

Свойства границ раздела в солнечных элементах на основе GaInP

© А.С. Гудовских^{*†}, Н.А. Калюжный[■], В.М. Лантратов[■], С.А. Минтаиров[■],
М.З. Шварц[■], В.М. Андреев^{■*}

* Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

■ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 5 марта 2009 г. Принята к печати 18 марта 2009 г.)

Проведены исследования влияния свойств границ раздела фосфидов атомов III группы на характеристики фотопреобразователей на основе GaInP. Показано, что большая величина разрыва валентных зон на границе p -GaAs/ p -AlInP создает фундаментальные ограничения для использования слоев p -AlInP в качестве широкозонного окна в p - n -структурах фотопреобразователей, работающих при высоких уровнях концентрации солнечного излучения. Показана потенциальная возможность улучшения характеристик фотопреобразователей на основе p - n -структур при использовании двухслойного широкозонного окна, состоящего из слоев p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As и p -(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P.

PACS: 73.20.At, 73.40.Kp, 84.60.Jt

1. Введение

Развитие солнечной энергетики требует постоянного совершенствования характеристик фотопреобразователей (солнечных элементов) с целью повышения эффективности преобразования солнечной энергии. Одним из наиболее успешных путей повышения коэффициента полезного действия (кпд) солнечных элементов (СЭ) является использование многопереходных (каскадных) гетероструктур на основе соединений A^{III}B^V. Такие каскадные солнечные элементы достигают кпд более 40% при преобразовании концентрированного солнечного излучения, что определяет перспективность их применения в фотоэлектрических модулях с концентраторами излучения [1].

В многопереходных солнечных элементах GaInP/GaAs/Ge тройные соединения фосфидов элементов III группы (GaInP и AlInP) являются одними из наиболее подходящих кандидатов для формирования верхнего перехода. Однако свойства границ раздела в гетероструктурах относятся к определяющим факторам в работе таких устройств. Влияние свойств границ раздела на характеристики фотоэлектрических преобразователей на основе GaInP было показано в [2]. Также экспериментально было показано, что СЭ на основе структур n -GaAs/ n -AlInP/ n -GaInP/ p -GaInP/ p -GaAs (далее n - p -структуры) обладают большим кпд по сравнению с СЭ на основе структур p -GaAs/ p -AlInP/ p -GaInP/ n -GaInP/ n -GaAs (далее p - n -структуры). Основная особенность p - n -структур заключается в наличии изгиба на нагрузочной вольт-амперной характеристике (ВАХ) в области напряжения холостого хода (V_{oc}), что приводит к уменьшению коэффициента заполнения (FF) ВАХ, а следовательно, и кпд СЭ [2,3]. В работе [4] нами было показано, что образование перегиба может быть связано со свойствами границ раздела p -GaAs/ p -AlInP/

p -GaInP. В данной статье представлены результаты дополнительных экспериментальных исследований, в которых учтены особенности работы солнечных элементов при освещении концентрированным солнечным излучением и показаны пути совершенствования СЭ на основе p - n -структур. Интерес к совершенствованию p - n -структур также обусловлен перспективностью использования СЭ, прозрачных в инфракрасной области спектра, для высокоэффективных механически стыкованных многопереходных фотопреобразователей [5].

2. Описание эксперимента и моделирования

Экспериментальные гетероструктуры на основе тройного соединения Ga_{0.52}In_{0.42}P (далее GaInP) были выращены методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на подложках GaAs p - и n -типа проводимости. В качестве широкозонного окна использовались слои Al_{0.53}In_{0.47}P (далее AlInP) толщиной 30 и 15 нм или слои Al_{0.8}Ga_{0.2}As. Топология верхней контактной сетки формировалась с использованием операций фотолитографии, селективного травления верхнего контактного слоя GaAs и нанесения контактных систем

Таблица 1. Параметры материалов слоев гетероструктур

| Материал | E_g , эВ | χ , эВ | μ_n/μ_p |
|---|------------|-------------|----------------|
| GaAs | 1.42 [8] | 4.07 [8] | 1000/50 [8] |
| GaInP | 1.85 [9] | 4.01 [11] | 500/30 [13,14] |
| AlInP | 2.35 [10] | 3.78 [11] | 100/10 |
| Al _{0.8} Ga _{0.2} As | 2.09 [9] | 3.53 [12] | 500/30 [15] |
| Al _{0.4} Ga _{0.6} As | 1.92 [9] | 3.63 [12] | 500/30 |
| (Al _{0.6} Ga _{0.4}) _{0.51} In _{0.49} P | 2.26 [9] | 3.83 [9] | 100/50 |

Примечание. E_g — ширина запрещенной зоны; χ — электронное средство; μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок в см² · В⁻¹ · с⁻¹.

† E-mail: gudovskikh@edu.ioffe.ru

Таблица 2. Значения уровней легирования (в см^{-3}) и толщин (в нм) слоев, используемые в расчете

| Слой | n - p -структура с окном (AlInP) | p - n -структура с окном (AlInP) | p - n -структура с окном (AlGaAs) |
|-----------------|--------------------------------------|--|---|
| Контактный GaAs | $2 \cdot 10^{18} / 300$ | $10^{19} / 300$ | $10^{19} / 300$ |
| Окно | AlInP | AlInP | $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ |
| Эмиттер GaInP | $5 \cdot 10^{18} / 30$ | $2 \cdot 10^{17} / (30 \text{ и } 15)$ | $2 \cdot 10^{17} / 30$ |
| База GaInP | $2 \cdot 10^{18} / 50$ | $4 \cdot 10^{17} / 130$ | $4 \cdot 10^{17} / 130$ |
| GaInP BSF | $10^{17} / 800$ | $10^{17} / 920$ | $10^{17} / 920$ |
| Буферный GaAs | $10^{18} / 50$ | $2 \cdot 10^{18} / 50$ | $2 \cdot 10^{18} / 50$ |
| | $2 \cdot 10^{18} / 150$ | $2 \cdot 10^{18} / 150$ | $2 \cdot 10^{18} / 150$ |

Au:Ge/Ni/Au и Ag:Mn/Ni/Au к слоям n - и p -типа проводимости соответственно. Двухслойное просветляющее покрытие ZnS/MgF₂ наносилось на широкозонное окно. Конструкция контактов оптимизирована для работы СЭ в условиях концентрированной до 100 крат солнечной засветки. Затенение фотоактивной области контактной сеткой составляло 8%. Более детальное описание процесса изготовления структур можно найти в [6].

Компьютерное моделирование ВАХ гетероструктур осуществлялось с использованием программы AFORS-HET v.2.2, разработанной в Hahn-Meitner-Institut (HMI) в Берлине [7]. При моделировании использовалась одномерная структура „контактный слой GaAs/широкозонное окно/переход в GaInP/ подложка GaAs“ со скоростью поверхностной рекомбинации на границе полупроводник/металлический электрод, равной $10^7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ для электронов и дырок. Основные параметры материалов, используемые при расчете, приведены в табл. 1. Для всех полупроводниковых слоев принималась одинаковая величина времени жизни в объеме материала 10^{-8} с [16]. При расчете вольт-амперных характеристик в условиях освещения принимались во внимание типичный экспериментальный спектр отражения для просветляющего покрытия и 8-процентные потери на затенение контактной сеткой. На первом этапе расчетов плотность поверхностных состояний не учитывалась. Используемые в расчетах параметры слоев (табл. 2) выбирались на основе анализа данных о выращенных структурах.

На втором этапе моделирования исследовалось влияние плотности состояний на границе раздела „широкозонное окно (AlInP или $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$)/эмиттер GaInP“. Граница раздела была описана введением очень тонкого (толщиной $d = 1 \text{ нм}$) дефектного слоя GaInP (с шириной запрещенной зоны $E_g = 1.85 \text{ эВ}$) между эмиттером GaInP и широкозонным окном. Распределение плотности состояний (g_{it}) в этом дефектном слое предполагалось постоянным. При этом в нижней половине запрещенной зоны состояния были донорного типа, а в верхней половине — акцепторного. Площадь сечения захвата для электронов и дырок была принята равной 10^{-14} см^2 . Плотность поверхностных состояний $D_{it} = g_{it}d$ варьировалась в диапазоне $10^7 - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Предварительные результаты моделирования показали, что влия-

ние плотности состояний на границе раздела „контактный слой GaAs/широкозонное окно“ на характеристики солнечных элементов пренебрежимо мало вплоть до $D_{it} = 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, и эти поверхностные состояния в дальнейшем не принимались во внимание.

3. Результаты исследований и обсуждение

3.1. Солнечные элементы с широкозонным окном AlInP и AlGaAs

Характерные экспериментальные вольт-амперные характеристики солнечных элементов n - p - и p - n -типа с широкозонным окном AlInP (толщина 30 нм), измеренные при освещении неконцентрированным излучением, представлены на рис. 1. Основной отличительной особенностью p - n -структур является наличие изгиба на ВАХ около точки V_{oc} , приводящего к значительному уменьшению коэффициента заполнения ВАХ

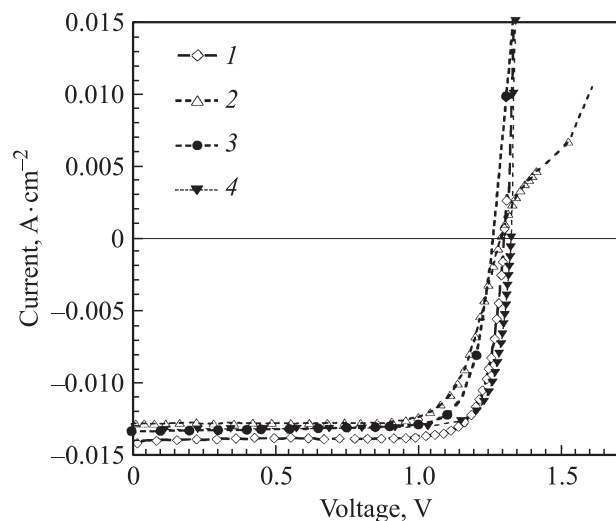


Рис. 1. Экспериментальные нагрузочные ВАХ для четырех типов изготовленных солнечных элементов: 1, 2 — соответственно n - p - и p - n -структуры с окном AlInP толщиной 30 нм; 3 — p - n -структура с окном AlInP толщиной 15 нм; 4 — p - n -структура с окном $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$. Условия освещения: AM1.5D, 100 мВт/см^2 .

($FF = 0.75$) и КПД СЭ (11.58% вместо 14.27% для $n-p$ -структуры). В [4] было показано, что наличие этого изгиба обусловлено значительным потенциальным барьером для дырок (~ 0.54 эВ), образующегося в области широкозонного окна. Расчетная зонная диаграмма этой области в условиях термодинамического равновесия показана на рис. 2, а. Потенциальный барьер образуется за счет большой величины разрыва валентных зон (ΔE_v) на границе раздела GaAs/AlInP. Полученные в результате моделирования ВАХ (рис. 3) достаточно хорошо воспроизводят форму экспериментальных ВАХ (рис. 1) как $n-p$ -, так и $p-n$ -структур.

Избежать появления изгиба на ВАХ $p-n$ -структур можно, либо увеличив уровень легирования слоя окна p -AlInP, либо уменьшив его толщину, а также за счет использования слоя p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As в качестве широкозонного окна [4]. Получение сильно легированных слоев

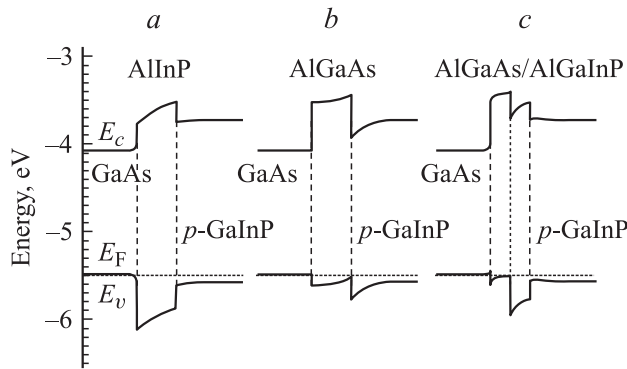


Рис. 2. Расчетные зонные диаграммы в условиях термодинамического равновесия для $p-n$ -структур с окном p -AlInP (а), с окном p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As (б) и с окном Al_{0.8}Ga_{0.2}As/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P (с). E_c — зона проводимости, E_v — валентная зона, E_f — уровень Ферми.

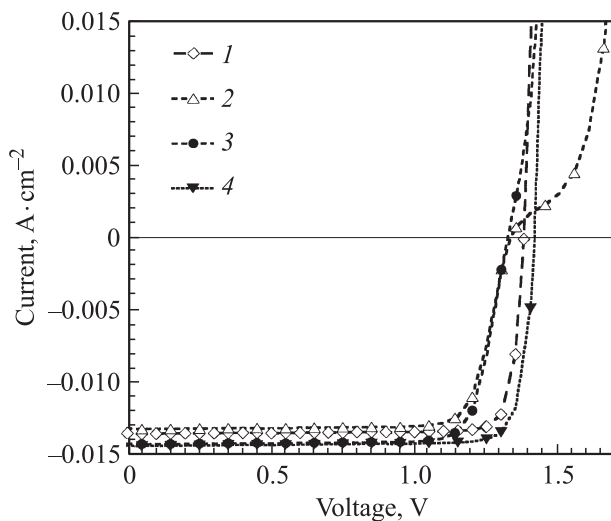


Рис. 3. Расчетные ВАХ для $n-p$ - (1) и $p-n$ - (2) структур с окном AlInP толщиной 30 нм, $p-n$ -структуры с окном AlInP толщиной 15 нм (3), $p-n$ -структуры с окном Al_{0.8}Ga_{0.2}As (4). Условия освещения: AM1.5D, 100 мВт/см².

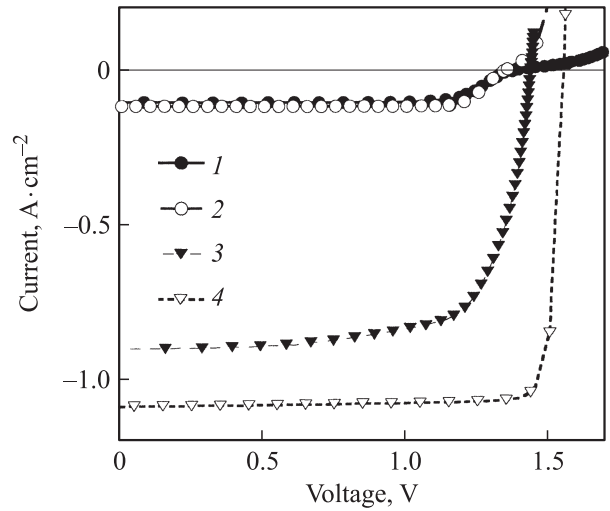


Рис. 4. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) ВАХ $p-n$ -структур с окном p -AlInP толщиной 15 нм при освещенности 8 крат (1, 2), с окном Al_{0.8}Ga_{0.2}As (3, 4) при освещенности 75 крат.

p -AlInP (с уровнем легирования больше $2 \cdot 10^{17}$ см⁻³) является достаточно сложной технологической задачей, требующей проведения дополнительных исследований условий роста. Поэтому на начальном этапе были изготовлены структуры с более тонким слоем p -AlInP (15 нм), а также с окном p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As. Расчетные ВАХ для этих двух вариантов представлены на рис. 3. Сравнение ВАХ, представленных на рис. 1 и 3 (кривые 3 и 4), показывает, что результаты моделирования для низкого уровня освещенности находятся в достаточно хорошем соответствии с экспериментальными данными. В обоих случаях отсутствует изгиб ВАХ и имеется некоторое увеличение тока короткого замыкания и коэффициента заполнения ВАХ по сравнению со структурой с окном p -AlInP толщиной 30 нм (кривая 2), для которой изгиб наблюдается и при низких уровнях освещения. Также в соответствии с результатами расчета для структуры с окном p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As наблюдается увеличение напряжения холостого хода.

Однако при использовании данных гетероструктур в солнечных элементах, преобразующих концентрированное излучение, наибольший интерес представляют их характеристики при высоких кратностях освещенности. Из рис. 4 (кривая 1) видно, что для солнечного элемента с окном p -AlInP толщиной 15 нм уже при освещенности в 8 крат наблюдается изгиб на ВАХ. Аналогичное поведение также наблюдается для расчетных ВАХ (кривая 2 на рис. 4). При моделировании для случая сильно легированного слоя p -AlInP (10^{19} см⁻³) также наблюдается изгиб на ВАХ при высоких кратностях концентрированного солнечного излучения. Таким образом, для преобразующих концентрированное излучение СЭ на основе $p-n$ -структур не следует использовать границу раздела p -GaAs/ p -AlInP.

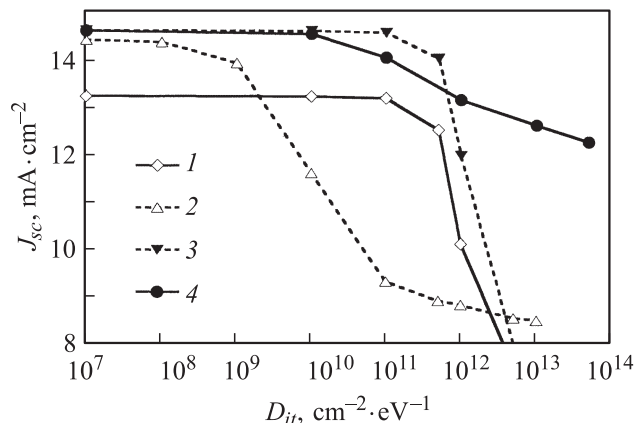


Рис. 5. Расчетные зависимости J_{sc} от D_{it} на границе окно/эмиттер для $p-n$ -структуры с окном AlInP (1), $p-n$ -структуры с окном $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ (2) и расчетные зависимости J_{sc} от D_{it} на границах раздела $(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P/GaInP$ (3), $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P$ (4) для $p-n$ -структуры с окном $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P$. Условия освещения: AM1.5D, 100 мВт/см².

С точки зрения минимизации барьера для дырок гораздо более выгодную зонную диаграмму имеет гетероструктура с окном $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ (рис. 2, *b*). Меньшая величина разрыва валентной зоны на границах $GaAs/Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ и $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaInP$ приводит к формированию незначительного барьера для дырок (и более значительного барьера для электронов) со стороны p -эмиттера. Как следствие, наблюдаются более высокие значения напряжения холостого хода (V_{oc}) и тока короткого замыкания (J_{sc}) по сравнению с $p-n$ -СЭ с окном $p-AlInP$ (рис. 3), а также отсутствуют перегибы ВАХ при концентрировании излучения вплоть до 75 крат (кривая 3 на рис. 4), что находится в точном соответствии с результатами моделирования (кривая 4 на рис. 4). Однако главной отличительной особенностью полученных солнечных элементов с окном $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ являются меньшие значения J_{sc} и V_{oc} по сравнению с результатами расчета, что проявляется и при концентрированной засветке. Причиной ухудшения параметров СЭ с окном $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ являются рекомбинационные потери на границе раздела $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As/p-GaInP$, так как транспорт через эту границу, согласно результатам моделирования, обладает повышенной чувствительностью к поверхностным состояниям. На рис. 5 представлены результаты расчета зависимости плотности тока короткого замыкания от плотности поверхностных состояний (D_{it}) для $p-n$ -структур с широкозонными окнами $p-AlInP$ (кривая 1) и $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ (кривая 2). Видно, что величина J_{sc} для структуры с окном $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ гораздо более зависима от плотности поверхностных состояний и начинает значительно падать уже при $D_{it} = 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$. Данная особенность обусловлена спецификой зонной структуры гетерограницы $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As/p-GaInP$. Из

зонной диаграммы, рассчитанной в условиях термодинамического равновесия для такого СЭ (рис. 2, *b*), следует, что значительный разрыв зоны проводимости (ΔE_c) на границе $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaInP$ приводит к существенному изгибу зон в эмиттере $p-GaInP$. Таким образом, создается электрическое поле, тянущее электроны из p -эмиттера к границе раздела, стимулируя там рекомбинацию носителей. Для сравнения: более выигрышная ситуация наблюдалась на границе раздела $p-AlInP/p-GaInP$ (рис. 2, *a*), где изгиб зон в $p-GaInP$ выражен гораздо слабее, что приводит к меньшей чувствительности параметров СЭ к величине D_{it} на этой границе раздела (кривая 1 на рис. 5). Предположение о повышенном уровне рекомбинации на границе раздела $Al_{0.8}Ga_{0.2}As/GaInP$ подтверждается измеренными спектральными характеристиками СЭ. Исследования спектральной чувствительности показали, что в коротковолновой области спектра величина внешнего квантового выхода для СЭ с окном $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ заметно меньше, чем для СЭ с окном $p-AlInP$. Это свидетельствует о рекомбинационных потерях в области, близлежащей к эмиттеру, и, что наиболее вероятно, на границе раздела $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As/p-GaInP$.

Таким образом, проведенные исследования показали, что значительный разрыв валентной зоны на границе раздела между слоями $p-GaAs$ и $p-AlInP$ принципиально не позволяет использовать данную комбинацию слоев в СЭ, работающих при высоких концентрациях солнечного излучения. Избежать проблемы можно при использовании слоя $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ в качестве широкозонного окна, граничащего с контактным слоем $p-GaAs$. Однако это приводит к резкому возрастанию влияния поверхностных состояний на границе раздела $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As/p-GaInP$ и ухудшению характеристик СЭ.

3.2. Солнечные элементы с окном AlGaAs/AlGaInP

Компромиссным решением может являться использование двухслойного окна, состоящего из верхнего слоя тройного соединения $p-AlGaAs$, граничащего с контактным слоем $p-GaAs$, и нижнего слоя тройного (AlInP) или четверного (AlGaInP) твердого раствора. Зонная структура двухслойной композиции окна, состоящей из слоев $p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ и $p-(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P$, представлена на рис. 2, *c*. Малая величина разрыва валентной зоны на границе раздела $p-GaAs/p-Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ позволяет снизить потенциальный барьер для дырок, протекающих со стороны эмиттера, до величины, достаточной для эффективной работы СЭ при высоких уровнях концентрации солнечного излучения. С другой стороны, отсутствие изгиба зон на границе раздела $p-(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P/p-GaInP$ приводит к слабой чувствительностью параметров СЭ к плотности поверхностных состояний на этой границе (кривая 3 на рис. 5). На рис. 5 также представлены расчетные зависимости величины J_{sc} от D_{it} на границе

Таблица 3. Результаты расчета характеристик СЭ с различными типами окон при условиях освещения AM1.5D, 1000 солнц

| Окно (уровень легирования, см ⁻³) | V_{oc} , В | J_{sc} , А · см ⁻² | FF , % | кпд, % |
|--|--------------|---------------------------------|----------|--------|
| AlInP($2 \cdot 10^{17}$) | 1.35 | 14.22 | 70.39 | 13.49 |
| Al _{0.4} Ga _{0.6} As(10^{18})/AlInP($2 \cdot 10^{17}$) | 1.5 | 14.17 | 65.46 | 13.88 |
| Al _{0.8} Ga _{0.2} As($5 \cdot 10^{17}$)/AlInP($2 \cdot 10^{17}$) | 1.56 | 14.64 | 63.46 | 14.48 |
| Al _{0.4} Ga _{0.6} As(10^{18})/(Al _{0.6} Ga _{0.4}) _{0.51} In _{0.49} P(10^{18}) | 1.53 | 13.8 | 83.96 | 17.75 |
| Al _{0.8} Ga _{0.2} As($5 \cdot 10^{17}$)/(Al _{0.6} Ga _{0.4}) _{0.51} In _{0.49} P(10^{18}) | 1.59 | 14.48 | 84.01 | 19.35 |

раздела Al_{0.8}Ga_{0.2}As/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P (кривая 4). Согласно результатам расчета, плотность состояний на данной границе раздела сказывается незначительно на характеристиках СЭ за счет малой толщины слоя (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P — 15 нм, даже несмотря на изгиб зон в слое (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P на границе с Al_{0.8}Ga_{0.2}As, который приводит к рекомбинации значительной части генерируемых в этом слое электронов.

Для различных комбинаций двухслойного окна был проведен расчет характеристик СЭ в условиях концентрированного солнечного излучения (1000 крат). Результаты расчета приведены в табл. 3. При учете влияния плотности поверхностных состояний на параметры СЭ использовалось значение $D_{it} = 10^{11}$ см⁻² · эВ⁻¹ на границах раздела между двумя слоями окна и между нижним слоем окна и эмиттером. Данная величина была выбрана с некоторым превышением верхнего предела D_{it} , полученного из сравнения экспериментальных ВАХ и результатов моделирования для структур с окном Al_{0.8}Ga_{0.2}As ($(2-5) \cdot 10^{10}$ см⁻² · эВ⁻¹). Для сравнения приведены данные для структуры с окном *p*-AlInP толщиной 30 нм, расчетное значение КПД которой составляет 13.49%. Использование двойного окна, состоящего из слоев Al_{0.4}Ga_{0.2}As толщиной 15 нм и AlInP толщиной 15 нм, позволяет незначительно повысить КПД за счет повышения V_{oc} . При использовании в качестве верхнего слоя Al_{0.8}Ga_{0.2}As КПД СЭ может быть еще повышен. Более существенный рост КПД наблюдается при использовании в качестве нижнего слоя окна четверного соединения (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P. Наиболее оптимальной является двойная гетероструктура с окном, состоящим из слоев Al_{0.8}Ga_{0.2}As и (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P, позволяющая поднять КПД СЭ до 19.35% (табл. 3). На ВАХ для СЭ на основе данной структуры наблюдается полное отсутствие изгибов вплоть до 1000 крат. Таким образом, согласно теоретическому расчету, комбинация слоев Al_{0.8}Ga_{0.2}As и (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P представляет наибольший интерес для формирования широкозонного окна в СЭ на основе *p-n*-структур, работающих при высоких концентрациях солнечного излучения. Согласно результатам расчета, СЭ с такими структурами позволяют достичь КПД 17% в условиях неконцентрированной засветки (AM1.5), что превосходит теоретические оценки для других типов СЭ при сопоставимых значениях D_{it} [4].

4. Заключение

С помощью компьютерного моделирования для солнечных элементов на основе GaInP показана роль параметров границ раздела, при этом достигнута хорошая корреляция расчета с экспериментальными данными. Показано, что значительный разрыв валентной зоны на границе раздела *p*-GaAs/*p*-AlInP в *p-n*-структурах приводит к ухудшению характеристик солнечных элементов на их основе. Использование в качестве окна слоя *p*-Al_{0.8}Ga_{0.2}As создает условия безбарьерного транспорта дырок, однако структура зон на границе раздела *p*-Al_{0.8}Ga_{0.2}As/*p*-GaInP приводит к существенному возрастанию влияния плотности поверхностных состояний на транспорт через эту границу, что в конечном счете приводит к значительному ухудшению параметров СЭ. Проведенные теоретические оценки показали перспективность использования двухслойного широкозонного окна, состоящего из слоев Al_{0.8}Ga_{0.2}As и (Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P. Данная комбинация позволяет, с одной стороны, снизить барьер для дырок, а с другой — уменьшить влияние плотности поверхностных состояний на границе раздела широкозонное окно/эмиттер на параметры ВАХ и обеспечить значительное повышение КПД СЭ на основе *p-n*-структур.

Работа проведена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 08-08-00916-а) и Советом по грантам президента РФ.

Список литературы

- [1] R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, D.D. Krut, J.H. Ermer, R.A. Sherif, N.H. Karam. In: *Proc. 4th Int. Conf. Solar Concentrators* (El Escorial, Spain, 2007).
- [2] S.R. Kurtz, J.M. Olson, D.J. Friedman, J.F. Geisz, K.A. Bertness, A.E. Kibbler. In: *Proc. Compound Semiconductor Surface Passivation and Novel Device Processing Symp.*, ed. by H. Hasegawa, M. Hong, Z.H. Lu and S.J. Pearton (Materials Research Society, Warrendale, 1999) p. 95.
- [3] S.I. Wojtczuk, S.M. Vernon, M.M. Sanfacon. In: *Proc. 23th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (1993) p. 655.
- [4] A.S. Gudovskikh, N.A. Kaluzhnyi, V.M. Lantranov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Thin Sol. Films*, **516** (20), 6739 (2008).

- [5] M.Z. Shvarts, P.Y. Gazaryan, N.A. Kaluzhniy, V.P. Khvostikov, V.M. Lantranov, S.A. Mintairov, S.V. Sorokina, N.K. Timoshina. In: *Proc. 21th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Dresden, 2006).
- [6] В.М. Лантратов, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **41**, 751 (2007) [V.M. Lantratov, N.A. Kaluzhniy, S.A. Mintairov, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Semiconductors*, **41**, 727 (2007)].
- [7] R. Stangl, M. Kriegel, M. Schmidt. *Proc. 4th World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC-4* (Hawaii, USA, 2006).
- [8] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices, 2nd edn* (John Wiley & Sons, N.Y., 1981).
- [9] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
- [10] D.P. Bour, J.R. Shealy, G.W. Wicks, W.J. Schaff. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 615 (1987).
- [11] C.-S. Jiang, D.J. Friedman, H.R. Moutinho, M.M. Al-Jassim. In: *Proc. 2006 IEEE 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Waikoloa, Hawaii, 2006) p. 853.
- [12] S. Adachi. *J. Appl. Phys.*, **58**, R1 (1985).
- [13] T. Shitara, K. Eberl. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 356 (1994).
- [14] M. Ikeda, K. Kaneko. *J. Appl. Phys.*, **66**, 5285 (1989).
- [15] D.C. Look, D.K. Lorance, J.R. Sizelove, C.E. Stutz, K.R. Evans, D.W. Whitson. *J. Appl. Phys.*, **71**, 260 (1992).
- [16] M.-J. Yang, M. Yamaguchi, T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori. *Sol. Energy Mater. and Solar Cells*, **45**, 331 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Interface properties in GaInP solar cells

A.S. Gudovskikh*[¶], N.A. Kalyuzhnyy[¶],
V.M. Lantratov[¶], S.A. Mintairov[¶], M.Z. Shvarts[¶],
V.M. Andreev^{¶*}

* Saint-Petersburg Physics and Technology Centre
for Research and Education,
Russian Academy of Sciences,
195220 St. Petersburg, Russia
¶ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The influence of III-phosphide alloys interface properties on GaInP solar cell characteristics was studied. It was demonstrated that significant value of the valence band offset at the p -GaAs/ p -AlInP interface forms a fundamental limitation for usage of p -AlInP as a window layer in p - n solar cells operated under high solar concentration. A potential possibility to improve p - n solar cell characteristics using double window layer, which consists of p -Al_{0.8}Ga_{0.2}As and p -(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P, was shown.