

УДК 621.315.592

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,  
НАРУШЕННЫХ ОБЛУЧЕНИЕМ  
γ-КВАНТАМИ**

**И.Г.ПАШАЕВ, М.Н.АГАЕВ, Р.Ф.МЕХТИЕВ, М.Г.ГАСАНОВ**

*Бакинский Государственный Университет*

*islampashayev@rambler.ru*

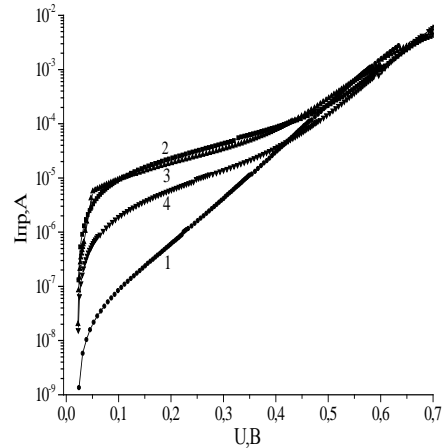
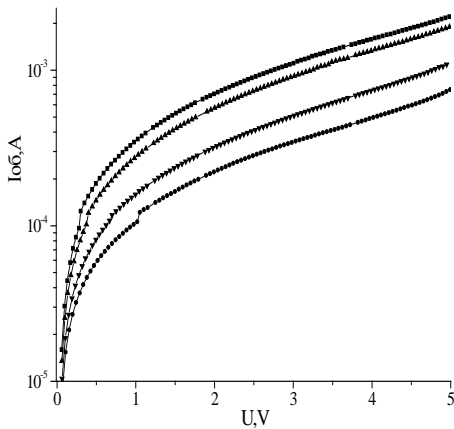
*Рассмотрены экспериментальные результаты доказывающие возможность влияния и управления параметрами кремниевых солнечных элементов с помощью ультразвуковой обработки (УЗО). Показана возможность частичного восстановления фотоэлектрических свойств солнечных элементов, нарушенных  $\gamma$ -облучением, с помощью ультразвуковой обработки. С целью исследования влияния УЗО на изменение механизма токопереноса, после каждого этапа ультразвуковой обработки, измерялись фотоэлектрические характеристики и температурные зависимости ВАХ кремниевых солнечных элементов [СЭ] в прямом и тока в обратном направлении. Температура изменялась от 80К до 350К.*

**Ключевые слова:** солнечные элементы,  $\gamma$ -облучения, ультразвуковые обработки.

Как известно, при облучении полупроводниковых приборов заряженными частицами высоких энергий происходит накопление в объеме полупроводника радиационных дефектов, что приводит к существенному ухудшению электрофизических и фотоэлектрических характеристик приборов [1,2,3]. Контролируемое воздействие на дефектную структуру полупроводникового прибора в области р-п перехода и базовой области позволяет целенаправленно корректировать его характеристики. Традиционно для восстановления нарушенных свойств облученных материалов применяют термическую обработку, использование, которой приводит к некоторым негативным последствиям [11]. Поэтому в качестве альтернативы все чаще уделяется внимание атермическим способам обработки, одним из видов которых является ультразвуковая обработка (УЗО). В данной работе исследуется возможность восстановления с помощью ультразвуковой обработки первоначальных свойств исследуемых кремниевых СЭ, свойства которых ухудшились в результате радиационного облучения.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

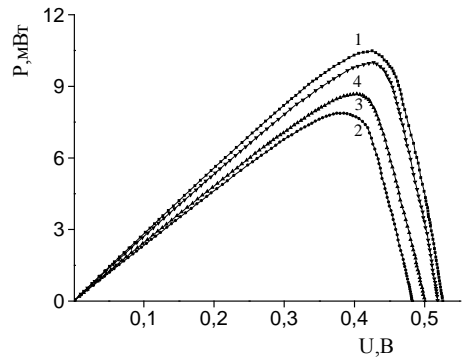
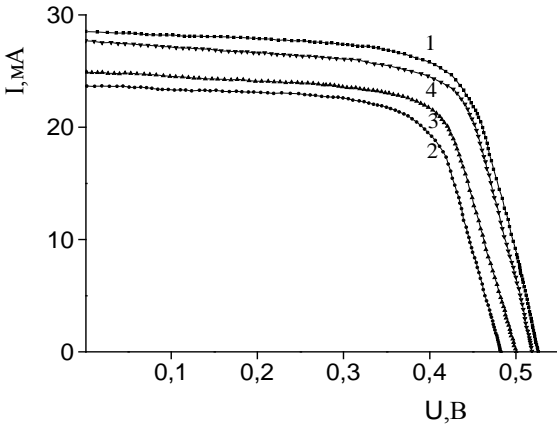
Исследуемые кремниевые СЭ облучались  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  с дозой  $\sim 10^6$  Rad при комнатной температуре. Затем эти образцы были последовательно, в два этапа, подвергнуты УЗО; продольная волна вводилась с тыльной стороны образца, перпендикулярно к его рабочей поверхности. На первом этапе УЗО-1 (частота  $f_{\text{УЗ}} \approx 9$  МГц, интенсивность  $W_{\text{УЗ}} \approx 0,5$  Вт/см<sup>2</sup>, продолжительность  $t \approx 120$  мин); на втором, УЗО-2, ( $f_{\text{УЗ}} \approx 27$  МГц,  $W_{\text{УЗ}} \approx 1$  Вт/см<sup>2</sup> и  $t \approx 200$  мин). После каждого этапа УЗО измерялись вольтамперные характеристики СЭ в широком интервале температур (100÷350К). На рис.1 и рис.2. показаны темновые ВАХ исследуемых солнечных элементов в обратном и в прямом направлениях, соответственно. Видно, что  $\gamma$ -облучение негативно сказывается как на обратной, так и на прямой ВАХ, ухудшая последние по сравнению с исходными (увеличение обратного тока  $I_{\text{обр}}$  рис.1, кривая 2 и уменьшение тока в прямом направлении  $I_{\text{пр}}$ — рис.2, кривая 2). Последующие УЗО-1 и, особенно, УЗО-2 восстанавливают темновые ВАХ СЭ, приближая их к исходным рис. 1, рис. 2 (кривые 3 и 4).



**Рис.1.** Изменение обратного темнового тока Al-Ni/Si-n+-p-p+ образца после УЗО при  $P_{\text{изл}}=0$  мВт/см<sup>2</sup> и  $T=300$  К. Кривые: 1 – исходная, до УЗО; 2 – после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^6$  Rad; 3 – после УЗО-1 ( $W_{\text{УЗ}} \approx 0,5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t \approx 120$  мин.,  $f_{\text{УЗ}} \approx 9$  МГц); 4 – после УЗО-2 ( $W_{\text{УЗ}} \approx 1$  Вт/см<sup>2</sup>,  $t \approx 200$  мин.,  $f_{\text{УЗ}} \approx 27$  МГц).

**Рис.2.** Изменение прямого темнового тока Al-Ni/Si-n+-p-p+ образца после УЗО при  $P_{\text{изл}}=0$  мВт/см<sup>2</sup> и  $T=300$  К. Обозначения те же, что и на рис.1.

Влияние  $\gamma$ -облучения и УЗО на фотоэлектрические характеристики исследуемых СЭ непосредственно видно из рис.3, на котором представлены нагрузочные ВАХ исследуемых СЭ. Как и следовало ожидать,  $\gamma$ -облучение приводит к ухудшению нагрузочной ВАХ СЭ, что проявляется в уменьшении тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжении холостого хода  $U_{хх}$  и как следствие, в снижении максимальной выходной мощности  $P_{max}$  (рис.4). Последующие УЗО-1 и, особенно, УЗО-2 восстанавливают нагрузочные ВАХ СЭ, приближая их



и 4).

к исходным рис.3, рис.4 (кривые 3

**Рис.3.** Нагрузочная ВАХ Al-Ni/Si-n+p-p+ образца подвергнутого облучению  $\gamma$ -квантами и УЗО при  $=100\text{мВт/см}^2$  и  $T=300\text{К}$ . Кривые: 1 – исходная; 2 – после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^6$  Rad; 3 – после УЗО-1 ( $W_{у3} \approx 0,5\text{Вт/см}^2$ ,  $t \approx 120$  мин.,  $f_{у3} \approx 9$  МГц); 4 – после УЗО-2 ( $W_{у3} \approx 1\text{Вт/см}^2$ ,  $t \approx 200$  мин.,  $f_{у3} \approx 27$  МГц).

**Рис.4 .** Изменение максимальной выходной мощности  $P_{max}$  Al-Ni/Si-n+p-p+ образца после облучения  $\gamma$ -квантами и УЗО при  $=100\text{мВт/см}^2$  и  $T=300\text{К}$ .

Обозначения те же, что и на рис. 3.

Проанализируем возможные механизмы наблюдаемых изменений. Известно, что величина фототока определяется из выражения [5]:

$$I_{\Phi} = qSN_{\Phi}Q, \quad (1)$$

здесь:  $q$  – заряд электрона,  $SN_{\Phi}$  – общее количество сгенерированных электронно-дырочных пар на площадке  $S$ ,  $Q$  - коэффициент собирания носителей заряда. Поскольку величина  $SN_{\Phi}$  остается практически постоянной в условиях данного эксперимента, то происходящее в результате  $\gamma$ -облучения падение фототока СЭ, очевидно, обусловлено уменьшением

Q. Когда диффузионная длина неосновных носителей в базе  $L_n \ll d_p$ , величина Q определяется из [12]:

$$Q = \frac{\alpha L_n}{\alpha L_n + 1}, \quad (2)$$

здесь  $\alpha$  – коэффициент поглощения света.

Известно, что  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ , где  $D_n$  и  $\tau_n$  – коэффициент диффузии и время жизни неосновных носителей в базе, соответственно.

Учитывая (2) для фототока получаем следующее выражение:

$$I_\Phi = qSN_\Phi \frac{\alpha \sqrt{D_n \tau_n}}{\alpha \sqrt{D_n \tau_n} + 1} \quad (3)$$

Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  определяется как (5)

$$U_{xx} \approx \frac{AkT}{q} \ln \frac{I_{кз}}{I_0}, \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $A$  – безразмерный коэффициент, характеризующий скорость рекомбинации в слое объемного заряда,  $I_0$  – обратный ток насыщения, протекающий через p-n переход,  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания. Как показывают наши оценки, облучение  $\gamma$ -квантами не приводит к значительному изменению  $A$ . Не должны приводить к заметному изменению  $U_{xx}$  и вариации  $I_{кз}$  и  $I_0$ , поскольку они находятся под знаком логарифма в (4).

Как известно, облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  с энергией порядка  $\sim 1,2\text{МэВ}$ , эквивалентно внутреннему облучению СЭ быстрыми электронами, возникающими в результате комптоновского рассеяния и фотопоглощения, что приводит в основном к образованию дефектов точечного типа. При этом в результате взаимодействия радиационных дефектов с уже имеющимися в кристалле дефектами, в области p-n перехода и базы создаются дополнительные электрически и оптически активные центры, играющие роль рекомбинационных центров, что приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей  $\tau_n$  и параметров  $Q$  и  $I_\Phi$ , зависящих от  $\tau_n$ .

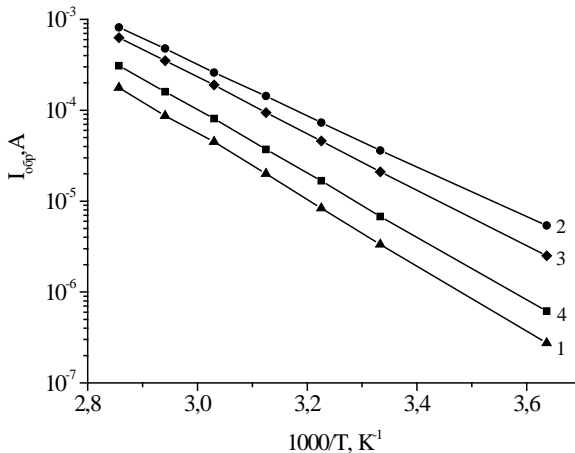
Как известно, [6] ток термогенерации прямо пропорционален концентрации рекомбинационных центров. Измерение величины обратного тока  $I_{обр}$  при практическом постоянстве наклона ВАХ после соответствующих обработок указывает на изменение концентрации центров рекомбинации (уменьшение обратного  $I_{обр}$  обусловлено уменьшением концентрации центров рекомбинации, увеличение  $I_{обр}$  – их ростом). Изменение наклона ВАХ при изменении величины  $I_{обр}$  после соответствующих обработок указывает как на изменение концентрации центров рекомби-

рации, так и на изменение механизма токопереноса. Об этом также свидетельствует температурная зависимость  $I_{обр}$  при  $U_{обр} = 0,4В$ .

Как для исходных, так и для прошедших соответствующие обработки СЭ изменение обратного тока  $I_{обр}$  с ростом обратного напряжения  $U_{обр}$  (при  $U_{обр} > 0,1В$ ) описывается зависимостью, близкой к  $I_{обр} \sim \sqrt{U_{обр}}$ , что указывает на преимущественно термогенерационную природу обратного тока.

В исходном состоянии (рис.5, кривая 1) наклон температурной зависимости  $I_{обр}$  составляет величину  $\sim 0,71эВ$ , что указывает на наличие диффузионного и генерационного механизма токопереноса.

Наклон температурной зависимости  $I_{обр}$  СЭ облученного  $\gamma$ -квантами (рис.5, кривая 2), понизился и составил величину  $\sim 0,55эВ$ , характерную для тока термогенерации (т.е. величину порядка  $E_g/2$ , где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны кремния). После УЗО-1 и, особенно, УЗО-2 наклон температурной зависимости  $I_{обр}$  возрастает (рис.5, кривые 3 и 4)



**Рис.5.** Температурные зависимости темнового обратного тока Al-Ni/Si-n+-p-p+ (образца) после  $\gamma$ -облучения и УЗО ( $T=300К$ ). 1 – исходная, до  $\gamma$ -облучения; 2 – после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^6 Rad$ ; 3 – после УЗО-1 ( $W_{УЗ} \approx 0,5Вт/см^2$ ,  $t \approx 120$  мин.,  $f_{УЗ} \approx 9$  МГц); 4 – после УЗО-2 ( $W_{УЗ} \approx 1Вт/см^2$ ,  $t \approx 200$  мин.,  $f_{УЗ} \approx 27$  МГц).

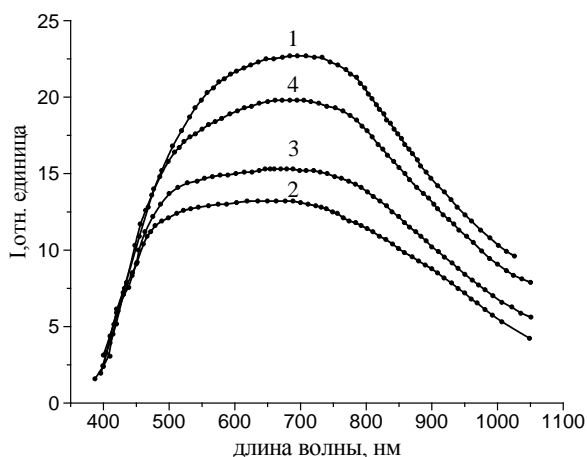
и становится равным  $\sim 0,69эВ$ . Это свидетельствует о появлении диффузионной компоненты в механизме токопереноса и уменьшении концентрации рекомбинационных центров в области p-n перехода.

С целью исследования влияния  $\gamma$ -облучения и УЗО на спектральную чувствительность исследуемых СЭ были сняты спектральные характеристики фототока в относительных единицах. Как видно из рисунка 5 (кривая 2), облучение СЭ не приводит к заметному уменьшению фотоответа в коротковолновой части спектра потому, что спектральная чувстви-

тельность в этой области обусловлена процессами, происходящими на поверхности и в верхнем сильно легированном  $n^+$  слое СЭ. При этом, в части спектра, где спектральная чувствительность обусловлена процессами в области р-п перехода и в базовой области, наблюдается заметное уменьшение фотоответа после  $\gamma$ -облучения исследуемых СЭ. Этот факт подтверждает, что ухудшение фотоэлектрических свойств исследуемых СЭ связано с радиационными нарушениями именно в области р-п перехода и базовой области. Соответственно, как мы могли наблюдать в предыдущих экспериментах, последующие УЗО-1 и, особенно, УЗО-2 восстанавливают спектральную чувствительность исследуемых СЭ приближая их к исходным рис.6. кривые 3 и 4).

Таким образом, УЗ воздействие является эффективным способом повышения внутренней энергии твердых тел. В отличие от тепловой энергии, поглощаемой равномерно во всем объеме полупроводника, затухание УЗ волн происходит, в основном, на дефектах кристаллической решетки, способствуя их перераспределению к равновесному состоянию [7,8,9].

Поскольку облучение  $\gamma$ -квантами создает радиационные дефекты в СЭ, которые более подвижны, то при последующей УЗО акустическая волна взаимодействует преимущественно с последними, способствуя их перераспределению и атермическому отжигу [10,11]. Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что УЗО частично восстанавливает совершенство кристаллической структуры СЭ, нарушенное в процессе облучения  $\gamma$ -квантами.



**Рис.6.** Спектральная характеристика Al-Ni/Si-p+-p-p+ (образца) после облучения и УЗО при  $T=300K$ . 1 – до облучения; 2 – после облучения дозой  $10^6$  Гр; 3 – после УЗО-1 ( $W_{УЗ} \approx 0,5 \text{ Вт/см}^2$ ,  $t \approx 120$  мин.,  $f_{УЗ} \approx 9$  МГц); 4 – после УЗО-2 ( $W_{УЗ} \approx 1 \text{ Вт/см}^2$ ,  $t \approx 200$  мин.,  $f_{УЗ} \approx 27$  МГц)

Изготовлены солнечные элементы  $Al_{80}Ni_{20}/Si-n+-p-p+$  на основе p-n перехода с применением аморфного металлического сплава  $Al_{80}Ni_{20}$  в качестве омического контакта и токосъемных дорожек. Установлено, что применение омического контакта на основе аморфного сплава приводит к повышению надежности и долговечности полученных солнечных элементов.

Выявлены закономерности влияния ультразвуковой обработки на фотоэлектрические свойства исследуемых кремниевых СЭ и установлено, что взаимодействие ультразвуковых волн с неоднородностями полупроводниковой структуры кремниевых СЭ оказывает воздействие на генерационно-рекомбинационный механизм переноса тока.

На основании фотоэлектрических измерений доказано, что восстановление фотоэлектрических свойств кремниевых СЭ с помощью ультразвуковой обработки, нарушенных  $\gamma$ -облучением, происходит за счет перегруппировки и атермического отжига радиационных дефектов образованных гамма квантами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бармин Ю.В., Золотухин И.В., Обвинцев Ю.А. Авторское свидетельство №1464500, 1987.
2. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат 1965, 310 с.
3. Лидоренко Н.С., Евдокимов В.М., Зайцева А.К. и др. Новые модели солнечных элементов и перспективы их оптимизации // Гелиотехника, 1978, № 3, с.3-17.
4. Аскеров Ш.Г., Гусейнов Н.А., Асланов Ш.С. и др. Определение основных параметров кремниевых фотопреобразователей // Вестник БГУ, серия физико-математических наук, 2005, №2, с.86-89.
5. Коутс Т.Дж., Микин Дж.Д. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики. М.: Мир, 1988, с.307.
6. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971, с.246.
7. Власенко А.И., Олих Я.М., Савкина Р.К. Акустостимулированная активация связанных дефектов в твердых растворах // ФТП, 1999, т.33, №4, с.410-414.
8. Лидоренко Н.С., Евдокимов В.М., Зайцева А.К. и др. Новые модели солнечных элементов и перспективы их оптимизации // Гелиотехника, 1978, № 3, с. 3-17.
9. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. М.: ЭнергоАтомиздат, 2001, с.350.
10. Милвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия, 1984, с.256
11. Турсунов М.Н., Муминов Р.А., Очилов С.М. Состояние исследований и разработок в области прямого преобразования солнечного излучения в электричестве на основе полупроводников // Гелиотехника, 1998, №2, с. 34-47.
12. Гонтарук А.Н., Корбутяк Д.В., Корбут Е.В. Деграционнo-релаксационные явления в светоизлучающих p-n структурах на основе фосфида галлия, стимулированные ультразвуком // Письма в ЖТФ, 1998, т.24, №15 с.64-68.

**$\gamma$  –KVANT ŞÜALANMASININ TƏSİRİNDƏN ZƏDƏLƏNMİŞ SİLİSIUM GÜNƏŞ  
ELEMENTLƏRİNİN XARAKTERİSTİKALARININ, ULTRASƏS EMALIN  
KÖMƏKLİYİ İLƏ BƏRPA OLUNMASI**

**İ.G.PAŞAYEV, M.N.AĞAYEV, R.F.MEHDİYEV, M.H.HƏSƏNOV**

**XÜLASƏ**

Ultrasəs emalı (USE) vasitəsilə silisium Günəş elementlərinin parametrlərinə təsdiq edilmiş eksperimental nəticələrin təsir və idarəetmə imkanına baxılmışdır. Burada  $\gamma$ -kvant şüalanmasının təsirindən zədələnmiş silisium Günəş elementlərinin xarakteristikalarının, ultrasəs emalın köməyi ilə qismən bərpa olunması göstərilmişdir. Silisium Günəş elementinin GE fotoelektrik xassələri və temperatur asılılığının düz və əks istiqamətdə cərəyanın VAX-ı və cərəyankeçmə mexanizminin dəyişməsinə USE hər mərhələsindən sonra təsiri tədqiqat məqsədilə öyrənilmişdir.

**Açar sözlər:** Günəş elementləri,  $\gamma$  - şüalanma, ultrasəs emalı.

**RESTORATION OF CHARACTERISTICS SILICON SOLAR ELEMENTS  
BROKEN BY AN IRRADIATION OF  $\gamma$  IN-QUANTA BY MEANS  
OF ULTRASONIC PROCESSING**

**I.G.PASHAEV, M.N.AGAEV, R.F.MEHDİYEV, M.Q.HASANOV**

**SUMMARY**

Experimental results proving possibility and management in parameters of silicon solar elements by means of ultrasonic processing (UP) are considered. Possibility of partial restoration of photo-electric properties of the solar elements broken by  $\gamma$ -irradiation by means of ultrasonic processing is shown. In order to research the influence of UP on the mechanism change of current transmission, after each stage of ultrasonic processing, photo-electric characteristics and temperature dependences of volt-ampere characteristics of silicon *Solar elements* SE in direct and those of the current in the opposite directions are studied. The temperature changed from 80K to 350K.

**Key words:** solar element, ultrasonic processing,  $\gamma$  - radiation.

*Поступила в редакцию: 09.03.2012 г.*

*Подписано к печати: 08.05.2012 г.*