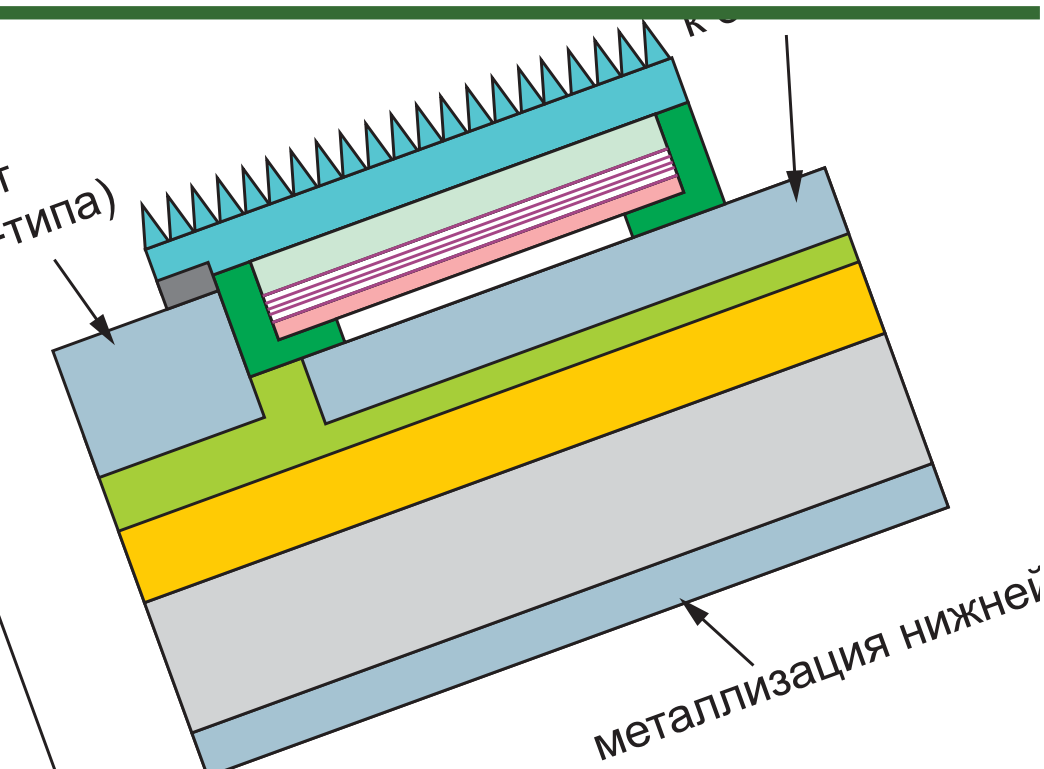


Андрей Туркин

# Гетероструктуры GaN от Plessey Semiconductors —

## технология, продукты, перспективы

В статье рассматривается технология выращивания гетероструктур на основе нитрида галлия и его твердых растворов на кремниевых подложках, обрабатываемая в последнее время компанией Plessey Semiconductor Ltd. Приведен краткий обзор светодиодных кристаллов на основе указанных гетероструктур, недавно представленных компанией на рынок, а также описывается новое направление работы, которое уже в ближайшем будущем может вывести ее в лидеры среди производителей компонентов на основе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов.



### Введение

О светодиодах за последние десять лет вышло достаточно много публикаций, что, в основном, обусловлено возросшим интересом к данным компонентам как к источникам света. Интерес этот, главным образом, объясняется бурным развитием физики и технологии светодиодов (СД) — важнейшего направления в современной полупроводниковой электронике и оптоэлектронике, нашедшего широкое применение в промышленности и обещающего в совсем недалеком будущем покорить новые отрасли.

Особенно стоит отметить период с середины 90-х годов XX в., когда в физике и технике полупроводников произошел прорыв благодаря созданию гетероструктур на основе нитрида галлия (GaN) и его твердых растворов [1]. Эффективные СД, разработанные на основе этих материалов, перекрыли коротковолновую часть видимого спектра — от ультрафиолетовой до желтой области [1, 2]. Одновременно существенно улучшилась эффективность светодиодов на основе гетероструктур и других полупроводниковых соединений типа АІІВV — от желто-зеленой до ближней инфракрасной области. Как следствие, СД стали перспективными источниками света не только для сигнализации, отображения и передачи информации, но и для общего освещения. То, что казалось фантастикой и далекой перспективой, стало реальностью.

### Технологии выращивания светодиодных GaN-гетероструктур

В начале 90-х годов XX в. японские исследователи создали первый СД на основе GaN-структуры с *p-n*-переходом, выращенной на сапфировой подложке. Он излучал свет в ультрафиолетовом и синем диапазоне, его КПД составлял порядка 1% [1–3]. Буквально через год сотрудники японской компании Nichia Chemical во главе с Шуджи Накамурой получили первые светодиоды голубого и зеленого цвета свечения [1, 2, 4], изготовленные на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов InGaN и AlGaN голубого и зеленого цвета свечения; КПД этих СД достигал 10% [1, 2, 5]. Еще через некоторое время ими были разработаны сначала первые импульсные лазеры, а затем и первые лазеры непрерывного излучения на основе GaN и его твердых растворов, работающие при комнатной температуре [1]. Данные структуры, несмотря на достаточно высокий квантовый

выход, содержали большое количество примесей и дефектов [2, 3], что снижало их эффективность. В спектрах и на вольт-амперных характеристиках синих СД при низких значениях прямого тока наблюдались особенности, связанные с туннельной рекомбинацией носителей [2, 6], а при обратном напряжении, равном примерно  $3E_g$ , в структурах синих светодиодов отмечался ионизационный пробой и ударная ионизация [2, 7]. Также в спектрах наблюдалась широкая полоса в диапазоне энергии квантов 2,2–2,3 эВ, что соответствовало «желтой полосе» дефектов в GaN, связанной с донорно-акцепторными парами и/или двойными донорами [2, 7].

Вслед за компанией Nichia технологию выращивания светодиодных кристаллов на подложках из сапфира ( $Al_2O_3$ ) освоили и другие компании. Развитие шло довольно быстрыми темпами, концентрации дефектов и дислокаций в структурах постепенно уменьшались, тем самым улучшалось их качество. Сегодня многие компании выпускают светодиодные кристаллы на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов, выращенных на подложках  $Al_2O_3$ , синего цвета свечения с КПД порядка 40–45% [2, 8].

Кроме технологии выращивания гетероструктур GaN и его твердых растворов на подложках  $Al_2O_3$ , существует технология выращивания данных структур на основе карбида кремния (SiC), разработанная компанией Cree также в начале 90-х годов прошлого века. Технология выращивания GaN на SiC обладает рядом принципиальных преимуществ перед технологией GaN на  $Al_2O_3$ . Прежде всего, SiC обладает на порядок большей теплопроводностью (3,8 Вт/см/К) по сравнению с  $Al_2O_3$  (0,3 Вт/см/К), что упрощает решение проблемы отвода тепла от активной области кристалла [8]. Кроме того, кристаллическая решетка 6H-SiC обладает лучшим (расогласование примерно), по сравнению с  $Al_2O_3$ , сродством с GaN — расогласование составляет примерно 3,3 и 14,8% соответственно, что сильно снижает концентрацию дефектов и дислокаций в структуре GaN и повышает квантовый выход кристаллов [2, 8]. Также SiC, являясь полупроводником, позволяет разрабатывать на своей основе кристаллы с вертикальным механизмом протекания тока, что уменьшает сопротивление структур и снижает величину рабочего напряжения и потребляемой мощности.

Типичный квантовый выход кристаллов гетероструктур GaN и его твердых растворов, выращенных на подложках SiC, составляет порядка 50–60%, кроме того, за счет вертикального протекания тока удалось получить прямое падение напряжения на кристалле при номинальном токе на 20% ниже, чем у других производителей [2, 8].

С 2005 г. две компании — Nichia и Cree — обеспечивают более 80% мирового производства кристаллов синего и зеленого излучений. При этом Cree традиционно использует технологию эпитаксиального выращивания GaN на SiC-подложках, а Nichia — на подложках из  $Al_2O_3$  [8].

Относительно недавно стала развиваться технология выращивания гетероструктур GaN на подложках из кремния (Si). Данную технологию активно развивает и использует компания Plessey Semiconductors Ltd.

### Технология выращивания GaN-гетероструктур на кремниевых подложках

Компания Plessey Semiconductors Ltd. занимается разработкой и производством светодиодных кристаллов на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов на Si-подложках. Работы начались в 2011 г., когда компанией был приобретен патент

на выращивание GaN на Si, разработанное в Кембриджском университете, исследователи которого уже более пятнадцати лет принимают активное участие в развитии технологий роста GaN и являются одними из ведущих специалистов по исследованию GaN-материалов в Великобритании.

Прежде всего, надо отметить, что себестоимость данных подложек, а следовательно, и гетероструктур на их основе ниже, чем технологии выращивания GaN на  $Al_2O_3$ - и SiC-подложках. Компания освоила технологию выращивания гетероструктур GaN/Si, тем самым обеспечив себе снижение себестоимости производства светодиодных кристаллов.

Процесс производства светодиодных кристаллов компании Plessey Semiconductors Ltd. начинается с выращивания GaN-структуры. Схематично это представлено на рис. 1 [9]. В процессе роста структуры на Si-подложке формируется буферный слой GaN требуемого качества, на котором выращивается слой GaN *n*-типа, затем активный слой гетероструктуры, представляющий собой множественную квантовую яму (МКЯ), и последним выращивается слой GaN *p*-типа [9]. Для обеспечения планарной структуры кристалла, то есть когда оба контакта находятся на одной его поверхности, специалисты компании Plessey Semiconductors Ltd. дополнительно добавляют в структуру металлизацию и изолирующий слой. После этого для постростовой обработки выращенная структура крепится к носителю и переворачивается (рис. 2) [9].

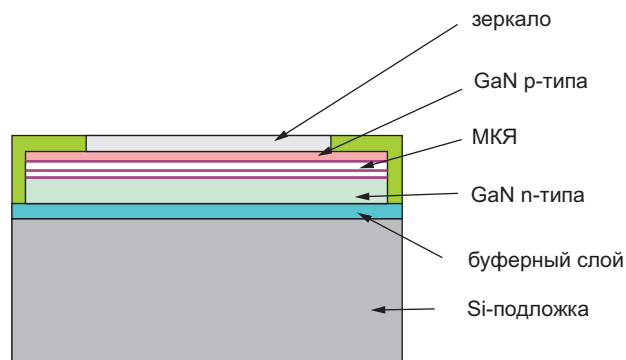


Рис. 1. Схема гетероструктуры GaN/Si [9]

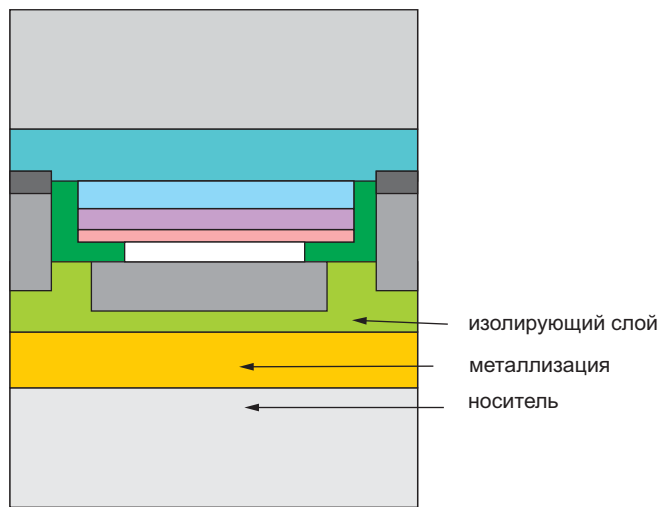


Рис. 2. Схема гетероструктуры GaN/Si с металлизацией на носителе [9]

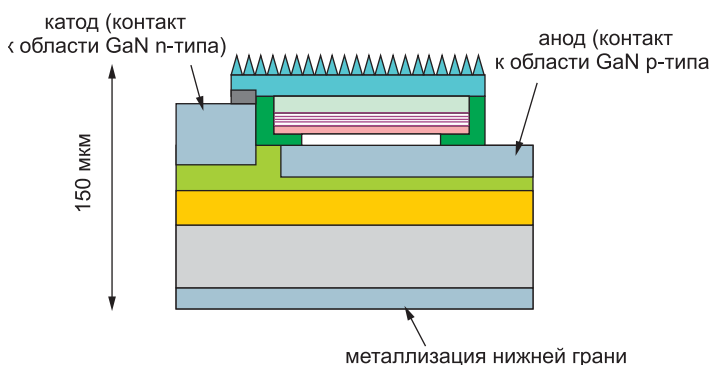


Рис. 3. Схема светодиодного кристалла на основе гетероструктуры GaN/Si [9]

Далее в процессе постростовой обработки подложка, на которой изначально структура была выращена, удаляется, и на освободившейся поверхности буферного слоя, ставшей теперь верхней гранью, формируется линзовая структура, обеспечивающая улучшенный вывод света из структуры кристалла [9]. На краях кристалла часть буферного и следующих за ним слоев стравливаются, и на верхнюю грань наносятся контакты обоих знаков — анод и катод. Получается светодиодный кристалл, схематично показанный на рис. 3 [9].

Как уже было сказано, на верхнюю грань кристалла наносится линзовая структура, позволяющая улучшить коэффициент вывода излучения. Аналогичную структуру одними из первых начали наносить на свои кристаллы EZ-серии специалисты компании Cree [8]. Также данная структура позволяет обеспечить форму кривой светораспределения, близкую к закону Ламберта, что также повышает эффективность вывода излучения при корпусировании кристаллов. На нижнюю грань кристалла наносится металлization (рис. 3), представляющая собой слой никеля и серебра. Данный слой обеспечивает хорошую адгезию при монтаже кристалла в корпус или на печатную плату, а также улучшает отвод тепла от кристалла [9].

Конструкция чипа компании Plessey Semiconductors Ltd. предусматривает наличие контактов на верхней грани, а нижняя

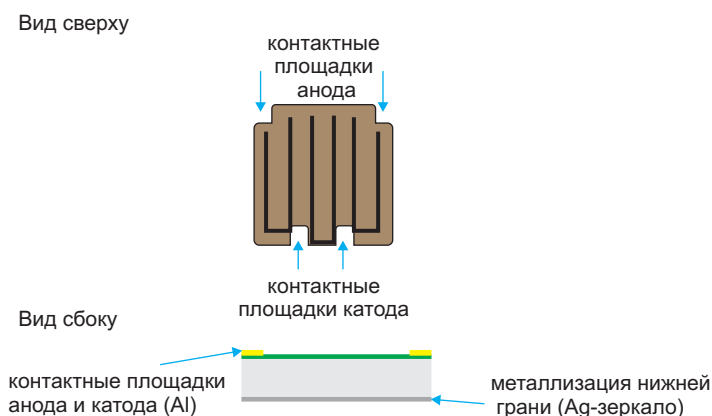


Рис. 4. Светодиодный кристалл серии PLB0T1212 компании Plessey Semiconductors [10]

грань является изолирующей. Поэтому для монтажа кристалла на основание не нужно использовать электропроводящий клей, достаточно воспользоваться только теплопроводящим, а также иметь высокую рабочую температуру [9].

### Светодиодные кристаллы компании Plessey Semiconductors

Для примера рассмотрим две серии кристаллов компании Plessey Semiconductors Ltd. — PLB0T1212 (рис. 4) и PLB0T1717 (рис. 5) [10, 11]. Доминантная длина волны кристаллов обеих серий соответствует синему диапазону, данные кристаллы могут использоваться для получения белого цвета.

Размеры кристаллов серии PLB0T1212 1,19×1,19 мм, их толщина 150 мкм [10]. Данные кристаллы предназначены для широкого круга применений, причем их можно использовать как в сверхъярких, так и в мощных СД, а также в светодиодных модулях chip-on-board. В силу этого конечными областями их применения могут быть как индикаторы, знако-сигнальные и информационные устройства, так и художественное освещение. Как уже отмечалось, данные кристаллы имеют кривую силы света, близкую к Ламбертовскому распределению, что облегчает нанесение на них люминофора и делает эффективным преобразование света в белом СД на их основе. Угол кривой светораспределения равен 120° [10].

По длине волны кристаллы серии PLB0T1212 перекрывают диапазон от 450 до 480 нм, т. е. области синего (450–465 нм) и голубого (465–480 нм) цвета. Кристаллы поставляются группами (бинуются) по длине волны через 2,5 нм и по мощности излучения с разницей 20 мВт, что дает возможность производителям СД подбирать и компоновать их при корпусировании [10].

Тепловое сопротивление от активной области — *p-n*-перехода — до нижней грани подложки кристаллов данной серии составляет 1,3 °С/Вт [10]. Максимальная рабочая температура *p-n*-перехода составляет +135 °С, максимальная температура хранения — +105 °С [10].

В режиме постоянного тока максимальное его рабочее значение для кристаллов серии PLB0T1212 составляет 700 мА [10]. В импульсном режиме при максимальных значениях длительности импульса 10 мс и скважности 0,1 максимальный рабочий ток кристаллов данной серии составляет 1000 мА [10]. При номинальном токе, значение которого составляет 350 мА, прямое

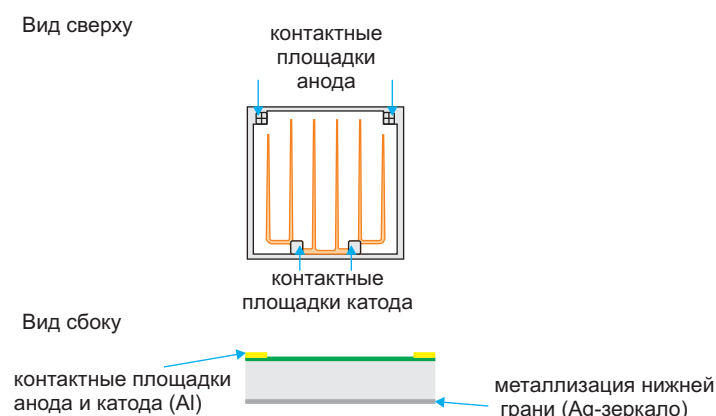


Рис. 5. Светодиодный кристалл серии PLB0T1717 компании Plessey Semiconductors [11]

падение напряжения соответствует диапазону 2,8–3,1 В [10]. Диапазон выходной мощности излучения кристаллов в номинальном режиме — 390–550 мВт [10]. Потребляемая мощность в номинальном режиме — примерно 1 Вт.

Кристаллы серии PLB0T1717, по сравнению с серией PLB0T1212, имеют большие размеры — 1,65×1,65 мм, а их толщина также 150 мкм [11]. В связи с этим данные кристаллы также предназначены для широкого круга применений, но в основном тех, где принято использовать мощные СД и светодиодные модули chip-on-board, например различные виды освещения: архитектурное, общее, уличное, акцентное и т. д. Как и кристаллы серии PLB0T1212, данные кристаллы имеют кривую силы света, близкую к Ламбертовскому распределению, что наделяет их описанными выше преимуществами при корпусировании и получении на их основе белого цвета свечения. Угол кривой светораспределения данных кристаллов также равен 120° [11].

Длины волн кристаллов серии PLB0T1717 также перекрывают диапазон от 450 до 480 нм, данные кристаллы аналогично бинуются по длине волны через 2,5 нм и по мощности излучения через 20 мВт, что облегчает производителям СД работу с ними при корпусировании [11].

Тепловое сопротивление от активной области до нижней грани кристаллов серии PLB0T1717 составляет 0,7 °С/Вт [11]. Значения максимальной рабочей температуры *p-n*-перехода и максимальной температуры хранения, как и у кристаллов серии PLB0T1212, составляют +135 и +105 °С соответственно [11].

В режиме постоянного тока максимальное его рабочее значение для кристаллов серии PLB0T1212 — 700 мА [11]. В импульсном режиме, при максимальных значениях длительности импульса 10 мс и скважности 0,1 максимальный рабочий ток кристаллов данной серии достигает 1000 мА [11]. При номинальном токе, значение которого составляет 350 мА, прямое падение напряжения находится в диапазоне 2,8–3,1 В [11], что также соответствует потребляемой мощности примерно 1 Вт. Диапазон выходной мощности излучения кристаллов в номинальном режиме составляет 390–570 мВт [11].

### Перспективные направления развития GaN-технологии компании Plessey Semiconductors

Компания Plessey Semiconductors продолжает активно осваивать новые технологические направления разработки гетероструктур на основе GaN и его твердых растворов. Недавно ее специалисты в сотрудничестве со специалистами компании Anvil Semiconductors и исследователями Кембриджского университета начали разработку технологии кубического GaN (3-GaN) на подложках из кубического карбида кремния (3C-SiC) на Si с целью производить светодиодные структуры. Предполагается, что подложки в этом коллективе будет производить компания Anvil Semiconductors, сотрудники же Plessey Semiconductors Ltd. должны сосредоточить усилия на отработке технологии выращивания гетероструктур на этих подложках. Исследователи Кембриджского университета должны будут осуществлять научно-исследовательскую поддержку данных работ. Создание таких СД должно стать следующим шагом на пути к производству эффективных светодиодных источников света.

Потенциал кубического нитрида галлия достаточен для исправления проблемы, вызванной сильными внутренними электрическими полями, которые ухудшают рекомбинацию носителей, увеличивая ее безызлучательную составляющую и тем самым снижая квантовый выход излучения, что вызывает спад эффективности. Особенно это проявляется в InGaN/GaN-гетероструктурах для зеленых светодиодов, где преобладают более сильные внутренние электрические поля. Предположительно именно они вызывают быстрое снижение эффективности СД в зеленой области. Возможность получения кубического GaN на Si-пластинах диаметром больше 150 нм в коммерческих объемах, безусловно, является ключом к созданию эффективных зеленых СД и снижению себестоимости светодиодных изделий.

Задел у сложившегося альянса компаний есть. В процессе совместной работы в рамках программы Energy Catalyst, призванной увеличить эффективность использования энергии, специалисты компании Anvil Semiconductors и исследователей Центра исследования GaN в Кембриджском университете вырастили кубический GaN на 3C-SiC методом химического осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы на Si-пластинах. Специалисты компании Anvil изготовили нижние слои 3C-SiC с использованием запатентованной технологии снятия внутренних напряжений, что позволило вырастить карбид кремния промышленного уровня на Si-пластинах диаметром 100 мм. Стоит также отметить, что данный процесс подготовки подложек, возможно, воспроизводится на пластинах диаметром 150 мм, а потенциально и на пластинах большего диаметра, и поэтому подходит для промышленного применения.

Работа же в альянсе со специалистами компании Plessey Semiconductor может стать естественным продолжением данного сотрудничества компании Anvil Semiconductors и Кембриджского центра исследования GaN, поскольку специалисты компании Plessey уже имеют опыт коммерческого изготовления светодиодов, изготовленных на основе гексагонального GaN, являющегося традиционным, выращенного на Si-подложках диаметром 150 мм с использованием технологии, изначально разработанной в Кембриджском университете. Благодаря технологии 3C-SiC на Si, разрабатываемой для силовых устройств на карбиде кремния, создана эффективная подложка, обеспечивающая однофазный эпитаксиальный рост кубического GaN. Именно она обеспечивает процесс, совместимый с технологией производства устройств на основе GaN на Si компании Plessey Semiconductors, которые уже выведены ее специалистами на промышленный уровень и были описаны выше.

### Заключение

В заключение можно сделать вывод, что компания Plessey Semiconductor Ltd., достаточно недавно вышедшая на рынок полупроводниковых GaN-материалов и компонентов на их основе, на сегодня достигла больших успехов и продолжает совершенствовать технологию. Эти успехи во многом объясняются сотрудничеством с Центром исследования GaN в Кембриджском университете, специалисты которого имеют большой опыт в выращивании GaN на подложках из сапфира, монокристаллического кремния, монокристаллического нитрида галлия и кремниевых подложках большой площади. Работы компании Plessey

ориентированы на развитие светодиодных GaN-структур и понимание факторов, ограничивающих их эффективность. Компания обеспечена современными реакторами для химического осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы, благодаря чему ее специалисты в ближайшее время смогут начать разрабатывать проекты по развитию применения GaN не только в области светодиодов, но и в других областях электроники, включая силовое и СВЧ-направления. ●

### **Литература**

1. Туркин А. Н., Юнович А.Э. Лауреаты Нобелевской премии по физике 2014 года: И. Акасаки, Х. Амано и С. Накамура // Современная электроника. 2015. № 2.
2. Туркин А. Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. 2011. № 5.
3. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. М.: ФизМатЛит. 2008.
4. Золина К. Г., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А.Э. Спектры люминесценции голубых и зеленых светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с квантовыми ямами // ФТП. 1997. Т. 31. № 9.
5. Туркин А.Н., Юнович А.Э. Измерения мощности излучения голубых и зеленых InGaN/AlGaN/GaN-светодиодов с помощью фотопреобразователей из аморфного кремния // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 23.
6. Ковалев А. Н., Кудряшов В. Е., Маняхин Ф. И., Туркин А. Н., Золина К. Г., Юнович А. Э. Туннельные эффекты в светодиодах на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с квантовыми ямами // ФТП. 1997. Т. 31. № 11.
7. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Электролюминесценция гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN при ионизационном пробое // ФТП. 1998. Т. 32. № 1.
8. Полищук А. Г., Туркин А. Н. Новое поколение светодиодов компании Cree для освещения // Автоматизация в промышленности. Июль, 2008.
9. Plessey MaGIC LED Die Handling & Packaging. Application Note Doc. no. 294258 Issue 2. 24/02/2016.
10. PLB0T1212 Series | Advanced Product Information. Datasheet No 294244 Issue 1, 20/01/2016.
11. PLB0T1717 Series | Advanced Product Information. Datasheet No 294242 Issue 1. 21/01/2016.