

Моделирование омических потерь в фотопреобразователях лазерного излучения для длин волн 809 и 1064 нм

© В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, 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 6 апреля 2015 г. Принята к печати 6 апреля 2015 г.)

Методом математического моделирования исследовано влияние характеристик эпитаксиальной структуры и контактной сетки фотопреобразователей лазерного излучения на уровень омических потерь в них. Определены предельно достижимые значения КПД при гауссовом распределении освещенности на поверхности фотопреобразователя и при плотностях темновых токов $p-n$ -переходов, характерных для структур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Предложен подход к нахождению оптимальных параметров фотопреобразователей на основе GaAs и $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$ в зависимости от преобразуемой ими оптической мощности, и определены параметры структур для мощностей 5, 20, 50 Вт и длин волн 809, 1064 нм. Установлено, что при мощностях лазерного излучения до 5 Вт достижим КПД $> 60\%$ при преобразовании излучения с длиной волны 809 нм и $> 55\%$ при преобразовании излучения с длиной волны 1064 нм.

1. Введение

На протяжении последних нескольких десятилетий остается актуальной задача обеспечения электропитания различных приборов и устройств посредством преобразования мощного лазерного излучения (ЛИ). Существующие приложения включают передачу энергии к преобразователю в среде оптического волокна [1–3] и через открытое пространство [3–9].

Основными достоинствами лазерных систем электропитания являются:

- идеальная гальваническая развязка генератора и потребителя;
- отсутствие создаваемых помех в радиодиапазоне и собственная устойчивость к электромагнитным наводкам;
- обеспечение электропитания волоконно-оптической аппаратуры связи посредством того же кабеля, по которому осуществляется информационный обмен, без использования дополнительных медных проводников;
- возможность беспроводной передачи энергии на большие расстояния, что может быть использовано для энергоснабжения малогабаритных робототехнических устройств [4,5], а также при передаче энергии между космическими аппаратами или от космической энергостанции к потребителю, расположенному на поверхности планеты [6–9].

Возможные сферы применения систем передачи и преобразования энергии лазерного излучения требуют обеспечения оптической мощности от единиц ватт до сотен киловатт в непрерывном режиме при высоком КПД, что является значительной величиной как для лазеров, так и для полупроводниковых фотопреобразователей (ФП). На сегодняшний день достигнута мощность в 1 кВт для лазерных решеток на основе GaAs с длиной волны излучения 808–809 нм при КПД 55% и максимальном КПД в 62% [10]. В твердотельном Nd:YAG-лазере (длина

волны 1064 нм) КПД $> 58\%$ достигнут при мощности излучения 87 Вт [11]. Указанные длины волн лазерного излучения попадают в окна прозрачности атмосферы и кварцевого волокна, что делает такие лазеры перспективными для оптических систем передачи энергии. При этом стоит учитывать, что КПД системы на основе Nd:YAG-лазера будет ниже вследствие потерь в светоизлучающих диодах, используемых для накачки активной среды. В то же время Nd:YAG-лазер способен обеспечивать большую плотность мощности и малую расходимость луча без применения сложной вторичной оптики, что актуально для передачи энергии на большие расстояния через открытое пространство.

Наибольшие значения КПД среди преобразователей лазерного излучения в электрический ток достигнуты на структурах на основе GaAs и составляют $> 50\%$ [12,13]. Это тем не менее существенно меньше теоретического предела эффективности для ФП монохроматического излучения, составляющего 78% при плотности фототока 10 А/см^2 [13]. Одним из наиболее значимых факторов, ограничивающих КПД ФП, являются резистивные потери. Среди них существенную роль играют омические сопротивления переднего (фронтального) слоя и контактной сетки. В настоящей работе решалась задача модельного анализа омических потерь в ФП ЛИ для длин волн 809 и 1064 нм с целью выбора оптимальной эпитаксиальной структуры ФП и конструкции его контактной сетки.

2. Исследованные структуры и математическая модель

Для преобразования лазерного излучения с длиной волны 808–830 нм в электрический ток наиболее целесообразно использование ФП на основе GaAs, который имеет оптимальную ширину запрещенной зоны и для которого при современном развитии ростовых технологий

обеспечивается высокое качество фотоактивных слоев. Для излучения с длиной волны 1064 нм следует использовать метаморфные структуры $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ при доле индия $x = 0.22-0.24$. В таких материалах лазерное излучение практически полностью поглощается в слое толщиной до 3 мкм, из которого возможно эффективное собирание фотогенерированных носителей. В то же время вследствие близости энергии фотонов к ширине запрещенной зоны термализационные потери также являются приемлемыми. Технология МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) позволяет получать не только согласованные по параметру решетки, но и высококачественные метаморфные структуры (ширина запрещенной зоны до 1 эВ) с высокими квантовым выходом фототока и рабочим напряжением [14,15].

Структуры ФП ЛИ представлены на рис. 1. Для минимизации потерь на отражение было использовано двухслойное просветляющее покрытие. Полярность структур выбрана с учетом того, что подвижность электронов значительно превосходит подвижность дырок. Так как слои под контактной сеткой вносят основной вклад в последовательное сопротивление ФП из-за протекания в них латеральных токов, целесообразно иметь эмиттер и широкозонное „окно“, легированные донорной примесью. Основным отличием представленных структур от ФП солнечного излучения является наличие толстого широкозонного „окна“. В ФП солнечного излучения, как правило, используется сравнительно тонкое „окно“ для минимизации потерь на поглощение и отражение от его гетерограниц. Вследствие интерференционных эффектов

| a | | b | |
|---|---|---|--|
| Au front contact | TiO ₂ /SiO ₂ ARC 84/141 nm | Au front contact | TiO ₂ /SiO ₂ ARC 110/183 nm |
| n^{++} -GaAs | "window" | n^{++} -In _{0.24} GaAs | "window" |
| n -InGaP, 0.05–1 μm, $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ | | n -InGaP, LM, 0.05–1 μm, $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ | |
| n -GaAs, 0.1 μm, $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ | emitter | n -In _{0.24} Ga _{0.76} As, 0.1 μm, $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ | emitter |
| p -GaAs, 3.5 μm, $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ | base | p -GaAs, 3.5 μm, $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ | base |
| | | p -InGaP, 0.1 μm BSF | |
| | | n -In _{0.24} Ga _{0.76} As... GaAs, ~1 μm, buffer | |
| p -InGaP, 0.1 μm BSF | | | |
| p -GaAs | wafer | p -GaAs | wafer |
| Rear contact | | Rear contact | |

Рис. 1. Структуры промоделированных GaAs (a) и In_{0.24}Ga_{0.76}As (b) для длин волн ЛИ 809 и 1064 нм соответственно.

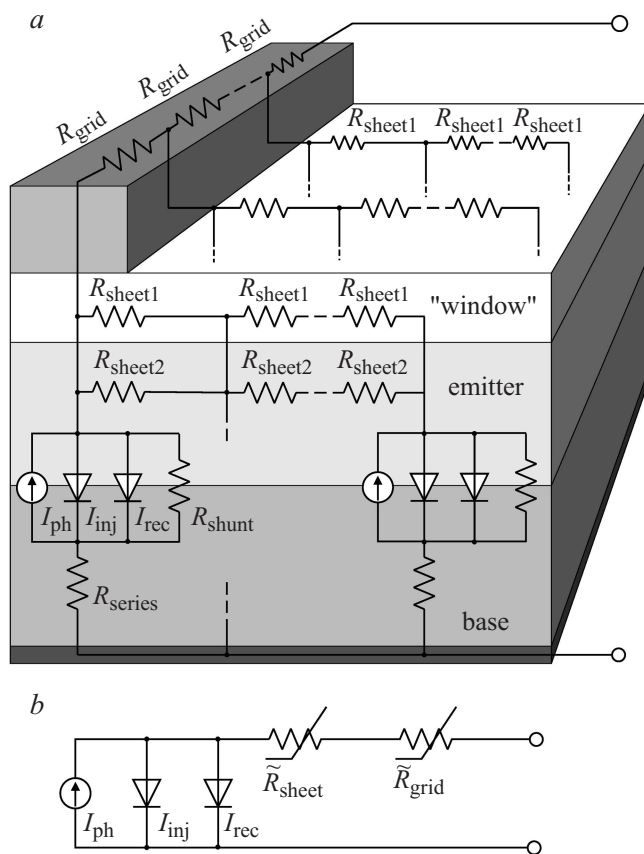


Рис. 2. Трехмерная (a) и упрощенная (b) электрические модели ФП ЛИ.

потери на отражение могут усиливаться, достигая 2% для пары InGaP/InGaAs. При большой толщине окна они имеют крайне сильную зависимость от длины волны из-за увеличения порядка интерференции, что исключает их устранение в широком спектральном диапазоне. В лазерных ФП материал и толщина окна могут быть подобраны по критерию минимизации потерь на отражение и поглощение для выбранной длины волны монохроматического излучения.

Для моделирования омических потерь в ФП использовалась трехмерная распределенная эквивалентная схема (рис. 2, a), схожая с предложенной в [12]. Схема учитывала омические сопротивления протеканиям латеральных токов в широкозонном „окне“, R_{sheet1} , эмиттере, R_{sheet2} , и контактной сетке, R_{grid} , а также последовательное сопротивление остальных слоев R_{series} . 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} — шун-

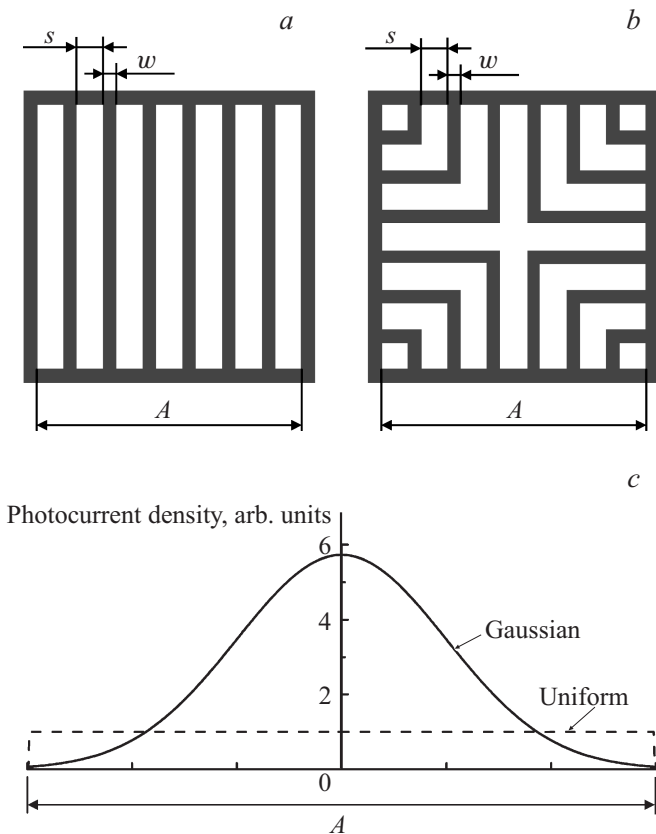


Рис. 3. Схема расположения контактных шин на сетках с одномерным (а) и двумерным (b) рисунком, а также соотношение плотностей фототока в различных точках ФП в случае гауссова и равномерного распределения освещенности в лазерном пучке (с).

тирующее сопротивление, q — элементарный заряд, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Алгоритм расчета основывался на записи уравнения Пуассона для поля потенциалов в эквивалентной схеме с граничными условиями, заданными на элементарных участках p – n -перехода, и решении его методом последовательной верхней релаксации [16].

Для анализа эффектов, связанных с омическими потерями, удобно помимо распределенной эквивалентной схемы использовать упрощенную схему, приведенную на рис. 2, b. В ней отсутствует шунтирующее сопротивление, так как его вклад мал при высоких плотностях тока, характерных для работы лазерных ФП. Омические потери учитываются двумя доминирующими компонентами: характеристическим сопротивлением переднего слоя \tilde{R}_{sheet} и характеристическим сопротивлением контактной сетки \tilde{R}_{grid} .

Значения характеристических сопротивлений определяются конструкцией ФП. Для задач преобразования лазерного излучения используются ФП квадратной или круглой формы с одномерной или двумерной структурой контактной сетки (рис. 3, a, b). Контактные сетки могут иметь постоянный или переменный шаг. Освещенность

поверхности лазерного ФП в большинстве случаев является существенно неравномерной — например, имеет форму, близкую к гауссоиду, что характерно для одномодовых лазеров, а также для изображения, формируемого оптическими концентраторами [17]. Для такой формы освещенность в центре ФП может более чем в 5 раз превышать усредненную по площади, на которой собирается 99% лазерного излучения. Для этих условий контактная сетка с переменным шагом обеспечивает меньшее затенение (по сравнению с сеткой с постоянным шагом) при том же уровне омических потерь, создавая условия для достижения более высоких КПД ФП. Однако, учитывая, что уменьшение затенения за счет более редкой сетки возможно только в областях, где освещенность мала, выигрыш в КПД ФП получается незначительным. В то же время характеристики ФП начинают сильно зависеть от формы распределения освещенности на их поверхности. По этим причинам предпочтительнее использовать сетки с постоянным шагом.

Характеристическое сопротивление переднего слоя для ФП квадратной формы и постоянного шага контактной сетки (см. рис. 3, a, b) рассчитывается по формуле

$$\tilde{R}_{\text{sheet}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_{\text{win}}}{d_{\text{win}}} + \frac{\rho_{\text{em}}}{d_{\text{em}}} \right) \left(\frac{s}{A} \right)^2, \quad (2)$$

где ρ_{win} , ρ_{em} — удельные сопротивления широкозонного „окна“ и эмиттера, d_{win} , d_{em} — их толщины, s — шаг контактной сетки, A — размер ФП. Характеристическое сопротивление контактной сетки в этих же условиях может быть выражено формулой

$$\tilde{R}_{\text{grid}} = \frac{1}{\beta} \frac{\rho_{\text{grid}}}{d_{\text{grid}}} \frac{s}{w}, \quad (3)$$

где ρ_{grid} — удельное сопротивление материала сетки, d_{grid} , w — толщина и ширина контактных шин, β — коэффициент, равный 4 для сетки с линейным и 8 для сетки с двумерным рисунком (см. рис. 3, a, b).

При равномерной освещенности и малых фототоках падение напряжения на сетке и переднем слое может быть оценено следующим образом [18]:

$$\Delta V = (\tilde{R}_{\text{sheet}} + \tilde{R}_{\text{grid}}) / 3, \quad (4)$$

что совместно с (1) позволяет получить аналитическое выражение для ВАХ ФП.

В случае неравномерной освещенности или при больших фототоках омические потери в контактной сетке и переднем слое приобретают нелинейный характер, и ВАХ может быть корректно промоделирована только с использованием распределенной эквивалентной схемы. Тем не менее формулы (2)–(4) позволяют сделать вывод, что омические потери в переднем слое пропорциональны плотности фототока ФП и зависят, помимо латерального сопротивления эмиттера и широкозонного „окна“, от шага контактной сетки. В то же время потери в контактной сетке инвариантны к размерам ФП, зависят только от абсолютной величины фототока и относительного затенения (отношения w/s).

3. Результаты и их анализ

С использованием описанной трехмерной эквивалентной схемы было проведено моделирование омических потерь для ФП на основе GaAs и $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ при их освещении ЛИ с длиной волны 809 и 1064 нм.

Плотности инжекционного ($I_{\text{inj}} = 8 \cdot 10^{-21} \text{ A/cm}^2$) и рекомбинационного ($I_{\text{rec}} = 6 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$) токов для моделирования ФП на основе GaAs были определены по ВАХ преобразователей солнечного излучения, имеющих схожую структуру и изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии в ФТИ им. Иоффе.

Плотности темновых токов в $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ -ФП оценивались по данным для GaAs-ФП с учетом того, что при схожих толщинах фотоактивных слоев, уровнях легирования и сравнимых диффузионных длинах неосновных носителей заряда плотность инжекционного тока пропорциональна квадрату концентрации собственных носителей, $I_{\text{inj}} \propto (n_i)^2$, а рекомбинационного — его первой степени, $I_{\text{rec}} \propto n_i$ [18]. Полученные значения составили $I_{\text{inj}} = 4.6 \cdot 10^{-15} \text{ A/cm}^2$ и $I_{\text{rec}} = 4.5 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Распределение освещенности по поверхности ФП при расчетах считалось гауссовым (см. рис. 3, с). Следует отметить, что вследствие сложного модового состава ЛИ распределение освещенности на ФП может иметь и иной вид, тем не менее в общем случае предложенное упрощение позволяет учесть влияние эффектов, связанных с сильным неравномерным характером освещенности.

При моделировании ФП разбивались на 10 зон по каждой из двух координат. Внутри каждой зоны открытая поверхность ФП, с которой осуществляется сбор тока на контактную шину, также разбивалась на 5 участков. Полученная схема, включающая 500 элементарных ячеек, позволяла учитывать нелинейные омические потери при протекании латеральных токов как в контактной сетке, так и в переднем слое.

Моделирование осуществлялось вплоть до плотностей тока 100 A/cm^2 , при которых уже проявляются эффекты высоких уровней возбуждения, ограничивающие КПД преобразования излучения [19], а также возникают сложности с обеспечением необходимого теплоотвода от ФП.

На рис. 4 представлены результаты расчета КПД ФП (η_0) в зависимости от плотности фототока в отсутствие омических потерь, а также показана динамика относительного снижения КПД ФП при различных значениях удельного характеристического сопротивления переднего слоя. Внешний квантовый выход фотоответа при расчетах принимался равным единице. Для обоих типов ФП наблюдается монотонный рост КПД, значения которого в случае отсутствия потерь на сопротивлении сетки и переднего слоя превышают 70% для GaAs-ФП (длина волны ЛИ 809 нм) и 65% для $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ -ФП (длина волны ЛИ 1064 нм) при токах $> 10 \text{ A/cm}^2$. При таких плотностях фототока приемлемые потери на сопротивлении переднего слоя могут быть обеспечены при его удельном значении не более $10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

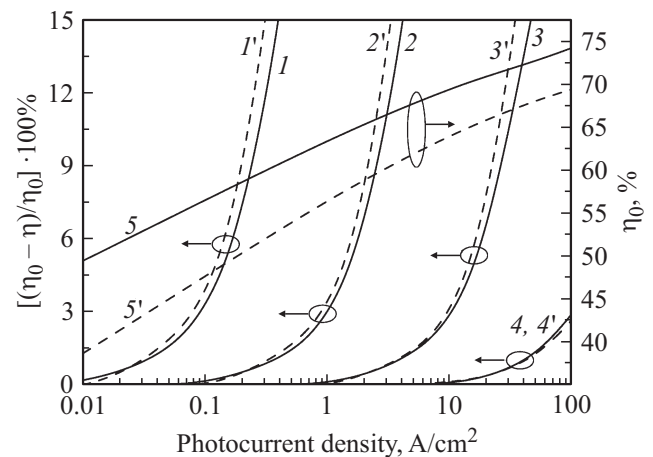


Рис. 4. Эффективность ФП в отсутствие омических потерь (η_0 — 5, 5') и динамика ее относительного снижения при их наличии (1–4, 1'–4') в зависимости от плотности фототока для различных значений удельного характеристического сопротивления переднего слоя $\bar{R}_{\text{sheet}} \text{ A}^2$, Ом: 1, 1' — 10^{-1} ; 2, 2' — 10^{-2} ; 3, 3' — 10^{-3} ; 4, 4' — 10^{-3} . (1–5) — GaAs-ФП (длина волны ЛИ 809 нм), (1'–5') — $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ -ФП (длина волны ЛИ 1064 нм).

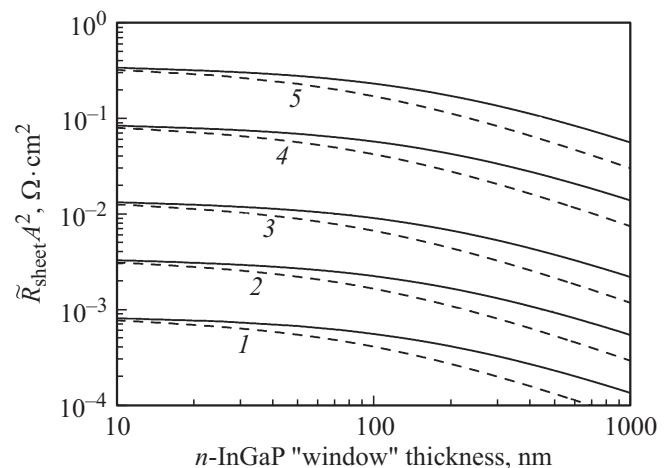


Рис. 5. Зависимости удельного характеристического сопротивления переднего слоя от толщины InGaP-„окна“ при различных значениях шага контактной сетки в ФП, мкм: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 500, 5 — 1000. Сплошные линии — GaAs-ФП (длина волны ЛИ 809 нм), штриховые линии — $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ -ФП (длина волны ЛИ 1064 нм).

Расчетные зависимости удельного сопротивления переднего слоя для различных шагов контактной сетки представлены на рис. 5. Исходные данные о подвижностях носителей заряда были взяты из работ [20–23]. Так как эмиттер обеспечивает достаточную проводимость, необходимое (не более $10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) значение характеристического сопротивления переднего слоя достигается при любых значениях толщины „окна“ при шаге контактной сетки 50 мкм во всем рассматриваемом диапазоне плотностей токов ($10\text{--}100 \text{ A/cm}^2$, см. рис. 4).

Параметры фотопреобразователей лазерного излучения, оптимизированных для различных значений мощности падающего излучения

| Параметр | Номер ФП | | | | | |
|---|----------|-------|---------|--|-------|---------|
| | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 |
| Материал фотоактивных слоев | GaAs | | | In _{0.24} Ga _{0.76} As | | |
| Длина волны преобразуемого излучения, нм | 809 | 809 | 809 | 1964 | 1064 | 1064 |
| Расчетная мощность преобразуемого излучения, Вт | 5 | 20 | 50 | 5 | 20 | 50 |
| Размер, мм | 3 × 3 | 7 × 7 | 10 × 10 | 3 × 3 | 7 × 7 | 10 × 10 |
| Ширина/шаг контактных шин, мкм | 5/100 | 4/50 | 7/50 | 6/100 | 6/50 | 10/50 |
| Расчетное затенение, % | 5 | 8 | 14 | 6 | 12 | 20 |
| Толщина широкозонного „окна“ n-InGaP, нм | 450 | 60 | 60 | 250 | 60 | 60 |

При шаге контактной сетки в 100 мкм необходимо включение в структуру широкозонного окна толщиной не менее 450 нм для GaAs-ФП и не менее 250 нм для In_{0.24}Ga_{0.76}As-ФП. Дальнейшее увеличение толщины окна до 1 мкм не позволяет обеспечить приемлемое удельное характеристическое сопротивление переднего слоя в ФП с шагом контактной сетки 200, 500 и 1000 мкм. Таким образом, в высокоэффективных ФП ЛИ большой мощности сетки с подобным шагом применять нецелесообразно.

Омические потери в контактной сетке с двумерным рисунком (см. рис. 3, б) были промоделированы для ФП различных размеров при токах от 0.01 до 100 А. В качестве материала контактной сетки рассматривалось осажденное гальваническим способом золото с удельным сопротивлением $2.3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Толщина покрытия полагалась равной 2 мкм, так как для контактной сетки с шириной шин 4–10 мкм (шаг 50–100 мкм) получение более толстых покрытий затруднительно.

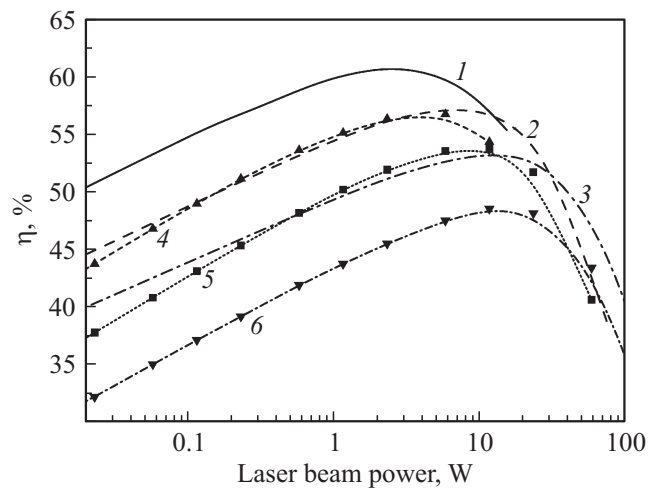


Рис. 7. Результаты моделирования зависимостей кпд (η) оптимизированных ФП от мощности падающего ЛИ: 1–6 соответствуют образцам ФП #1–6 в таблице.

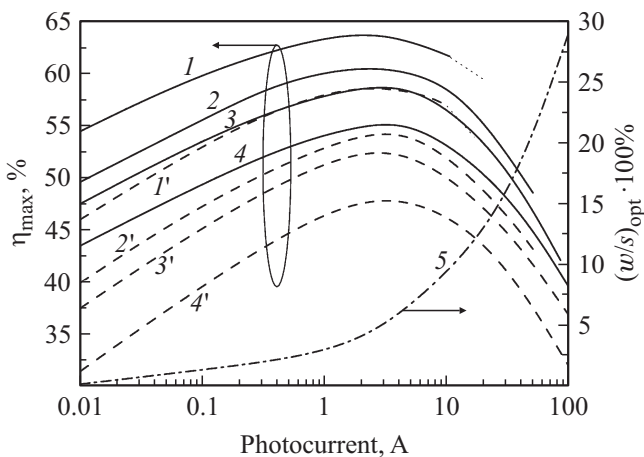


Рис. 6. Результаты моделирования зависимостей максимально достижимого кпд η_{max} от фототока ФП при наличии омических потерь в контактной сетке для длины волны лазерного излучения 809 нм (1–4), 1064 нм (1'–4') и оптимальное затенение $(w/s)_{opt}$, соответствующее максимуму кпд (5). Размеры ФП, мм: 1, 1' — 3 × 3; 2, 2' — 7 × 7; 3, 3' — 10 × 10; 4, 4' — 20 × 20.

Результаты моделирования, показывающие величину максимально достижимого кпд (η_{max}) в зависимости от фототока для ФП размерами 3 × 3, 7 × 7, 10 × 10 и 20 × 20 мм, представлены на рис. 6. Видно, что наибольший кпд наблюдается для всех конфигураций ФП при токах генерации $\sim (2-3)$ А, при этом ФП меньших размеров имели лучшие характеристики. Это объясняется инвариантностью характеристического сопротивления сетки и омических потерь на нем по отношению к размерам ФП, а также увеличением напряжения ФП с ростом фототока. Также следствием является то, что потери в контактной сетке оказываются основным фактором, ограничивающим эффективность ФП и не позволяющим достичь значений кпд, приведенных на рис. 4. Определено, что для ФП размером 3 × 3 мм при преобразовании ЛИ с длинами волн 809 и 1064 нм возможно достижение кпд 63.6% (ток 2.1 А) и 58.4% (ток 2.4 А) соответственно. В случае фотопреобразователей максимального размера (20 × 20 мм) предельные значения кпд составили 55.1% (GaAs-ФП, 809 нм, ток 3.1 А) и 47.8%

($\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ -ФП, 1064 нм, ток 3.2 А). Оптимальное затенение, при котором обеспечиваются максимальные значения КПД, не обнаруживало существенной зависимости от размера ФП и представлено на рис. 6 одной кривой.

Результаты моделирования, представленные на рис. 4–6, позволили установить оптимальные параметры ФП на основе GaAs и $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ при преобразовании ЛИ мощностью до 5, 20 и 50 Вт. Размер ФП выбирался с учетом ограничения по плотности фототока в 50 А/см². Внешний квантовый выход фотоответа в пересчете на открытую поверхность принимался 0.95, что экспериментально достижимо в исследованных структурах для рассматриваемых длин волн ЛИ. Полученные параметры ФП представлены в таблице, а соответствующие этим ФП расчетные зависимости КПД от мощности ЛИ представлены на рис. 7.

Среди оптимизированных преобразователей ЛИ наибольшим КПД обладает малоразмерный (3×3 мм) GaAs-ФП #1. При мощности падающего ЛИ в 2.5 Вт его КПД достигает 60.7%, а при 5 Вт — 60%. С ростом мощности ЛИ до 50 Вт при одновременном увеличении размера GaAs-ФП до 10×10 мм (ФП #3) предельный КПД сохраняется на достаточно высоком уровне в 48.3%.

Фотопреобразователи на основе $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ имеют значения КПД на 4–5% ниже в сравнении с GaAs-ФП аналогичных размеров при тех же мощностях ЛИ: наибольшее значение КПД в 56.6% получено для ФП размером 3×3 мм (ФП #4) при мощности падающего ЛИ ~ 5.7 Вт.

4. Заключение

Проведенный анализ эффективности ФП на основе GaAs и $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ для длин волн лазерного излучения 809 и 1064 нм показал, что омические потери в этих ФП являются фундаментальным фактором, ограничивающим КПД преобразования мощных потоков лазерного излучения. При этом, если омические потери в переднем слое ФП могут быть нивелированы за счет выбора рационального шага контактной сетки и толщины широкозонного „окна“, то потери в контактной сетке всегда будут ограничивать максимальную мощность фотопреобразователя.

При мощностях лазерного излучения < 5 Вт возможно получение КПД > 60% при длине волны 809 нм и > 55% при длине волны 1064 нм при структурном качестве эпитаксиальных слоев GaAs и $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$, достигаемом на сегодняшний день методом МОС-гидридной эпитаксии. При мощностях ЛИ > 50 Вт максимальный КПД GaAs-ФП не превышает 48.3%, а $\text{In}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ -ФП — 44%.

Более высокие значения КПД при преобразовании лазерного излучения высокой мощности могут быть получены в случае применения контактных сеток из серебра и при дальнейшем совершенствовании технологических процессов для повышения структурного

качества слоев ФП. В ФП на основе InGaAs-структур также некоторое увеличение КПД может быть достигнуто за счет уменьшения термализационных потерь при снижении доли индия до 0.22. Однако при этом из-за роста глубины поглощения излучения увеличиваются требования к структурному качеству слоев для обеспечения высокого внешнего квантового выхода фотоответа. Максимальный дополнительный прирост КПД в таких ФП может составлять ~ (1.5–2)%. При дальнейшем уменьшении доли индия (до 0.2) потребуется заметное увеличение толщины базы InGaAs-ФП с целью обеспечения близкого к полному поглощения лазерного излучения или применение брэгговского отражателя в структуре [24,25]. Оценки достижимых в таких структурах значений внешнего квантового выхода фотоответа и КПД требуют проведения дополнительных исследований.

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

- [1] M. Dumke, G. Heiserich, S. Franke, L. Schulz, L. Overmeyer. *J. Systemics, Cybernetics and Informatics*, **8** (1), 55 (2010).
- [2] В.М. Андреев, Б.В. Егоров, А.М. Койнова, В.М. Лантратов, В.Д. Румянцев. *ФТП*, **20** (3), 435 (1986).
- [3] R. Pena, C. Algora. *Proc. 20th EU Conf. on PV Solar Energy* (Barcelona, Spain, 2005) p. 488.
- [4] G.A. Landis. *J. Propulsion and Power*, **8** (1), 251 (1992).
- [5] J. Hecht. *New Scientist*, **207** (2777), 25 (2010).
- [6] F. Steinsiek, W.P. Foth, K.H. Weber, C. Schaefer, H.J. Foth. *Proc. 54th IAC* (Bremen, Germany, 2003) IAC-03-R.3.06.
- [7] G.A. Landis. *Proc. SPIE. Optics, Electro-optics & Laser Conference* (Los Angeles CA, USA, 1994) v. 2121, p. 252.
- [8] M. Mori, H. Kagawa, Y. Saito. *Proc. Conf. Solar Power from Space '04* (Granada, Spain, 2004) v. 567, p. 3.
- [9] H. Suzuki, T. Fujita, M. Mori. *Proc. 57th IAC* (Valencia, Spain, 2006) IAC-06-C3.2.4.
- [10] P.A. Crump, T.R. Crum, M. Devito, J. Farmer, M. Grimshaw, Z. Huang, S.A. Igl, S. Macomber, P. Thiagarajan, D. Wise. *Proc. SPIE High-Power Diode Laser Tech. and Appl. II* (2004) v. 5336, p. 144.
- [11] Li Fang-Qin, Zhang Xiao-Fu, Zong Nan, Yang Jing, Peng Qin-Jun, Cui Da-Fu, Xu Zu-Yan. *Chinese Phys. Lett.*, **26**, 114 206 (2009).
- [12] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **16** (4), 289 (2008).
- [13] V. Andreev, V. Khvostikov, V. Kalinovskiy, V. Lantratov, V. Grilikhes, V. Rumyantsev, M. Shvarts, V. Fokanov, A. Pavlov. *Proc. 3rd World Conf. on PV Energy Conv.* (Osaka, Japan, 2003) v. 1, p. 761.
- [14] P. Patel, D. Aiken, A. Boca, B. Cho, D. Chumney, M.B. Clevenger, A. Cornfeld, N. Fatemi, Y. Lin, J. McCarty, F. Newman, P. Sharps, J. Spann, M. Stan, J. Steinfeldt, C. Strautin, T. Varghese. *IEEE J. Photovoltaics*, **2** (3), 377 (2012).

- [15] M.W. Wanlass, S.P. Ahrenkiel, D.S. Albin, J.J. Carapella, A. Duda, K. Emery, J.F. Geisz, K. Jones, S. Kurtz, T. Moriarty, M.J. Romero. *Proc. Int. Conf. on Solar Conc. for the Generation of Electricity or Hydrogen* (Scottsdale, USA, 2005) NREL/CD-520-38172.
- [16] V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, V.M. Lantratov, O.I. Chosta, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina. *Proc. 27th EU PVSEC* (Frankfurt, Germany, 2012) p. 169.
- [17] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, A.A. Soluyanov, N.H. Timoshina, E.V. Vlasova, M.Z. Shvarts. *Proc. 22nd EPSEC* (Milan, Italy, 2007) p. 126.
- [18] А.М. Васильев, А.П. Ландсман. *Полупроводниковые фотопреобразователи* (М., Сов. радио, 1971) с. 83, 143, 222, 224.
- [19] В.И. Корольков, В.С. Юферев. *ФТП*, **14** (6), 1064 (1980).
- [20] T. Shitara, K. Eberl. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (3), 356 (1994).
- [21] H.M. Macksey, N. Holonyak Jr., R.D. Dupuis, J.C. Campbell, G.W. Zack. *J. Appl. Phys.*, **44** (3), 1333 (1973).
- [22] D. Chattopadhyay, S.K. Sutradhar, B.R. Nag. *J. Phys. C*, **14** (6), 891 (1981).
- [23] C. Hilsum. *Electron. Lett.*, **10**, 259 (1974).
- [24] M.Z. Shvarts, O.I. Chosta, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, V.M. Andreev. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **68**, 105 (2001).
- [25] В.М. Емельянов, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. *ФТП*, **44** (12), 1649 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

Simulation of ohmic losses in laser beam photoconverters for wavelengths of 809 and 1064 nm

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

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Using mathematical model influence of the characteristics of the epitaxial structure and contact grid of laser beam photoconverters on the ohmic losses in them has been studied. The highest possible values of the photoconverter efficiency at Gaussian distribution of laser beam intensity on the photoconverter surface and the dark current densities of $p-n$ junctions typical for structures grown by MOCVD technique were determined. An approach for estimation of optimal parameters of GaAs and $\text{In}_{0.24}\text{GaAs}/\text{GaAs}$ photoconverters depending on the converting optical power was introduced and parameters of the structures for power values of 5, 20 and 50 W at wavelengths of 809 and 1064 nm were determined. It was established that at laser beam power values lower than 5 W efficiency $> 60\%$ can be achieved for converting laser beam at the wavelength of 809 nm and $> 55\%$ at the wavelength of 1064 nm.