

Ф И З И К А

УДК 621.383.51

ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОВЕСНОГО ЗАРЯДА ГРАНИЦЫ SiO_2 -SI НА НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С СУБМИКРОННЫМ P - N -ПЕРЕХОДОМ*Богатов Н. М.¹, Корнеев А. И.², Матвеев М. П.³, Родоманов Р. Р.⁴***EFFECT OF NONEQUILIBRIUM CHARGE IN THE SiO_2 -SI LAYER ON NONSTATIONARITY OF THE SPECTRAL CHARACTERISTIC OF SOLAR CELLS WITH SUBMICRON P - N -JUNCTION**

Bogatov N. M., Korneev A. I., Matveyakin M. P., Rodomanov R. R.

Spectral characteristics of silicon solar cells with submicron high-low p - n -junction are investigated in a non-stationary mode. The characteristic time of the nonequilibrium charge accumulation in the SiO_2 -Si layer is determined. The method makes it possible to control uniformity of electronic properties of the dielectric-semiconductor interface.

Введение

Преобразование солнечной энергии в электрическую является одним из экологически безопасных методов использования возобновляемых источников энергии. Повышение КПД — основная тенденция развития конструкций и технологии полупроводниковых солнечных элементов (СЭ). Рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ) через поверхностные состояния снижает КПД. Для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации и повышения эффективности фотоэлектрического преобразования на поверхность полупроводника наносится пассивирующая диэлектрическая пленка [1, 2], в которую вносится фиксированный поверхностный заряд [3], создается тянущее электрическое поле за счет контролируемого распределения легирующей примеси [4].

Влияние фиксированного равновесного поверхностного заряда на распределение внутреннего электрического поля изучено достаточно подробно [5–7]. Неравновесные эффекты, обусловленные захватом электронов (дырок) на поверхностные состояния, разнообраз-

ны и не изучены до конца. Если зарядовое состояние поверхности изменяется, то эффективная скорость поверхностной рекомбинации ННЗ не является постоянной.

Для современных кремниевых СЭ характерно уменьшение глубины p - n -перехода до субмикронных размеров $w_p < 1$ мкм. В этом случае параметры области пространственного заряда (ОПЗ) p - n -перехода зависят от концентрации акцепторов, доноров и плотности заряда на поверхностных состояниях внешней границы полупроводника. Для субмикронного p - n -перехода выполняется неравенство $w_p \gg l$ (l — длина свободного пробега электронов или дырок), обосновывающее применимость классических моделей распределения носителей заряда [8, 9].

Неравновесные процессы, происходящие на свободной поверхности или границе раздела диэлектрик-полупроводник в СЭ с субмикронным p - n -переходом, изменяют электрическое поле ОПЗ и эффективную скорость поверхностной рекомбинации. Эти процессы мало исследованы, но могут существенно снижать мощность солнечных элементов. Спектральная чувствительность СЭ (зависимость

¹Богатов Николай Маркович, д-р. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета.

²Корнеев Антон Игоревич, аспирант кафедры общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета.

³Матвеев Михаил Петрович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета.

⁴Родоманов Роман Робертович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета.

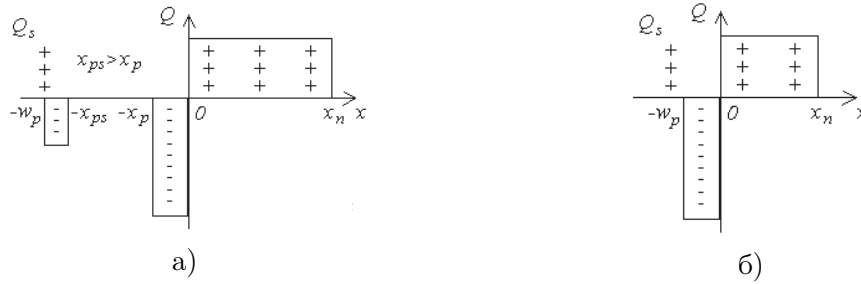


Рис. 1. Схема распределения заряда в структуре с глубоким (а) и субмикронным (б) несимметричным p - n -переходом

тока короткого замыкания от длины волны падающего на поверхность оптического излучения, рассчитанная на единицу мощности излучения) [10] одна из основных его характеристик, на основании которой оценивается эффективность использования излучения. В стандартных методиках [10] измеряются стационарные значения спектральной чувствительности. Влияние неравновесного стационарного поверхностного заряда на собирание фотогенерированных электронов и дырок в кремниевых СЭ с субмикронным p - n -переходом исследовано в [11]. В работе [12] показано, что изменение неравновесного поверхностного заряда обуславливает нестационарную составляющую спектральной чувствительности.

Цель работы — определение характерного времени накопления неравновесного заряда на границе SiO_2 - Si на основе нестационарных измерений спектральной чувствительности кремниевых солнечных элементов с субмикронным p - n -переходом, отличающихся структурой плёнки SiO_2 .

1. Методика измерений

Величина плотности поверхностного заряда Q_s зависит от состояния поверхности, является основным параметром для поверхностно-барьерных структур и неконтролируемым параметром для приборов с p - n - или гетеропереходами. Обозначим изменение плотности поверхностного заряда в неравновесном режиме ΔQ_s . Считаем, что ΔQ_s не изменяет тип проводимости в поверхностной области, но влияет на величину потенциального барьера перехода. Эта ситуация реализуется, если область пространственного заряда перехода подходит вплотную к поверхности. На рис. 1, а область объемного заряда, индуцированного поверхностным зарядом ($x \in [-w_p, -x_{ps}]$), отделена от ОПЗ p - n -перехода ($x \in [-x_p, x_n]$),

а на рис. 1, б сливается с ней. Если темпы захвата неравновесных электронов и дырок поверхностными состояниями отличаются, то $\Delta Q_s \neq 0$. Неравновесный поверхностный заряд вызывает изменение ширины ОПЗ p - n -перехода и высоты потенциального барьера, что можно рассматривать как падение напряжения V_s на переходе.

Полное падение напряжения на p - n -переходе в режиме электрической нагрузки $V = U + V_s + IR_s$, где U — напряжение на контактах прибора, I — электрический ток, R_s — сосредоточенное последовательное сопротивление. В теории солнечных элементов [9] полагают, что релаксация электрического тока обусловлена рекомбинационными процессами. Характерное время жизни неравновесных электронов τ_n , дырок τ_p в кремнии составляет $10 \div 100$ мкс, время измерения спектральной чувствительности $t \gg \tau_n$, $t \gg \tau_p$. В этом временном масштабе фототок, диффузионный ток насыщения, рекомбинационный ток насыщения постоянны, а вольтамперная характеристика описывается экспоненциальной моделью. В режиме короткого замыкания ($U = 0$) ток I_{sc} вычисляется по формуле

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left\{ \frac{q(V_s + I_{sc}R_s)}{kT} \right\} - 1 \right) - I_r \left(\exp \left\{ \frac{q(V_s + I_{sc}R_s)}{akT} \right\} - 1 \right) - \frac{V_s + I_{sc}R_s}{R_{sh}}, \quad (1.1)$$

где I_{ph} — фототок, I_0 — диффузионный ток насыщения, I_r — рекомбинационный ток насыщения, a — коэффициент неидеальности p - n -перехода, R_{sh} — шунтирующее сопротивление [9].

При низких уровнях освещенности $\frac{qV_s}{kT} \ll 1$, $V_s \sim \Delta Q_s$, выразим I_{sc} через ΔQ_s

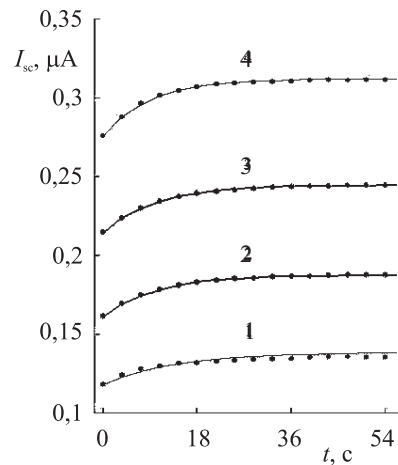


Рис. 2. Зависимость тока короткого замыкания от времени при резком изменении условий освещения, точки — экспериментальные значения, сплошные линии рассчитаны по формуле (1.3):

1 — $\lambda=420$ нм; 2 — $\lambda=430$ нм; 3 — $\lambda=440$ нм; 4 — $\lambda=450$ нм

из формулы (1.1) в линейном приближении

$$I_{sc} \approx \frac{I_{ph} - \left(\left(I_0 + \frac{I_r}{a} \right) \frac{q}{kT} + \frac{1}{R_{sh}} \right) V_s}{1 + \left(I_0 + \frac{I_r}{a} \right) \frac{qR_s}{kT} + \frac{R_s}{R_{sh}}} = I_c + \beta \Delta Q_s. \quad (1.2)$$

Из (1.2) следует, что накопление (сброс) неравновесного поверхностного заряда $\Delta Q_s = \Delta Q_0 \exp\{-t/\tau\}$ с характерным временем $\tau \gg \tau_n$, $\tau \gg \tau_p$ обуславливает изменение тока короткого замыкания

$$I_{sc} = I_c + \Delta I \exp\{-t/\tau\}. \quad (1.3)$$

Исследования спектральных характеристик солнечных элементов выполнялись с помощью автоматизированного спектрального комплекса, в состав которого входят светосильный монохроматор МДР-23, предназначенный для работы в диапазоне 200–2000 нм, и разработанный программируемый контроллер для сбора и первичной обработки информации. В этом комплексе программируемый контроллер управляет работой шагового двигателя монохроматора и регистрирует спектр, снимая значение сигнала с универсального цифрового вольтметра, к которому подключен фотоприемник. При измерении спектральной чувствительности солнечных элементов вместо выходного сигнала фотоумножителя регистрируется ток короткого замыкания солнечного элемента. Кроме того, программируемый контроллер выполняет основные функции по первичной математической обработке данных.

Исследовались двусторонние кремниевые солнечные элементы со структурой $n^+ - p - p^+$

или $p^+ - n - n^+$ типа, субмикронным (0,15 мкм) диффузионным p - n -переходом, текстурированной поверхностью, на которую наносилось пассивирующее просветляющее покрытие SiO₂. Образцы отличались технологией формирования плёнки SiO₂. Спектральная чувствительность $J_f(\lambda)$ и $J_b(\lambda)$ измерялась, соответственно, при освещении со стороны p - n -перехода (лицо) и со стороны изотипного перехода (тыл). В качестве образца-свидетеля использовался СЭ с глубоким плоским p - n -переходом.

Дискретизированные во времени измерения значений тока короткого замыкания при фиксированной длине волны λ проводились на автоматизированном спектральном комплексе по методике с низким уровнем освещенности [10]. Погрешность измерений не превышала 5%. Сканирование по λ сопровождается резким изменением условий освещения и коэффициента поглощения при переходе от одной длины волны к другой. В результате у СЭ с субмикронным p - n -переходом наблюдалась «релаксация» тока короткого замыкания к своему стационарному значению I_c . Этот эффект проявлялся при освещении как с лицевой, так и с тыльной поверхности. Спектральная чувствительность образца-свидетеля в том же временном интервале была стационарна.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены типичные временные зависимости тока короткого замыкания для фиксированных длин волн при переходе к условиям освещения с более высоким I_{sc} . Ап-

Характерное время накопления неравновесного поверхностного заряда

№ СЭ	τ , с	$\Delta\tau$, с
1	3,9	1,1
2	8,7	0,78
3	11,7	2,4
4	37	7,7
5 край	31,3	5,1
5 центр	12,6	2,1

проксимация экспериментальных данных зависимостью (1.3) дает следующие значения τ : 1 — 14 с, 2 — 10,6 с, 3 — 10,1 с; 4 — 9 с.

Характерная для исследуемых СЭ при низких уровнях освещенности нестационарность тока короткого замыкания с временем релаксации $\tau \sim 10$ с обусловлена захватом основных носителей заряда на медленные поверхностные электронные состояния на границе Si-SiO₂, имеющие достаточно большие времена обмена зарядами с разрешенными зонами. Согласно данным [13], для этих процессов τ может составлять 10^{-1} – 10^4 с и зависит от молекулярного состава межфазной границы. Текстурирование поверхности увеличивает площадь границы Si-SiO₂ и p - n -перехода более чем в 10 раз, поэтому эффект влияния изменения плотности неравновесного поверхностного заряда на ток короткого замыкания возрастает вследствие увеличения эффективных значений I_0 , I_r в формуле (1.1).

Медленные поверхностные электронные состояния типичны для реальных границ Si-SiO₂. Они образуются в результате адсорбции молекул при термическом выращивании SiO₂ на поверхности кремния в атмосфере. Время релаксации зависит от природы и концентрации адсорбированных молекул [13].

Другой причиной дефектности межфазной границы является несоответствие постоянных решетки Si и SiO₂, в результате чего генерируются напряжения в поверхностной области кремния. Если эти напряжения превышают критические значения, соответствующие температуре выращивания SiO₂, то в объеме кремния образуются структурные дефекты и снижается время жизни неравновесных носителей заряда [14]. Исследуемые СЭ имели достаточно высокий коэффициент собирания в фиолетовой части спектра, что свидетельствует о структурном совершенстве поверхностной области.

Временные зависимости тока короткого замыкания исследовались в различных участках поверхности СЭ в диапазоне длин волн λ от

360 нм до 1 200 нм с шагом 50 нм или 10 нм. Для каждого участка величина τ не зависит от λ в пределах погрешности измерений. В таблице приведены средние по λ значения τ и стандартное отклонение этой величины $\Delta\tau$.

Для большинства СЭ значение τ приблизительно постоянно вдоль поверхности, что свидетельствует об однородности пленки SiO₂. У СЭ №5 наблюдалось увеличение τ в области края по сравнению со значением в центре. На этом краевом участке возможны дополнительные потери мощности прибора.

Таким образом, разработанный метод определения характерного времени накопления неравновесного заряда на границе диэлектрик-полупроводник на основе нестационарных измерений спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным p - n -переходом позволяет определить степень однородности границы раздела и выявить её дефектные участки.

Авторы благодарят директора НПФ «Кварк» Закса М. Б. и ведущего технолога Ситникова А. М. за предоставленные для исследований образцы.

Литература

1. Willeke G.P. Thin crystalline silicon solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2002. V. 72. I. 1-4. P. 191–200.
2. Zhao J. Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2004. V. 82. I. 1-2. P. 53–64.
3. Agostinelli G., Delabie A., Vitanov P., Alexieva Z., Dekkers H. F. W., De Wolf S., Beaucarne G. Very low surface recombination velocities on p-type silicon wafers passivated with a dielectric with fixed negative charge // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2006. V. 90. I. 18–19. P. 3438–3443.
4. Majumdar D., Dutta S.K., Chatterjee S., Saha H. Effect of controlled dopant distribution

- in thin silicon solar cell // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2004. V. 81. I. 4. P. 459–468.
5. *Zu C.* Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
 6. *Овсюк В. Н.* Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука, 1984. 254 с.
 7. *Гаман В. И.* Физика полупроводниковых приборов. Томск: НТЛ, 2000. 426 с.
 8. *Jain S. C., Heasell E. L., Roulston D. J.* Recent advances in the physics of silicon PN junction solar cells including their transient response // *Progr. Quant. Electron.* 1987. V. 11. I. 2. P. 105–204.
 9. *Фаренбрух А., Бьюб Р.* Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с.
 10. *Колтун М. М.* Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. 280 с.
 11. *Богатов Н. М., Матвеев М. П., Родоманов Р. Р., Яковенко Н. А.* Автоматизация измерений спектральных характеристик двусторонних солнечных элементов // *Автометрия*. 2003. Т. 39. № 6. С. 68–77.
 12. *Богатов Н. М., Корнеев А. И., Матвеев М. П., Родоманов Р. Р.* Исследование влияния неравновесного заряда границы SiO₂-Si на динамику спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным *p-n*-переходом // *Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Технические науки*. 2006. № 2. С. 52–54.
 13. *Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В.* Основы физики поверхности твердого тела. М.: МГУ, 1999. 284 с.
 14. *Cousins P. J., Cotter J. E.* Minimizing lifetime degradation associated with thermal oxidation of upright randomly textured silicon surfaces // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2005. V. 90. I. 2. P. 228–240.

Статья поступила 26 сентября 2006 г.

Кубанский государственный университет

© Богатов Н. М., Корнеев А. И., Матвеев М. П., Родоманов Р. Р., 2006