

06.2; 06.3; 07

© 1993

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ
НА ОСНОВЕ $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As$
ДЛЯ КАСКАДНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В.М. А н д р е е в, И.А. Ж е б у л е в,
Л.Б. К а р л и н а, И.А. М о к и н а,
В.Д. Р у м я н ц е в, М.З. Ш в а р ц

Использование концентраторных каскадных солнечных элементов (СЭ) является одним из наиболее перспективных путей увеличения КПД фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. В тандемных СЭ в качестве лицевых СЭ могут использоваться высокоэффективные СЭ на основе $GaAs$ или InP , технология которых хорошо разработана [1]. В этом случае наиболее подходящими материалами для изготовления тыльных элементов являются $GaSb$ или твердый раствор $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ ($InGaAs$). В настоящее время КПД более 35% (при кратности концентрации солнечного излучения $K_c = 100$, АМ 1, 5) достигнут в концентраторных тандемных СЭ с механическим соединением $GaAs$ и $GaSb$ элементов и использованием призматических покрытий на светочувствительных поверхностях [2].

Однако существует значительный интерес к разработке и усовершенствованию узкозонных СЭ на основе $InGaAs$, что связано с обнаруженной высокой радиационной стойкостью каскада $InP/InGaAs$ [3].

В данной работе приводятся результаты исследований концентраторных солнечных элементов на основе твердого раствора $In_{0.53}Ga_{0.47}As$, выращенного на подложках фосфида индия методом жидкофазной эпитаксии.

Обычно структура СЭ, используемого в качестве узкозонного каскада, включает в себя активные области n - и p -типа твердого раствора $InGaAs$ и широкозонное окно из $InGaAsP$ или InP , которое снижает рекомбинационные потери носителей на поверхности СЭ [4]. Однако при использовании метода ЖФЭ наращивание широкозонного окна вызывает определенные трудности, связанные с возможностью неконтролируемого подтравливания узкозонного фотоактивного слоя и образованием дополнительных переходных слоев на гетерогранице $InGaAs - InP$.

Нами была разработана конструкция узкозонного СЭ с подводом концентрированного солнечного излучения через подложку фосфида индия. В этом случае подложка является широкозонным окном и одновременно обеспечивает малое сопротивление растекания. В силу лучшей прозрачности в диапазоне 1.0–1.8 мкм предпочтительно использование подложек InP n -типа проводимости.

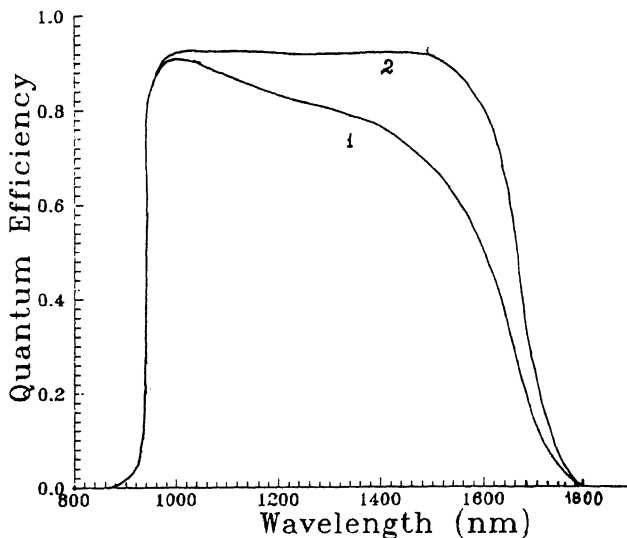


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента сбора *InGaAs* солнечного элемента с концентрацией акцепторов в базовой области 1 - $N_p = (1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 2 - $N_p = (3-8) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Выращенные структуры СЭ включали в себя подложку *InP*, буферный слой *n-InP* легированный рением или нелегированный, фронтальный слой *n-InGaAs* с концентрацией носителей $(0.7-1) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и базовую область *p-InGaAs*, легированную марганцем с концентрацией носителей $(0.6-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

В ряде случаев с целью создания изотипного тыльного барьера наращивался дополнительный слой *p⁺-InGaAs* с концентрацией $(0.8-1) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Использование марганца в качестве акцепторной примеси, в отличие от традиционно используемых цинка или магния, позволило точно и воспроизводимо контролировать глубину залегания - перехода, уровень легирования базовой области и тыльного барьера. Тонкоотводящие контакты к подложке *n-InP* выполнялись в виде рамки к фронтальному слою и в виде сплошного контакта к слою *p⁺-InGaAs*. Просветление структуры обеспечивалось нанесением пленок *Si₃N₄* методом магнетронного распыления. На завершающем этапе изготовления пластина разделялась на СЭ площадью 1.5-2 мм². Значения КПД рассчитывались по отношению к площади фоточувствительной поверхности СЭ, свободной от контактов.

На рис. 1 показана зависимость коэффициента сбора фотогенерированных носителей заряда от длины волны падающего излучения для структур с различным уровнем легирования области *p-InGaAs*. Сильное легирование базы приводит к резкому уменьшению диффузионной длины неосновных носителей в ней и увеличе-

нию рекомбинационных потерь в объеме материала. Для $\mu\text{-InGaAs}$ [Mn] уменьшение L_n почти в два раза наблюдается при увеличении концентрации n от $6 \cdot 10^{17}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см^{-3} . Снижение концентрации примеси в базовой области вызывает уменьшение напряжения холостого хода (U_{xx}) вследствие снижения потенциального барьера, но приводит к увеличению тока короткого замыкания. Компромиссным решением является наращивание изотипного тыльного барьера, снижающего скорость поверхностной рекомбинации вблизи тыльного металлического контакта и увеличивающего U_{xx} . Коэффициент собирания носителей заряда составлял около 90% практически во всем спектральном диапазоне фоточувствительности, простирающемся от начала поглощения излучения в слое InGaAs до начала поглощения излучения в подложке InP . Это позволило получить значения фототока 24–26 мА/см^2 близкие к лучшим опубликованным к настоящему времени значениям I_{K3} для узкозонных соединений A_3B_5 с шириной запрещенной зоны 0,6–0,8 эВ [2–5], освещаемых солнечным излучением АМ 1,5–2 через GaAs или InP .

Измерения ВАХ СЭ при интенсивной засветке проводились под импульсным имитатором солнечного излучения. В качестве эталонных использовались несколько образцов СЭ, измеренных непосредственно в натуральных условиях при освещении солнечным спектром АМ 2 и $K_c = 1$.

Анализ зависимостей $\lg I_{K3}$ от U_{xx} , получающихся за счет варьирования K_c , позволил определить параметры составляющих темнового тока (рис. 2). Структуры СЭ, выращенные непосредственно на подложке или имеющие промежуточный нелегированный буферный слой, имели диодный коэффициент $A = 2$ и плотность обратного тока насыщения $j_o = (3-7) \cdot 10^{-5}$ А/см^2 , т.е. в таких структурах преобладающим темновым током является генерационно-рекомбинационная составляющая в области объемного заряда (рис. 2, б). Для СЭ с буферным слоем $n\text{-InP}(Re)$ $A = 1$, $j_o = (0,6-2) \cdot 10^{-8}$ А/см^2 , что свидетельствует о диффузионном механизме протекания тока через $p\text{-}n$ переход (рис. 2, а). При этом минимальные значения $j_o = 6 \cdot 10^{-9}$ А/см^2 несколько ниже лучших опубликованных значений обратного тока насыщения СЭ InGaAs , изготовленных методом газофазной эпитаксии с применением металлоорганических соединений [5].

Нагрузочные ВАХ InGaAs СЭ с нелегированным буферным слоем представлены на рис. 3. Данный элемент сохраняет высокие значения КПД порядка 10% (АМ 2) в широком диапазоне $K_c = 28-129$ (кривые 2–4).

Таким образом, разработанная структура InGaAs СЭ с изотипным тыльным барьером позволила получить КПД, близкий к предельным значениям при данных условиях освещенности. Использование такого СЭ в сочетании с широкозонным элементом из арсенида галлия с КПД 25–27% дает основание надеяться на получение КПД до 35% в каскадном СЭ с механическим соединением элементов.

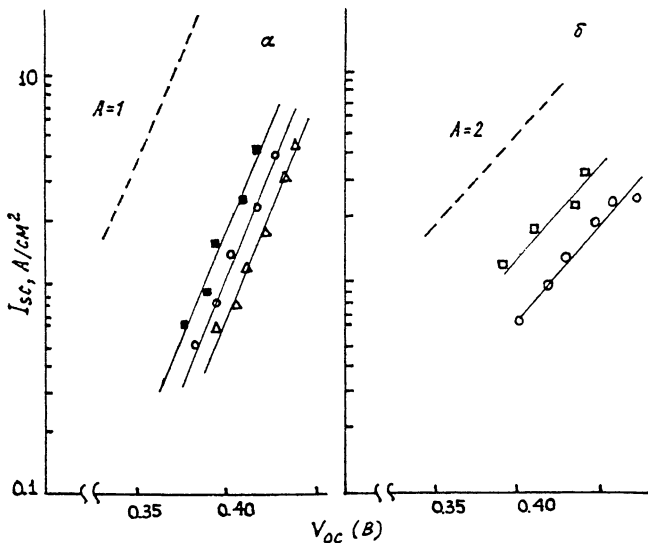


Рис. 2. Зависимость $I_{КЗ}$ от $U_{ХХ}$ для $InGaAs$ СЭ с буферными слоями, легированными рением (а) и нелегированными буферными слоями (б).

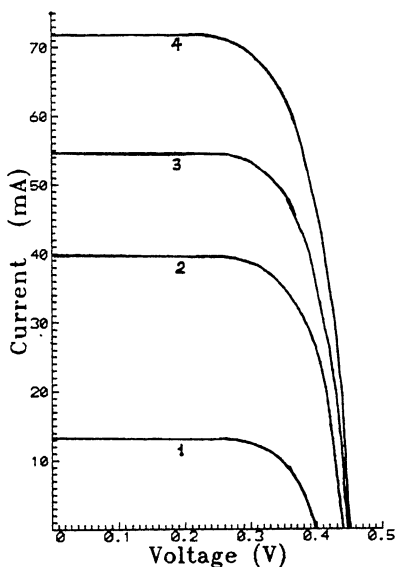


Рис. 3. Нагрузочные ВАХ $InGaAs$ СЭ при освещении импульсной Хе-лампой. Интенсивность освещения эквивалентна кратностям концентрирования солнечного излучения АМ 2: 1 - 28, 2 - 83, 3 - 114, 4 - 149.

В заключение авторы выражают благодарность Ж.И. Алферову за поддержку данной работы, Т.С. Табарову за полезные обсуждения и В.И. Мырзину за нанесение просветляющих покрытий.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 309 с.
- [2] Fraas L.M., Avery J.E., Martin J., Sundaram V.S., Girard G., Van Dinh T., Davenport T.M., Yerkes J.W., O'Neill M.J. // IEEE Tran on Electron Devices. 1990. V. 37. N 2. P. 443-449.
- [3] Walter R.J., Shaw G.J., Summers G.P., Wanlass M.W., Ward J.S. Proc. 4 Inter. Conf. Indium Phosphide and Related Material 1992, Newport, USA. P. 550-553.
- [4] Beaumont B., Nataf G., Garabedian P., Guillaume J.C., Verie C. // Solar Cells. 1989. V. 26. P. 313-321.
- [5] Wanlass M.W., Ward J.S., Emery K.A., Gessert T.A., Osterwald C.R., Coutts T.J. // Solar Cell. 1991. V. 30. P. 363-371.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
15 марта 1993 г.