

УДК 621.372.038

В.Г. Сидоров, Н.М. Шмидт

**ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

V.G. Sidorov¹, N.M. Shmidt²

¹ St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

² Ioffe Physical Technical Institute,
26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia.

**DEGRADATION PHENOMENA AND THE PROBLEM
OF SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING SOURCES RELIABILITY**

Рассмотрены механизмы деградации в источниках излучения на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 , а также особенности процесса деградации в структурах InGaN/GaN. Анализируется проблема надежности полупроводниковых источников излучения.

МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ. НАДЕЖНОСТЬ. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ. СТРУКТУРЫ InGaN/GaN. ДИСЛОКАЦИИ. ВНУТРЕННИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

The degradation mechanisms in light emitting sources based on A^3B^5 semiconductors and also the peculiarities of degradation processes in light emitting sources based on InGaN/GaN structures have been reviewed. The problem of semiconductor light emitting sources reliability have been analyzed.

DEGRADATION MECHANISMS. RELIABILITY LIGHT EMITTING SOURCES. InGaN/GaN STRUCTURES. DISLOCATIONS. INTERNAL MECHANICAL STRESSES.

Современные информационные технологии, используемые практически во всех областях человеческой деятельности, немислимы без полупроводниковых приборов. Именно поэтому проблеме надежности и деградационным явлениям в полупроводниковых материалах и приборах уделяется большое внимание как в прикладной, так и в фундаментальной науке. Деградацией принято называть необратимое ухудшение эксплуатационных параметров прибора во время его работы. Время, в течение которого параметры прибора при его эксплуатации сохраняются в пределах гаран-

тичных допусков, называют сроком службы, долговечностью или ресурсом прибора. Тогда как под надежностью понимают способность прибора выполнять свои функции в течение заданного условиями эксплуатации промежутка времени и в соответствии с предъявляемыми к прибору техническими требованиями. Отсюда следует, что прибор может иметь малый срок службы и быть надежным в течение этого срока. Если бы не сложности в определении индивидуального срока службы для каждого прибора в отдельности, то все полупроводниковые приборы могли бы найти свое применение.

Особое значение проблема надежности имеет для полупроводниковых источников излучения, прежде всего, для мощных светодиодов и лазеров, поскольку они работают при больших уровнях возбуждения, когда процессы деградации идут с повышенной скоростью. Многолетние исследования позволили установить основные механизмы деградации оптической мощности и разработать методы прогнозирования срока службы для светодиодов и лазеров, изготавливаемых на основе традиционных соединений A^3B^5 – арсенидов, фосфидов, антимонидов [1, 2]. Появление в конце XX века светодиодов и лазеров на основе соединений металлов третьей группы с азотом (III-нитридов AlN, GaN, InN) заставило вернуться к проблеме надежности полупроводниковых источников излучения на новом уровне. Имеющихся представлений о механизмах и природе развития деградационных процессов в источниках излучения на основе традиционных A^3B^5 , а также о методах прогнозирования их сроков службы оказалось недостаточно применительно к источникам излучения на III-нитридах.

В связи с принятием во многих странах мира государственных программ по созданию твердотельного энергосберегающего освещения задача по увеличению срока службы мощных синих светодиодов InGaN/GaN приобрела лидирующее значение. Несмотря на заявленные рядом ведущих мировых фирм сроки службы в 50 тыс. ч и более для этих светодиодов, в их массовом производстве – картина иная. Непредсказуемые выходы из строя мощных светодиодов за короткие времена эксплуатации ставят под угрозу рентабельность перехода на твердотельное освещение. Успешное решение этой проблемы осложняется тем, что до сих пор, несмотря на 20-летние усилия многих лабораторий мира, не удается разработать общепринятой модели деградационного процесса в этих светодиодах [3]. Ситуация с лазерами InGaN/GaN для синей и зеленой областей спектра еще сложнее, так как для них, даже на экспериментальных образцах, сроки службы оказываются на порядок меньше. Причины наблюдаемых явлений связаны с особенностями кристал-

лической структуры этих материалов.

В статье кратко рассмотрены общепринятые механизмы, определяющие долговечность полупроводниковых источников излучения, изготавливаемых на основе традиционных соединений A^3B^5 , проанализированы общие закономерности деградационных процессов в светодиодах и лазерах и указаны возможные пути увеличения их срока службы. Для светодиодов и лазеров на InGaN/GaN рассмотрены как общие закономерности процесса деградации, так и особенности, типичные только для этих источников излучения.

Механизмы деградации

Рассмотрим механизмы объемной деградации, заключающиеся в уменьшении внутреннего квантового выхода материала активной области излучателя. Наибольший интерес представляет исследование неустраняемых причин деградации, свойственных от природы полупроводниковым материалам и излучателям и определяющих срок службы наиболее долгоживущих источников излучения.

Экспериментально установлено, причем для источников излучения на всех известных полупроводниковых материалах [1, 2, 4 – 6], что значительные скорости деградации наблюдаются только при пропускании прямого тока через излучатель. Скорость деградации всегда растет с увеличением плотности тока, температуры источника излучения во время его работы и с увеличением внутренних механических напряжений. Дефектные реакции, ответственные за рост безызлучательного канала рекомбинации в активной области излучателя, обусловлены наличием избыточных носителей заряда и составляют класс рекомбинационно-стимулированных дефектных реакций. Область физики, которая занимается их изучением, называют химией или фотохимией дефектов.

В соответствии со скоростью протекания процесса объемную деградацию разделяют на быструю и медленную. Быстрая деградация (часы, десятки и сотни часов) носит пространственно-неоднородный характер и связана с относительно быстрым развитием в активной области излучателей

дефектов «темных линий» (ДТЛ) и дефектов «темных пятен» (ДТП) [1, 7]. В соединениях A^3B^5 ДТЛ представляют собой трехмерные дислокационные сетки с локальной плотностью дислокаций 10^8 – 10^9 см⁻². Такие дефекты начинаются от гетерограниц, от ростовых дислокаций, пересекающих активную область, от дефектов упаковки, царапин и других неоднородностей. Темные линии растут во время работы прибора в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. ДТП также представляют собой скопления дислокаций. Основными механизмами образования и развития ДТЛ и ДТП являются генерация, скольжение и переползание дислокаций в условиях сильного электронного возбуждения системы.

Медленная деградация развивается однородно в объеме активной области излучателя в течение тысяч, десятков тысяч часов и связана, как считает большинство авторов, с генерацией глубоких безызлучательных центров в результате реакций дефектов в твердой фазе. Важным фактором в этом процессе является состав исходных дефектов структуры в активной области излучателя: остаточные и легирующие примеси, собственные точечные дефекты кристалла и дислокации. Для описания процессов деградации источников излучения предложен ряд моделей, которые преимущественно носят феноменологический характер [1, 4 – 7].

Диффузионная модель. Эта модель предполагает генерацию дефектов, создающих глубокие уровни в активной области диода за счет перераспределения быстро диффундирующих примесей. Скорость диффузии заряженных примесей увеличивается в электрическом поле p – n -перехода, а также при их перезарядке, поскольку в этих случаях уменьшаются барьеры для диффузии. Если компоненты сложного центра (донорно-акцепторной пары, комплекса, молекулы) удерживаются между собой за счет кулоновских сил, то перезарядка компонент центра при захвате неравновесных носителей заряда может привести к развалу центра из-за ослабления сил связи, а их последующая диффузия – к образованию дефектов нового типа. Диффузия приоб-

ретает атермический характер, если перезарядка или возбуждение переводят примесный атом в седловую точку функции потенциальной энергии, из которой он без активации может переместиться в соседний узел или междоузлие [5].

Модель «фононного удара». В этой модели предполагается образование точечных дефектов за счет передачи в решетку кристалла энергии, выделяющейся при безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар. Этой энергии может быть достаточно для генерации пар Френкеля, особенно вблизи дефектов, где существует асимметрия пространства. Если же энергия, выделяющаяся при безызлучательной рекомбинации на центре, поглощается самим центром, то он может перейти на более высокий колебательный уровень или в возбужденное электронное состояние. При этом барьер для диффузии дефекта понижается или исчезает совсем. Возможность поглощения энергии безызлучательного перехода центром подтверждена экспериментами по рекомбинационно-ускоренному отжигу радиационных дефектов [1, 5].

Дислокационная модель. В указанной модели деградации [7] причиной изменения рекомбинационных параметров активной области излучателя считается развивающаяся во время работы прибора сеть дислокаций. В условиях сильного возбуждения электронной подсистемы происходит генерация и ускоренное скольжение дислокаций [4, 9, 10]. Кроме того, дислокации могут сами играть роль центров безызлучательной рекомбинации, а также служить путями для облегченной миграции примесей. Все перечисленные явления могут происходить одновременно, могут быть разнесены во времени, или реализовываться по отдельности.

Модель резонансного дефектообразующего захвата. В этой модели [4] природа элементарного акта дефектообразования рассматривается на языке глубоких центров как «дефектных молекул», внедренных в кристалл в качестве некоторых автономных систем и имеющих локальные уровни в пределах разрешенных зон. При захвате электрона молекула переходит в возбуж-

денное антисвязывающее состояние, из которого она релаксирует через диссоциацию с образованием дефектов нового типа. Данная модель, по всей видимости, единственная, которая позволяет рассчитать вероятность дефектных реакций, причем она в широком понимании вопроса включает в себя все вышеназванные механизмы, кроме дислокационного.

Процесс деградации полупроводниковых источников излучения, как правило, состоит из ряда распределенных во времени этапов. Каждый из названных выше механизмов образования центров безызлучательной рекомбинации неоднократно привлекался для объяснения экспериментальных результатов по деградации различного типа излучателей как преобладающий в пределах отдельных этапов процесса. При этом основные трудности интерпретации явления деградации как единого процесса всегда были связаны с попытками согласования различных механизмов на границах этапов [1, 4 – 7].

Роль внутренних механических напряжений и дислокаций

Любой полупроводниковый прибор представляет собой гетерогенную систему, содержащую границы раздела разнородных материалов. Эти материалы, как правило, имеют различные параметры решеток или различные температурные коэффициенты расширения (ТКР). Такие системы принципиально термодинамически не равновесны. В них всегда на границах раздела имеются остаточные упругие напряжения, которые повышают полную энергию системы. При этом система неминуемо будет стремиться к минимуму энергии с релаксацией механических напряжений через упругую или пластическую деформацию, расслаивание или растрескивание с генерацией дислокаций и других структурных дефектов [1, 4, 9 – 11]. Это позволяет трактовать процесс деградации полупроводникового прибора как общий закон природы о минимизации энергии неравновесной системы. Отсюда следует, что полупроводниковые источники излучения должны и даже обязаны деградировать во время работы, а задача соз-

дания надежных излучателей заключается в разработке способов, уменьшающих скорость деградации, поскольку исключить ее полностью невозможно.

Даже если в неработающем приборе достигнута полная компенсация остаточных механических напряжений, т. е. он находится в разгруженном равновесном состоянии, то во время его работы на границах разнородных слоев обязательно возникнут термоупругие напряжения, вызванные различием ТКР и неоднородным нагревом слоев в приборной структуре. При этом возникающие термоупругие напряжения имеют величину одного порядка с обычно существующими в структурах остаточными напряжениями [10].

Таким образом, можно предполагать, что одной из главных причин деградации полупроводниковых источников излучения может быть их механическая неравновесность – либо остаточная, либо возникающая при локальных перегревах во время работы прибора. А все рассмотренные выше механизмы деградации лишь накладываются на механическую релаксацию системы и могут в конкретных случаях проявлять себя как основные.

Многочисленные эксперименты показывают, что на ранних этапах деградации идет процесс генерации, перестройки и миграции точечных дефектов, а на конечных этапах определяющую роль начинает играть образование дислокационных структур [1, 2, 4, 7]. Роль дислокаций на ранних этапах процесса деградации не ясна. Установлено, что скорость деградации всегда растет с увеличением уровня инъекции, температуры и начального уровня внутренних механических напряжений в приборной структуре. Но поскольку увеличение уровня возбуждения и температуры в значительной степени сводится к изменению величины внутренних механических напряжений, то основной движущей силой, определяющей процесс деградации на всех его этапах, все-таки является механическая неравновесность деградирующей системы. Соответственно, если механическая неравновесность минимальна, то минимальной будет и

скорость деградации системы, а ее долговечность — максимальной.

О преобладающем механизме деградации можно судить по характеру изменения во времени параметров деградирующего прибора. Общей чертой всех рассмотренных выше механизмов дефектообразования в деградирующем приборе, за исключением дислокационного, должно быть постепенное накопление дефектов в активной области прибора в процессе его работы и, как следствие, плавное изменение параметров активной области прибора: проводимости, емкости, геометрических размеров и др. В то же время релаксация механических напряжений в приборной структуре, приводящая к генерации и перемещению дислокаций, всегда оказывается в той или иной степени «замороженной» из-за наличия различных по величине энергетических барьеров, закрепляющих дислокации в решетке кристалла. Поэтому генерация, перемещение и скольжение дислокаций всегда должны иметь пороговый характер [9, 10]. Толчком, приводящим «замороженную» механическую неравновесность системы в движение, может быть внешнее воздействие достаточной интенсивности или локальное внутреннее выделение энергии при безызлучательной рекомбинации. С этим, например, связан пороговый характер фотопластического эффекта в твердом теле.

Пороговый характер процесса деградации может служить критерием при интерпретации механизма деградации прибора.

Предположение о решающей роли механической неравновесности приборной структуры экспериментально продемонстрировано при исследовании свойств светодиодов из арсенида галлия GaAs, легированного амфотерными примесями [12]. Показано, что светодиоды, изготовленные из эпитаксиальных структур с минимальными внутренними механическими напряжениями, имеют минимальную плотность дислокаций в области $p-n$ -перехода, максимальную квантовую эффективность и минимальную скорость деградации. В работе [13] выполнен модельный эксперимент по контролируемому введению внутренних механических напряжений в активные об-

ласти гетеролазеров InGaAsP/InP, также подтверждающий предположение о дислокационной природе процесса деградации и решающему влиянию на срок службы лазеров их начальной механической неравновесности. В этом эксперименте на всех стадиях процесса деградации наблюдался пороговый характер изменения параметров лазеров, свойственный дислокационному механизму.

Большинство из рассмотренных механизмов деградации, надежно установленных для источников излучения на основе традиционных соединений A^3B^5 , являются общими и для излучателей на основе III-нитридов, за исключением механизма, связанного с размножением и скольжением дислокаций, основного для традиционных A^3B^5 .

Особенности деградации оптической мощности в мощных источниках излучения на основе III-нитридов

В отличие от источников излучения на основе традиционных соединений A^3B^5 , для мощных светодиодов на основе квантоворазмерных структур InGaN/GaN наблюдается большое разнообразие в формах развития процесса деградации. В начальные периоды эксплуатации светодиодов в 1000–5000 ч, наряду с обычным постепенным снижением излучаемой мощности, может наблюдаться ее увеличение, волнообразное изменение или катастрофическое падение. Такая неоднозначность процесса характерна также и для светодиодов с близкими исходными параметрами, изготовленных из структур, полученных в одном технологическом процессе [3, 14].

За последние два десятилетия были выявлены и устранены многие причины, приводящие к деградации мощных светодиодов на основе III-нитридов. В основном это были недоработки в их конструкциях и постростовых технологиях [3]. Но эти успехи не приблизили к пониманию физической природы нестандартного развития процесса деградации в мощных светодиодах InGaN/GaN и не ликвидировали их катастрофические отказы. В большинстве работ отмечается, что деградация оптиче-

ской мощности светодиодов и лазеров на InGaN/GaN имеет общую природу [3, 14] и сопровождается генерацией дефектов под действием инжекционного тока и электромиграцией ионов металлов из контактных площадок, а также увеличением числа состояний на гетерограницах, но взаимосвязь свойств дефектной структуры с деградацией оптической мощности остается невыясненной. По-прежнему остаются предметом дискуссий вопросы о природе дефектов, о роли системы протяженных дефектов и структурной разупорядоченности слоев, типичной для III-нитридов. Нет также единой точки зрения о том, в каких областях излучающей структуры происходит генерация дефектов деградации – в *p*-области или в квантовых ямах активной области [3].

Основные особенности процесса деградации оптической мощности для светодиодов InGaN/GaN состоят в следующем:

неоднозначное течение деградационного процесса во времени [3];

уменьшение квантовой эффективности, в первую очередь, происходит в максимуме ее зависимости от плотности тока при плотностях, меньших 10 А/см^2 , когда преобладает рекомбинация локализованных носителей заряда [14];

деградация носит локальный характер, но не наблюдается генерации и скопления дислокаций в активной области с образованием дислокационных сеток, характерных для светодиодов на традиционных $\text{А}^3\text{В}^5$ [14, 15];

деградация ускоряется при плотностях тока выше 10 А/см^2 и температурах выше $200 \text{ }^\circ\text{С}$ даже без приложения смещения, а также при электростатических воздействиях во время сборки и измерений [14];

скорость деградации существенно зависит от степени разупорядоченности материала светоизлучающих структур, проявляющейся в трехмерном (или близком к трехмерному) характере роста структур, что приводит к развитой системе протяженных дефектов в слоях с повышенным содержанием неравновесной металлической фазы, выделяющейся на поверхности при слабых температурных и радиационных воздействиях [15].

Несмотря на общие черты развития деградационного процесса, поведение дефектной системы III-нитридов принципиально отличается от традиционных $\text{А}^3\text{В}^5$. Этим материалам свойственна более сложная дефектная структура, существование которой предопределяется неравновесными условиями роста в присутствии больших рассогласований параметров решетки с подложкой (до 13 %) и необходимостью при этом формирования переходного зародышевого слоя. В результате образуется квазиэпитаксиальный наноматериал, текстурированный протяженными дислокационными и дилатационными границами, с плотностью дислокаций до 10^9 см^{-2} и их скоплений, пронизывающих активную область источника излучения [16]. Это порождает многообразие форм организации наноматериала: от плохо сросшихся доменов до практически совершенных эпитаксиальных слоев лишь со следами границ доменной структуры, но с большими локальными, неоднородно распределенными механическими напряжениями и локальными (на наноразмерном уровне) неоднородностями состава твердых растворов. В этом состоит основная причина противоречий в результатах различных авторов, поскольку обычно исследуются источники излучения, имеющие разные формы организации наноматериала.

В ряде работ [14] демонстрируется связь локального характера деградации с системой протяженных дефектов, тогда как большинство авторов, как правило, не рассматривает участия сложной дефектной системы в деградационном процессе, предполагая, что индий экранирует систему протяженных дефектов от взаимодействия с неравновесными носителями заряда [2]. Это противоречит наблюдаемому сложному характеру вольтамперных характеристик (ВАХ), а также результатам исследования ВАХ для светодиодов, имеющих различный характер организации наноматериала [15]. С увеличением степени разупорядоченности материала светодиодных структур, т. е. с увеличением протяженности дислокационных границ и скоплений дислокаций, на ВАХ наблюдается рост на порядки величины туннельных токов. ВАХ и

зависимости спектральной плотности низкочастотного шума от тока свидетельствуют о сложном взаимодействии дефектной системы с неравновесными носителями заряда при частичном подавлении канала безызлучательной рекомбинации [17], что затрудняет выявление взаимосвязи деграционных явлений с системой протяженных дефектов.

Зависимости спектральной плотности шумов от плотности тока показывают, что с увеличением времени испытаний диодов увеличивается неоднородность протекания тока в их активных областях [17]. На зависимостях дифференциального сопротивления диодов появляются омические участки, шунтирующие $p-n$ -переход. В активной области диодов возникают области локального перегрева, присутствие которых выявляется по резкому росту плотности шумов при плотностях тока выше 10 А/см^2 . В светодиодах, деградировавших более чем на 20 %, такие участки роста шумов появляются уже при плотностях тока 10^{-2} А/см^2 , а области локального перегрева могут быть зарегистрированы методом тепловизионной микроскопии. Локальные перегревы активируют миграцию галлия и индия по протяженным дефектам, пронизывающим активную область светодиода, ускоряя процесс деградации [14, 15].

В работе [18] сообщается еще об одном механизме быстрого развития процесса деградации в светодиодах InGaN/GaN , связанного с присутствием локальных областей с неравновесным составом твердого раствора InGaN , содержащих повышенную концентрацию индия. В этих областях при эксплуатации диода изменяется состав твердого раствора, а следовательно, и характеристики излучателя.

Проблемы надежности полупроводниковых источников излучения

К настоящему времени достигнуты значительные успехи в увеличении срока службы полупроводниковых источников излучения, светодиодов и лазеров, так что эти приборы по долговечности вышли на первое место среди элементов квантовой электроники. Но эти успехи достигнуты, в

основном, эмпирическим путем. Существующие методы контроля приборов на долговечность пока далеки от совершенства. Это, главным образом, статистические (вероятностные) методы. Они не позволяют давать физически обоснованные прогнозы надежности приборов и устанавливать каждому из них индивидуальный срок службы, не позволяют четко сформулировать критерии, определяющие надежность прибора, и наметить пути ее повышения. Во многом это определяется тем, что процессы деградации для большей части приборов развиваются медленно, а поэтому для прогнозов используются ускоренные испытания при повышенных тепловых и электрических нагрузках. Неоднозначность результата таких испытаний заключается в неопределенности коэффициента ускорения процесса деградации. Для его точного определения необходимо знать механизм деградации и быть уверенным, что он сохраняется при экстраполяции к нормальным условиям работы прибора. Такие испытания выявляют лишь грубые нарушения в технологии. Они принципиально непригодны для прогноза индивидуального срока службы приборов и не могут быть использованы для выявления потенциально ненадежных приборов.

Существенную неопределенность в определении сроков службы приборов вносят локальные области с «замороженной» механической неравновесностью. Выявление таких областей – задача непростая, поскольку существующие методы, в основном, дают интегральную информацию о внутренних механических напряжениях.

Особенно остро проблема надежности стоит для мощных источников излучения на основе структур InGaN/GaN из-за более сложного развития в них деградации с участием конкурирующих процессов в системе протяженных дефектов и в локальных областях с неравновесным составом твердого раствора. Более того, отсутствуют общепринятые методы количественной оценки существования многочисленных структурных форм существования этого материала, что затрудняет изучение механизмов деградации и эффективного решения проблемы надежности.

Физическая модель деградации часто может быть охарактеризована параметрами, мало связанными с эксплуатационными характеристиками прибора, за которыми принято следить при ускоренных испытаниях. Поэтому поиск таких прогнозирующих параметров с целью разработки методов ранней диагностики надежности приборов является одной из актуальных задач при решении проблемы создания надежных полупроводниковых приборов.

Например, таким интегральным информационным инструментом может быть анализ ВАХ излучающих $p-n$ -структур. На ВАХ в области малых токов и напряжений (прямых и обратных) практически всегда наблюдаются так называемые «избыточные» токи. Эти токи обычно являются безызлучательными и имеют туннельный или термотуннельный характер. Их природа до конца не ясна, а описание еще не нашло последовательного отражения в теории. Характер «избыточных» токов может быть различным, но причины их появления всегда связаны с наличием дефектов в слое объемного заряда (СОЗ) $p-n$ -перехода [2].

В настоящее время считается общепринятым, что вид ВАХ, напряжение пробоя и величина обратного тока являются показателями совершенства $p-n$ -структуры. Тем не менее, предполагается, что чувствительность ВАХ к дефектам, расположенным вне активной области излучателя, столь велика, что ВАХ не может быть информативной для определения срока службы источника излучения. Но результаты многочисленных экспериментов свидетельствуют о том, что именно «избыточные» токи на ВАХ наиболее чувствительны к степени дефектности СОЗ $p-n$ -перехода. Изменение дефектной структуры активной области прибора, происходящее во время его работы, приводит к изменению проводимости $p-n$ -перехода и отражается на форме его ВАХ в области малых токов и напряжений. При этом на ВАХ можно выделить различные компоненты токов, каждая из которых связана с появлением определенного сорта дефектов в СОЗ $p-n$ -перехода и характеризуется своей зависимостью тока от напряжения и скоростью возрастания во время работы

прибора, т. е. в процессе его деградации [19]. Этот результат говорит о том, что анализ формы ВАХ в области «избыточных» токов может быть использован для оценки совершенства активных областей источников излучения. Законы эволюции «избыточных» токов, установленные в процессе испытаний источников излучения, могут быть использованы для определения их индивидуальных сроков службы, а значит и для прогнозирования их надежности.

Таким образом, требования к надежности и долговечности светодиодов и лазеров все время повышаются, а дальнейший прогресс полупроводниковой оптоэлектроники, определяющий в значительной степени современное состояние всей физики и техники полупроводников, связан как с повышением эффективности источников излучения, так и с увеличением их надежности.

Рассмотренные в обзоре механизмы, ответственные за деградацию оптической мощности полупроводниковых инжекционных источников излучения, а также физические явления, определяющие их надежность, показывают, что, несмотря на многолетние исследования и безусловные успехи практики, белых пятен в понимании явления деградации как в научном плане, так и с точки зрения практического применения источников излучения осталось немало, особенно для источников на основе III-нитридов.

Физически обоснованный прогноз надежности полупроводникового прибора может быть сделан лишь на основании знания механизмов его деградации, поэтому повышение надежности полупроводниковых источников излучения следует искать на пути создания термодинамически стабильного состояния дефектной структуры полупроводника при широком привлечении физических методов исследования природы явлений, определяющих процесс деградации. Только в этом случае можно надеяться на создание источников излучения с повышенной надежностью и разработку объективных методов прогнозирования индивидуального срока службы для каждого

излучателя без использования ускоренных испытаний при высоких температурах и нагрузках.

Необходимо всестороннее изучение свойств дефектов, возникающих при деградации, их взаимодействий между собой и моделирование устойчивых дефектных ситуаций в активных областях источников излучения.

Требуется детальное изучение процессов деградации, вызванных «замороженными» внутренними механическими напряжениями, с привлечением для анализа представлений синергетики.

До сих пор остаются мало исследованными процессы деградации в упруго напряженных квантоворазмерных структурах, на основе которых в настоящее время изготавливаются практически все светодиоды и лазеры.

Для источников излучения на основе III-нитридов недостаточно изучены различные конкурирующие механизмы, участвующие в деградационном процессе, до сих пор отсутствует единое мнение, в каких областях источников излучения идет генерация дефектов и какого типа эти дефекты, почему влияние генерируемых дефектов на значение внешней квантовой эффективности носит пороговый характер. Не ясна природа обнаруженного эффекта подавления безызлучательной рекомбинации при увеличении тока через светодиод. Эти трудности могут быть связаны со сложной

внутренней структурой этих материалов, выращиваемых в сильно неравновесных условиях, когда существенную роль играют процессы самоорганизации при формировании структуры растущего кристалла.

В связи с этим, необходимо развитие методов для количественной оценки различных форм организации наноматериала, позволяющих отбраковывать потенциально ненадежные приборные структуры на ранних стадиях технологического процесса. Для этой цели, а также для разработки принципов построения светоизлучающих структур с устойчивой дефектной структурой следует, например, использовать метод мультифрактального анализа.

Также необходимо развивать методы диагностики в твердых растворах локальных областей с неравновесным составом и локальными механическими напряжениями.

И, наконец, для выяснения природы избыточных токов, наблюдающихся на вольтамперных характеристиках источников излучения, эволюции этих токов в процессе деградации, порогового характера взаимосвязи потерь оптической мощности с избыточными токами необходимо развитие теории проводимости по протяженным дефектам в полупроводниках, которые играют существенную роль в процессах деградации светодиодов и лазеров, изготовленных как на основе традиционных соединений A^3B^5 , так и на основе III-нитридов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берг, А. Светодиоды [Текст] / А. Берг, П. Дин. — М.: Мир, 1979. — 686 с.
2. Шуберт, Ф.Е. Светодиоды [Текст] / Ф.Е. Шуберт. — М.: Физматлит, 2008. — 384 с.
3. Meneghesso, G. Recent results on the degradation of white LEDs for lighting [Text] / G. Meneghesso, M. Meneghini, E. Zanoni // J. Phys., D: Appl. Phys. — 2010. — Vol. 43. — P. 354007.
4. Елисеев, П.Г. Теоретическое рассмотрение физических процессов объемной деградации активной среды полупроводниковых лазеров [Текст] / П.Г. Елисеев, И.Н. Завестовская, И.А. Полуэтов, Ю.М. Попов // Инжекционные лазеры. Труды ФИАН. — М.: Наука, 1983. — Т. 141. — С. 154–185.
5. Клингер, М.И. Создание дефектов в твер-

- дых телах при распаде электронных возбуждений [Текст] / М.И. Клингер, Ч.Б. Лушик, Т.В. Машовец [и др.] // УФН. — 1985. — Т. 147. — Вып. 3. — С. 523–558.
6. Вавилов, В.С. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках [Текст] / В.С. Вавилов, А.Е. Кив, О.Р. Ниязова. — М.: Наука, 1981. — 368 с.
7. Мильвидский, М.Г. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников [Текст] / М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. — М.: Металлургия, 1985. — 160 с.
8. Petroff, P. Nonradiative recombination at dislocations in III-V compound semiconductors [Text] / P. Petroff, R.A. Logan, A. Savage // Phys. Rev. Lett. — 1980. — Vol. 44. — № 4. — P. 287–291.

9. **Monemar, B.** Threshold for optically induced dislocation glide in GaAs-AlGaAs double heterostructures: degradation via a new cooperative phenomenon [Text] / B. Monemar, K.M. Peteneski, M.B. Small [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1978. – Vol. 41. – № 4. – P. 260–264.
10. **Конакова, Р.В.** Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов [Текст] / Р.В. Конакова, П. Кордош, Ю.А. Тхорик, Ф. Штофаник. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 188 с.
11. **Тхорик, Ю.А.** Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах [Текст] / Ю.А. Тхорик, Л.С. Хазан. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 304 с.
12. **Сидоров, В.Г.** Влияние внутренних механических напряжений на характеристики светодиодов из арсенида галлия [Текст] / В.Г. Сидоров, Д.В. Сидоров, В.И. Соколов // ФТП. – 1998. – Т. 32. – № 11. – С. 1393–1398.
13. **Гореленок, А.Т.** Влияние несоответствия параметров решеток на I-V-характеристики InGaAsP/InP *p-n*-гетероструктур [Текст] / А.Т. Гореленок, В.Г. Груздов, В.В. Евстропов [и др.] // ФТП. – 1984. – Т. 18. – Вып. 8. – С. 1413–1416.
14. **Leung, K.K.** Physical mechanisms for hot-electron degradation in GaN light-emitting diodes [Text] / K.K. Leung, W.K. Fong, P.K.L. Chan, C. Surya // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 107. – P. 073103 (6 p.).
15. **Kamanin, A.V.** Degradation of blue LEDs related to structural disorder [Text] / A.V. Kamanin, A.G. Kolmakov, P.S. Kopev [et al.] // Phys. Stat. Sol. (c). – 2006. – Vol. 3. – P. 2129–2132.
16. **Шретер, Ю.Г.** Широкозонные полупроводники [Текст] / Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, В.А. Зыков, В.Г. Сидоров. – СПб.: Наука, 2001. – 124 с.
17. **Закгейм, А.Л.** Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах [Текст] / А.Л. Закгейм, М.Е. Левинштейн, В.П. Петров [и др.] // ФТП. – 2012. – Т. 46. – Вып. 2. – С. 219–223.
18. **Басалкевич, Т.М.** Особенности развития деградационного процесса в мощных синих светодиодах InGaN/GaN [Текст] / Т.М. Басалкевич, Н.А. Тальнишних, Н.М. Шмидт // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – Вып. 3 (153). – С. 45–47.
19. **Гореленок, А.Т.** Токи туннельного типа в *p-n*-гетероструктурах InGaAsP/InP [Текст] / А.Т. Гореленок, В.Г. Груздов, В.В. Евстропов [и др.] // ФТП. – 1984. – Т. 18. – Вып. 6. – С. 1032–1038.

СИДОРОВ Валерий Георгиевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
sidorov@rphf.spbstu.ru

ШМИДТ Наталия Михайловна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра физики наногетероструктур Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе.

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26