

## ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

И. К. Дойчо, Ф. Э. Маому, Я. О. Ройзин

Одесский госуниверситет им. И. И. Мечникова

Определены пороговые дозы у-облучения, при которых наблюдаются деградационные изменения в  $a\text{-Si:H}$ . Показано, что у-излучение приводит к повышению однородности электрических параметров на фоне общего ухудшения нагрузочных кривых. Результаты интерпретируются в рамках представлений о разрыве  $\text{Si-H}$  связей под действием мощных излучений.

Солнечные элементы на аморфном гидрированном кремнии ( $a\text{-Si:H}$ ) являются одним из наиболее перспективных преобразователей электромагнитного излучения в электрическую энергию благодаря своей экологической чистоте и экономичности. Солнечные батареи на  $a\text{-Si:H}$  имеют большие площади и относительно дешевы. Их стабильность и надежность определяются, в основном, наличием локальных дефектов типа пор и трещин и процессами диффузии водорода из  $a\text{-Si:H}$  [2]. В ряде применений элементы на аморфном гидрированном кремнии подвергаются мощным радиационным воздействиям. Как большинство полупроводниковых приборов на аморфных материалах, солнечные батареи на аморфном кремнии достаточно стабильны к ионизирующему излучению. Однако, при больших дозах проявляются эффекты деградации, заключающиеся в изменении нагрузочной характеристики. Происходящие при этом физические процессы детально не исследованы. Целью настоящей работы является изучение влияния у-излучения на параметры солнечных элементов на основе  $a\text{-Si:H}$ .

При определенных условиях облучения материалы и приборные структуры могут быть радиационно стабильными по своим оптическим параметрам, но нестабильными по электрофизическим свойствам. Поэтому в настоящей работе проводились параллельно измерения нагрузочных характеристик солнечных элементов и контроль оптических параметров слоев, из которых они были изготовлены.

Исследуемые структуры представляли собой  $p\text{-i-n}$  элемент, сформированный на стеклянных подложках, покрытых проводящим слоем окиси индия-олова сопротивлением порядка 100 Ом/. Аморфный гидрированный кремний получался путем разложения силаново-водородной смеси в высокочастотном разряде при температуре 240°C и давлении порядка 1 Торр. Формирование  $p\text{-i-n}$  структуры осуществлялось путем добавки фосфина и диборана в реакционную смесь. Поверх внешнего

$p$ -слоя напылялись непрозрачные алюминиевые контакты. В ряде случаев роль внешнего электрода выполняли ртутные зонды различных конструкций, в том числе оригинальные сканирующие фотозонды [1], совмещающие возможности сканирующих [3] и лазерных зондов. Внешняя поверхность  $p\text{-i-n}$  структуры была достаточно сильно легирована, чем обеспечивались малые значения фотоответа на барьере  $\text{Me-p}\{a\text{-Si:H}\}$  с рабочей областью прибора (почти омический контакт). Толщина слоев  $a\text{-Si:H}$  измерялась эллипсометрически на спутниках, изготовленных на стеклах без проводящего подслоя. Общая толщина слоев составляла 0,3 мкм. Нагрузочные характеристики измерялись с помощью электрометра У 5-7 с набором шунтирующих сопротивлений. Спектры оптического поглощения контролировались с помощью спектрофотометра СФ-46. Интерференционные эффекты учитывались путем пересчета с помощью специальной программы, написанной на языке BASIC, на ЭВМ типа IBM PC. Облучение образцов проводилось на установке КУ-100.000 (мощность 2000 рад/с) и установке МРХ-у-25 м (мощность 6000 рад/с). Источником облучения служил изотоп  $\text{Co}^{60}$ .

На рис. 1 показаны нагрузочные характеристики типичного  $p\text{-i-n}$  элемента с площадью металлического электрода 3 мм<sup>2</sup> в исходном состоянии (а) и той же структуры, снятые сразу после у-облучения дозами 10<sup>6</sup> рад (б), 10<sup>7</sup> рад (в), 2·10<sup>8</sup> рад (г). Кривые снимались при освещении лазером ЛГ-28А. Полученные данные позволяют оценить пороговые дозы, при которых начинают проявляться деградационные изменения. Эти значения находятся в области 5·10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> рад. Следует отметить, что при таких дозах не наблюдается заметных изменений коэффициента оптического поглощения аморфного кремния, из которого изготовлен солнечный элемент. Существенные изменения регистрируются при более, чем на порядок больших дозах (рис. 2). Как видно из этого рисунка, при облучении дозой 10<sup>7</sup>

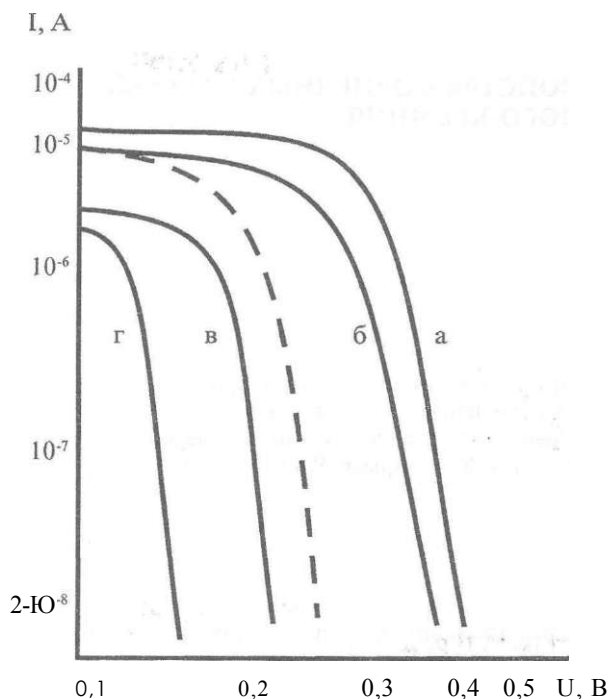


Рис. 1. Нагрузочные характеристики типичного p-i-n элемента:

- а) в исходном состоянии,
- б) после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^6$  рад,
- в) после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^7$  рад,
- г) после  $\gamma$ -облучения дозой  $210^8$  рад.

Пунктиром показана нагрузочная кривая спустя два месяца после облучения дозой  $2 \cdot 10^8$  рад.

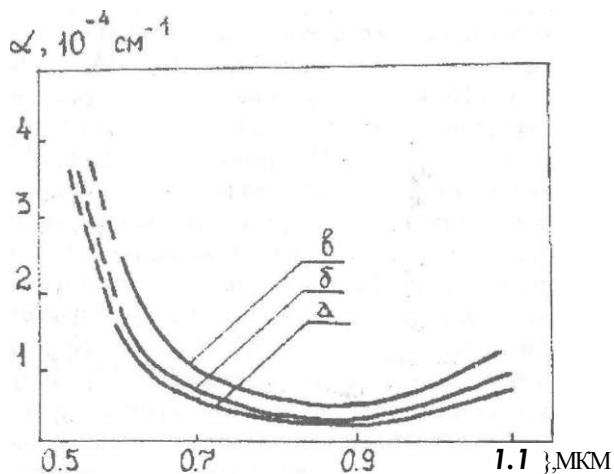


Рис. 2. Коэффициент оптического поглощения аморфного кремния:

- а) в исходном состоянии.
- б) после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^6$  рад.
- в) после  $\gamma$ -облучения дозой  $210^8$  рад.

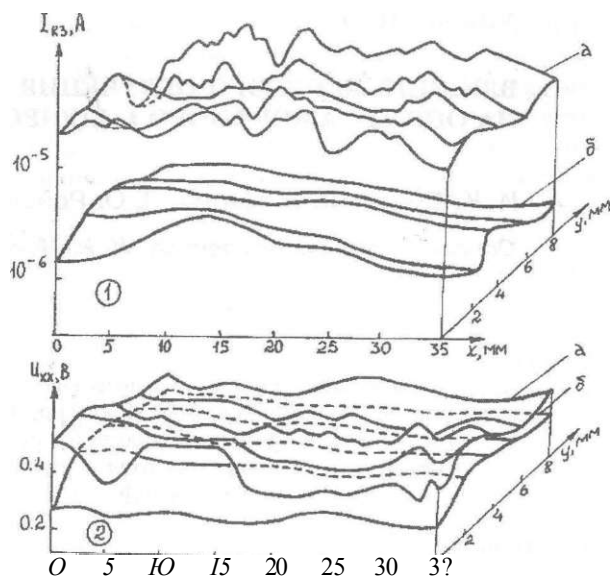


Рис. 3. Топограммы распределения тока короткого замыкания 1 и напряжения холостого хода 2 по площади исходного (а) и облученного дозой  $10^7$  рад (б) образца.

рад имеет место лишь незначительное уменьшение прозрачности в видимой и ИК областях спектра. Край собственного поглощения, соответствующий ширине оптической щели в  $a\text{-Si:H}$  (примерно 1.9 эВ) не сдвигается (а, б). При более мощном облучении (кривая в) этот край сдвигается на несколько десятых электрон-вольт в область меньших энергий кванта.

Следует отметить, что радиационные изменения частично отжигаются даже при комнатной температуре. На рис. 1 пунктиром показана нагрузочная кривая образца, облученного дозой  $2 \cdot 10^8$  рад, спустя два месяца после облучения. Видно, что имеет место частичное восстановление исходной характеристики. Последующие отжиги (в том числе и при повышенных температурах) не давали полного восстановления исходных параметров структуры.

На рис. 3 представлены топограммы тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) и напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ) до и после облучения, которые показывают, что однородность  $I_{ки}$  и  $U_{xx}$  улучшается при облучении, но абсолютные значения  $I_{ки}$  ( $U_{xx}$ ) уменьшаются с его дозой. Статистическая обработка результатов показывает, что если до облучения значения  $I_{ки}$  по площади образца отклонялись от среднего примерно на 8%, то после облучения значения  $I_{ки}$  отклонялись от среднего лишь на  $1,5^\circ$  о. Аналогично, если до облучения значения  $U_{xx}$  по площади образца отклонялись от среднего на  $7,5''$  о. то после облучения — на  $4,3''$  о.

Для объяснения полученных результатов предлагается следующая интерпретация. Известно [5], что при мощных световых воздействиях в водородо-

досодержащих материалах на основе кремния наблюдаются процессы миграции водорода. Эти процессы ведут к кластеризации водорода и его частичной эффузии из тонких пленок. Низкая энергия квантов при световых воздействиях не позволяет разорвать основные связи *Si-H* в аморфном гидрированном кремнии. В отличие от указанной ситуации, энергия  $\gamma$ -квантов вполне достаточна для разрыва этих связей, вследствие чего наряду с процессами, приводящими к эффузии водорода, имеет место также интенсивное образование новых оборванных связей кремния. Покинувший свои места водород занимает новые, квазиустойчивые положения вблизи образовавшихся оборванных связей. В свою очередь, оборванные связи являются эффективными центрами рекомбинации электронно-дырочных пар. В объеме аморфного кремния обычно присутствует до 20% связанного в виде *Si-H* связей водорода. Даже если только 1% этих связей разрушается в процессе  $\gamma$ -излучения, этого достаточно для образования  $10^{18}$ - $10^{20}$  см<sup>3</sup> новых рекомбинационных состояний. Этот факт объясняет наблюдаемые в эксперименте изменения нагрузочных характеристик. При отжиге происходит обратный процесс, приводящий к частичному восстановлению свойств исследуемых структур. Генерация упомянутых дефектов происходит однородно по всему объему пленки в отличие от локальных нарушений при облучении видимым светом.

Поэтому, в отличие от случая деградации под действием мощного излучения из видимой части спектра, на фоне уменьшения  $I_{\text{ф}}$  и  $U_{\text{ф}}$  регистрируется улучшение однородности характеристик по площади при дозах порядка  $10^7$  рад. При более высоких дозах облучения, видимо, доминируют процессы кластеризации и эффузии водорода. На спектрах поглощения это регистрируется по уменьшению оптической щели *a-Si:H* (см. также [4]).

#### Литература

1. Дойчо И. К., Ройзин Я. О., Свиридов В. Н. Фотозонд. А. с. СССР № 1725133, 1991. опубл. в Бюл. откр. и изобр. № 13, 7 апр. 1992.
2. Ендриховский С. А., Ройзин Я. О., Свиридов В. Н., Цыбесков Л. В. Токовая деградация гетероструктур на основе *a-Si:H* // ФТП. — 1989. — Т. 23. — Вып. 3. — С. 444-449.
3. Свиридов В. Н., Ройзин Я. О., Дойчо И. К. Сканирующий ртутный зонд. А. с. СССР № 1556462, 19897
4. Karcher R., Lay L., Sohnison R. L. Electronic structure of hydrogenated and unhydrogenated amorphous  $SiN_x$  ( $0 < x < 1.6$ ). A photoemission study // Phys. Rev., B. — 1984. — Vol. 30. — №. 4. — P. 1896-1910.
5. Roizin Y. O. Failure phenomena due to hydrogen migration in amorphous *a-Si:H* film // J. Non-Cryst. Sol. — 1991. — Vol. 137 & 138. — P. 61-64.