

## О локальном определении скоростей рекомбинации неравновесных носителей заряда в объеме и на тыльной стороне пластин кремния с $p$ - $n$ переходами бесконтактным методом

О. Г. Кошелев,\* Н. Г. Васильев†

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра общей физики

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 02.10.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

Рассмотрен бесконтактный метод определения рекомбинационных параметров локальных участков  $p(n)$  слоя кремниевых структур  $n^+ - p(n) - p^+$ . Метод основан на локальном освещении исследуемой структуры двумя различно поглощаемыми лучами света. Оба луча освещают одновременно сначала одну сторону локальной области этой структуры, а затем противоположную. Интенсивности лучей света модулируются так, что суммарная переменная фотоэдс обращается в 0. При этих условиях измеряют отношения амплитуд модуляций интенсивностей лучей. На основании таких величин нами были вычислены номограммы для раздельного определения времени жизни неравновесных носителей заряда в освещаемой части  $p(n)$  области и скорости их поверхностной рекомбинации на тыльной стороне. Номограммы вычислялись для длин волн 1064 и 808 нм при толщинах  $p(n)$  слоя 0.4 и 0.2 мм

PACS: 40.42.87, 70.78.56

УДК: 621.383.5

Ключевые слова: солнечная энергия, гетеропереход, полупроводник, солнечная батарея.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее распространенными являются солнечные элементы (СЭ) из монокристаллического кремния на основе  $p - n$  переходов [1] и гетеропереходов типа HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) на основе  $\alpha$ -Si:H/c-Si [2]. Эффективность их работы в первую очередь определяется эффективным временем жизни  $\tau_{eff}$  неравновесных носителей заряда (ННЗ) в исходных пластинах кремния, которые затем используются в качестве базовой области этих СЭ. Для определения  $\tau_{eff}$  в этих случаях широко используют так называемый  $\mu$ -PCD (microwave photoconductive decay) метод [3–5]. Метод основан на возбуждении в пластине фотопроводимости импульсом света и измерении  $\tau_{eff}$  по времени спада СВЧ фотопроводимости после его выключения. КПД СЭ в значительной мере определяется наличием участков с низкой фоточувствительностью. Выявление таких участков, т.е. определение контраста  $\tau_{eff}$ , осуществляют путем измерения СВЧ фотопроводимости при сканировании лучом света поверхности этих пластин [6].

Для анализа причин возникновения участков с низкими значениями  $\tau_{eff}$  важное значение имеет раздельное определение времени жизни ННЗ  $\tau$  в объеме исходных пластин и скорости поверхностной рекомбинации  $S$ . Разработанные для этого СВЧ методы основаны на поочередном измерении  $\tau_{eff}$  на двух длинах волн, при которых коэффициенты поглощения света значительно различны [7].

Возникновение участков с низкими значениями  $\tau_{eff}$  возможно и на последующих этапах изготовления СЭ, например, в процессе изготовления  $p - n$  или гетеропереходов. В [8] был предложен метод раздельного определения значения  $\tau$  в базовой области структуры  $n^+ - p(n) - p^+$  типа и значения  $S$  на ее тыльной стороне. Этот метод, основанный на измерении коэффициента собирания при двух длинах волн, применим в случае наличия контактов к структуре. Однако практический интерес представляет контроль контраста  $\tau$  и  $S$  сразу после нанесения сильно легированных слоев  $n^+$  и  $p^+$  типа, но до нанесения контактов. Применение СВЧ методов в этом случае не эффективно вследствие шунтирования освещаемого участка остальной частью пластины из-за токов по этим слоям [9].

Бесконтактный метод определения  $\tau_{eff}$  в локальных областях структур кремния  $n^+ - p(n) - p^+$  типа был предложен в [10, 11]. Метод основан на освещении таких областей со стороны  $p - n$  перехода сразу двумя различно поглощаемыми лучами света с длинами волн  $\lambda_2$  и  $\lambda_1$ . Лучи модулированы синусоидально так, чтобы переменные составляющие их интенсивностей были много меньше их постоянных составляющих и чтобы суммарная переменная фотоэдс обращалась в 0. Наличие компенсации определяется по отсутствию переменной фотоэдс, наведенной на обкладках конденсатора, между которыми помещена исследуемая структура. Значения  $\tau_{eff}$  вычисляются по результатам измерений в этих условиях отношений коэффициентов собирания  $Q(\lambda_2)$  и  $Q(\lambda_1)$ , соответствующих модуляции. Благодаря компенсации неосвещаемые участки  $n^+ - p(n) - p^+$  структуры не оказывают шунтирующего действия, что и позволяет использовать метод для локальных измерений  $\tau_{eff}$ .

\*E-mail: scon282@phys.msu.ru

†E-mail: bng.vasiljev@physics.msu.ru

Цель настоящей работы — рассмотреть возможность отдельного определения  $\tau$  и  $S$  кремниевых структур  $n^+p(n)-p^+$  типа без контактов путем измерений рассмотренным выше компенсационным методом.

### 1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Отличие рассматриваемого в настоящей работе метода от [10, 11] состоит в том, что для отдельного определения  $\tau$  и  $S$  предлагается использовать результаты двух независимых измерений отношений  $Q(\lambda_2)/Q(\lambda_1) \equiv Q_2/Q_1$ . А именно, измерений, соответствующих компенсации переменных фотоэдс при поочередном освещении структуры как с лицевой стороны  $Q_2^a/Q_1^a$ , так и с тыльной стороны  $Q_2^t/Q_1^t$ . Предварительно для базовой области проводились расчеты зависимостей от расстояния  $x$  до  $p-n$  перехода концентраций ННЗ, определяемых модуляцией интенсивности света. Расчеты проводились на примере  $n^+p-p^+$  структуры в одномерном приближении для случая низкого уровня инжекции на основании следующего уравнения [12]

$$D_n \frac{d^2 \vec{n}(x)}{dx^2} - \frac{\vec{n}(x)}{\vec{\tau}} + g(x) = 0, \quad (1)$$

где  $1/\vec{\tau} = 1/\tau + i2\pi f$ , где  $f$  — частота модуляции,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $D_n$  — коэффициент диффузии ННЗ (электронов) в базовой области  $p$ -типа,  $\vec{n}(x)$  — амплитуда модуляции концентрации ННЗ (в комплексной форме)

$$g(x) = g_0 \exp[-\alpha(W_f + x)], \quad (2)$$

при освещении с лицевой стороны и

$$g(x) = g_0 \exp[-\alpha(W_b + d - x)]. \quad (3)$$

при освещении с тыльной стороны,  $g_0$  [ $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ ] — амплитуда модуляции скорости генерации ННЗ на освещаемой поверхности,  $\alpha$  — коэффициент поглощения кремния на используемой длине волны,  $d$ ,  $W_f$  и  $W_b$  — толщины базовой области, а также сильно легированных  $n^+$  и  $p^+$  слоев с лицевой и тыльной сторон. Граничные условия:  $\vec{n}(0) = 0$  (благодаря компенсации переменных фототоков),  $D_n d\vec{n}(d)/dx = -S\vec{n}(d)$ .

На основании этих исходных данных для двух длин волн ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ) вычислялись зависимости модулей квантовых эффективностей (коэффициентов собирания)  $|Q_1|$  и  $|Q_2|$ , соответствующих модуляции. В случае выполнения условия  $2\pi f\tau \ll 1$  и равенства коэффициентов отражения света  $R_1$  и  $R_2$  на обеих длинах волн

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{P_1 \lambda_1}{P_2 \lambda_2}, \quad (4)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — амплитуды модуляций интенсивностей световых потоков при компенсации переменных фототоков.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для отдельного определения  $\tau$  и  $S$  на основании приведенных в предыдущем разделе соотношений были вычислены и построены номограммы, соответствующие различным параметрам структур и условиям измерений. Пример такой номограммы показан на рис. 1. По оси абсцисс и ординат отложены значения  $|Q_2^a/Q_1^a|$  и  $|Q_2^t/Q_1^t|$ , измеряемые при освещении с лицевой и тыльной сторон соответственно. Кривые вычислены при  $\lambda_1 = 1064 \text{ нм}$  ( $\alpha_1 = 10 \text{ см}^{-1}$ ),  $\lambda_2 = 808 \text{ нм}$  ( $\alpha_2 = 790 \text{ см}^{-1}$ ),  $R_1 = R_2$ ,  $f = 10 \text{ Гц}$ ,  $d = 0.4 \text{ мм}$ ,  $W_f = W_b = 0.5 \text{ мкм}$ ,  $D_n = 12 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Сплошные кривые соответствуют фиксированным значениям  $\tau$  (1000, 100, 32 и 10 мкс) при различных значениях  $S$ . Штриховые кривые соответствуют фиксированным значениям  $S$  ( $10^4$ , 3200, 1000, 320, 100 и  $10 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ) при различных значениях  $\tau$ . Например, если  $\tau = 32 \text{ мкс}$  и  $S = 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , то в условиях, соответствующих рис. 1,  $|Q_2^a/Q_1^a| = 6.2$ , а  $|Q_2^t/Q_1^t| = 0.82$ .

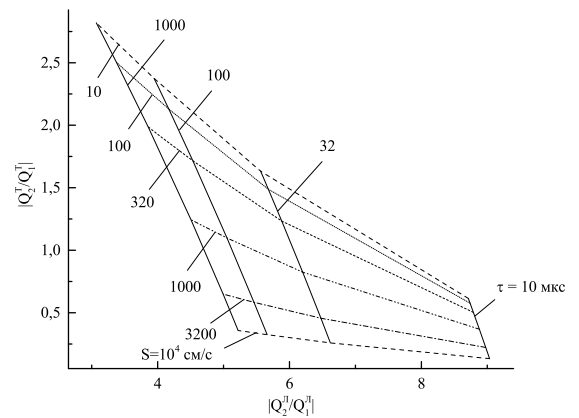


Рис. 1: Номограмма для определения  $\tau$  и  $S$  базовой области кремниевой структуры  $n^+p-p^+$  типа при  $d = 0.4 \text{ мм}$ ,  $\lambda_1 = 1064 \text{ нм}$ ,  $\lambda_2 = 808 \text{ нм}$ . Сплошные кривые соответствуют различным значениям  $\tau$ , штриховые — различным значениям  $S$ . Эти значения приведены на рисунке. Остальные параметры кривых приведены в тексте

Расчеты показали, что для получения значений  $\tau$  и  $S$  с заданной точностью допустимые ошибки измерений отношений  $|Q_2/Q_1|$  различны в зависимости от параметров структуры и условий освещения. Например, при тех же значениях  $\tau$  и  $S$  для определения  $\tau$  с точностью 10% допустимые ошибки измерений  $|Q_2^t/Q_1^t|$  и  $|Q_2^a/Q_1^a|$  должны не превышать 4 и 2% соответственно. А для определения  $S$  с такой же точностью при тех же условиях допустимые ошибки измерений этих отношений должны не превышать 4 и 0.5% соответственно. С уменьшением  $\tau$  и с увеличением  $S$  требования к точности измерений этих отношений снижаются, и наоборот. В частности, точность определения

$\tau$  существенно снижается, когда диффузионная длина НЗ  $L_n = (D_n\tau)^{0.5}$  становится больше толщины базы, а точность определения  $S$  существенно снижается, когда параметр  $SL_n/D_n > 1$ .

На точность определения  $\tau$  и  $S$  влияют также другие условия. На рис. 2 приведена номограмма аналогичная рис. 1 для случая, но когда толщина базы в 2 раза меньше (0.2 мм). Из сравнения этих рисунков видно, что изменение толщины базы приводит к существенному смещению номограммы. При этом точность измерения толщины структуры также сильно влияет на точность определения  $\tau$  и  $S$ . В частности, согласно расчетам, при тех же значениях  $\tau$  и  $S$  (32 мкс и  $1000 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ) ошибка в толщине на 1% приводит к ошибке  $\tau$  на 16% и  $S$  на 10%.

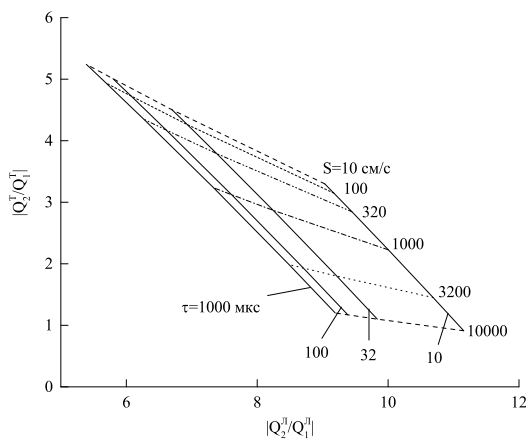


Рис. 2: Номограмма, аналогичная рис. 1 для определения  $\tau$  и  $S$  базовой области кремниевой структуры  $n^+p-p^+$  типа при  $d = 0.2 \text{ мм}$ . Остальные параметры такие же, как для рис. 1

На рис. 3 приведены номограммы для трех пар длин волн, которые соответствуют наиболее распространенным полупроводниковым лазерам. Номограмма А соответствует рис. 1 для экстремальных значений  $\tau$  (10, 1000 мкс) и  $S$  ( $10, 10^4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Номограммы Б и В вычислены для тех же экстремальных значений  $\tau$  и  $S$  при  $\lambda_{1,2} = 980, 808 \text{ нм}$  ( $\alpha_{1,2} = 95, 790 \text{ см}^{-1}$ ) и  $\lambda_{1,2} = 1064, 980 \text{ нм}$  ( $\alpha_{1,2} = 10, 95 \text{ см}^{-1}$ ) соответственно. Остальные параметры для всех трех номограмм одинаковы. Как видно, в рассматриваемых диапазонах изменений  $\tau$  и  $S$  значения  $|Q_2^T/Q_1^T|$  и  $|Q_2^S/Q_1^S|$  в первом случае меняются значительно больше, чем в остальных. Следовательно, использование лазеров с длинами волн 808 и 1064 нм из рассмотренных трех вариантов представляет наибольший интерес для реализации рассматриваемого метода.

Были проведены также расчеты для определения влияния частоты модуляции на вид номограмм. Эти расчеты показали, что номограммы практически не зависят от  $f$ , когда выполняется условие  $2\pi f\tau_{eff} \ll 1$ , где  $\tau_{eff} = \frac{\tau}{1+S\tau/d}$ , но сильно меняются при  $2\pi f\tau_{eff} > 1$ , при этом точности определения  $\tau$  и  $S$  также снижаются.

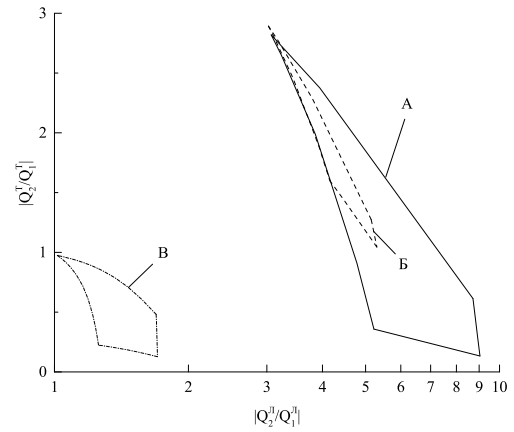


Рис. 3: Номограммы, аналогичные рис. 1 при экстремальных значениях  $\tau$  (1000, 10 мкс) и  $S$  ( $10^4, 10 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ) для трех пар длин волн. А:  $\lambda_{1,2} = 1064, 808 \text{ нм}$ , Б:  $\lambda_{1,2} = 980, 808 \text{ нм}$ , В:  $\lambda_{1,2} = 1064, 980 \text{ нм}$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен бесконтактный компенсационный метод определения фоточувствительности в локальных областях кремниевой пластины  $p$  типа, покрытой  $n^+$  и  $p^+$  слоями. Метод основан на освещении этой структуры двумя различно поглощаемыми лучами света, модулированными по интенсивности в противофазе, и измерении отношений амплитуд этих модуляций, при которых создаваемые ими переменные фототоки компенсируют друг друга.

Путем расчетов показано, что такие измерения при освещении структуры поочередно с обеих сторон позволяют раздельно определять время жизни неравновесных носителей заряда в  $p$  области такой структуры и скорость рекомбинации на ее тыльной стороне. Построены номограммы, связывающие эти параметры структуры с измеряемыми величинами.

Проведены оценки точности метода при различных параметрах  $p$  области и условиях измерений.

- 
- [1] 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference. IX. 2013, Paris.
- [2] <http://www.eltech.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2015/Orehov/Dissertaciya-12-04-2015-Orehov-D-L-pechat.pdf>
- [3] Schmidt J., Aberle A. G. J. Appl. Phys. 1997. **81**. P. 6186.
- [4] Тюрнев Н.В., Соколов Е.Б., Куцев М.В. и др. Изв. вузов. Электроника. 2001. № 1. С. 87.
- [5] Gaubas E., Kaniava A. Review of Scientific Instruments. 1996. **67**, N6. P. 2339. Doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1146943>.
- [6] Metzger W.K. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2008. **92**. P. 1123
- [7] Buczkowski A., Radzimski Z.J., Rozgonyi G.A., Shimura F. J. Appl. Phys. 1991. **69**, №9. P. 6495.
- [8] Концевой Ю.А., Брашеван Ю.В., Завадский Ю.И. и др. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. **66**, № 10. С. 32.
- [9] Кошелев О.Г., Унтила Г.Г. 2015. XII Всероссийская конференция по физике полупроводников. <http://semicond-2015.lebedev.ru/>.
- [10] Кошелев О.Г., Морозова В.А. Патент 2019890 РФ. МКИ 5H01 L21/66 (БИ 17, 1994).
- [11] Koshelev O. G., Morozova V. A. Solid-State Electronics. 1996. **9**. P. 1379.
- [12] Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971.
- 

## Local determination of nonequilibrium charge carrier recombination velocities in volume and at the rear side of the silicon wafers with $p-n$ junctions by a noncontact method

O. G. Koshelev<sup>a</sup>, N. G. Vasiljev<sup>b</sup>

Department of semiconductors, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>scon282@phys.msu.ru, <sup>b</sup>ng.vasiljev@physics.msu.ru

A noncontact method for determination of recombination parameters of  $p(n)$  layer local spaces of silicon  $n^+-p(n)-p^+$  structures is considered. The method is based on local illumination of investigated structure by two different absorbed light beams. At first both beams illuminate simultaneously one side of the local space of this structure and then — another side. The intensities of the light beams are modulated so that the sum of the alternative photo-voltage becomes equal zero. Under these conditions the ratio of the modulation amplitudes of this light beam intensities are measured. Using such values we calculated nomograms for separate determination of the nonequilibrium charge carrier lifetimes of the illuminated  $p(n)$  local space and its surface recombination velocity at the rear side. The nomograms were calculated at wave lengths 1064 and 808 nm for thicknesses 0.4 and 0.2 mm of the  $p(n)$  layer.

PACS: 40.42.87, 70.78.56.

Keywords: solar energy, heterojunction, semiconductor, solar cell.

Received 02 October 2017.

### Сведения об авторах

- Кошелев Олег Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: e-mail: scon282@phys.msu.ru.
  - Васильев Никита Геннадьевич — студент; e-mail: ng.vasiljev@physics.msu.ru.
-