

УДК 539.2:533.9

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В КОМПРЕССИОННОЙ ПЛАЗМЕ

В.В. УГЛОВ¹, Н.Т. КВАСОВ², В.М. АСТАШИНСКИЙ³, Ю.А. ПЕТУХОВ²,
А.М. КУЗЬМИЦКИЙ³, И.Л. ДОРОШЕВИЧ², С.В. ЛАСТОВСКИЙ⁴

¹Белорусский государственный университет
Независимости, 4, Минск, 220080, Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

³Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ
Независимости, 70, Минск, 220072 Беларусь

⁴Научно-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_{ϕ} .

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; μ_n и μ_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.

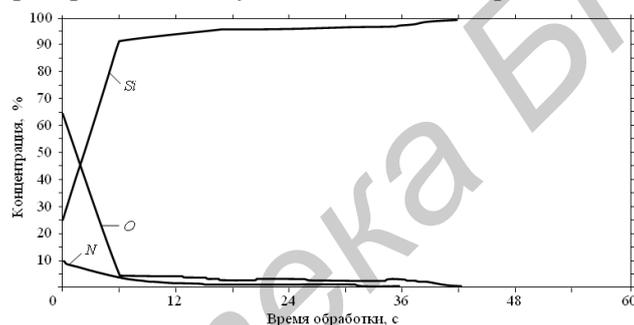


Рис. 1. Распределение элементов в поверхностном слое кремния (КДБ-0,3), обработанного компрессионным плазменным потоком воздуха (13 Дж/см^2 , 1 импульс)

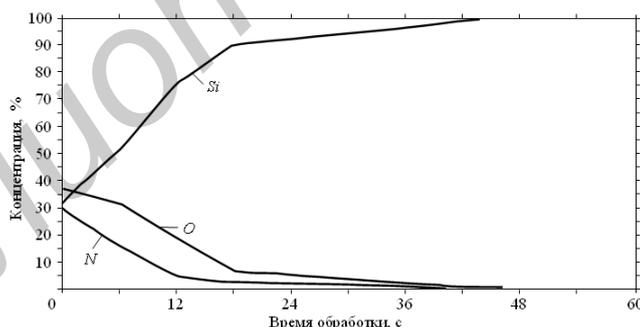


Рис. 2. Распределение элементов в поверхностном слое кремния (КДБ-0,3), обработанного компрессионным плазменным потоком воздуха (13 Дж/см^2 , 3 импульса)

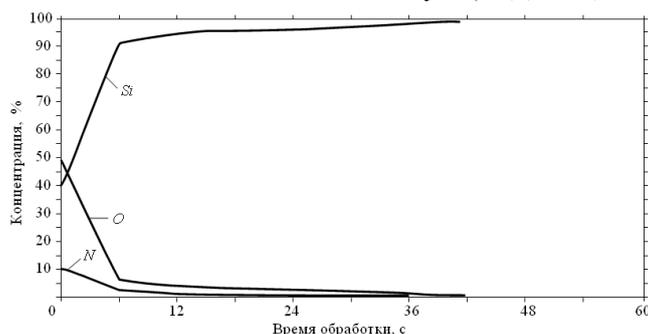


Рис. 3. Распределение элементов в поверхностном слое кремния (КДБ-12), обработанного компрессионным плазменным потоком воздуха (13 Дж/см^2 , 1 импульс)

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_{ϕ} , 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_{ϕ} , 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_{ϕ} , 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_{ϕ} , 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, σ – 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 φ_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.

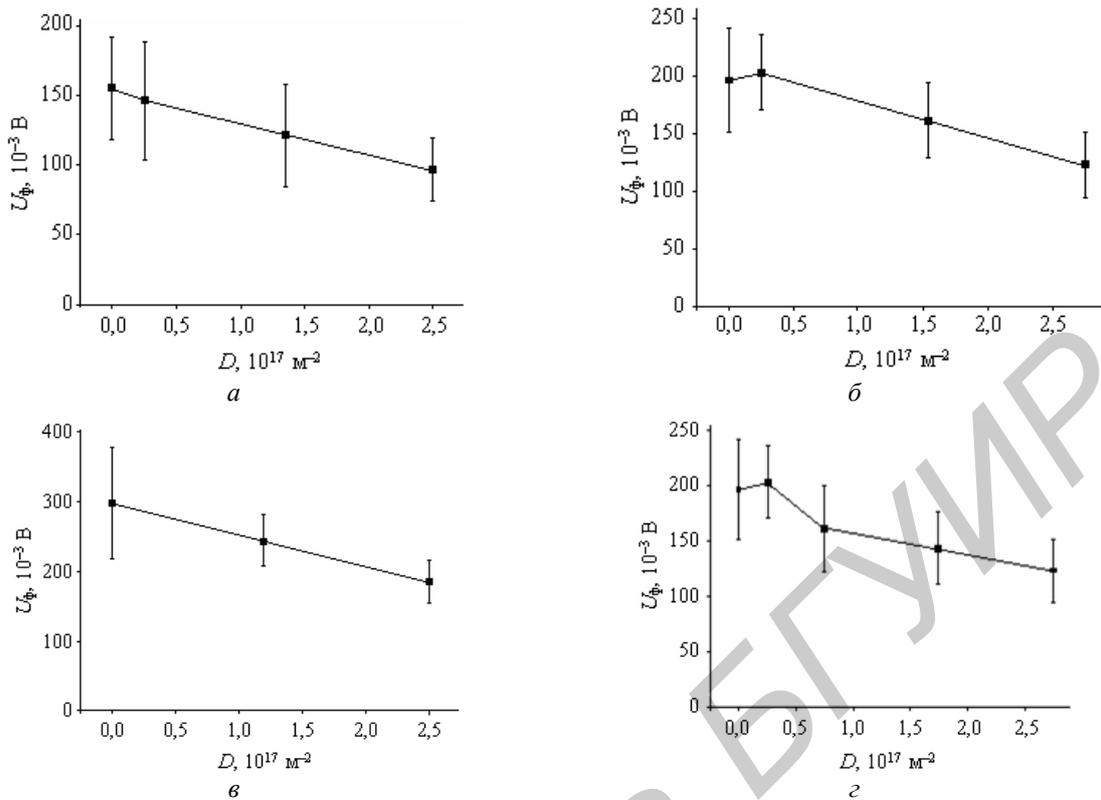


Рис. 4. Зависимости фотоЭДС пластин кремния КДБ-0,3, подвергнутых воздействию компрессионной плазмы и облученных электронными пучками, от дозы электронного облучения: а – образец 6, б – образец 3, в – образец 4, г – образец 1

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

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

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

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.

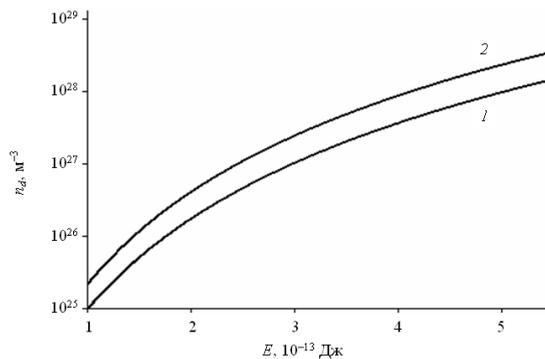


Рис. 5. Зависимость концентрации радиационных дефектов n_d в кремнии (1) и железе (2) от энергии E электронов

Заключение

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.