

Высокомощные синие флип–чип светодиоды на основе AlGaInN

© Д.А. Закгейм[¶], И.П. Смирнова, И.В. Рожанский, С.А. Гуревич, М.М. Кулагина,
Е.М. Аракчеева, Г.А. Онушкин⁺, А.Л. Закгейм⁺, Е.Д. Васильева^{*}, Г.В. Иткинсон^{*}

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

⁺ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур,
194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} ЗАО „Светлана–Оптоэлектроника“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 5 октября 2004 г. Принята к печати 28 ноября 2004 г.)

Сообщается о разработке конструкции и изготовлении светодиодного кристалла большой мощности с площадью активной области 1 мм^2 , излучающего на длине волны 460 нм. Конструкция кристалла разработана на основе численного моделирования и предназначена для монтажа флип–чип. Применение двухуровневой разводки n -контакта позволило получить рекордно низкое значение последовательного сопротивления (0.65 Ом) и высокую однородность распределения тока накачки. Светодиоды на основе разработанной конструкции работают в непрерывном режиме в диапазоне токов 0–2 А, при этом максимальная выходная оптическая мощность составила 430 мВт.

1. Введение

Существенный прорыв, произошедший в последние годы в области эпитаксиального выращивания высококачественных гетероструктур на основе AlGaInN, позволил получить высокие значения внешней квантовой эффективности светодиодов, излучающих в видимой и ближней ультрафиолетовой области. Так, при низких плотностях тока накачки для светодиодов, излучающих на длине волны 460 нм (400 нм), достигнуты значения эффективности свыше 50% (свыше 35%) [1]. Столь высокие эффективности делают возможным создание на основе таких светодиодов источников белого света, способных составить конкуренцию традиционным лампам накаливания, флуоресцентным и даже галогеновым лампам.

Однако помимо высокой квантовой эффективности для подобных применений от светодиодов требуется высокая мощность излучения. В то же время для всех существующих на данный момент гетероструктур на основе нитридов элементов III группы характерен довольно резкий спад эффективности с увеличением плотности тока накачки, что приводит к необходимости использования светодиодных кристаллов с большой площадью активной области. В этом случае на первый план выходит проблема поддержания приемлемой однородности плотности тока накачки по площади излучающего p – n -перехода. Дело в том, что светодиодные гетероструктуры, как правило, выращиваются на изолирующей сапфировой подложке, и проводимость тонкого (4–5 мкм) слоя n -GaInN недостаточно высока для обеспечения однородного распределения тока накачки по активной области в случае, если линейные размеры кристалла превышают 300–400 мкм. На решение этой проблемы направлены усилия многих исследовательских

коллективов. Так, фирма Lumileds разработала так называемую „встречно-штыревую“ конструкцию для своих мощных светодиодных кристаллов [2], фирма OSRAM использует метод лазерного отделения изолирующей подложки [3], что позволяет применить вертикальную конструкцию кристалла.

Помимо достижения однородного распределения тока накачки в светодиодах большой мощности должны быть решены еще несколько важных проблем. Так, очень существенным препятствием для дальнейшего повышения внешней эффективности светодиода является внутреннее отражение генерируемого светового излучения на границах полупроводника с воздухом и (или) с сапфировой подложкой. На повышение эффективности вывода излучения из светодиодного кристалла направлено множество работ; наиболее эффективными решениями представляются создание рассеивающих свет поверхностей [4], создание микрорезонатора внутри активной области [5], использование фотонного кристалла [6]. Важной задачей является также минимизация последовательного электрического сопротивления светодиода и создание условий для эффективного отвода тепла от активной области, так как требуемый диапазон рабочих токов составляет несколько ампер.

Для решения изложенных задач и создания мощных светодиодов наиболее перспективной представляется так называемая флип–чип конструкция излучающего кристалла [2,7], в которой обе контактные площадки к материалу n - и p -типа проводимости расположены с одной (лицевой) стороны и кристалл монтируется на теплоотвод лицевой стороной. При этом в качестве контакта к p -GaInN используется комбинация металлов с высокой отражающей способностью (обычно на основе Ag), а свет выводится через прозрачную сапфировую подложку. Такая конструкция позволяет в 1.6–2 раз повысить эффективность вывода излучения из кристалла

[¶] E-mail: mitya@quantum.ioffe.ru

по сравнению со „стандартным“ вариантом, использующим тонкий полупрозрачный p -контакт [8]. Кроме того, при монтаже флип-чип минимизируется тепловое сопротивление между активной областью светодиода и теплоотводом, так как тепло от p - n -перехода отводится через тонкий (0.1–0.3 мкм) слой GaN, а не через сапфировую подложку, обладающую низкой теплопроводностью.

2. Численное моделирование растекания тока

Таким образом, задачей данного исследования являлась разработка конструкции и изготовление светодиодного кристалла с площадью активной области $\sim 1 \text{ мм}^2$, предназначенного для монтажа флип-чип. При этом решалась задача одновременной минимизации последовательного сопротивления и достижения высокой однородности распределения плотности тока накачки. Было также уделено внимание минимизации площади пассивной области кристалла, занятой n -контактными площадками, а также повышению эффективности вывода света. При разработке конструкции использовалось численное моделирование трехмерной картины распределения тока в кристалле.

Используемая для расчетов численная модель основана на вычислении потенциалов и токов в трехмерной линейной сетке сопротивлений путем решения системы линейных уравнений Кирхгофа. В сетку включались сопротивления трех типов, соответствующие удельному объемному сопротивлению материала n -GaInN и удельным контактными сопротивлениям n - и p -контактов. Удельное объемное сопротивление p -GaInN отдельно не рассматривалось (входило в контактное сопротивление p -контакта), поскольку толщина p -слоя в светодиодных гетероструктурах на основе AlGaInN весьма мала и латеральным растеканием тока по этому слою можно пренебречь. Также в модель не вводилась вольт-амперная характеристика самого p - n -перехода, поскольку в режиме работы при больших плотностях тока (когда p - n -переход полностью открыт) он не вносит заметного вклада в общее дифференциальное сопротивление светодиода.

Использование специальных алгоритмов численного решения систем линейных уравнений (многофронтальный метод LU-разложения для разреженных матриц [9]) позволило рассчитывать сетки, содержащие до 10^5 узлов. Это в свою очередь дало возможность корректного описания трехмерного распределения плотности тока накачки в светодиодных кристаллах со сложной геометрией контактных площадок. Полученные расчетные распределения плотности тока по площади активной области кристалла сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными методом сканирования ближнего поля излучения светодиодного кристалла [10].

3. Изготовление экспериментальных образцов

Для определения параметров светодиодной гетероструктуры были изготовлены кристаллы средней мощности, имеющие простую прямоугольную форму p -контакта размером $350 \times 450 \text{ мкм}^2$. В этих кристаллах n -контакт имел форму „вилки“, охватывающей p -контакт с трех сторон. При изготовлении использовалась коммерческая структура на основе AlGaInN, излучающая на длине волны 460 нм. Процесс изготовления включал в себя вытравливание двухуровневой меза-структуры методом реактивного ионного травления в атмосфере $\text{Cl}_2:\text{BCl}_3:\text{Ar}$. Первое травление на глубину 0.5 мкм проводилось для вскрытия площадок под нанесение n -контакта. Второе травление на глубину 5–6 мкм (до сапфировой подложки) по всему контуру светоизлучающего кристалла проводилось с целью повышения эффективности вывода света из кристалла за счет дополнительного отражения света от боковых стенок меза-структуры, имеющих наклон 45° к вертикали [8].

Для формирования рисунков всех контактных площадок применялась взрывная фотолитография. В процессе изготовления контактов особое внимание уделялось обработке поверхности нитрида галлия с целью удаления поверхностных окислов перед нанесением металлов. Химическая обработка поверхности GaN перед нанесением p -контакта была двухступенчатой. Перед формированием фотолитографической маски образцы кипятились в растворе $\text{HCl}:\text{HNO}_3$ (3:1) в течение 10 мин, а после обрабатывались в растворе буферного травителя в течение 5 мин. Отражающий p -контакт состоял из тонкого (4 нм) слоя Ni и толстого (200 нм) слоя Ag, наносимых методом термического испарения. Отражательная способность такого контакта на длине волны 460 нм составляет $\sim 85\%$ для нормального падения света. В качестве n -контакта использовалась традиционная металлизация Ti/Al, наносимая методом магнетронного распыления в атмосфере Ar. Для получения низкоомного омического контакта n -поверхность GaN подтравливалась ионами аргона непосредственно перед напылением металлов. После отжига в атмосфере азота обе контактные площадки усиливались слоем Au.

В дальнейшем n - и p -контактные площадки, предназначенные для монтажа флип-чип, усиливались гальваническим слоем Au (толщиной 3 мкм), сапфировая подложка утоньшалась до толщины 150–200 мкм и разрезалась с помощью лазерной резки на отдельные кристаллы. Кристаллы монтировались на подкристалльные платы, представляющие собой чипы из окисленного кремния с нанесенной ответной разводкой контактных площадок. Полученные чипы в свою очередь напаивались на медный теплоотвод и закрывались линзой из эпоксидной смолы [11].

На рис. 1 приведены зависимости выходной оптической мощности и внешнего квантового выхода излучения светодиодов от тока накачки, измеренные в

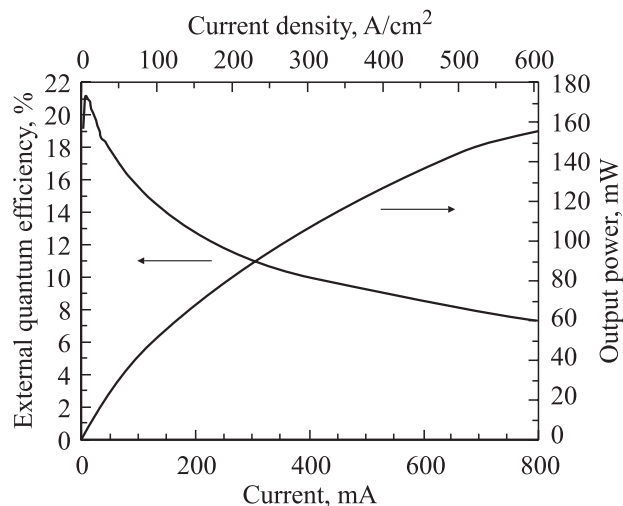


Рис. 1. Зависимость выходной оптической мощности и внешнего квантового выхода от тока накачки для светодиодов средней мощности.

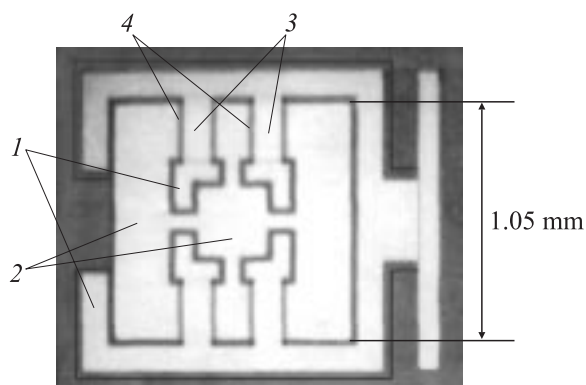


Рис. 2. Внешний вид светодиодного кристалла большой мощности.

непрерывном режиме. Как видно из рисунка, максимальная выходная оптическая мощность составила более 150 мВт при токе 800 мА, а максимальный квантовый выход $\sim 21\%$ при токе 10 мА. Дифференциальное последовательное сопротивление светодиодов в диапазоне токов 400–800 мА составляет 1.8 Ом. Было также исследовано распределение мощности оптического излучения по площади кристалла при различных токах накачки. Экспериментальные данные свидетельствуют о достаточно высокой однородности накачки вплоть до максимальных токов (800 мА) — отклонение мощности излучения от среднего значения не превышает 20%, что хорошо согласуется с результатами расчетов. Однако расчет показывает, что однородность распределения плотности тока накачки по активной области кристалла существенно ухудшается при увеличении линейных размеров активной области. Следовательно, для светодиодных кристаллов большой площади требуется применение более сложной топологии контактных площадок.

Разработанный на основе численного моделирования кристалл с площадью активной области $\sim 1 \text{ мм}^2$ изображен на рис. 2. В этом кристалле n -контакт (1) состоит из охватывающей p -контакт „вилки“, а также из четырех фрагментов, внедренных в область p -контакта (2) и имеющих форму „уголков“. Все эти фрагменты электрически соединяются с помощью специальных мостиков (3), проходящих над p -контактом и изолированных от него слоем диэлектрика (4). Такая конструкция позволяет достичь очень высокой однородности плотности тока накачки в активной области, а также минимизировать площадь пассивной области, занятой n -контактом, так как проводники, подводящие ток к середине кристалла, вынесены на второй уровень металлизации. Главной технологической трудностью в реализации предложенной конструкции является надежная изоляция между слоями металлизации. В настоящей работе в качестве изолирующего диэлектрика был выбран SiO_2 , наносимый методом магнетронного напыления на вращающуюся подложку в атмосфере $\text{H}_2 : \text{Ar}$. Известно, что диэлектрик, нанесенный таким способом, обладает более высокой плотностью и вероятностью электрического пробоя для него существенно меньше, чем для SiO_2 , напыленного в атмосфере чистого Ar [12]. Толщина слоя диэлектрика составляла 0.25 мкм. Наиболее критичным с точки зрения электрического пробоя является место, где слой диэлектрика перекрывает край p -контактной площадки. Поскольку толщина слоя металлизации p -контакта сравнима с толщиной диэлектрика, необходимо, чтобы край металла, формируемый с помощью взрывной фотолитографии, был пологим. Это достигается путем применения „обратной фотолитографической маски“, т. е. маски, у которой стенка имеет отрицательный наклон к поверхности. Помимо нанесения промежуточного диэлектрика, все остальные технологические этапы изготовления светодиодного кристалла (включая травление двухуровневой меза-структуры) были идентичны применяемым для кристалла средней площади. Аналогичным образом кристаллы монтировались на подкристалльные плиты и корпусировались.

4. Обсуждение результатов

На рис. 3 (слева) приведены расчетные распределения плотности тока накачки по активной области кристалла. Более темные участки на рисунке соответствуют большей плотности тока. На рис. 3 (справа) также представлено экспериментальное распределение оптической мощности излучения при токе накачки 1 А. Как результаты расчета, так и экспериментальные данные свидетельствуют о весьма высокой однородности распределения тока накачки. Лишь в непосредственной близости к n -контакту присутствуют области, где плотность тока (и соответственно мощность излучения) несколько превышает среднее значение. Расчетное среднеквадратичное отклонение плотности тока накачки от

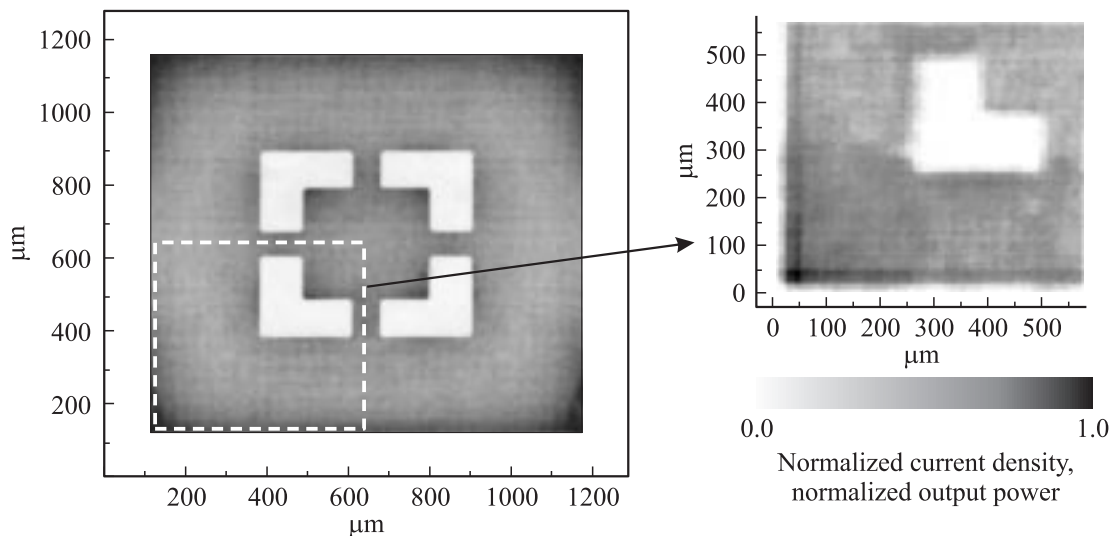


Рис. 3. Расчетное (слева) распределение плотности тока накачки по площади активной области светодиодного кристалла и экспериментальное (справа) распределение оптической мощности при токе 1 А.

среднего значения не превышает 20%. Отметим, что для встречно-штыревой конструкции, применяемой фирмой Lumileds, это отклонение больше, поскольку у основания штырей неизбежно существуют области, с трех сторон окруженные n -контактом, где плотность тока заметно превышает свое среднее значение. Кроме того, при такой конструкции соотношение пассивной и активной областей кристалла заметно хуже, чем в предложенном варианте с двухуровневой разводкой n -контакта.

Основные характеристики изготовленных мощных светодиодов приведены на рис. 4. На рис. 4, *a* приведена вольт-амперная характеристика светодиода, измеренная в непрерывном режиме. Значение динамического последовательного сопротивления составляет 0.65 Ом в диапазоне токов 0.5–2 А. Отметим, что это значение ниже по сравнению с заявленным фирмой Lumileds для светодиодов Luxeon (0.8 Ом) [13]. На рис. 4, *b* приведены ватт-амперные характеристики светодиодов, а также зависимости внешнего квантового выхода и КПД светодиодов от тока накачки. Полученные максимальные значения эффективности и КПД светодиодов составляют 17.5% и достигаются при токах накачки ~ 50 мА. Максимальная выходная оптическая мощность светодиода в непрерывном режиме работы составляет 430 мВт при токе 2 А. Следует отметить, что использованная в работе коммерческая гетероструктура на основе AlGaInN не является рекордной по своей внутренней квантовой эффективности, поэтому и полученные светодиоды не обладают рекордной эффективностью. Однако разработанная конструкция кристалла и теплоотвода позволяет светодиодам работать в диапазоне токов 0–2 А и дает рекордно низкие значения последовательного электрического сопротивления.

Заметим, что полученные максимальные значения внешней квантовой эффективности для кристаллов боль-

шой мощности (17.5%) несколько ниже, чем для кристаллов средней мощности (21%), несмотря на то что они изготовлены из одной и той же эпитаксиальной гетероструктуры. Это различие свидетельствует о том,

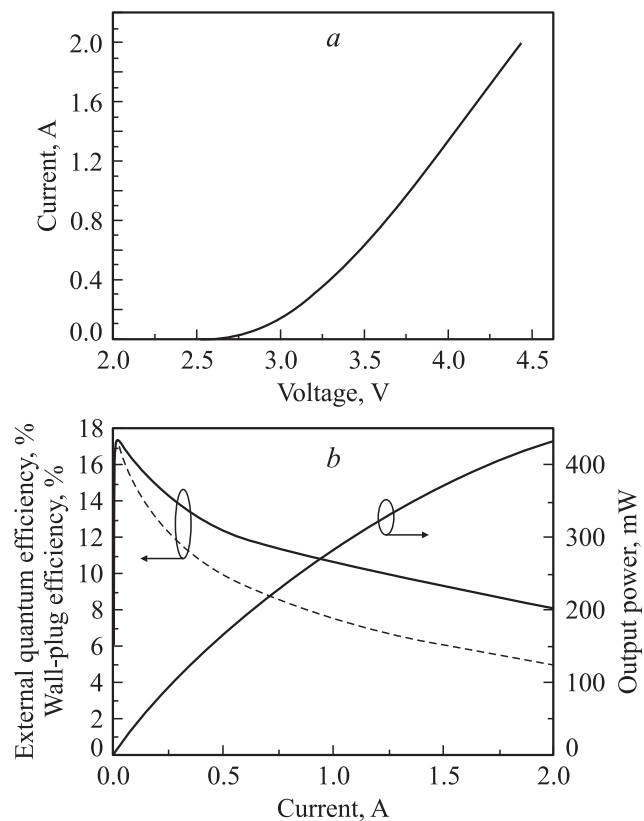


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика (*a*) и зависимость оптической мощности, внешнего квантового выхода (сплошная кривая) и КПД (штриховая) от тока накачки (*b*) для светодиодов большой мощности.

что эффективность вывода света падает с увеличением геометрических размеров кристалла, поскольку для кристаллов большого размера меньше удельный вклад в общий поток света, отраженного от наклонных боковых стенок меза-структуры [8]. Это означает, что в кристаллах большой площади на первый план выходит проблема повышения эффективности вывода света путем создания рассеивающих поверхностей на границе полупроводник/подложка и (или) полупроводник/металл, поскольку оптимизация наклонов боковых стенок меза-структуры уже не дает существенного результата.

5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирован светодиод на основе AlGaInN-гетероструктуры на сапфировой подложке, имеющий рекордно низкое последовательное сопротивление и высокую однородность распределения плотности тока накачки по активной области. Площадь активной области кристалла составляет 1 мм^2 , при этом используется двухуровневая разводка *n*-контактных площадок с промежуточной изоляцией слоем диэлектрика. Изготовленные светодиоды излучают на длине волны 460 нм и работают в диапазоне токов накачки 0–2 А (в непрерывном режиме). При этом максимальная выходная оптическая мощность составляет 430 мВт, а максимальная внешняя квантовая эффективность и КПД 17.5%.

Список литературы

- [1] M. Yamada, T. Mitani, Y. Narukawa, S. Shioji, I. Niki, S. Sonobe, K. Deguchi, M. Sano, T. Mukai. *Jap. J. Appl. Phys.*, **41**, L 1431 (2002).
- [2] 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. Gotz, N.F. Gardner, R.S. Kern, S.A. Stockman. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3379 (2001).
- [3] V. Harle, B. Hahn, J. Baur, M. Fehrer, A. Weimar, S. Kaiser, D. Eisert, F. Eberhard, A. Plossl, S. Bader. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5187**, 34 (2004); <http://compoundsemiconductor.net/articles/news/7/9/4/1>.
- [4] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E.L. Hu, S.P. DenBaars, S. Nakamura. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 855 (2004).
- [5] Y.C. Shen, J.J. Wierer, M.R. Krames, M.J. Ludowise, M.S. Misra, F. Ahmed, A.V. Kim, G.O. Mueller, J.C. Bhat, S.A. Stockman, P.S. Martin. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2221 (2003).
- [6] J.J. Wierer, M.R. Krames, J.E. Epler, N.F. Gardner, M.G. Craford, J.R. Wendt, J.A. Simmons, M.M. Sigalas. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3885 (2004).
- [7] I.P. Smirnova, D.A. Zakheim, I.V. Rozhanskii, M.M. Kulagina, E.M. Arakcheeva, S.A. Gurevich, A.L. Zakheim, E.D. Vasil'eva, G.V. Itkinson. *Proc. Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, 2004) p. 99.
- [8] V.A. Zabelin, D.A. Zakheim, S.A. Gurevich. *IEEE J. Quant. Electron.*, **40**, 1675 (2004).

- [9] T.A. Davis. *UMFPACK Version 4.1 User Guide*; <http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/umfpack/> (2003).
- [10] Г.А. Онушкин, Д.А. Закгейм, И.П. Смирнова, И.В. Рожанский, А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, А.Л. Закгейм. *Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы. Тез. докл. 3-й Всеросс. конф.* (М., 2004), с. 96.
- [11] Д.А. Закгейм, И.П. Смирнова, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина, С.А. Гуревич, А.Л. Закгейм, Е.Д. Васильева, Г.В. Иткинсон. *Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы. Тез. докл. 3-й Всеросс. конф.* (М., 2004) с. 138.
- [12] T. Serikawa, T. Yachi. *J. Electrochem. Soc.*, **131**, 2105 (1984).
- [13] Luxeon® III Emitter, *Technical Datasheet DS45*; <http://www.lumileds.com/pdfs/DS45.PDF>.

Редактор Л.В. Шаронова

High power blue light emitting diodes based on AlGaInN

D.A. Zakheim, I.P. Smirnova, I.V. Rozhansky, S.A. Gurevich, M.M. Kulagina, E.M. Arakcheeva, G.A. Onushkin*, A.L. Zakheim*, E.D. Vasil'eva⁺, G.V. Itkinson⁺

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
Scientific Engineering Center for Microelectronics,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ „Svetlana-Optoelectronica“,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract In the paper, we report on the design development and fabrication of high power light emitting diode chips having an active area of 1 mm^2 and operating at a wavelength of 460 nm. The chip design has been developed on the basis of numerical simulations and meant for flip-chip mounting. The implementation of a two-level setting of the *n*-type contact allowed for obtaining a record-breaking value of series resistance (0.65Ω) and rather uniform distribution of the pumping current. Light emitting diodes based on the developed chips operate in the dc regime in the range of currents of 0–2 A, the maximum output power being 430 mW.