

Д. т. н. И. Е. МАРОНЧУК, к. ф.-м. н. Ю. А. ДОБРАЖАНСКИЙ

Украина, Херсонский национальный технический университет;
Одесский государственный экологический университет
E-mail: design@tlc.kherson.ua, yuriy@dobrozhanskiy.od.ua

Дата поступления в редакцию
27.06 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaAs С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Процесс жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора в расплаве индия или олова позволяет получить гетероструктуры, содержащие квантовые точки.

Согласно прогнозу, представленному в [1], в развитии солнечной фотоэнергетики, в отличие от других возобновляемых видов энергетики, с 2000 по 2030 годы ожидается рост установленной мощности от 1 до 655 ГВт.

В соответствии с классификацией, предложенной в [2], к солнечным элементам (СЭ) I поколения относятся фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) с одним p - n -гомо- или гетеропереходом, к СЭ II поколения — tandemные (каскадные) ФЭП, которые имеют не менее двух гетеропереходов, т. е. созданные на основе многослойных, многопереходных гетероструктур и имеющие в наше время рекордно высокие значения эффективности преобразования излучения — кпд около 40%. К III поколению относятся ФЭП, созданные на основе гетероструктур, содержащих квантовые точки (КТ).

Теоретический анализ, проведенный в [3], показал, что эффективность СЭ III поколения может достигать 68—70%. Однако, как показано в [4], гетероструктуры с КТ, полученные МОС-гидридной технологией, имеют параметры хуже, чем ФЭП, изготовленные на основе аналогичных гетероструктур, не содержащих КТ. Авторы [4] объяснили полученный результат наличием рекомбинации в области p - n -перехода, где были расположены КТ.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности получения гетероструктур с КТ в процессе жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава (ИОНРР), пригодных для получения эффективных солнечных элементов. Предложение о возможности получения высокоэффективных СЭ на основе гетероструктур с КТ, выращенными ЖФЭ, базируется на том, что этот метод позволяет осуществлять кристаллизацию при условиях, близких к равновесным, т. е. при низком пересыщении и, следовательно, низком содержании дефектов.

Задачами исследования являлись: выбор оптимальных материалов матрицы и квантовых точек, выбор

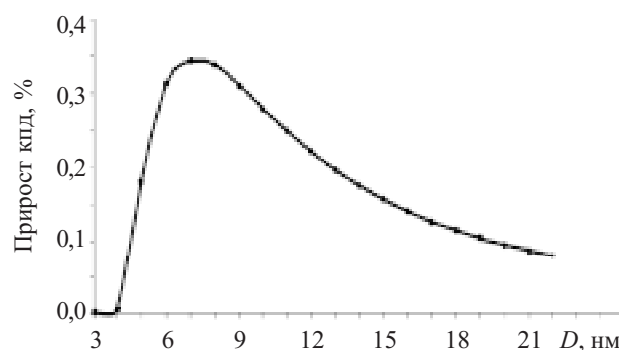


Рис. 1. Зависимость прироста эффективности СЭ от диаметра (D) квантовой точки для системы «КТ InAs — матрица GaAs» при падающем солнечном излучении спектра AM 1,5

оптимальных размеров КТ и толщины спейсерных слоев, выбор места размещения КТ — в p -, n -области или в области p - n -перехода.

Теоретический анализ влияния размеров КТ на эффективность СЭ на основе арсенида галлия с квантовыми точками InAs, проведенный нами ранее [5], показал, что максимальный прирост кпд СЭ в 10,5% происходит при использовании более 50 массивов КТ InAs с линейными размерами КТ около 7 нм. На **рис. 1** представлена зависимость кпд солнечных элементов от размеров квантовых точек для случая одного массива.

Эксперимент. Обсуждение результатов

Выращивание массивов КТ методом ИОНРР осуществлялось в горизонтальном реакторе в атмосфере водорода на подложках GaAs (100) при температуре 400—450°C по методике, описанной в [6]. В качестве растворителя были использованы расплавы индия или олова. При выращивании многослойных гетероструктур с КТ спейсерные слои p - и n -типа проводимости, разделяющие массивы КТ, выращивались из раствора в расплаве галлия. Толщина спейсерных слоев при получении вертикально связанных массивов КТ не превышала 5 нм.

Характеристики КТ и гетероструктур с КТ изучались путем анализа изображений, полученных атомно-силовой микроскопией; спектров фотолюминесценции, полученных при 77 и 300 К; темновых и нагрузочных вольт-амперных характеристик изготовленных макетов ФЭП, размеры которых составляли

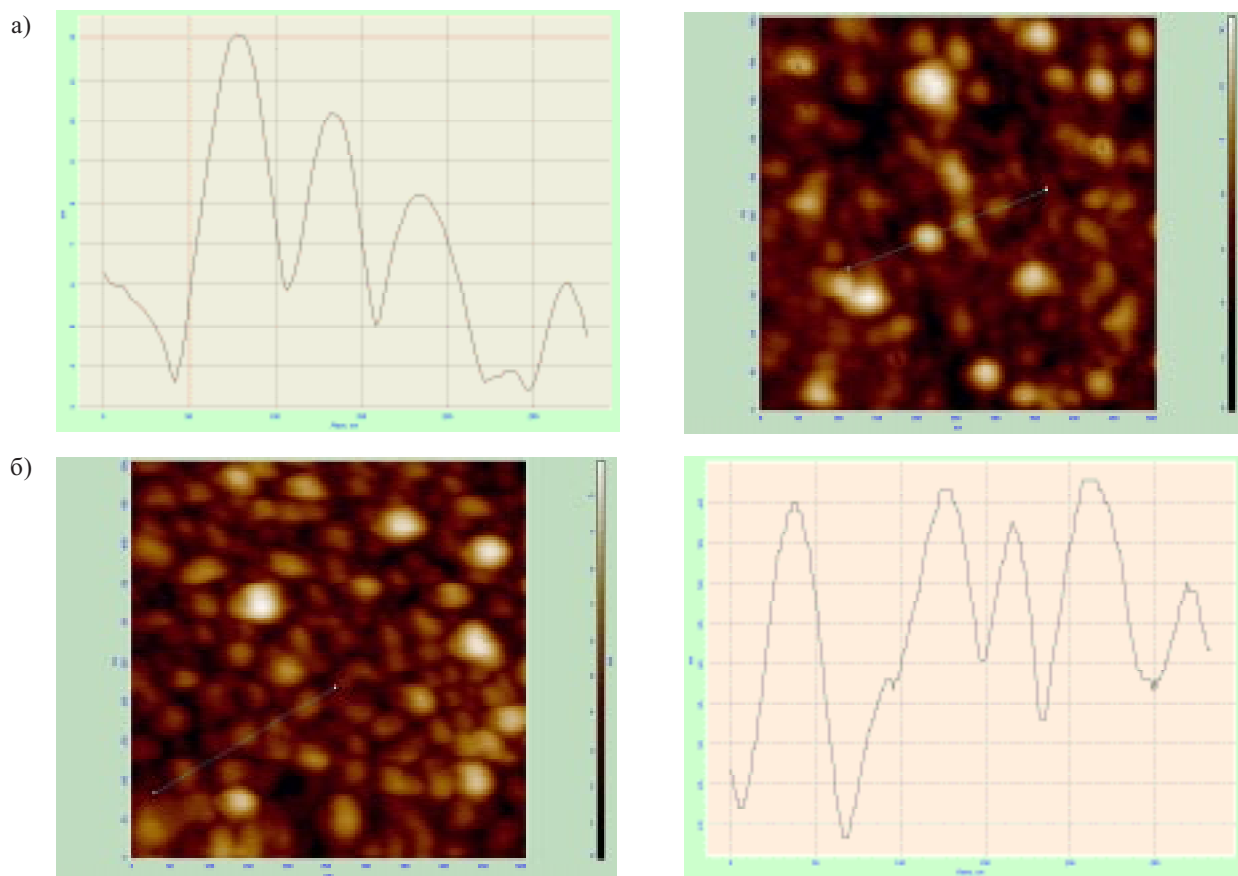


Рис. 2. Изображение и графики распределения квантовых точек по высоте образца с КТ InAs на подложке GaAs: *а* — КТ выращены из индиевого раствора-расплава, размеры подложки 500×500 нм; *б* — КТ выращены из оловянного раствора-расплава, размеры подложки 1000×1000 нм

3,2×3,2×0,3 мм, при обычном и концентрированном солнечном излучении.

На рис. 2 представлено полученное сканирующим микроскопом изображение квантовых точек InAs, выращенных на поверхности подложки GaAs при температуре 400°C, величине импульса охлаждения 5°C и толщине подложки $\delta=0,3$ см из раствора в расплаве индия и из раствора в расплаве олова. Из сопоставления приведенных на рис. 2 данных с учетом размеров образцов следует, что диаметр основания КТ, выращенных из оловянного раствора-расплава, в полтора раза больше, чем у КТ, выращенных из индиевого раствора-расплава, а высота, как следует из графиков, отличается в два раза.

Разница в размерах КТ, выращенных из оловянного и индиевого растворов-расплавов, связана, в основном, с различием растворимости, с различием поверхностного натяжения используемых расплавов, с изменением параметра кристаллической решетки КТ при легировании материалом растворителя.

Изображения, приведенные на рис. 2, подтверждают, что при выращивании КТ из оловянного раствора-расплава происходит сращивание КТ в островки, линейные размеры основания которых достигают 150—200 нм. Образование таких островков из КТ может быть связано с тем, что олово как легирующая примесь оказывает влияние на размер решетки слоев КТ вблизи гетерограницы.

Влияние температуры выращивания, величины импульса охлаждения и его длительности, а также материала подложки и ориентации ее поверхности на характеристики массивов КТ и структур с КТ исследовалось при помощи фотолюминесценции и описано в наших работах [5, 7, 8].

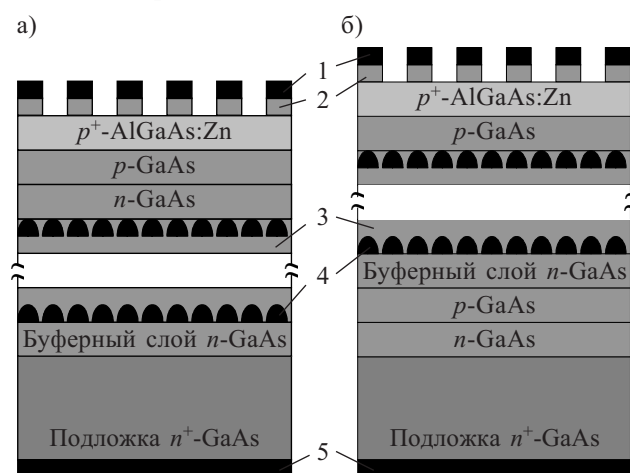


Рис. 3. Схема ФЭП на основе гетероструктуры AlGaAs–GaAs с КТ InAs в *n*-области (*а*) и *p*-области (*б*): 1 — фронтальный контактный слой; 2 — подконтактный слой; 3 — спейсер GaAs; 4 — массив КТ InAs; 5 — контактный слой со стороны подложки

На рис. 3 схематически представлены ФЭП, изготовленные на основе полученных гетероструктур AlGaAs–GaAs с КТ InAs. Тылный контакт был сплошным, а фронтальный имел форму гребенки. Ширина контактных дорожек составляет 20 мкм, расстояние между контактными дорожками — 80 мкм. Световая характеристика разработанных ФЭП приведена на рис. 4.

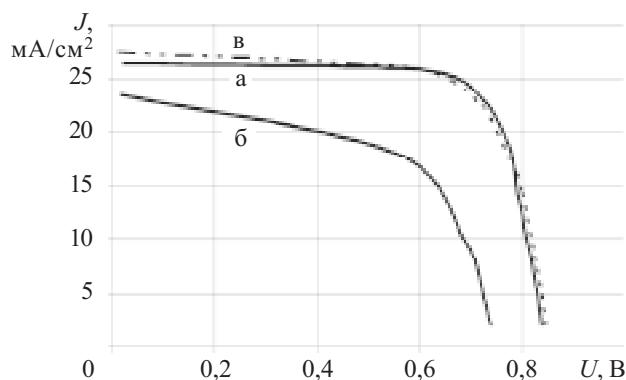


Рис. 4. Световая характеристика ФЭП с 12 слоями при $K_c=1$: а — контрольный ФЭП, не содержащий КТ; б — ФЭП с КТ в области p – n -перехода; в — ФЭП с КТ в p -области

Как следует из рис. 4 (кривая б), структуры с КТ в области p – n -перехода имели характеристики хуже, чем у контрольного образца, а именно: образец ФЭП с 12 слоями КТ в области p – n -перехода имел напряжение холостого хода $U_{xx}=0,75$ В, ток короткого замыкания $J_{кз}=23,5$ мА/см², а контрольный — $U_{xx}=0,84$ В, $J_{кз}=26,5$ мА/см². Полученные результаты совпадают с результатами работы [4] и могут быть объяснены рекомбинацией электронно-дырочных пар в области p – n -перехода, где размещены КТ.

ФЭП с 12 слоями КТ в p -области структуры имел $U_{xx}=0,85$ В, $J_{кз}=27,5$ мА/см² (рис. 4, кривая в). Увеличение $J_{кз}$, которое наблюдается в такой структуре по сравнению с контрольным образцом, свидетельствует о поглощении и преобразовании длинноволновой части солнечного спектра. Таким образом, введение КТ в p -область структуры, полученной методом ЖФЭ, не приводит к ухудшению параметров ФЭП с КТ.

Из рис. 4 видно, что ФЭП с 12 слоями КТ в p -области несущественно отличается от контрольного ФЭП, не имеющего КТ. Это связано со слабым поглощением длинноволнового излучения в связи с малым количеством массивов КТ. Это может быть также обусловлено отсутствием процессов рекомбинации неравновесных носителей в области расположения КТ.

Контрольный ФЭП был изготовлен на подложке n^+ -GaAs, на которой методом ЖФЭ при температуре 850°C сначала выращивался буферный слой n -GaAs, а потом слой p -Al_{0,8}Ga_{0,2}As:Zn толщиной 100 нм. В процессе выращивания p -слоя в буферном слое формировался диффузионный p – n -переход. Поверх p -Al_{0,8}Ga_{0,2}As выращивался подконтактный слой p^+ -GaAs толщиной 1 мкм для нанесения фронтальной контактной сетки.

Выводы

Исследования подтвердили, что метод жидкофазной эпитаксии позволяет получать гетероструктуры с квантовыми точками. Созданные на их основе фотоэлектрические преобразователи достаточно эффективны и, в отличие от ФЭП, полученных МОС-гидридной технологией, не ухудшают параметры в случае если КТ расположены не в области p – n -перехода. Небольшое увеличение КПД ФЭП с КТ связано, очевидно, с небольшим количеством массивов (12 массивов) квантовых точек.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Karokava K. Energy from the Desert.— James & James.— 2003.
2. Green M. A. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond // Physica.— 2002.— Vol. E 14.— P. 65–70.
3. Brown A. S., Green M. A. Limiting efficiency of multiple band solar cells: an overview // Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference.— 2001.— Munich, Germany.— P. 246–249.
4. Norman A. G., Hanna M. C., Dippe P. et al. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells // Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition.— 2005.— Lake Buena Vista, Florida, USA.— P. 3–7.
5. Maronchuk I. E., Erochin S. Yu., Kulutkina T. F. et al. Solar cells heterostructures with InAs quantum dots obtained by liquid phase epitaxy // Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion.— 2003.— Osaka, Japan.— P. 11–18.
6. Марончук И. Е., Марончук А. И., Кулюткина Т. Ф. и др. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.— 2005.— № 12.— С. 95–99.
7. Maronchuk I., Minailov A., Andronova E. et al. Quantum dots PV-cells obtained by liquid phase epitaxy // Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference.— 2004.— Paris, France.— P. 352–354.
8. Maronchuk I. E., D'yachenko A. M., Minailov A. I. et al. Obtaining heterostructures with quantum dots for sensors by using liquid phase epitaxy // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2004.— Vol. 7, N 4.— P. 363–367.