

СВЕТОДИОД НА ОСНОВЕ МНОГОПРОХОДНОЙ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

У.Бекирев, к.ф.-м.н. bekirev@niifp.ru, С.Бабенко¹, д.т.н. babenkosvetlana@mail.ru,
В.Крюков¹, к.т.н. vitk3@mail.ru, Б.Потапов borpot@niifp.ru, А.Скипер¹ vitk3@mail.ru

Повышение светоотдачи энергосберегающих осветительных модулей и оптоэлектронных устройств широкого бытового и промышленного назначения для систем освещения, отображения, передачи, записи и считывания информации требует создания источников излучения, в том числе полупроводниковых светодиодов, с высокими коэффициентами полезного действия. Сегодня решение этой проблемы предусматривает замену производимых светодиодов на основе многопроходных гетероструктур новым типом светодиодов на основе многопроходных тонкопленочных гетероструктур. За рубежом уже начат промышленный выпуск таких светодиодов. Внешний квантовый выход экспериментальных тонкопленочных светодиодов превышает 40%, и есть перспективы дальнейшего повышения этого параметра. В работе представлены исследования некоторых конструкций тонкопленочных светодиодов, впервые изготовленных в России.

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ СВЕТОДИОДЫ

Наиболее эффективные светодиоды в настоящее время в основном изготавливаются на основе многопроходных полупроводниковых р-п-гетероструктур в системе полупроводниковых соединений A^3B^5 [1]. В результате многократных проходов излучения в кристалле гетероструктуры интенсивность излучения может многократно возрастать, приводя к значительному увеличению КПД излучающего прибора.

При этом накопленное в структуре излучение может частично поглощаться в ее активной области и затем переизлучаться в ней. Переизлучение приводит к увеличению концентрации неосновных носителей заряда в активной области излучающего прибора, которая может оказаться значительно выше концентрации, обусловленной инжекцией носителей через р-п-переход. Эти обстоятельства позволили улучшить характеристики полупроводниковых светодиодов, в том числе и их внешний квантовый выход [1]. Дальнейшему повышению

¹ МГТУ им. Баумана (ООО "МеГа Эпитех")

этого параметра препятствуют значительное поглощение излучения на свободных носителях в кристалле светодиода, а также его перегрев.

Для усиления переизлучения в активной области и снижения потерь накопленного излучения в кристалле излучателя на свободных носителях в НИИФП были изготовлены мезоструктуры светодиодов малого объема со слаболегированными n- и p-ограничивающими слоями. На лабораторных образцах этих диодов удалось достичь внешнего квантового выхода 60% [2]. В институте также были предложены гетероструктуры с дополнительным узкозонным слоем в активной области [3]. Внешний квантовый выход лабораторных образцов светодиодов малого объема с мезоструктурой превысил 60% [4]. Однако пока из-за сложности изготовления светодиоды малого объема с мезоструктурой не освоены в производстве. Гетероструктуры с дополнительным узкозонным слоем в активной области мы считаем прототипами многопроходных излучающих гетероструктур с внутренним усилением инжекции, в которых возможно самоохладение активной области [5]. Такие гетероструктуры могут быть перспективны для дальнейших разработок тонкопленочных светодиодов.

Зарубежные исследователи прилагают активные усилия к увеличению вывода излучения из кристалла светодиода, для чего изучают различные варианты структур светодиодов [6–9]. Внимание также уделяется исследованию термических процессов в светодиодах [10]. В итоге удалось выявить перспективные варианты тонкопленочных структур светодиодов [11–16]. В многопроходных тонкопленочных излучателях толщина кристалла излучателя была уменьшена со 100–300 до 10–50 мкм. Это привело к увеличению концентрации носителей заряда в активной области за счет усиления эффектов переизлучения при малом объеме кристалла и к повышению внешнего квантового выхода (или КПД) излучателей. В результате из кристалла гетероструктуры отводилось больше энергии в виде полезного излучения, уменьшилось его тепловыделение. Это позволило увеличить срок службы и расширить диапазон рабочих токов излучателей. В таких светодиодах внешний квантовый выход превысил 40%, а световая отдача – 100 лм/Вт [17]. Компания OSRAM намерена превзойти полученный результат и довести внешний квантовый выход до 75–80% [18].

Тонкопленочные многопроходные светодиоды реализованы и в российских НИИ. Первые, самые простые конструкции чипов таких светодиодов были изготовлены в НИИФП (рис.1). На GaAs-подложке методом жидкофазной эпитаксии выращивали двухсторонние GaAlAs p-n-гетероструктуры с толщиной активной области (области переизлучения) 0,3 мкм и более. Подложка после изготовления омических контактов и мезоструктуры стравливалась. Максимальная толщина оставшейся многопроходной гетероструктуры составляла 30–35 мкм, а наибольший размер кристалла излучателя – 300×300 мкм. Следует заметить, что подобные чипы светодиодов уже исследованы компанией OSRAM [19]. Внешний квантовый выход разработанных светодиодов в корпусе составлял 35–40%.

Измерения характеристик изготовленных чипов тонкопленочных светодиодов показали, что при комнатной температуре внешний квантовый выход со стороны контактных площадок равен 5–11%, с противоположной стороны – 9–28%. Максимальный суммарный внешний квантовый выход с обеих сторон для одного из образцов превысил 36%. Попытки увеличить внешний квантовый выход, изготовив на стороне мезовыступа отражающее покрытие, пока дали увеличение на 8–13% в сторону, противоположную мезе. В пластмассовый световыводящий корпус

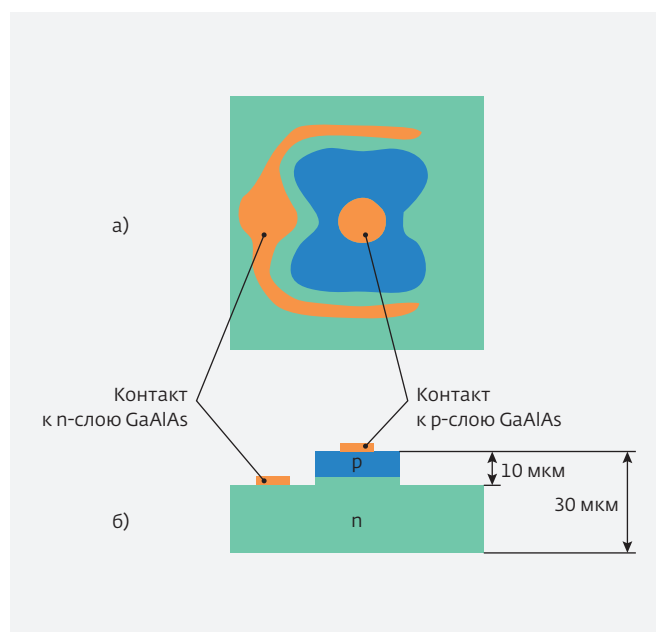


Рис.1. Тонкопленочный многопроходный кристалл светодиода: а – вид сверху и б – фронтальный вид

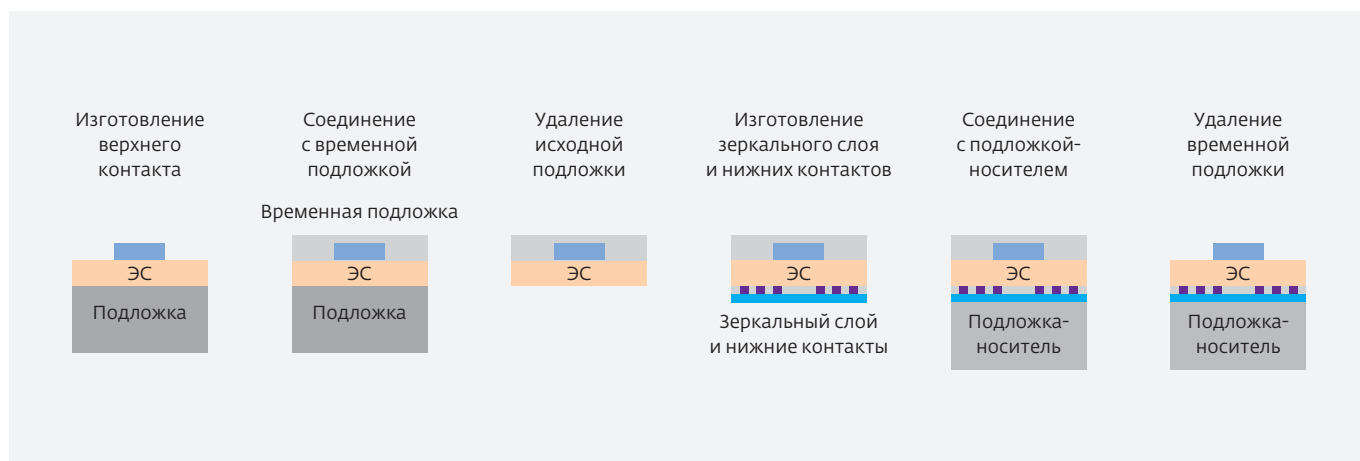


Рис.2. Процесс изготовления экспериментальных тонкопленочных чипов

светодиодные чипы не монтировались. Тем не менее очевидно, что светодиоды на основе рассмотренных чипов имели бы внешние квантовые выходы в 1,5-2 раза выше, чем сами чипы. Некоторые из таких светодиодов по значению внешнего квантового выхода не уступали бы лучшим светодиодам компании OSRAM.

Существенным недостатком рассмотренных чипов является их хрупкость из-за малой толщины GaAlAs, что требует сверхосторожности при работе с ними.

Рассмотрены конструкции тонкопленочных чипов излучателей, лишенных такого недостатка. Тонкопленочная излучающая p-n-гетероструктура чипа припаивалась на прочную GaAs-подложку-носитель, которая обеспечивала минимальное дефектообразование

в тонкопленочной активной области излучающей GaAlAs-гетероструктуры при термических процессах.

В последние годы в изготовлении чипов светодиодов развивается направление, связанное с переносом эпитаксиальной структуры с поглощающей подложки либо на прозрачную, либо на отражающую (зеркальную) подложку, что позволяет существенно повысить излучающие характеристики светодиодов. Это так называемая тонкопленочная технология. Ее суть заключается в том, что тонкий эпитаксиальный слой (ЭС) излучающей гетероструктуры удаляется с первоначальной ростовой подложки и переносится на подложку-носитель. С помощью подобной технологии нами на GaAs-подложке-носителе были изготовлены чипы мощных тонкопленочных светодиодов, более чем в три раза превосходящие по внешней эффективности изготовленные нами ранее чипы мощных нетонкопленочных светодиодов. Они также имели значительно больший срок службы.

Были разработаны конструкция чипа и технологический маршрут изготовления мощного тонкопленочного ИК-светодиода, содержащий операции пересадки тонкой пленки излучающей p-n-гетероструктуры на непрозрачную временную подложку-носитель и формирования промежуточного зеркального

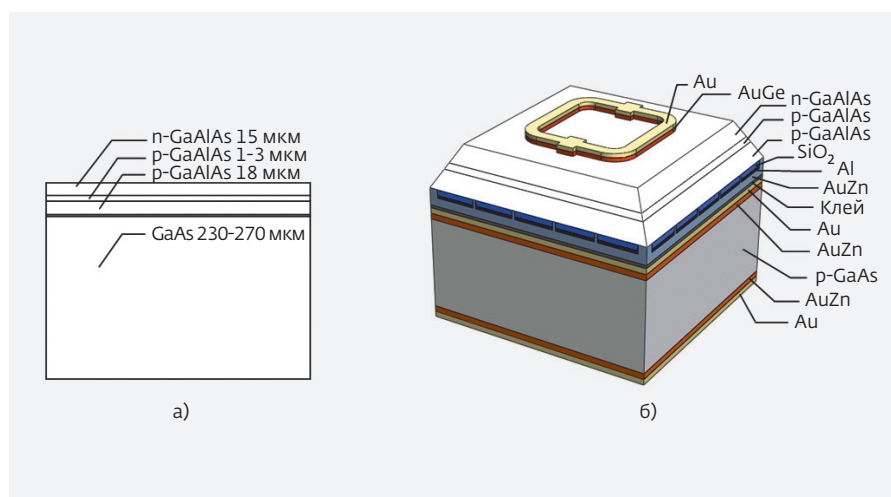


Рис.3. Эпитаксиальная структура ПДИ (а), конструкция мощного тонкопленочного ИК-чипа светодиода (б)

слоя на постоянной подложке-носителе (рис.2).

Зеркальный слой представляет собой диэлектрик с металлическим покрытием и контактами к нижней стороне излучающей структуры, обеспечивающими электрическое соединение эпитаксиального слоя излучающей гетероструктуры с подложкой-носителем. Выбор материала "зеркала" сильно влияет на излучательные свойства структуры, поэтому металлом в зеркальном слое был выбран алюминий, у которого высокий коэффициент отражения в ИК-диапазоне и хорошая адгезия к слою диэлектрика.

При изготовлении контактов к нижней и верхней стороне излучающей структуры стремились добиться как можно меньшего поглощения излучения контактами, оптимизации топологии и общей площади контактов с точки зрения внешнего квантового выхода и обеспечения их достаточной проводимости. Исходя из этих требований, верхний контакт был изготовлен в виде овальной полоски металлизации, соединяющей две контактные площадки, а нижний контакт – в виде нескольких узких параллельных полосок.

Экспериментальные образцы чипов мощных тонкопленочных ИК-светодиодов выполнялись на основе двойной GaAlAs p-n-гетероструктуры ПДИ, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на GaAs-подложке (производства ООО "МеГа Эпитех") (рис.3а). Концентрация алюминия в нижнем слое позволяла удалять подложку селективным травлением. После удаления подложки толщина излучающей гетероструктуры составляла 30–50 мкм.

В состав мощного тонкопленочного ИК-чипа входят: верхний контакт на основе слоев AuGe-Au, эпитаксиальная излучающая p-n-гетероструктура, зеркальный слой с алюминиевой металлизацией, омические AuZn-контакты к нижней стороне и GaAs подложка-носитель (рис.3б). Для соединения излучающей p-n-гетероструктуры с подложкой компания OSRAM использует золото-серебряный припой толщиной в несколько сотен

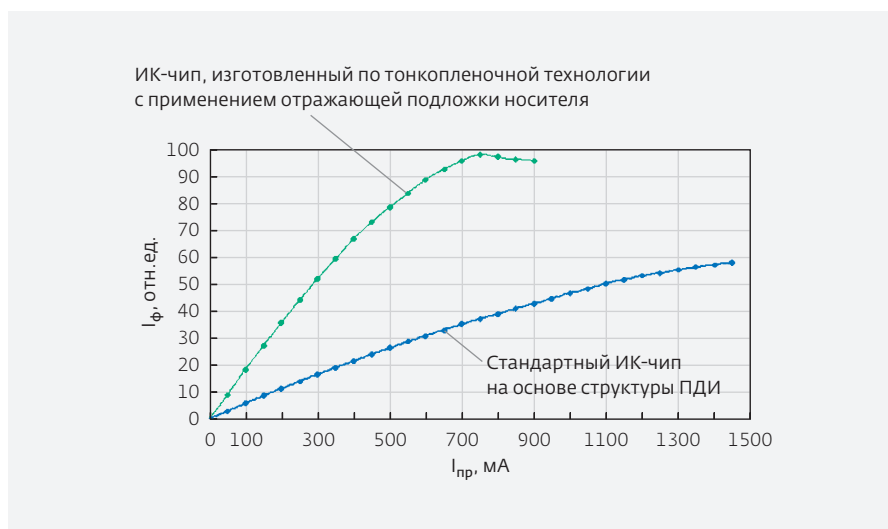


Рис.4. Зависимость фототока от тока через чип

ангстрем [20]. Более толстый слой припоя при термических процессах не обеспечивает минимального дефектообразования в тонкопленочной активной области гетероструктуры. Поскольку поверхность эпитаксиальной излучающей гетероструктуры может быть шероховатой (с выступами высотой более 1 мкм), нами использовался токопроводящий серебряный клей.

По разработанному технологическому маршруту были изготовлены экспериментальные образцы излучающих чипов повышенной мощности с площадью p-n-перехода $\sim 600 \times 600$ мкм. Площадь поглощающих излучение омических контактов занимала 20–30% поверхности тонкопленочного кристалла. Были измерены зависимость фототока ИК-чипов от тока питания и их внешний квантовый выход (рис.4). Из рисунка видно, что ИК-чип, изготовленный по тонкопленочной технологии, при токах до 500 мА приблизительно в три раза превосходит по мощности излучения чип, созданный по "обычной" технологии. Внешний квантовый выход тонкопленочного ИК-чипа при прямом токе 25 мА составлял 11–12%, что также не менее чем в три раза больше, чем у лучших образцов светодиодов на основе подобных, но не тонкопленочных, гетероструктур. Из рис.4 также видно, что высокий внешний квантовый выход тонкопленочного варианта светодиода сохраняется до значения тока ~ 700 мА. Для получения высокого внешнего квантового выхода при больших значениях тока, видимо, необходим лучший теплоотвод. Это может потребовать применения припоя вместо проводящего клея.

Предприятие, где были изготовлены эти светодиоды, проявило к ним большой интерес и изготовило дополнительную пробную партию для испытаний заинтересованными потребителями. В случае успеха предприятие готово приступить к освоению промышленного выпуска таких приборов.

Большие внешние квантовые выходы в тонкопленочных чипах светодиодов можно получить, если уменьшить площадь омических контактов относительно площади кристалла (рис.5). Это допустимо для светодиодов невысокой мощности. Тепловые нагрузки на активную область чипа уменьшаются, и появляется возможность применения как проводящего высокотемпературного клея, так и высокотемпературного золото-серебряного припоя.

Следует заметить, что в этих светодиодах тонкопленочная излучающая гетероструктура часто соединялась с GaAs-подложкой-носителем с помощью высокотемпературного проводящего клея H20E. По этой причине омические контакты вжигали во внешнюю поверхность чипа с помощью фотонного отжига. В случае применения припоя для обеспечения лучшего электрического контакта на внутренней стороне тонкопленочного кристалла в качестве зеркала вместо алюминия использовалось золото. В этом технологическом маршруте не применялась временная подложка-носитель. Толщина излучающей гетероструктуры экспериментальных образцов чипов светодиодов была равна ~30 мкм, размер р-п-перехода ~300×300 мкм. Омические контакты занимали не более 10% поверхности тонкопленочного кристалла. В таком варианте значение внешнего квантового выхода лучших чипов достигало 21–23%. Внешний квантовый выход этих светодиодов в 5-мм пластмассовом световыводящем корпусе составлял 36–38% при токе 20–50 мА.

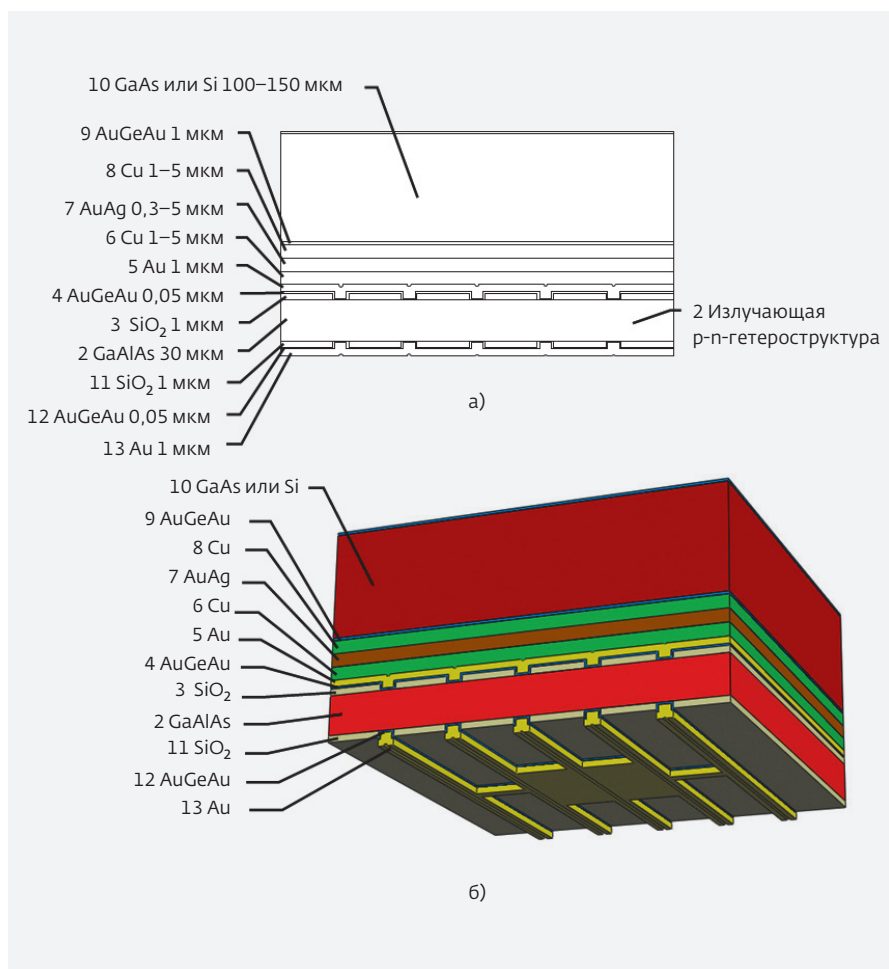


Рис.5. Исходная р-п-гетероструктура с омическими контактами (а) и конструкция тонкопленочного чипа светодиода (б)

* * *

Изучение различных конструкций чипов тонкопленочных многопроходных светодиодов показало заметное увеличение их внешнего квантового выхода по сравнению с обычными светодиодами на основе многопроходных структур. Это достигнуто за счет уменьшения излучения, поглощаемого свободными носителями в тонких сильно легированных ограничивающих слоях многопроходной р-п-гетероструктуры. Внешний квантовый выход некоторых чипов светодиодов ИК-диапазона с мезаструктурой и толщиной излучающей р-п-гетероструктуры ~30 мкм превышал 30%, светодиодов в пластмассовом куполообразном световыводящем корпусе ~38%. Это значительно выше внешнего квантового выхода светодиодов на основе обычных многопроходных р-п-гетероструктур. Мощные тонкопленочные многопроходные светодиоды

в два-три раза превзошли по внешнему квантовому выходу светодиода такой же конструкции на основе обычных многопроходных гетероструктур. Дальнейший рост внешнего квантового выхода в тонкопленочных светодиодах можно получить, используя р-п-гетероструктуры с внутренним усилением инжекции. В светодиодах на основе такой гетероструктуры может наблюдаться многопроходность в более тонком объеме, чем объем, определяемый толщиной гетероструктуры [21, 22]. Ускорить выпуск высокоэффективных тонкопленочных светодиодов можно, освоив в России тонкопленочную технологию, которая получает все большее распространение в мире.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алферов Ж.И., Агафонов В.Г., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ларионов В.Р., Халфин В.Б.** Многопроходные структуры II. Внешний квантовый выход излучения. – ФТП, 1976, т.10, вып.8, с.1497-1506.
2. **Бекирев У.А.** и др. Излучающие диоды ИК-диапазона с внешним квантовым выходом 60% на основе гетероструктур ЭСАГА-60. – Материалы докладов IV Всесоюзной конференции "Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах", Минск, 1986, с.116-117.
3. **Бекирев У.А., Инкин В.Н., Степанищева Г.В.** Излучательная многопроходная гетероструктура. – Авт. свид. №1111645 от 03.05.1984 с приоритетом от 01.10.1982. – Опубликовано в Бюллетене №20. – 20.07.2012.
4. **Бекирев У.А., Галченков Д.В., Гранкин М.А., Ершова Г.В., Инкин В.Н., Малышкин М.А.** Физические явления в излучающих гетероструктурах с неоднородным составом в активной области. – Тезисы докладов IV всесоюзной конференции "Физические процессы в полупроводниковых гетероструктурах". Минск, 1986, с.136-137.
5. **Бекирев У.А.** Самоохлаждение активной области излучающих гетероструктур. – Перспективные технологии, 1996, т.3, вып.7/8, с.5-6.
6. **Crawford M.H.** LEDs for Solid-State Lighting: Performance Challenges and Recent Advances. – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Jul-Aug 2009, v.15, p.1028-1040.
7. **Karlicek R.F., Jr.** High power LED packaging. – Piscataway NJ, USA, 2005, p.337-339.
8. **Schubert E.F.** Light-emitting diodes. – Cambridge, New York – Cambridge University.
9. **Liu J.M.** Photonic devices. – New York, Cambridge University Press, 2005.
10. **Lu X.Y., Hua T.C., Liu M.J., and Cheng Y.X.** Thermal analysis of loop heat pipe used for high-power LED. – Thermochimica Acta, Sep 2009, v.493, p.25-29.
11. **Peter M., Laubsch A., Stauss P., Walter A., Baur J., and Hahn B.** Green Thin GaN power-LED demonstrates 100 lm. – Physica status solidi (c), 2008, v.5, p.2050-2052.
12. **Shchekin O.B., Epler J.E., Trottier T.A., Margalith T., Steigerwald D.A., Holcomb M.O., Martin P.S., Krames M.R.** High performance thin-film flip-chip InGaN-GaN light-emitting diodes. – App. Physics Letters, 2006, v.89, p.071-109.
13. **Bergenek K., Wiesmann Ch., Wirth R., O'Faolain L., Linder N., Streubel K., Krauss T.F.** Enhanced light extraction efficiency from AlGaInP thin-film light-emitting diodes with photonic crystals. – Appl. Phys. Lett. 93, 04.1.105 2008; doi:10.1063/1.2963030, с.3 (3 pages).
14. **K. McGroddy, A. David, E. Matioli, M. Iza, S. Nakamura, S. DenBaars, et al.** Directional emission control and increased light extraction in GaN photonic crystal light emitting diodes. – Applied Physics Letters (published online 29 July 2008).
15. Thin-film chips are revolutionizing LED technology, 11.10.2007. – http://www.osram-os.com/osram_os/EN/News_Center/Spotlights/Success_Stories/The_only_way_is_up!
16. Osram unveils enhanced thin-film chip technology 20 Dec 2005. – <http://89.234.46.246//news/2/12/26/1>
17. **Windisch R., et al.** 100 -lm/W InGaAlP Thin-Film Light-Emitting Diodes. – IEEE Xplore, 2009, v.19, is.10, p.774-776.
18. Patent US6,929,966 B2 – Aug.16.2005. – Каталог фирмы OSRAM по светодиодам за 2011 год. – www.ledsmagazine.com/products.
19. **Jelek S., Plossol A., Streubel K., Wegleiter W., Wirth R.** Light-Emitting Semiconductor chip and Method For The -anufacture. – Patent Application Publication, Pub. No: US 2006/0180820 A1, Aug.17, 2006. Assignee: Osram Opto Semiconductors GmbH.
20. **Бекирев У. А., Крюков В.Л., Купченко Л.Л., Потапов Б.Г., Скипер А.В., Стрельченко С.С.** Гетероструктуры с внутренним усилением инжекции. – Естественные и технические науки, 2012, №4, с.67-82.
21. **Бекирев У., Потапов Б.** Некоторые особенности излучателей на основе гетероструктур с внутренним усилением инжекции. – Наст. номер, с.122.