

# Светодиодные чипы для производства высокоэффективных белых светодиодов



**Л. К. Марков,**  
к. ф.-м. н., ведущий инженер  
e-mail: l.markov@mail.ioffe.ru



**И. П. Смирнова,**  
к. ф.-м. н., ведущий инженер  
e-mail: irina@quantum.ioffe.ru

**Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр НТС Инновации»**

*В настоящей работе рассмотрены AlGaInN светодиодные чипы, предназначенные для производства высокоэффективных мощных белых светодиодов. Приведены основные конструкции светоизлучающих кристаллов, а также рассмотрены базовые стадии их изготовления. Обсуждены основные проблемы, возникающие при конструировании чипов и разработке технологии формирования отражающих омических контактов и мезоструктур, и предложены пути их решения. Приведены основные электрооптические параметры разработанных светодиодов.*

**Ключевые слова:** AlGaInN гетероструктуры, светодиоды, «flip-chip»-кристаллы, отражающие контакты, наноразмерные слои ИТО.

Первая половина девяностых годов XX века может по праву считаться началом века нитридной электроники. Разработанная в то время технология получения гетероструктур на основе нитридов металлов III группы обозначила широкую перспективу их использования в разных классах приборов. К настоящему моменту известные успехи достигнуты в области СВЧ и силовой электроники [1]. В то же время наиболее коммерчески востребованным продуктом остаются AlGaInN-светодиоды. Безусловно, такое положение обеспечивается целым рядом широко известных факторов: их экономичностью, долговечностью, экологической безопасностью, компактностью и т. д. Однако, для понимания столь значительного прогресса, достигнутого светодиодами за прошедшие два десятилетия, следует отметить, что GaN — широкозонный полупроводник. Именно ширина запрещенной зоны порядка 3,4 эВ приводит к высоким значениям энергии собственного излучения (лежащего в синей и ультрафиолетовой областях спектра) этого класса светодиодов и позволяет создавать на их основе источники белого света для общего освещения. Как и в люминесцентных лампах с этой целью достаточно нанести на светоизлучающие поверхности прибора слой люминофора. Кстати, именно большая ширина запрещенной зоны позволила материалу GaN в уже упомянутые девяностые годы занять место темной

лошадки в соревновании с явным фаворитом того времени — ZnSe. Приз превзошел все, даже самые смелые ожидания: многомиллиардная индустрия источников света продолжает развиваться стремительными темпами. На рынке представлено множество компаний, начиная с китайских, выпускающих в основном дешевые, маломощные и, к сожалению, не всегда качественные изделия, и заканчивая ставшими уже признанными фирмами-лидерами, в номенклатуре которых есть высокоэффективные изделия, воплотившие в жизнь последние технические разработки в этой области. К ним помимо пионера рынка, японской фирмы Nichia, можно по праву отнести компании Cree, Inc (США), Philips Lumileds Lighting Company (США), OSRAM Opto Semiconductors (Германия). Стоит также отметить, что поскольку внедрение светодиодов как наиболее эффективных и безопасных источников света сопряжено с колоссальными экологическими преимуществами в виде экономии невозобновляемых источников энергии и отсутствием проблем утилизации, существует ряд государственных программ по поддержке исследований в этой области. Тем не менее, несмотря на то, что уже сейчас лучшие коммерческие образцы белых светодиодов декларируют светоотдачу на уровне 150 лм/Вт, ее теоретический предел превышает это значение более чем в 2 раза. И это при том, что эффективность современных светодиодов

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| p-GaN:Mg $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (0,1 мкм)   |                                      |
| p-GaN  | Токоограничивающий слой<br>2 периода |
| p-Al <sub>0,02</sub> Ga <sub>0,98</sub> N              |                                      |
| u-GaN – барьер (8 нм)                                  | Активная область<br>5 периодов       |
| u-In <sub>0,12</sub> Ga <sub>0,88</sub> N – яма (3 нм) |                                      |
| p-GaN – барьер (4,5 нм)                                | Буферная сверхрешетка<br>10 периодов |
| p-InGaN – яма (3,5 нм)                                 |                                      |
| n-GaN: Si $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (4,5 мкм)  |                                      |
| u-GaN (0,5 мкм)  |                                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> подложка (500 мкм)      |                                      |

Рис. 1. Схема расположения и толщины слоев стандартной светодиодной гетероструктуры. Символами «u-, n-, p-» обозначены нелегированный, n- и p-легированные слои, соответственно.

на несколько порядков выше эффективности их первых предшественников. В чем же причина такого существенного разрыва между теорией и практикой, и каковы возможные пути его сокращения?

Изготовление полупроводниковых светодиодных гетероструктур осуществляется методом газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (наиболее распространенный англоязычный термин: Metal Organic Chemical Vapor Deposition – MOCVD). Конечным продуктом эпитаксиального выращивания являются светодиодные гетероструктуры, представляющие собой пластины сапфира со слоями нитрида галлия (GaN), и тройных твердых растворов алюминия, галлия и азота (AlGaInN) и индия, галлия и азота (InGaInN). На рис. 1 приведена упрощенная схема расположения и указаны толщины слоев стандартной гетероструктуры. Эффективность работы светодиодов и их характеристики определяются как качеством исходных эпитаксиальных светодиодных гетероструктур AlGaInN, так и технологией изготовления приборов на их основе.

Очевидно, что за прошедшее время накоплен огромный арсенал средств, направленных на повышение эффективности светодиодов на всех стадиях их производства: роста гетероструктур, постростовой обработки (изготовление кристаллов) и их постановки в корпус. В настоящей статье мы хотим коснуться основных проблем, возникающих на стадии изготовления светоизлучающих кристаллов, а также коснуться приемов их решения. Можно выделить несколько основополагающих принципов, лежащих в основе конструирования всех типов светодиодных кристаллов.

### Минимальное сопротивление

Эффективный светодиод преобразует электрическую энергию в световую с минимальными потерями, а, следовательно, для исключения джоулевых потерь он должен характеризоваться минимальными значениями электрического сопротивления. Эта не-

простая в силу целого ряда причин задача решается оптимизацией как технологии нанесения контактов к n- и p-областям GaN, так и топологии расположения контактных площадок.

### Минимум поглощения света в кристалле

Максимальная доля света, сгенерированного в активной области кристалла, должна быть выведена из него через световыводящие поверхности без потерь на поглощение света внутри кристалла. Основным физическим эффектом, ограничивающим эффективность вывода света в светодиодных кристаллах на основе AlGaInN гетероструктур, является эффект полного внутреннего отражения на границе материала с высокой оптической плотностью (полупроводника) и материала с низкой оптической плотностью (сапфировой подложки и/или воздуха). Это приводит к тому, что в случае абсолютно гладкой поверхности лишь 4% излучения может попасть в конус выхода и беспрепятственно покинуть кристалл. Свет, распространяющийся в полупроводнике под углом, превосходящим угол полного внутреннего отражения, оказывается захваченным в волновод, образованный полупроводниковым слоем и распространяется в нем, постепенно затухая. Следовательно, весьма важным направлением представляется внесение в конструкцию кристалла каких-либо элементов, способствующих эффективному рассеянию света, распространяющегося в этом волноводе. В последнее время наиболее востребованным приемом в этой области становится рост на подложках из профилированного сапфира. Таким способом создается эффективное рассеяние света на поверхности раздела сапфир-полупроводник.

### Эффективный теплоотвод

Поскольку эффективность работы и долговечность светодиодов падают с ростом температуры его активной области, необходимо организовать эффективное отведение тепла от нее. Минимизация теплового сопротивления между p-n-переходом и теплоотводом – краеугольный камень правильного проектирования конструкции светодиода.

### Оптимальное растекание тока по поверхности активной области кристалла

Дополнительные требования к конструкции светоизлучающего кристалла предъявляет необходимость максимально равномерного распределения тока по поверхности его активной области. Однородность плотности тока обеспечивает снижение влияние эффекта падения квантового выхода светодиодной гетероструктуры с увеличением плотности тока (явление, упоминаемое в англоязычной литературе как «efficiency droop»). Более равномерное распределение тока также позволяет избежать локального перегрева участков активной области, что, как только что обсуждалось выше, снижает эффективность и долговечность светодиода. Отметим, что вообще для AlGaInN светоизлучающих кристаллов проблема организации равномерного

растекания тока по поверхности активной области имеет особый статус в силу двух факторов. Во-первых, латеральная проводимость верхнего р-слоя гетероструктуры крайне мала из-за относительно низкого уровня легирования слоя р-GaN и его незначительной толщины, составляющей десятые доли микрона (см. рис. 1). Поэтому в кристаллах распределение тока в пределах р-области происходит исключительно по слоям р-контакта. Во-вторых, требования эффективного использования площади кристалла, а также минимизации потерь на поглощение излучения в п-контакте предполагает сокращения поверхности, занимаемой им, что, соответственно, приводит к появлению участков значительного продольного протекания тока по сравнительно тонкому и высокоомному слою п-GaN. Это явление сказывается особенно негативно на работе высокоомных диодов большой площади, приводя к «непрокачке» центральной области р-п-перехода. С целью определения оптимальной конфигурации и топологии контактных площадок необходимо привлекать средства компьютерного моделирования растекания электрического тока в светоизлучающем кристалле.

Подавляющее большинство производимых в мире гетероструктур AlGaInN выращиваются на сапфировых подложках, являющихся диэлектриками. Непроводящий характер сапфира диктует необходимость создания мезаструктуры путем удаления участков слоя р-проводимости, расположенных на внешней стороне гетероструктуры, чтобы получить доступ к расположенному ниже п-слою и в конечном итоге пропустить ток через активную область (р-п-переход). Традиционная и используемая большинством производителей светодиодов, так называемая «face-up»-конструкция светодиодного кристалла предполагает вывод света через прозрачный контакт, наносимый со стороны гетероструктуры, а сам кристалл располагается на корпусе сапфировой подложкой вниз (рис. 2). Эта конструкция была предложена фирмой Nichia еще в начале 1990-х гг. [2]. Для минимизации потерь света на внешней стороне сапфировой подложки наносится зеркальное покрытие. Очевидным недостатком рассматриваемой конструкции является поглощение света при прохождении его через верхнюю световыводящую и одновременно контактную поверхность. Поскольку вывод света осуществляется через контакт (а светодиоды, как мы уже упоминали, требуют однородного распределения тока по поверхности активной области), то всегда при-

ходится идти на компромисс между проводимостью и прозрачностью р-контактов, а также организовывать дополнительные металлургические непрозрачные токонесущие шины на поверхности кристалла. Кроме того, данная конструкция кристалла предполагает организацию на его поверхности контактных площадок для разварки токонесущих проволок. Но все же основной проблемой кристаллов «face-up»-конструкции можно считать недостаточно эффективное отведение тепла от активной области кристалла, что приобретает особое значение в условиях эксплуатации светодиодов при повышенных токах. Причина кроется в малой теплопроводности сапфировой подложки, отделяющей активную область от теплоотвода (см. рис. 2). Как известно, сапфир уступает по этому параметру многим материалам, в том числе, и кремнию.

Альтернативным вариантом конструкции светодиодного кристалла, свободным от указанных недостатков, является так называемая обращенная или «flip-chip»-конструкция, в которой светодиодный кристалл монтируется на теплоотвод своей лицевой стороной, т. е. эпитаксиальными слоями, а свет выводится через прозрачную сапфировую подложку (рис. 3). В этом случае в качестве материала р-контакта может использоваться металл, обладающей высокой отражающей способностью в сине-фиолетовой области спектра (серебро, алюминий). При этом снимается ряд характерных для кристаллов «face-up»-конструкции проблем: для обеспечения равномерности растекания тока по поверхности р-области можно использовать любые необходимые толщины металлов р-контакта, активная область находится в непосредственной близости от теплоотвода (отделена от него р-слоем с толщиной в десятые доли микрона и металлами р-контакта с высоким значением теплопроводности).

В кристаллах «flip-chip»-геометрии величина коэффициента отражения света от контактов приобретает особое значение. Как уже обсуждалось выше, из-за высокого показателя преломления света в структурах AlGaInN и эффекта полного внутреннего отражения существенная часть излучения не может сразу покинуть кристалл и испытывает многократные отражения внутри него, соответственно, отражаясь и от контактов. Вследствие этого обстоятельства даже небольшие относительные изменения отражательной способности контакта могут существенно повлиять на эффективность прибора в целом. В последние годы применение слоев прозрачного и одновременно прово-

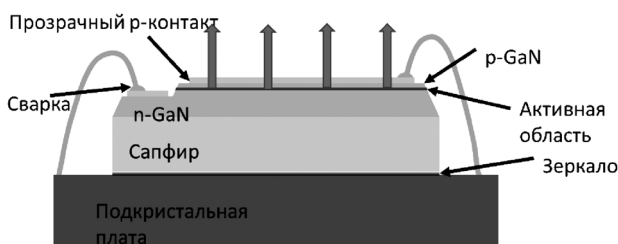


Рис. 2. Схематическое изображение конструкции светодиода с верхним прозрачным контактом

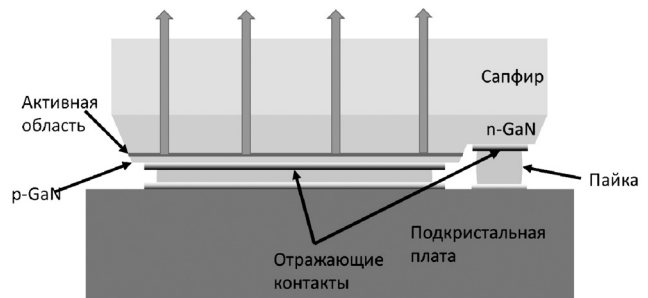


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции светодиода с выводом света через сапфировую подложку

дающего материала — оксида индия и олова (ITO) — в качестве р-контактного материала становится одним из основных технологических приемов в производстве светодиодов на основе AlGaInN [3,4]. Как было показано в [5], использование в качестве р-контакта комбинации ITO/Ag позволяет достичь коэффициента отражения на уровне 94% (в диапазоне длин волн собственного излучения светодиода) и значительно увеличить квантовый выход приборов. Дополнительный вклад в прирост внешнего квантового выхода светодиодного кристалла достигается применением отражающего п-контакта (в настоящее время нами разработана и используется технология получения п-контактов с коэффициентом отражения на уровне 80%).

Отметим, что «flip-chip»-геометрия кристалла позволяет получить ряд дополнительных преимуществ по сравнению с «face-up»-кристаллами:

- Во-первых, применение изолирующих слоев дает возможность подойти к решению задачи оптимизации формы п-контактов совершенно на другом уровне, поскольку в этом случае они могут представлять собой несвязные области практически любой требуемой геометрии, и могут быть полностью окружены областями р-контакта. Такая топология контактных площадок позволяет достичь минимального значения последовательного электрического сопротивления светоизлучающего кристалла, минимизировать площадь кристалла за счет доставки тока к п-контакту по второму слою металлизации (без необходимости неэффективного расходования площади кристалла для прокладки токопроводящих шин) и одновременно получить оптимальное растекание тока по активной области кристалла. Данный прием невозможен в случае «face-up»-кристаллов, поскольку вывод света в них осуществляется через контактную поверхность, которая должна быть максимально прозрачна.
- Во-вторых, разводка п- и р-контактов через дополнительный изолирующий слой позволяет сделать всю тыльную поверхность кристалла отражающей (зеркало перекрывает неизбежные зазоры между п- и р-контактами, не замыкая их электрически. Тем самым минимизируется поглощение света кристаллом и повышается его эффективность.
- В-третьих, монтаж кристалла на плате-носителе без контактных проволок помимо удобства для сборки светодиода, и перспективности с точки зрения массового производства дает определенные преимущества при изготовлении белых светодиодов, поскольку упрощает процесс нанесения люминофорного покрытия.

Синие светодиоды, содержащие «flip-chip»-кристаллы собственной конструкции, разработанные и оптимизированные нами с учетом всех вышеперечисленных требований, демонстрируют значения внешнего квантового выхода, превышающие 60%. При этом динамическое сопротивление светодиода — менее 0,3 Ом, тепловое сопротивление между р-п-переходом

и подкристалльной платой — менее 1 К/Вт, неравномерность распределения тока в активной области кристалла, характеризующаяся как среднеквадратическое отклонение плотности тока по поверхности активной области, — менее 20% средней рабочей величины. Общая площадь кристалла — 1,28 мм<sup>2</sup>, площадь активной области — 1 мм<sup>2</sup>.

Дополнительный прирост эффективности «flip-chip»-кристаллов может быть получен путем удаления сапфировой подложки и создания рассеивающего микрорельефа на открывшейся свободной п-поверхности полупроводника. Для удаления сапфировых подложек обычно применяется метод, использующий поглощаемое GaN материалом излучение мощного коротковолнового (как правило, эксимерного) лазера (процедура, получившая название в англоязычной литературе как lift-off). Как было показано в [6], внешний квантовый выход светодиодного кристалла с удаленной подложкой существенно возрастает.

Таким образом, «flip-chip»-кристаллы обладают рядом преимуществ, использование которых на стадии моделирования конструкции светодиода позволяет производить мощные, эффективные источники света. В заключении хочется подчеркнуть, что все лидеры рынка источников твердотельного освещения ведут разработки и имеют в своей номенклатуре светодиоды «flip-chip»-дизайна.

#### Список использованных источников

1. Ю. Федоров. Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // Электроника НТБ, № 2, 2011.
2. S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama // Jpn. J. Appl. Phys. 34, L797, 1995.
3. S. Hiraoka, H. Okagawa, T. Joichi, US Patent No. 2010/0012971 A1 (Jan. 21, 2010).
4. D. W. Kim, Y. J. Yoon, D. H. Oh, J. H. Kim, US Patent No. 7,998,761 B2 (Aug. 16, 2011).
5. Л. К. Марков, И. П. Смирнова, А. С. Павлюченко, Е. М. Аракчеева, М. М. Кулагина. ФТП 43, 1564 (2009).
6. И. П. Смирнова, Л. К. Марков, Д. А. Закгейм, Е. М. Аракчеева, М. Р. Рымалис. ФТП 40, 1397 (2006).

#### LED Chips Intended for Production of High-efficiency White LEDs

**L. K. Markov**, PhD, principal engineer, Scientific-Technical Center NTL Innovation, Limited Liability Company.

**I. P. Smirnova**, PhD, principal engineer, Scientific-Technical Center NTL Innovation, Limited Liability Company.

In this paper, AlGaInN LED chips intended for production of high-power efficiency white LEDs are considered. The main designs of light-emitting chips as well as basic stages of chip fabrication are given. The key problems both of chip designing and of reflective ohmic contacts and mesa-structure formation processing are discussed. The ways allowing us to overcome these problems are suggested. The main electrical and optical parameters of the developed LEDs are considered.

**Keywords:** AlGaInN heterostructures, LEDs, flip-chip design, reflective contacts, ITO nanodimensional layers.