

Исследование свойств границ раздела солнечных элементов на основе GaInP с помощью измерения спектральных характеристик с варьируемым потоком излучения

© И.А. Морозов[†], А.С. Гудовских

Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 июля 2013 г. Принята к печати 19 августа 2013 г.)

Проведены исследования зонной структуры и свойств границы раздела в солнечных элементах на основе гетероструктур GaInP/AlInP. Продемонстрирован эффект изменения зонной структуры на границе раздела p -AlInP, широкозонное окно p -GaInP, эмиттер, под воздействием излучения, приводящий к ситуации, когда спектральные характеристики солнечных элементов на основе GaInP зависят от интенсивности излучения. Разработана новая методика по оценке величин времени жизни неосновных носителей заряда в слое p -GaInP эмиттера и плотности поверхностных состояний на границе раздела широкозонное окно/эмиттер (p -AlInP/ p -GaInP) на основе обнаруженного эффекта. Показано, что плотность поверхностных состояний на границе p -AlInP/ p -GaInP находится в диапазоне $10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$.

1. Введение

Ежегодный рост потребления электроэнергии требует развития альтернативных источников энергии, и в первую очередь солнечной. Для развития солнечной энергетики требуется постоянное совершенствование характеристик фотопреобразователей (солнечных элементов) с целью повышения эффективности преобразования солнечной энергии. Самыми эффективными на сегодняшний момент являются многокаскадные гетероструктурные солнечные элементы 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].

Тройные и четверные соединения фосфидов третьей группы (GaInP, AlInP и AlGaInP) являются одними из наиболее подходящих кандидатов для формирования верхнего перехода в многопереходных солнечных элементах GaInP/GaAs/Ge, которые в настоящий момент представляют основу массового производства высокоэффективных фотопреобразователей [2]. На основе GaInP ($E_g = 1.9 \text{ эВ}$) формируется фотоактивный p - n -переход, а AlInP ($E_g = 2.26 \text{ эВ}$) и AlGaInP используются в качестве широкозонного окна и тыльного потенциального барьера.

Однако свойства границ раздела в солнечных элементах на основе GaInP являются одним из ключевых факторов в работе таких устройств [3]. В работах [4,5] было показано критическое влияние на характеристики фотопреобразователей зонной структуры и плотности поверхностных состояний на границах раздела гетеропереходов. Большие значения разрывов валентных зон на изотипных гетеропереходах p -типа проводимости могут

приводить к формированию паразитных потенциальных барьеров, ограничивающих транспорт основных носителей заряда. Высокие значения плотности поверхностных состояний, а также изгиб зон, способствующий повышению концентрации неосновных носителей заряда вблизи границ раздела, приводят к значительному возрастанию рекомбинационных потерь. Таким образом, определение параметров границ раздела является неотъемлемой частью исследований, направленных на повышение эффективности преобразования солнечных элементов.

Существует большое количество методов, применяемых для характеризации границ раздела гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$. Среди них можно выделить две основные группы — это методы, основанные на оптических измерениях, такие как фотолюминесценция (ФЛ), кинетика спада ФЛ [6], ФЛ возбуждения [7–11], спектроскопия рентгеновской фотоэмиссии [12], позволяющие проводить оценки величин, скорость поверхностной рекомбинации и разрывы зон; а также методы, в основе которых лежат емкостные измерения: C - V -профилирование [13], нестационарная спектроскопия глубоких уровней [14] и спектроскопия полной проводимости [15], позволяющие определять значения разрывов зон и плотности состояний.

В данной работе предлагается использовать метод, основанный на измерениях спектральных характеристик солнечных элементов с вариацией интенсивности внешней подсветки. Спектры квантовой эффективности в коротковолновой области чувствительны к рекомбинационным процессам на фронтальной границе. Добавление интенсивной внешней подсветки может приводить к изменению изгиба зон в приповерхностной области и, следовательно, к вариации уровня рекомбинации, что в свою очередь отражается на спектральной зависимости квантовой эффективности. По полученным зависимостям квантовой эффективности от интенсивности внешней подсветки можно получить информацию о зонной

[†] E-mail: morivan@mail.ru

Таблица 1. Конструкция солнечного элемента на основе GaInP

Слой	Толщина, нм	Легирование, см ⁻³
Подложка <i>n</i> -GaAs	—	$2 \cdot 10^{18}$
Буферный слой <i>n</i> -GaAs	150	$2 \cdot 10^{18}$
База <i>n</i> -GaInP	750	$1 \cdot 10^{17}$
Эмиттер <i>p</i> -GaInP	450	$8 \cdot 10^{16}$
Широкозонное окно <i>p</i> -AlInP	15	$2 \cdot 10^{17}$
Контактный слой <i>p</i> -GaAs	300	$1 \cdot 10^{19}$

Таблица 2. Значения ширины запрещенной зоны (E_g), электронного сродства (χ) и разрывов зон (ΔE_c , ΔE_v), используемые при моделировании слоев и гетеропереходов

Слой	R_g , эВ	χ , эВ	Интерфейс	ΔE_c , эВ	ΔE_v , эВ
GaAs	1.42 [3]	4.07 [3]	GaAs/AlInP	0.3	0.63
Ga _{0.52} In _{0.48} P	1.85 [4]	4.01 [6]	GaInP/AlInP	0.24	0.26
Al _{0.53} In _{0.47} P	2.35 [5]	3.77 [6]			

структуре и рекомбинационных процессах на границах раздела.

2. Эксперимент

Исследования проводились на специально изготовленных фотопреобразовательных гетероструктурах на основе тройного соединения Ga_{0.52}In_{0.42}P (далее GaInP), выращенных методом газовой фазной эпитаксии из металл-органических соединений на подложке GaAs *n*-типа проводимости. На основе гетероструктур были изготовлены солнечные элементы, размером 3.5 × 3.5 мм с верхней контактной сеткой, сформированной на контактном слое GaAs и оптимизированной под концентрированное излучение. Затенение контактной сеткой составляло 8% площади фотоактивной области. На остальную часть фоточувствительной области было нанесено двухслойное просветляющее покрытие ZnS/MgF₂ после селективного травления контактного слоя GaAs до слоя широкозонного окна *p*-Al_{0.53}In_{0.47}P (далее AlInP).

Конструкция исследуемой структуры, приведенная в табл. 1, обладает следующими отличительными особенностями: слой эмиттера *p*-GaInP слабо легирован и имеет сравнительно большую толщину; широкозонное окно AlInP выполнено достаточно тонким, что изначально задает значительный изгиб зон в *p*-GaInP в области, близкой к границе раздела *p*-AlInP/*p*-GaInP.

Измерения спектральных характеристик фотопреобразовательной структуры проводились с помощью монохроматора M226 (Laser Solar), используя внешнюю подсветку от светодиода APRL-star (3 Вт) с длиной волны 632 нм. Измерения производились при различном потоке внешней подсветки, находящемся в диапазоне

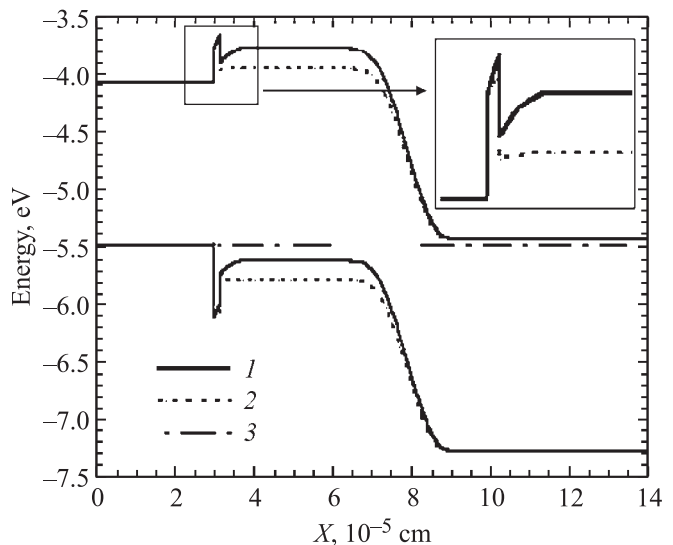
$10^{12} - 10^{16}$ см⁻²с⁻¹, контролируемом с помощью калиброванного кремниевого фотодиода.

3. Моделирование

Теоретическое моделирование проводилось с использованием программного обеспечения AFORS-НЕТ, разработанного для моделирования многослойных фотопреобразовательных гетероструктур [16]. При моделировании была задана структура с параметрами, максимально приближенными к экспериментальным образцам. Параметры слоев, используемые при расчете свойств структуры, указаны в табл. 1 и 2. Для моделирования условий дополнительной подсветки использовался источник излучения с гауссовым распределением интенсивности (длина волны 632 нм, полуширина 10 нм). Интегральная плотность потока источника варьировалась в диапазоне $10^{12} - 10^{17}$ см⁻²с⁻¹, что соответствовало экспериментальным условиям измерений с используемым светодиодным источником подсветки. В расчете использовался экспериментальный спектр отражения и учитывалось затенение контактной сеткой.

Для учета плотности поверхностных состояний на границе раздела GaInP/AlInP вводился тонкий дефектный слой (1 нм) с постоянным распределением состояний. Значение сечения захвата носителей заряда было равным 10^{14} см².

Из рассчитанной зонной диаграммы в условиях равновесия, представленной на рис. 1, видно, что большое значение разрыва валентной зоны на границе (контактный слой *p*-GaAs)/(широкозонное окно *p*-AlInP) приводит к значительному изгибу зон в *p*-AlInP и, вследствие малой толщины этого слоя, а также слабого уровня легирования эмиттера *p*-GaInP, изгиб зон наблюдается и в слое эмиттера. Этот изгиб зон приводит к форми-

**Рис. 1.** Расчетная зонная диаграмма в состоянии равновесия (1) и при подсветке (2), уровень Ферми (3).

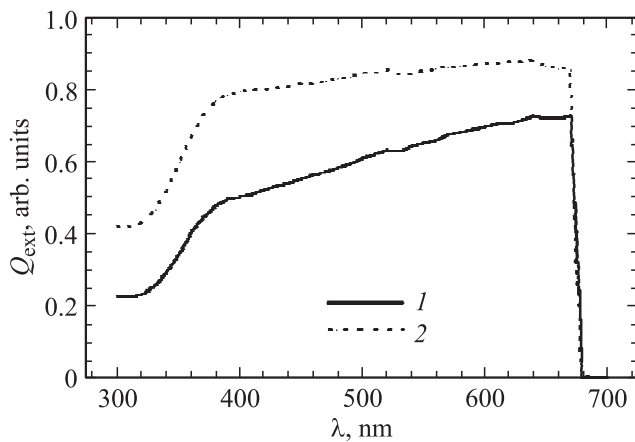


Рис. 2. Расчетные спектры квантовой эффективности без внешней подсветки (1) и при внешней подсветке (2).

рованию потенциальной ямы (0.1 эВ) для неосновных носителей заряда (электронов) вблизи интерфейса p -AlInP/ p -GaInP, где повышается их концентрация, что в свою очередь ведет к увеличению уровня рекомбинации в этой приповерхностной области. Как видно из расчета спектральной характеристики, представленной на рис. 2, описываемый изгиб зон на гетероинтерфейсе приводит к существенному уменьшению квантовой эффективности главным образом в коротковолновой области. В случае интенсивной засветки концентрация генерируемых носителей заряда превосходит уровень легирования эмиттера и происходит выпрямление зоны проводимости вблизи интерфейса p -AlInP/ p -GaInP, как показано на рис. 1. В этом случае уровень рекомбинации вблизи поверхности существенно уменьшается, что в свою очередь приводит к существенному возрастанию квантовой эффективности, как видно на рис. 2.

Были проведены три серии расчетов для выявления влияния на спектральные характеристики исследуемых параметров СЭ, определяющих рекомбинационные процессы в приповерхностной области: время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в слое p -GaInP, плотность поверхностных состояний и разрыв зон на границе гетероперехода p -AlInP/ p -GaInP.

3.1. Влияние времени жизни ННЗ в слое p -GaInP

При моделировании влияния времени жизни неосновных носителей заряда на квантовую эффективность была зафиксирована величина разрыва зон проводимости на границе гетероперехода p -AlInP/ p -GaInP, равная 0.24 эВ. На первом этапе поверхностные состояния на этой гетерогранице не учитывались. После расчета спектров внешней квантовой эффективности (Q_{ext}) при различных уровнях подсветки строилась зависимость Q_{ext} на длине волны 420 нм от потока подсветки, представленная на рис. 3, а. Эта длина волны была выбрана в связи с тем,

что коротковолновая область наиболее чувствительна к рекомбинационным процессам вблизи поверхности, при этом уровень сигнала еще достаточно высок для проведения достоверных измерений. При малых уровнях засветки квантовая эффективность очень слабо зависит от интенсивности, далее наблюдается участок с резким подъемом (сильная зависимость от интенсивности), который снова переходит в пологий участок, стремящийся к насыщению. На первом участке, при слабых интенсивностях засветки, превалирует рекомбинация в приповерхностной области, где изгиб зоны проводимости

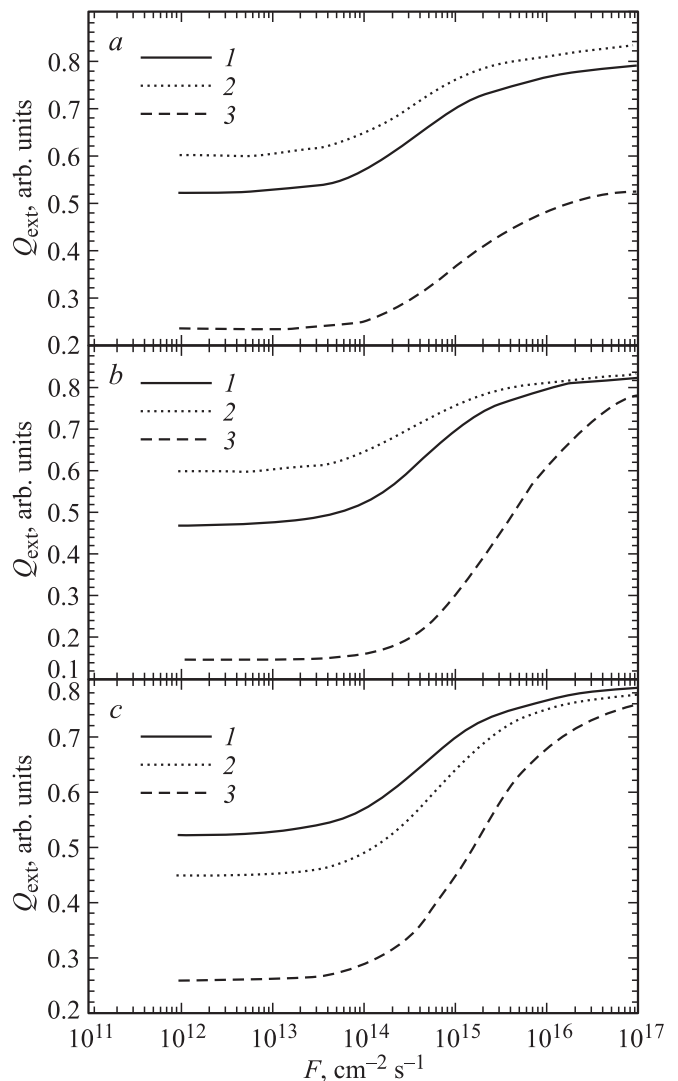


Рис. 3. Расчетные зависимости внешней квантовой эффективности (Q_{ext}) на длине волны 420 нм от уровня внешней подсветки для различных значений времени жизни носителей заряда в слое p -GaInP при отсутствии дефектов на гетерогранице (а): $\tau = 10^{-8}$ (1), $\tau = 10^{-9}$ (2), $\tau = 10^{-10}$ (3); для различных значений плотности состояний на границе гетероперехода p -GaInP/AlInP (б): $D_{it} = 0$ (1), $D_{it} = 10^9$ (2), $D_{it} = 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ (3); для различных значений разрывов зон проводимости на границе раздела p -AlInP/ p -GaInP (с): $\Delta E_c = 0.24$ (1) $\Delta E_c = 0.28$ (2), $\Delta E_c = 0.23$ (3).

(рис. 1) способствует возрастанию уровня рекомбинации. Далее с ростом интенсивности засветки происходит выпрямление зоны проводимости, и вклад рекомбинации в приповерхностной области снижется, что проявляется в значительном росте квантовой эффективности с интенсивностью. При сильном уровне засветки уровень рекомбинации в приповерхностной области значительно снижается и основной вклад вносит уже рекомбинация в объеме, что приводит к насыщению зависимости Q_{ext} от интенсивности. При уменьшении времени жизни носителей заряда в p -GaInP происходит понижение общего уровня Q_{ext} как в области слабой интенсивности, так и в области сильной интенсивности подсветки, поскольку уменьшение времени жизни ННЗ приводит к росту уровня рекомбинации как в приповерхностной области, так и в объеме слоя p -GaInP.

Следует обратить внимание на тот факт, что наклон зависимости Q_{ext} от интенсивности подсветки в переходной области (области наибольшего влияния интенсивности подсветки) практически остается неизменным для разных значений времени жизни неосновных носителей заряда в слое p -GaInP.

3.2. Влияние плотности поверхностных состояний на границе гетероперехода p -GaInP/ p -AlInP

При моделировании влияния плотности состояний (D_{it}) на границе раздела гетероперехода p -AlInP/ p -GaInP на квантовую эффективность были зафиксированы значения времени жизни ННЗ в слое p -GaInP, равное 10^{-9} с, и величина разрыва зон проводимости на гетерогранице p -AlInP/ p -GaInP, равная 0.24 эВ.

График зависимости квантовой эффективности на длине волны 420 нм от потока внешней подсветки представлен на рис. 3, б. Из графика видно, что увеличение плотности состояний на гетерогранице приводит к сдвигу переходной области зависимостей Q_{ext} в сторону большей интенсивности подсветки. При этом происходит уменьшение уровня Q_{ext} в области малых интенсивностей подсветки, поскольку с ростом D_{it} резко возрастает уровень рекомбинации в приповерхностной области. В области сильной интенсивности подсветки уровень Q_{ext} остается неизменным, так как определяется рекомбинацией в объеме слоя p -GaInP и, следовательно, зависит только от времени жизни неосновных носителей заряда.

Следует обратить внимание, что с ростом D_{it} изменяется наклон зависимости Q_{ext} от интенсивности подсветки в переходной области. Угол наклона возрастает с увеличением D_{it} . Данный факт представляет большой практический интерес, поскольку дает потенциальную возможность проводить количественную оценку D_{it} на основе данных измерений.

Расчеты зависимости Q_{ext} на длине волны 420 нм от уровня внешней подсветки для различных значений времени жизни ННЗ в слое p -GaInP с фиксированной

величиной D_{it} и для различных значений D_{it} на границе раздела p -AlInP/ p -GaInP с фиксированной величиной времени жизни ННЗ показали, что при D_{it} , равной 10^{11} см⁻²эВ⁻¹, изменение времени жизни носителей заряда в слое p -GaInP с 10^{-8} до 10^{-9} с незначительно влияет на Q_{ext} в области слабой интенсивности подсветки, поскольку в этом случае доминирует рекомбинация на поверхностных состояниях. Дальнейшее уменьшение времени жизни до 10^{-10} с приводит к снижению Q_{ext} .

3.3. Влияние разрыва зон на границе p -GaInP/ p -AlInP

Для моделирования влияния разрыва зон проводимости на границе гетероперехода p -AlInP/ p -GaInP на квантовую эффективность были зафиксированы значения времени жизни ННЗ в слое p -GaInP — 10^{-9} с и $D_{it} = 10^{11}$ см⁻²эВ⁻¹. График зависимости квантовой эффективности на длине волны 420 нм от потока внешней подсветки представлен на рис. 3, с.

Из графика видно, что изменение величины разрыва зон проводимости (ΔE_c) на гетерогранице p -AlInP/ p -GaInP оказывает сильное влияние на зависимость Q_{ext} от потока подсветки. Увеличение величины ΔE_c приводит к возрастанию изгиба зон проводимости в слое p -GaInP вблизи границы раздела, увеличению концентрации электронов, а следовательно, к росту уровня рекомбинации и уменьшению Q_{ext} в области слабой интенсивности подсветки. Возрастание ΔE_c приводит также к сдвигу переходной области зависимости Q_{ext} в сторону большей интенсивности засветки и имеет такой же характер, как и зависимость от D_{it} на границе гетероперехода p -GaInP/ p -AlInP.

4. Экспериментальные результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные спектры внешней квантовой эффективности при различных уровнях внешней подсветки представлены на рис. 4. Спектральные характеристики демонстрируют значительную зависимость величины квантовой эффективности от интенсивности внешней подсветки. Наблюдается значительный рост Q_{ext} в коротковолновой области с возрастанием интенсивности подсветки, что связывается с уменьшением уровня рекомбинации в приповерхностной области. Зависимость Q_{ext} для длины волны 420 нм от потока подсветки представлена на рис. 5. Характер зависимости аналогичен расчетным: при малом потоке внешней подсветки Q_{ext} слабо зависит от потока, далее следует резкий подъем с последующим выходом на насыщение.

Обобщая результаты моделирования, видно, что в области большой интенсивности подсветки величина Q_{ext} определяется рекомбинацией в объеме p -GaInP и зависит фактически только от времени жизни ННЗ в этом слое. Экспериментальное значение Q_{ext} в этой

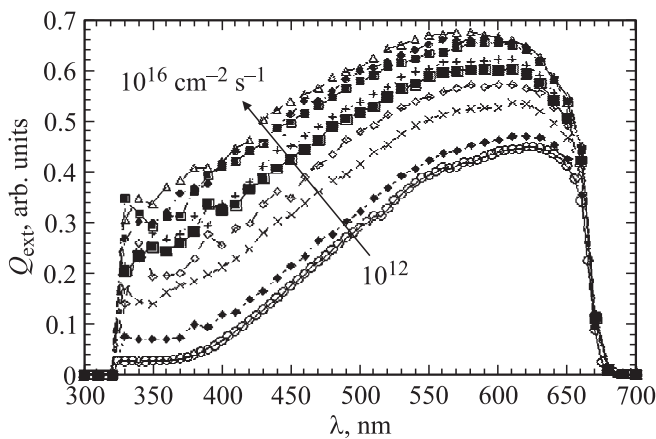


Рис. 4. Экспериментальные спектры внешней квантовой эффективности при различных потоках внешней подсветки в диапазоне $10^{12} - 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

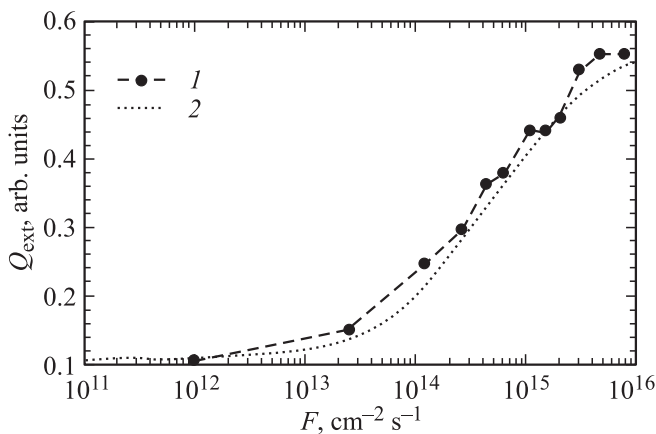


Рис. 5. Зависимости внешней квантовой эффективности от потока внешней подсветки: экспериментальная (1), расчетная для $D_{it} = 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$, $\tau = 1.25 \cdot 10^{-10} \text{ c}$, $\Delta E_c = 0.24 \text{ eV}$ (2).

области соответствует времени жизни ННЗ в слое $p\text{-GaInP}$ порядка $\tau = 1.25 \cdot 10^{-10} \text{ c}$ (рис. 3, а).

В области слабой интенсивности подсветки величина Q_{ext} определяется уровнем рекомбинации в приповерхностной области, который, применяя выражение для рекомбинации Шокли–Холл–Рида согласно [7], может быть выражен следующим образом:

$$U \approx c_n n \int_{E_1}^{E_2} D_{it}(E) dE, \quad (1)$$

где $E_2 = E_F^p$, $E_2 = E_i + (E_F^p \ll E_i) < k_B T \ln(c_p/c_n)$ и $c_n = v_n \sigma_n$; v_n — термическая скорость, σ_n — площадь сечения захвата, E_i — уровень Ферми в собственном $p\text{-GaInP}$, E_F^p — квазиуровень Ферми для дырок, k_B — постоянная Больцмана, n — концентрация электронов. Это выражение показывает, что уровень рекомбинации зависит от площади сечения захвата электронов, плотности поверхностных состояний и изгиба зон в $p\text{-GaInP}$,

обусловленного разрывом зон на гетерогранице. Зависимость от ΔE_c скрыта в концентрации электронов и пределах интегрирования. Таким образом, для оценки величины плотности поверхностных состояний, а точнее произведения $D_{it} \sigma_n$, необходимо знать значение ΔE_c .

Следует заметить, что приведенное однозначное деление на зоны чувствительности к рекомбинации в приповерхностной области и в объеме в зависимости от интенсивности внешней подсветки возможно главным образом благодаря особенности исследуемой структуры — большой толщине слоя эмиттера.

На рис. 5 построена расчетная зависимость Q_{ext} от потока подсветки, используя рекомендованное в [17] значение $\Delta E_c = 0.24 \text{ eV}$, величин $\tau = 1.25 \cdot 10^{-10} \text{ c}$ и $D_{it} \approx 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Расчетная кривая в достаточной мере хорошо описывает экспериментальные данные, что позволяет провести оценку D_{it} исследуемых структур. Однако, согласно литературным данным, существует достаточно большой разброс значений ΔE_c , которые находятся в диапазоне от 0.17 до 0.36 эВ [16]. Эти величины можно использовать в качестве оценки предельных значений D_{it} , которые при $\sigma_n = 10^{-14} \text{ cm}^2$ находятся в пределах $10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Разброс значений ΔE_c может быть связан не только с достоверностью определения этой величины различными методами, но еще с тем фактом, что значение запрещенной зоны в GaInP зависит от степени упорядочения атомов Ga и In в подрешетке атомов III группы и может находиться в диапазоне 1.8–1.9 эВ [18]. Таким образом, для более достоверной оценки величины D_{it} на границе $p\text{-AlInP}/p\text{-GaInP}$ необходимо независимое определение значения ΔE_c для слоев, выращенных в идентичных условиях.

5. Заключение

Проведены исследования зонной структуры и свойств границы раздела в солнечных элементах на основе AlInP/GaInP-гетероструктур. Показана возможность изменения изгиба зон в приповерхностной области за счет вариации потока внешней подсветки. Продемонстрированный эффект позволяет выделить вклад рекомбинационной составляющей, связанной с рекомбинацией в приповерхностной области, и составляющей, связанной с рекомбинацией в объеме слоев. На данном эффекте была разработана методика по оценке величин времени жизни неосновных носителей заряда в слое $p\text{-GaInP}$ эмиттера и плотности поверхностных состояний на границе раздела широкозонное окно/эмиттер ($p\text{-AlInP}/p\text{-GaInP}$).

Проведенная оценка для времени жизни неосновных носителей заряда в эмиттере дает величину $\tau = 1.25 \cdot 10^{-10} \text{ c}$, а для плотности поверхностных состояний на границе $p\text{-AlInP}/p\text{-GaInP}$, которая при $\Delta E_c = 0.24 \text{ eV}$ и $\sigma_n = 10^{-14} \text{ cm}^2$ дает величину D_{it} , равную $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Однако показано, что определяемое

произведение $D_{it}\sigma_n$ сильно зависит от значения разрыва зон проводимости на этой гетерогранице.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-08-01049-а.

Список литературы

- [1] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **21**, 1 (2013).
- [2] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. *ФТП*, **38** (8), 937 (2004).
- [3] 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, S.J. Pearton (Materials Research Society, Warrendale, 1999) p. 95.
- [4] A.S. Gudovskikh, N.A. Kaluzhnyi, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Thin Sol. Films*, **516**, 6739 (2008).
- [5] А.С. Гудовских, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **43**, 1403 (2009).
- [6] J.M. Olson, R.K. Ahrenkiel, D.J. Dunlavy, B. Keyes, A.E. Kibbler. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1208 (1989).
- [7] M.D. Dawson, G. Duggan. *Phys. Rev. B*, **47**, 12 598 (1993).
- [8] M.D. Dawson, S.P. Najda, A.H. Kean, G. Duggan, D.J. Mowbray, O.P. Kowalski, M.S. Skolnick, M. Hopkinson. *Phys. Rev. B*, **50**, 11 190 (1994).
- [9] Y. Ishitani et al. *J. Appl. Phys.*, **80**, 4592 (1996).
- [10] D. Vignaud, F. Mollot. *J. Appl. Phys.*, **93**, 384 (2003).
- [11] C.T.H.F. Liedenbaum et al. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2698 (1990).
- [12] O. Dehaese, X. Wallart, O. Schuler, F. Mollot. *J. Appl. Phys.*, **84**, 2127 (1998).
- [13] M.O. Watanabe, Y. Ohba. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 906 (1987).
- [14] Z.C. Huang, C. FL Wica, D.K. Johnstone, C.E. Stutz, K. FL Evans. *J. Appl. Phys.*, **73**, 4362 (1993).
- [15] A.S. Gudovskikh, J.P. Kleider, R. Chouffot, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, V.M. Lantratov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 165 307 (2009).
- [16] R. Stangl, M. Kreigel, M. Schmidt. *AFORS-HET. Proc. of the IEEE 4th World Conf. of Photovoltaic Energy Conversion* (Hawaii, USA, 2006) v. 2, p. 1350.
- [17] I. Vurgaftmana, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89** (11), 5815 (2001).
- [18] T. Suzuki, K. Kobayashi et al. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 673 (1987).

Редактор Т.А. Полянская

Study of GaInP solar cell interface properties by light intensity variable spectral response measurements

I.A. Morozov, A.S. Gudovskikh

Saint-Petersburg Academic University —
Nanotechnology Research and Education Centre
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The investigations of the band structure and properties of the interface in solar cells based on GaInP/AlInP heterostructures are presented. Demonstrated the effect of changes in the band structure at the interface p -AlInP wideband window p -GaInP emitter under the influence of radiation, resulting when the spectral characteristics of solar cells based on GaInP depends on the intensity of radiation. A new method to assess the value of the lifetime of minority carriers in a layer of p -GaInP emitter and the density of surface states at the interface of wide-window/emitter (p -AlInP/ p -GaInP) on the basis of the observed effect. It is shown that the density of surface states on the p -AlInP/ p -GaInP is in the range $10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$.