

Высоковольтные светодиодные кристаллы AlInGaN

© Л.К. Марков¹, М.В. Кукушкин¹, А.С. Павлюченко¹, И.П. Смирнова¹, Г.В. Иткинсон², О.В. Осипов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ЗАО «Инновационная фирма „ИРСЭТ-Центр“»,
194156 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: l.markov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 30 мая 2019 г.

В окончательной редакции 8 июня 2019 г.

Принята к публикации 10 июня 2019 г.

Разработан и изготовлен высоковольтный светодиодный кристалл флип-чип конструкции на основе гетероструктуры AlInGaN, состоящий из 16 последовательно соединенных элементов, каждый из которых представляет собой стандартный светоизлучающий диод. При общей площади 1.25×1.25 мм кристалл рассчитан на рабочий ток 20 мА, падение напряжения на рабочем токе составляет 48 В. Для повышения однородности распределения тока по активной области элементов кристалла, а также минимизации потерь площади элементов, занятой *n*-контактом, *n*-контактные площадки в них размещены внутри области *p*-контакта благодаря двухуровневой схеме расположения металлизации с промежуточным изолирующим слоем диэлектрика. Топология расположения контактных площадок разрабатывалась с привлечением численного моделирования. Повышение квантового выхода кристалла обеспечивается применением комбинаций металлов с высоким коэффициентом отражения света на длине волны излучения светодиода, используемых при создании *n*- и *p*-контактов, а также токопроводящих полос.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, светоизлучающий кристалл, флип-чип конструкция, высоковольтный кристалл, нитрид галлия.

DOI: 10.21883/FTP.2019.11.48456.9179

1. Введение

Массовое использование светодиодных кристаллов на основе полупроводникового соединения AlInGaN для изготовления источников белого света базируется на ряде их преимуществ по сравнению с традиционно использовавшимися ранее лампами накаливания и люминесцентными лампами. Среди них можно выделить высокие эффективность и эксплуатационный ресурс, надежность, компактность и экологичность. Востребованность кристаллов в производстве источников света рождает постоянный запрос на совершенствование конструкции светодиодных кристаллов и технологии их производства. Как правило, основные задачи, которые приходится решать при проектировании эффективных светодиодных кристаллов, сводятся к обеспечению минимальных значений последовательного сопротивления кристалла и поглощения света в кристалле, организации эффективного отведения тепла из его активной области и оптимального растекания тока по поверхности активной области кристалла. Для решения поставленных задач оптимизируется геометрия кристалла и контактных площадок [1,2], создаются рассеивающие свет поверхности [3,4], применяются светоотражающие элементы [5–7].

Мощные светодиоды создаются в основном, на основе кристаллов флип-чип или вертикальной конструкции, так как обе они обеспечивают наилучший отвод тепла из активной области светодиода.

Наиболее удачными и доступными для реализации являются, на наш взгляд, светодиодные кристаллы

флип-чип конструкции. В ней контактные площадки расположены с одной (тыльной) стороны кристалла, а свет выводится через прозрачную, как правило, сапфировую подложку [8–10]. В отличие от традиционной „face-up“ конструкции, в которой для вывода света используется полупрозрачный *p*-контакт, флип-чип конструкция предполагает создание контактов с высоким коэффициентом отражения на длине волны собственного излучения светодиода, и для обеспечения равномерности растекания тока по активной области кристалла можно использовать любые необходимые толщины металлов контактов, кроме того, непосредственная близость активной области от теплоотвода обеспечивает хорошие значения тепловых сопротивлений светодиодов.

Вертикальная конструкция предполагает расположение контактных площадок на противоположных сторонах кристалла. Она также использует контакты с высоким показателем отражения и достаточно хорошо справляется с решением большинства из поставленных задач, однако для создания кристалла вертикальной конструкции гетероструктура должна быть выращена на проводящей подложке, либо подложка должна быть удалена [11,12], что приводит к существенному удорожанию и усложнению технологии создания светодиодов. Сравнение тепловых характеристик светодиодов флип-чип и вертикальной конструкции проведено в работе [13].

Большой интерес в последнее время вызывают разработки так называемых высоковольтных кристаллов, в которых в рамках одного кристалла интегрировано несколько соединенных последовательно элементов,

каждый из которых представляет собой стандартный светоизлучающий диод. Последовательное включение элементов приводит к тому, что рабочие напряжения такого кристалла вырастают кратно количеству элементов кристалла. Так как рабочие напряжения стандартного светодиодного кристалла близки к 3 В, то соответственно кристалл, в котором интегрировано N последовательно соединенных элементов, будет рассчитан на эксплуатацию при $3N$ В. Соответственно использование таких кристаллов при производстве источников освещения упрощает задачу, связанную с понижением эксплуатационного напряжения до более низких уровней, требуемых одиночным кристаллам. При этом, так как кристалл эксплуатируется при повышенных значениях напряжений, его рабочие токи пропорционально снижаются, что также обеспечивает дополнительное преимущество, поскольку позволяет понизить требования к сопротивлению цепи питания кристалла. Основным отличием такого подхода от создания светодиодных линеек или матриц, в которых несколько независимых светодиодных кристаллов соединяются последовательно на одном носителе (как, например, в случае так называемых филаментных ламп [14]), является то, что элементы высоковольтного кристалла формируются в рамках одного кристалла с использованием фотолитографических методов и не разделяются на отдельные светодиоды. Такой подход может обеспечить дополнительные преимущества, так как позволяет эффективнее использовать площадь гетероструктуры, из которой изготавливаются кристаллы, а также дает возможность избавиться от нескольких дополнительных операций, таких как резка пластины на отдельные светодиоды и последующая сборка их в линейки или матрицы. Кроме того, отсутствие сборки должно существенно повысить эксплуатационный ресурс кристалла, так как именно соединения являются наиболее опасными с точки зрения механических воздействий или термоциклирования.

Существует несколько подходов создания высоковольтных кристаллов, один из которых заключается в том, что формируемые элементы представляют собой светодиодные кристаллы *face-up* конструкции [15]. Это наиболее простой вариант, когда сформированные на пластине светодиодные кристаллы не разделяются, а соединяются в цепочки посредством перемычек между n - и p -контактами соседних светодиодов. Альтернативный подход — высоковольтный кристалл на основе флип-чип элементов [16]. Он более сложен, так как, согласно концепции флип-чип, кристалл размещается на несущей плате стороной, по которой осуществляется соединение элементов, и следует продумать ряд мер по электрической изоляции и организации теплоотвода из активной области элементов.

В последние годы сформировался подход, в рамках которого для создания мощных светодиодных кристаллов флип-чип конструкции используются топологии с двухуровневой металлизацией, которая позволяет эффективнее использовать площадь AlInGaN -гетероструктуры за счет уменьшения пассивной области кристалла,

занятой n -контактом и токопроводящими шинами, а также добиться лучшей однородности распределения плотности тока накачки по активной области [17].

В работе [18] использовалось численное моделирование для разработки оптимальной топологии расположения контактных площадок на поверхности кристалла с площадью активной области 1 мм^2 . Применение двухуровневой металлизации кроме оптимизации однородности распределения тока накачки по площади p - n -перехода и уменьшения полного дифференциального сопротивления кристалла позволило также минимизировать пассивную область светодиодного кристалла, а также повысить эффективность вывода света из кристалла большой площади за счет сплошного зеркального покрытия на тыльной стороне светодиодного кристалла.

В настоящей работе на основе сформированных в работе [18] подходов предложена конструкция флип-чип светодиодного кристалла, состоящего из 16 последовательно соединенных элементов и рассчитанного соответственно на эксплуатацию при напряжениях 48 В. Расчет геометрии контактных площадок элементов, обеспечивающих оптимальное растекание тока, проводился с использованием численной модели, основанной на решении системы линейных уравнений Кирхгофа на трехмерной сетке узлов.

2. Результаты эксперимента

Общая площадь разработанного кристалла составила $1.25 \times 1.25 \text{ мм}$. Так как кристалл разделен на элементы, каждый из которых находится под своим потенциалом, создание кристалла начинается с вытравливания дорожек в гетероструктуре, обеспечивающих разграничение элементов. Травление должно быть проведено до подложки, на которой была выращена гетероструктура, чтобы гарантировать электрическую изоляцию между соседними элементами. Сама подложка должна быть непроводящей (в большинстве случаев, как и в рамках нашего эксперимента, используются подложки из лейкосапфира). Для изготовления кристаллов использовалась светодиодная AlInGaN -гетероструктура, выращенная методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на установке E300 производства фирмы Veeco. Для достижения максимальной эффективности вывода света структура выращивалась на профилированной сапфировой подложке.

Травление дорожек между элементами кристалла проводилось методом реактивного ионного травления в хлорсодержащей плазме. С целью оптимизации эффективности использования площади гетероструктуры, а также оптических и электрических параметров кристалла был проведен ряд экспериментов по травлению дорожек между элементами разной ширины в диапазоне от 5 до 50 мкм. Исходя из полученных данных была выбрана ширина дорожки, равная 20 мкм. На рис. 1, а представлены изображения дорожек, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

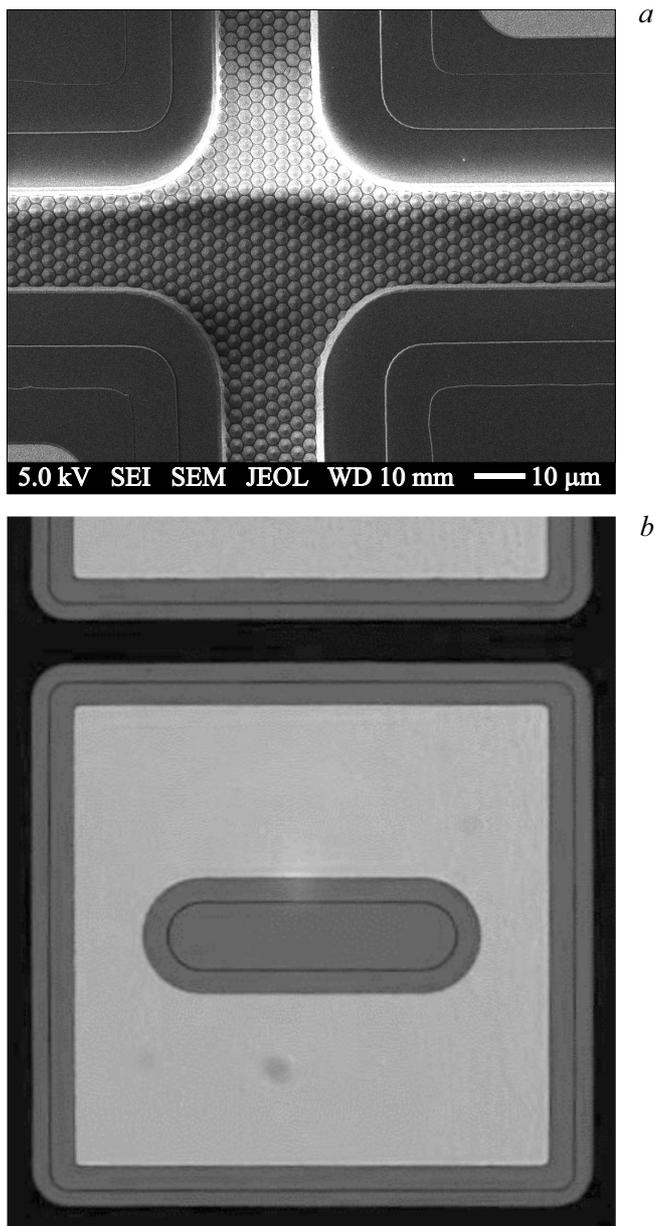


Рис. 1. РЭМ изображение дорожек между элементами высоковольтного кристалла (а) и фотография элемента высоковольтного кристалла после травления до *n*-слоя гетероструктуры и нанесения *p*-контакта (б).

Размеры самого элемента составили 286×286 мкм. Относительно небольшие размеры элемента позволяют решить задачу оптимизации растекания электрического тока по активной области кристалла проще, чем в случае мощных кристаллов с большими токами накачки. Однако основные задачи остаются теми же. Необходимость достижения максимально возможного однородного распределения плотности тока накачки по активной области кристалла связана в светоизлучающих кристаллах с двумя основными факторами. Наличие областей с повышенной плотностью тока приводит, во-первых, к

локальному перегреву этих областей и, как следствие, к ускоренной деградации светодиода, и, во-вторых, к снижению эффективности светодиода вследствие так называемого droop-эффекта, т.е. эффекта падения эффективности электролюминесценции с ростом тока накачки.

Светодиоды на основе соединений AlInGaN отличаются высоким удельное сопротивление слоя *p*-GaN, а также относительно высокое контактное сопротивление *p*-контакта, в то время как удельное сопротивление слоя *n*-GaN и контактное сопротивление *n*-контакта значительно ниже. Протекание электрического тока через *p*-*n*-переход и активную область гетероструктуры в таких светодиодных кристаллах возможно только в непосредственной близости от *p*-контактной площадки. Исходя из этого оптимизация конструкции светодиодного кристалла сводится к достижению максимального возможной площади *p*-контакта (так как его площадь фактически равна площади активной области кристалла) и минимальной площади *n*-контакта (для оптимального использования общей площади гетероструктуры).

Как мы отмечали выше, наличие двухуровневой металлизации позволяет размещать *n*-контактные площадки внутри области *p*-контакта, что позволяет повысить однородность распределения тока по активной области кристалла, а также минимизировать потери площади кристалла, занятого *n*-контактом. В случае относительно небольшого элемента высоковольтного кристалла достаточно эффективным является размещение в центре кристалла области *n*-контакта в виде прямоугольника со скругленными углами (рис. 1, б).

Оптимизация геометрических размеров *n*-контактной области, кроме обсуждавшейся выше однородности распределения плотности тока по активной области контакта, должна также обеспечить приемлемое значение сопротивления *n*-контакта, что требует достаточной площади области *n*-контакта. Моделирование кристалла проводилось с использованием численной модели, основанной на решении системы линейных уравнений Кирхгофа на трехмерной сетке узлов с переменным пространственным шагом. В сетку включались сопротивления нескольких типов, соответствующих удельному объемному сопротивлению *n*-GaN и контактных металлов, а также удельным контактным сопротивлениям *n*- и *p*-контактов. Сам *p*-*n*-переход предполагался полностью открытым, и его реальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) в модель не вводилась. Это упрощение представляется оправданным, так как при работе светодиода на высоких плотностях тока накачки дифференциальное сопротивление *p*-*n*-перехода мало по сравнению с удельным объемным сопротивлением слоев полупроводника. В качестве параметров в модели использовались полученные из эксперимента значения удельных контактных сопротивлений *n*- и *p*-контактов ($R_c^n = 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$ и $R_c^p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$ соответственно), а также удельное объемное сопротивление *n*-GaN ($\rho_n = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и справочные значения удельных объемных сопротивлений металлов контактов.

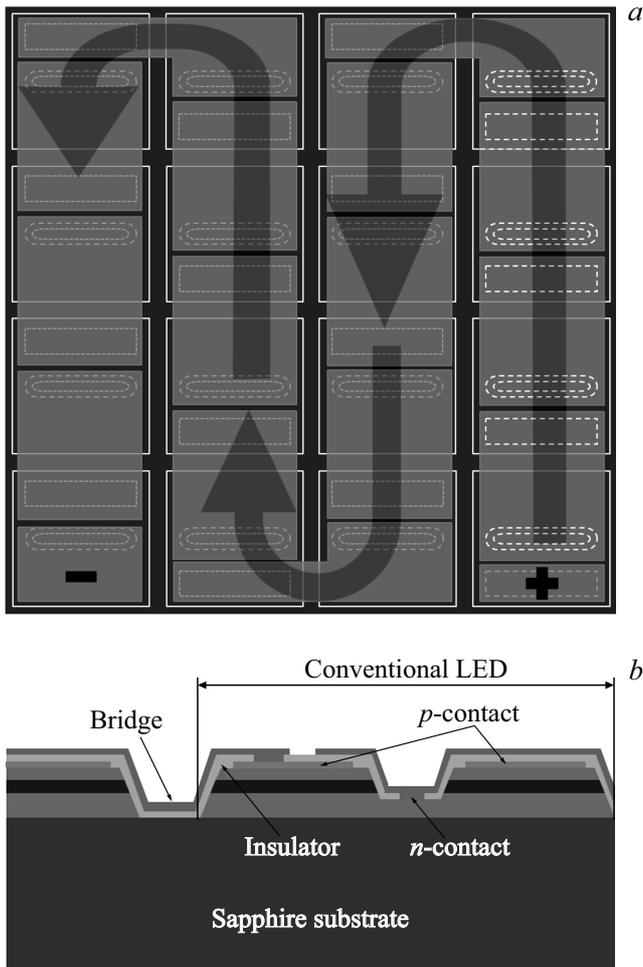


Рис. 2. Схемы размещения элементов в светодиодном кристалле (а) и соединения соседних элементов кристалла (b).

Размещение элементов в светодиодном кристалле изображено схематично на рис. 2, а. Устройство самого элемента и способ соединения соседних элементов представлено на схеме рис. 2, б, где приведено сечение вдоль оси симметрии одного из элементов в цепочке, а также часть граничащего с ним соседнего элемента.

Кратко описать конструкцию светодиодного кристалла можно следующим образом. Основную площадь элемента занимает контакт к *p*-области GaN (металлизация первого уровня), в центре которого вскрыта прямоугольная область со скругленными углами, предназначенная для травления мезаструктуры, обеспечивающей доступ к *n*-слою GaN. На дне вытравленного углубления расположен контакт к *n*-области GaN, электрически связанный с *p*-контактом соседнего элемента кристалла при помощи токопроводящей полосы металлизации второго уровня (см. рис. 3, а). Электрическая изоляция между слоями металлизации разных уровней осуществляется при помощи слоя SiO₂, закрывающего практически всю область элементов кристалла и дорожки между ними. В слое SiO₂ вскрыты только две области, обеспечивающие доступ к *n*- и *p*-контактным площадкам

элементов соответственно. Для повышения квантового выхода кристаллов *p*-контакт изготавливался на основе комбинации ITO/Ag (1.5 нм/250 нм), с коэффициентом отражения более 95% на рабочей длине волны светодиода [7], а *n*-контакт и токопроводящие полосы состояли из комбинации металлов Ti/Ag (2 нм/200 нм), что также обеспечивало высокое значение коэффициента отражения света (см. рис. 3, а).

В дальнейшем весь кристалл закрывался вторым изоляционным слоем SiO₂, поверх которого гальваническим методом наносились золотые площадки толщиной 3 мкм, размеры и расположение которых соответствовали элементам кристалла. Площадки необходимы для организации эффективного теплоотвода от активных областей элементов в плату-носитель. Перед их нанесением во втором изоляционном слое вскрывались

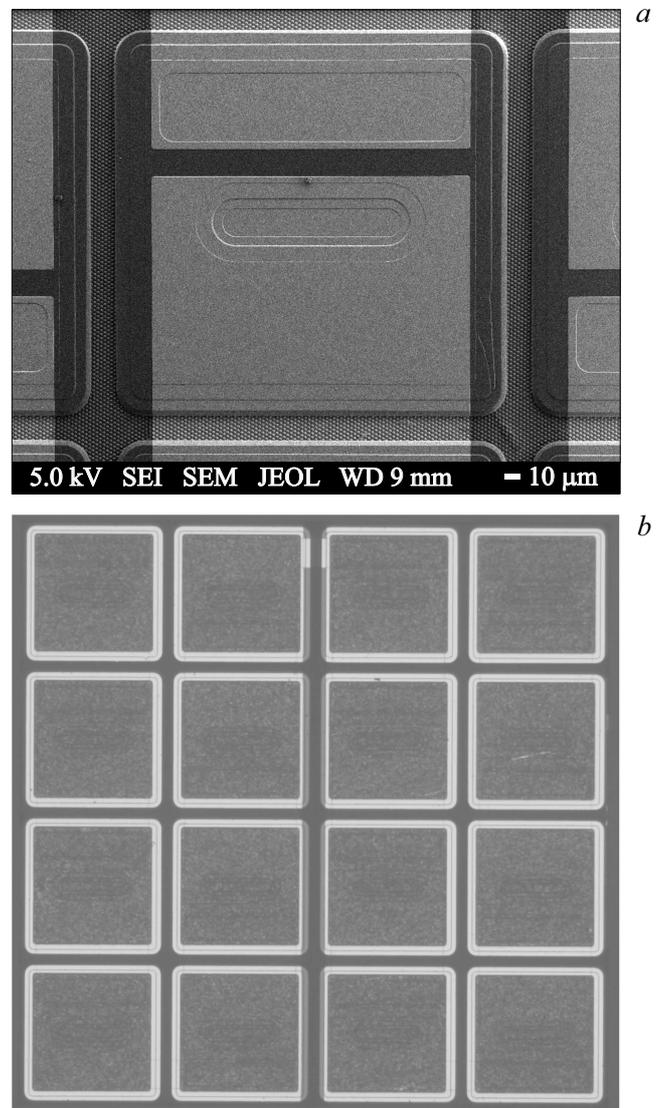


Рис. 3. РЭМ-изображение элемента светодиодного кристалла в процессе его изготовления после нанесения металлизации второго уровня (а) и фотография готового высоковольтного светодиодного кристалла (b).

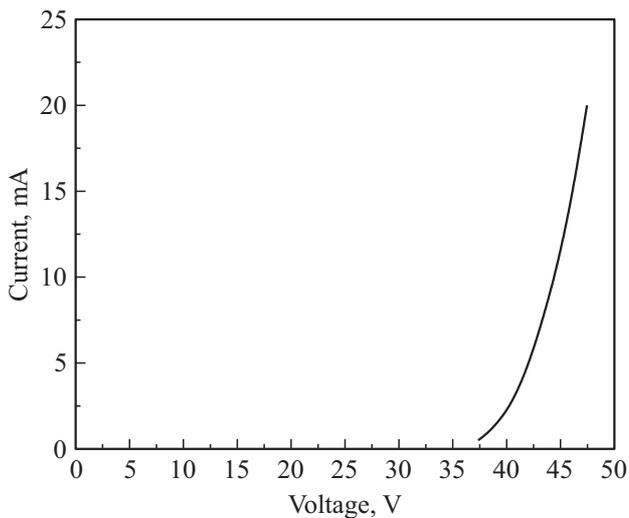


Рис. 4. ВАХ высоковольтного светодиодного кристалла.

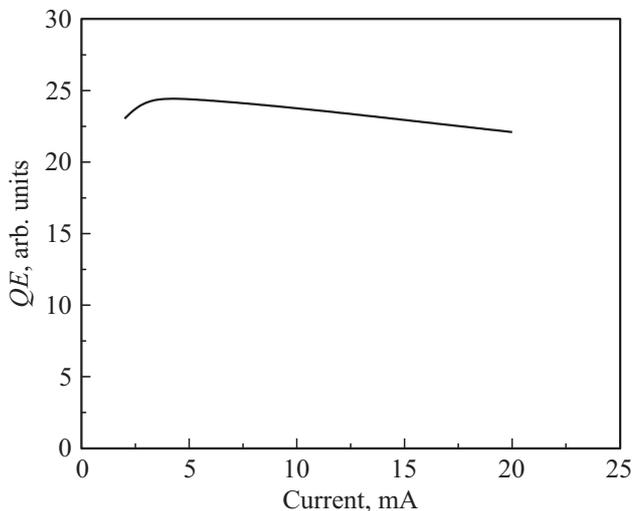


Рис. 5. Зависимость квантового выхода от тока накачки высоковольтного светодиодного кристалла.

окна для доступа к n -контакту первого и p -контакту последнего элементов цепочки, которые использовались как положительный и отрицательный контакты всего высоковольтного кристалла (см. рис. 2, *a*). Общий вид изготовленного кристалла со стороны, предназначенной для размещения на плате-носителе, приведен на рис. 3, *b*.

На рис. 4 приведена типичная ВАХ изготовленного высоковольтного светодиодного кристалла. Поскольку кристалл представляет собой цепочку из 16 последовательно включенных элементов, его рабочий ток составляет 20 мА, что существенно отличается от традиционных кристаллов высокой мощности схожих размеров. Обычно кристаллы сравнимых площадей эксплуатируются при токах 700–1000 мА. Соответственно рабочие напряжения высоковольтного кристалла, как и ожидалось, оказались близки к 48 В (47.4 В для кристалла, ВАХ которого приведена на рис. 4). Измеренное

динамическое сопротивление этого кристалла составило 258 Ом).

Типичная зависимость квантового выхода кристалла от тока накачки приведена на рис. 5. Ход кривой совпадает с наблюдаемой зависимостью для кристаллов большой мощности, изготовленных из аналогичных гетероструктур по флип-чип технологии, с учетом разницы площадей элемента высоковольтного светодиодного кристалла и кристалла большой мощности. Так как форма кривой при достаточно равномерном распределении плотности тока по поверхности активной области кристалла и хорошо организованном отводе тепла из нее определяется свойствами гетероструктуры, можно сделать косвенный вывод о правильности результатов моделирования дизайна светодиодного элемента.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе рассказывается о разработке и изготовлении высоковольтного светодиодного кристалла флип-чип конструкции на основе гетероструктуры AlInGaN с топологией расположения контактных площадок, рассчитанной на основе численного моделирования. В кристалле применена двухуровневая схема расположения металлизации с промежуточным изолирующим слоем диэлектрика. Использование такой топологии позволяет размещать n - контактные площадки внутри области p -контакта, что повышает однородность распределения тока по активной области кристалла, а также минимизирует потери площади кристалла, занятого n -контактом. Применение комбинаций металлов с высоким коэффициентом отражения света на длине волны излучения светодиода для создания n - и p -контактов, а также токопроводящих полос позволяет увеличивать квантовый выход светодиодов. При рабочем токе светодиодов 20 мА падение напряжения на них составило величину, близкую к 48 В, что позволяет использовать их в схемах, рассчитанных на повышенные напряжения питания.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O.B. Shchekin, J.E. Epler, T.A. Trottier, T. Margalith, D.A. Steigerwald, M.O. Holcomb, P.S. Martin, M.R. Krames. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 071109 (2006).
- [2] J. Lv, C. Zheng, Q. Chen, S. Zhou, S. Liu. *Phys. Status Solidi*, **213**, 3150 (2016).
- [3] Y.J. Lee, J.M. Hwang, T.C. Hsu, M.H. Hsieh, M.J. Jou, B.J. Lee, T.C. Lu, H.C. Kuo, S.C. Wang. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **18**, 1152 (2006).
- [4] S.-M. Jeong, S. Kissinger, D.-W. Kim, S. Jae Lee, J.-S. Kim, H.-K. Ahn, C.-R. Lee. *J. Cryst. Growth*, **312**, 258 (2010).

- [5] C.H. Chiu, P.C. Yu, C.H. Chang, C.S. Yang, M.H. Hsu, H.C. Kuo, M.A. Tsai. *Opt. Express*, **17**, 21250 (2009).
- [6] J.K. Kim, T. Gessmann, E.F. Schubert, J.-Q. Xi, H. Luo, J. Cho, C. Sone, Y. Park. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 013501 (2006).
- [7] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина. *ФТП*, **43**, 1564 (2009).
- [8] J.J. Wierer, D.A. Steigerwald, M.R. Krames, J.J. O'Shea, M.J. Ludowise, G. Christenson, Y.-C. Shen, C. Lowery, P.S. Martin, S. Subramanya, W. Götz, N.F. Gardner, R.S. Kern, S.A. Stockman. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3379 (2001).
- [9] D.A. Zakheim, I.P. Smirnova, E.M. Arakcheeva, M.M. Kulagina, S.A. Gurevich, I.V. Rozhansky, V.W. Lundin, A.F. Tsatsulnikov, A.V. Sakharov, A.V. Fomin, A.L. Zakheim, E.D. Vasil'eva, G.V. Itkinson. *Phys. Status Solidi*, **1**, 2401 (2004).
- [10] S.J. Chang, C.S. Chang, Y.K. Su, C.T. Lee, W.S. Chen, C.F. Shen, Y.P. Hsu, S.C. Shei, H.M. Lo. *IEEE Trans. Adv. Packag.*, **28**, 273 (2005).
- [11] W.S. Wong, T. Sands, N.W. Cheung, M. Kneissl, D.P. Bour, P. Mei, L.T. Romano, N.M. Johnson. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2822 (2000).
- [12] J.-S. Ha, S.W. Lee, H.-J. Lee, H.-J. Lee, S.H. Lee, H. Goto, T. Kato, K. Fujii, M.W. Cho, T. Yao. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **20**, 175 (2008).
- [13] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, Е.Д. Васильева, А.Е. Черняков, А.С. Усиков. *ФТП*, **47**, 386 (2013).
- [14] R. Jaschke, K.F. Hoffmann. *PCIM Europe* (Nuremberg, Germany, 2016) p. 1300.
- [15] T. Zhan, Y. Zhang, J. Li, J. Ma, Z. Liu, X. Yi, G. Wang, J. Li. *J. Semiconductors*, **34**, 094010 (2013).
- [16] Y.-C. Chiang, B.-C. Lin, K.-J. Chen, S.-H. Chiu, C.-C. Lin, P.-T. Lee, M.-H. Shih, H.-C. Kuo. *Int. J. Photoenergy*, **2014**, 1 (2014).
- [17] M. Donofrio, J. Ibbetson, Z.J. Yao. *Patent US 8 368 100 B2* (Feb. 5, 2013).
- [18] D.A. Zakheim, G.V. Itkinson, M.V. Kukushkin, L.K. Markov, O.V. Osipov, A.S. Pavluchenko, I.P. Smirnova, D.A. Bauman. *Phys. Status Solidi*, **12**, 381 (2015).

Редактор А.Н. Смирнов

High-voltage AlInGaN LED Chips

L.K. Markova¹, M.V. Kukushkina¹, A.S. Pavlyuchenko¹, I.P. Smirnova¹, G.V. Itkinson², O.V. Osipov²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² ZAO «„IRSET-Center“ Innovation Company»,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract In this work, a high-voltage AlInGaN LED flip-chip has been developed and fabricated. The chip consists of 16 elements connected in series, each of which is a conventional light-emitting diode. At a total area of 1.25×1.25 mm the chip is intended for a working current of 20 mA and a forward voltage of 48 V. To improve the uniformity of a current distribution over the active region of elements in a chip as well as to minimize the loss in the area occupied by *n*-contact, the *n*-contact pads in elements are placed inside the *p*-contact thanks to the two-level layout of metallization with the intermediate insulating layer of a dielectric. The topology of contact pads has been developed based on the numerical simulations. An increase in the quantum efficiency of a chip is provided by the application of combination of metals with high reflectance at a wavelength of LED radiation, which are used for forming both *n*- and *p*-contacts and current-carrying stripes.