

Исследование технологии изготовления мощных ИК (850 nm) светодиодов, получаемых методом переноса AlGaAs—GaAs-гетероструктуры на подложку-носитель

© А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Ф.Ю. Солдатенков, Р.В. Левин, Р.А. Салий, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Р. Ларионов, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 июня 2022 г.
В окончательной редакции 10 ноября 2022 г.
Принято к публикации 11 ноября 2022 г.

Проведена разработка технологии переноса AlGaAs/GaAs-гетероструктур, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии, на GaAs-подложку-носитель с использованием серебряносодержащей пасты или Au–In-компаунда. Исследован процесс формирования фронтального омического контакта к GaAs *n*-типа проводимости на основе контактных систем Au(Ge)/Ni/Au и Pd/Ge/Au с удельным переходным контактным сопротивлением $(2–5) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Выполнен анализ влияния технологии переноса гетероструктуры и процесса формирования фронтального омического контакта на параметры ИК светодиодов. Минимальное последовательное сопротивление светодиодов площадью 1 mm^2 составило 0.16Ω . Достигнуто значение оптической мощности 270 mW при токе 1.5 A.

Ключевые слова: AlGaAs/GaAs-гетероструктура, светодиод, перенос на подложку-носитель, Au–In-компаунд, омические контакты.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54078.166-22

Введение

Технология переноса гетероструктуры на подложку-носитель широко используется при изготовлении высокоэффективных светодиодов [1–5]. Данная технология обеспечивает возможность формирования тыльного металлического отражателя непосредственно на поверхности эпитаксиальных слоев, что позволяет уменьшить оптические потери излучения.

Высокоэффективные ИК (800–870 nm) светодиоды на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры изготавливаются методом МОС-гидридной эпитаксии с последующим формированием тыльного металлического отражателя, переносом гетероструктуры на подложку-носитель и удалением ростовой подложки. Тыльный отражатель, выполненный на основе зеркального слоя серебра, обеспечивает отражение более 90% генерируемого изотропного излучения. Снижение оптических потерь обеспечивает увеличение внешнего квантового выхода и оптической мощности в AlGaAs/GaAs ИК светодиодах с тыльным металлическим отражателем. Достигнутые значения оптической мощности в ИК светодиодах, изготовленных по описанной технологии, составили 60 mW [4] при токе 150 mA.

Исследование технологии переноса гетероструктуры на подложку-носитель имеет большое значение в технологии изготовления высокоэффективных светодиодов. Важным аспектом является соответствие коэффициента термического расширения слоев гетероструктуры и

подложки-носителя, что обеспечивает снижение степени деградации параметров прибора в ходе его изготовления и работы. Оптимальным вариантом является использование серебряносодержащей (Ag) пасты [4,5] или Au–In-компаунда [6,7] для монтажа гетероструктуры на GaAs-подложку-носитель.

В настоящей работе представлены исследования технологии формирования ИК светодиодов с использованием различных технологий переноса AlGaAs/GaAs-гетероструктуры на GaAs-подложку-носитель. Проведена также оценка влияния материалов омических контактов на параметры светодиодов.

1. Гетероструктура

AlGaAs/GaAs-гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии (см. таблицу). Активная область гетероструктуры включает 6 квантовых ям InGaAs, заключенных в обкладки *n*- и *p*-типа $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (при $x = 0.2–0.4$). Широкозонный высоколегированный слой $n\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной 4–6 μm обеспечивает растекание тока по фронтальной поверхности светодиода. Высоколегированные n^+ и p^+ GaAs-контактные слои обеспечивают низкое переходное контактное сопротивление при формировании фронтального и тыльного омических контактов. Стоп-слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ обладает высокой селективностью при травлении GaAs-подложки в аммиачно-перекисном травителе и в растворе на основе лимонной кислоты и перекиси водорода, что обеспечива-

Описание слоев AlGaAs/GaAs-гетероструктуры

Элементы гетероструктуры	Тип проводимости	Состав слоя
Контактный слой	p^+	GaAs
Переходный /барьерный слой	p	$Al_{0.2-0.4}Ga_{0.6-0.8}As$
Активный слой (6 пар квантовых ям)	–	InGaAs
	–	$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$
Барьерный слой /широкозонное окно	n	$Al_{0.2-0.4}Ga_{0.6-0.8}As$
Контактный слой	n^+	GaAs
Стоп-слой травления	–	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$
Подложка	n	GaAs

ет высокую надежность химического процесса удаления ростовой подложки.

2. Пост-ростовая технология переноса гетероструктуры на подложку-носитель

Пост-ростовая технология изготовления ИК светодиодов включает следующие операции:

- на поверхности гетероструктуры формируются точечные контакты диаметром $10 \mu m$ p -типа проводимости на основе слоев NiCr/Ag/Au (позиция 7 на рис. 1) с расстоянием между точечными контактами, равным $75 \mu m$;

- осаждается диэлектрическое покрытие в местах, свободных от точечных контактов на основе слоев TiO_x/SiO_2 или Si_3N_4 (позиция 8 на рис. 1);

- формируется сплошной тыльный отражатель (позиция 4 на рис. 1) на основе слоев NiCr (1 nm)/Ag/Au на поверхности диэлектрического покрытия;

- осуществляется перенос гетероструктуры на p -GaAs-подложку-носитель (с предварительно нанесенными двусторонними омическими контактами) с использованием Ag-пасты или Au–In-компаунда (позиция 5 на рис. 1);

- травливается n -GaAs-ростовая подложка в аммиачно-перекисном травителе до появления стоп-слоя $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ и в травителе на основе лимонной кислоты и перекиси водорода до полного удаления подложки;

- стоп-слой $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ травливается в горячей соляной кислоте до контактного слоя GaAs;

- проводится текстурирование световыводящей поверхности светодиода (позиция 2 на рис. 1);

- формируется фронтальное просветляющее покрытие на основе слоев TiO_x/SiO_2 или Si_3N_4 ;

- напыляется фронтальный полосковый омический контакт к GaAs-слою n -типа проводимости на основе Au(Ge)/Ni/Au или Pd/Ge/Au;

- проводится электрохимическое осаждение контактных материалов Ag/Ni/Au (позиция 1 на рис. 1);

- формируются меза-структуры светодиодов площадью $1 mm^2$.

Исследованы две технологии переноса гетероструктуры на p -GaAs-подложку-носитель: с использованием Ag-пасты и Au–In-компаунда.

Ag-паста наносится непосредственно на поверхность тыльного металлического отражателя (позиция 4 на рис. 1). Затем на поверхность пасты монтируется p -GaAs-подложка-носитель с предварительно сформированными двусторонними сплошными омическими контактами, и проводится термическая обработка смонтированной структуры при температуре $\sim 200^\circ C$.

Формирование Au–In-компаунда (позиция 5 на рис. 1) осуществляется в несколько этапов:

- на поверхность тыльного отражателя наносится слой Au толщиной $\sim 3 \mu m$;

- на p -GaAs-подложку-носитель с омическими контактами последовательно наносятся слои Au толщиной $\sim 1 \mu m$ и In толщиной $\sim 3 \mu m$ с адгезионным подслоем хрома и защитным слоем олова;

- проводится монтаж гетероструктуры с нанесенным слоем Au ($\sim 3 \mu m$) на подложку-носитель на слои Cr/In/Sn ($\sim 3 \mu m$);

- осуществляется термический отжиг (спекание) смонтированных структур в среде водорода при температуре $200^\circ C$ в течение 30 min.

При проведении термического отжига выше температуры плавления индия происходит диффузия индия в слои золота с образованием интерметаллического монокристаллического соединения Au–In, обеспечивающего надежный монтаж структур.

3. Характеристики тыльного зеркала на основе многослойной структуры NiCr(1 nm)/Ag/Au

При монтаже гетероструктуры на подложку-носитель с использованием Au–In-компаунда происходит расплавление индия и его диффузия в направлении подложки и в направлении тыльного металлического отражателя, что может привести к деградации параметров отражателя. Для оценки влияния технологии переноса гетероструктуры на коэффициент отражения от металлического отражателя на основе серебра выполнено следующее исследование. Непосредственно после термического отжига структур проведено локальное травление слоев AlGaAs/GaAs-гетероструктуры до открытия поверхности отражателя с последующим измерением его характеристик. Коэффициент отражения излучения от вскрытой поверхности отражателя составил 92–93%

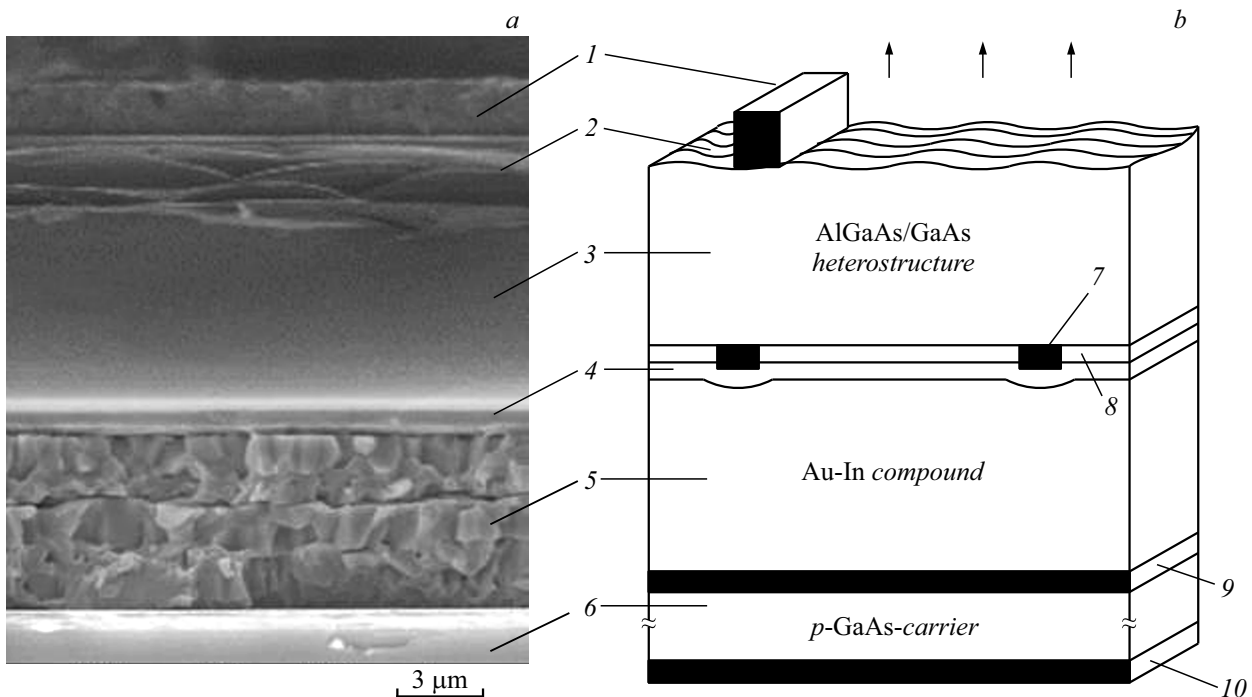


Рис. 1. *a* — фотография скола светодиодной гетероструктуры AlGaAs/GaAs после переноса на *p*-GaAs-подложку-носитель с использованием Au–In-компаунда; *b* — структура светодиода: 1 — фронтальный полосковый омический контакт, 2 — текстурированная поверхность световыводящего слоя, 3 — *n*-AlGaAs/GaAs-гетероструктура, 4 — тыльный серебряный отражатель, 5 — Au–In-компаунд, 6 — *p*-GaAs-подложка-носитель, 7 — тыльный точечный контакт к гетероструктуре, 8 — диэлектрическое покрытие из $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ или Si_3N_4 , 9, 10 — двусторонние омические контакты к *p*-GaAs-подложке-носителю.

при длине волны 750–850 nm, что полностью соответствует параметрам серебряного отражателя, полученным при его разработке [4].

4. Фронтальный полосковый омический контакт

Выполнено исследование влияния параметров фронтального металлического контакта к GaAs слою *n*-типа проводимости на характеристики ИК светодиодов.

Рассмотрено два варианта контактных систем: на основе слоев AuGe/Ni/Au и Pd/Ge/Au, обеспечивающие величину переходного контактного сопротивления $\sim 2\text{--}5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ [8–10] при температуре вжигания, составляющей 400°C для AuGe/Ni/Au и 185°C для Pd/Ge/Au. Использование высокотемпературного отжига гетероструктур после переноса на подложку-носитель приводит к возникновению дефектов из-за различия коэффициента термического расширения материалов AlGaAs/GaAs и Ag-пасты или Au–In-компаунда. Также возникает механическое напряжение на гетерогранице структуры с тыльным металлическим отражателем, что приводит к снижению коэффициента отражения излучения и, как следствие, к уменьшению эффективности прибора. Измерения параметров ИК светодиодов на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs показали существенное снижение выхода годных приборов после проведения

термического отжига при высокой температуре 400°C в течение 1 min.

Для оценки влияния материалов контактных систем проведены измерения последовательного сопротивления (R_s) приборов, включающего переходное сопротивление „тыльный контакт–полупроводник“, сопротивление полупроводниковой структуры и переходное сопротивление фронтального контакта. Перенос гетероструктуры на подложку-носитель осуществлялся с *p*-типа проводимости формировались на основе контактной структуры NiCr/Ag/Au с контактным переходным сопротивлением $\sim (6\text{--}9) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Единственное отличие в технологии изготовления приборов заключалось в выборе материалов фронтальных полосковых контактов к GaAs-слою *n*-типа проводимости.

Оценка последовательного контактного сопротивления светодиода выполнена путем измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) светодиодов (кривые 1 и 2, рис. 2) и аппроксимации идеализированной (при $R_s = 0 \Omega$) ВАХ (кривая 3). Результаты измерений показали, что у приборов с контактом Pd/Ge/Au сопротивление ниже и составляет $R_s = 0.16 \Omega$, в то время как у приборов с контактом Au(Ge)/Ni/Au $R_s = 0.21 \Omega$ при площади светодиодов 1 mm^2 . Таким образом, использование контактной системы Pd/Ge/Au обеспечивает увеличение выхода годных приборов и снижение их последовательного сопротивления.

5. Влияние технологии переноса на ВАХ и оптическую мощность ИК (850 нм) светодиодов

Технологии переноса AlGaAs/GaAs-гетероструктуры на GaAs-подложку-носитель с использованием Ag-пасты или Au-In-компаунда оказывают существенное влияние на эффективность работы полупроводниковых приборов.

Использование Ag-пасты не позволяет формировать монолитное соединение гетероструктуры и подложки-носителя, так как при спекании образуется пористая структура. Высокая химическая активность серебросодержащих паст усложняет пост-ростовой процесс изготовления прибора и не позволяет обеспечить стойкость прибора к воздействию параметров окружающей среды. В таких светодиодах имеет место значительное увеличение омических потерь при увеличении рабочего тока (кривая 4, рис. 2). Спекание гетероструктуры и подложки-носителя с использованием золота и индия ведет к образованию кристаллического интерметаллического соединения Au-In, что снижает последовательное сопротивление прибора и степень деградации параметров с ростом тока (кривые 1, 2, рис. 2).

Сравнение параметров ИК светодиодов, полученных с использованием Ag-пасты и Au-In-компаунда, осуществлялось до этапа формирования полусферического оптического элемента (рис. 3). Установлено, что существенное влияние на значения достигаемой оптической мощности светодиодов оказывает именно технология переноса гетероструктуры на подложку-носитель. Максимальная мощность излучения светодиодов, изготовленных с использованием Ag-пасты для переноса гетероструктуры на подложку-носитель, составила $P = 30 \text{ мВт}$

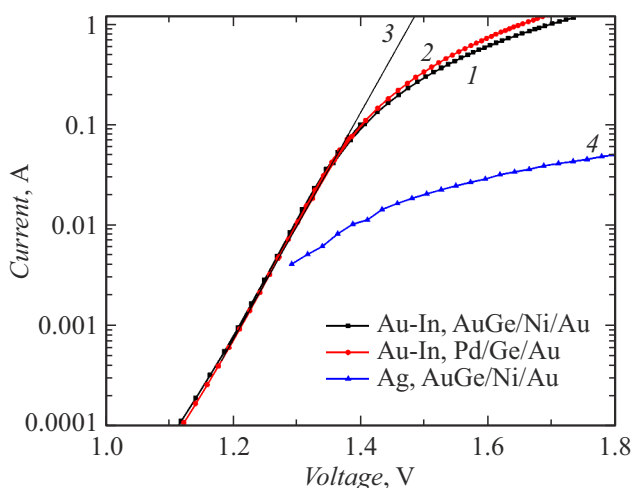


Рис. 2. ВАХ ИК (850 нм) светодиодов при переносе гетероструктуры на подложку-носитель с помощью Au-In-компаунда (кривые 1, 2) и Ag-пасты (кривая 4) с разными материалами фронтальных контактов к GaAs-слою *n*-типа проводимости: Au(Ge)/Ni/Au (кривые 1, 4) и Pd/Ge/Au (кривая 2); аппроксимация идеализированной ВАХ (кривая 3).

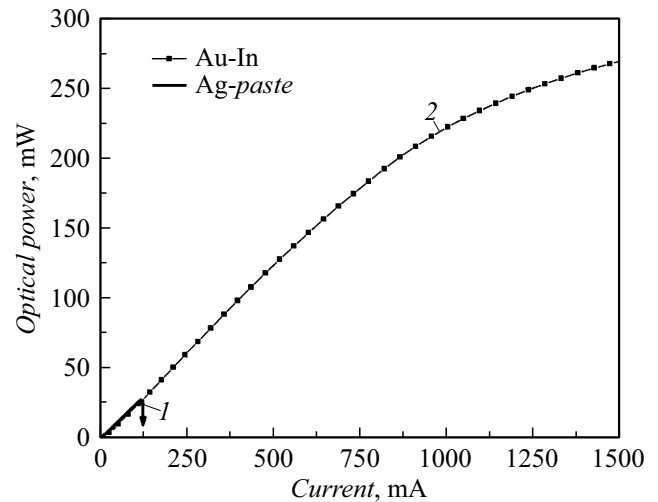


Рис. 3. Зависимость оптической мощности ИК (850 нм) светодиодов от тока при спекании структур Ag-пастой (кривая 1) и Au-In-компаундом (кривая 2).

при токе 120 мА. В светодиодах, изготовленных с использованием Au-In-компаунда, $P = 100 \text{ мВт}$ при токе 400 мА. Более существенное различие параметров светодиодов наблюдается при увеличении рабочего тока до 1 А и более: светодиоды с Ag-пастой необратимо деградируют при токе более 150 мА (кривая 1, рис. 3), а светодиоды с Au-In-компаундом обеспечивают достижение оптической мощности более 270 мВт при токе более 1.5 А (кривая 2, рис. 3).

Формирование на поверхности светодиода оптического элемента, выполненного в виде силиконовой полусферы, обеспечит увеличение оптической мощности примерно в 1.5 раза — до значений более 400 мВт при токе более 1.5 А.

Заключение

Разработана технология формирования высокоэффективных мощных ИК светодиодов на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры путем переноса гетероструктуры на подложку-носитель с использованием Au-In-компаунда. Оптимизирован этап формирования фронтального полоскового омического контакта к GaAs-слою *n*-типа проводимости на основе низкотемпературной контактной системы Pd/Ge/Au, что обеспечило увеличение выхода годных приборов и уменьшение последовательного сопротивления светодиодов площадью 1 мм^2 до величины $0.16 \text{ }\Omega$. Достигнутые значения оптической мощности в ИК светодиодах, изготовленных с использованием разработанной технологии, составили 270 мВт при токе 1.5 А без использования силиконовой полусферы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.F. Shubert. *Light-Emitting Diodes* (second edition) (Cambridge University Press, 2006)
- [2] Патент US6784462 (2004)
- [3] Электронный ресурс „EPSTAR corporation“
<https://www.epistar.com/EpistarEn/prodInfo>
- [4] А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, С.А. Мингаиров, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Ф.Ю. Солдатенков, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **55** (8), 699 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.08.51143.9665
- [5] А.В. Малевская, Н.А. Калужный, С.А. Мингаиров, Р.А. Салий, Д.А. Малевский, М.В. Нахимович, В.Р. Ларионов, П.В. Покровский, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **55** (12), 1218 (2021).
DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/FTP.2021.12.51709.9711>
- [6] Ch.C. Lee, Ch.Y.Wang, G. Matijasevic. *Transaction Components, Nybrids, Manufactur. Tech.*, **16** (3), 311 (1993).
DOI: 10.1109/33.232058
- [7] Y.-Ch. Sohn, Q. Wang, S.-J. Ham, B.-G. Jeong, K.-D. Jung, M.-S. Choi, W.-B. Kim, Ch.-Y. Moon. *Electronic Components and Technology Conference* (2007).
DOI: 10.1109/ECTC.2007.373863
- [8] A.G. Baca, F. Ren, J.C. Zolper, R.D. Briggs, S.J. Pearton. *Thin Solid Films*, **309**, 599 (1997).
- [9] P.H. Hao, L.C. Wang, Fei Deng, S.S. Lau, J.Y. Cheng. *J. Appl. Phys.*, **79**, 4211 (1996).
- [10] D.M. Mitin, F.Yu. Soldatenkov, A.M. Mozharov, A.A. Vasil'ev, V.V. Neplokh, I.S. Mukhin. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, **9** (6), 789 (2018).
DOI: 10.17586/2220-8054-2018-9-6-789-792