

УДК 539.2:533.9

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В КОМПРЕССИОННОЙ ПЛАЗМЕ

В.В. УГЛОВ<sup>1</sup>, Н.Т. КВАСОВ<sup>2</sup>, В.М. АСТАШИНСКИЙ<sup>3</sup>, Ю.А. ПЕТУХОВ<sup>2</sup>,  
А.М. КУЗЬМИЦКИЙ<sup>3</sup>, И.Л. ДОРОШЕВИЧ<sup>2</sup>, С.В. ЛАСТОВСКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Независимости, 4, Минск, 220080, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

<sup>3</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ  
Независимости, 70, Минск, 220072 Беларусь

<sup>4</sup>Научно-практический центр НАНБ по материаловедению, Минск, Беларусь  
П. Бровки, 19, Минск, 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 10 сентября 2012

Приводятся результаты исследований фотовольтаического эффекта, впервые обнаруженного авторами в легированном кремнии после облучения импульсами компрессионной плазмы. Определены оптимальные режимы обработки, обеспечивающие максимальное значение фотоЭДС. Установлены зависимости фотоЭДС от дозы облучения высокоэнергетическими электронами.

*Ключевые слова:* фотовольтаический эффект, кремний, радиационные дефекты, компрессионная плазма.

### Введение

Явление возникновения фотоиндуцированной электродвижущей силы (фотоЭДС) в полупроводниковых образцах при облучении светом состоит в формировании в их структуре определенной разности потенциалов  $U_{\phi}$ .

Полная фотоЭДС в этом случае может быть записана следующим образом:

$$U_{\phi} = \oint \frac{D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx}}{\mu_p p + \mu_n n} dx, \quad (1)$$

где  $D_n$  и  $D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок;  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – их подвижности, соответственно;  $n$  и  $p$  – концентрации носителей заряда.

При освещении однородных полупроводников фотоЭДС возникает за счет существенного различия коэффициентов диффузии электронов и дырок. Разделение носителей заряда при освещении светом может быть обеспечено также встроенными электрическими полями. Так, в неоднородных полупроводниках объемная фотоЭДС обусловлена формированием внутреннего электрического поля из-за наклона энергетических зон относительно уровня Ферми. Фотоэлектроны и фотодырки разделяются этим полем, создавая разность потенциалов. Имеет место,

также, возникновение поверхностной фотоЭДС, связанной с наличием вблизи поверхности потенциального барьера. Наиболее широко используется способ получения фотоЭДС с помощью *p-n*-переходов, сформированных в приповерхностном слое полупроводника. Сегодня это, как правило, многослойные сложные гетероструктуры.

Нами фотовольтаический эффект был обнаружен в кремниевых образцах *p*- и *n*- типа, облученных компрессионной плазмой [1].

### Методика проведения эксперимента и результаты исследований

Для исследований закономерностей формирования фотоЭДС в кремнии, облученном компрессионной плазмой, использовались образцы монокристаллического кремния различных кристаллографической ориентации, типа и концентраций примеси: КЭФ-20; КДБ-0,3; КДБ-10; КДБ-12. Облучение плазмой производилось при различных значениях напряжения на электродах ускорителя плазмы, что позволяло менять ее энергию и, соответственно, структуру модифицированного приповерхностного слоя кремния. На рис. 1–3 приведены полученные методом Оже-электронной спектроскопии распределения элементов в образцах для различных концентраций примеси бора и режимов обработки. Глубина проникновения азота и кислорода в объем кремния не превышает 100 нм. Проведен рентгеноструктурный анализ модифицированных слоев кремния.

Результаты замеров фотоЭДС облученных плазмой образцов сведены в табл. 1–4.

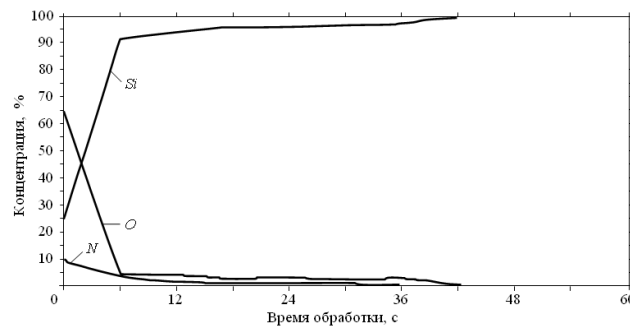


Рис. 1. Распределение элементов в поверхностном слое кремния (КДБ-0,3), обработанного компрессионным плазменным потоком воздуха ( $13 \text{ Дж/см}^2$ , 1 импульс)

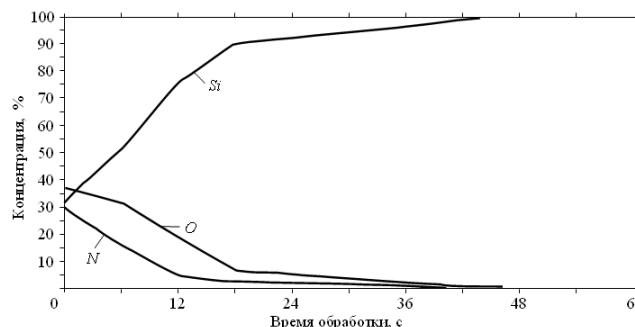


Рис. 2. Распределение элементов в поверхностном слое кремния (КДБ-0,3), обработанного компрессионным плазменным потоком воздуха ( $13 \text{ Дж/см}^2$ , 3 импульса)

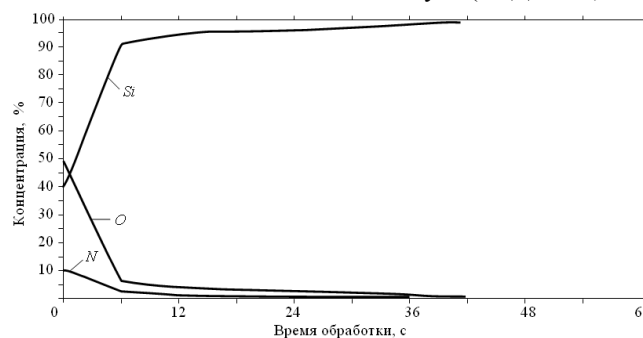


Рис. 3. Распределение элементов в поверхностном слое кремния (КДБ-12), обработанного компрессионным плазменным потоком воздуха ( $13 \text{ Дж/см}^2$ , 1 импульс)

Таблица 1. Значения фотоЭДС в образцах легированного кремния КДБ-0,3

№ образца	Напряжение $U$ , $10^3$ В	Число импульсов	Давление, Па	Расстояние до образца, $10^{-2}$ м	Рабочий газ	ФотоЭДС, $U_{\phi}$ , $10^{-3}$ В
1	4,0	1	400	12	воздух	270–290
2	4,0	3	400	12	воздух	300
3	2,5	1	400	12	водород	210–300
4	2,7	1	400	12	водород	300–380
5	3,0	1	400	12	водород	250–295
6	3,5	1	400	12	водород	200

Таблица 2. Значения фотоЭДС в образцах легированного кремния КДБ-10

№ образца	Напряжение $U$ , $10^3$ В	Число импульсов	Давление, Па	Расстояние до образца, $10^{-2}$ м	Рабочий газ	ФотоЭДС, $U_{\phi}$ , $10^{-3}$ В
1	4,0	1	400	12	воздух	280
2	4,1	1	400	12	азот	170
3	4,3	1	400	12	азот	280–334

Таблица 3. Значения фотоЭДС в образцах легированного кремния КДБ-12

№ образца	Напряжение $U$ , $10^3$ В	Число импульсов	Давление, Па	Расстояние до образца, $10^{-2}$ м	Рабочий газ	ФотоЭДС, $U_{\phi}$ , $10^{-3}$ В
1	4,0	1	400	12	воздух	130–170
2	2,7	1	400	12	водород	Центр: до 200, Периферия: 10–60

Таблица 4. Значения фотоЭДС в образцах легированного кремния КЭФ-20

№ образца	Напряжение $U$ , $10^3$ В	Число импульсов	Давление, Па	Расстояние до образца, $10^{-2}$ м	Рабочий газ	ФотоЭДС, $U_{\phi}$ , $10^{-3}$ В
1	4,0	1	467	12	воздух	60
2	3,4	1	467	12	водород	1–2

Исследования оптической микроскопией показали, что фотоЭДС индуцируется как в образцах с развитым микрорельефом и цилиндрическими структурами, так и в образцах с гладкой поверхностью. Кроме того, наноструктурирование поверхности проводилось путем магнетронного осаждения наноразмерных частиц кремния (50–100 нм) на обработанную компрессионной плазмой поверхность кремния. Облучение электронами таких структур с последующим замером фотоЭДС показало, что радиационные дефекты в наночастицах практически отсутствуют.

Для исследования стабильности фотоэлектрических свойств кремния, обработанного компрессионной плазмой, было проведено облучение кремниевых пластин (КДБ-0,3) электронными пучками с энергией 2 МэВ и интенсивностью  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Доза облучения составляла  $2,5 \cdot 10^{16}$ – $2,75 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$  (рис. 4). Как видно из полученных зависимостей, при дозе электронного облучения  $\sim 2,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$  значение фотоЭДС практически не изменяется, а при дозе  $(2,5–2,75) \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$  уменьшается в 1,5–1,7 раза по сравнению с необлученным кремнием, обработанным плазмой.

Концентрация радиационных дефектов  $n_d$  в кристаллах, облученных электронами, может быть оценена по следующей формуле:

$$n_d = D\sigma N, \quad (2)$$

где  $D$  – доза облучения,  $\sigma$  – сечение взаимодействия налетающего электрона с атомом мишени,  $N$  – концентрация атомов мишени.

Известно, что дефекты возникают в диапазоне углов рассеяния атомов от  $\varphi=0$  до  $\varphi=\varphi_m$ , причем  $\varphi_m$  определяется из выражения

$$\varphi_m = \arccos\left(\frac{E_d}{E_m}\right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $E_d$  – пороговая энергия смещения (для кремния  $E_d \sim 22$  эВ, железа  $E_d \sim 50$  эВ),  $E_m$  – максимальная энергия, передаваемая атому электроном при столкновении.

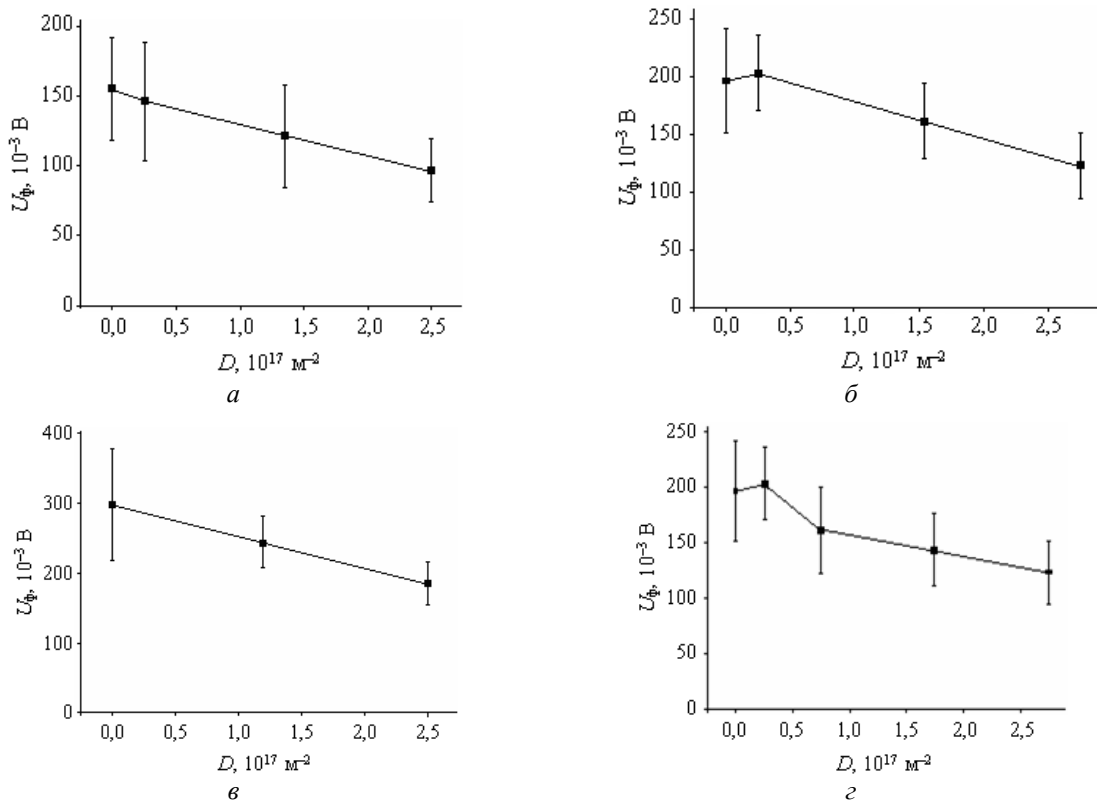


Рис. 4. Зависимости фотоЭДС пластин кремния КДБ-0,3, подвергнутых воздействию компрессионной плазмы и облученных электронными пучками, от дозы электронного облучения: а – образец 6, б – образец 3, в – образец 4, г – образец 1

В радиационной физике твердого тела для  $\sigma$  (при облучении электронами) используется следующее выражение (формула Кейна) [2]:

$$\sigma(E) = \left( \frac{8\pi Ze^2}{\epsilon_0 mc^2} \right)^2 \left( \frac{1-a^2}{a^4} \right) \left[ \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \varphi_m + \frac{Ze^2 a}{20\epsilon_0 hc} \frac{\sin^2(\varphi_m/2)}{\cos \varphi_m} + a \left( a + \frac{Ze^2}{40\epsilon_0 hc} \right) \ln(\cos \varphi_m) \right], \quad (4)$$

$$\text{где } a = \frac{\left[ \frac{E}{mc^2} \left( 2 + \frac{E}{mc^2} \right) \right]^{1/2}}{1 + \frac{2E}{Mc^2} + \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2},$$

$m$  – масса электрона,  $M$  – масса атома мишени,  $Z$  – его зарядовое

число,  $E$  – энергия электронов.

Здесь речь идет о первично смещенных атомах в тонких образцах ( $d < 10^{-3}$  м). На основе (2)–(4) была определена зависимость концентрации радиационных дефектов  $n_d$  в кремнии и железе от энергии электронов  $E$ . Результаты представлены на рисунке.

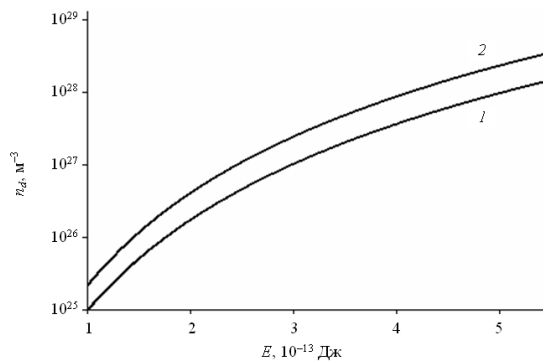


Рис. 5. Зависимость концентрации радиационных дефектов  $n_d$  в кремнии (1) и железе (2) от энергии  $E$  электронов

## Заклучение

В результате анализа полученных результатов установлено, что наибольший фотовольтаический эффект наблюдается у легированного бором кремния с высокой проводимостью. Область отрицательного заряда располагается у обработанной поверхности. Проведенные дополнительные исследования (лазерная обработка и облучение интенсивными потоками электронов с энергией 25 кэВ, приводящими к плавлению кремния) не подтвердили действие известных на сегодняшний день механизмов формирования фотоЭДС в полупроводниках. Уменьшение фотоЭДС при облучении образцов высокоэнергетическими электронами связано, очевидно, с генерацией в структуре точечных дефектов, являющихся центрами захвата (ловушками) носителей заряда.

## RADIATION RESISTANCE OF SILICON NANOSTRUCTURED PHOTOVOLTAIC ELEMENTS FORMED IN COMPRESSION PLASMA

V.V. UGLOV, N.T. KVASOV, V.M. ASTASHYNSKI, Yu.A. PETUKHOU,  
A.M. KUZMITSKI, I.L. DOROSHEVICH, S.B. LASTOVSKI

### Abstract

Photovoltaic effect in silicon doped by the action of compression plasma pulses is investigated for the first time. Plasma treatment parameters providing maximum values of photo-emf are optimized. Dependences of photo-emf on the dose of electron high-energy post-irradiation are studied.

### Список литературы

1. Асташинский В.М., Дорошевич И.Л., Квасов Н.Т. и др. // Тез. докл. XLI Междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 2011. С. 119.
2. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. М., 1988.