

Стабильность параметров и надежность светодиодов закладываются на производстве

Статья посвящена проблемам деградации параметров светоизлучающих диодов при наработке. Рассмотрены физические механизмы, оказывающие влияние на характеристики излучающих кристаллов и светодиодов на их основе при проведении производственной операции термоультразвуковой приварки контактных проводников. Установлен характер и степень влияния ультразвукового воздействия при сварке на величину потенциальной деградации светового потока излучающих структур на основе InGaN. Указаны пути повышения надежности и долговечности светодиодов, которые можно использовать при их производстве. Статья может быть полезна технологам производств, разработчикам полупроводниковых приборов, светодиодам и устройств на их основе.

Сергей НИКИФОРОВ,
к. т. н.
nikiforov@screens.ru

Еще один угол зрения

Общепринято считать, что одно из основных преимуществ светодиодов по сравнению с традиционными источниками света состоит в более продолжительном сроке службы. И теперь, когда применение светодиодов, например, в различных светотехнических устройствах, уже не новость, вопрос качества и стабильности их параметров с течением времени наработки приобретает совершенно иное значение. Прежде всего из-за того, что появился опыт использования светодиодов в таких устройствах, которые уже проработали значительное время и показали, на что способны эти твердотельные источники света при наработке. В результате, стало ясно, что существует большая разница в том, насколько изменились параметры различных типов светодиодов от разных производителей, которые применены в таких устройствах. Ранее пользователи считали, что не имеет особого значения, по какой технологии выращены излучающие кристаллы, какие использованы технологические особенности их монтажа в светодиод: раз мы имеем дело со светодиодом, значит, он «вечный», как любой полупроводниковый элемент. По крайней мере, вопросы долговечности описывались очень просто: срок службы 100 000 часов при потере до 30% светового потока. И даже те, кто применял светодиоды в ответственной сфере (к ней относятся светофоры, аварийное освещение, бортовая аппаратура, различные устройства СЦБ и т. д.), считали это число основным, если они и делали расчеты долговечности или надежности (что крайне важно), то лишь приблизительно.

Вместе с совершенствованием технологий производства светодиодов — от выращивания кристаллов до «упаковки» в оптику (корпус) — развивается и методология изучения процессов деградации параметров. И, пройдя этап описания совокупности причин, которые в большинстве своем лишь констатировали явления изменения параметров с наработкой, современные методики и средства исследований позволяют теперь дифференцировать эти проблемы, постепенно выстраивая обратную связь между пользователем и производителем светодиодов. Таким образом, можно достичь существенного повышения качества при производстве приборов путем усовершенствования некоторых технологических операций при монтаже или сборке светодиодов, как оказалось, существенно влияющих на потенциальную степень деградации параметров.

При корпусировании светодиодов происходит множество физических воздействий на излучающий кристалл: это повышенные температуры, механические напряжения, действия различных химически активных сред и т. д. Все они, несомненно, оказывают влияние на качество последующего эксплуатационного периода светодиода. Однако одно из наиболее «сильных» и специфических воздействий излучающий кристалл получает при приварке контактного проводника (контактных проводников) с помощью термоультразвукового способа сварки. Некоторые особенности такого метода с точки зрения надежности в зависимости от качества исполнения описаны в [1]. Стоит также отметить, что присоединение выводов к излучающему кристаллу — наиболее трудоемкая операция во

всем цикле изготовления приборов. Данная работа посвящена исследованиям характеристик светодиодов и излучающих кристаллов при воздействии на них производственной операции термоультразвуковой приварки контактных проводников и ее последствий, проявляющихся как деградация светотехнических и электрических характеристик примененных излучающих гетероструктур AlInGaN при наработке во времени. Ввиду того, что эта операция осуществляется при производстве подавляющего большинства полупроводниковых приборов, а не только светодиодов, результаты проведенных исследований вполне могут быть использованы и при прогнозировании качества и долговечности любых активных элементов, в основе которых лежат широкозонные гетероструктуры указанной группы материалов. Но лишь светодиоды позволяют в прямом смысле слова «пролить свет» на проблемы деградации, хотя бы потому, что, в отличие от обычных диодов и транзисторов, они имеют внешнее излучение, а многие — еще и в видимом диапазоне, изучение параметров которого в процессе наработки может открыть множество тайн физических механизмов изменения характеристик полупроводниковых материалов.

В излучающем кристалле обнаружена жизнь

Эксперимент

Наиболее удобным методом исследования влияния ультразвукового импульса сварки на параметры излучающего кристалла является сравнительный анализ ряда характери-

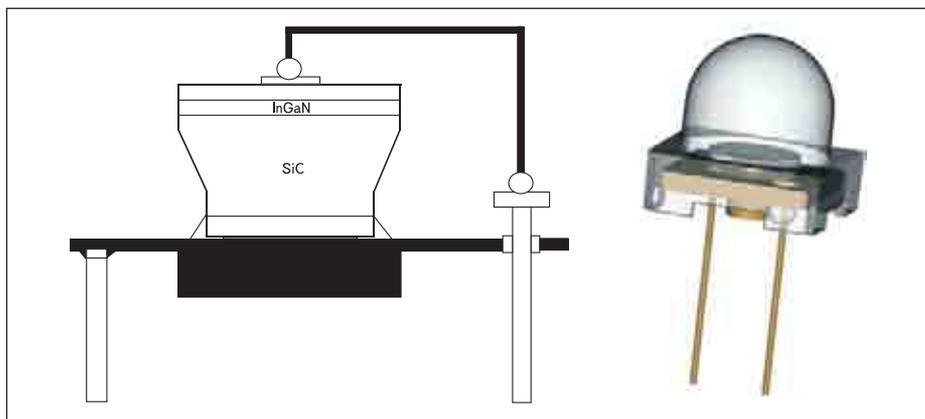


Рис. 1. Схематическое изображение кристаллодержателя без лунки с установленным кристаллом типа CREE MBright™ для эксперимента и вид светодиода на его основе

стик кристаллов, которые находятся в рабочем состоянии длительное время (более 6 месяцев), электрическое соединение с ними установлено без применения сварки.

Для устранения действия повышенной температуры, которая возникает в активной области кристалла и может существенно повлиять на деградационные характеристики параметров (зависимости значений различных величин от времени наработки) был применен эффективный, с точки зрения отвода тепла, кристаллодержатель без первичной оптики (параболической лунки), являющийся основой светодиода, описанного в [2]. Подобный кристаллодержатель (рис. 1) уже использовался ранее для изучения фотометрических характеристик кристаллов без оптики, например в [3]. Его удобно применять при проведении экспериментов и эксплуатации излучающих кристаллов размером до $0,3 \times 0,3$ мм в составе светодиодов при плотностях тока до 100 A/cm^2 .

Для эксперимента были выбраны наиболее известные кристаллы фирмы CREE — MBright™ и XBright™, выращенные на подложках SiC и имеющие один омический контакт для подсоединения контактного проводника.

Вначале кристаллы были смонтированы на кристаллодержатели штатным образом, с применением машины автоматической посадки. Затем с помощью специально изготовленной оснастки, обеспечивающей контактное соединение без приварки (на основе механического прижима упругого проводника к омическому контакту кристалла, рис. 2), были измерены:

- угловые распределения силы света образцов в нескольких плоскостях относительно физической оси с шагом фиксации значения силы света I_v при угле поворота $\Theta = 0,025^\circ$ (1,5 угловые минуты) в диапазоне $\pm 90^\circ$ (7200 точек I_v). Методика измерения описана в [1];
- прямые вольт-амперные характеристики в диапазоне 0–100 мА в двух режимах:
 - импульсном, со скважностью $Q = 1/100$, с шагом 1 мА (100 точек U_f),

- импульсном, со скважностью $Q = 1/10$, с шагом 0,1 мА (1000 точек U_f),
- ток в паузе между импульсами отсутствовал, время импульса при любом измерении составило $\tau = 0,1$ мс;

- обратная вольт-амперная характеристика измерялась в диапазоне $U_r = 0\text{--}20$ В с шагом 0,1 В.

По результатам измерений диаграмм углового распределения силы света был рассчитан световой поток и его значения в различных областях диаграммы. Эти значения, собранные вместе по принципу зависимости от времени в характеристики, позволили получить картину перераспределения светового потока по объему диаграммы излучения в процессе наработки. А поскольку оптика в образцах (кристалл на плоском кристаллодержателе) полностью отсутствует, можно предположить, что такое перераспределение существует и внутри излучающего кристалла, в его активной области, где расположены квантовые ямы. Подробно данная методика исследования структур описана в [3, 4].

На рис. 2 показана схема подсоединения контактного проводника с помощью прижима оснастки и после операции термоультразвуковой сварки.

Затем у части образцов была приварена контактная нить при использовании штатной машины, в режимах, соответствующих обычной производственной операции при массовом производстве светодиодов, с учетом типов кристаллов (различие обусловлено, например, методами посадки кристалла: на токопроводящий клей или на эвтектический сплав).

После этого этапа у тех образцов, которые подверглись операции приварки, был измерен комплекс параметров, описанный ранее. Затем все образцы были поставлены на специально приготовленные платы для наработки. Электрический контакт у образцов с неприваренным проводником обеспечивался, как и при измерениях, механическим прижимом специальных упругих проволок к верхнему омическому контакту кристалла. Каждый

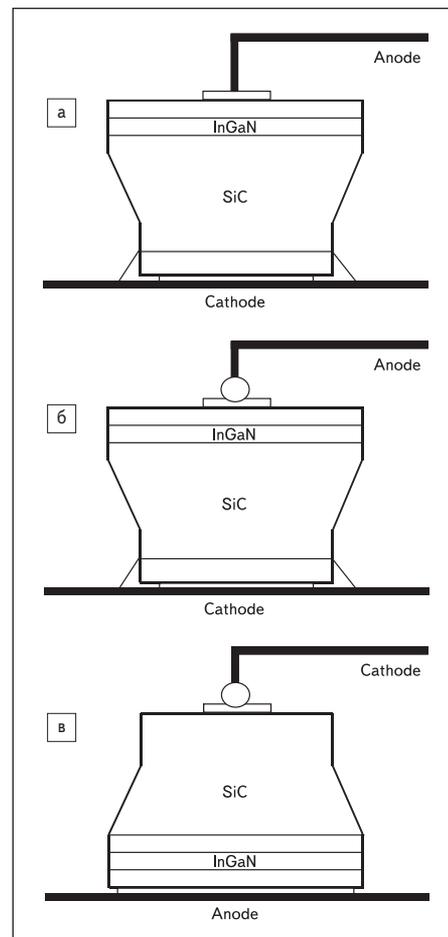


Рис. 2. Схематическое изображение подсоединения контактных проводников к исследуемым кристаллам, смонтированным на кристаллодержатель без оптики (рис. 1): а) механический прижим проводника к омическому контакту кристалла типа CREE MBright™, б) приваренная к контакту того же кристалла контактная нить, в) приваренная контактная нить у кристалла типа CREE XBright™

образец имел отдельный источник тока с тройной стабилизацией электрических характеристик (прямого тока I_f) в течение всего времени наработки, которое, как упоминалось ранее, составило не менее 6 мес. (более 4500 часов). Средняя плотность тока через кристалл при наработке была выбрана 64 A/cm^2 (40 мА).

В течение всего времени описанный комплекс параметров измеряли у каждого образца через некоторые промежутки, а рассчитанные по результатам измерения величины составили в совокупности деградационные характеристики исследуемых параметров излучающих кристаллов, разница между которыми, в свою очередь, находилась в зависимости от того, была ли применена операция ультразвуковой приварки контактного проводника или нет. Блок-схема эксперимента показана на рис. 3. Здесь также можно было выяснить, насколько эта операция влияет не только на степень деградации параметров, но и на то, как ультразвуковое воздействие изменит некоторые характеристики излучающей

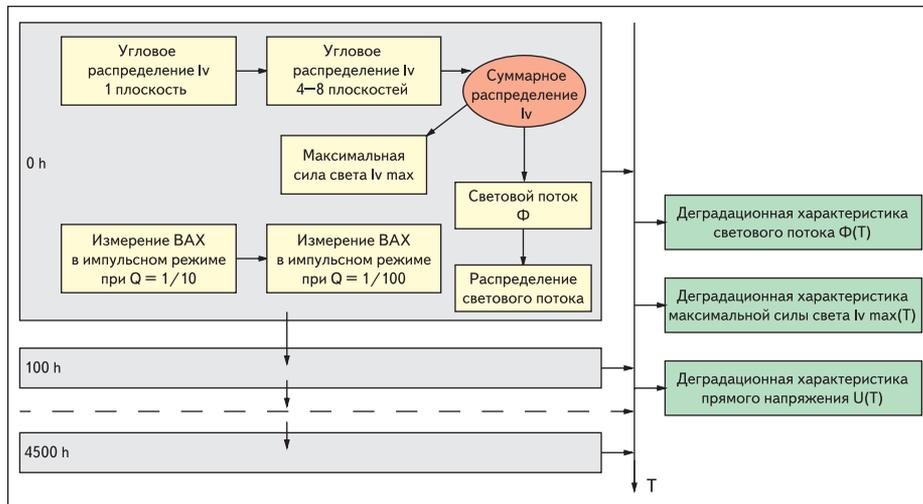


Рис. 3. Блок-схема эксперимента по исследованию деградации параметров

структуры, например распределение плотности светового потока по объему кристалла или вольт-амперные характеристики.

Расчеты и полученные зависимости

Для сравнения полученных характеристик удобнее разместить все графики так, как это сделано на рис. 4. В правом и левом вертикальном ряду показаны зависимости для образцов, исследованных без приварки контактной нити и с приваркой соответственно.

На первых двух графиках (рис. 4а, б) легко заметить, что в процессе наработки вплоть до 4500 часов световой поток у двух типов образцов имеет существенно отличающееся изменение его плотности по диаграмме углового распределения излучения. Имея в виду представленную конструкцию исследуемого кристалла на подложке SiC, показанную на рис. 2, у которого есть один центральный омический контакт, и сравнивая между собой оба графика, можно определить, что относительный рост доли светового потока на рис. 2б наблюдается именно в области этого контакта (область $-45...+30^\circ$). Смещение семейства кривых относительного распределения на этом рисунке в сторону отрицательных углов связано с особенностями измерения диаграмм пространственного распределения силы света, иных причин такого сдвига нет.

Конечно, нельзя назвать линейным изменение положения кривых распределения светового потока во времени и на левом графике. Но даже без каких-либо расчетов понятно, что практически по всей диаграмме (во всем диапазоне углов), исключая самые дальние от центра, боковые составляющие (углы более $\pm 70^\circ$), световой поток не претерпевает перераспределения, изменяя лишь свое интегральное значение, о чем свидетельствует рис. 4в — деградационная характеристика суммарного светового потока Φ . Продолжая сравнение эффекта перераспределения светового потока, стоит отметить также, что одна только операция приварки, без наработ-

ки, уже значительно повлияла на поведение описываемых зависимостей. Об этом свидетельствует кривая зеленого цвета на рис. 4б, обозначенная там как «0 h». Данный факт может служить основанием для вывода о том, что ультразвуковое воздействие, даже такое кратковременное и маломощное (параметры импульса ультразвука при сварке приведены в таблице 1), будет оказывать существенное влияние на работу излучающей структуры и, как следствие, на светотехнические и электрические характеристики светодиодов на их основе в процессе дальнейшей наработки. Здесь уже можно говорить о надежности, долговечности, стабильности и потенциальной деградации параметров. Поскольку операция приварки не проводилась по отношению к образцам, представленным в левой колонке диаграмм рис. 4, и наработка продолжалась с использованием контакта на прижиге, первая измеренная характеристика принята за 0 часов (0 h).

Вольт-амперные характеристики, представленные в нижней части рис. 4, также имеют

Таблица 1. Параметры импульса ультразвука при сварке

Длительность импульса сварки, мс	20–50
Частота ультразвука, кГц	40–60
Мощность УЗ-импульса, мВт	30–50

различия, с помощью которых можно сделать предположение о природе возникновения описанных эффектов перераспределения светового потока и деградационных явлений.

Таблица 2. Методы сварки материалов

Материал контактной площадки	Методы сварки материалов выводов											
	ТКС			СКИН			ЭКОС			УЗС		
	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu
Au с подслоем никрома	++	+	-	++	++	+	++	-	++	++	++	+
Cu или Ni с подслоем никрома	++	+	-	++	++	+	++	-	+	+	++	+

Механизмы, поясняющие полученные результаты

Прежде всего стоит напомнить о применимости современных способов приварки контактных проводников к омическим контактам полупроводниковых кристаллов и уточнить процессы, происходящие в материалах, участвующих при термоультразвуковой сварке в частности.

В зависимости от материала вывода и контактной площадки используют термокомпрессионную сварку (ТКС), сварку косвенным импульсным нагревом (СКИН), электроконтактную одностороннюю сварку (ЭКОС) двоящим инструментом и ультразвуковую сварку (УЗС) (табл. 2).

В отдельных случаях находят применение методы сварки лазерным или электронным лучом. Преимущества этих способов — в чистоте процесса, возможности выполнения соединения через любую прозрачную среду. Однако эти способы имеют и недостатки: некоторые комбинации свариваемых материалов вследствие быстрого нагрева и охлаждения в точке соединения становятся хрупкими, а тепловой режим зависит от отражательной способности соединяемых материалов. Эти типы сварки требуют точного регулирования количества энергии, длительности импульса, пиковой мощности, формы и воспроизводимости импульсов.

При термокомпрессионной сварке соединение образуется в твердой фазе в результате нагрева и сжатия соединяемых поверхностей. Пластическая деформация, возникающая в зоне контакта, способствует вытеснению адсорбированных газов и остаточных загрязнений с контактных поверхностей, в этом случае становится возможным электронное взаимодействие соединяемых материалов, то есть образование межатомных связей. Получению прочного соединения способствует также ограниченная взаимная диффузия материалов и образование твердых растворов в тонкой приграничной области. К недостаткам термокомпрессии следует отнести ограниченное количество сочетаний соединяемых материалов, жесткие требования к подложкам, которые должны быть изготовлены из материалов, обладающих малой чувствительностью к термическому удару и хорошей адгезией с напыленными пленками, и ограниченные геометрические размеры соединяемых элементов. Процесс чрезвычайно чувствителен к загрязнениям поверхности, окисным пленкам, внешним условиям и требует подбора режима термокомпрессии.

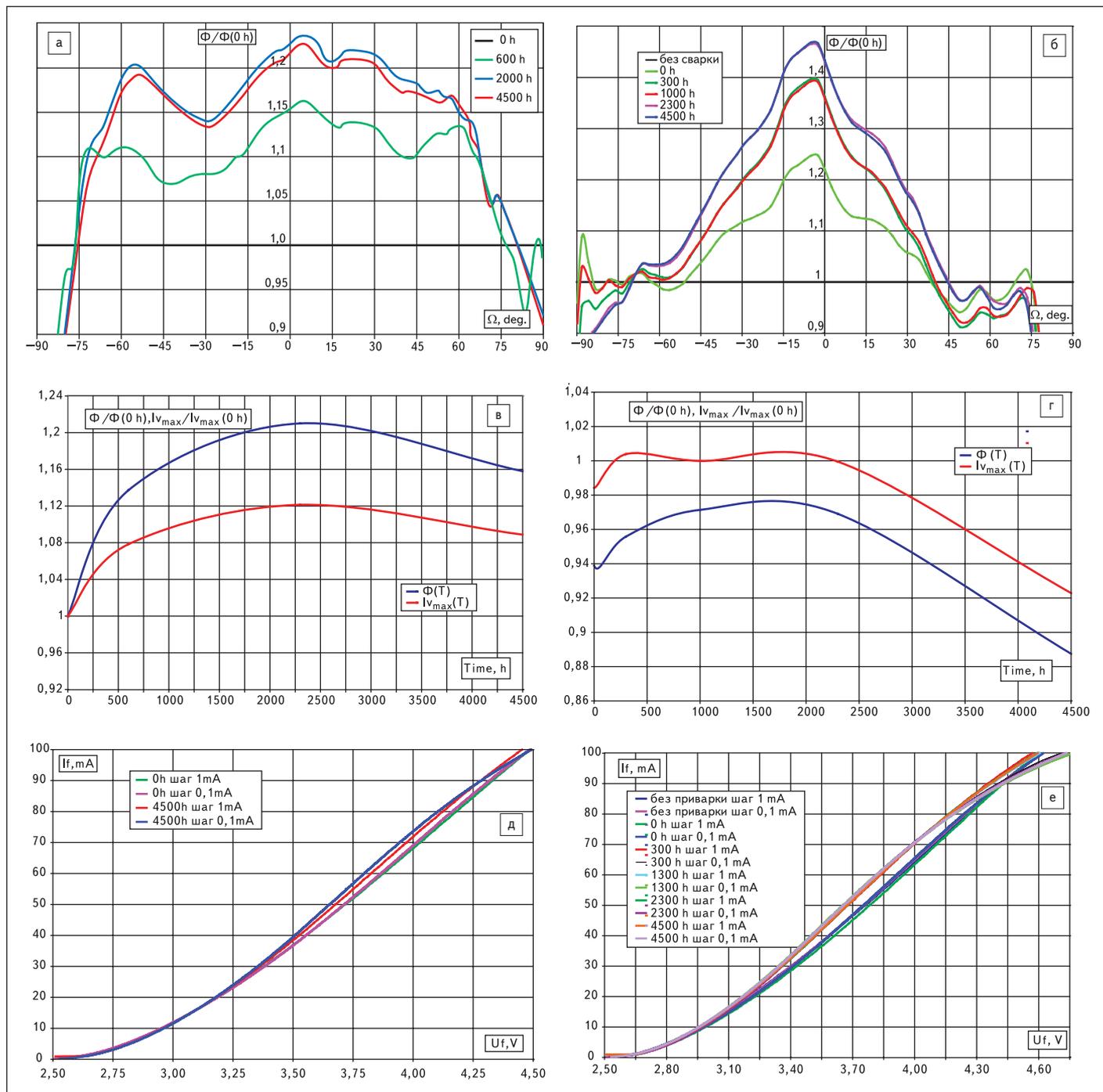


Рис. 4. Характеристики исследуемых образцов в процессе наработки. На сносках приведено соответствие графиков времени наработки в часах (h).

Без приварки контактной нити (воздействие ультразвуком отсутствует):

а) относительное перераспределение плотности светового потока Φ по углу излучения;
 в) деграционные характеристики светового потока Φ и максимальной силы света I_{\max} ;

д) вольт-амперные характеристики.

С приваркой контактной нити (воздействие ультразвуком):

б) относительное перераспределение плотности светового потока Φ по углу излучения;
 г) деграционные характеристики светового потока Φ и максимальной силы света I_{\max} ;

е) вольт-амперные характеристики

Определяющей тенденцией развития методов микросварки от ТКС до УЗС является локализация зоны нагрева, что уменьшает тепловое воздействие на изделие в целом и повышает воспроизводимость параметров сварного соединения.

Соединение при этом способе сварки обрывается под действием ультразвуковых (с частотой 40–100 кГц) колебаний и сжимаю-

щих давлений, приложенных к свариваемым деталям. Колебательные движения ультразвуковой частоты разрушают неровности поверхности и оксидный слой. Например, при осадке алюминиевого проводника оксидная пленка на нем растрескивается, и в зону контакта выходит чистый алюминий, растекание которого на поверхности контакта кристалла способствует удалению

из зоны сварки загрязнений и осколков оксидных пленок.

Перед включением ультразвуковых колебаний (УЗК) под действием статически приложенной нагрузки на инструмент из-за деформации проводника создается некоторая первоначальная площадь контактирования на границе раздела инструмент/проволока и проволока/омический контакт кристалла.

После включения УЗК, в результате активирующего действия ультразвука, снижающего предел текучести материала проволоки (золота, алюминия), облегчается пластическая деформация проводника и идет интенсивная его осадка. Таким образом, УЗК при сварке, прежде всего, создают условия для быстрого деформирования физического контакта, одновременно с этим происходит активация контактных поверхностей, приводящая к образованию очагов взаимодействия в условиях пластической деформации материала проволоки и упругой деформации подложки омического контакта (в нашем случае — SiC).

Совместное воздействие на соединяемые детали механических колебаний и относительно небольшого давления сварочного волновода инструмента (как правило, не более 0,5 Н) обеспечивает осаждение материала в зоне соединяемых поверхностей без внешнего подвода тепла. За счет трения, вызванного возвратно-поступательным движением большой частоты сжатых контактирующих поверхностей, происходит нагрев поверхностных слоев материалов. Трение не является доминирующим источником теплоты при сварке, но его «вклад» в образование сварного соединения является существенным. Компенсацию недостатка нагрева обычно выполняют с помощью некоторого подогрева свариваемых заготовок, поэтому сварка называется термоультразвуковой. Всегда в таких случаях технология проведения данной операции предписывает выбирать между степенью воздействия на кристалл того или иного деструктурирующего фактора: либо допустить большой нагрев, либо применить большую мощность ультразвукового (УЗ) импульса при сварке. Как правило, склоняются к большему нагреву: свариваемые поверхности уже нагреты до 180–200 °С, и тогда для обеспечения прочного соединения достаточно мощности УЗ-импульса 20–30 мВт. Однако это не всегда возможно, например, в случае применения для монтажа кристаллов эвтектических припоев, поэтому температура во время этой операции снижается, но повышается мощность УЗ-импульса.

Воздействие ультразвука не ограничивается рамками омического контакта, а распространяется на нижележащие слои материала кристалла. Будучи хорошим проводником механических колебаний, излучающий кристалл подвергается УЗ-воздействию, распределенному по его объему. Это воздействие неизбежно вызовет изменение электрических и излучательных свойств активной области примененной структуры и материала кристалла, прежде всего из-за довольно сильного пьезоэффекта, свойственного твердым растворам $\text{AlIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Возвращаясь к обсуждению графиков рис. 4, следует обратить внимание на изменение вольт-амперных характеристик (ВАХ) в процессе наработки. На обоих графиках

имеет место увеличение крутизны характеристик со временем при средних плотностях тока. Это обусловлено наличием шунтирующих центров безызлучательной рекомбинации, в совокупности имеющих нелинейную ВАХ, и при параллельном включении с участками без дефектов, существенно влияющих на наклон (крутизну) общей ВАХ-структуры. При приложении к излучающей структуре внешнего электрического поля возникает инжекция носителей заряда, интенсивность которой будет зависеть от величины этого поля и определять суммарный ток, но плотность этого тока в пределах активной области кристалла не будет одинаковой по всей ее площади (объему). Плотность тока упомянутых центров безызлучательной рекомбинации будет существенно выше из-за значительно меньшего их потенциального барьера относительно широкозонных участков структуры. И достаточно совсем небольшого времени протекания тока через эти элементы, чтобы они были разрушены, например из-за локального перегрева, и превращены в секторы с резистивным характером ВАХ. Суперпозиция токов, протекающих через эти и рекомбинационные элементы структуры, и будет определять суммарную ВАХ. При самых больших плотностях тока, обозначенных на диаграммах (соответствующих $I_f = 80\text{--}100\text{ мА}$), доминирующее действие на ход ВАХ оказывает последовательное сопротивление всей электрической цепочки светодиода, «изгибаемая» характеристики в сторону больших значений прямого напряжения. Следует отметить, что здесь сказывается и эффект разогрева кристалла проходящим током, что также заметно на графиках ВАХ; характеристики изменились при меньшей скважности импульсов. Однако можно заметить, что у образцов с применением УЗ-сварки увеличение крутизны ВАХ наступило не только гораздо раньше по времени, но и при значительно меньших плотностях тока и с большим градиентом изменения. Увеличение крутизны ВАХ в этом случае связано с пьезоэффектом в кристалле: при УЗ-воздействии появляющиеся локальные площадки с большой напряженностью поля разных знаков, возникающей на время действия механического импульса УЗ, образуют включения с каналами утечки, как результат «выгорания» путей уравнивания потенциалов (пробоя) разностей напряженности полей. Проводимость таких элементов существенно выше, чем секторов барьерной структуры активной области, поэтому при больших плотностях тока через кристалл доминировать в характере поведения суммарной ВАХ светодиода (определять ее крутизну) будут именно эти элементы [5]. Можно предположить, что новые каналы утечки в виде результатов пробоя при продолжающемся воздействии УЗ будут всегда возникать и в других областях кристалла из-за того, что увеличенная проводимость «пробитых» элементов не позволит возник-

нуть большой разности потенциалов в местах их нахождения, и, таким образом, будет прогрессировать дальнейшее изменение начальной ВАХ. В отличие от локальных шунтирующих секторов, формирующихся в области омических контактов при воздействии внешнего электрического поля, данный эффект будет больше влиять на параметры структуры, и в частности на ВАХ. Это подтверждают и графики: чем больше плотность тока, тем больше разница в прямых напряжениях при одном и том же значении тока. Стоит отметить, что частота УЗ будет определять величину описанного эффекта с учетом резонансных пьезосвойств материала кристалла, степенью рассогласования периодов кристаллических решеток подложек и выращенных на них гетероструктур [5].

Однако второй (нижний на рис. 2) контакт кристалла в исследуемых образцах электрически подсоединен к кристаллодержателю с помощью эпоксидного токопроводящего состава, который одновременно является и элементом механического крепления и выполняет функцию теплоотвода. Воздействие УЗ распространяется и на это соединение, изменяя его свойства (электропроводность, тепловое сопротивление). Механическое разрушение (распатывание) соединений алюминиевых и серебряных частиц токопроводящего клея приведет к появлению дополнительного переходного сопротивления в общей электрической цепи питания светодиода. Влияние этого сопротивления на поведение суммарной ВАХ будет также неотъемлемой частью последствий воздействия УЗ, и особенно оно будет заметно на больших плотностях тока, когда падение напряжения на нем достигнет значительной величины. Здесь же будет сказываться и уменьшение теплопроводных свойств этого соединения, что найдет отражение на ходе ВАХ при больших плотностях тока. Последнее актуально и для кристаллов, структуры которых выращены на подложках Al_2O_3 , где это соединение должно обладать минимальным тепловым сопротивлением.

Если рассматривать структуру как параллельное соединение площадок с различным содержанием индия в активном слое гетероструктур в твердых растворах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [6], то различие в механических свойствах (жесткость) и степени проявления пьезоэффекта у различных секторов с разным x будет определять степень появления шунтирующих элементов среди них, и поэтому изменяется доля их излучения в интегральном составе структуры. Это проявляется как изменение спектрального состава излучения и сдвига его в длинноволновую область после воздействия УЗ. Очевидно, что наибольшему разрушению подвержены элементы с низким содержанием индия, генерирующие самое коротковолновое излучение, через которые проходят токи гораздо большей плотности. Это объясняет и существенное уменьшение прямого напряжения при средних плотностях тока по-

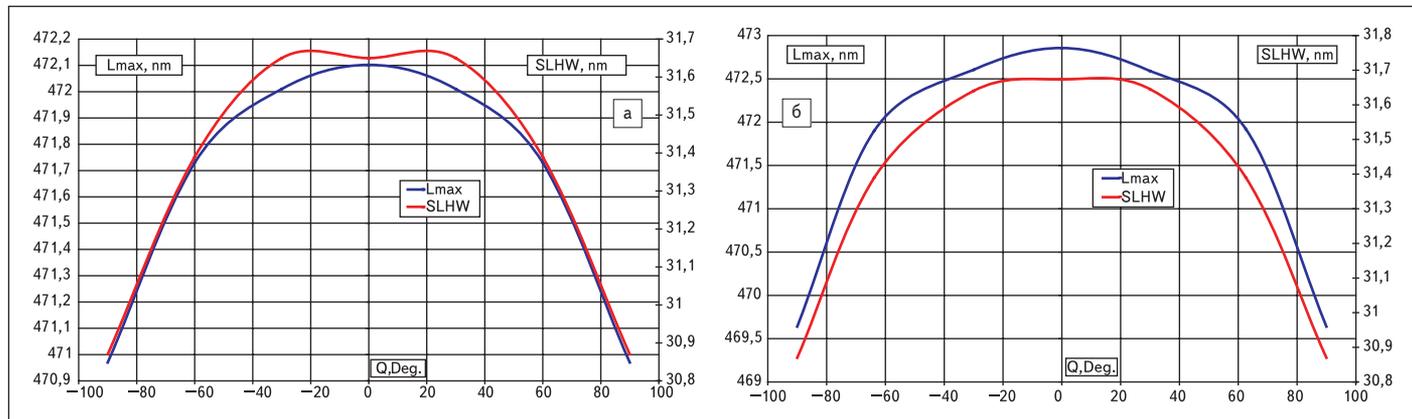


Рис. 5. Усредненное угловое распределение максимальной длины волны (синие кривые) и полуширины (красные кривые) спектра излучения: а) для образцов без приварки контактной нити, б) с приваркой контактной нити (воздействие ультразвуком)

сле воздействия УЗ (рис. 4е), потому как элементы с низким содержанием индия имеют самую большую E_g и, соответственно, самые высокие значения U_f . Стоит добавить также, что степень изменения состава спектрального распределения может зависеть от частоты УЗ, что связано с резонансными свойствами возникновения пьезоэффекта.

Рост длинноволновых составляющих приводит к увеличению эффективности излучения тех частей структуры, которые их излучают, что, однако, не пропорционально существенной деградации излучения секторов с центральными длинами волн, и поэтому суммарный интегральный световой поток уменьшается [4] (это наиболее заметно на деградационных характеристиках, представленных на рис. 4). При переходе к оптической мощности зависимость окажется с еще большей крутизной в сторону снижения из-за одновременного со световым потоком значительного уменьшения спектральной световой эффективности вследствие длинноволнового сдвига спектрального распределения.

Вероятно, этот процесс связан с эффектом Штарка, предполагающим спонтанную поляризацию в квантовых ямах гетероструктур с образованием встроенных электрических полей, формирующих заряженные центры, существенно влияющие на процессы излучательной рекомбинации. Этот эффект проявляется как сдвиг основного излучения в длинноволновую область.

Связь этих механизмов и процессов перераспределения плотности светового потока по диаграмме направленности излучения представлена на рис. 5.

Имея в виду графики рис. 4б, в и рис. 5 и сказанное о распределении плотностей токов через отдельные участки излучающей структуры, можно заметить, что большая доля коротковолновых составляющих спектра будет присутствовать на периферийных частях диаграммы пространственного распределения излучения, соответствующих углам более 60 градусов или излучению боковых граней. Это хорошо объясняется картиной рас-

пределения приложенного внешнего электрического поля: сужение полуширины спектрального распределения у крайних границ диаграмм, показанное на рис. 5, свидетельствует о более низкой плотности тока, протекающего через этот участок. Разница в графиках рис. 5а, б состоит в значительно большем разбросе максимальной длины волны по углу излучения, полученном у образцов, подвергшихся операции сварки с воздействием УЗ (рис. 5б). Как говорилось ранее, этот разброс может быть следствием большей разницы в плотностях тока через центральные и периферийные участки кристалла, возникшей вследствие протекания рассмотренных выше процессов, вызванных воздействием УЗ операции сварки.

Описанные механизмы, приводящие к изменению хода ВАХ, хорошо объясняют представленные на рис. 4а, б диаграммы перераспределения светового потока по углу излучения. Действительно: относительное увеличение доли светового потока в центральной (приконтактной) части кристалла со временем наработки, показанное на рис. 4б, вызвано не чем иным, как значительным увеличением плотности тока в этой области. Если предположить, что имеется пропорциональность этого процесса, то тогда плотность тока выросла приблизительно в полтора раза (исходя из относительного роста светового потока). При этом боковые составляющие потока, наоборот, существенно снизили свою долю в суммарном значении, что сказалось на ходе деградационной характеристики светового потока, показанной на рис. 4г. При сравнении с той же характеристикой кристалла, не испытывавшего УЗ-воздействие приваркой контактной нити, можно заметить, что его деградационная характеристика имеет противоположное направление. Во-первых, в ней отсутствует участок резкого падения значения светового потока в начальный момент, который связан именно с воздействием УЗ. Во-вторых, пропорциональное (по всей диаграмме излучения) увеличение светового потока с мини-

мальной степенью его перераспределения вызывает такое же увеличение суммарного значения (на ту же величину — около 20%). В-третьих, дальнейшая деградация светового потока будет определяться исключительно механизмами длительного старения, например, описанными моделью Шокли-Холла-Рида, а также диффузией материала омического контакта в низлежащие слои полупроводника (металлизация), снижением квантового выхода отдельных секторов, распределенных в объеме активной области по составу индия в материале структуры и имеющих повышенные плотности тока, образованием заряженных центров в области дислокаций и т. д., не приводящими, однако, к катастрофическим, и даже значительным изменениям величины светового потока (как показали исследования, это значение может составить около 2–3% в год) и других параметров.

Увеличение значения светового потока в начале деградационной характеристики (при первых 2000–3000 часов наработки) объясняется в [7] подъемом общего квантового выхода структуры, связанного с увеличением концентрации заряженных акцепторов в области пространственного заряда из-за дополнительной активации Mg при распаде остаточных комплексов Mg–H, оставшихся после введения легирующего элемента при эпитаксии AlInGaN. Когда ограниченный «запас» комплексов Mg–H заканчивается, над процессами деградации начинают доминировать механизмы, определяемые дефектами структуры или описанными выше эффектами. На деградационных характеристиках это практически постоянно (в зависимости от плотности тока или условий эксплуатации) отмечается в области точек 2000–3000 часов наработки, и это всегда означает окончание периода стабилизации параметров.

Однако значительный рост светового потока в центре диаграммы углового распределения излучения кристаллов с приваренной контактной нитью не может не только компенсировать потери боковых составляющих,

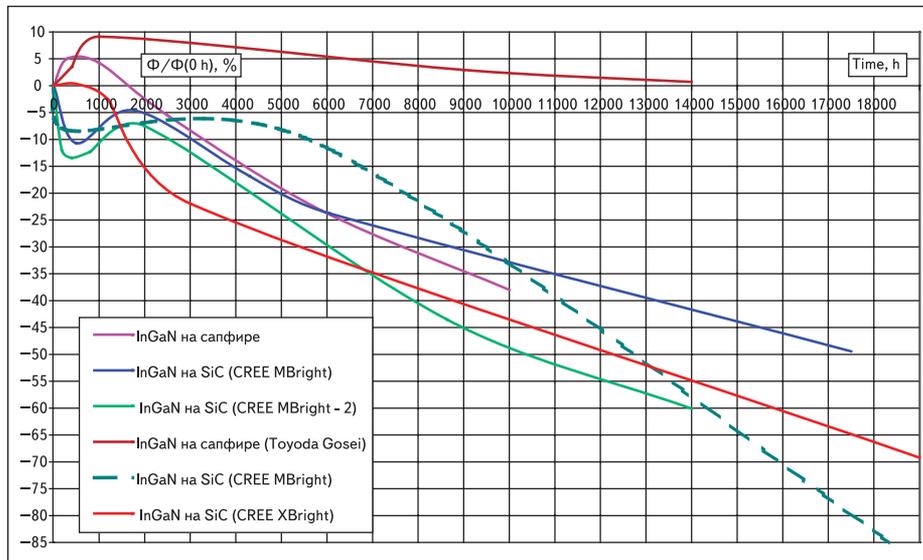


Рис. 6. Деградационные характеристики светового потока светодиодов синего цвета свечения на основе гетероструктур AlInGaN в составе излучающих кристаллов различных конструкций

сохраняя постоянство суммарного значения, но и быть долгим. С одной стороны, описанный выше и в [7] эффект, конечно, сыграет свою стабилизирующую роль, и это показывает график на рис. 4г: вплоть до 2000 часов наработки наблюдается рост светового потока, похожий на график рис. 4в, правда, только уже в «минусовой» половине координат, но с другой стороны, как только ресурс процесса распада комплексов Mg–H истощится, повышенная плотность тока через приконтактную область кристалла вызовет ускоренную деградацию светового потока (причины ее возникновения и связь с плотностью тока подробно описаны в [4]). Деградационная характеристика динамично устремится вниз, как это и показано на рис. 4г. В итоге, через одинаковое время наработки мы имеем почти 30%-ную разницу в значении светового потока у исследуемых образцов, что также можно заметить на графиках рис. 4в,г. Причем если подходить к этому факту с точки зрения абсолютного начального значения светового потока, то процесс его деградации у образцов, проходивших наработку без применения приварки контактного проводника, вообще еще не начался: в точке 4500 часов он превышает начальное значение на 16% и, судя по ходу графика, не так скоро его снова достигнет.

Деградационные характеристики максимального значения силы света, также показанные на рис. 4в,г, в основном определяют степень перераспределения светового потока и при широкоугольной диаграмме направленности излучения будут повторять ход характеристик потока.

Новые ответы на старые вопросы

Если учесть, что операция термоультразвуковой приварки контактных проводников при монтаже кристаллов используется

в подавляющем большинстве производств светодиодов или иных полупроводниковых элементов, то можно сказать, что на выходе конвейера мы получаем приборы с некоторой потенциальной степенью деградации параметров, отличающейся от той, которая была бы при отсутствии воздействия ультразвука на структуру. Именно такой вывод напрашивается после обсуждения представленных результатов. Однако нельзя сказать, что качество современных светодиодов неприемлемо. В большинстве случаев операция приварки контактных проводников достаточно отработана и оптимизирована, поэтому наносит минимальный ущерб свойствам полупроводниковых кристаллов. К сожалению, достоверная оценка истинности этого утверждения возможна лишь спустя довольно долгое время, когда становится ясной степень деградации параметров. В приведенных исследованиях показано, насколько можно повысить стабильность и долговечность характеристик светодиодов, если не прибегать к применению ультразвукового импульса при приварке контактных проводников. Стоит отметить, что подобные технологии монтажа кристаллов имеют место и оправданы указанной эффективностью сохранения параметров.

На рис. 6 приведены деградационные характеристики светового потока некоторых типов излучающих кристаллов, измеренные в составе светодиодов, произведенных промышленным способом.

Можно заметить, что поведение деградационных характеристик в использованном в настоящем исследовании промежутке времени (4500 часов) совпадает с диаграммами большинства типов кристаллов и светодиодов на их основе, представленных на рис. 6. Более того, здесь также можно проследить дальнейший ход этих зависимостей, вплоть

до 20 000 часов наработки (около 2,5 лет). По достижении этого времени практически у всех кристаллов остается немногим более 30% светового потока от начального значения. Ясно, что нет смысла говорить о 50 000 часах наработки с потерей 30% светового потока, которое указано в спецификациях большинства производителей [1]. В подтверждение этому стоит заметить, что к такому выводу в настоящей работе мы пришли с двух сторон: исходя из представленного эксперимента по изучению влияния УЗ на излучающий кристалл и приведя данные (рис. 6), которые получены из исследований деградации параметров промышленных светодиодов при длительной наработке, где, безусловно, применялась операция УЗ-приварки контактных проводников. Более того, на рис. 6 имеется деградационная характеристика светодиодов, выполненных на основе кристаллов AlInGaN, выращенных на подложках Al₂O₃, которые имеют 2 контакта, подвергшихся такой операции, а значит, излучающая структура получила двойное воздействие УЗ. Но из-за существенно большего рассогласования периодов кристаллических решеток AlInGaN и Al₂O₃, чем AlInGaN и SiC, как в представленном в данной работе исследовании, деструктивный эффект от воздействия УЗ будет несомненно выше. Хотя бы из-за отличающейся практически на порядок величины, плотности дислокаций у кристаллов AlInGaN на Al₂O₃ вследствие упомянутого рассогласования периодов решеток. Стоит также отметить, что светодиоды фирмы Nichia производятся именно по такой технологии.

Это нашло отражение на указанной характеристике (рис. 6), которая имеет больший градиент уменьшения светового потока со временем наработки, чем характеристики светодиодов на основе кристаллов InGaN на SiC (CREE MBright) в различных вариантах корпусов.

Однако на рис. 6 есть еще одна примечательная кривая, занимающая самое верхнее положение относительно других. Это деградационная характеристика светового потока светодиодов фирмы Toyota Gosei. Безусловно, такое поведение этой характеристики имеет множество причин, но если абстрагироваться от большинства из них и оставить только одну, которой и посвящена данная работа, то можно сделать один вывод: кристалл смонтирован без применения УЗ-приварки проводников к омическим контактам, которых, кстати, в этом кристалле два. Действительно: деградационная характеристика этих светодиодов практически идентична той, что получена в ходе эксперимента и представлена на рис. 4а, хотя конструкции кристаллов отличаются кардинально — так, как описано ранее (имеются в виду различные подложки). В действительности кристалл фирмы Toyota Gosei на подложке Al₂O₃ смонтирован методом flip-chip и не испытывает непосредственного воздействия УЗ-сварки (рис. 7).

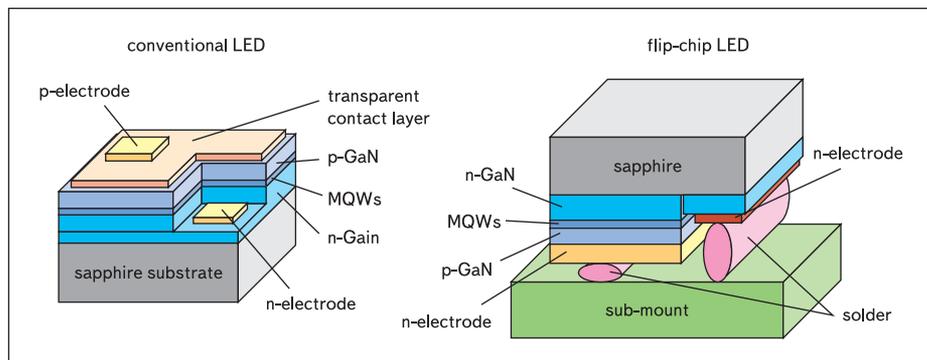


Рис. 7. Монтаж кристалла InGaN на подложке Al_2O_3 методом flip-chip

А некоторое несоответствие деградационных характеристик рис. 4а,б светодиодов фирмы Toyota Gosei, касающееся несколько меньшего увеличения светового потока в период стабилизации (до 2000 часов) у последних — 10% против 22%, можно отнести к тем самым отличиям в рассогласовании периодов решеток. Понятно, что в этом смысле большие перспективы у кристаллов на подложках SiC.

Из сказанного можно сделать один самых важных выводов по итогам представленного эксперимента: в излучающих кристаллах светодиодов имеет место деградация параметров гетероструктур на основе InGaN при воздействии УЗ (в виде технологической операции термоультразвуковой приварки контактных проводников к омическим контактными площадкам кристалла); у кристаллов различных конструкций физические механизмы деградации схожи, независимо от материала подложки.

Лучше меньше, да лучше

Возвращаясь к теме проблем деградации параметров излучающих структур, стоит напомнить, что современные технологии производства самих структур и светодиодов на их основе должны учитывать множество факторов, оказывающих влияние не только на качество отдельных производственных операций, но и на то, как впоследствии использованные режимы и условия проведения этих операций скажутся на работоспособности и стабильности параметров произведенных приборов. И если рассматривать отдельные комплектующие, составляющие, например, светодиод: кристаллодержатель, излучающий кристалл, линза и т. д., как сырье для его изготовления, то нужно таким образом обрабатывать это сырье до получения изделия, чтобы оно не потеряло свои полезные свойства уже при обработке.

Автор выражает особую благодарность профессору Московского государственного института стали и сплавов (МГИСиС), доктору физико-математических наук Е. К. Наими и аспиранту кафедры технологии материалов электроники МГИСиС О. И. Рабиновичу за идею проведения исследований. ■

Литература

1. Никифоров С. Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
2. Патент РФ №2114492 «Светоизлучающий диод» (Светоизлучающий диод с линзой на основе макролона и улучшенным теплоотводом).
3. Никифоров С. Г. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным // Компоненты и технологии. 2006. № 3.
4. Никифоров С. Г. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp // Компоненты и технологии. 2006. № 11.
5. Ermoshin I. K., Manyakhin F. I., Naimi E. K., Nikiforov S. G., Rabinovich O. I., Sushkov V. P., Shishov A. V. Studies of InGaN LEDs degradation // Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications XI. Photonics West Conferens 2007.
6. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Соболев П. А., Сушков В. П. Свойства зеленых и синих InGaN-светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2002. № 1, 2.
7. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Изменение люминесцентных электрических свойств светодиодов из структур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33, вып. 2.