

# ФІЗИКА

УДК 537.311.322

Надточий В.А., Уколов А.И., Попов О.К., Перебайло С.А.

<sup>1</sup> доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, СГПУ

<sup>2</sup> ассистент кафедры общенаучных дисциплин, АДИ ДонНТУ

<sup>3</sup> магистрант, СГПУ

<sup>4</sup> студент, АДИ ДонНТУ

e-mail: ukolov\_aleksei@mail.ru

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕКОМБИНАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Ge

Рассмотрена конструкция устройства для определения времени жизни неравновесных носителей заряда в приповерхностном дефектном слое монокристаллического германия по результатам измерений эффективного времени жизни, времени жизни в объеме и скорости поверхностной рекомбинации.

**Ключевые слова:** *полупроводник, эффективное время жизни, скорость поверхностной рекомбинации.*

### Введение

Измерение структурно-чувствительных параметров полупроводника дает возможность определить качество материала для изготовления полупроводниковых приборов. В данной работе рассмотрено разработанное авторами измерительное устройство для определения параметров рекомбинации неравновесных носителей заряда с учетом поверхностной рекомбинации. Поверхностная рекомбинация изменяет не только стационарную фотопроводимость, но и кинетику ее установления и затухания. Рассмотрим этот вопрос для пластинки, когда ее толщина намного меньше двух других измерений. Можно проанализировать убывание во времени избыточных носителей с момента выключения их источника. В этом случае мы должны рассматривать зависящее от времени уравнение непрерывности

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{\delta p}{\tau_v}, \quad (1)$$

здесь  $D$  – коэффициент диффузии,  $z$  – координата по толщине пластины,  $\delta p$  – концентрация неравновесных дырок,  $\tau_v$  – объемное время жизни дырок. Общее решение уравнения (1) можно записать в виде

$$\delta p(t, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m \exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right) \cos maz \quad (2)$$

где  $m$  – целые числа,  $\alpha_m, \tau_m$  и  $a$  – постоянные. Подставляя (2) в (1), мы находим, что это уравнение удовлетворяется при условии

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_v} + Da^2 m^2. \quad (3)$$

Если исключить начальный период затухания фотопроводимости и оставить в (2) член с  $m=1$  можно получить, что эффективное время жизни

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s}, \quad (4)$$

а для образца с дефектным приповерхностным слоем [1]

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_l} + \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_v}. \quad (5)$$

В формуле (5)  $\tau_{eff}$  – измеряемое время жизни,  $\tau_l$  – время жизни в приповерхностном слое,  $\tau_s = b/2s$ , где  $b$  – коэффициент, учитывающий размеры образца [2],  $s$  – скорость поверхностной рекомбинации.

## Основная часть

В данной работе предложена конструкция устройства, позволяющего определить  $\tau_{eff}, s, \tau_l, \tau_v$ , длину свободного пробега и коэффициент диффузии  $D$  носителей заряда на одном измерительном столике, используя необходимые методики. В электрических схемах измерений выполнены некоторые усовершенствования по сравнению с известными в литературе, позволяющие при малых затратах времени получать хорошо воспроизводимые результаты. В конструкции (рис. 1) можно выделить общие детали и отдельные, используемые для операций измерения определенного параметра. Основой является круглая стальная плита (1), на которой крепится индикатор перемещений (2) с чувствительностью 1 мкм/дел., пределами (0-1) мм. и двухкоординатный столик (3). Его перемещение по  $X$  (влево - вправо) осуществляется рукояткой (4), а измерение - микронным индикатором (2) или отсчетом по мерочной линейке (5). Перемещение столика (3) по  $Y$  (вперед - назад) осуществляется рукояткой (6), а его значение отсчитывается по линейке (7). Таким

образом осуществляется двухкоординатное перемещение образца (8), укрепленного пружинным зажимом (9); рукоятка (10) служит для освобождения, переустановки или смены образца.

I. Импульсный метод модуляции проводимости. Вопрос о времени жизни неосновных носителей заряда при измерениях этим методом рассмотрен в [14], где изложена теория механизма рекомбинации через локальные центры и приведена блок-схема. Элементами конструкции для измерений данным методом является деталь (11) вертикальной подачи держателя зонда (12), который укреплен на пружине (13) и свободно перемещается в отверстии планки (14).

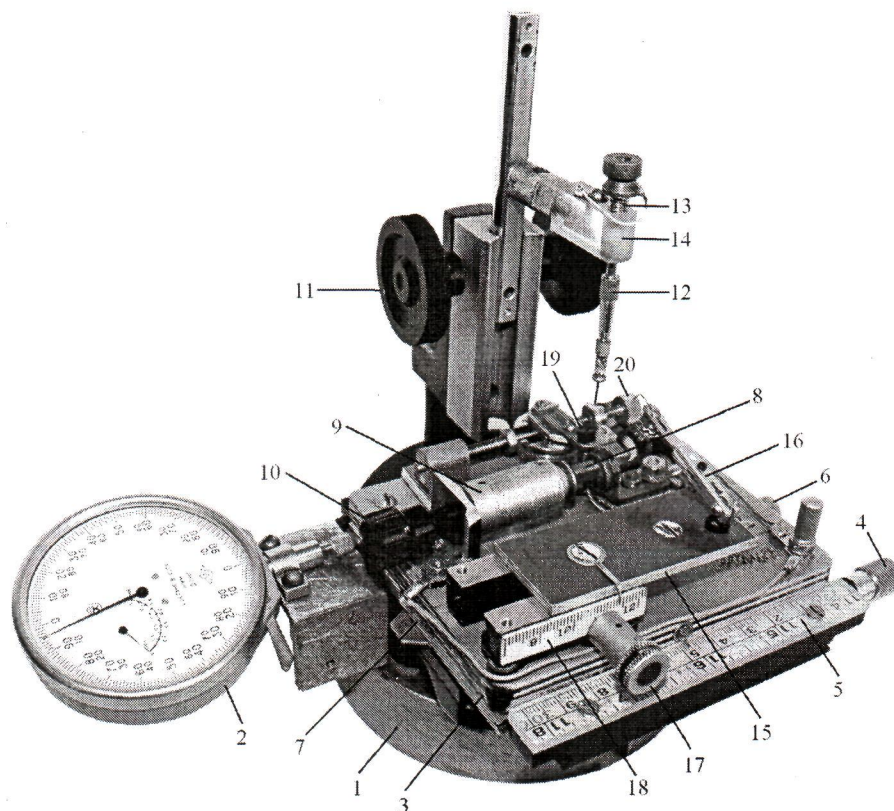


Рис. 1: Фотография измерительной установки

Такое крепление держателя позволяет плавно регулировать давление зонда на поверхность полупроводника. Перед началом измерений образец с дефектами в приповерхностном слое, введенными, например, деформированием при  $T = 300 \text{ K}$  [3-4], протравливают в кипящей перекиси водорода  $H_2O_2$ , промывают в дистиллированной воде и сушат в потоке горячего воздуха. Затем без загрязнений крепят в зажиме (9) предметного столика; при этом между торцевой поверхностью образца и держателем должен быть обеспечен омический контакт. Контакт между зондом и образцом должен быть малошумящим, что достигается в электрической схеме измерения  $\tau_{eff}$  (рис. 2). Для



этого кратковременным нажатием кнопки Кн и переводом ее в положение 2 производят формовку контакта импульсами тока и добиваются необходимого соотношения сигнал/шум при минимальном напряжении. В предлагаемом варианте электрической схемы (рис. 2) используется генератор прямоугольных импульсов Г5-7А, имеющий систему задержки, которая позволяет получить на выходе опорный импульс и импульс, задержанный на определенное время по отношению к опорному. Напряжение на образец подается через резистор  $R_1$ , обеспечивающий режим генератора тока. Диоды  $D_1$ - $D_4$  типа Д310; из них  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_4$  - корректирующие форму импульсов, а  $D_3$  - выполняет роль ограничителя, т.е. позволяет выделить верхнюю часть импульса напряжения, изменяющуюся в результате инжекции и рекомбинации носителей заряда. Необходимый уровень ограничения устанавливается резистором  $R_3$ . Схема при малых временах задержки измерительного импульса дает возможность определять время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_l$  в приповерхностном слое образца, а при больших временах -  $\tau_v$  в его объеме [5]. Перемещая образец по двум направлениям, можно находить  $\tau$  в любой точке на поверхности [6].

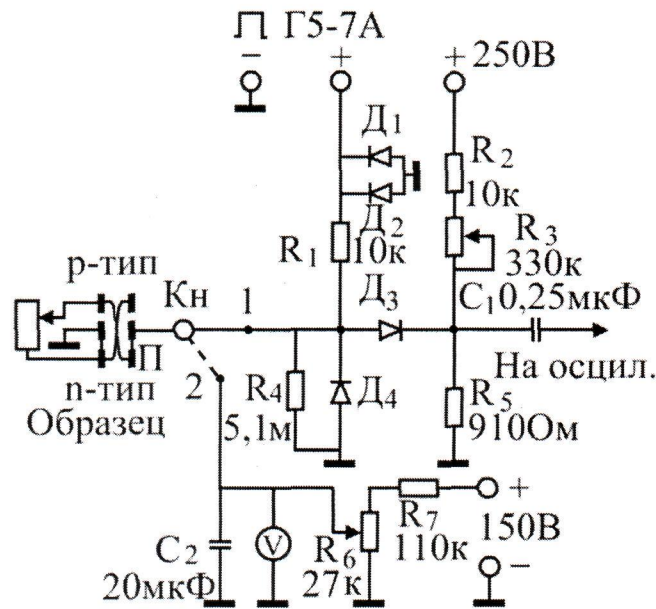


Рис. 2: Электрическая схема измерения времени жизни неравновесных носителей заряда импульсным методом модуляции проводимости

II. Фотоэлектрический метод. Определение диффузионной длины основано на измерении пространственного распределения концентрации неравновесных носителей заряда, возбуждаемых светом [7,8]. Перед измерениями планку (14) (рис. 1) вместе с держателем зонда (12) снимают для установки над образцом (8) источника света с оптической системой (см. рис. 3). В

ее состав входит конденсорная линза (К) и щелевая диафрагма (Д), между которыми помещен модулятор света (М). Система обеспечивает освещение образца модулированной по интенсивности полосой света, толщиной  $\leq 0,1$  мм. В устройстве (рис. 1) используется также второй, закрепленный на первом (3), подвижный столик (15) с держателем зонда (16). Перемещение его по  $X$  (влево - вправо) осуществляется рукояткой (17), а отсчет производится по линейке (18). Таким образом в устройстве предусмотрено как перемещение образца (8), так и относительно него – держателя зонда (16), чем достигается измерение  $L_D$  на удлиненных образцах без переустановки микрометрического датчика (2) с верхним пределом 1 мм. В отличие от [7-9] в схеме измерения  $L_D$  (рис. 3) применен, изготовленный авторами высокостабильный по частоте модулятор интенсивности света на основе камертонного генератора. Использован камертон с собственной частотой колебаний  $f_0 = 294$  Гц.

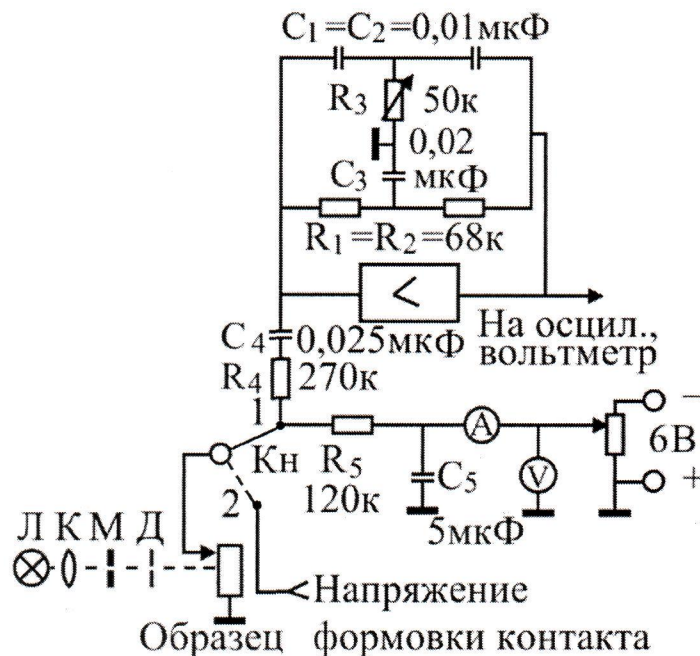


Рис. 3: Электрическая схема измерения диффузионной длины носителей заряда фотоэлектрическим методом

На концах его вибраторов были напаяны тонкие пластинки, между которыми создавался тонкий зазор в виде щели. По обеим сторонам вблизи вибраторов крепились малогабаритный динамический микрофон и электромагнит; микрофон включали на вход низкочастотного усилителя, а к его выходу - в цепь обратной связи - электромагнит, чем обеспечивали самовозбуждение генератора. При соблюдении определенных условий в подобного вида автогенераторах [9] можно добиться практически реализуемой стабильности частоты на порядок более высокой, чем в  $LC$  - и  $RC$  - генераторах. В схеме (рис.



3) использован также селективный усилитель с двойным Т-образным RC-фильтром [10], настраиваемый на частоту модулятора резистором  $R_3$ . При узкой полосе пропускания усилителя существенно повышается соотношение сигнал/шум. В фотоэлектрическом методе измерения  $L_D$  используется подвижный световой зонд с энергией фотонов, большей ширины запрещенной зоны. Свет, генерирующий электронно-дырочные пары, поглощается в тонком приповерхностном слое. Поэтому дефекты структуры, создающие глубокие уровни в запрещенной зоне и являющиеся эффективными центрами рекомбинации, могут существенно изменять  $L_D$ , а поэтому и время жизни  $\tau$  неосновных носителей заряда. Значение  $\tau$  можно определять по формуле  $\tau = L_D^2 / D$  при известной величине коэффициента диффузии  $D$  (см. ниже).

III. Метод движущегося светового луча позволяет измерить скорость поверхностной рекомбинации, коэффициент диффузии и диффузионную длину неосновных носителей заряда [7,11]. В устройстве (рис. 1) используется осветитель, формирующий узкую полосу света на образце, зеркало, укрепленное на микродвигателе, подвижный столик (15) с держателем зонда (16) и фотодиод (19). При вращении зеркала тонкая и широкая полоса света возбуждает импульс тока в цепи фотодиода и генерацию неравновесных носителей заряда в образце [8,11]. Фотодиодные импульсы используются для синхронизации осциллографа и генератора импульсных сигналов. При подаче на вход  $Z$  эти импульсы создают метки времени на осциллограмме, которая имеет вид несимметричной куполообразной кривой и представляет зависимость концентрации неравновесных носителей заряда от времени в контакте зонда с поверхностью полупроводника. Изображение сигнала можно смещать рукояткой (20) в положение, удобное для фотографирования, изменяя его временную задержку относительно импульса запуска развертки.

## Выводы

В работе разработано и изготовлено устройство для измерения параметров рекомбинации неравновесных носителей заряда в приповерхностных слоях монокристаллов Ge. Результаты измерений в рассмотренном устройстве в значительной мере зависят от качества монтажа электрических схем. Для получения хорошо воспроизводимых результатов следует принимать меры по уменьшению шумовых составляющих в сигнале и уровня фона от сети переменного тока. Рассмотренное измерительное устройство может быть использовано в учебных целях и для технологического контроля изделий микроэлектронной техники.

## Литература

- [1] Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств : Справочник / З.Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
- [2] Пека Г.П. Физика поверхности полупроводников / Г.П. Пека. – К.: Изд. Киевского ун-та, 1967. – 191 с.
- [3] Nadtochy V. Structure changes caused by the stress gradient in subsurface layers of germanium single crystals / V. Nadtochy, I. Zhikharev, M. Golodenko // Sol. State Phenomena. – 2003. – V. 94. – P. 253 – 256.
- [4] Надточий В.А. Рентгеновские исследования дефектов структуры в приповерхностных слоях монокристаллов германия и кремния, деформированных при 310 К / В.А. Надточий, И.В. Жихарев, Н.Н. Голоденко // Физ. и техн. высоких давлений. – 2003. – Т. 13, № 1. – С. 91 – 95.
- [5] Уколов А.И. Измерение времени жизни неосновных носителей заряда в приповерхностном слое монокристаллического Ge зондовым методом / А.И. Уколов, В.А. Надточий, Н.Н. Голоденко // Вісник ХНУ, серія Фізика. – 2011. – Т. 962, № 15. – С. 63 – 66.
- [6] Надточий В.А. Исследование электрических свойств Ge и Si, деформированных при низких температурах / В.А. Надточий, Н.К. Нечволод, Г.Д. Сущенко // Физ. и техн. высоких давлений. – 2001. – Т. 11, № 1. – С. 104 – 110.
- [7] Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М.: Высшая школа, 1987. – 238 с.
- [8] Шалимова К.В. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / К.В. Шалимова – М.: Высшая школа, 1968. – 464 с.
- [9] Лугвин В.Г. Элементы современной низкочастотной электроники / В.Г. Лугвин – М.: Энергия, 1964. – 90 с.
- [10] Барсуков Ф.И. Генераторы и селективные усилители низкой частоты / Ф.И. Барсуков. – М.: Энергия, 1964. – 82 с.
- [11] Уколов О.І. Визначення швидкості поверхневої рекомбінації і її впливу на час життя нерівноважних носіїв заряду / О.І. Уколов, В.О. Надточій, А.З. Калимбет // Збірник наукових праць фізико-математичного факультету СДПУ. – 2011. – № 1. – С. 104 – 110.