

УДК 621.382.2

СЛОЙ РАСТЕКАНИЯ ТОКА НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ИТО ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ СИНЕГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ

Ю. С. Жидик, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории ИОР ТУСУР, научный сотрудник лаборатории РФ ИОА СО РАН, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0001-7803-2086, e-mail: Zhidikyur@mail.ru

Д. И. Засухин, инженер-технолог АО «НИИПП», Томск, Россия;

orcid.org/0009-0009-6498-5420, e-mail: zasuhindi@mail.ru

О. Н. Минин, начальник лаборатории АО «НИИПП», Томск, Россия;

orcid.org/0009-0004-0109-7593, e-mail: minin_on@niipp.ru

П. Е. Троян, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории ИОР ТУСУР, Томск, Россия;

orcid.org/0000-0002-7349-0536, e-mail: tpe@tusur.ru

Рассматривается задача формирования слоя растекания тока на основе пленок ИТО для светодиодов синего цвета свечения. Целью работы являются определение оптимальных параметров слоя растекания тока ИТО для светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур, а также разработка технологии осаждения пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления на поверхность p-GaN-гетероструктуры. Толщина и удельное поверхностное сопротивление ИТО, а также сопротивление контакта ИТО/p-GaN оказывают значительное влияние на характеристики светодиода, содержащего слой растекания тока на основе ИТО. Эти параметры были установлены в результате моделирования параметров и характеристик кристалла светодиода со слоем растекания тока ИТО. Далее отрабатывается технология осаждения пленок ИТО на поверхность p-GaN светодиодной AlInGaN-гетероструктуры с защитой от бомбардировки высокоэнергетическими заряженными частицами в процессе осаждения. Показано, что использование системы In+Sn/ИТО в качестве слоя растекания тока позволило увеличить эффективность изготовленных светодиодов более чем в 2 раза относительно полупрозрачного контакта Ni/Au.

Ключевые слова: светодиод, ИТО, слой растекания тока, омический контакт, гетероструктура.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-204-212

Введение

В настоящее время полупроводниковые источники белого света на основе AlInGaN-гетероструктур являются самыми развивающимися по сравнению с другими источниками света. Этим обусловлено большое количество работ, связанных с улучшением их характеристик и повышением эффективности [1-4].

Одним из подходов, позволяющим существенно увеличить эффективность полупроводниковых источников белого света, является использование в конструкции полупроводникового кристалла слоя растекания тока [1, 3, 4]. Такой слой растекания тока должен обладать низким удельным сопротивлением электрическому току и высокой прозрачностью для проходящего через него сгенерированного излучения. На данный момент имеется большое количество используемых в качестве слоя растекания тока материалов. Перспективными являются: оксид индия, легированный оловом (indium tin oxide, ИТО).

Наиболее популярным методом осаждения ИТО является магнетронное распыление металлической или керамической мишени. Осаждение ИТО магнетронным распылением при изменении различных технологических параметров позволяет в очень широких пределах контролировать его свойства [5]. Однако при нанесении покрытий методом магнетронного распыления на поверхность микро- и наноразмерных гетероструктур полупроводниковых

приборов они подвергаются значительной бомбардировке высокоэнергетичными заряженными частицами. Это вызывает появление в гетероструктуре радиационных дефектов и ведет к деградации ее характеристик [1].

Целью данной работы являются определение оптимальных параметров слоя растекания тока ИТО для светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур, а также разработка технологии осаждения пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления на поверхность p-GaN-гетероструктуры.

Определение оптимальных параметров слоя растекания тока ИТО

Для исследования зависимости и определения оптимальных электрических и оптических параметров ИТО, а также диапазона допустимого контактного сопротивления контакта ИТО / p-GaN, на первом этапе работ выполнялось моделирование кристалла светодиода на основе AlInGaN-гетероструктур со слоем растекания тока ИТО. Моделирование производилось путем решения связанной электро-тепло-оптической задачи с использованием специализированного программного комплекса SimuLED [6].

Исходным вариантом моделирования планарного кристалла светодиода на основе AlInGaN-гетероструктуры стал светодиодный кристалл с гребенчатой топологией контактов АО «НИИПП». На рисунке 1 приведена структура моделируемого кристалла светодиода. Расшифровка обозначения указанных на рисунке 1 слоев, используемые материалы, а также их толщины, приведены в таблице 1.

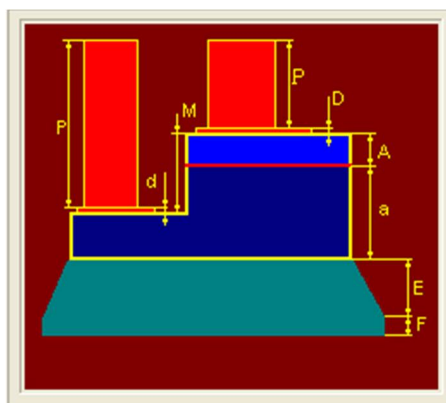


Рисунок 1 – Структура моделируемого кристалла светодиода с введенными обозначениями его слоев

Figure 1 – Structure of modeled LED crystal with introduced designations of its layers

Таблица 1 – Задаваемые при моделировании материалы и толщины слоев светодиодного кристалла

Table 1 – Materials and thicknesses of LED crystal layers specified during modeling

Обозначение слоя моделируемого кристалла на рисунке 1	Слой моделируемого кристалла светодиода	Материал слоя	Толщина слоя, мкм
<i>a</i>	<i>n</i> -слой гетероструктуры	<i>n</i> -GaIn	4
<i>A</i>	<i>p</i> -слой гетероструктуры	<i>p</i> -GaIn	0,5
<i>M</i>	меза-структура	-	0,7
<i>D</i>	контакт к <i>p</i> -слою гетероструктуры	Ni/Au	0,03-0,1
<i>d</i>	контакт к <i>n</i> -слою гетероструктуры	Ti/Al/Ni/Au	0,05/0,15/0,1/0,1
<i>p</i>	усиление <i>p</i> -контакта	Au	2,5
<i>P</i>	усиление <i>n</i> -контакта	Au	2,5
<i>E</i>	верхняя часть подложки	сапфир	100
<i>F</i>	нижняя часть подложки	не использовался	

Задаваемые контактные сопротивления между слоями структуры следующие: p-electrode / ITO – $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; ITO / p-GaN – $1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; n-electrode / n-GaN – $4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Значение прямого протекающего через кристалл тока составляло 0,15 А.

Для исследования влияния изменения величины контактного сопротивления слоя растекания тока ITO к приконтактной области полупроводника p-GaN смоделированной светодиодной структуры была произведена серия расчетов с изменяющимся контактным сопротивлением ITO / p-GaN от $7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ до $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Результаты расчётов представлены на рисунках 2 и 3.

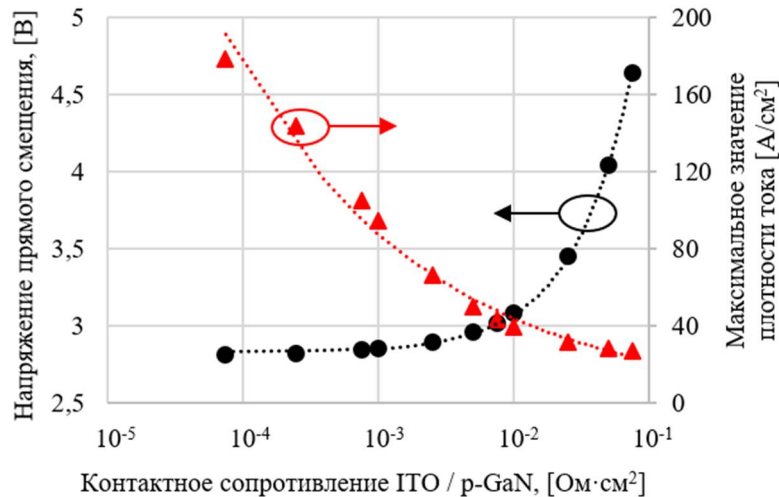


Рисунок 2 – Зависимости напряжения прямого смещения светодиода (●) и максимального значения плотности тока (▲) от контактного сопротивления ITO / p-GaN

Figure 2 – Dependences of LED forward bias voltage (●) and maximum current density (▲) on contact resistance of ITO / p-GaN

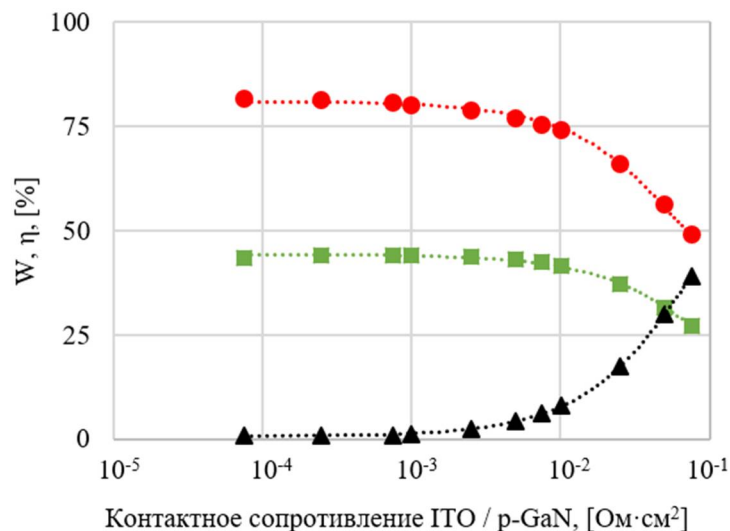


Рисунок 3 – Влияние изменения контактного сопротивления ITO / p-GaN на долю выделения тепла в области контакта ITO / p-GaN (▲), в активной зоне (●), а также на результирующий КПД светодиода (■)

Figure 3 – The effect of changing contact resistance of ITO/p-GaN on the proportion of heat released in ITO/p-GaN contact area (▲), in active zone (●), and on LED (■) resulting efficiency

Анализ полученных результатов, приведенных на рисунках 2 и 3, показывает, что при уменьшении контактного сопротивления ITO/p-GaN происходит снижение резистивных потерь, вследствие чего снижаются падение напряжения и тепловыделение в этой области. Существенное выделение тепла на границе ITO/p-GaN, приводящее к снижению

эффективности светодиода, наблюдается при контактном сопротивлении более $1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. С другой стороны, анализ зависимости максимального значения плотности тока от контактного сопротивления ИТО / p-GaN (рисунок 2) показывает, что снижение контактного сопротивления приводит к локальному усилению стягивания тока вблизи металлических электродов. Это может приводить к электрическому пробое гетероструктуры светодиода.

Важным параметром слоя растекания тока является его толщина, так как она влияет на его электрические (удельное поверхностное сопротивление) и оптические (оптические пропускание и поглощение) свойства. Оценка влияния толщины плёнки ИТО на характеристики светодиода проводилась при значении контактного сопротивления ИТО/p-GaN $1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Изменения некоторых рассчитанных параметров светодиода при изменении толщины слоя ИТО представлены на рисунках 4 и 5.

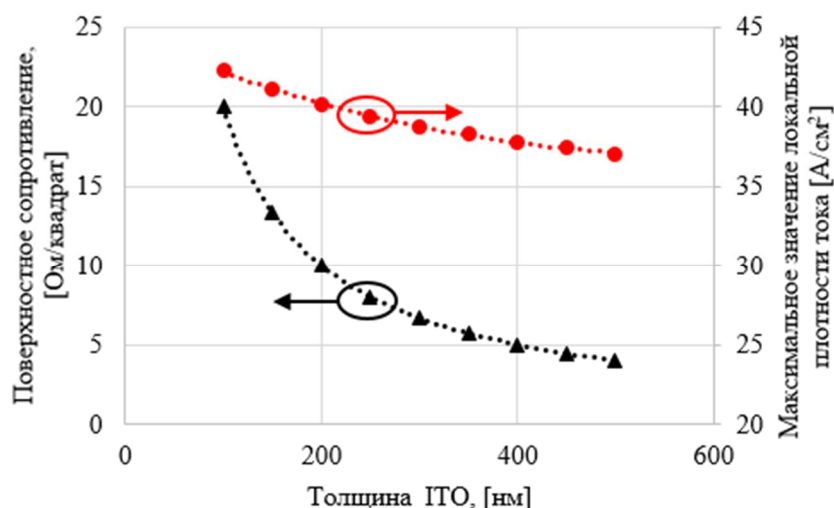


Рисунок 4 – Зависимости удельного поверхностного сопротивления пленки ИТО (▲) и максимального значения локальной плотности тока (●) в светодиодной структуре от толщины слоя ИТО

Figure 4 – Dependences of specific surface resistance of ITO film (▲) and maximum value of local current density (●) in LED structure on ITO layer thickness

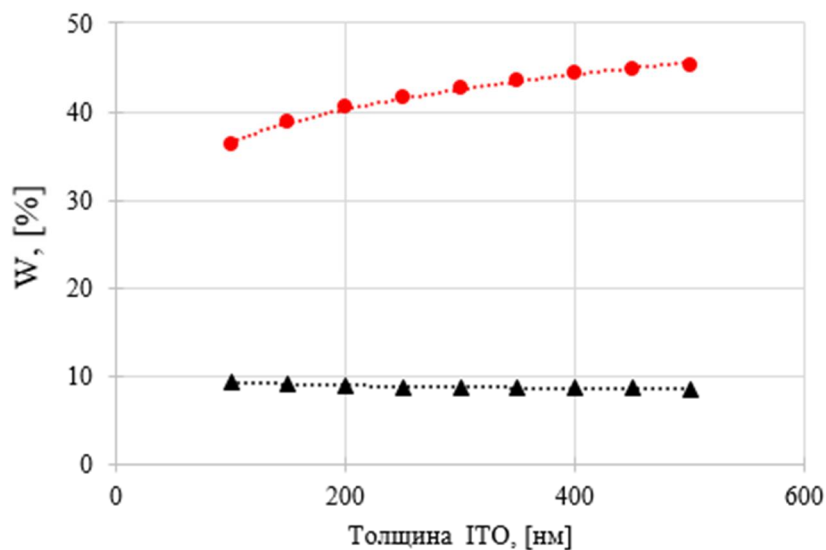


Рисунок 5 – Зависимость доли поглощаемой в гетероструктуре светодиода (▲) и в слое растекания тока ИТО (●) мощности оптического излучения от изменения толщины слоя ИТО

Figure 5 – Dependence of the fraction of optical radiation power absorbed in active zone (▲) and in top p-contact (●) on the change in ITO layer thickness

Анализ влияния толщины плёнки ИТО на характеристики светодиода (рисунок 4) показывает, что увеличение толщины слоя ИТО приводит к снижению его поверхностного сопротивления. Это в свою очередь приводит к более равномерному распределению тока и внутренней квантовой эффективности по активной области светодиода. Однако, с другой стороны, при увеличении толщины плёнки ИТО со 100 нм до 500 нм увеличивается и доля поглощаемых в объеме ИТО сгенерированных фотонов с 36 % до 45 % соответственно, что ведет к снижению эффективности экстракции генерируемого светового излучения (рисунок 5). Таким образом, наиболее оптимальная толщина слоя растекания тока ИТО должна лежать в диапазоне от 100 до 200 нм.

Дополнительно проведенные исследования показали, что подобным образом увеличение электропроводности ИТО, с одной стороны, благоприятно влияет на токораспределение, но с другой – увеличивает поглощение проходящего через ИТО светового излучения, снижая долю его извлечения из чипа. В частности, было оценено, что увеличение электропроводности ИТО с 2000 См/см до 5000 См/см приводит к соответствующему увеличению коэффициента поглощения от 320 см^{-1} до 850 см^{-1} . Это указывает на важность контроля условий осаждения пленок ИТО при их использовании в качестве слоя растекания тока светодиодов, так как именно технология осаждения прежде всего влияет на электрические свойства ИТО [7].

Осаждение пленок ИТО на поверхность p-GaN AlInGaN-гетероструктуры

Для использования пленок ИТО в качестве слоя растекания тока светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур была разработана технология их синтеза, обеспечивающая удельное поверхностное сопротивление 15 Ом/квадрат при толщине 120 нм. Используемая технология осаждения ИТО и исследование их электрофизических свойств подробно приведены в работах [7, 8].

Для устранения бомбардировки полупроводниковой гетероэпитаксиальной структуры высокоэнергетичными заряженными частицами исследовалась эффективность использования буферных покрытий, осаждаемых на поверхность p-GaN AlInGaN-гетероструктуры перед нанесением пленки ИТО. В качестве исследуемых контактных систем на основе пленок ИТО с буферными подслоями использовались следующие системы Ni/ITO (10/120 нм), Ni/Au/ITO (5/10/120 нм), In+Sn/ITO(2/120 нм). Контактная система In+Sn/ITO (2/120 нм) была получена методом магнетронного распыления металлической мишени In/Sn в течение 8 с в атмосфере Ar для получения металлического слоя толщиной 2 нм, после чего в состав рабочей атмосферы добавлялся кислород для формирования на подложке пленки ИТО. Наиболее оптимальное буферное покрытие определялось с учетом получения установленного ранее оптимального контактного сопротивления ИТО / p-GaN в диапазоне от $10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ до $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, обеспечения омической вольт-амперной характеристики этого контакта, а также с учетом обеспечения максимального коэффициента пропускания на длине волны излучения светодиода 450 нм. Для сравнения контактного сопротивления также был подготовлен традиционно используемый эталонный омический контакт к p-GaN на основе тонкопленочной системы Ni/Au (5/200 нм). Определение удельного контактного сопротивления производится при помощи метода длины передачи (TLM). Данный метод основан на измерении полного сопротивления между двумя контактами как функции расстояния между этими контактами и описан в [9]. В таблице 2 приведены значения удельного контактного сопротивления исследуемых контактных систем.

Таблица 2 – Удельное контактное сопротивление исследуемых контактных систем
Table 2 – Specific contact resistance of contact systems under study

	Ni/ITO	Ni/Au/ITO	In+Sn/ITO	Ni/Au
$\rho_c, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	$2,9\cdot 10^{-3}$	$9\cdot 10^{-4}$	$8\cdot 10^{-4}$	$7\cdot 10^{-5}$

В совокупности оговоренных выше критериев отбора лучшими характеристиками обладает контактная система In+Sn/ITO с удельным контактным сопротивлением $\rho_c = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при коэффициенте пропускания 94 % на длине волны излучения 450 нм. Полученное значение удельного контактного сопротивления системы In+Sn/ITO соответствует определенному в результате моделирования оптимальному диапазону значений от $10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ до $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, а также согласуется с экспериментальными результатами в работе [10].

Изготовление и исследование параметров светодиода на основе AlInGaN-гетероструктуры со слоем растекания тока ITO

Изготовление светодиодных кристаллов на основе AlInGaN-гетероструктуры со слоем растекания тока ITO проводилось на базе технологической линейки АО «НИИПП», г. Томск. Были изготовлены светодиодные кристаллы размером $550 \times 1000 \text{ мкм}^2$ с различными вариантами контактных систем к p-GaN AlInGaN-гетероструктуры. Последовательность изготовления кристаллов схематически представлена на рисунке 6.

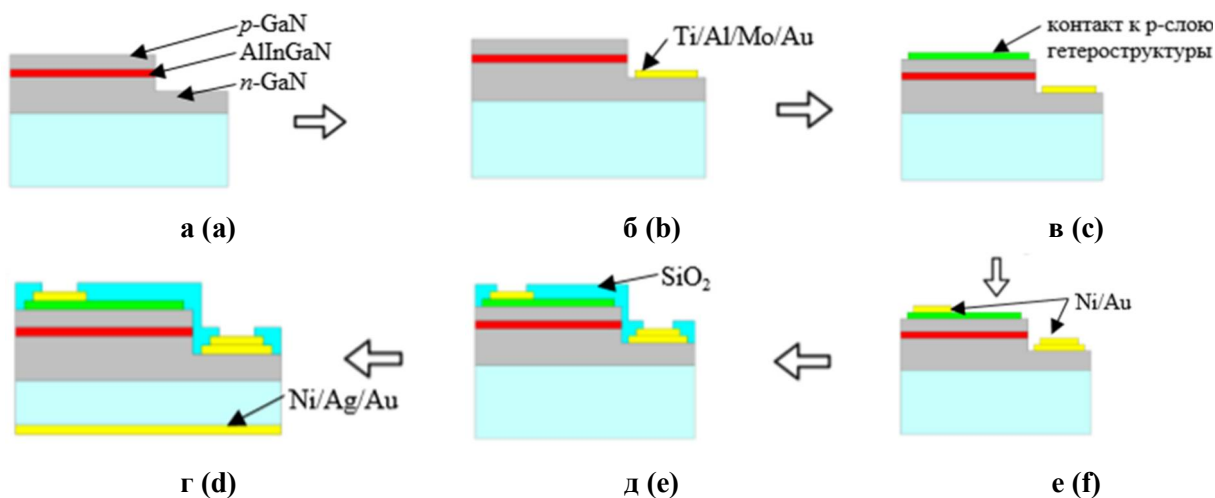


Рисунок 6 – Последовательность изготовления кристалла планарной конструкции:
 а – травление мезы до n-GaN; б – формирование контакта к n-GaN; в – формирование контакта к p-GaN; г – формирование дорожек металлизации; д – пассивация диэлектриком;
 е) утонение, формирование отражающего контакта
Figure 6 – Sequence of manufacturing a planar crystal: a – etching of mesa to n-GaN; b – formation of contact to n-GaN; c – formation of contact to p-GaN; d – formation of metallization tracks; e – passivation with dielectric; f – thinning, formation of reflective contact

Первой технологической операцией изготовления кристалла планарной конструкции было реактивное ионное травление AlInGaN-гетероструктуры на глубину 0,5 мкм для обеспечения доступа к n-слою (рисунок 6, а). Далее осуществлялось формирование контакта к n-слою (рисунок 6, б), в качестве которого выступала система металлов Ti/Al/Mo/Au (10/100/50/100 нм). В качестве контакта к p-слою (рисунок 6, в) были использованы следующие системы: Ni/Au (1/10 нм), Ni/Au/ITO (5/10/120 нм) и In+Sn/ITO (2/120 нм). Для равномерного растекания тока по всей площади кристалла далее формируются дорожки металлизации на основе Ni/Au с толщинами пленок 50 нм и 400 нм соответственно (рисунок 6, г). После формирования металлизации проводилась пассивация поверхности кристалла диэлектрическим слоем SiO₂ толщиной 0,4 мкм (рисунок 6, д). Далее проводилось утонение и полировка сапфировой подложки до толщины 150 – 200 мкм (рисунок 6, е), с последующим формированием отражающего покрытия Ni/Ag/Au (1/100/100 нм). Все слои металлизации получены методом электронно-лучевого испарения. На заключительном этапе осуществлялась лазерная резка пластины на отдельные кристаллы. Внешний вид рабочего кристалла показан на рисунке 7.

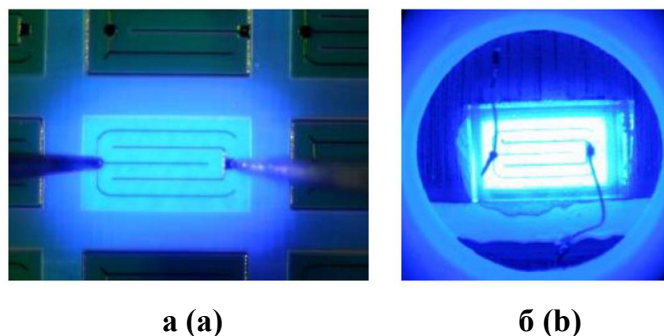


Рисунок 7 – Внешний вид рабочего кристалла на пластине (а) и в корпусе (б)
Figure 7 – The design of working crystal on plate (a) and in case (b)

Измерения вольт-амперных характеристик изготовленных кристаллов светодиодов с разными вариантами контакта к р-GaN показали, что они обладают схожими вольт-амперными характеристиками в диапазоне напряжений 3,04 – 3,1 В (рисунок 8). Однако мощность испускаемого оптического излучения кристалла отличается и коррелирует с прозрачностью контактных слоев к р-GaN. Для кристаллов с контактом Ni/Au, Ni/Au/ITO и In+Sn/ITO максимальная мощность оптического излучения составила 41, 70 и 101 мВт соответственно.

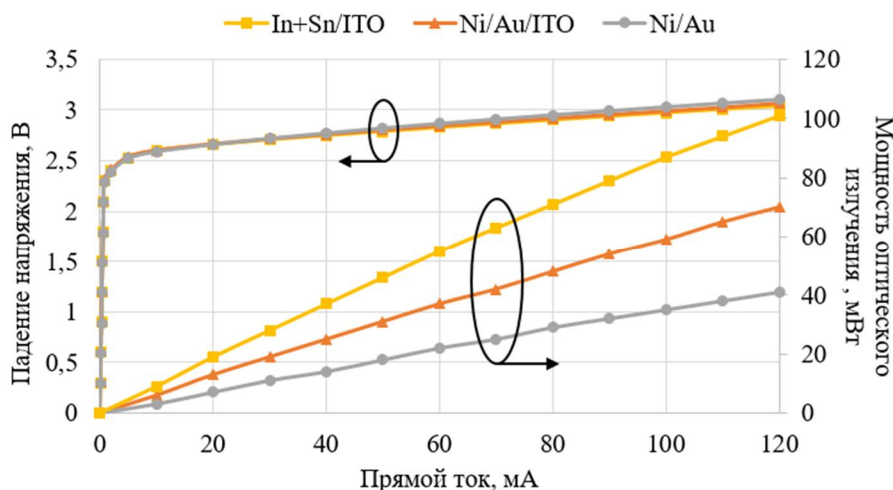


Рисунок 8 – Зависимость напряжения и мощности излучения от прямого тока для кристаллов с различным контактом к р-GaN

Figure 8 – Dependence of voltage and radiation power on forward current for crystals with different contacts to p-GaN

Таким образом, использование системы In+Sn/ITO в качестве слоя растекания тока позволило увеличить эффективность изготовленных светодиодов более чем в 2 раза относительно применения полупрозрачного контакта Ni/Au за счет сочетания оптимальных электрических характеристик ITO и высокой прозрачности для испускаемого светодиодом оптического излучения.

Заключение

Проведенное моделирование параметров и характеристик кристалла светодиода на основе AlInGaN-гетероструктур со слоем растекания тока ITO позволило выявить влияние электрических и оптических параметров пленок ITO на характеристики светодиода. В результате исследований было установлено, что оптимальная толщина ITO составляет 130 нм, а сопротивление контакта ITO / р-GaN должно быть в диапазоне от 10^{-2} Ом·см² до 10^{-4} Ом·см².

При осаждении пленок ИТО на поверхность p-GaN светодиодной AlInGaN-гетероструктуры для ее защиты был использован буферный слой из тонкой металлической плёнки In + Sn, осажденной методом магнетронного распыления мишени In(90 %)/Sn(10 %) в бескислородной среде перед осаждением основного слоя растекания тока ИТО. Такая комбинация позволила получить низкие значения удельного контактного сопротивления ИТО / p-GaN на уровне $8 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² при прозрачности слоя растекания тока 94 % на длине волны излучения 450 нм.

Использование указанных технологических подходов позволило повысить эффективность синих планарных светодиодов более чем в 2 раза по сравнению с ранее используемым полупрозрачным контактом Ni/Au.

Библиографический список

1. **Kim M.-J.** A Study on Optimal Indium Tin Oxide Thickness as Transparent Conductive Electrodes for Near-Ultraviolet Light-Emitting Diodes // *Materials*. 2023. № 16 (13). P. 4718.
2. **Kim J.Y., Oh G.G., Kim E., Kim H.S., Hong G., Ryou J.H., Kwon M.K.** Silver-Nanowire-Based Localized-Surface-Plasmon-Assisted Transparent Conducting Electrode for High-Efficiency Light-Emitting Diode // *Applied Sciences*. 2021. № 11 (16). P. 7747.
3. **Жидик Ю.С., Гарипов И.Ф., Карпов С.Р., Романова М.А., Троян П.Е.** Разработка полупроводникового источника белого света с высоким индексом цветопередачи // *Прикладная Физика*. 2024. № 6. С. 81-88.
4. **Bogdanov M.V., Bulashevich K.A., Khokhlev O.V., Evstratov I.Yu., Ramm M.S., Karpov S.Yu.** Effect of ITO spreading layer on performance of blue light-emitting diodes // *Physica status solidi*. 2013. № 7 (8). P. 2129.
5. **Троян П.Е., Сахаров Ю.В., Жидик Ю.С.** Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления // *Доклады ТУСУР*. 2014. № 1(31). С. 99-102.
6. SimuLED—engineering tool for LED and laser diode design and optimization // str-soft.com [сайт]. URL: <https://str-soft.com/devices/simuled/> (дата обращения: 27.09.2025).
7. **Жидик Ю.С., Троян П.Е., Козик В.В., Козюхин С.А., Заболотская А.В., Кузнецова С.А.** Исследование электрофизических свойств пленок ИТО // *Известия вузов. Физика*. 2020. Т. 63. № 7 (751). С. 31-35.
8. **Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhuk K., Yunusov I., Troyan P.** Nanoscale ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors // *Coatings*. 2022. № 12 (12). P. 1868.
9. **Ishikawa H., Kobayashi S., Koide Y., Yamasaki S., Nagai S., Umezaki J., Koike M., Murakami M.** Effects of surface treatments and metal work functions on electrical properties at p-GaN/metal interfaces // *Journal of applied physics*. 1997. № 81 (3). P. 1315.
10. **Chen J., Brewer W.D.** Ohmic Contacts on p-GaN // *Advanced electronic materials*. 1979. № 1 (8). P. 1.

UDC 621.382.2

ITO FILM-BASED CURRENT SPREADING LAYER FOR BLUE LEDs

Yu. S. Zhidik, Ph.D., Leading Researcher at the Laboratory of IOR TUSUR, Researcher at the Laboratory of the IAO Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

orcid.org/0000-0001-7803-2086, e-mail: Zhidikyur@mail.ru

D. I. Zasukhin, Process Engineer, NIIPP JSC, Tomsk, Russia;

orcid.org/0009-0009-6498-5420, e-mail: zasuhindi@mail.ru

O. N. Minin, Head of the Laboratory, NIIPP JSC, Tomsk, Russia;

orcid.org/0009-0004-0109-7593, e-mail: minin_on@niipp.ru

P. E. Troyan, Dr. in technical sciences, Leading Researcher, Laboratory of IOR TUSUR, Tomsk, Russia;

orcid.org/0000-0002-7349-0536, e-mail: tpe@tusur.ru

The problem of forming an ITO film-based current spreading layer for blue LEDs is considered. The aim of this work is to determine optimal parameters of ITO current spreading layers for LEDs based on

AlInGaN heterostructures, as well as to develop the technology for depositing ITO films using reactive magnetron sputtering on p-GaN heterostructure surface. Thickness and internal surface resistance of ITO as well as ITO/p-GaN contact resistance have a significant impact on the characteristics of LED containing ITO current spreading layer. These parameters were established by examining the parameters and characteristics of LED crystal with ITO current spreading layer. Next, the technology for depositing ITO films on p-GaN AlInGaN LED heterostructure surface with coupling from high-energy charged particle bombardment during deposition process is developed. The authors show that using In+Sn/ITO system as current spreading layer increases the efficiency of LEDs used by more than 2 times compared to semitransparent Ni/Au contact.

Keywords: LED, ITO, current spreading layer, ohmic contact, heterostructure.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-204-212

References

1. **Kim M.J.** A study on optimal indium tin oxide thickness as transparent conductive electrodes for near-ultraviolet light-emitting diodes. *Materials*. 2023, no. 16 (13), p. 4718.
2. **Kim J.Y., Oh G.G., Kim E., Kim H.S., Hong G., Ryou J.H., Kwon M.K.** Silver-nanowire-based localized-surface-plasmon-assisted transparent conducting electrode for high-efficiency light-emitting diode. *Applied Sciences*. 2021, no. 11 (16), p. 7747.
3. **Zhidik Yu.S., Garipov I.F., Karpov S., Romanova M.A., Troyan P.E.** Razrabotka poluprovodnikovogo istochnika belogo sveta s vysokim indeksom tsvetopperedachi. *Prikladnaya Fizika*. 2024, no. 6, pp. 81-88. (in Russian).
4. **Bogdanov M.V., Bulashevich K.A., Khokhlev O.V., Evstratov I.Yu., Ramm M.S., Karpov S.Yu.** Effect of ITO spreading layer on performance of blue light-emitting diodes. *Physica status solidi*. 2013, no. 7 (8), p. 2129.
5. **Troyan P.Ye., Sakharov Yu.V., Zhidik Yu.S.** Prozhachnyye elektroprovodyashchiye pokrytiya s kontroliruyemyimi znacheniyami koeffitsiyenta propuskaniya i poverkhnostnogo soprotivleniya. *Doklady TUSUR*. 2014, no. 1(31), pp. 99-102. (in Russian).
6. SimuLED-engineering tool for LED and laser diode design and optimization. *Str-soft.com [website]*. URL: <https://str-soft.com/devices/simuled/> (date of access: 27.09.2025).
7. **Zhidik Yu.S., Troyan P.Ye., Kozik V.V., Kozyukhin S.A., Zabolotskaya A.V., Kuznetsova S.A.** Issledovaniye elektrofizicheskikh svoystv plenok ITO. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2020, vol. 63, no. 7 (751), pp. 31-35. (in Russian).
8. **Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhuk K., Yunusov I., Troyan P.** Nanoscale ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors. *Coatings*. 2022, no. 12 (12), p. 1868.
9. **Ishikawa H., Kobayashi S., Koide Y., Yamasaki S., Nagai S., Umezaki J., Koike M., Murakami M.** Effects of surface treatments and metal work functions on electrical properties at p-GaN/metal interfaces. *Journal of applied physics*. 1997, no. 81 (3), p. 1315.
10. **Chen J., Brewer W.D.** Ohmic Contacts on p-GaN. *Advanced electronic materials*. 1979, no. 1 (8), p. 1.