

36. Пан В. М. Сверхпроводимость с высокими критическими параметрами // Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук.— Киев, 1974.— 28 с.
37. Hertel P. Lattice structure instabilities and  $E$ -ph coupling in superconductors with high  $T_c$  // Physics.— 1974.— LT13.— Р. 627—635.

Ин-т полупроводников АН УССР, Киев

Получено 12.03.90

УДК 621.383.8

**Е. Ю. Брайловский, Б. П. Масенко,  
С. А. Онищук**

**ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПРОФИЛИРОВАННОГО  
И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Исследовано влияние облучения быстрыми нейтронами реактора и последующего отжига на световые и темновые ВАХ, спектральную чувствительность и КПД солнечных элементов, изготовленных из монокристаллического и профицированного кремния  $p$ -типа. Определены коэффициенты радиационной повреждаемости диффузионной длины неосновных носителей в базовой области СЭ. Установлены более высокая радиационная стойкость при облучении и более эффективное восстановление характеристик при отжиге для СЭ из профицированного кремния. Результаты объяснены влиянием исходных дефектов структуры на процессы радиационного дефектообразования и отжига.

Профицированный кремний, выращенный по способу Степанова, является перспективным материалом для получения солнечных элементов (СЭ) наземного применения. Производство из отходов монокристаллического кремния, отсутствие механических обработок, малоотходная технология получения подложек создают возможности для производства дешевых солнечных батарей. Однако вследствие высокой скорости кристаллизации данный материал обладает повышенной плотностью структурных дефектов (межблочные и двойниковые границы, дислокации и собственные точечные дефекты), что приводит к снижению времени жизни неосновных носителей заряда и, как следствие, к ухудшению характеристик СЭ на основе профицированного кремния по сравнению с приборами на монокристаллическом кремнии.

В то же время в определенных условиях дефекты структуры могут играть положительную роль, выступая, например, в качестве стоков для радиационных дефектов (РД), что приводит к снижению скорости деградации приборов при облучении. При исследовании влияния собственных дефектов структуры на радиационное дефектообразование в профицированном кремнии по измерениям спектров фотолюминесценции в работе [1] получено, что после облучения  $\gamma$ -квантами  $Co^{60}$  в таком материале не наблюдается эффективный излучательный канал ( $C$ -полоса), обусловленный кислородсодержащими дефектами [2], но в то же время  $G$ -полоса люминесценции, не связанная с кислородсодержащими РД, вводится так же, как и в монокристаллическом тянутом кремнии.

При облучении кремния быстрыми нейтронами возникают разупорядоченные области, состоящие из насыщенного дивакансиями либо междоузельными атомами ядра и оболочки, включающей комплексы вакансий с примесями, например с кислородом [3, 4]. Отжиг разупорядоченных областей происходит вначале диссоциацией дивакансий (200—300 °C) с образованием новых комплексов вакансий с примесями и дальнейшей перестройкой оболочек [5].

В работе [6] показано, что на поведение дефектов в кремнии, облученном нейтронами, существенно влияет поверхность. Поэтому формирование отжига РД при облучении нейтронами могут зависеть от примесно-дефектного состава кремния.

© Е. Ю. Брайловский, Б. П. Масенко, С. А. Онищук, 1991

ISSN 0233-7577. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, 1991, Вып. 20,

уменьшении диффузионной длины в базовой области при облучении, поскольку в СЭ скорость генерации электрон-дырочных пар для длинноволнового света спадает с увеличением расстояния от поверхности медленнее, чем для коротковолнового. На рис. 3 приведены значения диффузионной длины  $L$  в зависимости от флюенса нейтронов для двух типов приборов, определенные по измерениям спектральной чувствительности. Радиационная чувствительность СЭ из профилированного кремния существенно выше, чем из монокристаллического. Экспериментальные точки хорошо описываются соотношением

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K\Phi, \quad (1)$$

где  $L_0$  — исходная диффузионная длина. Рассчитанные по данным рис. 3 значения константы повреждаемости  $K$  из (1) составили  $K_m = 5 \cdot 10^{-7}$  и  $K_p = 1 \cdot 10^{-7}$  для монокристаллического и поликристаллического кремния соответственно. Поскольку диффузионная длина связана с временем жизни неосновных носителей заряда, то полученные результаты указывают на меньшую скорость введения центров рекомбинации радиационного происхождения в профилированном кремнии. Рекомбинация носителей заряда в нейтроноблученном кремнии происходит на разупорядоченных областях, причем определяется примесно-дефектной оболочкой [3]. Отсюда следует, что в профилированном кремниевом разупорядоченные области характеризуются меньшей примесно-дефектной оболочкой. Можно объяснить наличием в таком кремнии большого количества внутренних стоков, являющихся стоками для подвижности РД. Результаты измерения темновых токов, облученных СЭ, указывают на усиление рекомбинационного тока с увеличением флюенса нейтронов, что также связано с нарушением РД.

Отжиг СЭ проводился при температуре 200 °С, соответствующей исчезновению около 90 % дивакансий в разупорядоченных областях [7]. Использовать более высокие температуры отжига не позволяла конструкция СЭ (ухудшились контакты). Контрольный отжиг при 200 °С не изменил характеристики необлученных приборов. Световые ВАХ и спектральная

относительные изменения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, коэффициента заполнения ВАХ и КПД СЭ после облучения

$\Phi, \text{Н/см}^2$	$U_{\text{хх}}$	$I_{\text{КЗ}}$	$FF$	КПД
Моно-Si				
$10^0$	$1,00 \pm 0,02$	$1,00 \pm 0,02$	$1,00 \pm 0,04$	$1,00 \pm 0,06$
$10^{11}$	$0,968 \pm 0,009$	$0,92 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,04$	$0,90 \pm 0,04$
$10^{12}$	$0,924 \pm 0,007$	$0,81 \pm 0,04$	$1,00 \pm 0,06$	$0,74 \pm 0,07$
$10^{13}$	$0,85 \pm 0,01$	$0,62 \pm 0,03$	$1,03 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,04$
$10^{14}$	$0,760 \pm 0,004$	$0,43 \pm 0,04$	$1,05 \pm 0,03$	$0,34 \pm 0,03$
Поли-Si				
$10^0$	$1,00 \pm 0,02$	$1,00 \pm 0,03$	$1,00 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,07$
$10^{11}$	$1,00 \pm 0,04$	$0,97 \pm 0,05$	$0,98 \pm 0,05$	$0,96 \pm 0,05$
$10^{12}$	$0,98 \pm 0,04$	$0,93 \pm 0,04$	$1,00 \pm 0,04$	$0,91 \pm 0,04$
$10^{13}$	$0,92 \pm 0,03$	$0,78 \pm 0,05$	$0,98 \pm 0,04$	$0,70 \pm 0,04$
$10^{14}$	$0,81 \pm 0,03$	$0,62 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,03$

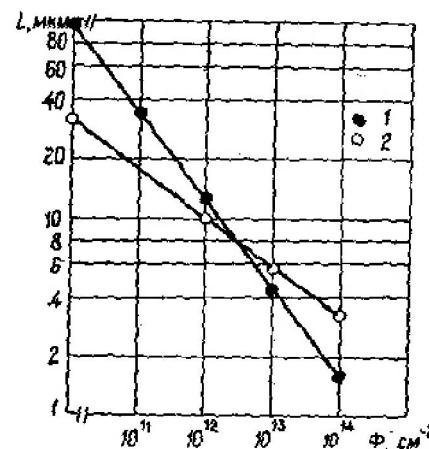


Рис. 3. Зависимость диффузионной длины неосновных носителей в базовой области от флюенса нейтронов:

1 — СЭ из монокристаллического кремния; 2 — СЭ из профилированного кремния

В настоящей работе исследовалось влияние различных доз нейтронного облучения на деградацию СЭ на основе монокристаллического и профилированного кремния, а также влияние отжига на характеристики облученных приборов.

Исследуемые СЭ были изготовлены на подложках из монокристаллического кремния марки КСД-3, выращенного методом Чохральского с ориентацией поверхности (111), а также из поликристаллического кремния, профилированного в виде полых многогранных труб по способу Степанова. Термической диффузией фосфора из ФСС был получен *p-n*-переход с глубиной залегания порядка 0,5 мкм, напылены трехслойные контакты. В качестве антиотражающего покрытия использован слой ZnS. Приборы для исследований были подобраны так, что все СЭ на основе монокремния размером  $30 \times 40$  мм имели до облучения КПД 12,5 %, а СЭ на основе поликремния размером  $30 \times 60$  мм — 8,5 %. КПД измерялся при температуре 40 °C

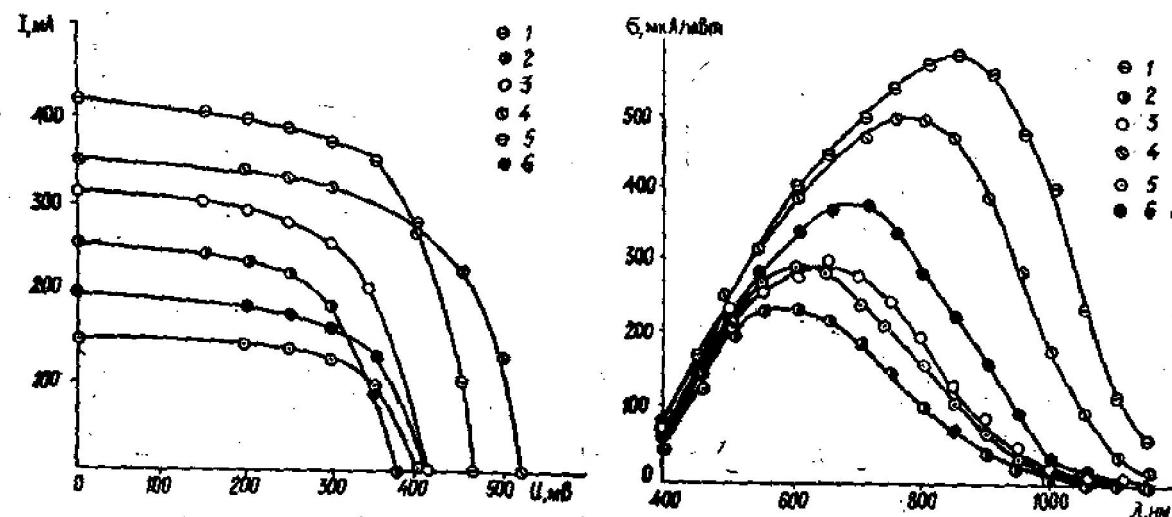


Рис. 1. Световая ВАХ СЭ на основе монокристаллического (1—3) и профилированного (4—6) кремния:

1, 4 — до облучения; 2, 5 — после облучения флюенсом  $1 \cdot 10^{14}$  Н/см<sup>2</sup>; 3, 6 — после отжига

Рис. 2. Спектральная чувствительность СЭ на основе монокристаллического (1—3) и профилированного кремния:

1, 4 — до облучения; 2, 5 — после облучения флюенсом  $1 \cdot 10^{14}$  Н/см<sup>2</sup>; 3, 6 — после отжига

под осветителем, в качестве источника света в котором использовалась лампа накаливания с цветовой температурой нити 2850 K.

Элементы были облучены быстрыми нейтронами со средней энергией 2,2 МэВ флюенсами  $10^{11}$ ,  $10^{12}$ ,  $10^{13}$  и  $10^{14}$  Н/см<sup>2</sup> в реакторе ВВРМ-10 АН УССР. Оба типа приборов облучались в одном пакете, чтобы сравнение деградации СЭ из разных материалов было достоверным. Приборы одного типа для облучения разделены на группы, причем одна из групп каждого типа СЭ использовалась в качестве контрольной. После облучения исследовались спектральная чувствительность, световая и темновая вольт-амперная характеристики каждого элемента, а результаты статистически обработаны.

На рис. 1 показаны средние по группам световые ВАХ облученных СЭ, полученные на имитаторе в условиях АМО. Видно, что приборы обоих типов заметно деградируют с увеличением флюенса нейтронов. Для сравнения деградации обоих типов приборов были вычислены отношения характеристик облученных СЭ к контрольным, которые представлены в таблице. Анализ показывает, что из измеренных характеристик СЭ сильно падают  $U_{xx}$ ,  $I_{xx}$  и КПД при практически неизменном коэффициенте заполнения ВАХ. Причем относительное ухудшение характеристик у СЭ на основе профилированного кремния выражено значительно слабее.

Для определения причин деградации СЭ были измерены спектральные чувствительности СЭ обоих типов, представленные на рис. 2. Их ухудшение происходит в основном в «красной» части спектра. Это свидетельствует об

чувствительность для обоих типов приборов после облучения флюенсом  $10^{14}$  Н/см<sup>2</sup> и последующего отжига в режиме:  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t = 30$  мин — приведены на рис. 1 и 2. Как видно из рис. 2, в результате отжига значительно восстановилась «красная» область спектральной чувствительности, что свидетельствует о снижении рекомбинационной активности на базе облученных приборов. Одновременно частично восстанавливаются и световые ВАХ, причем восстановление характеристик СЭ при отжиге у приборов на основе профилированного кремния происходит более эффективно. В процессе отжига разупорядоченных областей при  $200^\circ\text{C}$  в результате взаимодействия с дивакансиями подвижных междуузельных атомов, высвободившихся при развале комплексов междуузельного типа [7], появляются свободные ваканции, способные вновь образовывать стабильные комплексы — центры рекомбинации. Наблюдаемое различие в восстановлении характеристик СЭ, по-видимому, обусловлено дополнительным поглощением вакансий, освобождающихся из разупорядоченных областей при отжиге, дефектами структуры в профилированном кремнии.

Таким образом, исходные дефекты структуры в профилированном кремнии служат стоками для подвижных РД и оказывают влияние на процессы радиационного дефектообразования и отжига, в результате чего при облучении быстрыми нейtronами реактора радиационная стойкость СЭ из профилированного кремния выше по сравнению с приборами из монокристаллического кремния.

1. Дроздов И. А., Казючиц И. М., Патрин А. А. Радиационное дефектообразование в лентах кремния, облученных  $\gamma$ -квантами // ЖТФ.— 1986.— 56, вып. 5.— С. 954—955.
2. Софонов Л. Н. Низкотемпературная фотолюминесценция облученного кремния // Радиационные эффекты в полупроводниках.— Новосибирск : Наука, 1979.— С. 101—129.
3. Коноплева Р. Ф., Литвинов В. Л., Ухин Н. А. Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий.— М. : Атомиздат, 1971.— 176 с.
4. Гроза А. А., Хиврич В. И. Околоокраевое поглощение в кремнии, облученном нейтронами и 1,5 МэВ электронами // ФТП.— 1979.— 13, вып. 5.— С. 870—874.
5. Легирование полупроводников методом ядерных реакций / Л. С. Смирнов, С. П. Соловьев, В. Ф. Стась, В. А. Харченко.— Новосибирск : Наука, 1981.— 180 с.
6. Лангбайн Д., Шеланин Е. Исследование влияния поверхности на поведение дефектов в кремнии, облученном нейтронами // ФТП.— 1984.— 18, вып. 5.— С. 808—811.
7. Особенности отжига дивакансий в кремнии, содержащем разупорядоченные области / И. В. Антонова, А. В. Васильев, В. И. Панов и др. // Там же.— 1989.— 23, вып. 6.— С. 1076—1079.

Ин-т ядерных исследований АН УССР, Киев

Получено 20.01.90

УДК 534:621.38

**В. Л. Громашевский, А. Г. Кундзич,  
Н. П. Татьяненко, В. В. Яцик**

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНОЙ АКУСТО-ЭДС В СТРУКТУРЕ $\text{LiNbO}_3$ —Si**

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование динамических характеристик поперечного акустоэлектрического эффекта (АЭЭ) в слоистой структуре  $\text{LiNbO}_3$ —Si. Установлены условия, при которых наблюдаются взаимное влияние ловушечной и концентрационной компонент АЭЭ и нелинейный характер динамических зависимостей. В частности, насыщение последних в случае высокоомного Si объясняется с привлечением нового механизма этого явления. Полученные результаты используются при рассмотрении вопросов оптимизации динамического диапазона устройств свертки, а также акустоэлектронной спектроскопии — оценки плотности быстрых и медленных электронных состояний и изгиба зон на поверхности полупроводника.

Поперечный акустоэлектрический эффект (АЭЭ) [1] в структуре пьезодиэлектрик — полупроводник используется в настоящее время как для акустоэлектронной спектроскопии поверхности полупроводников [2—4],

© В. Л. Громашевский, А. Г. Кундзич, Н. П. Татьяненко, В. В. Яцик, 1991