

## Ф И З И К А

УДК 621.383.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАХВАТА НЕРАВНОВЕСНОГО  
ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ  
ПО СПАДУ ФОТОЭДС*Богатов Н. М.<sup>1</sup>, Матвеев М. П.<sup>2</sup>, Першин Н. В.<sup>3</sup>, Родоманов Р. Р.<sup>4</sup>*DETERMINING OF CAPTURE TIME OF NONEQUILIBRIUM SURFACE CHARGE BY OPEN  
CIRCUIT VOLTAGE FALL DOWN IN SEMI-CONDUCTOR STRUCTURES

Bogatov N. M., Matveyakin M. P., Pershin N. V., Rodomanov R. R.

The open circuit voltage  $U_{oc}$  of silicon solar cells with the submicronic asymmetrical p-n-junction is investigated in the non-stationary mode. Dependence  $U_{oc}(t)$  is explained by relaxation of the nonequilibrium surface charge on the boundary Si-SiO<sub>2</sub> with the characteristic value of time  $\tau \sim 1$  s.

## Введение

Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии является одним из перспективных, экологически безопасных вариантов использования возобновляемых источников энергии. В производстве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) применяются достижения современных полупроводниковых технологий. Совершенствование методик измерения характеристик полупроводниковых структур — актуальная задача физики и техники полупроводников.

Уменьшение размеров активных слоёв — одна из тенденций развития полупроводниковой электроники. При этом соотношение процессов, реализующихся в макроскопических и микроскопических масштабах, изменяется. В работах [1–3] показано, что в  $p$ - $n$ -переходах, толщиной  $w_p$  значительно меньше 1 мкм, параметры области пространственного заряда (ОПЗ)  $p$ - $n$ -перехода зависят не только от концентрации акцепторов, доноров, но и от плотности неравновесного заряда на поверхност-

ных состояниях внешней границы полупроводника.

Влияние равновесного поверхностного заряда на распределение внутреннего электрического поля изучено достаточно подробно [4–6]. Неравновесные эффекты, обусловленные захватом электронов (дырок) на поверхностные состояния, существенно изменяют характеристики полупроводниковых приборов. Действительно, захват неравновесного заряда на свободной поверхности или границе раздела диэлектрик-полупроводник в структурах с субмикронным  $p$ - $n$ -переходом изменяет электрическое поле  $p$ - $n$ -перехода. Влияние этого процесса на спектральные характеристики кремниевых ФЭП исследовано в работах [1–3]. Показано, что резкое изменение условий освещения вызывает изменение плотности неравновесного поверхностного заряда на границе Si-SiO<sub>2</sub> с характерным значением времени  $\tau \sim 10$  с [2, 3].

В данной работе исследована динамика фотоэдс кремниевых ФЭП с субмикронным несимметричным  $p$ - $n$ -переходом. Для измерения времени жизни неравновесного заряда ис-

<sup>1</sup>Богатов Николай Маркович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru.

<sup>2</sup>Матвеев Михаил Петрович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета.

<sup>3</sup>Першин Николай Владимирович, аспирант кафедры общей физики и информационных систем Кубанского государственного университета.

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

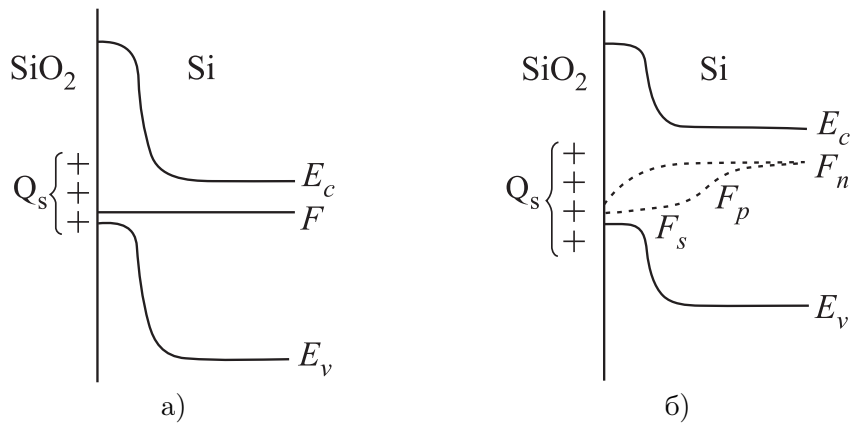


Рис. 1. Энергетическая диаграмма субмикронного  $p$ - $n$ -перехода в равновесном режиме (а) и с неравновесным поверхностным зарядом (б):  $E_c$  — дно зоны проводимости,  $F$  — уровень Ферми,  $E_v$  — вершина валентной зоны,  $F_n$ ,  $F_p$ ,  $F_s$  — квазиуровни Ферми электронов, дырок, поверхностных дырок, соответственно

пользуется метод затухания проводимости [7]. Цель работы — модифицировать указанный метод и определить время захвата неравновесного поверхностного заряда по затуханию фотоэдс.

Объектом исследований являлись двусторонние кремниевые фотоэлектрические преобразователи со структурой  $n^+p$  или  $p^+n$  типа, диффузионным  $p$ - $n$ -переходом толщиной  $w_p = 0,15$  мкм, текстурированной поверхностью, на которую наносилось пассивирующее просветляющее покрытие  $\text{SiO}_2$ . В качестве образца-свидетеля использовался ФЭП с глубоким плоским  $p$ - $n$ -переходом. Выполнение неравенства  $w_p \gg l$  ( $l$  — длина свободного пробега электронов или дырок) позволяет использовать классические модели распределения носителей заряда.

## 1. Методика исследований

Обозначим плотность поверхностного заряда  $Q_s$ , а её изменение в неравновесном режиме  $\Delta Q_s$ . Считаем, что  $\Delta Q_s$  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. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода в рассматриваемом случае показана на рис. 1.

Энергетическое распределение плотности состояний на свободной поверхности твердого тела или границе раздела диэлектрик — полупроводник подробно рассмотрено в [4, 8]. Это распределение имеет сложный вид и определяется многими факторами. В равнове-

сии поверхностные состояния в запрещенной зоне, лежащие ниже уровня Ферми, заполнены электронами, а выше — свободны. При смещении уровня Ферми вниз относительно середины зоны поверхностные состояния отдают электроны, а при смещении вверх — захватывают.

Пусть граничный слой кремния имеет  $p$ -тип проводимости, тогда поверхностные состояния между уровнем Ферми и средней линией запрещенной зоны диэлектрика приобретают положительный заряд (рис. 1)  $Q_s > 0$ . Обозначим через  $N_s = Q_s/q$  ( $q$  — элементарный заряд) плотность поверхностных состояний, содержащих равновесный положительный заряд,  $N_{sf}$  — полную плотность состояний, способных обмениваться зарядом. Последние состояния лежат в окрестности уровня Ферми в энергетическом зазоре шириной  $\sim kT$  ( $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура).

Изменение неравновесной плотности поверхностных состояний  $\Delta N_s = \Delta Q_s/q$  описывается уравнением

$$\frac{d\Delta N_s}{dt} = G_s - R_s, \quad (1.1)$$

где  $G_s$  — скорость генерации, а  $R_s$  — рекомбинации поверхностных дырок. Скорость захвата дырок поверхностью пропорциональна плотности заполненных поверхностных состояний  $N_{sf} - \Delta N_s$  и концентрации неравновесных подвижных дырок  $\Delta p$

$$G_s = (N_{sf} - \Delta N_s) \chi \Delta p, \quad (1.2)$$

где  $\chi$  — коэффициент захвата дырок. Поверхностные дырки рекомбинируют с электро-

нами ионизированных акцепторов. Поверхностная область сильно легирована, поэтому скорость рекомбинации определяется зарядом  $\Delta Q_s$ , плотность которого невелика,

$$R_s = \frac{\Delta N_s}{\tau_{ps}}, \quad (1.3)$$

где  $\tau_{ps}$  — эффективное время жизни поверхностных дырок.

В стационарном случае  $G_s = R_s$ . Тогда из (1.1)–(1.3) найдем

$$\Delta N_s = \frac{N_{sf}\chi\Delta p}{\chi\Delta p + \frac{1}{\tau_{ps}}}. \quad (1.4)$$

Таким образом, в неравновесных условиях происходит изменение плотности поверхностного заряда вследствие захвата основных носителей заряда из эмиттера.

Рассмотрим нестационарный режим. Ограничимся случаем низкого уровня фотовозбуждения и инжекции, выполняющимся в условиях эксперимента, тогда

$$\Delta p \ll \frac{1}{\chi\tau_{ps}}, \quad (1.5)$$

а изменение неравновесной плотности поверхностных состояний мало

$$\Delta N_s \ll N_{sf}. \quad (1.6)$$

Из (1.1)–(1.3), (1.5), (1.6) следует

$$\frac{d\Delta N_s}{dt} = N_{sf}\chi\Delta p - \frac{\Delta N_s}{\tau_{ps}}. \quad (1.7)$$

Учтем возможную взаимосвязь  $\Delta p$  и  $\Delta N_s$

$$\Delta p(t) = \Delta p_1 - \theta\Delta N_s(t), \quad (1.8)$$

где  $\Delta p_1$ ,  $\theta$  — постоянные коэффициенты. Решение уравнения (1.7) с учётом (1.8) определяется соотношением

$$\Delta N_s(t) = \frac{N_{sf}\chi\Delta p_1\tau_{ps}}{(1 + N_{sf}\chi\theta\tau_{ps})} + C \exp\left(-\frac{(1 + N_{sf}\chi\theta\tau_{ps})t}{\tau_{ps}}\right), \quad (1.9)$$

где  $C$  — постоянная интегрирования. Формула (1.9) описывает изменение плотности поверхностного заряда с характерным временем

$$\tau = \frac{\tau_{ps}}{(1 + N_{sf}\chi\theta\tau_{ps})}. \quad (1.10)$$

Анализ фотоэлектрических структур с субмикронным эмиттером  $n^+$ -типа дает аналогичный вывод. Отличие состоит в том, что на границе раздела кремний – диэлектрик накапливается отрицательный заряд.

Изменение высоты потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода пропорционально плотности неравновесного поверхностного заряда,  $V_s \sim \Delta Q_s$ . 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 режиме холостого хода  $I = 0$ , напряжение на контактах (фотоэдс)  $U_{oc} = V - V_s$ .

Нестационарные процессы в фотоэлектрических преобразователях разделяются на быстрые и медленные. Быстрые процессы связаны с характерным временем жизни неравновесных электронов  $\tau_n$ , дырок  $\tau_p$ , которые для кремния находятся в диапазоне  $10 \div 100$  мкс. В эксперименте исследуются медленные процессы, реализующиеся за время  $t \gg \tau_n$ ,  $t \gg \tau_p$ . Релаксация 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 фотоэдс

$$U_{oc} = \Delta U \exp\{-t/\tau\}. \quad (1.11)$$

Исследования фотоэдс выполнялись с помощью автоматизированного спектрального комплекса [3]. Сигнал с универсального цифрового вольтметра, к которому подключен фотоэлектрический преобразователь, регистрировался программируемым контроллером сбора и первичной обработки информации, затем передавался в компьютер.

Дискретизированные значения фотоэдс при фиксированной длине волны  $\lambda$  измерялись по методике с низким уровнем освещенности [9]. Погрешность измерений не превышала 5 %. Сначала определялось стационарное значение фотоэдс  $U_{oc}$  при постоянных условиях освещения. Затем световой поток резко прерывался  $\Delta p_1 = 0$ , и измерялась зависимость  $U_{oc}(t)$  на участке спада. У исследуемых ФЭП наблюдались плавные участки спада функции  $U_{oc}(t)$ . В рассматриваемом масштабе времени фотоэдс образца-свидетеля изменялась скачкообразно.

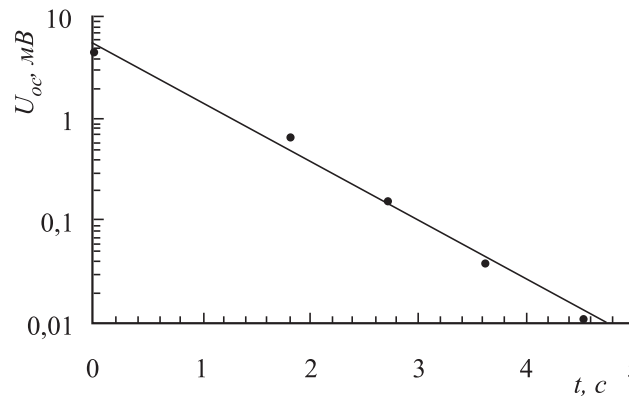


Рис. 2. Зависимость фотоэдс от времени при резком прекращении освещения ( $\lambda = 1150$  нм): точки — экспериментальные значения; линия — аппроксимация при  $\tau = 0,75$  с

## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана типичная временная зависимость фотоэдс на участке спада в полулогарифмическом масштабе. Экспериментальные данные аппроксимируются формулой (1.11). Значение  $\tau$  для каждого образца не зависит от  $\lambda$  в пределах погрешности измерений. Это значение оказалось на порядок меньше, чем в работах [2, 3]. Сравнение условий проведения экспериментов выявляет причины этого различия.

Начальное значение неравновесной плотности поверхностного заряда  $\Delta Q_0$  зависит от концентрации неравновесных носителей заряда  $\Delta p$  при постоянных условиях освещения. Из (1.4), (1.5) следует

$$\Delta Q_0 = qN_{sf}\chi\tau_{ps}\Delta p.$$

Значение  $\Delta p$  в режиме холостого хода много больше, чем в режиме короткого замыкания, исследуемом в [2, 3], поэтому в рассматриваемом случае величина  $\Delta Q_0$  значительно больше. Это означает, что квазиуровень  $F_s$  расположен ближе к соответствующей зоне (рис. 1). В этом случае заполняются и опустошаются поверхностные уровни, лежащие ближе к энергетической зоне основных носителей заряда. Найденные значения  $\tau \sim 1$  с характеризуют эти уровни. Из формулы (1.10) следует, что  $\tau$  уменьшается с ростом  $N_{sf}$ . Следовательно, поверхностные уровни, лежащие ближе к энергетической зоне, имеют более высокую плотность состояний.

Согласно данным [8], поверхностные электронные состояния границы Si-SiO<sub>2</sub> имеют время обмена носителями заряда с разрешенными зонами  $10^{-1}$ – $10^4$  с. Эти состояния образуются в результате адсорбции молекул при

термическом выращивании SiO<sub>2</sub> на поверхности кремния в атмосфере. Время релаксации зависит от природы и концентрации адсорбированных молекул.

Другой причиной дефектности межфазной границы является несоответствие постоянных решетки Si и SiO<sub>2</sub>, в результате чего генерируются напряжения в поверхностной области кремния. Связанное с этим изменение периода решетки Si является одной из причин возникновения состояний вблизи разрешенных зон.

Хвосты плотности состояний образуются также вследствие некоррелированного распределения основных примесей в сильно легированной области.

Текстурирование поверхности увеличивает площадь границы Si-SiO<sub>2</sub> и  $p$ - $n$ -перехода более, чем в 10 раз, поэтому эффект влияния изменения плотности неравновесного поверхностного заряда на фотоэдс возрастает вследствие текстурирования.

Таким образом, обнаруженное изменение  $\tau$ , связанное с плотностью поверхностных состояний вблизи края зоны основных носителей заряда, характеризует структурное несовершенство границы Si-SiO<sub>2</sub> фотоэлектрических преобразователей.

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

## Литература

1. 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.

2. Богатов Н. М., Корнеев А. И., Матвеекин М. П., Родоманов Р. Р. Исследование влияния неравновесного заряда границы  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  на динамику спектральной чувствительности солнечных элементов с субмикронным  $p\text{-}n$ -переходом // Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Технические науки. 2006. № 2. С. 52–54.
3. Богатов Н. М., Корнеев А. И., Матвеекин М. П., Родоманов Р. Р. Влияние неравновесного заряда границы  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  на нестационарность спектральной характеристики солнечных элементов с субмикронным  $p\text{-}n$ -переходом // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2006. № 4. С. 63–67.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
5. Овсяк В. Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука, 1984. 254 с.
6. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов. Томск: НТЛ, 2000. 426 с.
7. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высш. Школа, 1987. 239 с.
8. Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В. Основы физики поверхности твердого тела. М.: МГУ, 1999. 284 с.
9. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. 280 с.

**Ключевые слова:** полупроводниковые структуры, фотоэлектрические преобразователи, поверхностные состояния, неравновесный заряд.

---

Статья поступила 18 марта 2008 г.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

© Богатов Н. М., Матвеекин М. П., Першин Н. В., Родоманов Р. Р., 2008