

УДК 621.315.592

Е.Я. Шве́ц, и. о. реактора, к.т.н., профессор

А.Г. Коломо́ец, доцент, к.ф.-м.н.

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ И СПЛАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Запорожская государственная инженерная академия

Наведено результати аналізу найважливіших технологічних характеристик арсеніду галію GaAs та сплавів на його основі з точки зору використання зазначених матеріалів у сонячній енергетиці. Надано оцінку перспектив такого застосування.

Ключові слова: арсенід галію, р-п перехід, ширина забороненої зони, к.к.д. сонячного елемента, сонячна батарея

Приведены результаты анализа важнейших технологических характеристик арсенида галлия GaAs и сплавов на его основе с точки зрения использования указанных материалов в солнечной энергетике. Дана оценка перспектив такого использования.

Ключевые слова: арсенид галлия, р-п переход, ширина запрещенной зоны, к.п.д. солнечного элемента, солнечная батарея

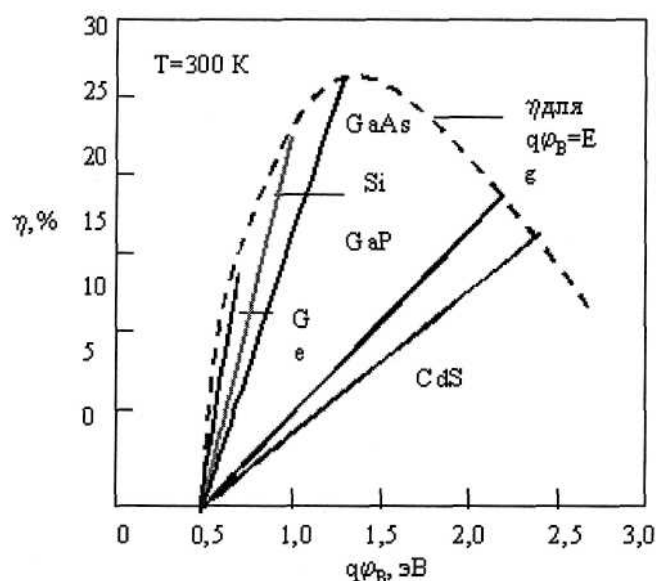
Results of analysis for major technological characteristics of gallium arsenide GaAs and alloys on his basis from the point of view of the use of the indicated materials in sun energy are considered. The estimation of prospects of such use is given.

Key words: arsenide of gallium, p-n transition, value of band gap, coefficient of efficiency for sun element, sun battery

Как отмечалось ранее [1], среди факторов, учитывающих экономическую целесообразность применения того или иного соединения в качестве материала для солнечной энергетике, превалирует его к.п.д. для гомогенных *p-n* переходов. Согласно [2], к.п.д. многих перспективных для фотовольтаики полупроводниковых материалов находится в определенной зависимости от ширины запрещенной зоны E_g (рис. 1), которая имеет устойчивый максимум для соединений с шириной запрещенной зоны в интервале 1,0...1,5 эВ. Из наиболее распространенных и эксплуатируемых полупроводниковых соединений указанной характеристикой обладает, прежде всего, арсенид галлия *GaAs*.

Действительно, согласно [3], солнечные элементы на основе арсенида галлия обеспечивают наибольший к.п.д. (22...23 %). Анализ каскадной солнечной батареи, выполненной из двух или большего количества фотоэлементов, последовательно электрически и оптически связанных между собой, показал возможность достижения к.п.д. преобразования более, чем 31 % для состава *AlGaAs-GaInAs* [4]. Ховелл и Вуддал [5], а также Хаббер и Богус [6], выполняли детальный анализ характеристик и оценку потенциальных возможностей солнечных элементов на основе *GaAs*. Результаты их исследований представлены в табл. 1, где для сравнения приведены данные Вольфа [7] для фотовольтаически традиционных кремниевых элементов. В табл. 1 включены экспериментальные данные из работы [5] для элементов со структурой *p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs*, которые имеют к.п.д. 12 % и результаты работы Хаббера и Богуса [6] для разработанных ими элементов со структурой *p-AlAs/p-GaAs/n-GaAs*, а также

ожидаемые возможные значения коэффициентов потерь, рассчитанные Ховеллом и Вуддалом. Видно, что основным недостатком элементов из арсенида галлия является низкое значение коэффициента собирания, тогда как значения коэффициента использования разности потенциалов ширины запрещенной зоны и коэффициента заполнения близки к их максимально возможным значениям. Коэффициент собирания существенно увеличивается при введении в солнечный элемент на основе $GaAs$ с $p-n$ гомопереходом слоя широкозонного полупроводника, который снижает характерные для элементов из $GaAs$ потери, связанные с поверхностной рекомбинацией. Высокая скорость рекомбинации на поверхности солнечных элементов из арсенида галлия оказывает сильное влияние на коэффициент собирания, поскольку в этом полупроводнике с прямыми межзонными переходами основная часть фотонов солнечного спектра поглощается вблизи поверхности.



огибающая соответствует максимальным значениям к.п.д., вычисленным при высоте потенциального барьера, равной ширине запрещенной зоны

Рисунок 1 – Зависимость эффективности преобразования от высоты потенциального барьера для различных полупроводников

При этом слой широкозонного материала на поверхности элемента служит «зеркалом» для неосновных носителей, которое «отражает» носители, движущиеся к поверхности, и заставляет их перемещаться в сторону $p-n$ перехода. Покрытие из широкозонного полупроводника, которое снижает поверхностные рекомбинационные потери, может использоваться не только в элементах с $p-n$ переходом, но и в любых других солнечных элементах. Такое покрытие оказывается наиболее эффективным для полупроводников с характерными прямыми переходами, поскольку в этих материалах свет поглощается очень близко к поверхности. Для создания покрытия выбирается полупроводник с непрямыми переходами, который имеет значительно более широкую запрещенную зону, чем полупроводниковый материал, из которого изготовлен сам элемент. Выбранный полупроводник наращивается на поверхность элемента. В случае $Al_xGa_{1-x}As$ такое наращивание оказывается возможным частично благодаря тому, что в состав широкозонного полупроводника и первоначального $GaAs$ входят два одинаковых химических элемента. Ховелл и Вуддал [5] отмечают, что для

уменьшения потерь, связанных с поглощением излучения в $Al_xGa_{1-x}As$, толщина слоя этого материала должна составлять не более нескольких тысяч ангстрем.

В начале восьмидесятых годов XX столетия были получены солнечные элементы на основе арсенида галлия с к.п.д., приблизительно равным 10 % [8]. На поверхности элемента, который состоял из арсенида галлия, наращивали очень тонкий (около 30 ангстрем) слой оксида, который затем покрывали прозрачной пленкой для получения структуры «металл – диэлектрик – полупроводник» [9]. Такие элементы могут быть изготовлены более дешевым способом по сравнению с обычными диффузионными элементами, в то время как их к.п.д. сравнимы по величине.

Таблица 1 – Механизмы потерь в обычных кремниевых солнечных элементах и некоторых элементах на основе GaAs при освещении в условиях АМО согласно [8]

№№ п/п	Механизмы потерь	Тип элемента			
		1	2	3	4
1	Пропускание длинноволновых фотонов с энергией $h\nu < E_g$	0,24	0,38	0,38	0,38
2	Потери избыточной энергии фотонов с $h\nu > E_g$	0,43	0,34	0,34	0,34
3	Поглощение в слое AlAs или $Al_xGa_{1-x}As$	-	-	0,18	0,29
4	Коэффициент потерь по напряжению	0,51	0,30	0,30	0,26
5	Коэффициент кривизны характеристики идеального перехода	0,19	0,10	0,10	-
6	Дополнительный коэффициент кривизны	0,09	0,09	0,09	-
7	Потери на внутреннем последовательном сопротивлении	0,03	0,03	0,03	-
8	Коэффициент заполнения (определяется потерями 5, 6, и 7), F_F	0,71	0,79	0,79	0,79
9	Потери при собирании носителей, $1 - Q$	0,28	0,54	0,20	0,21
10	Потери на отражение, R	0,03	0,03	0,03	0,03
11	К.п.д., η	0,11	0,12	0,14	0,13

Обозначения: 1 - обычный кремниевый элемент *n-p* типа с удельным сопротивлением базы 10 Ом·см [7];

2 - экспериментальные данные для обычного элемента *p-n* типа из GaAs [6];

3 - результаты расчета для элемента *p-AlAs/p-GaAs/n-GaAs* [6];

4 - экспериментальные данные для элемента *p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs* [5]

Несмотря на некоторые недостатки (ломкость, высокая плотность) арсенид галлия имеет неоспоримые преимущества перед кремнием – традиционным материалом для солнечных элементов. Из-за большой ширины запрещенной зоны способность арсенида галлия преобразовывать длинноволновое солнечное излучение ограничена (арсенид галлия поглощает излучение с длиной волны меньше 0,9 мкм). Однако это же обстоятельство приводит к существенно меньшим значениям обратного тока насыщения ($10^{-9} \dots 10^{-10}$ А/см²), в то время как для солнечных элементов из кремния обратный ток насыщения составляет $10^{-6} \dots 10^{-7}$ А/см² [8]. Это, в свою очередь, дает возможность получить большие, чем у кремния, значения напряжений холостого хода (0,7...0,8 В) для *p-n* перехода в гомогенном материале и достаточно высокий к.п.д. даже для серийно выпускаемых элементов (10...12 %) [9]. Эти же особенности арсенида галлия обуславливают значительно более медленное падение к.п.д. с ростом температуры (0,25 %/град), в то время как для кремниевых солнечных элементов эта величина составляет 0,45...0,46 %/град. [9].

Поиск новых перспективных для фотовольтаики материалов среди полупроводниковых соединений семейств I III VI₂ и II IV V₂, а также предварительная оценка их к.п.д., могут быть проведены с использованием рис. 2 [2]. Видно, что многие из материалов этих семейств попадают в тот же диапазон ширины запрещенной зоны, что и арсенид галлия.

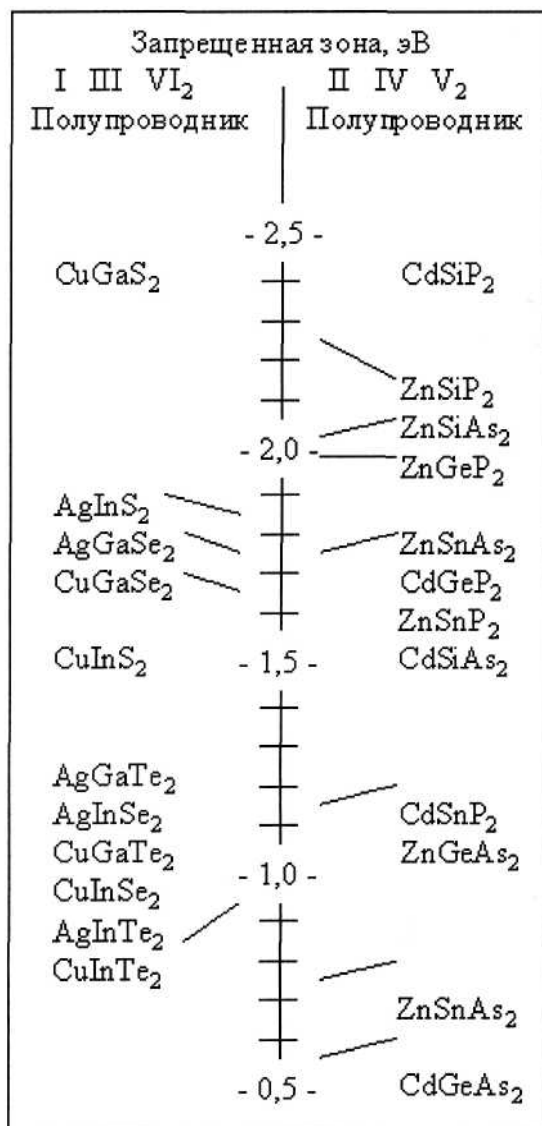


Рисунок 2 – Значения ширины запрещенных зон для полупроводников, представляющих интерес для фотовольтаического преобразования солнечной энергии [2]

Однако на сегодняшний день арсенид галлия является наиболее изученным материалом и поэтому его применение в фотовольтаике в большой степени прогнозируемо. Кроме почти идеальной для однопереходных солнечных элементов ширины запрещенной зоны 1,43 эВ, данный материал обладает еще и некоторыми особенностями, делающими его уникальным материалом для применения. Это повышенная способность к поглощению солнечного излучения (требуется слой толщиной всего несколько микрон); высокая радиационная стойкость, что делает этот материал чрезвычайно привлекательным для использования в космических аппаратах; относительная нечувствительность к нагреву батарей; характеристики сплавов GaAs с алюминием, мышьяком, фосфором или индием дополняют характеристики самого арсенида галлия, что расширяет возможности при проектировании солнечных элементов. Главное

достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе – широкий диапазон возможностей для дизайна солнечного элемента. Фотоэлемент на основе *GaAs* может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что, например, в кремниевых солнечных элементах ограничено допустимым уровнем легирования. Типичный солнечный элемент на основе *GaAs* включает очень тонкий слой *AlGaAs* в качестве окна.

Основной недостаток *GaAs* – высокая стоимость. Для удешевления производства предлагается формировать солнечные элементы на дешевых подложках, а также выращивать слои *GaAs* на удаляемых подложках или подложках многократного использования [10]. Поликристаллические тонкие пленки из арсенида галлия также весьма перспективны для солнечной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швец, Е. Я. Проблемы выбора материалов для солнечных элементов [Текст] / Е. Я. Швец, А. Г. Коломоец // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – РВВ ЗДІА, 2008. – Вип. 17. – С. 114-118.
2. Солнечные батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа : \www/ URL: hhp: //dssplab.karelia.ru/sources/moe12/Seminar_w_MOE/1999_200/ – 28.03.2006 г. – Загл. с экрана.
3. Дикий, М. О. Поновлювані джерела енергії [Текст] / М. О. Дикий. – Київ : Вища школа, 1993. – 351 с. – Бібліогр. : с. 346-348. – ISBN 511-004069-9.
4. Солнечные фотоэлектрические установки мощностью 200 Вт на основе AlGaAs-гетерофотоэлементов и зеркальных концентраторов [Текст] / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, Х. К. Архипов [и др.] // *Гелиотехника*. – 1982. – № 2. – С. 3-5.
5. Hovell, H. J. [Text] H. J. Hovell, J. M. Woodall. 10th Bogus Conf. Record IEEE Photovoltaic Specialists Conf. – Palo Alto, California (November 1973). – 1973. – P. 25.
6. Huber, D. [Text] D. Huber, K. 10th Bogus Conf. Record IEEE Photovoltaic Specialists Conf. – Palo Alto, California (November 1973). – 1973. – P. 100.
7. Wolf, M. A New Look at Silicon Solar Cell Performance [Text] / M. Wolf // *Energy Conversion*. – 1971. – Vol. 11. – P. 63-73.
8. Материаловедение и проблемы энергетики [Текст] ; под ред. Г. Либовица, М. Уиттингема. – М. : Мир, 1982. – 585 с. – Библиогр. : с. 242-245.
9. Колтун, М. М. Солнечные элементы [Текст] / М. М. Колтун. – М. : Наука, 1987. – 191 с. – Библиогр. : с. 113.
10. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : \www/ URL: http://www.electronics.ru/630.html/ – 26.05.2006 г. – Загл. с экрана.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2013 р.
Рецензент, проф. І. Ф. Червоний