

## **Разработка энергоэффективного светильника на основе наногетероструктур InGaN/GaN/AlGaN**

*Каргин Н. И., Рыжук Р. В., Коновалов А. М., Кузнецов А. Л., Макаров А. А., Павлов А. Ю.*

*В работе обоснована актуальность применения источников освещения на базе светодиодов. Рассмотрены конструктивно-технологические аспекты изготовления светодиодов, связанные с оптимизацией эпитаксиальных слоёв гетероструктуры InGaN/GaN/AlGaN, качеством омических контактов, выбором подложки и способом монтажа кристаллов для улучшения теплоотвода. Изготовлена светоизлучающая матрица на базе разработанной конструкции светодиодного кристалла и керамики AlN. Представлены результаты измерений светодиодного кристалла в синем свете на длине волны 470 нм и в белом свете с нанесённым люминофорным покрытием и сформированной собирающей линзой.*

Стремительное развитие технологий создания оптоэлектронных приборов на основе нитрида галлия позволит в ближайшем будущем произвести замену традиционных светотехнических устройств светодиодными [1]. Энергосберегающие светильники на основе светодиодов обладают рядом существенных преимуществ перед лампами накаливания и люминесцентными лампами: сверхдолгим сроком службы (до 100 тыс. часов), низкими энергопотреблением и уровнем рассеиваемой мощности, высокой светоотдачей, высоким уровнем пожаробезопасности, высокой механической прочностью, отсутствием нагрева, экологической безопасностью. Однако изготовление светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN/AlGaN связано с решением ряда технологических и конструкторских задач. Во-первых, необходимо обеспечение оптимальных условий синтеза эпитаксиальных слоёв GaN, позволяющих минимизировать количество дефектов в растущих плёнках [2,3]. Во-вторых, важно сформировать омические контакты, обеспечивающие одинаковую плотность тока через всю площадь р-п-перехода, а также равномерное распределение плотности тока между электродами чипа [4]. Качество омических контактов определяет эффективную площадь излучения света светодиодной структурой и в конечном итоге светоотдачу чипа и его надёжность. В-третьих, необходимо обеспечить хороший теплоотвод при монтаже излучающего кристалла. В-четвертых, решить ряд технологических вопросов, обеспечивающих эффективный выход света из кристалла и т. д. [4].

В условиях отечественного производства задача усложняется отсутствием подложек карбида кремния (SiC), близких по кристаллической структуре к GaN и обладающих высокой теплопроводностью. Поэтому рост гетероструктур в большей части осуществляется на пластинах сапфира (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), теплопроводность которого на порядок ниже. Организовать теплоотвод от р-п-перехода при прямой посадке светодиодного чипа на держатель становится практически невозможно. В этой связи перспективным является применение так называемой «flip-chip» (обратный монтаж) посадки чипа светодиода на держатель, что приводит к особенностям в распределении электронных потоков через р-п-переход.

Несмотря на достаточно большой объём работ, посвящённых исследованию конструкции «flip-chip» и технологии создания светодиодных гетероструктур на основе GaN [5,6], на сегодняшний день практически отсутствуют методы комплексного решения вышеперечисленных задач на стадии производства излучающих кристаллов и сборки светодиодных светильников.

Учитывая важность и актуальность отмеченной проблематики, целью настоящей работы является разработка конструкции и технологии изготовления светодиодных чипов на основе гетероструктур InGaN/GaN отечественного производства.

### Формирование светодиодных структур

Эпитаксиальные плёнки *n*-GaN толщиной 3 мкм, легированные кремнием с концентрацией электронов  $N_D \sim (5-7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , были выращены на поверхности (0001) подложек  $\text{Al}_2\text{O}_3$  методом МОС-гидридной эпитаксии (metal-organic chemical vapor deposition – МОСVD) на установке D-180 компании Veeco. Далее этим же методом была синтезирована гетероэпитаксиальная структура с 5 квантовыми ямами (МКЯ) GaN/InGaN толщиной 3-4 нм каждая. Запирающим слоем, ограничивающим электроны, служил слой AlGaN *p*-типа проводимости толщиной  $\sim 0,03$  мкм, легированный магнием. В качестве контактного слоя использовался слой GaN *p*-типа проводимости, также легированный магнием с концентрацией дырок  $N_A \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Омические контакты наносились резистивным методом при температуре структуры  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении в камере  $P = 10^{-4} \text{ Па}$ . К *n*-слою светодиодной структуры была нанесена система из металлов Ti (0,2 мкм)/ Al (1,5 мкм)/ Ni (0,4 мкм)/ Au (1,0 мкм), к *p*-слою – система Ti (0,6 мкм)/ Au (2,0 мкм). Отжиг контактов проводился в атмосфере азота при температурах 850  $^\circ\text{C}$  и 450  $^\circ\text{C}$  в течение 30 секунд к *n*- и *p*-слоям соответственно.

Топология контактов формировалась взрывной фотолитографией с использованием двухслойной маски.

Далее был нанесён пассивирующий слой  $\text{SiO}_2$  (рис. 1).

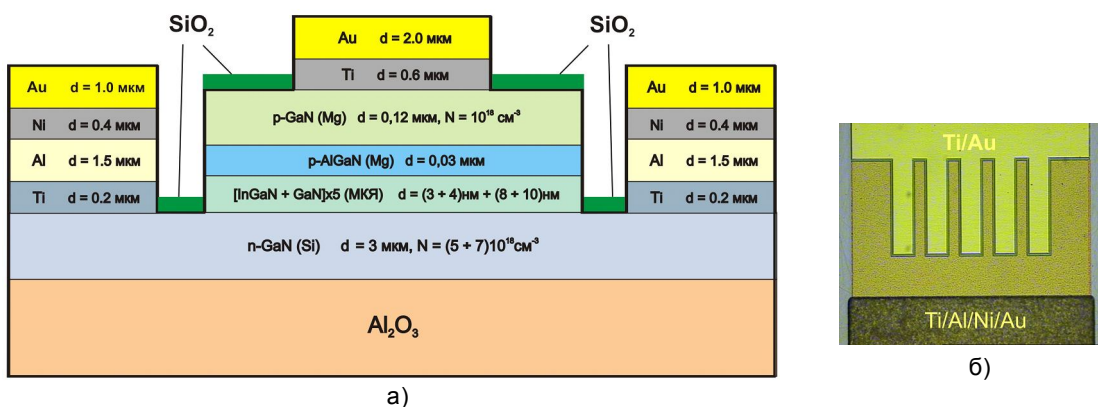


Рис. 1

Светодиодная гетероструктура: а) конструкция гетероструктуры; б) топология контактов светодиода

Методом дисковой резки пластина со светодиодами была разделена на чипы, каждый из которых состоял из пяти элементарных светодиодов. Суммарная площадь чипа составила 0,1 мм<sup>2</sup>. Зазор между анодом и катодом составил 5 мкм.

Известно, что для устранения термической деградации светодиодного чипа требуется его монтаж на радиатор или теплопоглощающую подложку. При этом *p*-*n*-переход отдельного чипа необходимо максимально приблизить к теплоотводящей поверхности. С этой целью использовалась технология обратного монтажа («flip-chip»), позволяющая расположить *p*-*n*-переход практически на теплоотвод. Выход излучения в этом случае происходит через основание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , коэффициент прозрачности которого в области данных длин волн составляет 0,8 [7]. Теплоотводящей поверхностью служила керамика на основе AlN, имеющая теплопроводность 170 Вт/м·К и позволяющая тем самым значительно увеличить эффективность светодиода при больших токах.

На основе изготовленных образцов была собрана светодиодная матрица, включающая в себя последовательное соединение 56 чипов, смонтированных методом обратного монтажа на теплопроводящей керамике AlN, что является основой конструкции светодиодной лампы (рис. 2).

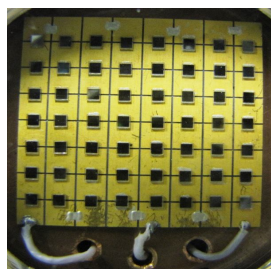


Рис. 2  
Внешний вид  
светодиодной матрицы

### *Экспериментальные результаты и их обсуждение*

Полученные экспериментально спектры электролюминесценции светодиодных чипов в зависимости от длины волны  $\lambda$  представлены на рис. 3.

Измерения проводились по методике, описанной в работе [7]. В результате было установлено, что интегральная оптическая мощность на длине волны 470 нм составила значение порядка 52 мВт, к. п. д. 5% (режим измерения – сила тока  $I = 350$  мА, напряжение  $U = 3,5$  В). Положение максимума спектра электролюминесценции соответствует излучению в синей области. Светоотдача таких чипов в белом свете (нанесён люминофор и сформирована собирающая линза) составляет не более 50 лм/Вт. Довольно низкие значения светоотдачи и к. п. д. образцов связаны с множеством факторов. Одним из них является повреждение кристаллической структуры светодиода в процессе разделения пластины на чипы, в результате которого образуются механические дефекты, препятствующие ходу излучательной рекомбинации.

Другим не менее значимым фактором является эффект локализации тока вблизи краёв контактов к n-области светодиода [8]. Проведённые в работе [5] исследования показали удовлетворительную корреляцию между численным моделированием растекания тока по площади кристалла с учётом контактных и объёмных сопротивлений материала и экспериментальными данными. Также в работе [5] показано, что вблизи границы n-контакта интенсивность излучения оказывается вдвое больше, чем на расстоянии 200 мкм от него.

Ещё одной причиной может являться довольно большая площадь пассивной области меза-структуры, зависящая от угла наклона боковой стенки относительно поверхности подложки. Так в работе [9] были исследованы светодиодные структуры на основе GaN с углублённой меза-структурой, расположенной под различными углами относительно поверхности подложки. Такое расположение структуры позволяет эффективно отклонять фотоны от боковых поверхностей эпитаксиальных слоёв в направлении нормали к поверхности за счёт полного внутреннего отражения. Показано, что наибольшая эффективность светодиодов достигается при расположении мезы под углом  $30^\circ$ . Однако авторы указывают на факт увеличения квантовой эффективности прибора при любых углах расположения мезы относительно поверхности подложки, подтверждая экспериментальные результаты теоретическими расчётами.

Совокупность перечисленных выше причин оказывает значительное влияние на выход квантовой эффективности светодиодов. Преодоление этих проблем заключается как в решении задач по оптимизации конструкции светодиодной гетероструктуры, так и технологии посткристалльной обработки пластин.

На рис. 4 представлены диаграммы углового распределения силы света (полученные при различных значениях силы тока) в вертикальной плоскости излучения ячейки светодиодной матрицы.

В таблице представлены основные характеристики светодиодных чипов, изготовленных на основе гетероструктуры InGaN/GaN/AlGaN.

Таблица

Характеристики светодиодных чипов на длине волны 470 нм

Наименование параметра	Значение
Максимальная сила света (кд)	0,842
Осевая сила света (кд)	0,839
Угол по уровню 0.5 (град)	122,5
Световая эффективность (лм/Вт) на 350 мА	2,5
Интегральная оптическая мощность (мВт) при 350 мА	51,7
Интегральный световой поток (лм) при 350 мА	2,7
КПД излучения (%)	4,7

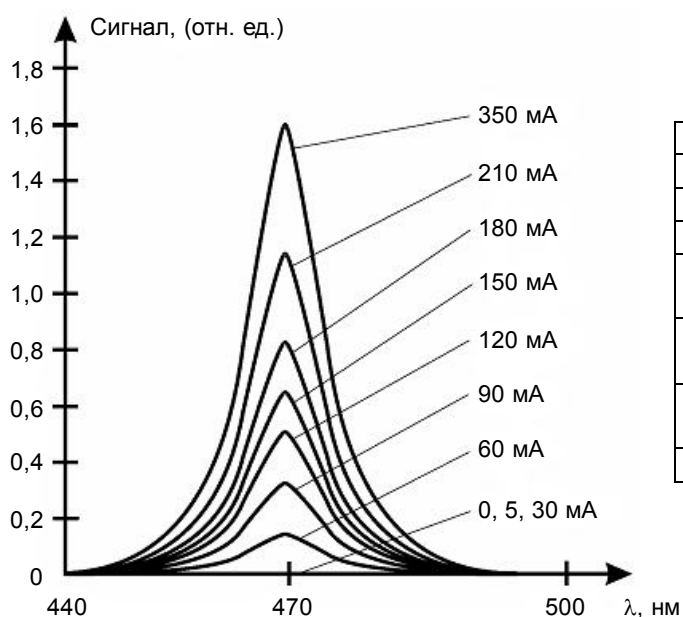


Рис. 3

Спектры электролюминесценции светодиодных чипов на основе гетероструктур InGaN/GaN/AlGaN

Заключение

В работе проведено исследование влияния конструкции чипа и технологии изготовления гетероструктур InGaN/GaN/AlGaN на световые характеристики светодиодных чипов, являющихся основой светодиодных матриц. Показано, что средняя величина светоотдачи чипов в белом свете составила значение не менее 50 лм/Вт, при этом к. п. д. образцов составил 5% (режим измерения – сила тока  $I = 350$  мА, напряжение  $U = 3,5$  В). Низкие значения светоотдачи и к. п. д. образцов связаны как с технологическими факторами, включая механические дефекты, вносимые технологией посткристальной обработки, так и конструктивными особенностями самой структуры, в том числе углом наклона мезы относительно подложки.

Показано, что выбранная топология контактов к р-области светодиодной структуры позволяет добиться достаточно равномерного распределения интенсивности излучения по площади контактной площадки.

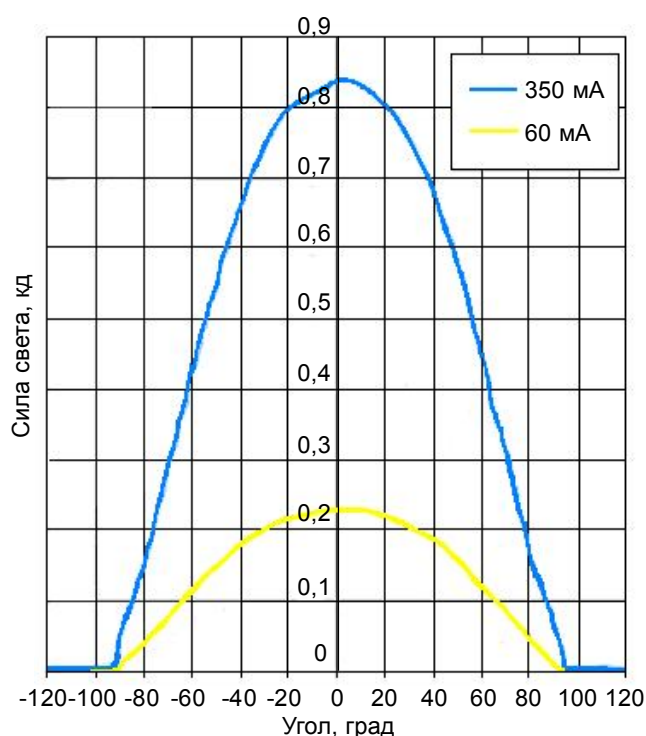


Рис. 4

Диаграммы направленности излучения ячейки светодиодной матрицы при токах 60 и 350 мА

На основе разработанной матрицы из светодиодов была собрана лампа со стандартным цоколем E27, являющаяся элементом бытовых осветительных устройств и включающая в себя печатную плату с преобразователем переменного напряжения 220 В в постоянное напряжение 150 В (рис. 5).



Рис. 5

Светодиодная лампа с цоколем E-27

Авторы выражают благодарность Е. Н. Енюшкиной и В. А. Романько за помощь в проведении экспериментальных работ.

Работы выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников НИЯУ МИФИ» при поддержке Министерства образования и науки РФ, в том числе в рамках ГК № 16.552.11.7005 от 29.04.2011г., ГК № 16.513.11.3103 от 03.10.2011г. и Договора № 13.G36.31.0005 от 22.10.2010 г.

### *Литература*

1. Туркин А. Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. – 2011. – № 5.
2. Бузынин Ю. Н., Дроздов Ю. Н., Дроздов М. Н. и др. Гетероэпитаксиальные плёнки GaN на подложках кремния с буферными слоями на основе пористого материала // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72. – № 11. – С. 1583-1587.
3. Near Field Photoluminescence Investigation of Surface Defects in InGaN/GaN Quantum Wells / Mun Seok Jeong, Hyun Jun Kim, Young-Woon Kim, etc. // Journal of the Korean Physical Society. – V. 47. – August 2005. – P. S209-S212.
4. Никифоров С. Г. Разработка методик контроля деградации характеристик светодиодов на основе твёрдых растворов AlGaInP и AlGaInN // Диссертация канд. техн. наук. – Москва. – 2006. – 158 с.
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. Высокомощные синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN // ФТП. – 2005. – Т. 39. – № 7. – С. 885-889.
6. 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. Optical cavity effects in InGaN/GaN quantum-well-heterostmcture flip-chip light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 82. – P.2221.
7. С. Г. Никифоров. Проблемы, теория и реальность светодиодов // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С. 176-185.
8. И. П. Смирнова. Высокоэффективные излучающие приборы на основе гетероструктур AlGaInN // Диссертация канд. физ-мат. наук. – Санкт-Петербург. – 2007. – 153 с.
9. Jae-Soong Lee, Richmond Joonhee Lee, Sunghwan Kim, Heonsu Jeon. GaN Light-Emitting Diode with Deep-Angled Mesa Sidewalls for Enhanced Light Emission in the Surface-Normal Direction // Electron Devices. IEEE. – 2008. – V. 55. – Issue: 2. – P. 523-526.