УДК 53.087.51,53.043,53.087.35

СНИЖЕНИЕ КОНТРАСТА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ *n*⁺-*p*(*n*)-*p*⁺-СТРУКТУР КРЕМНИЯ, ИЗМЕРЯЕМОГО ПРИ СКАНИРОВАНИИ СВЕТОМ *p*-*n*-ПЕРЕХОДА

© 2020 г. О.Г.Кошелев*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", физический факультет, Москва, Россия

**E-mail: scon282@phys.msu.ru* Поступила в редакцию 29.07.2019 г. После доработки 30.08.2019 г. Принята к публикации 27.09.2019 г.

Выполнена оценка снижения контраста фоточувствительности неоднородной $n^+ - p(n) - p^+$ -структуры кремния без контактов, измеряемого при ее сканировании светом. Измерения и расчеты проведены для модели, состоящей из двух поочередно освещаемых солнечных элементов (стандартного и облученного быстрыми электронами), соединенных резистором.

DOI: 10.31857/S0367676520010160

введение

В связи со значительным ростом энергопотребления и уменьшением запасов традиционных ископаемых энергоресурсов в последние годы существенно возрос интерес к возобновляемым источникам энергии. В частности, возрос интерес к фотопреобразователям солнечной энергии на основе кремниевых солнечных элементов (СЭ), изготавливаемых из структур $n^+-p(n)-p^+$ -типа. Основными задачами дальнейшего улучшения таких СЭ являются повышение кпд и снижение стоимости их производства. Недавно были получены кпд свыше 20% для СЭ из монокристаллического кремния [1] и свыше 23% для СЭ из кремния с гетероструктурой типа HIT [2].

Для получения максимального кпд фоточувствительность должна быть максимальна и практически одинакова по всей площади СЭ, т.е. ее контраст должен быть минимальным [3]. Кроме того, знание ее контраста по площади кремниевой $n^+ - p(n) - p^+$ -структуры позволяет предсказывать эффективность изготавливаемого из нее СЭ [4]. На готовых СЭ этот контраст легко определяется по измерениям тока короткого замыкания при сканировании поверхности p-n-перехода лучом света с энергией квантов (hv) больше ширины запрещенной зоны кремния (E_a).

Разброс значений фоточувствительности может возникнуть как в исходном слитке кремния, так и на различных этапах изготовления СЭ. Для такого контроля исходных пластин кремния успешно используются СВЧ-методы, основанные на сканировании их поверхности лучом света также при $hv > E_g$ (Місгоwave Detected Photoconductivity – MDP-map). При этом измеряются изменения интенсивности СВЧ-волны, которая отражается от исследуемой структуры или проходит через нее [5]. В частности, при импульсной модуляции света измеряются времена спада СВЧ-фотопроводимости после окончания этих импульсов (microwave photoconductivity decay – μ PCD). Для повышения разрешающей способности метода в работе [6] освещение осуществляли через световод (диаметр светового пятна не более 100 мкм), а СВЧ-зондирование производили через коаксиальный кабель диаметром 1 мм.

Для контроля контраста фоточувствительности кремниевых пластин в настоящее время успешно используются также методы, основанные на измерении люминесценции, возникающей при освещении (photoluminescence image – PLI). При этом пластина либо сканируется лучом лазера [7, 8], либо освещается целиком [9] также при $hv > E_g$. Для регистрации используются видеокамеры на основе приборов с зарядовой связью. В [10] измерения фотолюминесценции были использованы для раздельного определения времени жизни неравновесных носителей заряда (HH3) в объеме и скорости их рекомбинации на поверхности пластин кремния.

Значительно сложнее контроль контраста фоточувствительности пластины, когда на нее нанесены сильно легированные слои n^+ - и p^+ -типа, а контакты еще отсутствуют. На этом этапе изготовления СЭ контроль контраста часто не производится [11]. Попытка обнаружить контраст фотопроводимости СЭ из монокристаллического кремния была предпринята в [12]. Зондирование производилось с помощью СВЧ-микроскопа ближнего поля (near field microwave microscope – NFMM) на частоте около 4.1 ГГц с разрешающей способностью около 10 мкм. Хотя контраст СВЧпроводимости в отсутствие света четко регистрировался, контраст СВЧ-фотопроводимости практически не наблюдался.

Проблема правильности определения контраста фоточувствительности $n^+ - p(n) - p^+$ -структур связана с тем, что ННЗ экстрагируют из базовой области освещаемого участка и по слоям n^+ - и p^+ -типа инжектируют в неосвещаемые участки СЭ. В результате и на неосвещаемых участках СЭ возникает напряжение, а на освещаемом оно снижается по сравнению с напряжением холостого хода, т.е. контраст фото-ЭДС искажается. При этом концентрация ННЗ и время релаксации фотопроводимости (τ) в базовой области освещаемого участка падают. Согласно расчетам [13], значение τ снижается примерно в 3 раза в СЭ толщиной 0.4 мм при времени жизни ННЗ в базе 100 мкс. С увеличением времени жизни ННЗ значения τ еще более снижаются.

Цель настоящей работы — более детально рассмотреть влияние на фото-ЭДС шунтирования n^+ - и p^+ -слоями освещаемой части кремниевой $n^+-p(n)-p^+$ -структуры ее неосвещаемой частью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Экспериментальные исследования проводились на модели неоднородной $n^+-p^-p^+$ -структуры, состоящей из двух одинаковой площади СЭ, соединенных резистором — эквивалентом шунтирующего сопротивления. Один из СЭ был предварительно облучен быстрыми электронами. Измеренные по спектрам токов короткого замыкания времена жизни ННЗ в их базовых областях составляли около 26 и 1 мкс. Измерения постоянных напряжений, возникающих на этих СЭ, проводились при освещении одного из них лампой накаливания мощностью 60 Вт с различных расстояний от 0.25 до 1 м.

Полученные экспериментальные данные о фоточувствительности этих СЭ сравнивались с результатами расчетов. Вычислялись зависимости напряжений на освещаемом (U_1) и неосвещаемом (U_2) СЭ в зависимости от величины сопротивления *R* соединяющего их резистора. При расчетах



Рис. 1. Зависимости напряжений на необлученном СЭ (${}^{\rm H}U_1$, ${}^{\rm H}U_2$) и на облученном СЭ (${}^{\rm O}U_1$, ${}^{\rm O}U_2$) от сопротивления R соединяющего их резистора при освещении одного из них. Индекс 1 соответствует освещаемому СЭ, а индекс 2 – неосвещаемому. Точками обозначены экспериментальные данные, кривыми – расчетные.

использовались следующие уравнения для токов через освещаемый (J_1) и неосвещаемый (J_2) СЭ

$$J_{1} = S_{1} \left[j_{s1} \left(\exp \frac{qU_{1}}{A_{l}kT} - 1 \right) - j_{sc1} \right],$$
(1)

$$U_2 = U_1 - RJ_1, \qquad (2)$$

$$J_{2} = S_{2}j_{s2} \left(\exp \frac{qU_{2}}{A_{2}kT} - 1 \right).$$
(3)

Здесь S_1 – площадь освещаемого СЭ, S_2 – неосвещаемого, j_{s1} и j_{s2} – плотности их токов насыщения, A_1 и A_2 – численные коэффициенты, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура, j_{sc1} – плотность тока короткого замыкания освещаемого СЭ.

$$J_1 = -J_2. \tag{4}$$

Знак "—" в соотношении (4) связан с тем, что J_1 есть ток экстракции ННЗ из освещаемого СЭ, а J_2 есть ток их инжекции в неосвещаемый СЭ. Значения j_{s1} и j_{s2} , а также коэффициентов A_1 и A_2 определялись предварительно на основании измерений вольт-амперных характеристик этих СЭ без освещения. Решения системы этих нелинейных уравнений проводилось численно на ЭВМ. Для этого значения U_1 подбирались такими, чтобы выполнялось условие (4).

На рис. 1 показаны измеренные (точки) и вычисленные (кривые) зависимости напряжений (${}^{\rm H}U_{1, 2}$) на необлученном СЭ (на рис. они обозначены как ${}^{\rm H}U_1$, ${}^{\rm H}U_2$) и (${}^{\rm o}U_{1, 2}$) на облученном СЭ (${}^{\rm o}U_1$,



Рис. 2. Зависимости отношений напряжений (${}^{H}U_{1}/{}^{O}U_{1}$) поочередно освещаемых СЭ (тех же, что на рис. 1) от соединяющего их сопротивления *R*. Кривые (1, 2, 3) – измеренные, (2p) – расчетная.

 $^{o}U_{2}$) от величины сопротивления *R* шунтирующего резистора. Зачерненные точки и сплошные кривые соответствуют освещенным СЭ (${}^{H}U_{1}$, ${}^{o}U_{1}$), а светлые точки и штриховые кривые – неосвещенным (${}^{H}U_{2}$, ${}^{o}U_{2}$). (Индексы 1 соответствуют напряжениям при освещении, а индексы 2 – при его отсутствии). Все данные рис. 1 получены при фиксированном расстоянии до источника света (0.5 м). В пределах точности измерений экспериментальные зависимости согласуется с вычисленными зависимостями. При максимальных значениях *R* влияние шунтирования на напряжения освещаемых СЭ пренебрежимо мало - напряжения на них практически равны фото-ЭДС холостого хода. С уменьшением значений *R* напряжение на освещаемых СЭ несколько уменьшается (из-за экстракции ННЗ), тогда как на неосвещаемых СЭ оно существенно возрастает (из-за инжекции HH3). В частности, на необлученном СЭ (${}^{\rm H}U_2$) это возрастание происходит в 100 раз. При R = 1 кОм значение ${}^{\rm H}U_1$ снижается на 10% (на 35 мВ). Согласно [13], такое снижение может привести к уменьшению измеряемого времени релаксации ННЗ в несколько раз.

На рис. 2 штриховыми кривыми с точками (1, 2, 3) показаны измеренные при освещении зависимости отношений напряжений (${}^{\rm H}U_1/{}^{\rm o}U_1$) тех же СЭ от *R*. Соответствующие им интенсивности освещения относятся как 1 : 4 : 16. Сплошной кривой показана расчетная зависимость (2p) для того же случая, что и кривая 2. Расхождение между ними в пределах ошибок измерений. При максимальном значении *R* (86 кОм) в интервале ис-



Рис. 3. Вычисленные зависимости отношений напряжений (${}^{H}U_{1}/{}^{o}U_{1}$) двух СЭ от соотношения их площадей (S_{1}/S_{2}). Фотоэлектрические параметры для них те же, что и в предыдущих случаях.

пользованных интенсивностей освешения отношения (${}^{\rm H}U_1/{}^{\rm o}U_1$) исследованных СЭ практически равны отношениям их фото-ЭДС (напряжений холостого хода). В этом случае шунтирование практически отсутствует. При этом с ростом интенсивности освещения отношение (^нU₁/^oU₁) уменьшается в пределах примерно от 6.1 при минимальной освещенности до 1.7 при максимальной. Это означает, что с ростом интенсивности освещения снижается точность определения контраста их фоточувствительностей. Отношение напряжений снижается также с уменьшением значений *R*, в особенности при слабых интенсивностях освещения. Это означает, что точность определения контраста фоточувствительностей снижается также с ростом шунтирования.

На рис. 3 приведены вычисленные зависимости отношений напряжений (^нU₁/°U₁) от доли освещаемой площади S₁ для обоих СЭ относительно неосвещаемой площади S₂. Расчеты проводились для двух значений R = 30 кОм (кривая 1) и 3 кОм (кривая 2) при тех же фотоэлектрических параметрах СЭ, что и раньше. Для кривой 1 отношение напряжений ^нU₁/^oU₁ слабо зависит от S_1/S_2 , т.е. контраст фоточувствительностей практически не снижается с уменьшением плошалей освещаемых участков в рассмотренном диапазоне. Однако при R = 3 кОм это отношение заметно меньше и существенно снижается с уменьшением площадей освещаемых участков. При S = 0.03 шунтирование настолько велико, что контраст напряжений отсутствует. Это согласуется с тем, что авторам [12] не удалось обнаружить изменения величины сигнала по площади СЭ при весьма малой области зондирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На модели, состоящей из двух различных соединенных резистором кремниевых солнечных элементов, проведены исследования измеряемого контраста фоточувствительности $n^+ - p - p^+$ -структуры при ее сканировании светом в различных условиях. Экспериментально и путем расчетов показано, что этот контраст снижается при уменьшении как величины сопротивления шунтирующего резистора, так и площади освещаемого участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zheng P, Rougieux F.E. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016.
 V. 108. № 12. Art. № 122103.
- 2. Mishima T., Taguchi M., Sakata H. et al. // Solar Energy Mat. & Solar Cells. 2011. V. 95. № 1. P. 18.

- 3. *Wezep D.A., Velden M.H.L., Borsa D.M. et al.* // 26th Europ. Photovolt. Solar Energy Conf. and Exhib. Progress in Photovolt.: Research and Appl. (Munich, 2016). P. 1423.
- Metzger W.K. // Solar Energy Mat. Solar Cells. 2008. V. 92. P. 1123.
- Gaubas E., Kaniava A. // Rev. Sci. Instr. 1996. V. 67. № 6. P. 2339.
- Palais O., Gervais J., Clerc L. el al. // Mater. Sci. Engin. 2000. V. 71. P. 47.
- 7. Kasemann M., Kwapil W., Walter B. et al. // 23rd Europ. Photovolt. Solar Energy Conf. (Valencia, 2008). P. 965.
- Wilson M., Lagowski J., Edelman P. et al. // Energy Proc. 2013. V. 38. P. 209.
- 9. *Kiliani D., Micard G., Steuer B. et al.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. Art. № 054508.
- 10. *Heinz F.D., Warta W., Schubert M.C.* // Appl. Phys. Let. 2017. V. 110. Art. № 042105.
- 11. http://solar-front.livejournal.com/11644.html
- 12. Hovsepyan A., Babajanyan A., Sargsyan T. et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. Art. № 114901.
- Кошелев О.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 41; Koshelev O.G. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 1. Р. 34.