

КОРОТКОВОЛНОВАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ В ОБЛУЧЕННЫХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ОПТИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Р.С.МАДАТОВ, В.Г.ГАСУМОВА, Н.А.САФАРОВ, Г.М.АХМЕДОВ

*Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана
AZ 1143, г.Баку, пр. Г.Джавида, 31*

Приведены результаты исследования спектральных характеристик кремниевых фотоэлементов с оптическими покрытиями Nd_2O_3 и $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$, облученных гамма квантами при комнатной температуре. Установлено, что гамма облучение дозой 50крад кремниевых фотоэлементов с покрытиями Nd_2O_3 и $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$ приводит к возникновению на границе раздела встроенного электрического поля, в результате чего наблюдается повышение фоточувствительности в коротковолновой области спектра. Уменьшение чувствительности в длинноволновой области спектра определяется базовой областью, вследствие чего можно полагать, что наблюдаемые значительные изменения являются результатом введения радиационных дефектов в р-область перехода. Возникающие радиационные дефекты устойчивы и длительно сохраняются при комнатной температуре.

Одним из путей повышения эффективности солнечных элементов в коротковолновой области спектра является покрытие светочувствительной поверхности просветляющими слоями [1,2]. При этом уменьшается коэффициент отражения света от чистой поверхности кремния в области спектра 0,4-1,1мкм [3]. В результате этого улучшаются эксплуатационные характеристики и увеличиваются сроки службы элементов. Среди материалов, перспективных для использования в качестве просветляющих покрытий кремниевых приборов, выгодно выделяются Nd_2O_3 и ZnS , которые обладают высокой прозрачностью в области спектра 0,4-1,1мкм. Кроме того, просветляющие покрытия защищают элементы от повреждений, вызванных радиацией в Космосе и неблагоприятными атмосферными воздействиями на Земле. В настоящее время в качестве просветляющего слоя для кремниевых элементов используются SiO_2 , Ta_2O_5 и др. В зависимости от природы покрытий в элементах происходят различные эффекты [4,5]. Целью данной работы является исследование коротковолновой фоточувствительности (ФЧ) облученных кремниевых фотопреобразователей (ФП) с оптическими покрытиями Nd_2O_3 и $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$.

Элементы были изготовлены методом термической диффузии фосфора в р-кремний с удельным сопротивлением 2Ом·см. Полученные р-п переходы имеют глубины 0,8÷1,0мкм. При условии АМ-1 фототок короткого замыкания составлял 25÷30мА/см², а напряжение холостого хода 0,5÷0,52В, КПД составлял 10-11%. Покрытия осаждались на поверхность элемента методом вакуумного испарения, контроль толщины слоев осуществлялся с помощью кварцевого резонатора КИТ-1. После нанесения на поверхность фотоэлемента тонкого слоя (70нм) Nd_2O_3 (показатель преломления $n=1,5$) фототок увеличивался более чем на 40% при АМ-1, а при двойном слое $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$ фототок увеличивается на 60% [4-6]. На поверхность элементов наносили сначала слой ZnS (70нм, $n=2,5$), а затем слой Nd_2O_3 (50нм). Облучение образцов проводилось гамма квантами энергией 1,25МэВ при комнатной температуре, и далее исследовались характеристики полученных элементов. На Рис.1 представлены кривые спектральной характеристики фотоэлементов на основе кремния с покрытиями SiO_2 , Nd_2O_3 и $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$ (измерения проведены на зеркальном монохроматоре МДР-23 с использованием в качестве эталона отградуированного вакуумного термоэлемента). Как видно из

Рис.1, фотоэлементы с покрытием Nd_2O_3 и $ZnS+Nd_2O_3$ в коротковолновой спектральной области имеют повышенную чувствительность относительно пленки двуокиси кремния. Сравнивая кривые 1-3, можно заключить, что повышенная чувствительность элементов в КВ области спектра обусловлена эффектами пассивации поверхностных заряженных центров и фотолюминесценции [6].

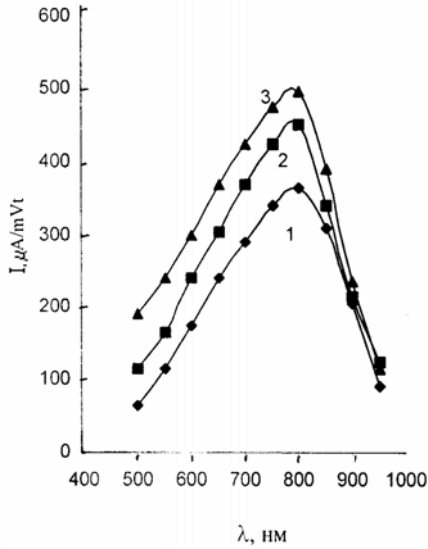


Рис.1.

Спектральная зависимость фотоэлемента $Si+ZnS+Nd_2O_3$:
 1- Si,
 2 - $Si+Nd_2O_3$,
 3 - $Si+ZnS+Nd_2O_3$.

На Рис.2 представлены спектральные характеристики фотоэлементов облученных гамма квантами дозой $50 \div 500$ крэд. Как видно из Рис.2, чувствительность в КВ части спектра возрастает при дозе 50 крэд (кр.2, 4) во всех образцах, а при высоких дозах (500 крэд) уменьшаются (кр.1, 3). Следует отметить, что чувствительность в образцах с оптическими покрытиями $ZnS+Nd_2O_3$ (кр.2, 3) всегда выше, чем с покрытием Nd_2O_3 (кр.1, 4).

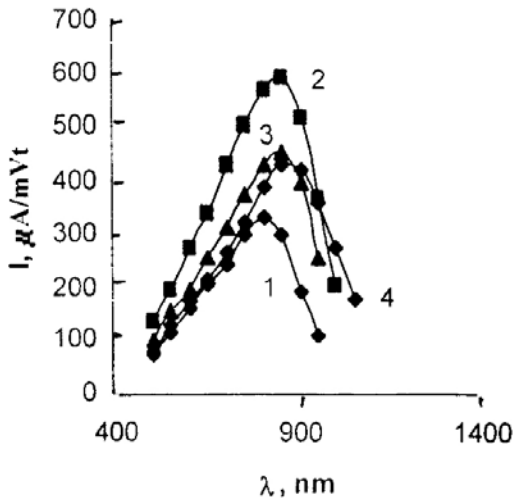


Рис.2.

Спектральные характеристики фотоэлементов $Si+Nd_2O_3$ и $Si+ZnS+Nd_2O_3$ при различных дозах облучения:
 1 и 4: $Si+Nd_2O_3$ $\Phi=500, 50$ крэд, соотв.,
 2 и 3: $Si+ZnS+Nd_2O_3$ $\Phi=50; 500$ крэд, соотв.

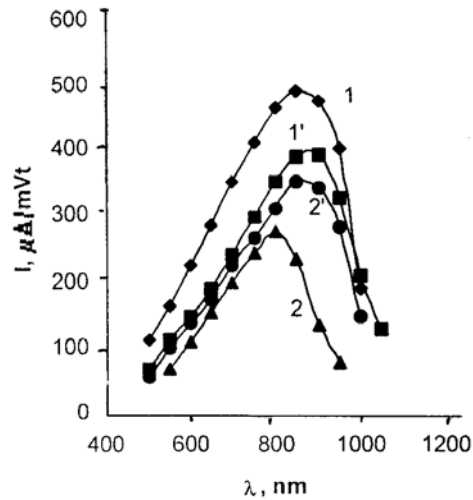
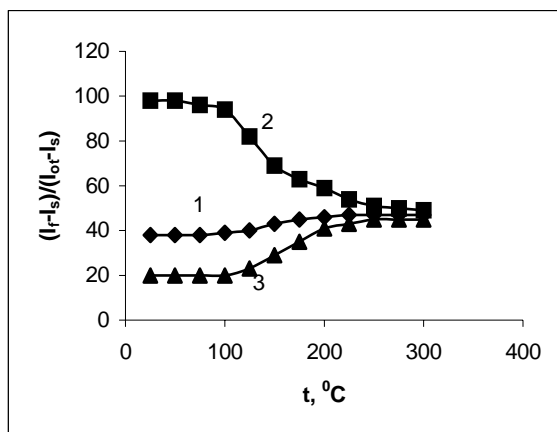


Рис.3.

Спектральная зависимость облученных фотоэлементов $Si+ZnS+Nd_2O_3$ после терм. отжига:
 1- $\Phi=50$ крэд и $t=150^\circ C$; 2- $\Phi=500$ крэд и $t=150^\circ C$;
 1' - $\Phi=150$ крэд и $t=150^\circ$; 2' - $\Phi=500$ крэд и $t=200^\circ C$.

Как видно из Рис.2., при увеличении дозы облучения вслед за снижением эффективности сбора происходит уменьшение чувствительности во всем диапазоне длин волн (кривая 1, 3). Возрастание фоточувствительности в КВ области спектра может быть объяснено тем, что вблизи перехода образуется слой с повышенным удельным сопротивлением, возникающий вследствие захвата основных носителей центрами, создаваемыми гамма квантами. Действительно, следует ожидать, что в результате облучения потоком гамма квантов $5 \cdot 10^{15}$ кв/см² с энергией 1,25 МэВ концентрация создаваемых центров захвата будет достаточной

для компенсации исходных уровней. Это следует из наших экспериментов по облучению кремния гамма квантами энергией 1,25МэВ, согласно которым оказалось, что рост чувствительности в коротковолновой области спектра преобладает над спадом при длинах волн более 0,8мкм. Известно, что чувствительность в длинноволновой области спектра, главным образом, определяется базовой областью, вследствие чего можно полагать, что наблюдаемые значительные изменения являются результатом введения радиационных дефектов в р- область перехода. На Рис.3 показано спектральное распределение чувствительности кремниевых р-п переходов с оптическими покрытиями, облученных дозами 50 и 500крад, измеренные после ряда этапов изохронного отжига. Анализ кривых показывает, что при отжиге 150°С наблюдается постепенное восстановление характеристики облученных фотоэлементов. Видно, что после отжига при 150°С в течение 1 часа образец, облученный низкой дозой (50крад, кр.1) полностью восстанавливается, а образец облученный дозой 500крад - частично (кр.2). Однако после отжига даже при 200°С полного восстановления не происходит. Эта стадия, по-видимому, связана с перегруппировкой дефектов в процессе отжига. Для определения энергии активации проводился изохронный отжиг однотипных элементов, облученных при одинаковых условиях. Относительное изменение чувствительности образцов ($I_{\phi}/I_{\phi,об}$ при 0,85мкм) в результате отжига представлено на Рис.4. В образцах, облучаемых дозой 50крад, наблюдается резкий спад фототока при 150°С и далее экспоненциальное его уменьшение в области 150÷300°С (кр.1). В образцах, облучаемых дозами 150 и 500крад в области отжига 100÷200°С фототок растет, а в диапазоне температур 200÷300°С - не изменяется. Анализ экспериментальных результатов показывает, что облучение вводит два вида дефектов, один из которых является центром прилипания основных носителей тока, а другой центром рекомбинации неосновных носителей тока. Это согласуется с результатами отжига низкотемпературных характеристик облученных образцов (при 50, 150 и 500крад), когда участок “отрицательного” отжига свидетельствует о том, что наряду с аннигиляцией и исчезновением дефектов одних типов происходит перегруппировка



ка дефектов и образование новых центров рекомбинации. Для определения энергии активации на более выраженных стадиях проводился изотермический отжиг однотипных элементов, облученных в одинаковых условиях. Такие зависимости для температур отжига 150 и 200°С показаны на Рис. 4.

Рис.4.

Зависимость неотожженных дефектов от температуры отжига в фотоэлементе Si+ZnS+Nd₂O₃ облученном при различных дозах: 1- Φ=150крад, 2- Φ=50крад, 3- Φ=500крад.

Связь между временем и температурой дается уравнением в [6]. Энергия активации отжига, определенная по изотермам (Рис.4), для первой стадии оказалось 0,95эВ, для второй – 1,56эВ. Полученные величины удовлетворительно совпадают со значениями энергии активации для E – центров (кремний + сера, E_c-0,26эВ) и А – центров (вакансия + кислород, E_c -0,16эВ) [6]. Таким образом, исследование отжига облученных образцов показывает, что природа радиационных дефектов на поверхности кремния с покрытиями Nd₂O₃ и ZnS+Nd₂O₃ связана с необратимым

процессом разрыва межатомных связей на границе раздела Si–ZnS+Nd₂O₃ (Nd₂O₃) и изменением зарядового состояния примесей и дефектов. Отметим, что воздействие ионизирующего излучения на полупроводники приводит к возникновению в поверхностной области встроенного электрического поля, которое может вызвать десорбцию (адсорбцию) ионов и электронов, а также стимулировать процессы миграции этих частиц в объем кристалла [6,7]. Эти поля видоизменяют электронную поверхность и создают значительной изгиб энергетических зон в приповерхностной области образца. Исходя из этих данных, можно предположить, что при нанесении слоя ZnS + Nd₂O₃ на очищенную поверхность кремния благодаря диффузионному проникновению серы из слоя в объем кремния может возникать частично скомпенсированная область в кремнии, обогащенная дырками, которая будет влиять на электрические и фотоэлектрические характеристики структур. Следует отметить, что при этом между полупроводником и покрытием образуется высокоомный переходной слой – p⁺ с концентрацией $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Возникновение переходного слоя удалось зафиксировать методом ЭО в [8]. Учитывая тот факт, что в кремнии примесь серы создает центры захвата для основных носителей тока с энергией ионизации $E_c - 0,26 \text{ эВ}$ [5], а атом цинка образует локализованные центры люминесценции с энергией $E_v + 0,16 \text{ эВ}$ [4], можно предположить, что основным механизмом радиационного дефектообразования под действием гамма квантов является ионизация примесей.

Экспериментальные результаты свидетельствуют, что фотоэлементы с покрытиями ZnS+Nd₂O₃ обеспечивает большие значения фототока короткого замыкания и более подходит для использования в космическом и земном энергоснабжении, чем покрытия из SiO₂ как в плане обеспечения большого значения КПД, так и в отношении стойкости к проникающей радиации.

В результате проведенных выше исследований можно сделать следующие выводы:

1. Гамма облучение дозой 50крад кремниевых фотоэлементов с покрытиями Nd₂O₃ и ZnS+Nd₂O₃ приводит к возникновению на границе раздела встроенного электрического поля, в результате чего наблюдается повышение фоточувствительности в коротковолновой области спектра .
2. Возникающие радиационные дефекты устойчивы и длительно сохраняются при комнатной температуре.

1. М.М.Колтун, *Оптика и метрология солнечных элементов*, М. Наука, (1985) 279.
2. Ю.А.Анешкин, А.И.Петров и др., *Гелиотехника*, **1** (1982) 13.
3. В.А.Рожков, А.П.Петров и др., *Письма в ЖТФ*, **20** в.12 (1994) 43.
4. М.Я.Бакиров, *ФТП*, **30** (1996) 1213.
5. Р.С.Мадатов, Н.А.Сафаров, Г.М.Ахмедов, *Confer.Proceed.TRE-2002*, Baku, (2002) 437.
6. V.L.J.Cregov, *Appl.Phys.*, **18** (1979) 3765.
7. L.Alan Fahrenbruch, H.Richard, *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, (1987) 137.
8. В.Д.Попов, В.С.Григорьев и др., *Радиационные дефекты в полупроводниках*, (1972) 95.

**OPTİK ÖRTÜKLÜ ŞÜALANMIŞ SİLİSIUM FOTOÇEVİRİCİLƏRİN
QISADALĞALI FOTOHƏSSASLIĞI**

R.S.MƏDƏTOV, V.Q.QASIMOVA, N.Ə.SƏFƏROV, Q.M.ƏHMƏDOV

Qamma kvantları ilə şüalandırılmış optik örtüklü Nd_2O_3 və $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$ silisium fotoelementlərinin spektral xarakteristikalarının tədqiqinin nəticələri göstərilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, şüalanma dozası 50krad olan qamma şüaları ayrılma sərhədində istiqamətlənmiş elektrik sahəsi yaradır və onun nəticəsində silisium fotoelementlərinin qısa dalğa oblastindəki həssaslığı artır. Əmələ gələn radiasiya qüsurları dayanıqlıdır və uzun müddət otaq temperaturunda saxlanılır.

**SHORT-WAVE PHOTSENSIVITY IN THE IRRADIATED SILICON PHOTOCONVERTERS
WITH OPTICAL COVERINGS**

R.S.MADATOV, V.G.GASUMOVA, N.A.SAFAROV, G.M.AHMEDOV

The results of investigations spectral characteristics of silicon photoelements Nd_2O_3 and $\text{ZnS}+\text{Nd}_2\text{O}_3$ with optical coverings and irradiated with γ -kvants have been shown in this work. It has been determined that γ -rays of 50krad radiation dosage forms directed electric field on the sensitivity of silicon photoelements on short wase interval increases. The appearing radiation defects were reliable and could be stored at the normal temperature for a long time.

Редактор: Э.Гуссейнов