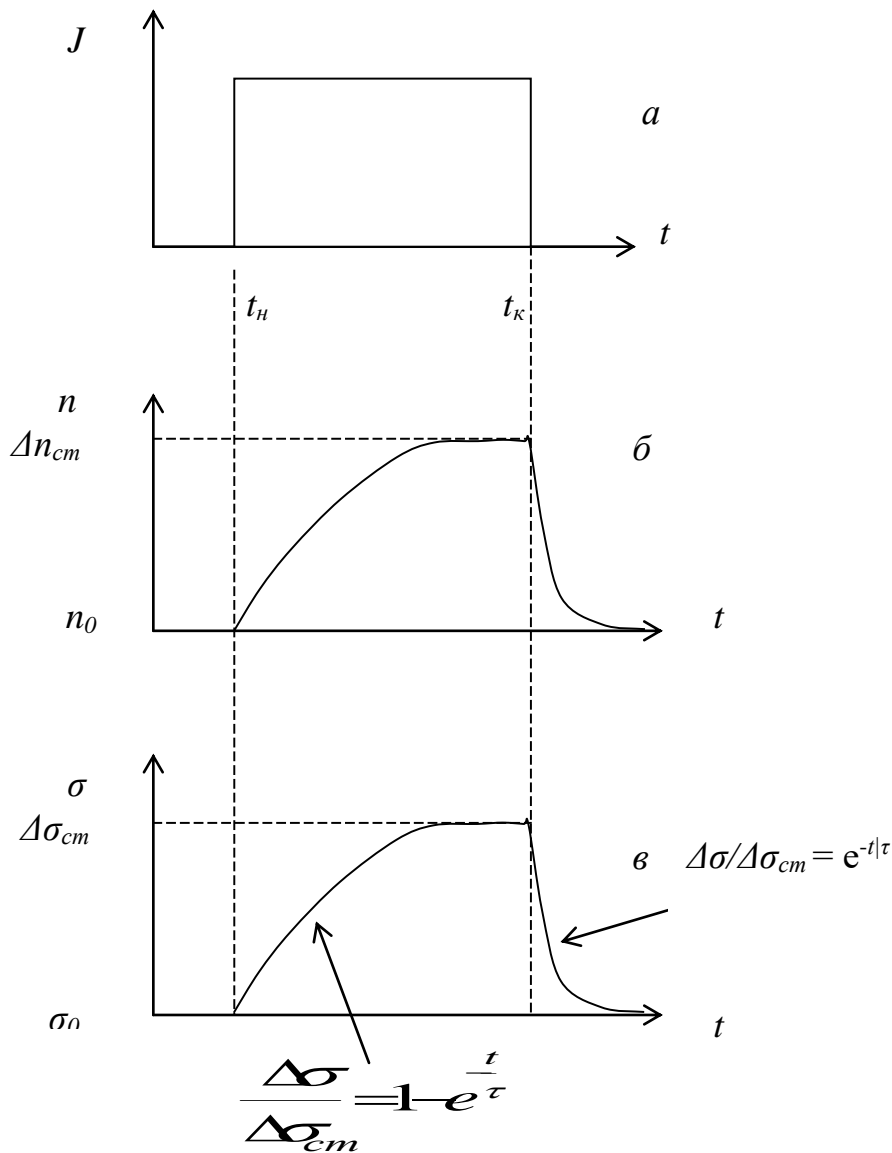


Рисунок 1.1 – Форма импульса света (а), кривая релаксация концентрации неравновесных носителей (б) и фотопроводимости (в)

С учетом (1.13) для участка спада фотопроводимости можно записать

$$\Delta\sigma = q \cdot \Delta n_{cm} \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot \exp(-t\tau) = \Delta\sigma_{cm} \cdot \exp(-t\tau) \quad (1.15)$$

или, логарифмируя,

$$\ln(\Delta\sigma) = \ln(\Delta\sigma_{cm}) - t\tau. \quad (1.16)$$

Отсюда следует, что значение τ можно определить по наклону зависимости $\ln(\Delta\sigma) = f(t)$, т.е. как

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln(\Delta\sigma(t_1)) - \ln(\Delta\sigma(t_2))}, \quad (1.17)$$

где $\Delta\sigma(t_1), \Delta\sigma(t_2)$ – значения фотопроводимости на участке нарастания или спада в моменты времени t_1 и t_2 , соответственно.

Обычно в случае малого уровня биполярной генерации величину τ (время жизни неравновесных носителей заряда) измеряют как время, в течение которого фотопроводимость полупроводника убывает в $e = 2,7$ раза.

1.4. Величина фотопроводимости, а также время жизни неравновесных носителей заряда сильно зависят от размеров образца.

Если толщина образца h меньше диффузионной длины носителей заряда L , то неравновесные носители рекомбинируют как в объеме образца, так и на его поверхности. В этом случае наблюдаемое (эффективное) время жизни $\tau_{\text{эф}}$ можно рассматривать как составленное из отдельных времен жизни для объемной τ_0 и поверхностной τ_S рекомбинации согласно уравнению

$$1/\tau_{\text{эф}} = 1/\tau_0 + 1/\tau_S. \quad (1.18)$$

В толстых образцах, где $h > L$, основная часть неравновесных носителей успевает прорекомбинировать в объеме полупроводника, и τ будет равно τ_0 . Таким образом, изменение кривой релаксации фотопроводимости на толстом образце дает возможность определить объемное время жизни, а на тонком из того же материала - эффективное время жизни. Зная значения τ_0 и $\tau_{\text{эф}}$ по формуле (1.18) можно определить величину τ_S . Более того, отсюда можно найти такой важный параметр полупроводникового материала, как скорость поверхностной рекомбинации S на больших гранях тонкого образца

$$\tau_S = \frac{h}{2S}. \quad (1.19.)$$

Скорость поверхностной рекомбинации весьма чувствительна к наличию примесей на поверхности образца, к различным структурным нарушениям и в ряде случаев является параметром, контролирующим совершенство технологии производства полупроводниковых приборов. При достижении особой чистоты поверхности германия величина S может находиться в пределах нескольких десятков сантиметров в секунду. Присутствие на поверхности микроскопических следов примесей, например, меди, серебра, золота и др., увеличивает S до десятков тысяч сантиметров в секунду и соответственно уменьшает $\tau_{\text{эф}}$, вследствие интенсивной рекомбинации возбужденных носителей заряда на поверхности образца.

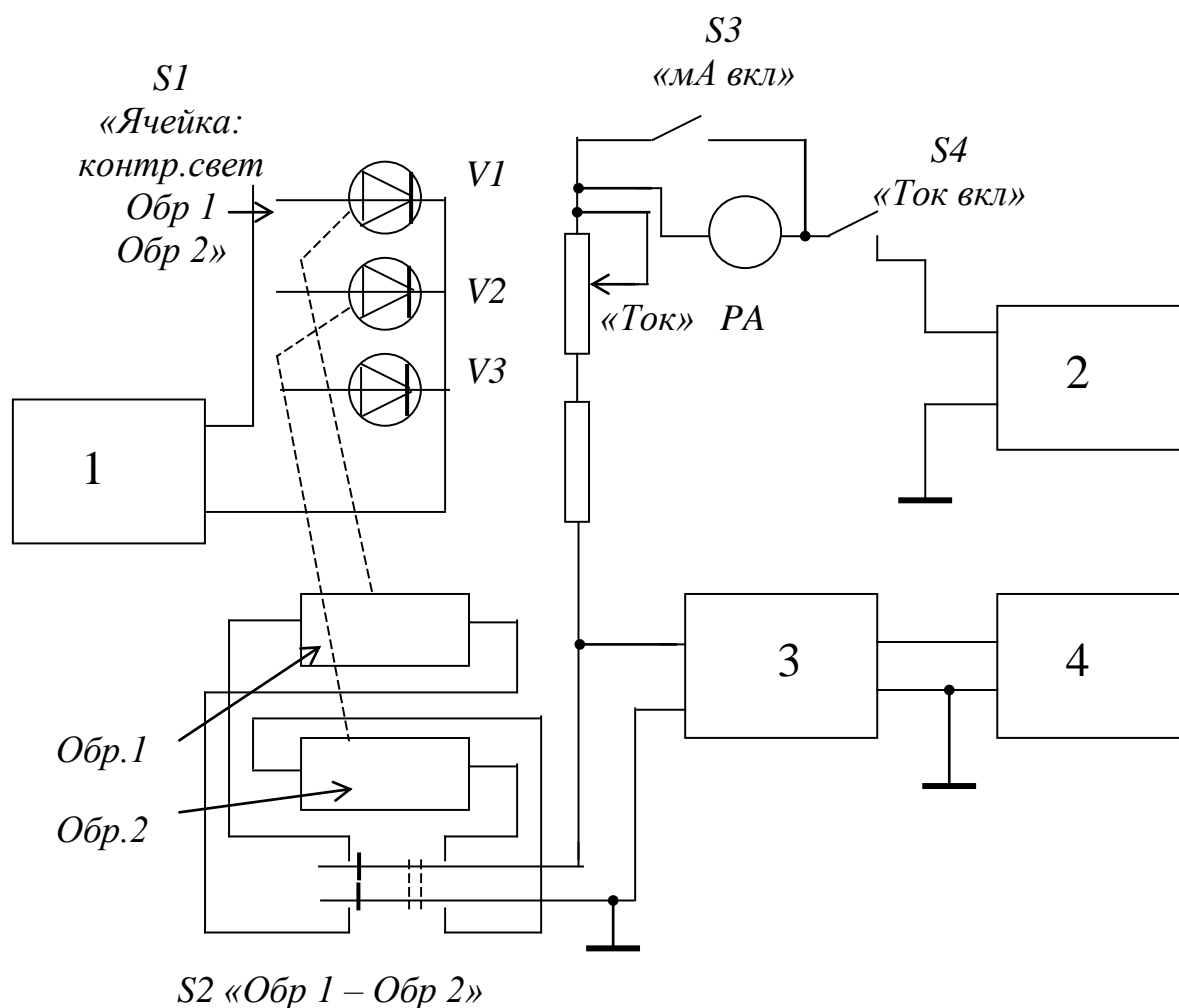
2 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ

Для наблюдения кривых релаксации фотопроводимости необходим источник прямоугольных импульсов света, причем, время нарастания и спада светового импульса должно быть пренебрежимо мало по сравнению со временем жизни носителей заряда. Механические модуляторы света, широко используемые для измерения стационарных значений фотопроводимости, как правило, не пригодны для исследования кинетики релаксации фотопроводимости из-за относительно больших значений времени нарастания и спада импульсов света, составляющих 10^{-4} - 10^{-5} с.

В данной лабораторной работе источником импульсов света служит светодиод, на который подаются прямоугольные импульсы напряжения (рисунок 2.1). Длина волны излучения λ , равная 0,68 мкм, соответствует условию биполярной генерации носителей заряда, см. выражение (1.8). Сигнал, снимаемый с образца, усиливается предварительным усилителем, выполненным на основе интегральной схемы, и поступает на вход осциллографа.

В работе исследуются два образца, которые размещены в светонепроницаемой ячейке, укрепленной на макете. Образцы могут быть поочередно подключены к установке с помощью тумблера «Обр.1 - Обр.2». Каждый образец освещается индивидуальным светодиодом. Подача импульсов напряжения на тот или другой светодиод производится переключателем «Ячейка: контр.свет - Обр.1 -Обр.2 », расположенным на передней панели

макета. В положении этого переключателя "Обр.1" импульсы света воздействует на образец № 1, в положении "Обр.2" - на образец № 2. Третий светодиод также расположен в ячейке и является контрольным. Импульсы напряжения на него подаются в том случае, если переключатель «Ячейка: Контр.свет – Обр1 - Обр.2» находится в положении «Контр. свет». Контрольный светодиод излучающей частью обращен к наблюдателю и используется для наблюдения световых вспышек. При этом длительность световых импульсов следует выбирать большой (положение «500 мс» переключателя «Длительность импульса света»). При меньшей длительности импульсов света глаз наблюдателя не воспринимает интервалы между импульсами, из-за большой частоты их следования. Интенсивность излучения устанавливается изменением тока через светодиод с помощью потенциометра «Интенсивность света». Изменение интенсивности световых импульсов удобно наблюдать на контрольном светодиоде.



1 – генератор импульсов; 2 – источник напряжения;
 3 – усилитель; 4 – осциллограф; PA –
 милливольтметр; V1, V2, V3 - светодиоды

Рисунок 2.1 – Схема установки для изучения фотопроводимости

Верхний ряд ручек управления на передней панели макета используется для установки и изменения тока через образец. Тумблером «Вкл» производится включение тока через образец (см. рисунок 2.2). В положении другого тумблера «мА вкл.» в цепь образца подключается прибор для измерения тока. В период наблюдения релаксационных кривых фотопроводимости при наличии помех тумблер «мА вкл.» следует поставить в нижнее положение. Ручкой «Ток» устанавливается необходимый ток через образец. Не рекомендуется устанавливать ток через образец более 0,7 мА.

С выхода предварительного усилителя (гнезда «+выход - » на передней панели) сигнал подается на вход осциллографа. Изменение падения напряжения на образце с частотой модуляции света наблюдается, таким образом, на экране осциллографа. Связь между фотопроводимостью и сигналом ΔV выражается формулой

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta V}{I \cdot R_0}, \quad (2.1)$$

где I - ток через образец;

R_0 - темновое сопротивление образца.

3 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

- 3.1. Включить блок питания.
- 3.2. Подключить образец №1 к установке, для чего тумблер «Обр.1-Обр.2» на ячейке поставить в положение «Обр.1».
- 3.3. Подключить светодиод образца №1 к генератору импульсов напряжения. Для этого ручку переключателя «Ячейка: Контр. свет - Обр.1-Обр.2» поставить в положение «Обр.№1».
- 3.4. Установить ручку «Интенсивность света» в положение, близкое к крайнему правому.
- 3.5. Включить тумблеры «Вкл», «мА вкл» и установить ток через образец, равный 0,5 мА.
- 3.6. С помощью ручки макета «Длительность импульса света» и ручек управления осциллографа установить на экране картину (рисунок 3.1).
- 3.7. По кривой релаксации фотопроводимости на экране осциллографа время жизни неравновесных носителей заряда определяется на уровне 0,37 от стационарной величины сигнала фотопроводимости на участке спада (см. рисунок 3.1).
- 3.8. Время жизни на образце № 2 определяется аналогичным образом в положении переключателей «Обр.2» (см. пункты 3.1 и 3.2).

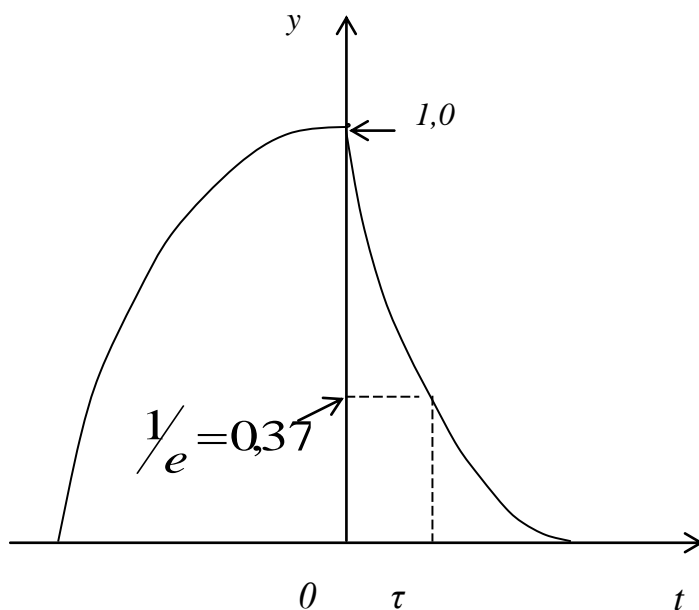


Рисунок 3.1 – Кривая релаксации фотопроводимости

4 ЗАДАНИЕ

- 4.1. Согласно вышеизложенной методике получить на экране осциллографа картину, подобную показанной на рисунке 3.1, и определить время жизни неравновесных носителей заряда в образце № 1.
- 4.2. Снять зависимость амплитуды сигнала фотопроводимости ($Y, \text{мм}$) от времени на участке быстрого спада.
- 4.3. Рассчитать и построить зависимость $\ln Y = f(t)$ и объяснить ее вид.
- 4.4. По наклону зависимости $\ln Y = f(t)$, см. формулу (1.17), определить время жизни неравновесных носителей заряда и сравнить с найденным ранее значением (см. подраздел 4.1)
- 4.5. По формуле (2.1.) рассчитать величину стационарной фотопроводимости. При определении амплитуды стационарной фотопроводимости ΔV учесть, что на вход осциллографа сигнал поступает усиленным в 780 раз.
Для образца № 1 $R_0 = 3,8 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.
- 4.6 Сравнить найденную величину $\Delta \sigma_{cm}$ с темновой проводимостью образца ($\sigma_0 = 1/R_0$) .т.е. найти отношение $\frac{\Delta \sigma_{cm}}{\sigma_0} = \frac{\Delta V_{cm}}{I \cdot R_0}$.
- 4.7. Повторить подразделы 5.1 - 5.6 для образца №2. Темновое сопротивление этого образца $R_0 = 5,5 \cdot 10^2 \text{ Ом}$.
- 4.8. По формулам (1.18) и (1.19) рассчитать скорость поверхностной рекомбинации на образце № 1. Т.к. толщина образца № 2 больше, чем у образца №1, то в первом приближении следует считать, что величина τ , измеренная на образце №2, соответствует объемному времени жизни τ_0 . Величина τ , измеренная на образце №1, соответствует эффективному времени жизни $\tau_{\text{эф}}$. Толщина образца №1 $h = 0,4 \text{ мм}$.
- 4.9. Сформулировать и записать выводы.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Чем различаются равновесные и неравновесные носители заряда в полупроводниках?
- 5.2. Что такое генерация носителей заряда?
- 5.3. Чем биполярная генерация отличается от монополярной?
- 5.4. Что такое фотопроводимость?
- 5.5. Зависит ли фотопроводимость от длины световой волны?
- 5.6. Какие физические процессы учитываются в уравнениях непрерывности для освещенного и неосвещенного полупроводников?
- 5.7. Почему при освещении проводимость полупроводника не возрастает до бесконечности?
- 5.8. Каков физический смысл времени жизни неравновесных носителей заряда?
- 5.9. Что такое «диффузионная» длина?
- 5.10. Объясните, как можно определить время жизни неравновесных носителей заряда по кривой релаксации фотопроводимости.
- 5.11. Как определить объемное время жизни, как эффективное время жизни?
- 5.12. Каким образом поверхность полупроводника влияет на время жизни носителей заряда?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высш. шк., 1986. 304 с.
2. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высш. шк., 1977. 448 с.
3. Несмелов Н.С., Славникова М.М., Широков А.А. Физические основы микроэлектроники. Томск, ТУСУР, 2007. с. 276
4. Елифанов Г. И. Физика твердого тела: Учебное пособие для вузов. Спб. Лань, 2011. -288с. 978-5-8114-1001-9ISBN. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023 (дата обращения: 15.12.2017)
5. Шалимова К.В. Физика полупроводников: 4-е изд., стер., - Спб. Лань, 2010. 384с. 978-5-8114-0922-8ISBN.