

PACS:85.60.Dw,73.40.Lq  
УДК:621.315.592

## Измерение времени жизни неосновных носителей заряда в приповерхностном слое монокристаллического Ge зондовым методом

А.И. Уколов<sup>1</sup>, В.А. Надточий<sup>1</sup>, Н.Н. Голоденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Славянский государственный педагогический университет,  
Украина, Донецкая обл., 84116, г. Славянск, ул. Генерала Батюка, 19  
<sup>2</sup>Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
Украина, Донецкая обл., 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2

Исследовано влияние дефектов структуры, созданных в приповерхностном слое монокристаллического германия резанием и деформированием одноосным сжатием с одновременным ультразвуковым облучением при температуре 310 К, на время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$ . Измерения выполнены импульсным методом модуляции проводимости в точечном контакте с поверхностью образцов Ge и методом подвижного светового зонда. Показано, что при малых задержках измерительного импульса относительно инжектирующего в первом методе можно определять время жизни в приповерхностном дефектном слое. Сопоставление с методом подвижного светового зонда показало расхождение результатов не более 12%.

**Ключевые слова:** германий, время жизни, дефекты структуры, приповерхностный слой

Вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду у приповерхневому шарі монокристалічного Ge зондовим методом О.І. Уколов, В.О. Надточій, М.М. Голоденко

Досліджено вплив дефектів структури, створених у приповерхневому шарі монокристалічного германію різанням та деформуванням одноосним стискуванням з одночасним ультразвуковим опроміненням при температурі 310К, на час життя неосновних носіїв заряду  $\tau$ . Вимірювання виконані імпульсним методом модуляції провідності у точковому контакті з поверхнею зразків Ge та за методом рухомого світлового зонду. Показано, що при малих затримках вимірювального імпульсу відносно інжектваного у першому методі можна визначати час життя у приповерхневому дефектному шарі. Порівняння з методом рухомого світлового зонду показало розбіжність результатів не більше 12%.

**Ключові слова:** германій, час життя, дефекти структури, приповерхневий шар

Influence of structure defects created in the subsurface layer of germanium single-crystal by cutting and uniaxial pressing deformation with simultaneous ultrasonic irradiation at the temperature 310 K on the life time  $\tau$  of minority charge carriers is investigated. Measurements are executed by the pulse method of modulation of conductivity in a point contact with the surface of Ge specimens and by the method of a movable light probe. It is proved that at the small delays of measuring pulse relatively of injecting one the first method allows to determine life time in the subsurface defective layer. Comparison with the method of a movable light probe has shown divergence of results no more than 12 %.

**Keywords:** germanium, life time, defects structure, subsurface layer

Измерение времени жизни  $\tau$  неравновесных носителей заряда в приповерхностных слоях необходимы в тех случаях, когда выращенные кристаллы полупроводников подвергаются различного рода механическим воздействиям (деформированию, шлифованию и полированию), легированию, облучению частицами высоких энергий, вызывая резкое увеличение плотности структурных дефектов. В лабораторных и производственных условиях широко используется метод модуляции проводимости в точечном контакте металлического зонда с

поверхностью полупроводника [1,2], рекомендованный для определения времени жизни в объеме кристалла. В данной работе исследовались возможности зондового метода применительно к тонким приповерхностным слоям.

### Объекты и методика исследований

Измерения  $\tau$  выполнены на образцах Ge *n*- и *p*-типа проводимости (ГЭ45Г3 и ГДГ40, по сертификату  $\tau=200-250$ мкс) с введенными дефектами структуры в

приповерхностный слой. Форма образцов *n*-Ge имела вид прямоугольных параллелепипедов с размерами  $4 \times 4 \times 10$  мм<sup>3</sup> и боковыми поверхностями (110), (112), (111). Кроме того, из образцов Ge *n*- и *p*- типа были подготовлены тонкие ( $a=200$  мкм.) пластины с плоскостью (111).

Сущность метода заключается в следующем: на образце устанавливается металлический зонд и через точечный контакт с поверхностью подаются в пропускном направлении два прямоугольных (инжектирующий и измерительный) импульсы тока, равных по амплитуде и сдвинутых на время задержки  $t_d$  [1,2]. Импульсы напряжения на образце не повторяют форму импульсов тока, а имеют спад, обусловленный возрастанием концентрации носителей заряда и уменьшением сопротивления образца (рис. 1). Время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  в объеме кристалла определяют из наклона прямой линии в координатах  $\ln[U_2(\infty) - U_2(t)]$  и  $t_d$  при временах задержки  $> \tau$  [1,2].

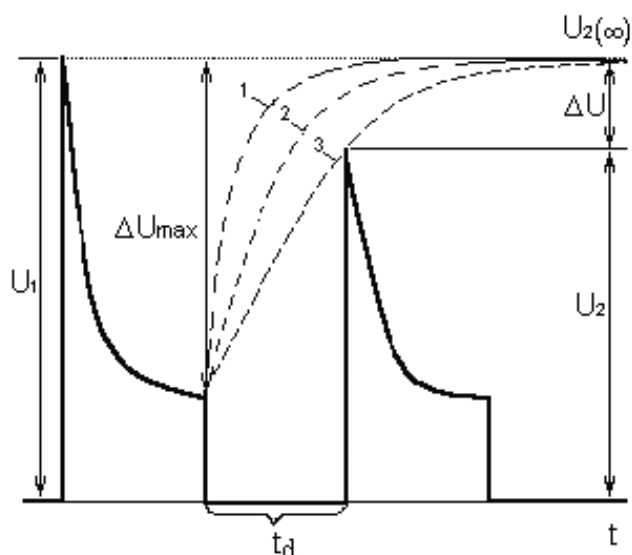


Рис.1. Зависимости амплитуды измерительного импульса  $U_2$  от времени задержки  $t_d$  относительно инжектирующего  $U_1$  для образцов с различной плотностью дефектов  $n_d$  (для кривых 1–3  $n_{d1} > n_{d2} > n_{d3}$ )

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В первой серии экспериментов в приповерхностный слой кристаллов вводились дефекты обработки. В процессе измерений было обнаружено, что зависимости  $U_2(t_d)$  отличаются для образцов Ge с различной плотностью дефектов  $n_d$  приповерхностного слоя (рис.1): большей концентрации  $n_d$  соответствует более быстрое восстановление  $U_2$  к уровню  $U_1$ . Это

отличие наиболее заметно при малых временах задержки  $t_d < 100$  мкс измерительного импульса относительно инжектирующего. Для численных расчетов времени жизни неосновных носителей заряда снимались нормированные зависимости  $y = \ln(\Delta U / \Delta U_{\max})$  от времени задержки  $t_d$ . Зависимость  $y(t_d)$  для образца Ge с введенными в приповерхностный слой дефектами, созданными резкой отрезным кругом типа АСН 60-40, не представляется прямой линией (рис. 2, кривая 1). Кривая 2 снята для этого же образца после удаления дефектного слоя травлением в смеси  $\text{HNO}_3:\text{HF}=5:3$  и затем в 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Из сравнения этих зависимостей следует, что начальный участок (0а) кривой 1 проявляется в связи с наличием дефектного приповерхностного слоя, поскольку он не обнаруживается после химического травления. Такой же вывод следует из зависимостей 3,4 (рис. 2) для тонких пластин Ge ( $a=200$  мкм) с дефектами, созданными по всей толщине вырезанием отрезным кругом. Измерения выполнены после химического травления пластин в кипящем 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . На этих зависимостях второй, более пологий участок, по которому определяют  $\tau$  в объеме кристалла, не проявляется.

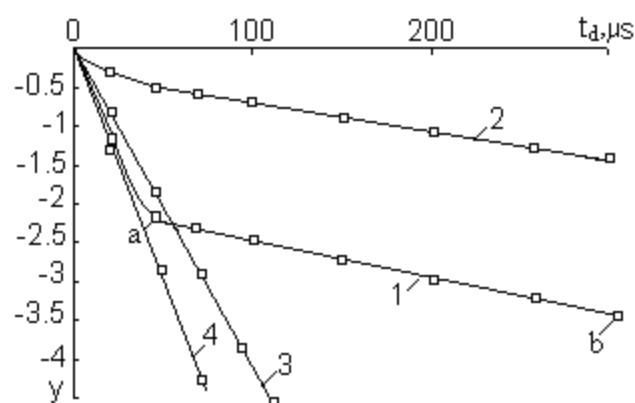


Рис.2. Графики зависимостей  $y(t_d)$  для образцов после резания диском: 1 – для кристалла *n*-Ge с дефектами в приповерхностном слое; 2 – для этого же образца после удаления дефектного слоя; 3,4 – для тонких пластин Ge *n*- и *p*-типа соответственно

Во второй серии экспериментов дефекты в приповерхностный слой кристаллов вводились деформированием одноосным сжатием с одновременным ультразвуковым облучением при  $T=310\text{K}$  [3,4]. Использовали образцы *n*-Ge, предварительно обработанные после резки механическим и химико-динамическим полированием для полного удаления дефектов. Деформирование создавали вдоль оси [110], совпадающей с большим измерением. Условия деформирования [3,4] обеспечивали генерацию дефектов типа кластеров и дислокационных петель от внутренних источников

на глубине до 50 мкм. Затем проводили послойное удаление введенных дефектов химическим травлением и измерения  $\tau$ . Эти результаты приведены на рис.3 для разных толщин в микрометрах снятого приповерхностного слоя. Как и в первом примере (рис.2), наличие деформационных дефектов приводит к появлению на кривых 1-4 (рис.3) участков повышенной крутизны в области А (слева от пунктирной линии) при малых задержках  $t_d$  измерительного импульса. Как показали структурные исследования [3], деформирование образцов Ge при температурах ниже  $0,35T_{\text{пл}}$  вызывает повышенную концентрацию дефектов вблизи поверхности, уменьшающуюся по направлению вглубь кристалла. Такое неоднородное распределение концентрации проявляется как плавное уменьшение крутизны кривых в области А на рис. 3.

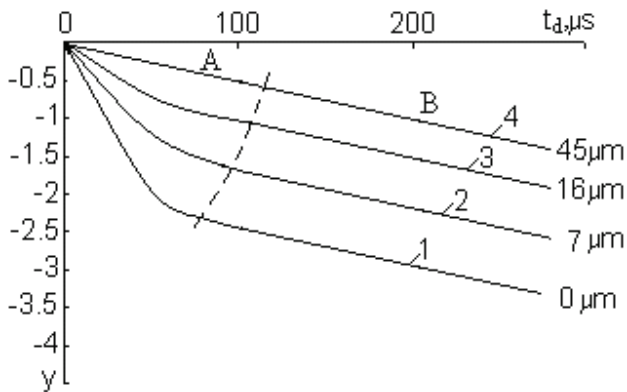


Рис.3. Нормированные зависимости измерительного импульса от времени задержки для деформированных сжатием образцов *n*-Ge. Возле кривых указана толщина удаленного химическим травлением дефектного слоя

Рассмотрим возможность оценки времени жизни неравновесных носителей заряда в приповерхностном слое с дефектами. При наличии нескольких видов рекомбинации эффективное время жизни носителей можно найти из выражения

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \sum_i \frac{1}{\tau_i} \quad (1)$$

Для тонкой пластины *n*-Ge с учетом введенных дефектов структуры и влияния поверхности эффективное время жизни можно определить как [5,6]

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_l} + \frac{1}{\tau_s}, \quad (2)$$

где  $\frac{1}{\tau_s} = \frac{2s}{a}$ ;  $\tau_l$  – время жизни, учитывающее

рекомбинацию носителей на структурных дефектах в пластине;  $\tau_s$  – поверхностное время жизни;  $s$  – скорость поверхностной рекомбинации;  $a$  – толщина пластины. Найденное из графика 3 (рис. 2)  $\tau_{\text{eff}} = 28,6$  мкс. С учетом  $a=200$  мкм и скорости поверхностной рекомбинации после травления пластины Ge в перекиси водорода  $s=50$  см/с [7] по формуле (2) получим  $\tau_l = 33,3$  мкс.

Для образца *n*-Ge в форме прямоугольного параллелепипеда высотой  $L=10$ мм и основанием  $a \times w = 4 \times 4$  мм<sup>2</sup> при  $s \ll 2D/a$ , где  $D$  – коэффициент биполярной диффузии можно найти эффективное время жизни  $\tau_{\text{eff}}$  с учетом приповерхностного дефектного слоя [6,5]

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_l} + \frac{1}{\tau_s} \quad (3)$$

где  $\tau_v$  – время жизни для объема кристалла,

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{2s}{a}; \bar{a} = \frac{a}{1 + \alpha + \beta}, \quad \bar{a} = 1,78 \text{ мм} - \text{учитывает}$$

геометрию образца через коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{a}{L}, \beta = \frac{a}{w}$$

участку (ab) кривой 1 (рис.2)  $\tau_v \approx 200$  мкс, а по участку (0a) этой же зависимости время жизни  $\tau_{\text{eff}} = 22,7$  мкс. Тогда рассчитанное по формуле (3) время жизни в дефектном слое  $\tau_l = 26$  мкс.

Измеренные значения времени жизни  $\tau_{\text{eff}}$  неосновных носителей заряда сопоставляли с результатами измерений фотоэлектрическим методом, в котором  $\tau$  определяли через диффузионную длину  $L_D$ . Условия эксперимента [2] обеспечивали равномерную генерацию неравновесных носителей по глубине образца и использование формулы  $L_D = 0,43 \Delta x / \Delta \lg U$ , где  $x$  – расстояние между световой полоской и коллектором, а  $U$  – напряжение на сопротивлении нагрузки в коллекторной цепи. Тогда  $\tau_{\text{eff}} = L_D^2 / D$ , где  $D$  – коэффициент биполярной диффузии носителей заряда, найденный нами методом движущейся световой полосы [8] и равный  $45,5$  см<sup>2</sup>/с для германия марки ГЭ45Г3. Результаты измерений  $\lg U(x)$  приведены на рис.4. Для удобства сравнения результатов измерений методом модуляции проводимости (рис.2) и фотоэлектрическим методом (рис.4) нумерации кривых для одних и тех же образцов и условий обработки одинаковые. Результаты измерений и вычислений эффективных значений времени жизни неосновных носителей обоими методами сведены в таблице, из которой следует, что найденные  $\tau_{\text{eff}}$  в поверхностном слое этими методами различаются не более, чем на 12%. Величину  $\tau$  в Ge, как известно [5], определяют центры рекомбинации. В некоторых случаях [5]  $\tau$  может

изменяться и под влиянием центров прилипания, влияние которых можно выявить дополнительным внешним освещением. На рис.4 кривой 1 показано, что подсветка в данных условиях совершенно не влияет на результаты измерений.

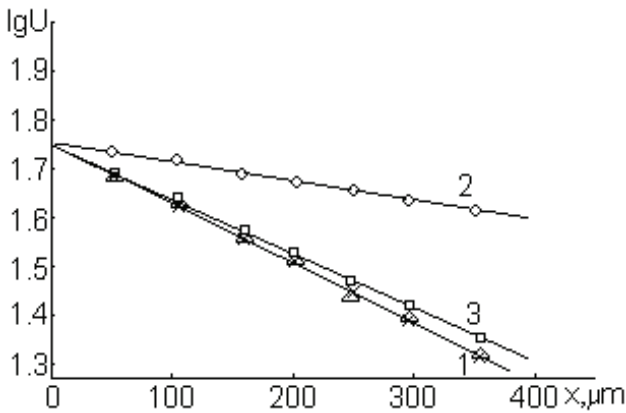


Рис.4. Графики зависимости  $\lg U(x)$ : 1 – для кристалла  $n$ -Ge с дефектным слоем ( $\times$  - измерения с подсветкой,  $\Delta$  – без подсветки); 2 – после удаления дефектного слоя химическим травлением; 3 – для тонкой пластины  $n$ -Ge с дефектами

Полученные результаты свидетельствуют, что введение дефектов структуры в поверхностный слой кристалла Ge приводит к появлению на временной зависимости  $y(t_d)$  участка повышений крутизны при малых временах задержки измерительного импульса, по которому можно определять время жизни неосновных носителей заряда в приповерхностном слое. Достоинством зондового метода модуляции проводимости является его локальность измерений [2], которая определяется малыми размерами (несколько микрометров) области контакта с поверхностью кристалла. Это дает возможность использовать его, как и зондовые методы структурного анализа (атомно силовую и туннельную микроскопию [9]) для измерений на полупроводниковых микроструктурах.

Таблица.

Значения  $\tau_{eff}$  (мкс.) для двух методик измерений

График	№1	№2	№3
Метод модуляции проводимости	участок (0a) 22,7	192	28,6
Метод светового зонда	25,6	194	31,1

1. М.И. Иглицын, Ю.А. Концевой, В.Д. Кудин, А.А. Мейер. ЖТФ, **27**,7(1957).
2. Л.П. Павлов. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. Высшая школа, Москва (1987).

3. V.Nadtochiy, N.Golodenko, N. Nechvolod. Functional Materials, **12**, 1 (2005).
4. V.Nadtochiy, N.Golodenko, N.Nechvolod. Functional Materials, **10**, 4 (2003).
5. Г.П. Пека. Физика поверхности полупроводников. Изд. Киевского ун-та, Киев (1967).
6. В.А. Рожков, М.А. Родионов, А.В. Пашин. Вестник СамГУ, естественнонаучная серия (2004).
7. L.I. Berezhinsky, E.F. Venger, I.E. Matyash, B.K. Serdega. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, **7**, 4 (2004).
8. О.В. Сорокин. ЖТФ, **26**, 11 (1956).
9. F. Giessibl. Reviews of Modern Physics, **75**, 3 (2003).