РАДИОФИЗИКА

УДК 621.382 ГРНТИ 47.13.11
DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).631-638 Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ДЛИН НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НЕОДНОРОДНО ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЯХ

Ариас Е. А., Гаврушко В. В., Карачинов В. А., Петров В. М.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Рассматривается метод определения диффузионных длин неосновных носителей заряда, основанный на анализе спектральных характеристик планарного электронно-дырочного перехода. Толщина освещаемой области ступенчато уменьшалась методом химического травления. По изменению сигнала для излучения в области сильного поглощения определялась эффективная длина затягивания неосновных носителей заряда. При последовательном удалении слоев регистрировалось изменение электропроводности освещаемой области. Это позволило построить профиль легирования и определить напряженность встроенного электрического поля неоднородно легированного слоя. Полученные результаты дали возможность рассчитать диффузионную длину неосновных носителей заряда. Приводится пример реализации описанного метода для фотодиода на основе InSb. Предлагаемая методика может быть эффективно использована для определения небольших значений диффузионных длин неоднородно легированных слоев.

Ключевые слова: диффузионная длина, спектральная характеристика, фототок, травление, профиль легирования, электрическое поле

Для цитирования: Ариас Е. А., Гаврушко В. В., Карачинов В. А., Петров В. М. О методике определения диффузионных длин неосновных носителей заряда в неоднородно легированных слоях // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 631-638. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).631-638

Research Article

ON THE METHOD OF DETERMINING THE DIFFUSION LENGTHS OF NON-BASIC CHARGE CARRIERS IN INHOMOGENEOUSLY DOPED LAYERS

Arias E. A., Gavrushko V. V., Karachinov V. A., Petrov V. M.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The paper considers a method for determining the diffusion lengths of non-basic charge carriers based on the analysis of the spectral characteristics of a planar electron-hole transition. The thickness of the illuminated area was reduced by chemical etching. By changing the signal for radiation in the region of strong absorption, the effective length of the tightening of non-basic charge carriers was determined. With removal of layers, a change in the electrical conductivity of the illuminated area was recorded. This made it possible to construct the doping profile and determine the intensity of the built-in electric field. The obtained results made it possible to calculate the diffusion length of the non-basic charge carriers. An example of implementation of the described method for an InSb-based photodiode is given. The proposed technique can be effectively used to determine small values of diffusion lengths of inhomogeneously alloyed layers.

Keywords: diffusion length, spectral characteristic, photocurrent, etching, doping profile, electric field

For citation: Arias E. A., Gavrushko V. V., Karachinov V. A., Petrov V. M. On the method of determining the diffusion lengths of non-basic charge carriers in inhomogeneously doped layers **//** Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 631-638. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).631-638

Введение

Знание диффузионных длин неосновных носителей заряда (L_n или L_p) необходимо для расчета ряда важнейших параметров фоторезисторов [1] и фотодиодов [2-5] таких, как токовая чувствительность, коэффициент усиления, обратные токи и др. Определение диффузионных длин возможно осуществить на основе оптических измерений [6]. Метод основан на том, что стационарное распределение концентрации неосновных неравновесных носителей заряда в области тени является простой функцией (экспонентой) длины диффузионного смещения. Для реализации метода в работе [7] предлагается перемещать металлический зонд-коллектор вдоль образца, приближая его к освещаемой области. В работе [8] описан метод перемещения оптического зонда с использованием механического модулятора света, позволяющего повысить чувствительность измерительного макета. Интересным является метод с использованием в качестве источника излучение светодиода [9], значительно упрощающий конструкцию установки. Вместе с тем для всех отмеченных методов существует условие соблюдения соотношения значения диффузионной длины и геометрических размеров световой полосы. Так, в работе [10] при использовании метода подвижного светового зонда приводится соотношение между допустимой областью регистрации сигналов r и размерами (шириной ω и длиной l) светового луча: $5\omega < r < ¼\ l$. Это создает технические проблемы в случае малых значений диффузионной длины, требуя очень узких световых полос. Кроме того, следует отметить влияние поверхностной рекомбинации на результаты [11], поскольку измерения проводятся в приповерхностной области. Все широко используемые методы пригодны для однородно легированных образцов. В случае неоднородно легированных слоев возникает встроенное электрическое поле, которое влияет на измеряемые экспериментально результаты [8]. В настоящей работе предлагается апробированный метод определения диффузионных длин неосновных носителей заряда из анализа изменения спектральных характеристик фоточувствительных структур при уменьшении толщины освещаемой области, свободный от указанных недостатков.

Методика исследования

Согласно [12] для световой части плотности тока через *p-n* переход при монохроматическом освещении можно записать:

$$I_\phi = e\beta N_0(1-R)\left\{\frac{\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 2\varepsilon_p \alpha L_n - 1}\left[\left(\varepsilon_p - \alpha L_n - \sqrt{\varepsilon_p^2+1}\frac{\delta' \ell_p}{\delta \ell_p}\right)\times\right.\right.$$

$$\times \exp\left(-\alpha \ell_p\right) + \frac{\frac{SL_n}{D_n} - 2\varepsilon_p + \alpha L_n}{\delta \ell_p}\cdot \exp\left(-\varepsilon_p \frac{\ell_p}{L_n}\right)\Bigg] + \frac{\alpha L_p}{\alpha L_p + \varepsilon_n + \sqrt{\varepsilon_n^2+1}}\times$$

$$\left.\left.\times \exp\left(-\alpha \ell_p\right)\right\}\right.$$

где: β – квантовый выход;

N_0 – число фотонов, падающих на единицу поверхности за 1 сек;

L_n и L_p – диффузионные длины электронов в *p*-области и дырок в *n*-области;

l_p – толщина *p*-области.

α – коэффициент поглощения;

ε_p и ε_n – приведенные тянущие электрические поля в *p*- и *n*-областях:

$$\varepsilon_p = \frac{eE_p L_n}{2kT}, \quad \varepsilon_n = \frac{eE_n L_p}{2kT};$$

$$\delta_{\ell_p} = \frac{\frac{SL_n}{D_n} - \varepsilon_p}{\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1}} sh\left[\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1} \cdot \frac{\ell_p}{L_n}\right] + ch\left[\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1} \cdot \frac{\ell_p}{L_n}\right]$$

$$\delta'_{\ell_p} = \frac{\frac{SL_n}{D_n} - \varepsilon_p}{\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1}} ch\left[\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1} \cdot \frac{\ell_p}{L_n}\right] + sh\left[\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1} \cdot \frac{\ell_p}{L_n}\right]$$

Здесь: S – скорость поверхностной рекомбинации;

D_n – коэффициент диффузии электронов в *p*-области.

E_p и E_n – напряженности электрических полей в *p*- и *n*-областях.

В условиях сильного поглощения:

$$\alpha l_p >> 1, \ \alpha L_n >> 1$$

для плотности фототока будет справедливым выражение:

$$I_\phi = e\beta N_0 (1 - R) \frac{\alpha L_n \left(\alpha L_n - 2\varepsilon_p + \frac{SL_n}{D_n}\right)}{\alpha^2 L_n^2 - 2\varepsilon_p \alpha L_n - 1} \cdot \frac{\exp\left(-\varepsilon_p \frac{\ell_n}{L_n}\right)}{\delta \ell_p}$$

$$I_\phi = I_{\phi o} \frac{\exp\left(-\varepsilon_p \frac{\ell_n}{L_n}\right)}{\delta \ell_p}.$$

Если с уменьшением l_p поток падающих квантов, коэффициент отражения, скорость поверхностной рекомбинации, напряженность «встроенного» поля остаются постоянными, что обычно выполняется, то изменение фототока с изменением l_p запишется в виде:

$$d \ln I_\phi = \left(-\frac{\varepsilon_p}{L_n} + \frac{\delta' \ell_p}{\delta \ell_p} \frac{\sqrt{\varepsilon_p^2 + 1}}{L_n}\right) d\ell_p.$$

Анализ отношения $\frac{\delta_{lp}^{I}}{\delta_{l_p}}$ в зависимости от глубины залегания перехода показал, что при выполнении условия:

$$\frac{\ell_p}{L_n}\sqrt{\varepsilon_p^2+1} \geq 2 \qquad (*)$$

величина $\frac{\delta_{lp}^{I}}{\delta_{l_p}}$ с точностью ≈2% равна единице при любых значениях $\frac{SL_n}{D_n}$. Таким образом, при глубинах залегания *p-n* перехода, достаточно больших для выполнения условия (*), приращение логарифма фототока с уменьшением l_p будет зависеть только от напряженности встроенного поля E_p и от диффузионной длины электронов. Последняя может быть найдена, если величину E_p определить из независимых измерений.

Пример использования методики. В качестве объекта исследования была выбрана фоточувствительная структура на основе *InSb*. Фотодиод был получен диффузией акцепторов в исходный материал n-типа с концентрацией носителей заряда 4,3•10^{14} $см^{-3}$. Освещение производилось перпендикулярно плоскости перехода со стороны *p*-области. На рисунке 1 приведено семейство кривых фототока короткого замыкания, отнесенного к равному числу падающих квантов в зависимости от длины волны для одного из образцов. Каждая кривая отвечала определенной глубине залегания p-n перехода: первоначальная глубина, в данном случае, составляла 25 мкм, затем она последовательно уменьшалась химическим травлением. Идентичная обработка кристалла после каждого травления должна была обеспечить практически неизменную скорость рекомбинации на поверхности *p*-слоя. Спектральные кривые имели характерный для невырожденного *p*-материала вид: длинноволновая граница фотоответа расположена в районе длин волн 5,35-5,4 мкм, что соответствовало пороговой энергии квантов 0,225-0,23 эВ. В районе 2,7-2,8 мкм наблюдалась ступенька фотоответа, обусловленная увеличением квантового выхода фотоносителей в результате ударной ионизации. Энергия фотонов при этих длинах волн hv = 0,45 эВ соответствовала первому порогу ударной ионизации электронами при возбуждении первичных электронов светом из валентной зоны [13].

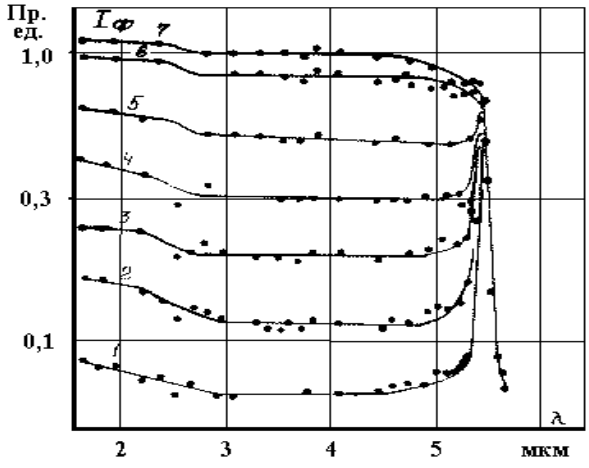

Рисунок 1. Изменение спектральной чувствительности *p-n* перехода при последовательном утонении *p*-области на величину *h*. *h* = (1)-0,6; (2)-5; (3)-8,5; (4)-11,6; (5)-15; (6)-19,5; (7)-22 мкм

С приближением освещаемой поверхности к плоскости р-п перехода наблюдался рост фототока, особенно значительный в области сильного поглощения (рисунок 2).

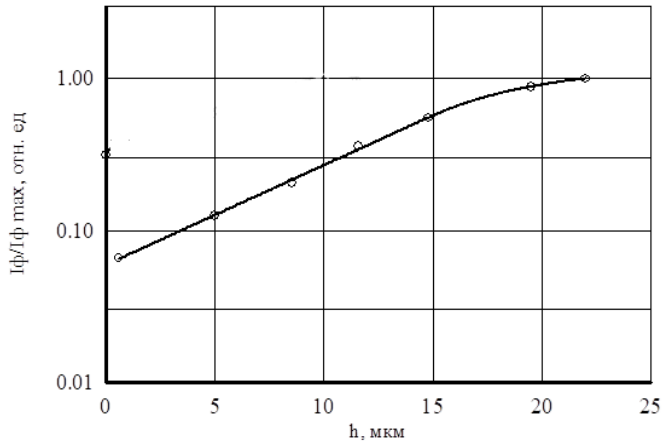

Рисунок 2. Зависимость сигнала от толщины удаленной области для λ=2,17 мкм

Фототок с приближением освещаемой поверхности к *p-n* переходу возрастал экспоненциально. Замедление роста фототока наблюдалось лишь при малых глубинах залегания *p-n* перехода, когда отношение $\frac{\delta_{l_p}^{I}}{\delta_{l_p}}$ заметно отличалось от единицы. Кроме того, на результаты измерения могла сказываться возрастающая величина сопротивления растекания *p*-слоя.

По экспоненциальному участку зависимости $lnI_{ф}=f(l_p)$ определялась эффективная длина затягивания электронов $L_{эф}$:

$$L_{эф} = \frac{d\ln I_{\phi}}{dl_p}$$

Напряженность поля в исследованных образцах рассчитывалась из концентрационных профилей легирования *p*-области, построенных по экспериментально измеренным зависимостям электропроводности от толщины диффузионного слоя. Пример профиля легирования приведен на рисунке 3.

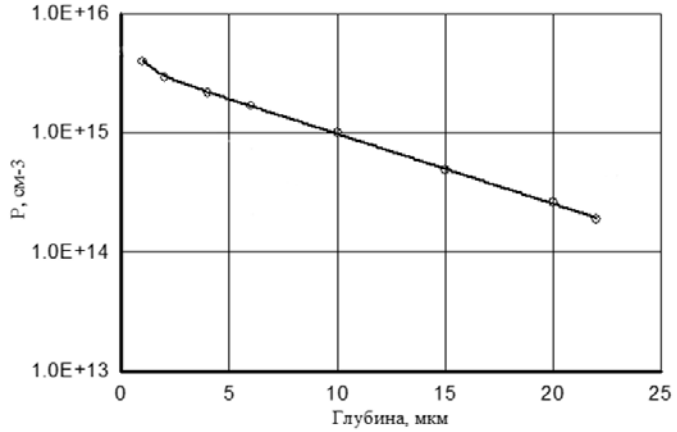

Рисунок 3. Профиль легирования *p*-области

За исключением приповерхностного слоя (1-2 мкм) распределение избыточных акцепторов по глубине *p*-области являлось экспоненциальным и «встроенное» внутреннее поле имело постоянную величину:

$$\boldsymbol{E_p = \frac{kT}{e}\frac{1}{L_d}},$$

где $\boldsymbol{L_d}$ – характеристическая длина в профиле легирования *p*-области.

Диффузионная длина электронов для экспоненциального участка роста фототока может быть найдена как:

$$L_n = \sqrt{\frac{L_{эф} \bullet L_D}{1 + \frac{L_D}{L_{эф}}}},$$

Для приведенного примера получены следующие значения: $L_{эф}$ = 6,6 мкм, E_p = 9,2 В/см, L_n = 4,85 мкм. Сравнение с данными по L_n в однородно легированном материале *p*- *InSb* (L_n = 13 мкм при p= 3,7 •10^{14} $см^{-3}$) [14] показало, что наши значения меньше в 2...3 раза. Это можно связать с наличием дополнительных рассеивающих центров из-за перекомпенсации материала в процессе получения диффузионного слоя.

Заключение

Таким образом предлагаемая методика может быть эффективно использована с целью определения диффузионных длин неосновных носителей заряда для неоднородно легированных слоев в случаях небольших значений L_n. Условием применимости методики является необходимость использование слоев с толщиной, значительно превышающей L_n. Эффективная длина затягивания электронов может заметно возрастать с увеличением «тянущего» поля. В реально осуществимых случаях введением встроенного электрического поля напряженностью 25...50 В/см для *InSb* можно в 2...5 раз увеличить $L_{эф}$ по сравнению с L_n в соответствующем однородно легированном материале *p*-типа.

Список литературы

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. Москва: Физматкнига, 2012. 363 с.

2. Киес Р. Дж., Крузе П. В., Патли Э. Г., Лонг Д., Цаиккер Г. Р., Милтон А. Ф., Тейч М. К. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / перевод с английского В. И. Стафеева. Москва: Радио и связь, 1985. 328 с.

3. Смирнов В. И. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие Ульяновск: УлГТУ, 2022. 203 с.

4. Ариас Е. А., Гаврушко В. В. Криогенный фотоприемник с изменяемой спектральной характеристикой // Вестник НовГУ. 2022. 3(128). 75-77. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).75-77

5. Гаврушко В. В., Ионов А. С., Кадриев О. Р., Ласткин В. А. Кремниевые

дифференциальные фотоприемники. Технология, характеристики, применение // Журнал технической физики. 2023. 93(9). 1353-1604.

6. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Москва: Физматгиз, 1963. 494 с.

7. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / под редакцией К. В. Шалимовой. Москва: Высшая школа, 1967. 464 с.

8. Шутов Д. А., Ситанов Д. В. Методы исследований материалов и структур: лабораторный практикум. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2009. 84 с.

9. Битюрин Ю. А., Оболенский С. В., Мельников А. С., Демарина Н. В., Волкова Е. В., Пузанов А. С. Измерение времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей заряда в полупроводниках: практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2011. 21 с.

10. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: учебник / 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Высш. школа, 1987. 239 с.

11. Попов В. М. Определение диффузионной длины неосновных носителей заряда в полупроводнике по динамическим неравновесным вольт-амперным характеристикам МДП структур // Физика и техника полупроводников. 2014. 48(7). 902-908.

12. Субашиев В. К. Вентильный фотоэффект на p-n переходе при произвольной функции генерации // Физика твердого тела. 1961. 3(12). 3571-3580.

13. Волков А. С., Гуткин А. А., Кумеков С. Е. Ударная ионизация электронами в InSb // Физика и техника полупроводников. 1970. 4(6). 1856-1860.

14. Гим Гван Дё. Исследование фотоэлектрических явлений в структурах с Р-П-переходом на базе антимонида индия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 01.04.10. Ленинград, 1984. 221 с.

References

1. Filachev A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A. Tverdotel'naia fotoelektronika. Fotorezistory i fotopriemnye ustroistva [Solid state photoelectronics. Photoresistors and photodetectors]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2012. 363 p.

2. Keyes R. J., Kruse P. W., Long D., Milt A. F., Putley E. H., Teich M. C., Zwicker H. R. Optical and Infrared Detectors. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 1980. (Russ. ed.: Kies R. Dzh., Kruze P. V., Patli E. G., Long D., Tsaikker G. R., Milton A. F., Teich M. K. Fotopriemniki vidimogo i IK diapazonov. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1985. 328 p.)

3. Smirnov V. I. Fizika poluprovodnikovykh priborov [Physics of semiconductors]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2022. 203 p.

4. Arias E. A., Gavrushko V. V. Kriogennyi fotopriemnik s izmeniaemoi spektral'noi kharakteristikoi [Cryogenic photodetector with variable spectral characteristics] // Vestnik NovSU. 2022. 3(128). 75-77. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).75-77

5. Gavrushko V. V., Ionov A. S., Kadriev O. R., Lastkin V. A. Kremnievye differentsial'nye fotopriemniki. Tekhnologiia, kharakteristiki, primenenie [Silicon differential imaging devices. Technology, parameters, and application] // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2023. 93(9). 1353-1363

6. Ryvkin S. M. Fotoelektricheskie iavleniia v poluprovodnikakh [Photoelectric phenomena in semiconductors]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 494 p.

7. Shalimova K. V., ed. Praktikum po poluprovodnikam i poluprovodnikovym priboram [Semiconductor devices tutorial]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1967. 464 p.

8. Shutov D. A., Sitanov D. V. Metody issledovanii materialov i struktur [Exploration methods for studying materials and structures]. Ivanovo, ISUCT Publ., 2009. 84 p.

9. Bitiurin Iu. A., Obolenskii S. V., Mel'nikov A. S., Demarina N. V., Volkova E. V., Puzanov A. S. Izmerenie vremeni zhizni i diffuzionnoi dliny neosnovnykh nositelei zariada v poluprovodnikakh [Measuring the life time and diffusion length of non-basic charge carriers]. Nizhniy Novgorod, Lobachevsky University Publ., 2011. 21 p.

10. Pavlov L. P. Metody izmereniia parametrov poluprovodnikovykh materialov [Methods for measuring the parameters of semiconductor materials]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1987. 239 p.

11. Popov V. M. Determination of the diffusion length of minority charge carriers in a semiconductor from the dynamic nonequilibrium I–V characteristics of MIS structures. Semiconductors. 2014. 48(7). 875-882.

12. Subashiev V. K. Ventil'nyi fotoeffekt na r-p perekhode pri proizvol'noi funktsii generatsii [Blocking-layer photoeffect on p-n barrier for arbitrary generation function] // Fizika tverdogo tela. 1961. 3(12). 3571-3580.

13. Volkov A. S., Gutkin A. A., Kumekov S. E. Udarnaia ionizatsiia elektronami v InSb [Impact ionization by electrons in InSb]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1970. 4(6). 1856-1860.

14. Gim Gvan De. Issledovanie fotoelektricheskikh iavlenii v strukturakh s R-P-perekhodom na baze antimonida indiia [Research of photoelectric phenomena in structures with p-n barrier based on indium antimonide]. Leningrad, 1984. 221 p.

Информация об авторах

Ариас Елена Анатольевна – кандидат педагогических наук, доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5202-1215, Elena.Arias@novsu.ru

Гаврушко Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8704-6751, Valery.Gavrushko@novsu.ru

Карачинов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор, ведущий научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9252-2233, Vladimir.Karachinov@novsu.ru

Петров Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru