

ФІЗИКА

УДК 537.311.322

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

¹ доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, СГПУ

² ассистент кафедры общенаучных дисциплин, АДИ ДонНТУ

³ магистрант, СГПУ

⁴ 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, δp – концентрация неравновесных дырок, τ_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, α_m, τ_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) τ_{eff} – измеряемое время жизни, τ_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).

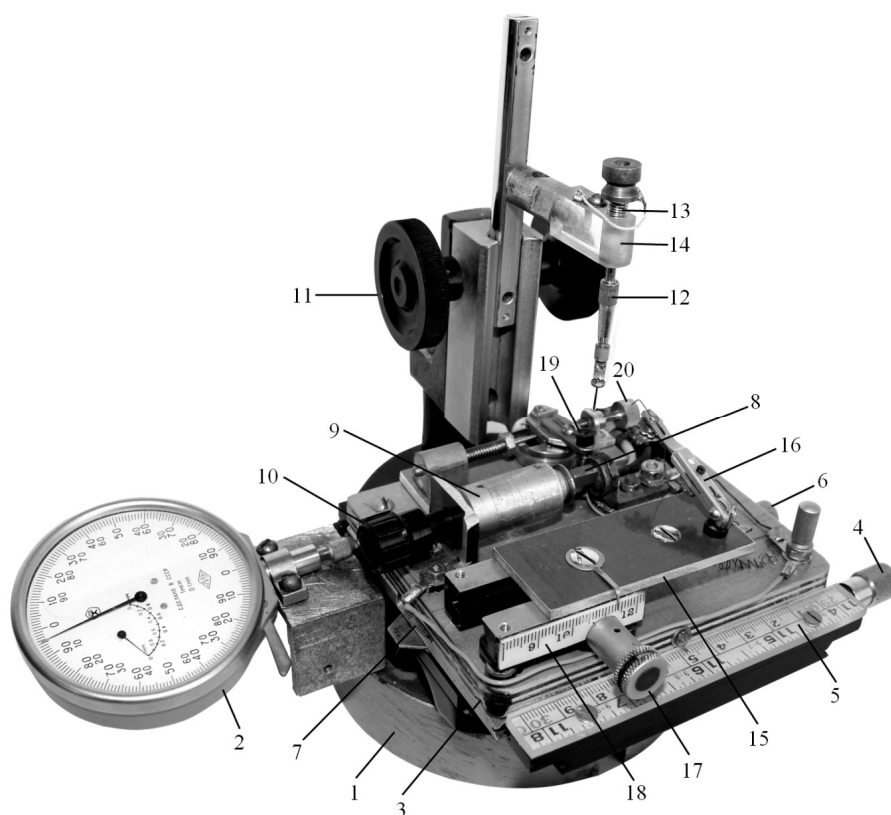


Рис. 1: Фотография измерительной установки

Такое крепление держателя позволяет плавно регулировать давление зонда на поверхность полупроводника. Перед началом измерений образец с дефектами в приповерхностном слое, введенными, например, деформированием при $T = 300$ К [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 τ_{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 τ_l в приповерхностном слое образца, а при больших временах - τ_v в его объеме [5]. Перемещая образец по двум направлениям, можно находить τ в любой точке на поверхности [6].

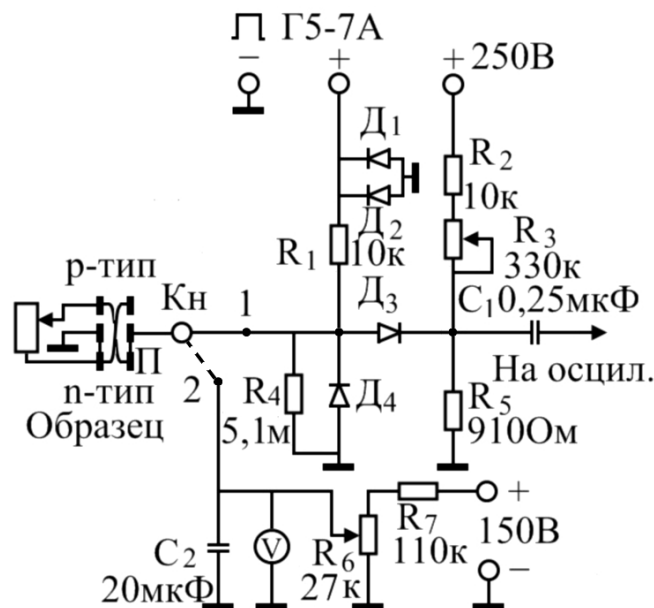


Рис. 2: Электрическая схема измерения времени жизни неравновесных носителей заряда импульсным методом модуляции проводимости

II. Фотоэлектрический метод. Определение диффузионной длины основано на измерении пространственного распределения концентрации неравновесных носителей заряда, возбуждаемых светом [7,8]. Перед измерениями L_D 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.

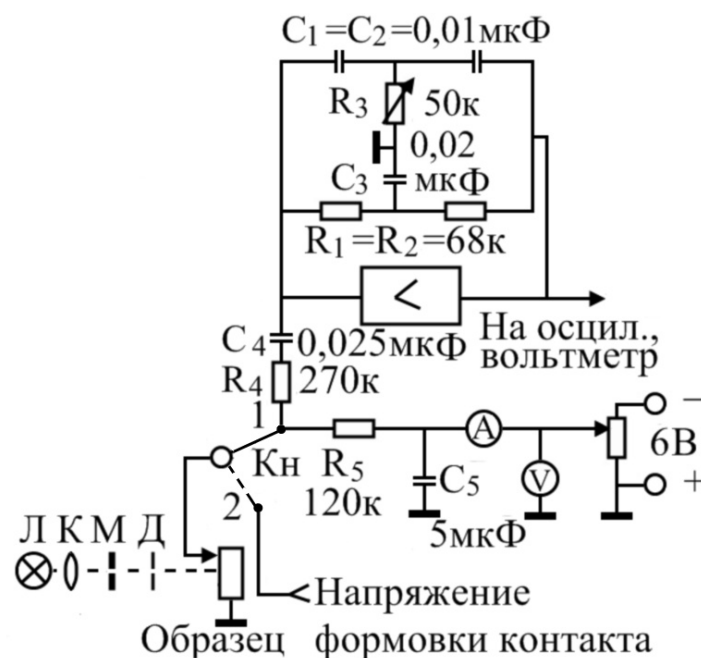


Рис. 3: Электрическая схема измерения диффузионной длины носителей заряда фотоэлектрическим методом

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 высокий, 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 τ неосновных носителей заряда. Значение τ 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.