

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА НИКЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ GaAs

С.М.Манаков¹, К.К.Диханбаев¹, З.А.Мансуров², М.Ауелханкызы²,
Т.И.Таурбаев¹, Б.Т.Лесбаев²

¹Физико-технический факультет, КазНУ им. аль-Фараби, 050038, Алматы, Казахстан,
пр. Аль-Фараби 71,

²Институт Проблем Горения, 050012, Алматы, Казахстан, ул. Богенбай батыра, 172.
E-mail: sergei.manakov@kaznu.kz

Аннотация

Представлены результаты исследования солнечных элементов на основе GaAs с нанесенными на их фронтальную поверхность наночастицами оксида никеля. Показано, что покрытие из наночастиц оксида никеля повышает коэффициент полезного действия солнечных элементов на 4,7% за счет рассеяния света на них и увеличения доли поглощенных фотонов в активной области СЭ.

Введение

Одним из наиболее перспективных материалов для преобразования солнечной энергии является арсенид галлия (GaAs). Это объясняется следующими его особенностями: большим коэффициентом оптического поглощения, обусловленного прямыми оптическими переходами в GaAs, высокие КПД солнечных элементов (СЭ) на их основе могут быть получены при значительно меньшей в сравнении с кремнием толщине СЭ. Принципиально достаточно иметь толщину GaAs СЭ 5-6 мкм для получения КПД порядка не менее 20 %, тогда как толщина кремниевых элементов не может быть меньше 50-100 мкм без заметного снижения их КПД [1]. Это обстоятельство разрешает рассчитывать на создание легких пленочных СЭ, для производства которых потребуется сравнительно мало исходного материала, в особенности если в качестве подложки удастся использовать не GaAs, а другой материал, например, синтетический сапфир (Al_2O_3) или интерметаллид (NiSb).

Предел Шокли-Квайссера, ограничивающий эффективность однопереходного СЭ величиной 33,7% достигает максимального значения для полупроводниковых преобразователей солнечной энергии с шириной запрещенной зоны 1,4 эВ, соответствующей GaAs [2].

Повышение равновесной температуры GaAs СЭ до +150...180°C не приводит к существенному снижению их КПД и оптимальной удельной мощности. В то же время для кремниевых ФЭП повышение температуры выше +60...70°C является почти критическим - КПД падает вдвое. Кроме того, высокая радиационная стойкость делает этот материал чрезвычайно привлекательным для использования в космических аппаратах.

Однако, несмотря на вышеперечисленные преимущества GaAs проблема увеличения КПД стоит довольно остро. Для обеспечения снижения оптических

потерь используют различные конструктивные и технологические решения: применение однослойного или многослойного антиотрадающего покрытия [3,4], текстурирование фронтальной поверхности [5], формирование на поверхности нанонитей, наночастиц и квантовых точек [6-8].

Целью нашей работы является исследование возможности повышения эффективности GaAs СЭ путем нанесения на их поверхность наночастиц оксида никеля, синтезированных в пламени.

Экспериментальная часть

Солнечные элементы со структурой GaAlAs/GaAs были сформированы на низкоомной подложке n⁺-GaAs:Te (111), поглощающий слой n-GaAs ($n \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), толщиной примерно 10 мкм, эмиттерный слой p - GaAs:Mg и оптическое окно p-GaAlAs:Mg толщиной по 0,5 мкм p⁺- GaAs:Mg последовательно выращивались на пластинах n⁺-GaAs методом жидкофазной эпитаксии. Омический контакт к подложке n⁺-GaAs изготавливался вплавлением сплава In+3%Te при температуре 450⁰C. В качестве металлических контактов использовалась трехслойная структура Sn/Ni/Al, антиотражающим покрытием являлся слой нитрида кремния Si₃N₄ толщиной 70 нм. Активная площадь СЭ составляла 4,56 см². На рисунке 1а приведено сечение исследуемого GaAs СЭ с p-n переходом.

В качестве контрольных структур использовали барьеры Шоттки Au-n-GaAs/n⁺-GaAs, изготовленные из базовых структур путем травления верхнего слоя GaAs в растворе H₂O₂:H₂SO₄:H₂O (1:1:2) на глубину 2-3 микрона. Полупрозрачный БШ Au-n-GaAs создавался методом химического осаждения из водного раствора HAuCl₄ (4г/л)+HF(100 мг/л). Толщина осажденных слоев золота составляла 150-200 нм. Конструкция Au-n-GaAs СЭ представлена на рисунке 1б. Так как свойства поверхности арсенида галлия существенно влияют на характеристики барьера Шоттки Au-n-GaAs [9], то перед химическим осаждением слоев золота поверхность арсенида галлия обрабатывалась в бромметаноловом травителе 4%Br₂+95%CH₃OH. Активная площадь фотопреобразователей с БШ варьировалась от 10 мм² до 50 мм².

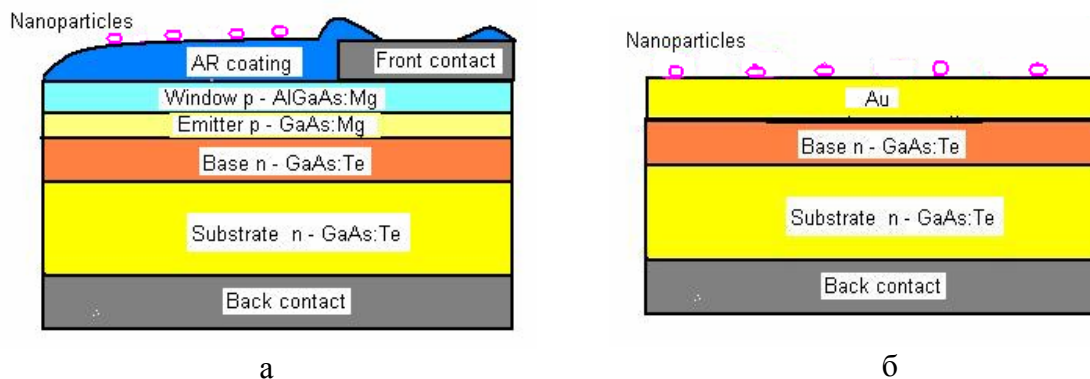


Рис.1. Конструкция исследуемых GaAs СЭ: а) с p-n переходом, б) с барьером Шоттки.

Наночастицы оксида никеля синтезировались в противоточном пламени пропана [10] на поверхности нихромовой проволоки, имели характерные размеры 50-300 нм в зависимости от условий синтеза и наносились распылением в несколько слоев на поверхность фотопреобразователя. Для получения равномерного покрытия из наночастиц на поверхности солнечного элемента, предварительно создавалась суспензия наночастиц в этаноле в ультразвуковой бане. После осаждения каждого слоя образец помещался на 15 минут в термостат при температуре 150 °С.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения коэффициента отражения (R) как функции длин волн для пластины полированного GaAs, поверхности СЭ с антиотражающим покрытием Si_3N_4 и барьера Шоттки показаны на рисунке 2.

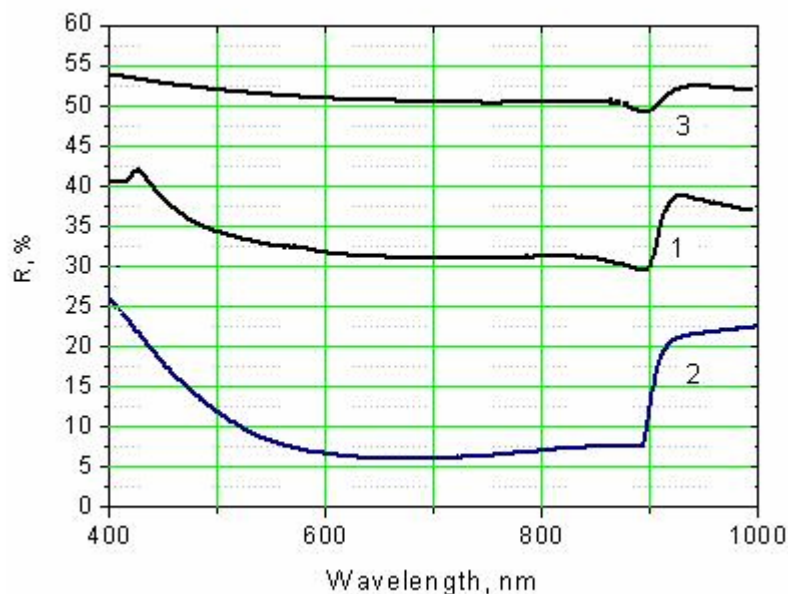


Рис.2. Коэффициент отражения, как функция длин волн для полированного GaAs (1), поверхности СЭ с антиотражающим покрытием Si_3N_4 (2) и барьера Шоттки (3).

Как видно из графика без нанесения антиотражающего покрытия коэффициент отражения элементов из GaAs превышает 30% во всем спектральном диапазоне. Однослойное антиотражающее покрытие уменьшает коэффициент отражения до 6 %. Нанесенный на поверхность GaAs слой золота, увеличивает коэффициент отражения до 50%.

Влияние нанесенных на поверхность образцов СЭ наночастиц оксида никеля на значение тока короткого замыкания J_{sc} и напряжения холостого хода (U_{oc}) оценивалось после и отжига каждого слоя наночастиц. На рисунке 3 представлена динамика изменения фототока и напряжения GaAs СЭ с р-п переходом (а) и с барьером Шоттки (б) от числа нанесенных слоев наночастиц оксида никеля, то есть от их поверхностной концентрации.

Как видно из рисунка наблюдается возрастание фототока, который достигает максимального значения для двух слоев наночастиц, затем ток уменьшается как для СЭ с р-п переходом, так и с барьером Шоттки.

Максимальное увеличение фототока для элемента с р-п переходом достигает 4,7%, а для барьера Шоттки – 2,2%. С учетом того, что максимальная доля фотонов вошедших в СЭ с р-п переходом достигает 94 %, а в СЭ с БШ только 50% (рис.2), можно сделать вывод, что эффект возрастания фототока связан только с наночастицами и его количественная характеристика одинакова для двух типов исследуемых СЭ.

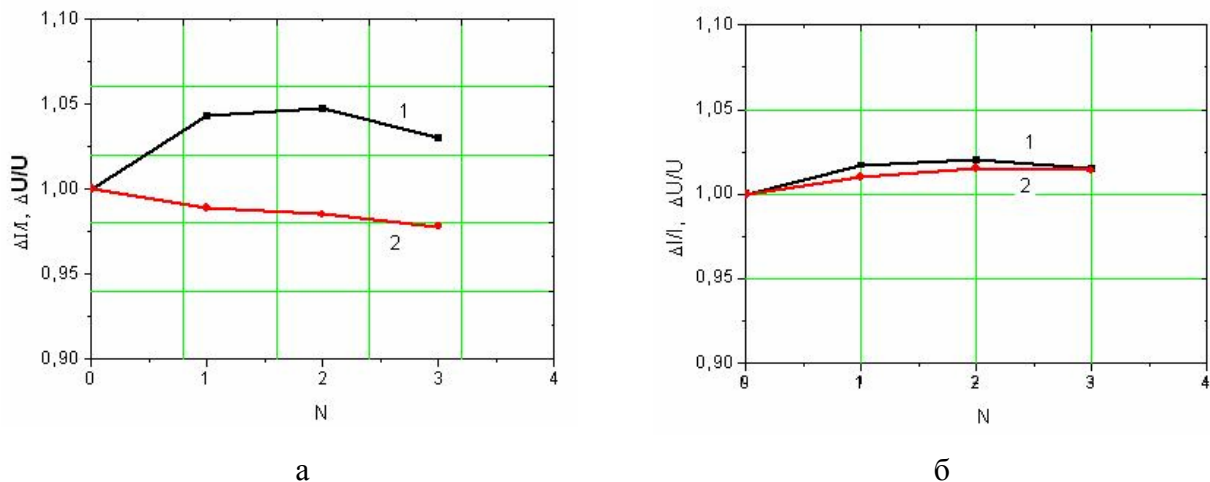


Рис.2 Относительное изменение тока короткого замыкания (кривые 1) и напряжения холостого хода (кривые 2): а) СЭ с р-п переходом, б) СЭ с БШ от числа N нанесенных слоев наночастиц оксида никеля.

Результаты измерения U_{oc} от числа слоев с оксидом никеля показывают, что эти зависимости различаются для СЭ с р-п переходом, и СЭ с БШ: для всех образцов с р-п переходом наблюдалось небольшое уменьшение напряжения на 1-2 %, в то время, как для БШ напряжение изменялось также как и ток, для первых двух слоев увеличивалось на 1,5 %, а затем уменьшалось. Для СЭ с р-п переходом при N=2 уменьшение U_{oc} составило 1,4%.

Начальное увеличение напряжения U_{oc} и тока J_{sc} с увеличением числа слоев N в барьере Шоттки связано увеличением количества фотонов, поглощенных в области обеднения, примыкающей к полупрозрачному слою золота. При дальнейшем увеличении концентрации частиц на поверхности СЭ отражение фотонов от поверхности увеличивается, приводя к уменьшению тока и напряжения в обоих типах структур.

Спектральные характеристики СЭ снимались в диапазоне 400 – 900 нм по модуляционной методике. На рис.3 представлены спектры внешней квантовой эффективности EQE структур с р-п переходом до нанесения наночастиц (кривая 1) и после нанесения двух слоев наночастиц оксида никеля (кривая 2). Исходный спектр (1) характеризуется резким спадом в длинноволновой области, характерного для СЭ на основе GaAs, являющегося прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны $E_g=1,42$ эВ.

Спад коротковолновой чувствительности связан с поглощением коротковолновых фотонов в сильнолегированной эмиттерной р области р-п перехода и рекомбинацией в ней фотогенирированных носителей.

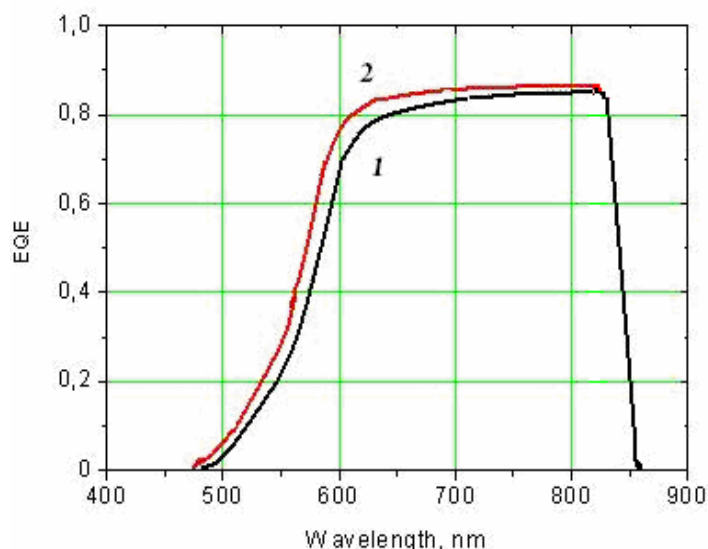


Рис.3 Спектры внешней квантовой эффективности GaAs СЭ с p-n переходом до нанесения наночастиц (кривая 1) и после нанесения двух слоев наночастиц оксида никеля (кривая 2).

Размеры частиц оксида никеля меньше длины волны падающего излучения, в этом случае происходит дифракционное рассеяние света и, как следствие, более полный захват фотонов. Увеличение внешней квантовой эффективности наблюдалось во всей области спектральной чувствительности СЭ (кривая 2). Максимальное увеличение EQE наблюдалось в коротковолновой области спектра, и монотонно изменялось от 6,8 % при $\lambda=540$ нм до 2,2% при $\lambda=800$ нм.

С использованием электронного микроскопа Quanta 3D200i было исследовано форма и распределение наночастиц на поверхности солнечного элемента. На рисунке 4 представлена растровая микрофотография наночастиц оксида никеля на поверхности солнечного элемента.

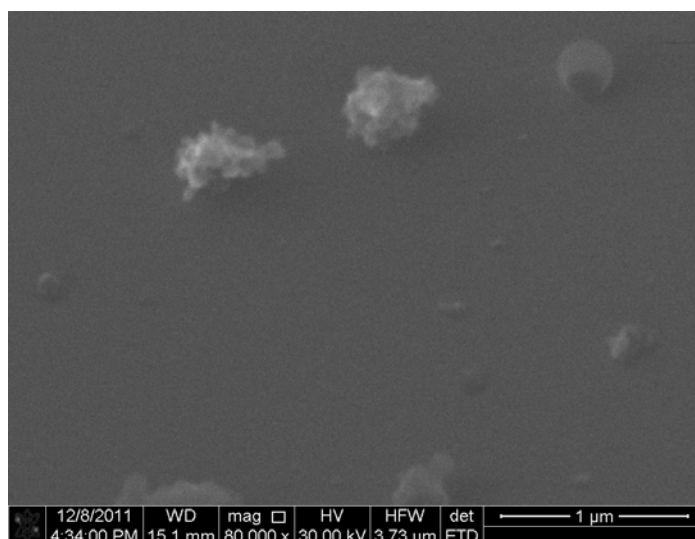
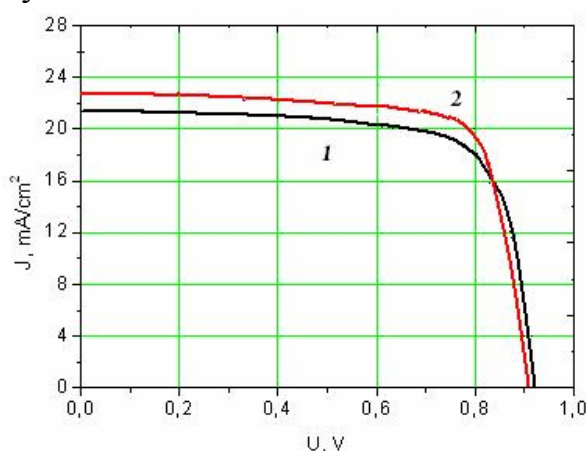


Рис. 4. Микрофотография наночастиц оксида никеля на поверхности солнечного элемента.

Морфология поверхности наночастиц является довольно развитой и по-видимому имеет фрактальную структуру: на поверхности частиц размером ≈ 100 нм наблюдаются полуостровковые образования с характерным размером порядка 20 нм. Увеличение фоточувствительности за счет наночастиц кроме эффекта рассеяния может быть также связано с эффектом переизлучения на наноразмерных составляющих частиц оксида никеля.

Вольтамперные характеристики GaAs СЭ с р-п переходом при интенсивности светового излучения 100 мВт/см^2 и их основные параметры представлены на рисунке 5. После нанесения наночастиц наблюдалось небольшое увеличение коэффициента заполнения (FF) от 0,75 до 0,76, связанное с увеличением концентрации носителей заряда в поглощающем слое СЭ и уменьшением последовательного сопротивления.



$$1. J_{sc} = 21,5 \text{ мА/см}^2, U_{oc} = 0,92 \text{ В}, \\ FF = 0,75, \eta = 14,8\%$$

$$2. J_{sc} = 22,5 \text{ мА/см}^2, U_{oc} = 0,907 \text{ В}, \\ FF = 0,76, \eta = 15,5\%$$

Рис. 5. Вольтамперная характеристика GaAs СЭ с р-п переходом до нанесения наночастиц (кривая 1) и после нанесения двух слоев наночастиц оксида никеля (кривая 2) и параметры СЭ.

Измерения показали, что использования наночастиц приводит к увеличению коэффициента полезного действия СЭ от $\eta = 14,8\%$ до $\eta = 15,5\%$, то есть на 4,7%, несмотря на уменьшение напряжения холостого хода. Необходимо отметить, что исследованные солнечные элементы до нанесения частиц характеризовались разбросом тока короткого замыкания в пределах 10-15 %, и напряжения холостого хода в пределах 2-3 процентов. Для различных элементов увеличение эффективности также лежала в интервале $\pm 15\%$. Исследуемый образец характеризовался средними значениями параметров.

Заключение

В работе исследовано влияние наночастиц оксида никеля на эффективность преобразования солнечных элементов на основе GaAs. При нанесении двух слоев частиц наблюдалось максимальное увеличение тока короткого замыкания. Проведенные исследования показали, что покрытие из наночастиц оксида никеля существенно повышает коэффициент полезного действия солнечных элементов на 4,7% за счет рассеяния света на них и увеличения доли поглощенных фотонов в активной области СЭ.

Список использованных источников

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984, Т. 2, 456 с.
2. W. Shockley, H.J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells, *Journal of Applied Physics* 32 (1961) 510–519.
3. W.H. Southwell, Gradient-index antireflection coatings, *Optics Letters* 8 (1983) 584–586.
4. N.Shibata, Plasma-chemical vapor-deposited silicon oxide/silicon oxynitride double-layer antireflective coating for solar cells, *Japanese Journal of Applied Physics* 30 (1991) 997–1001.
5. Y.A. Chang, Z.Y. Li, H.C. Kuo, T.C. Lu, S.F. Yang, L.W. Lai, L.H. Lai, S.C. Wang, Efficiency improvement of single-junction InGaP solar cells fabricated by a novel micro-hole array surface texture process, *Semiconductor Science and Technology* 24 (2009).
6. T. Stelzner, M. Pietsch, G. Andra, F. Falk, E. Ose, S. Christiansen, Silicon nanowire-based solar cells, *Nanotechnology* 19 (2008) 295203.
7. M.A. Tsai, P.C. Tseng, H.C. Chen, H.C. Kuo, P.C. Yu, Enhanced conversion efficiency of a crystalline silicon solar cell with frustum nanorod arrays, *Optics Express* 19 (2011) A28–A34.
8. X.D. Pi, Q. Li, D.S. Li, D.R Yang, Spin-coating silicon-quantum-dot ink to improve solar cell efficiency, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011) 2941–2945.
9. В.Л.Берковиц, Т.В.Львова, В.П.Улин. Нитридная пассивация поверхности GaAs (100): влияние на электрические характеристики поверхностно-барьерных структур Au/GaAs. *ФТП*, 2011, т.45, вып.12, с.1637-1641.
10. Б.Т.Лесбаев, М.Ауелханкызы, З.А.Мансуров, А.Б.Лесбаев, Г.О.Турешева, Н.Г.Приходько, Б.З.Мансуров. Синтез наночастиц оксида никеля в диффузионном пламени на встречных струях. *Вестник КазНУ, серия физическая*, №4, (43), 2012, с.8-14.