

## Моделирование характеристик фотопреобразователей лазерного излучения InGaAs/InP

© В.М. Емельянов, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц

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

E-mail: resso2003@bk.ru

(Получена 16 апреля 2015 г. Принята к печати 20 апреля 2015 г.)

Методом математического моделирования проведен анализ достижимых значений эффективности фотоэлектрического преобразования лазерного излучения с длиной волны 1.3 и 1.55 мкм в гетероструктурах  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  с вводом излучения со стороны подложки  $n\text{-InP}$ . Исследовано влияние параметров гетероструктуры  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  и конструкции фотопреобразователя лазерного излучения на кпд. Проведено сравнение характеристик промоделированных фотопроизводителей  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  и фотопреобразователей на основе GaAs для длины волны 809 нм. Показано, что при мощностях излучения 2–6 Вт достижимы значения кпд 40% для длины волны 1.3 мкм и близкие к 50% для длины волны 1.55 мкм, однако при больших мощностях кпд заметно снижается. Установлено, что основным фактором, препятствующим достижению высокой эффективности преобразования излучения большой мощности, являются потери в подложке  $n\text{-InP}$ . Оценен оптимальный уровень легирования подложек  $n\text{-InP}$  для фотопреобразователей лазерного излучения различной мощности.

### 1. Введение

Передача энергии посредством мощного оптического излучения имеет различные инженерные приложения, включающие обеспечение электропитания робототехнических устройств [1,2], космических аппаратов [3–6] и телекоммуникационного оборудования [7–9]. При этом, в качестве среды передачи может использоваться либо открытое пространство, либо оптическое волокно. Достоинства оптического метода энергоснабжения заключаются в обеспечении идеальной гальванической развязки между генератором и потребителем энергии, устойчивости к электромагнитным помехам в радиодиапазоне, а также отсутствие помех, создаваемых линиями передачи.

Электропитание телекоммуникационного оборудования требует создания достаточно мощных (от единиц до сотен ватт) источников и приемников излучения, обеспечивающих при этом высокий кпд преобразования энергии. Для этой цели в качестве источников могут применяться мощные полупроводниковые и твердотельные лазеры, а в качестве приемников — фотоэлектрические преобразователи (ФП) лазерного излучения (ЛИ). При этом необходимо учитывать, что приемлемый кпд и долговечность системы электропитания, использующей в качестве среды передачи оптическое волокно, могут быть обеспечены только при передаче излучения в пределах окон прозрачности волокна. Для широко используемого в оптоволоконных системах кварцевого волокна такие окна находятся вблизи следующих длин волн излучения: 0.8–1.0 (первое окно), 1.3 (второе окно) и 1.55 мкм (третье окно).

Значения кпд 50% были достигнуты для ФП ЛИ на основе GaAs при преобразовании излучения с длиной волны 808–809 нм из первого окна прозрачности [10,11].

С увеличением длины волны излучения предельно достижимый кпд ФП уменьшается, однако также уменьшаются потери в оптическом волокне. Для второго и третьего окон прозрачности они составляют 0.4 и 0.2 против 3 дБ/км для первого окна. По этой причине система, функционирующая на длинах волн 1.3 или 1.55 мкм, может иметь преимущество в случае использования протяженных оптических волноводов по сравнению с более коротковолновой.

При создании высокоэффективных ФП ЛИ для вышеуказанных длин волн перспективным материалом является  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ , согласованный по параметру решетки с подложкой InP [12–14]. Такие структуры могут быть получены методами жидкофазной или МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). Фосфид индия, являясь прозрачным в ближнем инфракрасном диапазоне, позволяет создавать структуры ФП ЛИ с вводом излучения через подложку. Значительная в сравнении с допустимой толщиной формируемых эпитаксиальными методами слоев толщина подложки (100–600 мкм) обеспечивает (при условии достаточной проводимости) низкое сопротивление относительно протекания латеральных токов в ней, что дает возможности обойтись в ФП ЛИ без контактной сетки на светопринимающей поверхности преобразователя. Это исключает потери на затенение, а также потери в самой контактной сетке, которые являются доминирующим видом омических потерь в ФП ЛИ большого размера. В то же время в таких структурах возможны существенные оптические потери вследствие поглощения излучения на свободных носителях при его прохождении через толстую подложку. Эти потери увеличиваются с ростом концентрации легирующей примеси в подложке, т.е. пропорциональны ее проводимости, и вынуждают искать баланс между

омическими потерями и потерями на поглощение излучения.

В настоящей работе ставилась задача моделирования характеристик ФП для длин волн излучения 1.3 и 1.55 мкм на основе структур InGaAs/InP, освещаемых со стороны подложки. Методом моделирования оценивалась оптимальная толщина фотоактивных слоев, достижимый КПД и мощность преобразуемого излучения в зависимости от размеров ФП ЛИ.

## 2. Структуры фотопреобразователей и математическая модель

Структуры ФП ЛИ, выбранные для моделирования, представлены на рис. 1. Ввод излучения осуществляется со стороны подложки *n*-InP, играющей роль широкозонного „окна“. Ближкое к нулевому отражение излучения в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм обеспечивается просветляющим двухслойным покрытием TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>. Роль тыльного потенциального барьера (ТПБ) играет слой *p*-InP. Полярность структуры выбиралась с учетом большей по сравнению с дырками подвижности электронов, что соответствует более высокой проводимости подложки при той же концентрации легирующей примеси. Передний контакт имел форму кольца и располагался по краю ФП ЛИ.

На выбранном типе подложек возможно формирование двух типов структур: со слабо (рис. 1, *a*) и сильно (рис. 1, *b*) легированным слоем *n*-InGaAs. В первом типе структуры поглощение большей части ЛИ обеспечивается в *n*-слое, так как высокий уровень легирования *p*-слоя не позволяет обеспечить высокий коэффициент собирания неосновных носителей заряда (ННЗ) из-за

<i>a</i>		<i>b</i>	
Front contact	TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ARC	Front contact	TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ARC
<i>n</i> <sup>++</sup> -InP	162/268 nm	<i>n</i> <sup>++</sup> -InP	162/268 nm
<i>n</i> -InP, 350 μm, (0.5–8) · 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	substrate	<i>n</i> -InP, 350 μm, (0.5–8) · 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>	substrate
<i>n</i> -InP "buffer"		<i>n</i> -InP "buffer"	
<i>n</i> -InGaAs, 0.4–4 μm, 1 · 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>		<i>n</i> -InGaAs, 0.4 μm, 1 · 10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>	
		<i>p</i> -InGaAs, 1–20 μm, 5 · 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>	
<i>p</i> -InGaAs, 1 μm, 1 · 10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>			
<i>p</i> -InP, 0.1 μm BSF		<i>p</i> -InP, 0.1 μm BSF	
Rear contact		Rear contact	

Рис. 1. Структуры ФП ЛИ

малого значения диффузионной длины для них. Во втором типе структуры, наоборот, основная доля фототока собирается из толстого слабо легированного *p*-слоя.

Моделирование характеристик ФП ЛИ осуществлялось с использованием трехмерной распределенной эквивалентной схемы, состоящей из описывающих участки *p*–*n*-перехода элементарных ячеек, соединенных между собой посредством омических сопротивлений [15]. Сопротивления в схеме использовались для моделирования омических потерь, наиболее существенными из которых являются потери из-за протекания латеральных токов в подложке со всей поверхности ФП ЛИ к кольцевому контакту. Алгоритм расчета эквивалентной схемы основывался на записи уравнения Пуассона для поля потенциалов с граничными условиями, заданными на элементарных участках *p*–*n*-перехода, и решении его методом последовательной верхней релаксации.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) *p*–*n*-перехода описывалась выражением

$$I(V) = I_{ph} - I_{inj} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_{rec} \left[ \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{shunt}}, \quad (1)$$

где  $I_{ph}$ ,  $I_{inj}$ ,  $I_{rec}$  — плотности фото-, инжекционного и рекомбинационного токов соответственно,  $R_{shunt}$  — шунтирующее сопротивление,  $q$  — элементарный заряд,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Внешний квантовый выход ФП ЛИ и значения плотностей токов в (1) рассчитывались путем решения системы диффузионно-дрейфовых уравнений для фотоактивных слоев [16]. Для вычисления плотностей инжекционного и рекомбинационного токов использовались следующие выражения [17]:

$$I_{inj} \approx qn_i^2 \left[ \frac{\sinh(w_n/L_p) + (S_n L_p/D_p) \cosh(w_n/L_p) D_p}{(S_n L_p/D_p) \sinh(w_n/L_p) + \cosh(w_n/L_p) N_d L_p} + \frac{\sinh(w_p/L_n) + (S_p L_n/D_n) \cosh(w_p/L_n) D_n}{(S_p L_n/D_n) \sinh(w_p/L_n) + \cosh(w_p/L_n) N_A L_n} \right], \quad (2)$$

$$I_{rec} \approx \frac{kT}{\varphi'} \frac{n_i}{\tau}, \quad (3)$$

где  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда,  $w_n$ ,  $w_p$  — толщины *n*- и *p*-областей соответственно,  $D_n$ ,  $L_n$  — коэффициенты диффузии и диффузионные длины неравновесных электронов в *p*-области,  $D_p$ ,  $L_p$  — коэффициенты диффузии и диффузионные длины неравновесных дырок в *n*-области,  $N_A$ ,  $N_d$  — концентрации акцепторов и доноров в *p*- и *n*-областях соответственно,  $S_n$ ,  $S_p$  — скорости рекомбинации на интерфейсах с широкозонным „окном“ и ТПБ;  $\varphi'$  — градиент потенциала в области пространственного заряда (ОПЗ) в точке максимума рекомбинации,  $\tau$  — среднее время жизни неравновесных носителей заряда в ОПЗ.

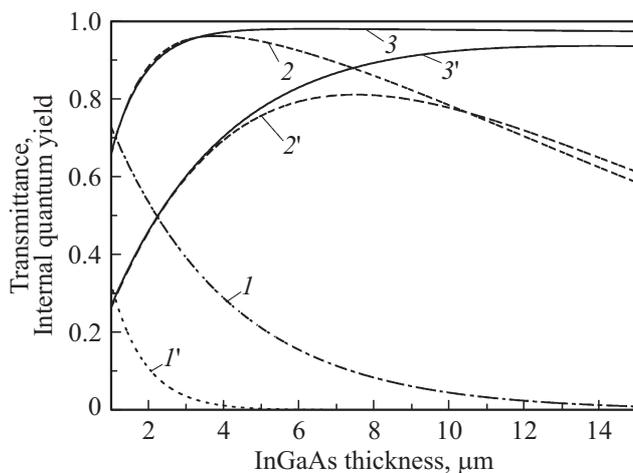
Расчетные значения коэффициентов диффузии и диффузионных длин ННЗ, использованные при моделировании

Уровень легирования мелкой примесью, $10^{17} \text{ см}^{-3}$	Слой $n\text{-InGa}$		Слой $p\text{-InGaAs}$	
	$D_p, \text{ см}^2/\text{с}$	$L_p, \text{ мкм}$	$D_n, \text{ см}^2/\text{с}$	$L_n, \text{ мкм}$
1	7.8	12.46	232.9	83.58
5	5.9	6.36	173.2	22.79
10	5.2	4.83	147.5	17.17
100	2.6	1.14	62.1	2.49

### 3. Результаты

С использованием описанной модели были рассчитаны зависимости значений внутреннего квантового выхода фотоответа (длины волн 1.3 и 1.55 мкм) от толщин фотоактивных слоев для двух вариантов структуры ФП ЛИ (см. рис. 1, *a, b*). Значения показателей поглощения и преломления, использованные при моделировании, соответствовали [18,19]. Коэффициенты диффузии и диффузионные длины ННЗ для  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  были рассчитаны на основании данных о подвижности [20,21], временах жизни носителей заряда [22] и приведены в таблице. Скорости рекомбинации на гетероинтерфейсах считались не превосходящими 100 см/с. При моделировании толщины сильно легированных слоев полагались постоянными и составляли 1 и 0.4 мкм для случаев  $p$ - и  $n$ -областей соответственно. Оставшаяся толщина области InGaAs приходилась на слабо легированные слои.

На рис. 2 представлены результаты моделирования внутреннего квантового выхода. Видно, что близкое к полному поглощение излучения с длиной волны 1.3 мкм достигается при суммарной толщине InGaAs



**Рис. 2.** Пропускание излучения ( $I, I'$ ) и внутренний квантовый выход фотоответа для структур ФП ЛИ, представленных на рис. 1, *a* (2,  $2'$ ) и *b* (3,  $3'$ ), в зависимости от суммарной толщины фотоактивных слоев InGaAs: (1, 2, 3) — длина волны 1.3 мкм;  $1', 2', 3'$  — длина волны 1.55 мкм.

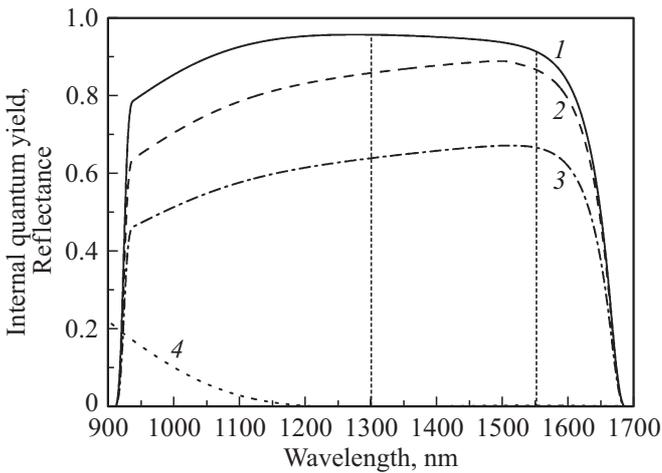
3–4 мкм, а излучения с длиной волны 1.55 мкм — при толщине  $> 10$  мкм. В свою очередь, более высокий квантовый выход наблюдается для структуры со слабо легированным  $p$ -слоем (см. рис. 1, *b*). Лучшие результаты обеспечивались при уровне легирования  $n$ -слоя  $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $p$ -слоя  $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а оптимальное значение суммарной толщины слоев InGaAs составляет 13.5 мкм. Расчетные значения плотностей темновых токов, полученные по формулам (2) и (3), для такой структуры составляют:  $I_{\text{inj}} = 5.5 \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$ ,  $I_{\text{rec}} \sim 10^{-8} \text{ А/см}^2$ . Анализ полученных значений показал, что при характерных для ФП на основе структур InGaAs/InP рабочих фототоках плотность рекомбинационного тока практически не оказывает влияния на форму ВАХ, а значения напряжения холостого хода в целом соответствуют известным экспериментальным результатам [12–14], хотя и незначительно превышают их.

Для структуры с сильно легированным  $p$ -слоем и слабо легированным  $n$ -слоем (см. рис. 1, *a*) может быть обеспечен высокий квантовый выход фотоответа только для длины волны 1.3 мкм.

При полном поглощении излучения с длиной волны 1.55 мкм (общая толщина фотоактивных слоев  $> 4$  мкм) достижимые диффузионные длины ННЗ не позволяют получить высокий коэффициент собирания ННЗ. Это объясняется гораздо более низким коэффициентом диффузии для неравновесных дырок в сравнении с неравновесными электронами. Возможным решением является одновременное уменьшение уровня легирования  $p$ -слоя до  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и увеличение его толщины до 9.5 мкм. Совместно с  $n$ -слоем толщиной 4 мкм при уровне его легирования  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  это создаст условия для полного поглощения ЛИ в InGaAs и обеспечит высокий квантовый выход фотоответа. Получаемая при этом величина внутреннего квантового выхода фотоответа будет практически совпадать с характерными для структуры на рис. 1, *b* значениями. Однако плотность инжекционного тока увеличится до  $I_{\text{inj}} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$ , что приведет к меньшему на  $\sim 15$  мВ рабочему напряжению.

Для исследования влияния уровня легирования подложки  $n\text{-InP}$  на характеристики ФП ЛИ были промоделированы значения внешнего квантового выхода фотоответа для структуры с суммарной толщиной фотоактивных слоев 13.5 мкм и сильно легированной  $n$ -областью (рис. 3). Используемый в расчетах коэффициент поглощения лазерного излучения на свободных носителях соответствовал работе [23]. При уровнях легирования до  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и толщине подложки 350 мкм поглощение на свободных носителях не приводит к заметному снижению внешнего квантового выхода фотоответа, однако уже при уровне  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  падение составляет 5–15% в зависимости от длины волны ЛИ. При уровне легирования  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  внешний квантовый выход снижается на 25–30%. К аналогичному эффекту приводит увеличение толщины подложки.

Для оценки предельно достижимого КПД преобразования ЛИ было осуществлено моделирование ВАХ

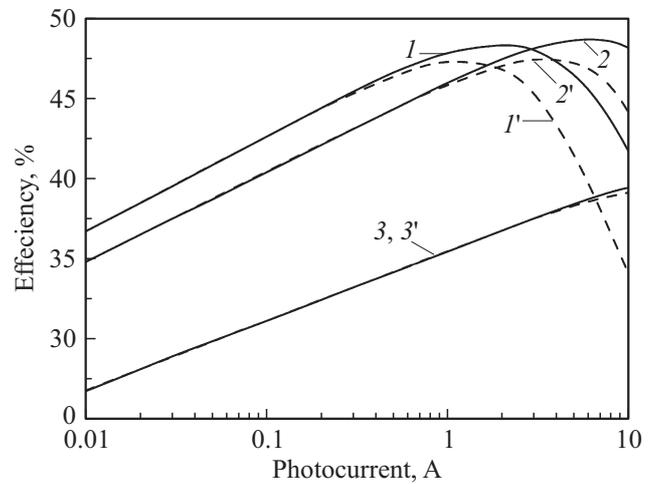


**Рис. 3.** Результаты расчета внешнего квантового выхода фотоответа на основе ФП ЛИ InGaAs/InP с сильно легированным *n*-InGaAs и слабо легированными *p*-InGaAs слоями (см. рис. 1, *b*) при оптимальных толщинах фотоактивных слоев (1–3), а также отражение от структуры (4). Уровень легирования подложки *n*-InP,  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ : 1 — 0.5, 2 — 2, 3 — 8.

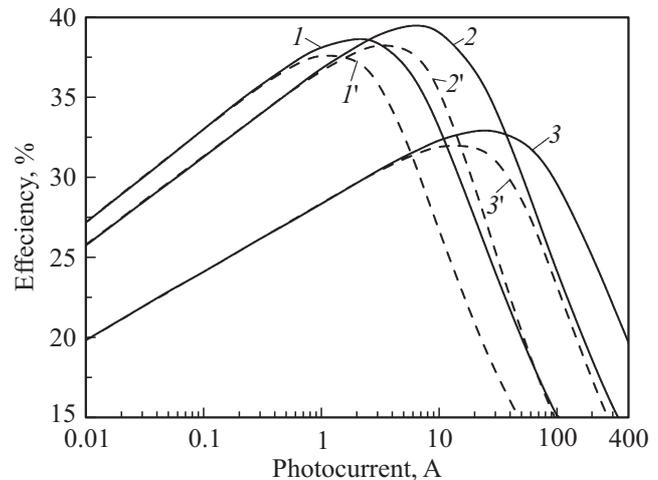
ФП. Анализ проводился для значения плотности инжекционного тока  $5.5 \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$ , соответствующего оптимальной структуре ФП ЛИ, и с учетом спектральных характеристик ФП (см. рис. 3). Расчет ВАХ производился вплоть до плотностей фототоков  $100 \text{ А/см}^2$ , при превышении которых проявляются эффекты высокого уровня возбуждения, ограничивающие кпд преобразования излучения [24], а также могут возникать сложности с обеспечением необходимого теплоотвода от ФП в реальных условиях эксплуатации. Удельные сопротивления подложек *n*-InP принимались равными  $8 \cdot 10^{-3}$ ,  $2.5 \cdot 10^{-3}$  и  $0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  для уровней легирования  $5 \cdot 10^{17}$ ,  $2 \cdot 10^{18}$  и  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно. В качестве вариантов распределения освещенности на поверхности ФП ЛИ рассматривались равномерное и гауссово распределения с концентрированием 99% оптической мощности в пределах открытой поверхности фотопреобразователя. Близкое к равномерному распределение характерно для лазерного излучения, прошедшего волоконно-оптическую линию и стандартные элементы вторичной оптики. Гауссово распределение характерно для одномодовых лазеров. Несмотря на то что на практике форма распределения освещенности может иметь гораздо более сложный вид, рассмотренные два крайних случая позволяют оценить влияние неравномерности освещенности на характеристики ФП ЛИ.

На рис. 4 и 5 представлены расчетные зависимости кпд ФП ЛИ размерами  $3 \times 3$  и  $20 \times 20$  мм от фототока для длины волны излучения 1.55 мкм. Зависимости для длины волны 1.3 мкм будут иметь такой же вид, но лежать ниже вследствие больших термализационных потерь. Большой кпд преобразования ЛИ обеспечивается фотопреобразователями меньшего размера при умерен-

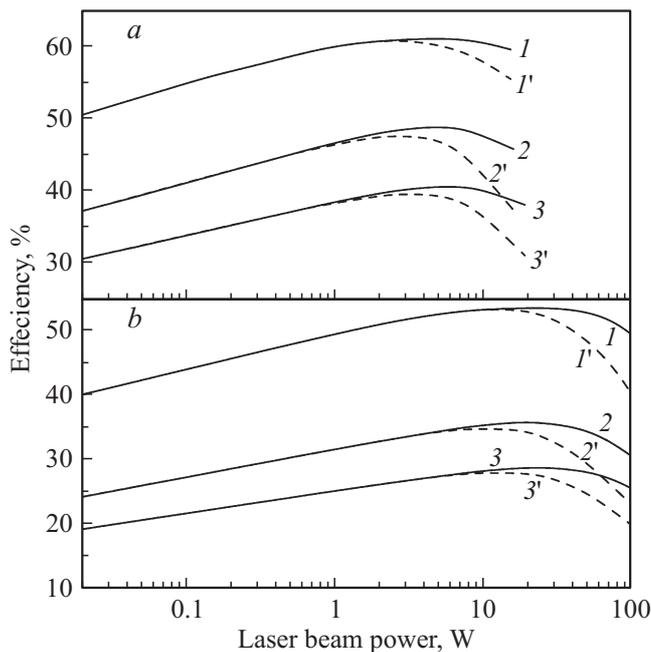
ном легировании подложки. При равномерном распределении освещенности максимум кпд составляет  $\sim 48.5\%$  для элемента размером  $3 \times 3$  мм и достигается при токах  $\sim 2$  и  $6.5 \text{ А}$  при использовании подложек с уровнем легирования  $5 \cdot 10^{17}$  и  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Для ФП ЛИ размером  $20 \times 20$  мм максимум кпд достигается при тех же токах и уровнях легирования, но составляет всего 38.5–39%. Переход от равномерного к гауссовому распределению освещенности при сохранении оптической мощности на ФП и соответственно величины генерируемого фототока приводит к падению кпд ФП на 2–2.5%. Несколько скомпенсировать негативное влияние гауссова распределения освещенности на кпд ФП можно, уменьшив оптическую мощность ЛИ.



**Рис. 4.** Эффективность (кпд) ФП ЛИ (см. рис. 1, *b*) размером  $3 \times 3$  мм при равномерном (1, 2, 3) и гауссовом (1', 2', 3') распределениях освещенности (длина волны ЛИ 1.55 мкм) в зависимости от уровня легирования подложки *n*-InP,  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ : 1, 1' — 0.5; 2, 2' — 2; 3, 3' — 8.



**Рис. 5.** Эффективность (кпд) ФП (см. рис. 1, *b*) размером  $20 \times 20$  мм при равномерном (1, 2, 3) и гауссовом (1', 2', 3') распределениях освещенности (длина волны ЛИ 1.55 мкм) в зависимости от уровня легирования подложки *n*-InP,  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ : 1, 1' — 0.5; 2, 2' — 2; 3, 3' — 8.



**Рис. 6.** Зависимости кпд оптимизированных ФП размера-ми  $3 \times 3$  мм (а) и  $10 \times 10$  мм (б) от мощности падающего ЛИ. 1, 1' — ФП ЛИ на основе GaAs, длина волны излучения 809 нм; 2, 2' — ФП ЛИ InGaAs/InP, длина волны излучения 1.55 мкм; 3, 3' — ФП ЛИ InGaAs/InP, длина волны излучения 1.3 мкм. (1, 2, 3) — равномерное распределение освещенности. (1', 2', 3') — гауссово распределение освещенности.

Так, потери по кпд не превысят 1%, если понизить фототок в 2 раза.

Повышение тока ФП до 10 А и выше за счет роста оптической мощности ЛИ приводит к быстрому падению кпд, особенно заметному в случае гауссова распределения освещенности. Увеличение уровня легирования подложки до  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  позволяет получить преимущество при токах  $> 20$  А для гауссова распределения освещенности и  $> 40$  А для равномерного. Однако достижимый кпд в этих случаях будет существенно уступать достигаемому при меньших токах.

С целью сравнения характеристик ФП ЛИ на основе InGaAs/InP (для длин волн 1.3 и 1.55 мкм) и ФП ЛИ на основе GaAs (для длины волны 809 нм) были рассчитаны зависимости кпд преобразования лазерного излучения от его мощности (рис. 6). Моделирование проводилось для ФП ЛИ, оптимизированных для мощностей излучения 5 и 50 Вт, при размерах ФП  $3 \times 3$  мм для меньшей и  $10 \times 10$  мм для большей мощности ЛИ.

Уровень легирования подложки *n*-InP ФП ЛИ InGaAs/InP составлял  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для преобразователя излучения мощностью 5 Вт и  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для ФП излучения мощностью 50 Вт.

Фотопреобразователи ЛИ на основе GaAs имели *n-p*-поляриность. Внешний квантовый выход фотоответа на длине волны 809 нм был равен 0.95. Плотности

темновых токов являлись типичными для данного типа фотопреобразователей, получаемых методом МОС-гидридной эпитаксии, и составляли  $I_{inj} = 8 \cdot 10^{-21} \text{ А/см}^2$  и  $I_{rec} = 6 \cdot 10^{-11} \text{ А/см}^2$ . Контактная сетка выполнялась из золота толщиной 2 мкм и имела двумерный рисунок. Для мощности излучения 5 Вт шаг контактных шин составлял 100 мкм, их ширина — 5 мкм, а для мощности 50 Вт — 50 и 7 мкм соответственно.

Зависимости кпд от мощности падающего излучения имеют в целом схожую форму для ФП ЛИ на основе GaAs и InGaAs/InP (см. рис. 6). При преобразовании излучения с длиной волны 1.55 мкм достижимым является кпд  $\sim 48\%$  при мощности 2–6 Вт. Для излучения с длиной волны 1.3 мкм кпд при этих мощностях не превышает 40% вследствие больших потерь на термализацию носителей. ФП ЛИ на основе GaAs (длины волны  $\sim 809$  нм) обеспечивают в этом же диапазоне мощностей кпд  $\sim 60\%$ .

Для ФП ЛИ большего размера при мощностях падающего излучения 10–50 Вт достижимы значения кпд 28–34% (длина волны 1.55 мкм) и 24–28% (длина волны 1.3 мкм) в зависимости от распределения освещенности на поверхности преобразователя. Для ФП ЛИ на основе GaAs (длина волны 809 нм) при тех же условиях облучения кпд составляет 47–52%.

Для ФП ЛИ InGaAs/InP с уровнем легирования слоев *n*- и *p*-InGaAs  $1 \cdot 10^{17}$  и  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при их толщине 4 и 9.5 мкм соответственно значения кпд во всех случаях будут приблизительно на 1.5% ниже.

#### 4. Заключение

Проведенное моделирование характеристик ФП на основе структур  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/InP}$  с вводом излучения со стороны подложки *n*-InP позволило определить достижимые значения кпд при преобразовании ЛИ с длинами волн 1.3 и 1.55 мкм. Показано, что структура, включающая тонкий сильно легированный слой *n*-InGaAs и толстый слабо легированный слой *p*-InGaAs, обладает большей эффективностью в сравнении со структурой, включающей слой слабо легированного *n*-InGaAs и сильно легированного *p*-InGaAs. При мощностях излучения 2–6 Вт ФП ЛИ InGaAs/InP обеспечивают кпд, близкий к 50% для длины волны 1.55 мкм и близкий к 40% для длины волны 1.3 мкм. Это открывает дополнительные возможности при проектировании и создании систем электропитания отдельных видов оборудования, использующих в качестве среды передачи энергии оптическое волокно и ФП ЛИ InGaAs/InP в качестве приемников.

Применение таких ФП ЛИ может быть актуально только для протяженных линий передачи энергии, когда низкие потери в волокне позволяют для сборки „лазер–волокно–ФП“ нивелировать разницу по кпд с системами на основе GaAs-ФП, изначально обеспечивающих кпд до 60% для длины волны 809 нм при схожих мощностях ЛИ.

Основным фактором, препятствующим достижению высокой эффективности преобразования излучения большой мощности, являются потери в подложке  $n$ -InP. В случае низкого легирования существенными становятся омические потери при протекании тока в латеральной плоскости по направлению к кольцевому контакту. Легирование же выше, чем  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , при толщине 350 мкм приводит к заметным потерям на поглощение излучения на свободных носителях. Аналогичные потери возникают и при увеличении толщины подложки. В зависимости от мощности лазерного излучения эти факторы в комплексе делают оптимальным выбор уровня легирования для подложек  $\sim (0.5-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При преобразовании излучения мощностью 20–50 Вт целесообразным оказывается использование подложек с более высоким уровнем легирования, однако, нарастающие потери на свободных носителях не позволяют получить КПД выше 28 и 34% для длин волн ЛИ 1.3 и 1.55 мкм соответственно, в то время как ФП на основе GaAs при таких мощностях ЛИ сохраняют КПД на уровне 50%.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (Соглашение № 14.604.21.0089 от 27 июня 2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60414X0089).

## Список литературы

- [24] G.A. Landis. *J. Propulsion Power*, **8** (1), 251 (1992).
- [2] J. Hecht. *New Scientist*, **207** (2777), 25 (2010).
- [3] F. Steinsiek, W.P. Foth, K.H. Weber, C. Schaefer, H.J. Foth. *Proc. 54th IAC* (Bremen, Germany, 2003) IAC-03-R.3.06.
- [4] G.A. Landis. *Proc. SPIE Optics, Electro-optics & Laser Conference* (Los Angeles CA, USA, 1994) v. 2121, p. 252.
- [5] M. Mori, H. Kagawa, Y. Saito. *Proc. Conf. Solar Power from Space '04* (Granada, Spain, 2004) v. 567, p. 3.
- [6] H. Suzuki, T. Fujita, M. Mori. *Proc. 57th IAC* (Valencia, Spain, 2006) IAC-06-C3.2.4.
- [7] M. Dumke, G. Heiserich, S. Franke, L. Schulz, L. Overmeyer. *J. Systemics Cybernetics. Informatics*, **8** (1), 55 (2010).
- [8] В.М. Андреев, Б.В. Егоров, А.М. Койнова, В.М. Лантратов, В.Д. Румянцев, ФТП, **20** (3), 435 (1986).
- [9] R. Pena, C. Algora. *Proc. 20th EU Conf. on PV Solar Energy* (Barcelona, Spain, 2005) p. 488.
- [10] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett. *Prog. in PV: Res. and Appl.*, **16** (4), 289 (2008).
- [11] V. Andreev, V. Khvostikov, V. Kalinovsky, V. Lantratov, V. Grilikhes, V. Rumyantsev, M. Shvarts, V. Fokanov, A. Pavlov. *Proc. 3rd World Conf. PV Energy Conv.* (Osaka, Japan, 2003) v. 1, p. 761.
- [12] Л.Б. Карлина, А.С. Власов, М.М. Кулагина, Н.Х. Тимошина. ФТП, **40** (3), 351 (2006).
- [13] Л.Б. Карлина, А.С. Власов, М.М. Кулагина, Е.П. Ракова, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. ФТП, **44** (2), 240 (2010).
- [14] N. Dharmarasu, M. Yamaguchi, A. Khan, T. Yamada, T. Tanabe, S. Takagishi, T. Takamoto, T. Ohshima, H. Itoh, M. Imaizumi, S. Matsuda. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (15), 2399 (2001).
- [15] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. *Proc. 25th EPSEC* (Valencia, Spain, 2010) p. 406.
- [16] V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina. *Proc. 23rd EPSEC* (Valencia, Spain, 2008) p. 375.
- [17] А.М. Васильев, А.П. Ландсман. *Полупроводниковые фотопреобразователи* (М., Сов. радио, 1971) с. 84, 221, 222.
- [18] S.S. Adachi. *Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors: Numerical Data and Graphical Information* (Kluwer Academic, Boston, 1999).
- [19] D.E. Aspnes, A.A. Studna. *Phys. Rev. B*, **27** (2), 985 (1983).
- [20] T.P. Pearsall, J.P. Hirtz. *J. Cryst. Growth*, **54** (1), 127 (1981).
- [21] T.P. Pearsall. *GaInAsP Alloy Semiconductors* (John Wiley and Sons, 1982).
- [22] C.H. Henry, R.A. Logan, F.R. Merritt, C.G. Bethea. *Electron. Lett.*, **20** (9), 358 (1984).
- [23] O.K. Kim, W.A. Bonner. *J. Electron. Mater.*, **12** (5), 827 (1983).
- [24] В.И. Корольков, В.С. Юферев. ФТП, **14** (6), 1064 (1980).

Редактор Л.В. Шаронова

## Simulation of characteristics of InGaAs/InP laser beam photoconverters

V.M. Emelyanov, S.V. Sorokina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts

Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Using mathematical model an analysis of achievable values of efficiency for photovoltaic laser beam conversion with wavelengths of 1.3 and 1.55  $\mu\text{m}$  in  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  heterostructures with a lead-in from the  $n$ -InP substrate has been carried out. Influence on the efficiency of the heterostructure parameters and construction of the  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  laser beam photoconverter was investigated. The calculated characteristics of the  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  photoconverters were compared with those of the GaAs-based photoconverters for the wavelength of 809 nm. It was established that at laser beam power values about 2–6 W the efficiency of 40% can be achieved for converting laser beam at the wavelength of 1.3  $\mu\text{m}$  and close to 50% at the wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ , but at higher powers efficiency considerably descends. It was estimated that the main factor limiting high efficiency at conversing high power laser beam radiation are the losses in the  $n$ -InP substrate. Optimal doping levels for  $n$ -InP substrates for different laser beam power values were evaluated.