

УДК 621.383

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТРЁХПЕРЕХОДНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА GaInP/GaAs/Ge СО ВСТРОЕННЫМ БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ $Al_{0,1}Ga_{0,9}As/Al_{0,8}Ga_{0,2}As$

А. Ф. Скачков

*Открытое акционерное общество «Сатурн»,  
350040, г. Краснодар, ул. Солнечная, 6  
E-mail: afskachkov@mail.ru*

Проведена оптимизация структуры трёхпереходного солнечного элемента (СЭ) GaInP/GaAs/Ge со встроенным брэгговским отражателем (БО), в результате которой были снижены потери прошедшего (отражённого) излучения в слоях туннельного диода. Получена оптимизированная структура СЭ с БО методом МОС-гидридной эпитаксии. Изготовлены образцы фотопреобразователей размером  $20 \times 30$  мм. Проведены испытания образцов СЭ с БО и без БО при воздействии потоков электронов с энергией 1 МэВ. Показано, что введением брэгговского отражателя в структуру солнечного элемента и уменьшением толщины базы среднего  $p$ - $n$ -перехода можно увеличить радиационную стойкость СЭ.

*Ключевые слова:* солнечные элементы, брэгговский отражатель, радиационная стойкость.

**Введение.** Основной областью применения трёхпереходных солнечных элементов (СЭ) GaInP/GaAs/Ge в настоящее время является космическая отрасль. Находясь в космосе, солнечные элементы подвержены воздействию космической радиации, в результате чего происходит деградация электрических параметров. Действие космической радиации на фотопреобразователи приводит главным образом к снижению тока короткого замыкания, связанному с уменьшением времени жизни и диффузной длины носителей заряда. Это обусловлено возникновением дополнительных центров рекомбинации под действием радиации путём смещения атомов полупроводникового материала в междоузлие [1, 2]. Наибольшей радиационной деградации в структуре солнечного элемента подвержен средний  $p$ - $n$ -переход GaAs. Данный элемент обладает значительной толщиной базы ( $\sim 3,5$  мкм), и при образовании дефектов кристаллической решётки в результате радиационного воздействия увеличивается доля носителей, не достигающих области разделения зарядов.

В [3] рассмотрена возможность уменьшения толщины базы среднего  $p$ - $n$ -перехода GaAs без потери тока, генерируемого в нём. Показано, что использование распределённого брэгговского отражателя (БО) позволяет компенсировать потери тока, вызванные увеличением доли прошедшего сквозь элемент излучения.

Цель предлагаемой работы — увеличение радиационной стойкости трёхпереходных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge со встроенным БО за счёт оптимизации эпитаксиальной структуры солнечного элемента.

**Оптимизированная структура СЭ со встроенным БО.** Брэгговский отражатель представляет собой слоистую структуру, в которой показатель преломления материала периодически изменяется в одном пространственном направлении (перпендикулярно слоям). В структуре СЭ он должен отражать прошедшее сквозь средний элемент GaAs излучение обратно в  $p$ - $n$ -переход, т. е. обеспечивать максимальное отражение в определённом диапазоне длин волн.

Модель распределённого брэгговского отражателя состояла из 16 периодов. В качестве материалов слоёв БО выбраны  $(Al_{0,1}Ga_{0,9})_{1-x}In_xAs$  и  $Al_{0,8}Ga_{0,2}As$ . Содержание индия

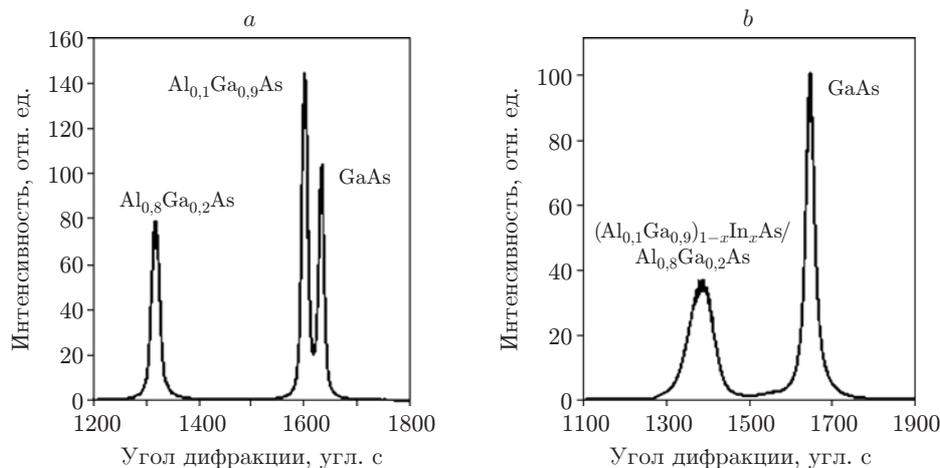


Рис. 1

в слое  $(Al_{0,1}Ga_{0,9})_{1-x}In_xAs$  подобрано таким образом, чтобы обеспечить согласование постоянных решёток слоёв зеркала. На рис. 1 представлены профили дифракционных линий образцов  $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$ ,  $(Al_{0,1}Ga_{0,9})_{1-x}In_xAs$  и  $Al_{0,8}Ga_{0,2}As$  на подложках GaAs. Как видно из рисунка, введением менее 1 % индия в слой зеркала  $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$  можно добиться полного согласования параметров кристаллических решёток слоёв брэгговского отражателя. Учитывая многослойность распределённого БО, данный шаг должен привести к уменьшению различного рода дефектов и дислокаций в структуре зеркала. Добавление такой малой концентрации индия в слой  $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$  позволяет пренебречь изменением оптических свойств материала  $(Al_{0,1}Ga_{0,9})_{1-x}In_xAs$  и использовать в расчётах дисперсию коэффициентов преломления и экстинкции для  $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$ . Толщины слоёв БО были рассчитаны методом характеристических матриц [4], чтобы обеспечить максимальную отражательную способность в диапазоне длин волн 800–900 нм.

Для отражения излучения, прошедшего сквозь средний элемент GaAs, брэгговское зеркало в структуре СЭ располагается на буферном слое. Между базой среднего  $p$ - $n$ -перехода и структурой БО находятся слои туннельного диода (ТД), в которых происходит паразитное поглощение прошедшего (отражённого) излучения, в частности в слое туннельного диода  $GaAs-n^{++}$ . В работе [5] рассмотрена возможность использования слоёв структуры брэгговского отражателя в качестве тыльного потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода, т. е. предложено расширить круг задач, решаемых посредством встраивания зеркала. Слои БО чередовались так, чтобы широкозонный слой AlAs последней пары граничил с базой элемента. В предлагаемой работе пара слоёв зеркала, прилегающая к ТД, объединена с туннельным диодом для предотвращения паразитного поглощения излучения в слоях между базой среднего  $p$ - $n$ -перехода и структурой брэгговского отражателя. Для этого слой  $(Al_{0,1}Ga_{0,9})_{1-x}In_xAs-n$  заменялся слоем туннельного диода  $GaAs-n^{++}$ , а слой  $Al_{0,8}Ga_{0,2}As-n$  являлся барьерным слоем. Таким образом, ТД был частью БО и составлял с ним единую оптическую систему, обеспечивающую максимальную отражательную способность в заданном диапазоне длин волн.

На рис. 2 представлены оптимизированная структура трёхпереходного солнечного элемента с БО и расчётный спектр отражения зеркала с учётом наличия слоёв ТД для случаев, когда они являются (кривая 1) и не являются (кривая 2) частью брэгговского отражателя.

Моделирование показало, что использование слоёв ТД и структуры БО в качестве единой оптической системы позволяет практически полностью избежать потери отражённого излучения, вызванного поглощением и рассеиванием в слоях туннельного диода.

Лицевой контакт
GaAs- $n^{++}$
Верхний элемент GaInP
Туннельный диод
Средний элемент Ga(In)As
AlGaAs- $p$
AlGaAs- $p^{++}$
GaAs- $n^{++}$ (слой ТД и БО)
Al <sub>0,8</sub> GaAs- $n$ (слой ТД и БО)
БО
Буфер Ga(In)As
Нуклеационный слой GaInP- $n$
$p$ -Ge подложка
Тыльный контакт

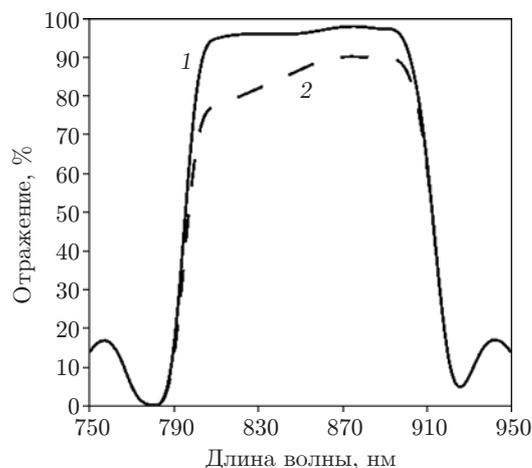


Рис. 2

**Изготовление СЭ и проведение испытаний.** Образцы структур оптимизированных трёхпереходных солнечных элементов со встроенным брэгговским отражателем были получены методом МОС-гидридной эпитаксии в реакторе с горизонтальным индукционным нагревом при давлении 50 мбар на предприятии ОАО «Сатурн».

В качестве источников третьей группы использовались соединения TMGa, TMIn и TMAI, а источников пятой группы — арсин и фосфин. Для легирования  $p$ -типом взяты соединения DMZn и СВг<sub>4</sub>, для легирования  $n$ -типом — SiH<sub>4</sub>. Несущим газом являлся особо чистый водород с содержанием посторонних примесей менее 1 ppb.

Из полученных структур были изготовлены солнечные элементы площадью 20 × 30 мм со встроенным БО для проведения испытаний на радиационную стойкость при воздействии потоков электронов с энергией 1 МэВ. Также испытаниям подверглись фотопреобразователи без брэгговского отражателя. Толщина базы среднего  $p$ - $n$ -перехода СЭ с БО составляла 1,9 мкм, а без БО — 3 мкм.

Облучение электронами с энергией 1 МэВ производилось на линейном ускорителе непрерывного действия Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ (Москва). Образцы были облучены четырьмя интегральными флюенсами  $3 \cdot 10^{13}$ ,  $1 \cdot 10^{14}$ ,  $1 \cdot 10^{15}$  и  $1 \cdot 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>.

На рис. 3 приведены значения относительной деградации основных параметров солнечных элементов обоих типов в зависимости от флюенса электронов. Из полученных результатов видно, что для структуры солнечного элемента с повышенной радиационной стойкостью существенно уменьшилась деградация тока короткого замыкания, причём на низких флюенсах (до  $1 \cdot 10^{14}$ ) изменения тока короткого замыкания не наблюдалось. Радиационная стойкость напряжения холостого хода существенных изменений не претерпела, увеличившись приблизительно на 1 %. В совокупности радиационная стойкость солнечных элементов со встроенным брэгговским отражателем (кривые 1) повысилась более чем на 10 % в сравнении с фотопреобразователями без БО (кривые 2).

На рис. 4 представлена спектральная зависимость внешнего квантового выхода солнечных элементов без БО и с БО до (кривые 1) и после (кривые 2) облучения потоком электронов. Существенное увеличение радиационной стойкости было достигнуто благодаря снижению деградации среднего  $p$ - $n$ -перехода. Уменьшение толщины базы GaAs с 3,4 до 1,9 мкм привело к снижению зависимости электрических параметров от диффузионной длины носителей зарядов. В таблице приведены значения плотностей токов, генерируемых в верхнем и среднем  $p$ - $n$ -переходах до и после облучения потоком электронов.

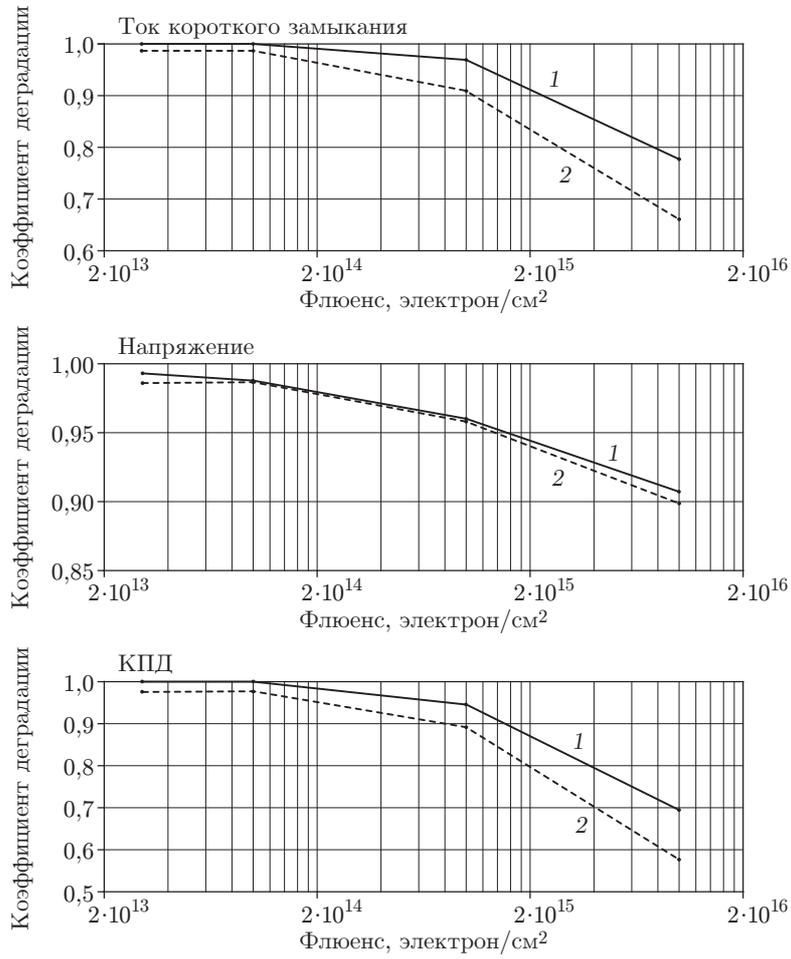


Рис. 3

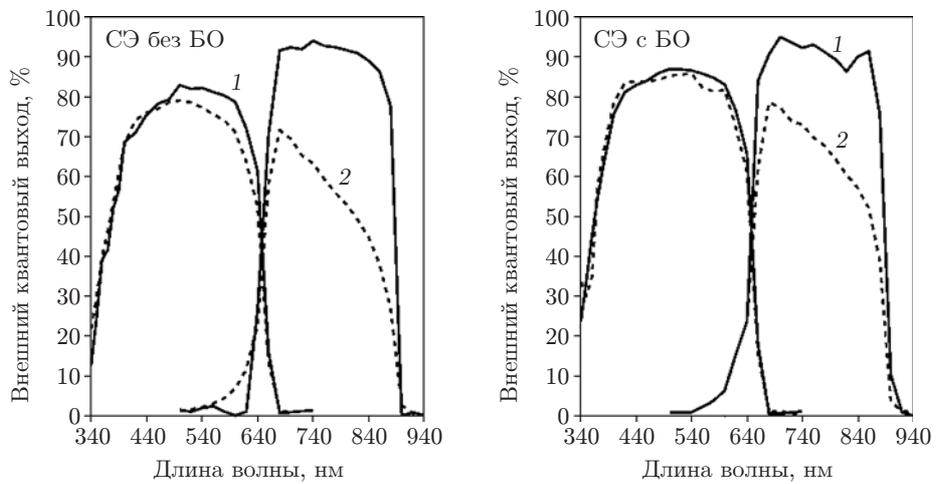


Рис. 4

Тип СЭ	$J_{\text{GaInP}}$ , мА/см <sup>2</sup> до облучения	$J_{\text{GaInP}}$ , мА/см <sup>2</sup> после облучения	$J_{\text{GaInAs}}$ , мА/см <sup>2</sup> до облучения	$J_{\text{GaInAs}}$ , мА/см <sup>2</sup> после облучения
СЭ с БО	17,36	17,02	17,7	12,75
СЭ без БО	17,15	16,71	17,4	11,08

Таким образом, проведённые испытания образцов солнечных элементов при воздействии потоков электронов показали, что уменьшение толщины базы среднего элемента и введение брэгговского зеркала в структуру СЭ приводит к увеличению радиационной стойкости СЭ более чем на 10 %.

**Заключение.** В результате выполнения данной работы был получен первый отечественный трёхпереходный солнечный элемент с повышенной радиационной стойкостью. Оптимизация эпитаксиальной структуры СЭ позволила снизить потери прошедшего (отражённого) излучения на 15 %, вследствие чего радиационная стойкость трёхпереходного солнечного элемента GaInP/GaAs/Ge увеличилась более чем на 10 %. Применение таких фотопреобразователей даст возможность продлить срок активного существования солнечных батарей космического назначения, тем самым увеличивая срок эксплуатации спутников и других космических аппаратов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев А. М., Ландсман А. П.** Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 246 с.
2. **Белан Н. В., Безручко К. В., Елисеев В. Б.** Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей. Харьков: Харьковский авиационный институт, 1992. 191 с.
3. **Скачков А. Ф.** Многопереходные солнечные элементы со встроенным брэгговским отражателем // Матер. X конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар: КубГУ, 2012. С. 116–117.
4. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
5. **Andreev V., Komin V.** High-efficiency AlGaAs-GaAs solar cells with internal Bragg reflector // Proc. of the A. F. Ioffe Physico-Technical Institute. St. Petersburg, 1994. P. 1894–1897.

*Поступила в редакцию 13 ноября 2013 г.*