

Разработка высокоэкономичного светодиодного кластера на наноструктурах GaN

Буробин В. А., Коновалов А. М.

Рассмотрены вопросы разработки конструкции и технологии изготовления светодиодов, являющихся базовым элементом для светодиодного кластера, на гетероструктурах AlGaIn/InGaIn/GaN, выполненных методом MOCVD. Анализируются вопросы улучшения отвода тепла за счёт использования технологии обратного монтажа кристаллов на керамику с высокой теплопроводностью.

Благодаря низким эксплуатационным затратам, длительному сроку службы, электробезопасности, высокой механической прочности, отсутствию нагрева, ультрафиолетового и инфракрасного излучений светодиоды являются лидерами в рейтинге среди прочих источников света. Уже сейчас они обогнали по световой отдаче лампы накаливания. Однако пока не произойдет заметного снижения цен, светодиоды не смогут конкурировать с другими видами общего освещения. Скорость, с которой они будут завоёвывать рынок, зависит от нескольких факторов, таких как световая отдача, цена и общее признание. В промышленном и коммерческом секторах, где сегодня в основном применяется люминесцентное освещение, более всего заинтересованы в приобретении экономичных и долговечных источников света высокой эффективности. Деятельность этих секторов рассчитана на перспективу, поэтому снижение расходов на обслуживание, безопасность и низкие энергозатраты имеют первостепенное значение. Сравнивая светодиоды с люминесцентными лампами, нельзя говорить однозначно о преимуществе тех или других. На сегодняшний день световая отдача белых светодиодов вдвое меньше, чем у люминесцентных ламп, а цена намного выше. Однако во многих случаях, где применяются люминесцентные лампы, по техническим показаниям и условиям безопасности предпочтительнее использовать светодиодные источники уже сегодня. Классический пример - освещение шахт. Кроме того, нельзя забывать, что расходы на эксплуатацию люминесцентной лампы не заканчиваются с ее «смертью». Использованные люмы после завершения срока эксплуатации должны быть подвергнуты обязательной утилизации как ртутьсодержащие отходы. Ежегодные расходы на утилизацию люминесцентных ламп в России составляют приблизительно 700 тысяч долларов США.

В области источников освещения за последнее десятилетие светодиоды стали чем-то большим, чем просто электронные компоненты. Сохранив свои сигнальные и индикаторные функции, новые сверхяркие светодиоды начали заменять лампы накаливания и неоновые лампы. Перспективы глобального рынка освещения на ближайшие десятилетия просматриваются как полная замена традиционного освещения на светодиодный свет (led light).

Сравнение параметров осветительных приборов и прогноз эффективности полупроводниковых светодиодов американской программы освещения будущего приведены в таблице.

Параметры осветительных приборов

	Лампа накалива- ния	Компакт. люмине- сцентная лампа	Люмине- сцентная лампа	Светодиодные источники			
				2002 г.	2007 г.	2012 г.	2020 г.
Потребляемая мощность, Вт	75	18	40	1	5	6,7	7,5
Световая отдача, лм/Вт	10	60	80	25	75	100-150	150-200
Срок службы, тыс. час.	1	10	20	100	100	100	100
Световой поток, лм	1200	1100	3400	25	200	1000	1500
Стоимость одной лампы, USD	0,5	12	5	5	4	менее 5	менее 3

В 60-70-е годы были созданы светодиоды на основе фосфида и арсенида галлия. Они излучают в красной, жёлтой и жёлто-зелёной областях спектра. В нашей стране к концу 80-х годов производили более 100 миллионов светодиодов в год, а мировая промышленность выпускала несколько десятков миллиардов.

Уже тогда по светоотдаче, долговечности, надёжности и безопасности светодиоды превосходили обычные лампы накаливания. Однако никак не удавалось сделать светодиоды синего, зелёного и белого света. Эту задачу решил в начале девяностых профессор Накамура, который в то время работал в химической лаборатории японской компании «Ничия». Он исследовал плёнки нитрида галлия, которые осаждал из металлорганических соединений. Он вырастил многослойные гетероструктуры на основе нитрида галлия с добавками индия, которые давали яркий синий свет. А если добавить чуть больше индия, свет становился ярко зелёным. А если включить в систему фосфор, то получается светодиод, дающий белый свет.

Твердотельный белый свет (SSL-Solid State Light) всё ещё не является хорошо известным, несмотря на разнообразие способов его получения и реализации через светодиоды. Большинство компаний и проектировщиков знакомы только с традиционным аналоговым белым освещением без реальной оценки выгодных и полезных альтернатив, обеспечиваемых применением светодиодов. Кроме легко прогнозируемых выгод, указанных выше, следует обратить внимание на следующие специфические признаки светодиодов как новых источников белого света:

- малое тепловыделение и низкое питающее напряжение (гарантирует высокий уровень безопасности);
- отсутствие стеклянной колбы (определяет очень высокую механическую прочность и надёжность);
- отсутствие разогрева или высоких пусковых напряжений при включении;
- безынерционность включения/выключения (реакция < 100 нс);

- абсолютный контроль (регулировка яркости и цвета в полном динамическом диапазоне);
- полный спектр излучаемого света (или, если требуется, специализированный спектр);
- встроенное светораспределение;
- компактность и удобство в установке;
- отсутствие ультрафиолетового и иных вредных для здоровья излучений;
- не применяется никаких опасных веществ типа ртути.

В настоящий момент не существует никаких стандартов, определяющих срок службы и критерии надёжности для светодиодов. Один из методов определения отказа заключается в том, чтобы зафиксировать ток и следить за выходной мощностью прибора, считая прибор неработоспособным при падении выходной мощности ниже определённого уровня (обычно от 20% до 50%) от исходной величины. Исходя из этого предположения были разработаны конструкция (рис. 1) и технологическая схема изготовления светодиода (рис. 2).

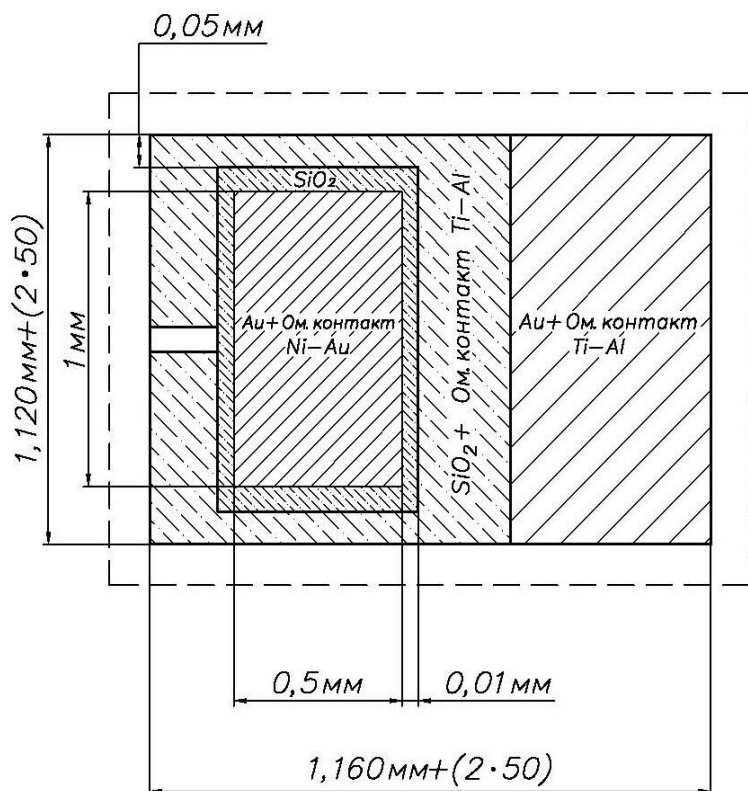
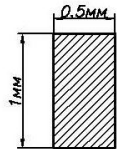


Рис. 1.
Конструкция кристалла светодиода на GaN

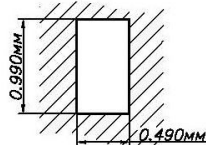
Поперечный разрез nano-гетероструктуры, выращенной по технологии MOC-гидридной эпитаксии (MOCVD) в ЗАО «Элма-Малахит» г. Зеленограда, показан на рис. 3. Для этого процесса применены особо чистые газы. Установка фирмы «АЕ» обеспечивает автоматизированный контроль состава газов, их отдельные потоки, точную регулировку температуры газов и подложек. Толщины выращиваемых слоёв измеряются и контролируются в пределах от десятков ангстрем до нескольких микрон. Слои p-GaN легированы магнием, n-GaN - кремнием, чтобы создать p-n-переход с большой концентрацией электронов в n-области и дырок в p-области.

Технологический маршрут изготовления светодиода на GaN.

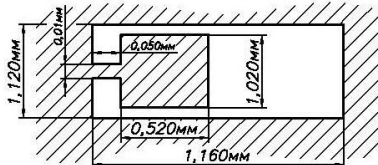
I. Фотолитография – "Меза".



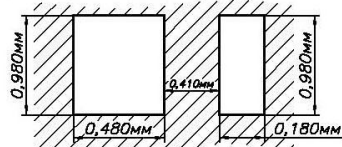
II. Фотолитография – "Ом. контакт" к "p-типу".



III. Фотолитография – "Ом. контакт" к "n-типу".



IV. Фотолитография – Окна в SiO₂.



V. Фотолитография – Осаждение гальванического Au.

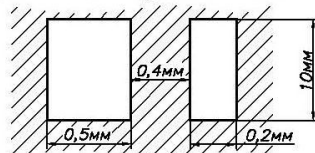


Рис. 2.

Излучение света в светодиоде происходит в результате рекомбинации инжектированных носителей в активной области системы множественных квантовых ям InGaN/GaN (для голубого и зелёного излучения) и встроенных гетероструктур AlGaIn.

Для устранения деградации электродов в светодиодах, основной причиной которой является диффузия металла омического контакта во внутреннюю область (так называемая периферийная диффузия) полупроводника, была проведена большая технологическая работа по выбору композиции металлов омических контактов. Диффузия усиливается с увеличением инжектированного тока и температуры. Выбрать подходящий материал для омического контакта к p-области систем InGaN/GaN довольно сложно из-за большой ширины запрещённой зоны GaN p-типа. Система тонкоплёночной

Выращивание полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур - процесс сродни искусству. Помимо установки соответствующего класса требуются глубокое понимание процессов, происходящих в гетероструктурах, и многолетний технологический опыт, что в полной мере присуще ведущим специалистам вышеуказанного предприятия.

На рис. 4 представлено излучение светодиодного кристалла при контроле на пластине и приведена типичная вольт-амперная характеристика светодиода; в рабочих режимах ток экспоненциально зависит от напряжения и незначительные изменения напряжения приводят к большим изменениям тока. Поскольку световая отдача прямо пропорциональна току, то и яркость светодиода оказывается нестабильной. Поэтому ток необходимо стабилизировать. Кроме того, если ток превысит допустимый предел, то перегрев светодиода может привести к его ускоренному старению.

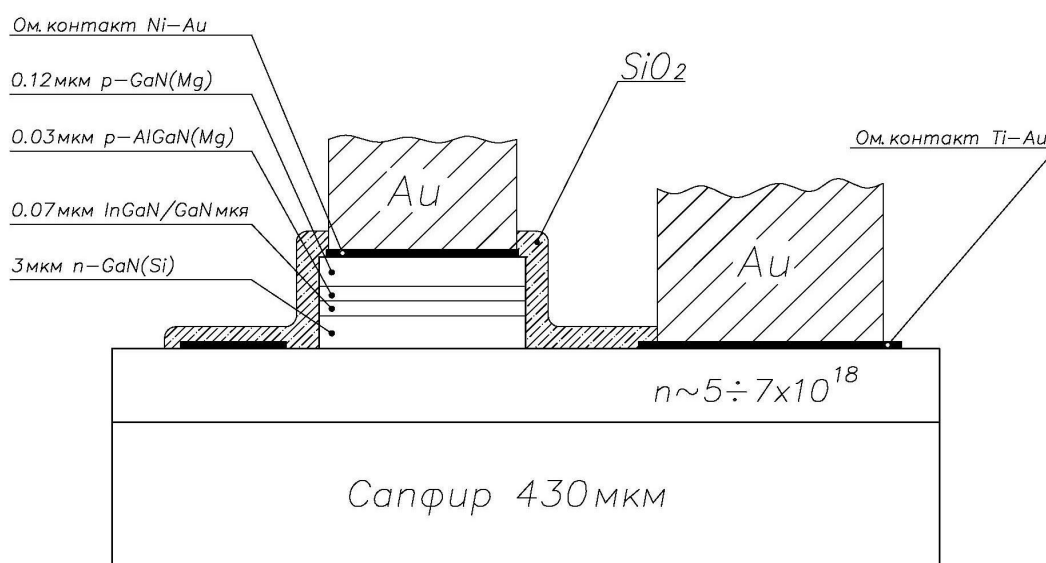


Рис. 3.

Поперечный разрез кристалла светодиода на GaN

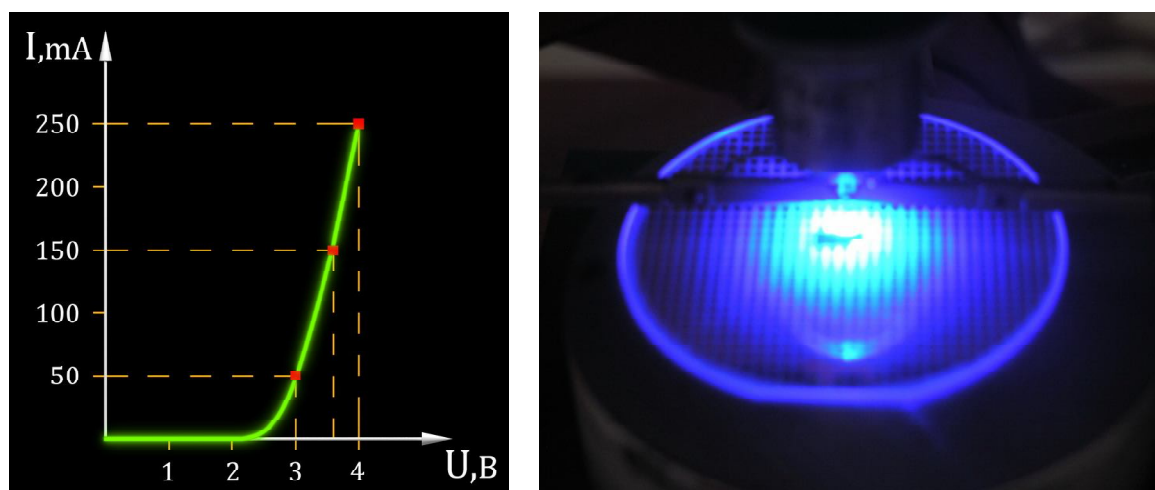


Рис. 4.

Типичная вольт-амперная характеристика светодиода

Излучение светодиодного кристалла при контроле на пластине

металлизации на основе Ni-Au показала свою пригодность для подавления эффектов электромиграции.

Проблемы с токовым насыщением в мощных светодиодах более серьезны. Для решения проблемы была оптимизирована конструкция электрода за счёт локального выращивания толстого 3-5 мкм гальванического Au.

Для устранения термической деградации количество тепла, выделяющееся при работе светодиодов, требует их монтажа на радиатор или теплопоглощающую подложку. Надо было максимально приблизить чип к теплопроводящей поверхности. Технология обратного монтажа (flip chip) позволила расположить испускающий свет p-n переход практически на теплоотвод. Использование керамики с высокой

теплопроводностью из нитрида алюминия (AlN) привело к значительному увеличению эффективности и операционных характеристик светодиодов на высоких токах. Уникальные тепловые свойства керамики AlN позволили осуществить многокристальную сборку светодиодов на одной плате, то есть сформировать светодиодный кластер.

Подводя итоги, можно сказать об огромных потенциальных масштабах распространения и, соответственно, производства кластерных светодиодных источников освещения. Еще несколько цифр - ежегодно в США на лампы накаливания, лампы дневного света и галогенные светильники расходуется 3,5 млрд. долларов. Объем мирового рынка источников света составляет примерно 11,5 млрд. долларов. Согласно исследованиям агентства Strategies Unlimited доля осветительных приборов на основе светодиодов на сегодня весьма невелика - 680 млн. долларов. Ожидается, что в течение пяти лет объем этого сектора достигнет 2-3 млрд. долларов.

Очевидно, что потребности в светодиодных кластерах освещения, необходимых для эффективного решения задач энергосбережения в масштабах Российской Федерации, не могут быть удовлетворены только импортом. Именно поэтому сегодняшний день настоятельно требует освоения новейших технологий и новых полупроводниковых материалов, коренного обновления изношенного технологического оборудования, реконструкции и модернизации всей производственной инфраструктуры. Необходимы подготовка новых кадров и создание условий труда, привлекательных для молодежи.

Для этого нужны крупные как частные, так и государственные инвестиции и, на наш взгляд, при определяющей силе государства. Вкладывая серьезные капиталы в электронное приборостроение, можно быть уверенным, что они окупятся реальной научно-технической независимостью нашей страны.

Литература

1. В. А. Буробин, Л. М. Пазинич, С. Е. Рудаков. *Комплексный подход в планировании направлений производственно-технологического развития ФГУП «ГЗ «Пульсар» на ближайшие годы. - Научно-техническая конференция «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Владимир, 2007.*

2. Сопов О. В., Бачурин В. В., Ногин В. М., Крымко М. М. *Кремниевые полевые транзисторы: становление и прогресс. - Электронная промышленность, 2003, вып.2, с. 176-191.*

3. С. С. Мамакин, А. Э. Юнович, А. Б. Ваттана, Ф. И. Маняхин. *Электрические свойства и спектры люминесценции светодиодов на основе гетеропереходов InGaN/GaN с модулированно-легированными квантовыми ямами. - ФТП, 2003, т. 37, в. 9, с. 1131-1137.*