

Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения ($\lambda = 1550$ нм) на основе GaSb: метод получения и характеристики

© В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, Р.В. Левин, Б.В. Пушный, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев

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

E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

(Получена 17 февраля 2016 г. Принята к печати 25 февраля 2016 г.)

С применением эпитаксии из жидкой фазы, химического осаждения из паров металлоорганических соединений и диффузии из газовой фазы в подложку n -GaSb разработаны фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1550$ нм. Изготовлены и протестированы фотоэлементы площадью $S = 4, 12.2$ и 100 мм², проведено сравнение характеристик образцов, полученных различными технологическими методами. На лучших преобразователях ($S = 12.2$ мм²) значения монохроматической эффективности составили 38.7% при мощности лазерного излучения 1.4 Вт.

1. Введение

Перспективность разработок фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения (ФЭП ЛИ) с $\lambda = 1550$ нм определяется возможностью их использования в наземных системах беспроводной передачи энергии, а также для преобразования излучения, передаваемого по оптоволокну. Они могут найти применение и в малогабаритной электронике.

Из литературных источников известно о разработке ФЭП ЛИ для $\lambda = 1550$ нм на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ с эффективностью 34% [1] и фотоэлементов $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ с кпд $> 45\%$ [2–5]. Другим возможным материалом для создания преобразователей монохроматического излучения при данной длине волны является антимонид галлия, край поглощения которого соответствует ~ 1.7 мкм. При получении ФЭП ЛИ на основе GaSb может быть использован накопленный ранее опыт изготовления фотоэлементов с одним p – n -переходом, разработанных для солнечных батарей, термофотоэлектрических генераторов и получаемых как диффузией примеси в подложку [6–10], так и ростовыми методами — эпитаксией из паров металлоорганических соединений (МОГФЭ [8,11]) или жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ [12,13]). В зависимости от размера ФЭП ЛИ, их назначения и мощности лазерного излучения каждый из указанных технологических методов может проявить свои преимущества и ограничения.

2. Назначение фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения и выбор метода его изготовления

Для практического применения в системах беспроводной передачи энергии, в зависимости от расстояния между лазером и фотопреобразователем, а также плотности лазерного излучения, требуются ФЭП ЛИ разных раз-

меров. В частности, при передаче энергии на удаленные объекты нужны преобразователи наибольшей площади, что упростит фокусирование лазерного луча на его светочувствительной поверхности. Точность системы наведения будет определять суммарные оптические потери системы. С увеличением расстояния до объекта возрастает и расходимость лазерного луча. Для повышения конструктивной простоты системы и ее общей эффективности будут востребованы ФЭП ЛИ размером не менее 10×10 мм. Для их получения предпочтительны такие технологические методы, как диффузия из газовой фазы или МОГФЭ, дающие возможность формирования однородных по свойствам фотоэлементных структур на практически неограниченной площади. Применение ЖФЭ при изготовлении ФЭП ЛИ больших размеров менее перспективно в связи с особенностями метода: возможного наличия остатков расплава на поверхности фотоэлементных структур, неоднородности толщин слоев, ограничения габаритами ростовой кассеты размеров подложек и т.д.

Для различных потребительских и промышленных устройств, в бытовой электронике или при подводе излучения по оптоволокну будут успешно применяться малоразмерные фотоэлементы, где метод их получения не играет определяющей роли. При массовом изготовлении ФЭП ЛИ станут существенными экономические показатели, поэтому метод диффузии в подложку может оказаться наиболее удобным, рентабельным и производительным.

Для ряда применений ФЭП ЛИ, в частности модулей, установленных на борту космических аппаратов, особое значение приобретает кпд и возможность преобразования излучения высокой плотности. Максимальные монохроматические кпд достигаются с использованием технологий эпитаксиального выращивания. При увеличении плотности мощности падающего излучения размер ФЭП ЛИ должен уменьшаться, в противном случае будут расти омические потери. Для изготовления концентраторных преобразователей, характеризующих-

ся небольшой площадью, оба метода — МОГФЭ и ЖФЭ — являются конкурентоспособными. Жидкофазная эпитаксия в сравнении с МОГФЭ привлекательна невысокой себестоимостью технологического процесса, простотой оборудования и отсутствием токсичных соединений. Химическое осаждение из паров металлоорганических соединений, в свою очередь, дает возможность воспроизводимого получения наиболее сложных эпитаксиальных структур с минимальным разбросом параметров фотоэлементов, что особенно важно при согласовании преобразователей по напряжению или току при их сборке в модули.

3. Особенности изготовления и параметры фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения, полученных диффузией из газовой фазы

Наиболее простой способ получения однопереходного ФЭП ЛИ — диффузия примеси в подложку GaSb, которая проводилась в графитовых кассетах на установках ЖФЭ. Формирование эмиттера *p*-GaSb и углубление *p*-*n*-перехода в подконтактных областях осуществлялись двухстадийным легированием цинком из газовой фазы через пленки диэлектрика. Особенности технологических процессов описаны ранее в [13,14]. В случае диффузионных ФЭП ЛИ (и далее для образцов, полученных методами ЖФЭ и МОГФЭ) на фронтальной поверхности фотоэлементов наносились пленки ZnS/MgF₂.

Для преобразования излучения высокой и низкой интенсивности изготовлены и протестированы под Хе-лампой ФЭП ЛИ площадью $S = 4, 12.2$ и 100 мм² (рис. 1). Спектральная фоточувствительность (SR) при $\lambda = 1550$ нм составляла ~ 0.99 А/Вт. На лучших образцах ($S = 12.2$ мм²) достигнут кпд $\eta = 34.8\%$ при мощности лазерного излучения ~ 0.6 Вт (рис. 1). Мощность лазера оценивалась как I_{sc}/SR (I_{sc} — ток короткого замыкания). Более подробно характеристики диффузионных ФЭП ЛИ представлены в [14].

4. Параметры и особенности изготовления фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения эпитаксией из жидкой фазы

При диффузии примеси в подложку выходные характеристики ФЭП ЛИ и их воспроизводимость во многом определяются качеством исходного материала и его уровнем легирования. Другой вариант технологии изготовления преобразователей на основе GaSb — комбинирование эпитаксиального выращивания и диффузии — позволяет снизить влияние подложки на эффективность

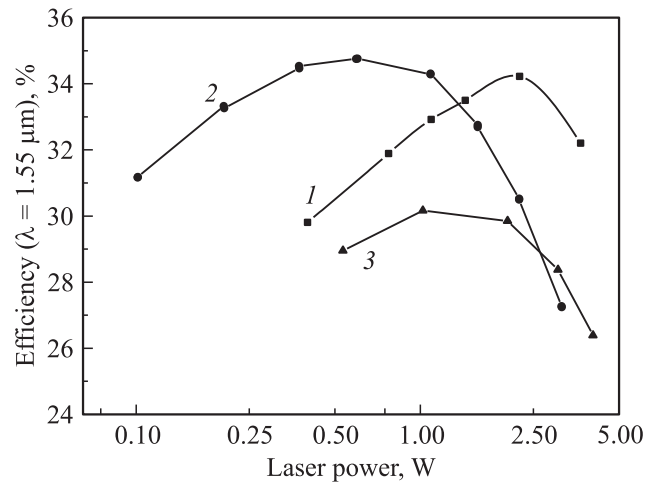


Рис. 1. Монохроматическая эффективность ($\lambda = 1550$ нм) преобразователя лазерного излучения при равномерной заливке: $S = 4$ мм² (1), 12.2 мм² (2), 100 мм² (3).

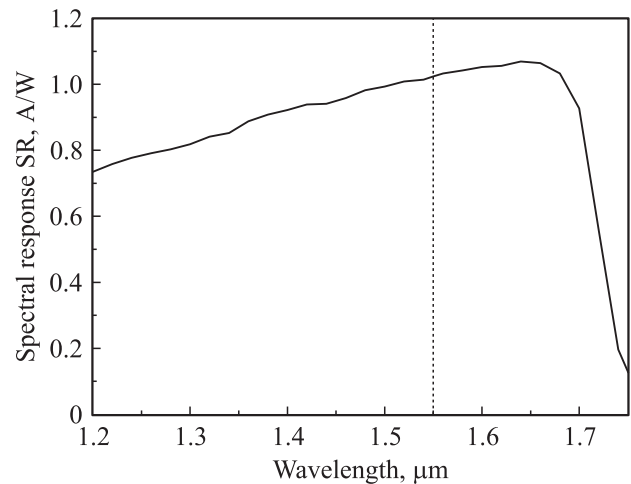


Рис. 2. Спектральная фоточувствительность (SR) ФЭП ЛИ, полученного комбинацией метода ЖФЭ и диффузии из газовой фазы.

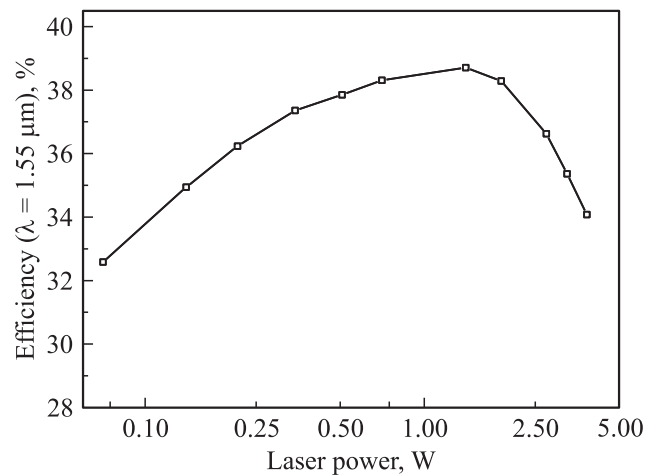


Рис. 3. Монохроматическая ($\lambda = 1550$ нм) эффективность преобразователя, полученного комбинацией метода ЖФЭ и диффузии из газовой фазы ($S = 12.2$ мм²).

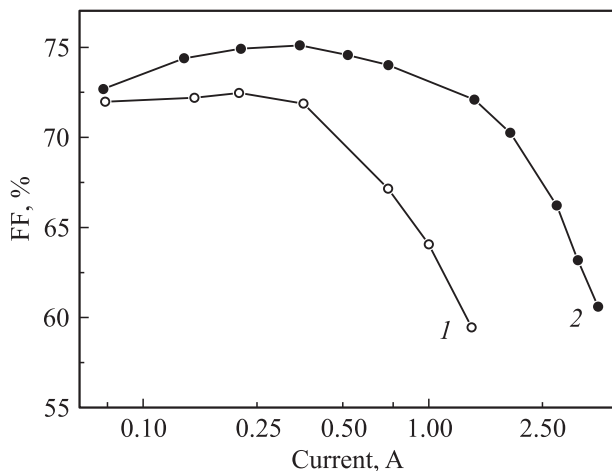


Рис. 4. Фактор заполнения вольт-амперной характеристики FF преобразователей: 1 — с буферным слоем и диффузионным $p-n$ -переходом, 2 — с дополнительным слоем n^+ -GaSb с тыльной стороны подложки ($S = 12.2 \text{ мм}^2$).

ФЭП ЛИ. Особенности выращивания приборных структур методом ЖФЭ посвящены работы [12,15]. Типичная спектральная чувствительность фотоэлемента показана на рис. 2. Характеристики фотоэлектрических преобразователей представлены на рис. 3, 4. При мощности лазерного излучения $\sim 1.4 \text{ Вт}$ получен кпд 38.7% (рис. 3).

Дополнительное осаждение высоколегированного слоя n^+ -GaSb с обратной стороны подложки облегчает формирование тыльного омического контакта, улучшает фактор заполнения вольт-амперной характеристики (FF) и позволяет сдвинуть максимум кпд в сторону больших токов. Сравнение FF фотоэлементов с одиночным буферным слоем и диффузионным $p-n$ -переходом (кривая 1) и преобразователей с двухсторонней структурой (кривая 2) иллюстрирует рис. 4.

5. Параметры и особенности изготовления фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения методом МОГФЭ

Выращивание гетероструктур ФЭП ЛИ методом МОГФЭ осуществлялось на установке AIXTRON AIX200 (Германия) с горизонтальным реактором. В ростовых экспериментах соотношение молярных потоков триметилсурьмы/триэтилгаллия (TMSb/TEGa) задавалось равным 2 при постоянном потоке газа-носителя (водорода) 5.5 л/мин. Увеличение соотношения молярных потоков приводило к ухудшению качества поверхности. Температура роста соответствовала 600°C . Давление в реакторе поддерживалось на уровне 76 мм.рт.ст. Особенности технологического процесса более подробно рассмотрены в [16,17].

Структура ФЭП ЛИ, полученного методом МОГФЭ, изображена на рис. 5. На подложке n -GaSb осаждался буферный слой и тыльный потенциальный барьер n^+ -GaSb. Наличие градиента концентрации акцепторной примеси в эмиттере p -GaSb создавало тянущее электрическое поле, что позволило увеличить вероятность собирания генерированных светом носителей тока. Широкозонное оптическое „окно“, снижающее скорость поверхностной рекомбинации, формировалось на основе четверного твердого раствора $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$.

Состав твердого раствора соответствовал $x = 0.82$, $y = 0.07$, ширина запрещенной зоны $E_g = 1.4 \text{ эВ}$. Материал окна не должен создавать на границе с эмиттером дополнительных дефектов. Высокое кристалли-

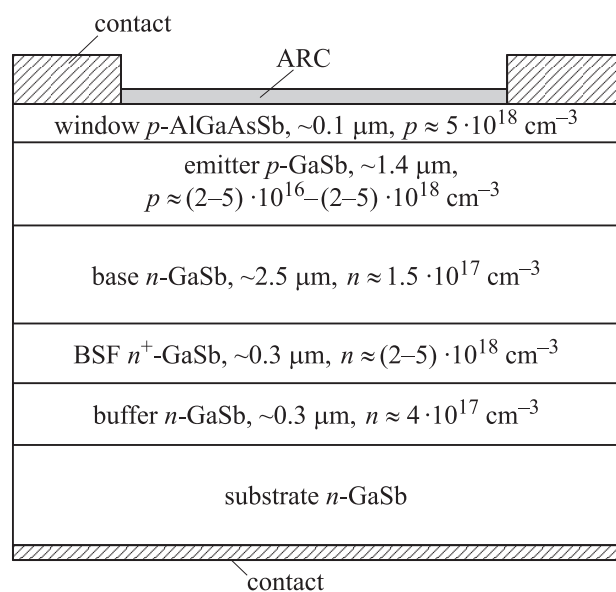


Рис. 5. Структура ФЭП ЛИ на основе GaSb, полученного методом МОГФЭ. ARC — антиотражающее покрытие (anti-reflection coating), BSF — тыльный потенциальный барьер (back surface field).

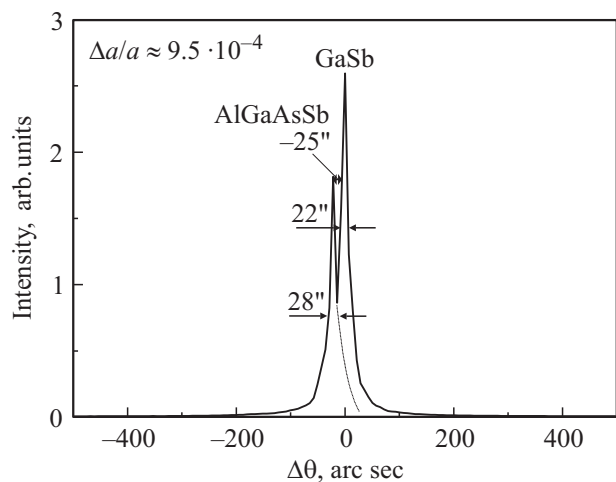


Рис. 6. Рентгенодифракционная кривая качения слоя $\text{Al}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ (толщина $d = 1 \text{ мкм}$), выращенного на подложке GaSb.

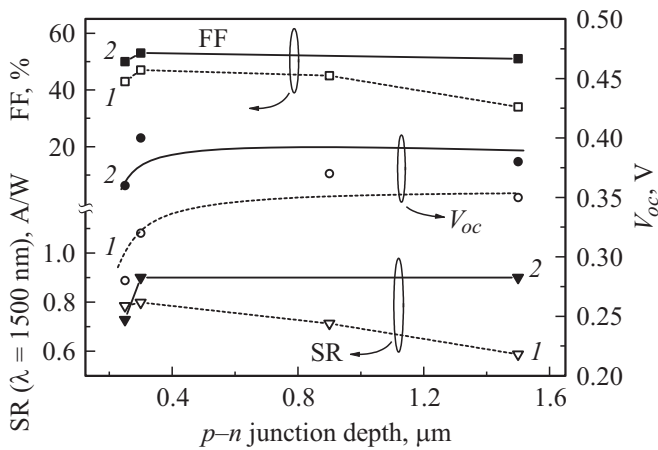


Рис. 7. Зависимость основных параметров ФЭП ЛИ от глубины залегания $p-n$ -перехода. 1 — для приборов без широкозонного окна; 2 — со слоем $\text{Al}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$.

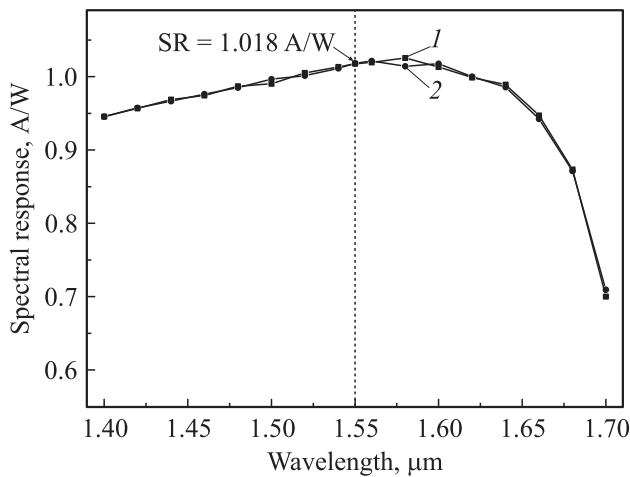


Рис. 8. Спектральная чувствительность ФЭП ЛИ площадью 6.25 мм^2 , осажженных на подложках $n\text{-GaSb}$: $n \sim (2-5) \cdot 10^{17}$ (1), $n \sim (0.5-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2).

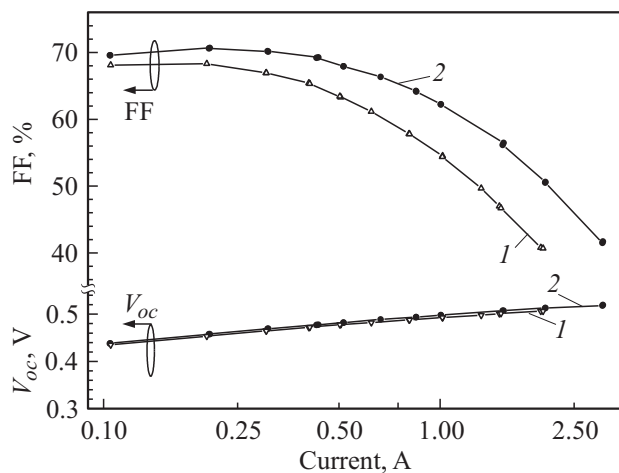


Рис. 9. Зависимости FF и V_{oc} от фототока для ФЭП ЛИ, осажженных на подложках $n\text{-GaSb}$: $n \sim (2-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (1), $n \sim (0.5-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2).

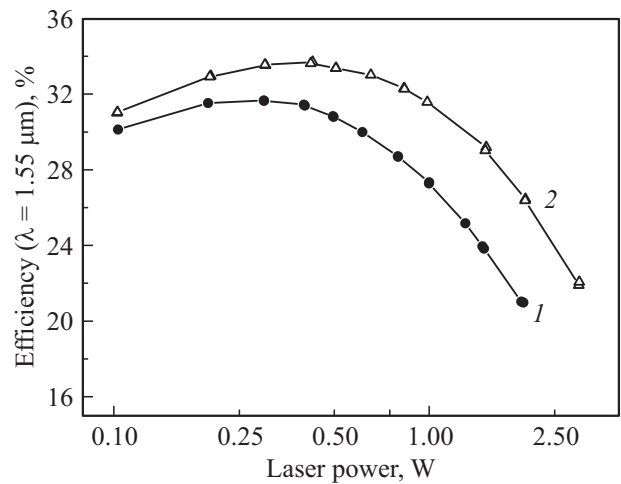


Рис. 10. Зависимость монохроматического ($\lambda = 1550$ нм) КПД фотоэлектрического преобразователя площадью 6.25 мм^2 от мощности лазерного излучения для ФЭП ЛИ, осажженных на подложках $n\text{-GaSb}$: $n \approx (2-5) \cdot 10^{17}$ (1), $(0.5-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

ческое совершенство осажженного твердого раствора $\text{Al}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ подтверждается близостью полуширин и интенсивностей пиков на рентгенодифракционной кривой качания (рис. 6) для эпитаксиального слоя и подложки. Рассогласование постоянных их кристаллических решеток $\Delta a/a$ не превышало 10^{-3} .

Влияние наличия/отсутствия слоя широкозонного оптического окна и глубины залегания $p-n$ -перехода на параметры ФЭП ЛИ показано на рис. 7. Как и следовало ожидать, осаждение твердого раствора $\text{Al}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ приводит за счет снижения поверхностной рекомбинации к росту спектральной чувствительности и, следовательно, к повышению КПД ФЭП ЛИ. Отсутствие жестких ограничений на малую толщину эмиттера $p\text{-GaSb}$ ($\sim 0.3 \text{ мкм}$), присущих солнечным элементам и диктуемых требованиями их радиационной стабильности, дает возможность повысить толщину до 1.5 мкм , избегая тем самым возможных утечек $p-n$ -перехода и повышая сопротивление растекания в слое. Толщина оптического окна в приборной структуре соответствовала 0.1 мкм .

Спектральная фоточувствительность ФЭП ЛИ показана на рис. 8. Рост приборных структур проводился на ориентированных в плоскости (100) пластинах $n\text{-GaSb}$ разной степени концентрации (кривые 1, 2). Повышение уровня легирования подложки с $n \sim (2-5) \cdot 10^{17}$ до $\sim (0.5-1) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ облегчает формирование низкоомного тыльного контакта и способствует увеличению фактора заполнения нагрузочной характеристики FF (рис. 9). При одинаковых спектрах фоточувствительности монохроматический ($\lambda = 1550$ нм) КПД преобразователей будет существенно различаться (рис. 10).

ФЭП ЛИ, полученные методом МОГФЭ, обладали высоким качеством эпитаксиальных слоев и, следовательно, высоким значением SR ($\lambda = 1550$ нм), но ха-

рактизовались недостаточными для получения максимальных КПД значениями FF и быстрым падением эффективности при увеличении интенсивности засветки. Дальнейшая оптимизация данных преобразователей (как и оптимизация ФЭП ЛИ, полученных диффузионным методом и методом ЖФЭ) будет связана со снижением омических потерь, в частности за счет замены контактных композиций Cr–Au на Ti–Pt–Ag [18,19] и увеличения суммарной толщины контакта от ~ 1 мкм до 3–5 мкм.

6. Заключение

Диффузионный метод создания ФЭП ЛИ на основе GaSb обеспечивает хорошее воспроизведение толщин и уровня легирования p – n -перехода. Он обладает малой материалоемкостью и высокой производительностью, поэтому может быть эффективно реализован как при получении ФЭП ЛИ больших площадей, так и в промышленных условиях при массовом производстве фотоэлементов. Достижение высоких значений КПД фотоэлементов, полученных данным методом, в значительной степени будут определяться качеством исходного материала подложек.

Комбинирование жидкофазной эпитаксии и диффузии цинка из газовой фазы позволяет воспроизводимо получать высокоэффективные ($> 38.5\%$) ФЭП ЛИ малых размеров широкого спектра применения, но несколько усложняет технологический цикл их изготовления.

При возбуждении излучением с $\lambda = 1550$ нм фотопреобразователи с широкозонным окном на основе $Al_{0.82}Ga_{0.18}As_{0.07}Sb_{0.93}$ ($E_g \sim 1.4$ эВ, толщина ~ 0.1 мкм), полученные методом МОГФЭ, имеют высокую спектральную чувствительность. Использование высоколегированных подложек n -GaSb ($n > 5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$) приводит к росту FF и КПД.

Работа выполнена при финансовой 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] S.J. Wojtczuk. *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.* (Anaheim, CA, USA, 1997) p. 971.
- [2] J. Mukherjee, S. Jarvis, M. Perren, S.J. Sweeney. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46** (26), 264006 (2013).
- [3] S.D. Jarvis, J. Mukherjee, M. Perren, S.J. Sweeney. *IET Optoelectron.*, **8** (2), 64 (2014).
- [4] S. Jarvis, J. Mukherjee, M. Perren, S.J. Sweeney. *Proc. 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Tampa, USA, 2013) p. 1031.
- [5] S.J. Sweeney, J. Mukherjee. *Laser power convertor*. British Patent Application (2012).
- [6] L.M. Fraas, J.E. Avery, J. Martin, V.S. Sundaram, G. Girard, V.T. Dinh, T.M. Davenport, J.W. Yerkes, M.J. O'Neill. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **37** (2), 443 (1990).
- [7] O.V. Sulima, A.W. Bett. *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, **66**, 533 (2001).
- [8] A.W. Bett, O.V. Sulima. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, S184 (2003).
- [9] S.V. Sorokina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts. *Proc. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Exh.* (Nice, France, 1995) p. 61.
- [10] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.R. Larionov, V.D. Rumyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts, V.I. Vasil'ev, A.S. Vlasov, O.I. Chosta. *Proc. 5th Eur. Space Power Conf.* (Tarragona, Spain, 1998) p. 527.
- [11] T. Schlegl, F. Dimroth, A. Ohm, A.W. Bett. *AIP Conf. Proc.*, **738**, 285 (2004).
- [12] V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova, P.Y. Gazaryan, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, A.V. Malevskaya, N.A. Kaluzhniy, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *ASME J. Solar Energy Eng.*, **129** (3), 291 (2007).
- [13] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **43** (5) 695 (2009).
- [14] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина. *ФТП*, **49** (7), 1104 (2015).
- [15] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, О.А. Хвостикова, А.С. Власов, Е.П. Ракова, В.М. Андреев. *ФТП*, **42** (10), 1198 (2008).
- [16] Р.В. Левин, А.С. Власов, Н.В. Зотова, Б.А. Матвеев, Б.В. Пушный, В.М. Андреев. *ФТП*, **40** (12), 1427 (2006).
- [17] S. Luca, J.L. Santaller, J. Rothman, J.P. Bell, C. Calvat, G. Basset, A. Passero, V.P. Khvostikov, N.S. Potapovich, R.V. Levin. *ASME J. Sol. Energy Eng.*, **129**, 304 (2007).
- [18] Ф.Ю. Солдатенков, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, Ю.М. Задиранов, М.Г. Растегаева, А.А. Усикова. *ФТП*, **45** (9), 1266 (2011).
- [19] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина. *ФТП*, **48** (9), 1280 (2014).

Редактор Л.В. Шаронова

GaSb laser power ($\lambda = 1550$ nm) converters: technological method of fabrication and features

V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, R.V. Levin, B.V. Pushnyi, N.Kh. Timoshina, V.M. Andreev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Using LPE, MOCVD and diffusion from the gas phase into the n -GaSb substrate, laser power converters with a 1550 nm wavelength have been developed. The cells of 4, 12.2 and 100 mm 2 in area have been fabricated and tested. The features of these cells produced by different methods are compared. The monochromatic efficiency is found to be up to 38.7% (for samples with $S = 12.2$ mm 2) at the laser power of 1.4 W.