

К. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Дата поступления в редакцию
31.10 2003 г.Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие «Карат»
E-mail: krukovsky@poly.net.lviv.uaОппонент к. ф.-м. н. В. Ю. ЕРОХОВ
(НУ "Львовская политехника", г. Львов)СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ТАНДЕМНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs—InGaAs—AlGaAs

На основе многослойных тандемных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs изготовлены фотопреобразователи солнечной энергии с максимальным КПД 30,1% при АМ 1,5.

Высокоэффективные многопереходные солнечные батареи на основе A_3B_5 -материалов все более широко используются для обеспечения энергией орбитальных спутников и, особенно, межпланетных космических аппаратов. Высокая эффективность и лучшая радиационная стойкость солнечных батарей на основе A_3B_5 , по сравнению с традиционными кремниевыми, определяет их будущее в космической энергетике. Многопереходные солнечные батареи с эффективными концентраторами, снижающими их стоимость, могут найти применение и в земных условиях.

Использование тандемных (каскадных) гетероструктур для изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии является радикальным способом повышения их эффективности. Так, теоретическое значение КПД тандемной гетероструктуры с двумя рабочими $p-n$ -переходами может достигать 35%, а с тремя — около 42% [1]. Реально достигнутые в последние годы значения КПД двух- и трехпереходных солнечных элементов на основе гетероструктур A_3B_5 составляют 28—33% [2, 3].

Одной из главных проблем, стоящих на пути приближения КПД тандемных фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs—AlGaAs к теоретическому пределу, является образование стимулированных кислородом дефектов в активных слоях гетероструктуры, а также дефектов на границах раздела $p-n$ -переходов. До 1990 г. большинство работ было посвящено созданию каскадных солнечных элементов на основе GaAs и твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ [4—7]. В 1990 г. впервые [8] было предложено использовать для изготовления верхнего $p-n$ -перехода каскадного солнечного фотоэлемента слой InGaP, а для широкозонного окна — AlInP. Особенностью InGaP является значительно меньшее дефектообразование под влиянием кислорода [1]. Однако и для гетероструктур, включающих слой InGaP и AlInP, существует проблема, связанная, в частности, с получением сильнолегированных слоев p -типа проводимости. Поэтому весьма актуальной является задача повышения качества каскадных гетероструктур на основе GaAs—AlGaAs.

Один из путей, позволяющих продвинуться в этом направлении, был реализован в работе [9], где для уменьшения дефектности структуры было использо-

вано легирование изовалентными элементами. Данная работа является продолжением предыдущей, и здесь приведены исследования характеристик солнечных элементов, изготовленных на основе тандемных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs.

Солнечные элементы изготавливались на основе тандемных гетероструктур $n^+GaAs-n-In_{0,4}Ga_{0,6}As-p-In_{0,4}Ga_{0,6}As-n-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-p-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-n-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-p-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-p-Al_{0,8}Ga_{0,2}As$, содержащих один узкозонный (InGaAs) и один широкозонный (AlGaAs) $p-n$ -переходы, соединенные между собой туннельным p^+-n^+ -переходом на основе AlGaAs, обеспечивающим низкие омические потери. Контакты к n^+ -подложке формировались на основе системы Au—Ni, а фронтальные к слою $p-Al_{0,14}Ga_{0,86}As$ — на основе Au—Ge—Au. Гетероструктуры изготовлены методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Детально их технология получения, а также параметры слоев описаны в работе [1].

На поверхность гетероструктуры наносилось антиотражающее покрытие из SiO_2 , в котором, как и в широкозонном слое $p-Al_{0,8}Ga_{0,2}As$, с использованием фотолитографии создавались сквозные канавки до поверхности слоя $p-Al_{0,8}Ga_{0,2}As$. Через канавки дополнительной послеростовой диффузией цинка из газовой фазы в приповерхностной области слоя $p-Al_{0,14}Ga_{0,86}As$ формировался сильнолегированный слой с концентрацией дырок, равной $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, и толщиной 0,2—0,3 мкм. Эта операция позволила снизить омические потери в солнечных элементах. Затенение контактными полосами составляло около 12%. На каждом фотоэлементе химическим травлением формировалась мезаструктура для уменьшения токов утечки.

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики двух солнечных элементов, изготовленных на основе тандемных гетероструктур $n^+GaAs-n-In_{0,4}Ga_{0,6}As-p-In_{0,4}Ga_{0,6}As-n-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-p-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-n-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-p-Al_{0,14}Ga_{0,86}As-p-Al_{0,8}Ga_{0,2}As$, измеренные при спектральных условиях АМ 1,5. Кривая 1 соответствует солнечному элементу с наилучшими, а кривая 2 — фотоэлементу с наихудшими параметрами из партии в 27 фотоэлементов. Плотность тока, генерируемого солнечными элементами площадью $0,93 \text{ см}^2$, изменялась от 14,2 до $15,1 \text{ мА/см}^2$, а напряжение холостого хода $U_{xx} = 2,35 \dots 2,43 \text{ В}$. Коэффициент полезного действия на лучших образцах достигал 30,1%, что очень близко к значениям, полученным другими авторами для солнечных элементов, изготовленных на основе тандемных гетероструктур InGaP/GaAs [2], AlGaAs/GaAs [1].

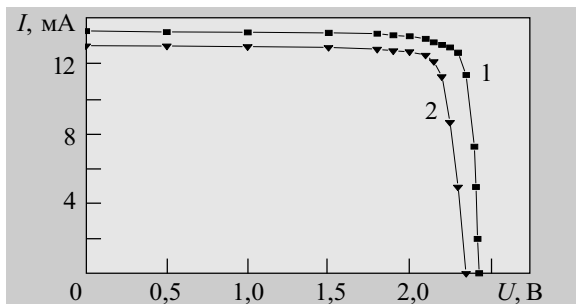


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики солнечных элементов на основе гетероструктур $\text{InGaAs—Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As—Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$:
1 — максимальные значения достигнутых параметров;
2 — минимальные значения

Использование низкотемпературной ЖФЭ позволило кристаллизовать высококачественный материал в активных областях гетероструктуры. Уменьшению дефектности и улучшению воспроизводимости электрофизических параметров активных слоев AlGaAs и InGaAs , образующих нижний и верхний $p-n$ -переходы тандемной гетероструктуры, способствовало дополнительное легирование висмутом (0,07—0,1 ат%) галлиевых растворов-расплавов, из которых они наращивались. Кристаллизация тандемной гетероструктуры при низких температурах предохраняла туннельный p^+-n^+ -переход от деградации во время температурного отжига, происходящего при наращивании верхних слоев структуры.

Последнее требование является очень важным, учитывая сильное влияние высокотемпературного отжига на проводимость туннельного p^+-n^+ -перехода в прямом направлении [10]. Тонкое (0,2 мкм) широкозонное окно из $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ обеспечило минимальное поглощение фронтального светового потока и снизило поверхностную рекомбинацию. Благодаря этому удалось достичь высокой эффективности сбора носителей тока в широком спектральном диапазоне от 400 до 1440 нм (рис. 2). В видимой и ближней инфракрасной области спектра (400—870 нм) высокая фоточувствительность обеспечивается широкозонным $p-n$ -переходом на основе $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, а в инфракрасной области от 900 до 1450 нм — $p-n$ -переходом на основе более узкозонного $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$.

Распределение значений КПД 27 солнечных элементов, изготовленных на основе тандемных гетероструктур $\text{GaAs—InGaAs—AlGaAs}$, приведены на рис. 3. Значение коэффициента полезного действия изменяется в

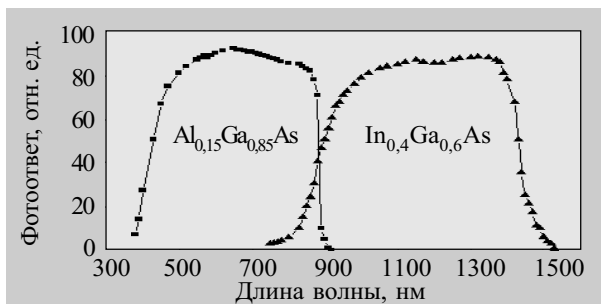


Рис. 2. Спектр фотопотв. солнечного элемента, изготовленного на основе тандемной гетероструктуры $\text{GaAs—InGaAs—AlGaAs}$

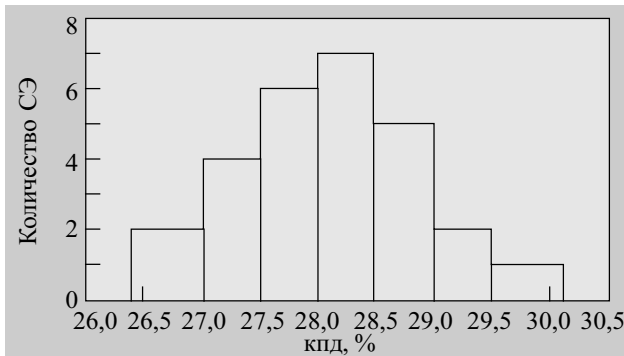


Рис. 3. Распределение значений КПД солнечных элементов (СЭ), изготовленных на основе тандемных гетероструктур $\text{InGaAs—Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As—Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$ диапазоне от 26,4 до 30,1%, а его среднее значение равно 27,87%. Полученный разброс значений КПД неплохо согласуется с данными для двухкаскадных солнечных элементов Ge/GaAs/InGaP , изготовленных фирмой EMCORE Corporation (США) [3].

Таким образом, на основе тандемных гетероструктур, включающих два рабочих $p-n$ -перехода — нижний из узкозонного InGaAs и верхний из широкозонного AlGaAs , а также соединяющий их лавинный $p-n$ -переход на основе AlGaAs , изготовлены фотопреобразователи солнечной энергии со средним значением КПД 27,87%. Активная площадь фотопреобразователя составляла 0,93 см². В наилучших образцах КПД достигал 30,1% при спектральных условиях АМ 1,5, а плотность фототока и напряжение холостого хода достигали значений 15,1 мА/см² и 2,35—2,43 В, соответственно, что сравнимо с лучшими зарубежными образцами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yamaguchi Masafumi. Physics and technologies of super-high-efficiency tandem solar cells//ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 9.— С. 1054—1058.
2. Green M. A., Emery K., Bucher K. et al. Solar cell efficiency tables (Version 9) // Progres in Photovoltaics: Research and Application.— 1997.— Vol. 5.— P. 51—54.
3. www.emcore.com
4. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Зимогорова Н. С. и др. Исследование каскадных солнечных элементов в системе Al—Ga—As //ФТП.— 1982.— Т. 16, № 6.— С. 982—987.
5. Борисова Л. А., Каган М. Б., Королева Н. С. и др. Повышение эффективности СЭ при использовании многослойных структур в системе Al—Ga—As //Письма в ЖТФ.— 1982.— Т. 8, № 1.— С. 55—60.
6. Ludovige V. J., La Rue R. A., Borden P. S. et al. High efficiency organometallic vapor phase epitaxy AlGaAs/GaAs monolithic cascade solar cells using metall interconnects//Appl. Phys. Lett.— 1982.— Vol. 41, N 6.— P. 550—552.
7. Flores C. Fabrication process and performance of new type of AlGaAs/GaAs cascade solar cells//16th IEEE photovoltaic spec. conf.— San Diego, Calif.— 1982.— P. 569—573.
8. Olson J. M., Kurtz S. R., Kibbler K. E. InGaP as material for the top solar cells // Appl. Phys. Lett.— 1990.— Vol. 56, N 7.— P. 623—625.
9. Николаенко Ю. Е., Круковский С. И., Завербный И. П. и др. Получение тандемных гетероструктур $\text{GaAs—InGaAs—AlGaAs}$ для фотопреобразователей солнечной энергии// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 3.— С. 27—29.
10. Трофим В. А., Чумак В. А. Оптоэлектронные преобразователи излучений на основе гетеропереходов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As—GaAs}$.— Кишинев: Штиинца, 1987.