

Мощные светодиодные кристаллы AlGaInN с двухуровневой металлизацией

© Д.А. Закгейм^{+*}†, Г.В. Иткинсон*, М.В. Кукушкин*, Л.К. Марков⁺⁺, О.В. Осипов*,
А.С. Павлюченко⁺, И.П. Смирнова⁺⁺, А.Е. Черняков[#], Д.А. Бауман[•]

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

* ООО „НТС Инновации“,
194223 Санкт-Петербург, Россия

[#] НТЦ микроэлектроники Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[•] ЗАО „Светлана-Оптоэлектроника“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 декабря 2013 г. Принята к печати 24 января 2014 г.)

Сообщается о разработке и изготовлении мощного светодиодного флип-чип кристалла AlGaInN с новой топологией расположения контактных площадок. Использование двухуровневой схемы расположения металлизации с промежуточным изолирующим слоем диэлектрика позволило значительно повысить эффективность использования площади гетероструктуры (до 78%). Применение численного моделирования растекания тока при разработке топологии кристалла позволило достичь высокой однородности распределения тока накачки по площади активной области, а также низких значений дифференциального сопротивления (0.3 Ом). На основе разработанных кристаллов были изготовлены светодиоды с максимальным значением внешней квантовой эффективности 60% и выходной оптической мощностью 542 мВт при рабочем токе накачки 350 мА.

1. Введение

Современный уровень развития технологии производства светодиодных кристаллов на основе твердых растворов AlGaInN позволяет успешно использовать их в качестве основы для изготовления источников белого света для целей общего освещения. Таким образом, белый светодиод на основе полупроводникового соединения AlGaInN становится реальной альтернативой традиционным источникам освещения, таким как лампа накаливания и люминесцентная лампа [1].

При массовом использовании светодиодных кристаллов AlGaInN на первый план выходят такие их параметры, как оптическая мощность излучения, эффективность, надежность, себестоимость. Это в свою очередь накладывает жесткие требования как на технологию изготовления самих полупроводниковых AlGaInN-гетероструктур, так и на конструкцию светодиодных кристаллов, которая становится все более сложной, чтобы отвечать постоянно растущим требованиям, предъявляемым к светоизлучающему прибору в целом.

В первую очередь светодиодный кристалл, служащий основой для мощного источника света, должен обладать достаточно большой площадью активной области, так как допустимая рабочая плотность тока накачки ограничена, с одной стороны, так называемым эффектом „efficiency droop“ [2,3], т.е. падением внутренней квантовой эффективности с ростом плотности тока накачки, и, с другой стороны, необходимостью эффективного отвода тепла от активной области светодиодной гетероструктуры [4].

Однако увеличение площади светодиодного кристалла приводит к необходимости усложнения топологии его контактных площадок для достижения приемлемой однородности распределения тока накачки, так как подавляющее большинство производимых AlGaInN-гетероструктур выращивается на изолирующей сапфировой подложке и растекание тока обеспечивается тонким (3-4 мкм) слоем *n*-GaN. Одновременно контактные площадки должны обеспечивать высокую эффективность вывода света из кристалла, а также обладать низким тепловым сопротивлением для эффективного отвода тепла от *p-n*-перехода.

На наш взгляд, наиболее удачной конструкцией светодиодного кристалла, отвечающей вышперечисленным требованиям, является так называемая флип-чип конструкция, в которой контактные площадки расположены с одной (тыльной) стороны кристалла, для изготовления контакта к *p*-области применяется комбинация металлов с высоким коэффициентом отражения, а свет выводится через прозрачную сапфировую подложку [5,6]. Такая конструкция обладает рядом преимуществ перед традиционной конструкцией „face-up“ [7], в которой для вывода света используется полупрозрачный *p*-контакт: для обеспечения равномерности растекания тока по активной области кристалла можно использовать любые необходимые толщины металлов *p*-контакта, активная область находится в непосредственной близости от теплоотвода.

В последние годы в литературе появились данные о разработке топологии мощных светодиодных кристаллов с двухуровневой металлизацией, что позволяет эффек-

† E-mail: mitya@quantum.ioffe.ru

тивнее использовать площадь AlGaInN-гетероструктуры (снизить себестоимость) за счет уменьшения пассивной области кристалла, занятой n -контактом и токопроводящими шинами, а также добиться более высокой однородности распределения плотности тока накачки по активной области [8].

В настоящей работе мы используем численное моделирование для разработки оптимальной топологии расположения контактных площадок на поверхности кристалла с площадью активной области 1 мм^2 . При этом решаются три основные задачи:

1) оптимизируются однородность распределения тока накачки по площади p - n -перехода и полное дифференциальное сопротивление кристалла;

2) минимизируется пассивная область светодиода кристалла, т.е. доля его площади, не используемая напрямую для генерации светового излучения;

3) оптимизируется эффективность вывода света из кристалла большой площади.

Для решения первой и второй задач предлагается изготовить n -контакт кристалла в виде несвязанных фрагментов внутри p -контактной площадки, а электропроводящий коммутирующий слой, соединяющий эти фрагменты между собой, вынести на второй уровень металлизации, изолированный от p -контакта слоем диэлектрика. Для решения третьей задачи оба слоя металлизации, обеспечивающие электрический контакт к n - и p -слоям полупроводника, должны иметь высокий коэффициент отражения света на рабочей длине волны, в таком случае минимизируются оптические потери, поскольку тыльная сторона светодиода кристалла будет иметь сплошное зеркальное покрытие. Двухуровневая металлизация позволяет сделать отражающими в том числе технологические зазоры между n - и p -контактными площадками. Дополнительный положительный эффект от ее применения — возможность непосредственного теплового контакта указанных областей зазоров с теплоотводом. Этот эффект весьма существен, поскольку в кристаллах флип-чип конструкции плотность тока имеет максимальные значения вблизи краев контактных площадок и именно эти области наиболее опасны с точки зрения возможного локального перегрева [9].

Используемая численная модель и результаты расчетов по ней подробно обсуждаются во второй части статьи. Там же описываются разработанная на основе расчетов оптимизированная конструкция и топология светодиода кристалла. Третья часть посвящена экспериментальной проверке предложенной конструкции, в ней подробно обсуждается технология изготовления полупроводниковой AlGaInN-гетероструктуры и светодиода кристалла на ее основе. Полученные экспериментальные данные и характеристики светодиодов на основе разработанных кристаллов обсуждаются в четвертой части статьи.

2. Оптимизация топологии и геометрических параметров светодиода кристалла

В светодиодах кристаллах конструкции флип-чип контакты к p - и n -слоям полупроводника располагаются с одной стороны кристалла, а свет выводится через прозрачную сапфировую подложку. Для формирования n -контактов в эпитаксиальных слоях вытравливается мезоструктура до слоя n -GaN, что приводит к уменьшению площади активной области кристалла. Поскольку светодиодные гетероструктуры на основе нитрида галлия отличаются высоким удельным сопротивлением слоя p -GaN, а также относительно высоким контактным сопротивлением p -контакта, протекание электрического тока через p - n -переход и активную область гетероструктуры возможно только в непосредственной близости от p -контактной площадки. Таким образом, средняя плотность тока в активной области определяется соотношением тока накачки и площади p -контактной площадки. При заданных рабочем токе и общей площади кристалла снижение средней плотности тока в активной области возможно только за счет увеличения доли площади, занимаемой p -контактной площадкой в общей площади кристалла.

Помимо средней плотности тока в активной области важным параметром для оптимизации конструкции светодиода кристалла является среднеквадратичное отклонение плотности тока в активной области. Наличие областей, в которых плотность тока значительно превышает среднее значение, существенно снижает эффективность и надежность прибора в целом, поскольку приводит к локальному перегреву и, как следствие, возникновению утечек и ускоренной деградации гетероструктуры.

Поскольку растекание тока по активной области осуществляется по относительно тонкому слою полупроводника, во всех светодиодах кристаллах наблюдается неоднородность плотности тока в активной области. Максимальные значения плотности тока достигаются вблизи n -контактов, по мере удаления от n -контакта плотность тока экспоненциально падает. Характерная длина падения плотности тока зависит от соотношения контактного сопротивления p -контакта и удельного сопротивления n -слоя GaN и может изменяться в зависимости от технологии изготовления контактов, а также особенностей роста гетероструктур. Таким образом, расстояние между n -контактными площадками должно определяться в зависимости от требований к однородности плотности тока в активной области.

Минимальная ширина n -контактных площадок должна быть примерно равна удвоенной характерной длине стекания электрического тока на n -контактные площадки из n -слоя, которая также определяется соотношением контактного сопротивления и объемного сопротивления n -слоя. Уменьшение ширины контактных площадок ниже

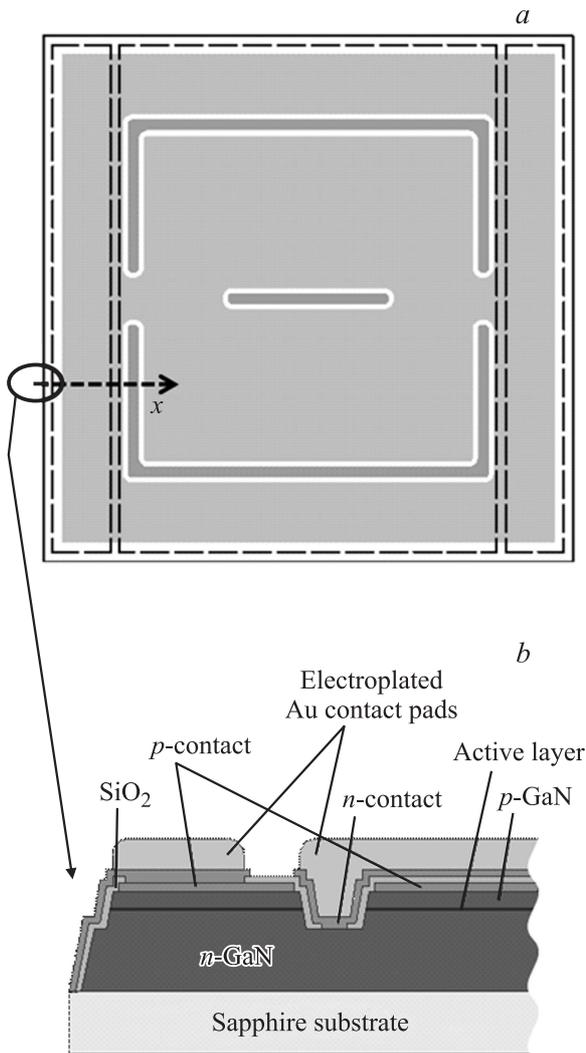


Рис. 1. Расположение контактных и монтажных площадок в светодиодном кристалле (a) и сечение кристалла вдоль оси *x* (b).

указанной величины приводит к значительному росту дифференциального сопротивления кристалла в целом.

Таким образом, в качестве основы для оптимизации нами была выбрана топология кристалла, в которой *p*-контакт образует связную область и занимает максимально возможную часть площади кристалла, *n*-контакт образован протяженными полосами, форма которых позволяет минимизировать среднее расстояние между точками *p*-контакта и *n*-контактом. Предложенная форма и расположение *n*- и *p*-контактных площадок на поверхности светодиодного кристалла приведены на рис. 1. Верхняя часть рисунка представляет собой вид сверху на светодиодный кристалл. Светло-серым тоном показан *p*-контакт, темно-серым — *n*-контакт. Штриховыми линиями обозначены контуры площадок для монтажа кристалла, находящиеся на втором уровне металлизации. Две полосы по краям кристалла предназначены для

распайки *p*-контакта, центральный прямоугольник — для распайки *n*-контакта. При этом центральная площадка изолирована от нижележащего слоя *p*-контакта диэлектриком. В нижней части рисунка схематически изображено сечение кристалла, показывающее взаимное расположение *n*- и *p*-слоев металлизации, а также разделяющего их диэлектрика в вертикальной плоскости.

Все геометрические параметры *n*-контактных площадок, такие как длина и ширина полосок, ширина зазора между ними, расстояние от центра кристалла до площадок, оптимизировались на основе численного моделирования трехмерного растекания тока. 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*-GaIn ($\rho_n = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и справочные значения удельных объемных сопротивлений металлов контактов [10].

Модель, используемая для расчета плотности тока, основывалась 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*-GaIn и контактным металлам, а также удельным контактным сопротивлениям *n*- и *p*-контактов. Сам *p*–*n*-переход предполагался полностью открытым, и его реальная вольт-амперная характеристика в модель не вводилась. Это упрощение представляется оправданным, поскольку при работе светодиода на высоких плотностях тока накачки дифференциальное сопротивление *p*–*n*-перехода мал по сравнению с удельным объемным сопротивлением слоев полупроводника. Оптимизация проводилась для кристалла с размерами активной области $1095 \times 1095 \text{ мкм}$, при этом в реальном кристалле часть площади занята под технологические дорожки, используемые для разделения кристаллов. Полное дифференциальное сопротивление диода ограничивалось величиной 0.3 Ом , а площадь активной области должна была составить 1 мм^2 .

На рис. 2, a приведены результаты расчетов двумерного распределения плотности тока, протекающего через *p*–*n*-переход при оптимизированных значениях геометрических параметров. Полный ток через кристалл был выбран равным 350 мА . На рис. 2, b приведены одномерные профили распределения плотности тока в двух отмеченных сечениях *x* и *y*. Как видно из этого рисунка, плотность тока имеет максимум вблизи краев *n*-контактных площадок и спадает по мере удаления от них. Неоднородность ее распределения можно охарактеризовать среднеквадратичным отклонением от среднего значения, составляющего 35 А/см^2 . В результате оптимизации геометрических параметров контактных площадок, минимальное полученное среднеквадратичное отклонение составило 7 А/см^2 , т.е. 20% от средней плотности тока. Полное расчетное дифференциальное

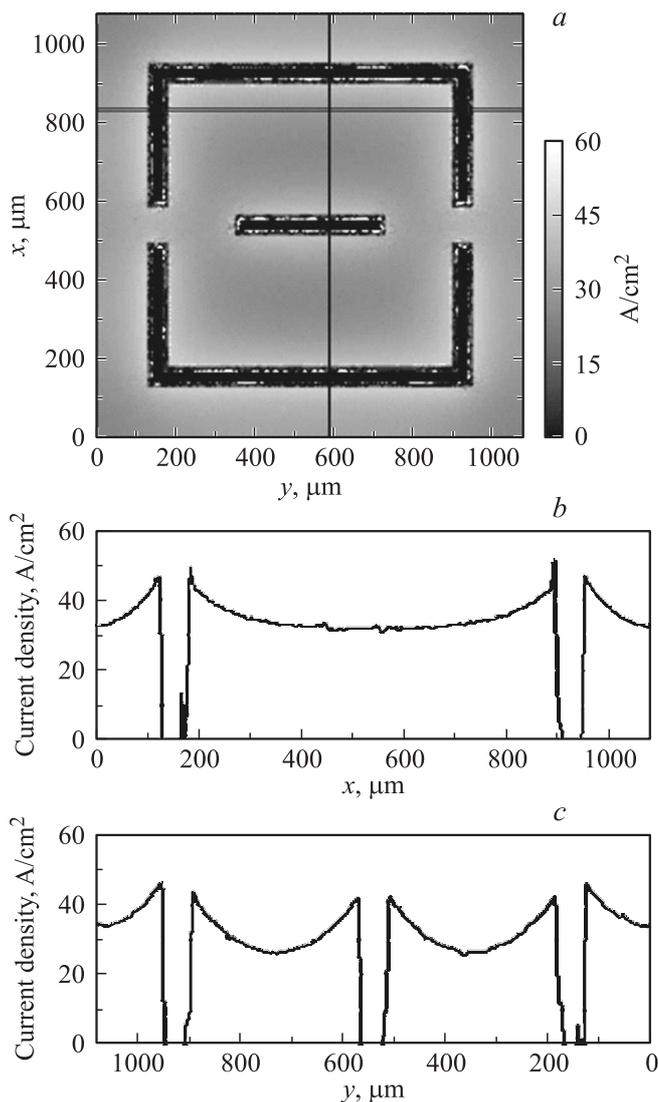


Рис. 2. Расчетное распределение плотности тока в активной области светодиодного кристалла (a) и профили расчетного распределения плотности тока в активной области вдоль осей x (b), y (c).

сопротивление кристалла при этом составило 0.27 Ом, а доля используемой под активную область площади кристалла — 78%.

3. Технология изготовления светодиодного кристалла

Разработанная на основе численного моделирования конструкция светодиодного кристалла была протестирована экспериментально. Для изготовления кристаллов использовалась светодиодная AlGaInN-гетероструктура, выращенная методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на установке E300 производства фирмы Veeco. Для достижения максимальной эффективности вывода света структура выращивалась

на профилированной сапфировой подложке [11]. Гетероструктура содержала следующие слои: нелегированный слой GaN толщиной ~ 1 мкм, слой n -GaN толщиной ~ 3 мкм, вспомогательную сверхрешетку (СР) из 10 слоев n -GaInN (3/2.5 мкм), активную область, состоящую из 5 квантовых ям InGaInN толщиной 1.6 нм, разделенных барьерами GaN толщиной 2 нм, сверхрешетку из 10 пар слоев p -AlGaInN/GaN и слой p -GaN толщиной 0.1 мкм. Использование сверхрешетки в качестве активной области позволяет минимизировать падение внутренней квантовой эффективности с ростом тока накачки. Подробно конструкция используемой гетероструктуры со сверхрешеткой в активной области и ее свойства описаны в [12,13]. Температура роста квантовых ям InGaInN подбиралась для получения электролюминесценции на длине волны 450 нм.

Постростовая обработка включала в себя изготовление фотолитографических масок, травление мезаструктуры, нанесение металлических слоев и слоя диэлектрика, формирование усиленных контактных площадок для монтажа флип-чип.

Для вскрытия слоя n -GaN (формирования мезаструктуры) использовалось реактивное ионное травление в индукционно-связанной плазме в атмосфере $\text{Cl}:\text{BCl}_3:\text{Ar}$ на установке Oxford Plasmalab 100. Особое внимание уделялось наклону стенок мезаструктуры, поскольку они впоследствии покрываются слоями металлизации и диэлектрика. При наклоне, близком к вертикальному, может произойти разрыв слоя металлизации и (или) диэлектрика. Путем оптимизации режимов задубливания фотолитографической маски и режимов травления был получен наклон стенки мезаструктуры, близкий к 45° .

Далее методом электронно-лучевого напыления на p -поверхность наносился высокоотражающий p -контакт на основе ITO/Ag (1.5 нм/250 нм). Технология его изготовления, позволяющая достичь коэффициента отражения $> 95\%$ на рабочей длине волны, описана нами ранее в [14]. Поверх p -контакта методом плазмохимического осаждения формировался слой диэлектрика, в качестве которого был выбран SiO_2 . Толщина диэлектрического слоя была подобрана в отдельных экспериментах по изготовлению плоских конденсаторов, имеющих площадь контактов $\sim 1 \text{ мм}^2$. Было определено, что начиная с толщины ~ 0.3 мкм более 95% таких конденсаторов не имеют электрических утечек, а величина напряжения пробоя составляет > 100 В. Увеличение толщины слоя диэлектрика до 0.35 мкм позволило также достичь максимума коэффициента отражения света зеркальными элементами для нормальных лучей за счет достижения конструктивной интерференции в пленке SiO_2 .

Далее в диэлектрике с помощью химического травления через фотолитографическую маску вскрывались окна на месте расположения n -контактов. Контакт состоял из комбинации металлов Ti/Ag (2 нм/200 нм) и наносился методом электронно-лучевого распыления. Благодаря использованию серебра он, так же как и p -

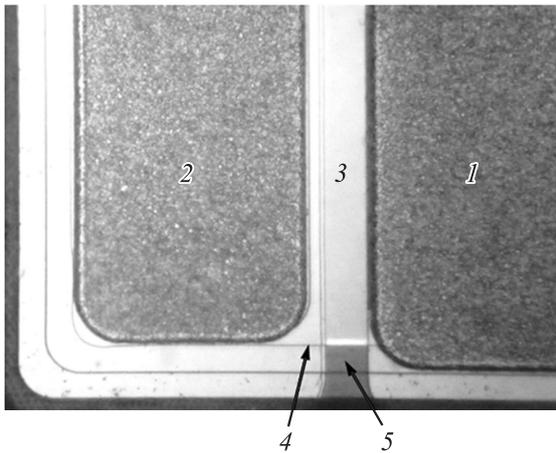


Рис. 3. Микрофотография фрагмента светодиода с двухслойной металлизацией и изолирующим слоем. Пояснения в тексте.

контакт, обладал высоким коэффициентом отражения света.

На рис. 3 приведена микрофотография фрагмента светодиода с *n*-контактной площадкой (1), *p*-контактной площадкой (2). Слой диэлектрика закрывает всю область *p*-контакта, за исключением *p*-контактной площадки (2), включая область (3) — зазор между *p*- и *n*-контактными площадками. Граница *p*-контакта обозначена 4. Также диэлектриком закрывается не занятая контактными площадками поверхность гетероструктуры (5).

Далее методом гальванического осаждения Au формировались усиленные монтажные *n*- и *p*-площадки, кристалл монтировался методом монтажа флип-чип на кремниевую подкристалльную плату и помещался в корпус.

4. Результаты и обсуждение

Экспериментальная проверка результатов оптимизации геометрических параметров кристалла включала измерение вольт-амперных характеристик для оценки дифференциального сопротивления кристалла и исследование пространственного распределения интенсивности электролюминесценции для оценки однородности растекания тока. С этой целью изготовленные образцы светодиодных кристаллов, смонтированные на кремниевых подкристалльных платах, устанавливались в корпус светодиода без формирования заливной линзы и исследовались при помощи оптического микроскопа фирмы „Mitutoyo“. Для регистрации пространственного распределения интенсивности электролюминесценции использовалась фотокамера Canon EOS 5D с 12 Мрх1 КМОП матрицей. Матрица оборудована RGBG фильтрами Байдера. Регистрировался сигнал по каналу, отвечающему за синюю область видимого спектра. Измерения проводились при токе накачки 350 мА.

Результаты измерений приведены на рис. 4, *b*. Измеренная интенсивность излучения светодиодных кристаллов имеет естественные флуктуации, связанные с рельефом на поверхности сапфировой подложки. Поэтому для более корректного сравнения результатов численного моделирования и экспериментальных результатов экспериментальные данные необходимо усреднить по нескольким соседним сечениям. Так, на рис. 4, *b* приведены распределения плотности тока и интенсивности излучения вдоль оси кристалла, усредненные по полосе шириной 200 мкм.

Из этого рисунка видно, что экспериментально полученные профили интенсивности излучения кристалла весьма хорошо согласуются с расчетными профилями плотности тока накачки, что свидетельствует о корректности численной модели и правильной оценке параметров, в нее входящих. Экспериментально полученное

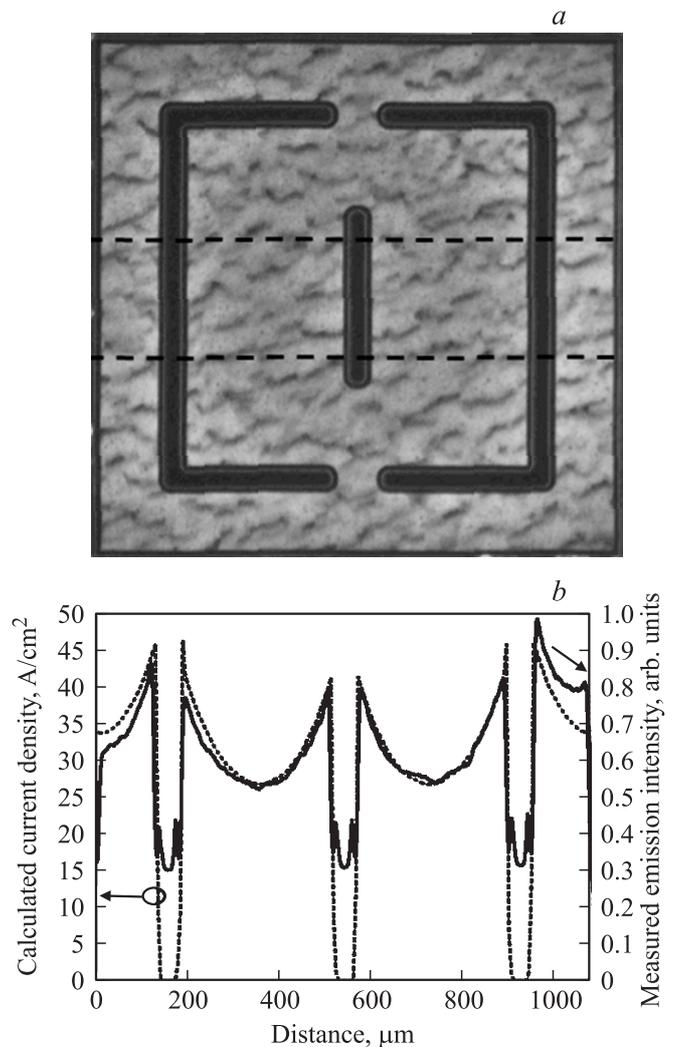


Рис. 4. Распределение интенсивности электролюминесценции в изготовленном кристалле (а) и сравнение нормированных профилей расчетного распределения плотности тока в активной области и измеренной интенсивности электролюминесценции светодиодного кристалла (b).

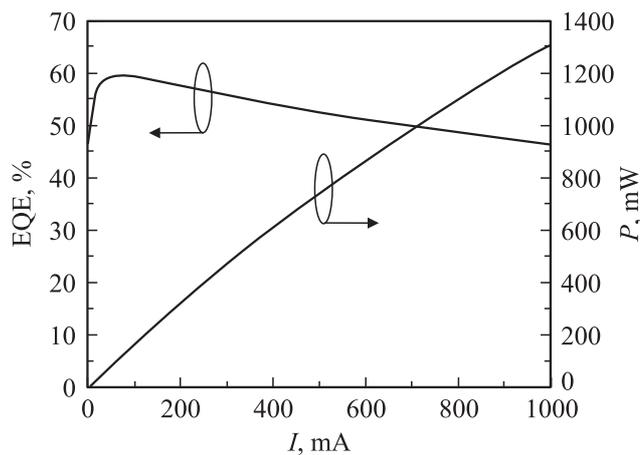


Рис. 5. Зависимости внешней квантовой эффективности EQE и выходной оптической мощности P излучения светодиодов от тока накачки I .

значение дифференциального сопротивления кристалла (0.3 Ом) также хорошо согласуется с расчетной величиной (0.27 Ом).

На рис. 5 приведены результаты измерения выходной оптической мощности и внешней квантовой эффективности светодиодов, изготовленных из разработанных кристаллов. Как видно из рисунка, максимальная квантовая эффективность излучения светодиодов составила 60%. При рабочем токе 350 мА оптическая мощность и квантовая эффективность светодиодов составили 542 мВт и 55% соответственно.

5. Заключение

Таким образом, в данной работе рассказывается о разработке и изготовлении мощного светодиодного кристалла флип-чип на основе AlGaInN-гетероструктуры с новой топологией расположения контактных площадок, рассчитанной с привлечением численного моделирования.

В кристалле применена двухуровневая схема расположения металлизации с промежуточным изолирующим слоем диэлектрика. Использование такой топологии позволило значительно повысить эффективность использования площади гетероструктуры (до 78%) и при этом достичь высокой степени однородности распределения тока накачки по площади активной области, а также низких значений дифференциального сопротивления.

Благодаря использованию ранее разработанных технологий изготовления высокоэффективных AlGaInN гетероструктур со сверхрешеткой в активной области, а также технологии формирования p -контактных площадок с высоким коэффициентом отражения ($> 95\%$) на основе разработанных кристаллов были получены светодиоды с рекордно высокими значениями внешней квантовой эффективности (60%) и выходной оптической мощности на рабочем токе накачке (542 мВт).

Список литературы

- [1] Ф. Шуберт. *Светодиоды* (М., Физматлит, 2009) с. 10.
- [2] A.Y. Kim, W. Götz, D.A. Seigerwald, J.J. Wierer, N.F. Gardner, J. Sun, S.A. Stockman, P.S. Martin, M.R. Krames, R.S. Kern, F.M. Steranka. *Phys. Status Solidi A*, **188**, 15 (2001).
- [3] M.H. Kim, M.F. Schubert, Q. Dai, J.K. Kim, E.F. Schubert, J. Piprek, Y. Park. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 183 507 (2007).
- [4] А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Н. Мизеров, В.Г. Половинкин, И.В. Рожанский, А.Е. Черняков. *ФТП*, **44** (3), 390 (2010).
- [5] 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. *ФТП*, **39** (7), 885 (2005).
- [6] И.П. Смирнова, Д.А. Закгейм, М.М. Кулагина, Е.М. Аракчеева. *Тез. докл. 5-й Всеросс. конф.* (М., 2007) с. 63.
- [7] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина. *ФТП*, **43** (11), 1564 (2009).
- [8] M. Donofrio, J. Ibbetson, Z.J. Yao. Patent US 8,368,100 B2, (Feb. 5, 2013).
- [9] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, Е.Д. Васильева, А.Е. Черняков, А.С. Усиков. *ФТП*, **47** (3), 386 (2013).
- [10] Л.И. Майссел, Р. Глэнг. *Технология тонких пленок* (М., Сов. радио, 1977) т. 2, с. 305.
- [11] D.S. Wu, W.K. Wang, K.S. Wen, S.C. Huang, S.H. Lin, R.H. Horng, Y.S. Yu, M.H. Pan. *J. Electrochem. Soc.*, **153**, G765 (2006).
- [12] D.A. Zakheim, A.S. Pavluchenko, D.A. Bauman. *Phys. Status Solidi C*, **8**, 2340 (2011).
- [13] D.A. Zakheim, A.S. Pavluchenko, D.A. Bauman, K.A. Bula-shevich, O.V. Khokhlev, S.Yu. Karpov. *Phys. Status Solidi A*, **209**, 456 (2012).
- [14] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина. *ФТП*, **43** (11), 1564 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

High power AlGaInN LED chips with two-level metallization

D.A. Zakheim⁺⁺, G.V. Itkinson^{}, M.V. Kukushkin^{*},
L.K. Markov⁺⁺, O.V. Osipov^{*}, A.C. Pavluchenko⁺,
I.P. Smirnova⁺⁺, A.E. Chernyakov[#], D.A. Bauman[•]*

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} NTL Innovation LLC,
194223 St. Petersburg, Russia

[#] SHM R & E Center,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

[•] Svetlana Optoelectronics JSC,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract In this paper, we report on development and fabrication of high power AlGaInN LED flip-chips with a new configuration of contact pads. Introduction of a two-level metallization scheme with a dielectric interlayer allowed for significant improving in active to total area ratio (up to 78%). Numerical simulations of current spreading were employed in chip topology development to obtain good current spreading uniformity over an active layer and low series resistance of chip (0.3Ω). Light emitting diodes based on the considered chips have demonstrated maximum external quantum efficiency 60% and optical power 542 mW at operation current of 350 mA.