

УДК 621.383.52:534.29.66

© 2008 г. Е. К. Наими, С. Г. Никифоров, О. И. Рабинович, В. П. Сушков

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИБРАЦИИ НА ДЕГРАДАЦИЮ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ InGaN



НАИМИ Евгений Кадырович,
д. ф.-м. н., профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный
технологический университет
«Московский институт стали и сплавов»,
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4



НИКИФОРОВ Сергей Григорьевич,
к. т. н., руководитель центра
по сертификации светотехники, ЛИСТ,
Москва, 1-й Котляковский пер., д. 4



РАБИНОВИЧ Олег Игоревич,
к. ф.-м. н., ст. преподаватель,
ФГБОУ ВПО «Государственный
технологический университет
«Московский институт стали и сплавов»,
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4



СУШКОВ Валерий Петрович,
д. т. н., профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный
технологический университет
«Московский институт стали и сплавов»,
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4

Приведены результаты исследования влияния высокочастотной ($\sim 10^5$ Гц) ультразвуковой вибрации (УЗВ) на деградацию рабочих характеристик светоизлучающих диодов (СИД) на основе многокомпонентных гетероструктур InGaN. После каждого цикла УЗВ изучены вольт-амперные характеристики, зависимости оптической мощности и квантового выхода излучения от плотности тока через кристалл, а также спектры электролюминесценции. Впервые установлено влияние частоты УЗВ на скорость деградации рабочих характеристик СИД. Отмечено, что у образцов СИД, проходивших наработку без УЗВ, процесс деградации всегда происходит значительно медленнее. Предложена модель, качественно объясняющая наблюдаемые эффекты.

Ключевые слова: ультразвуковая вибрация, светоизлучающие диоды, деградация.

Введение

Промышленное применение светоизлучающих диодов (СИД) в различных светотехнических устройствах невозможно без решения вопросов качества и стабильности их параметров с течением времени наработки. Главной проблемой, с которой приходится сталкиваться при длительном использовании СИД, остается деградация рабочих характеристик этих приборов. Поэтому, наряду с совершенствованием технологии производства СИД, актуальной является разработка методологии изучения процессов деградации их параметров. К настоящему времени выявлено множество различных факторов, влияющих на изменение рабочих характеристик СИД, среди которых основными считаются ток и температура [1].

Ниже представлены результаты дальнейшего исследования влияния на деградацию СИД этих факторов, а также нового — ультразвуковой вибрации (УЗВ), влияние которой на изменение рабочих характеристик СИД впервые было продемонстрировано в работе [2]. Интерес к влиянию УЗВ обусловлен как использованием ультразвука непосредственно при производстве СИД, так и расширением областей применения СИД, в которых присутствует УЗВ (аэрокосмическая область, медицина).

Образцы и методы исследований

Исследование влияния УЗВ на СИД синего цвета свечения на основе многокомпонентных гетероструктур InGaN проводили при частоте

тах $\sim 10^5$ Гц. Методика осуществления воздействия УЗВ на СИД описана в работе [2].

Исследовали СИД различных конструкций с кристаллами на основе InGaN на подложках Al_2O_3 и SiC. После каждого цикла УЗВ снимали вольт-амперные характеристики (ВАХ), зависимости оптической мощности и квантового выхода излучения от плотности тока через кристалл, а также спектры электролюминесценции.

Результаты и их обсуждение

Примеры снятых ВАХ различных СИД до и после каждого из трех циклов УЗВ различной длительности приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что по мере увеличения времени УЗВ на отрезках ВАХ с малой плотностью тока через кристалл (до 40 А/см^2) значительно увеличивается крутизна характеристики относительно начальной. Степень изменения крутизны ВАХ различных СИД находится в некоторой зависимости от частоты УЗВ и имеет схожую картину.

Увеличение крутизны ВАХ связывают с сильным пьезоэффектом и спонтанной поляризацией кристалла при УЗВ [3]. Появляющиеся при этом локальные площадки с большой напряженностью знакопеременного электрического поля образуют включения с каналами пробоя как результат «выгорания» путей выравнивания потенциалов. Проводимость таких элементов существенно выше,

чем у участков барьерной структуры активной области, поэтому с ростом плотности тока через кристалл доминирующую роль в формировании ВАХ (ее крутизны) будут выполнять именно эти элементы. При повторном воздействии УЗВ новые каналы пробоя будут возникать уже в других областях кристалла, поскольку увеличенная проводимость «пробитых» элементов препятствует созданию большой разности потенциалов в местах их нахождения. Следовательно, крутизна начальной ВАХ будет в дальнейшем увеличиваться. Так, на ВАХ, приведенных на рис. 1, с ростом плотности тока увеличивается разница в прямых напряжениях при одной и той же величине тока.

СИД представляет из себя прибор, в котором излучающий кристалл для подачи на него питающего тока имеет соединительные контакты — проводники или эпоксидные токопроводящие составы, одновременно являющиеся и элементами механического крепления кристалла, и теплоотводящими элементами. Механическое воздействие УЗВ распространяется и на эти элементы, изменяя их свойства (электропроводность, тепловое сопротивление). Например, механическое разрушение (расшатывание) соединений алюминиевых частиц токопроводящего клея, применяемого для монтажа кристаллов на подложке SiC с аксиальным расположением омических контактов, приводит к появлению дополни-

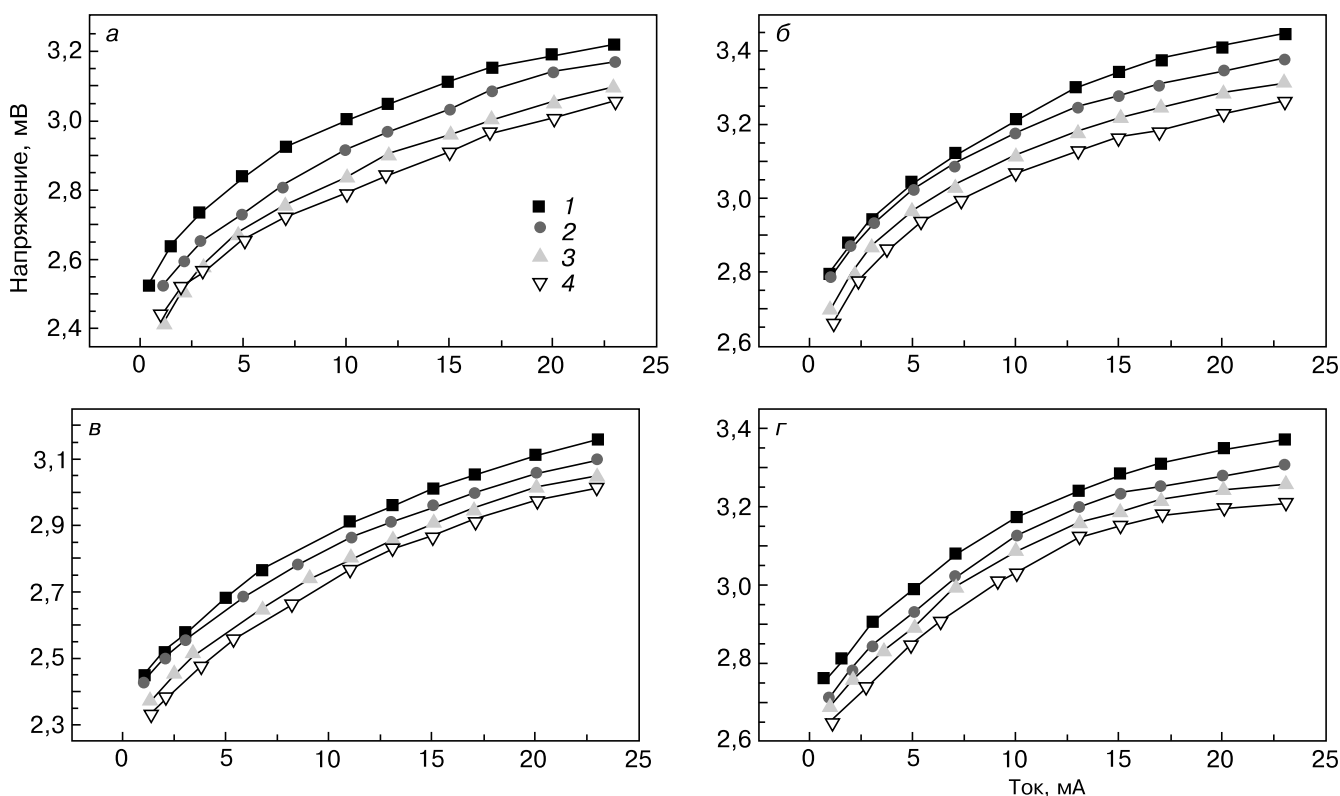


Рис. 1. ВАХ исследованных СИД на основе InGaN на подложке SiC (а, в) и Al_2O_3 (б, г) при частоте УЗВ 64 (а, б) и 106 (в, г) кГц до (1) и после (2–4) воздействия УЗВ различной длительности: а, б — 3 ч; в, г — 1,5 ч

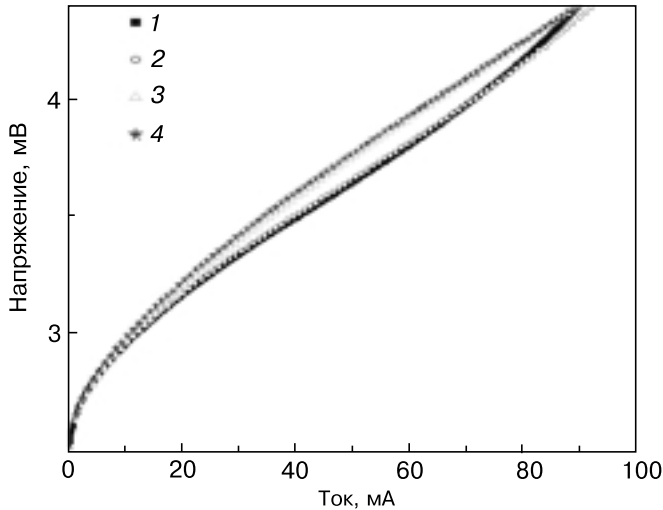


Рис. 2. Влияние УЗВ на ВАХ светодиода на основе InGaN, выращенного на подложке SiC, до (1, 2) и после (3, 4) УЗВ. ВАХ снимали в импульсном режиме с различной длительностью импульсов: 1, 4 — 100 мкс; 2, 3 — 10 мкс

тельного переходного сопротивления в общей электрической цепи питания СИД. Влияние этого сопротивления на поведение ВАХ особенно будет заметно при больших плотностях тока, когда падение напряжения на переходном сопротивлении достигает значительной величины. Кроме того, будет сказываться и уменьшение теплопроводящих свойств этого соединения, что также отразится на ходе ВАХ при больших плотностях тока.

Наглядно это можно видеть на рис. 2, где представлены ВАХ СИД на основе кристалла InGaN, выращенного на подложке SiC, снятые при плотностях тока вплоть до 120 A/cm^2 в импульсном режиме до и после воздействия УЗВ.

Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что при средних значениях плотности тока через СИД имеет место уменьшение прямого напряжения, вызванное описанным выше действием пьезоэффекта и спонтанной поляризации, а при больших плотностях тока наблюдается сильное влияние увеличенного переходного сопротивления в области омического контакта, отсутствующее до воздействия УЗВ. Разброс в поведении ВАХ, обусловленный неодинаковой степенью разогрева кристалла при использовании измерительных импульсов разной длительности при одном и том же значении тока, подтверждает предположение об изменении теплопроводящих свойств эпоксидного состава, вызванного действием УЗВ.

Влияние УЗВ на изменение интегральной мощности излучения СИД показано на рис. 3. Из сравнения приведенных на рис. 3 кривых видно, что зависимость оптической мощности излучения СИД от прямого тока в еще большей степени связана с длительностью воздействия УЗВ.

Модель, объясняющая изменение рабочих характеристик СИД основывается на предположении, что многокомпонентная гетероструктура

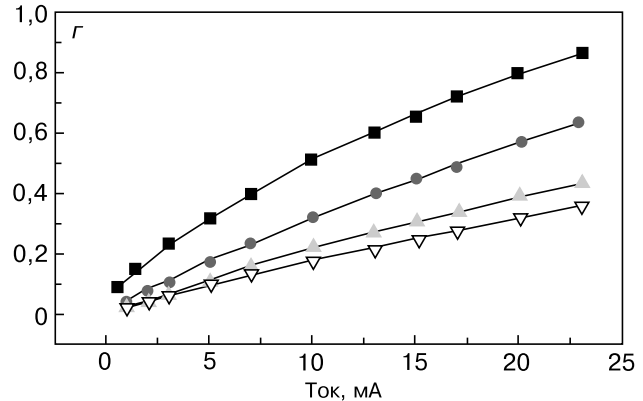
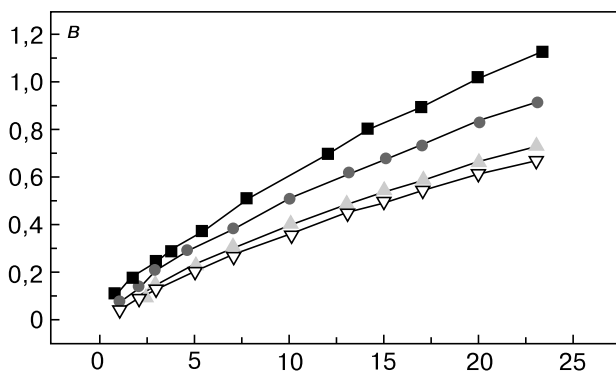
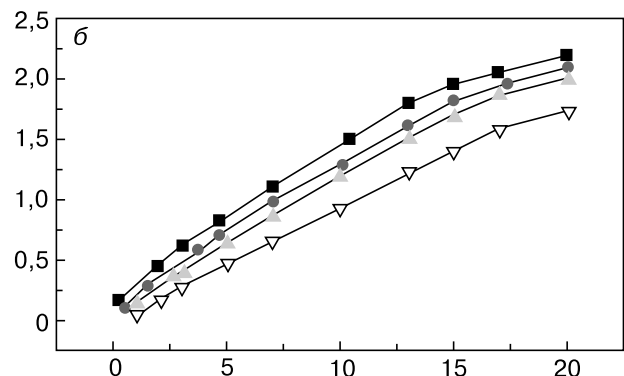
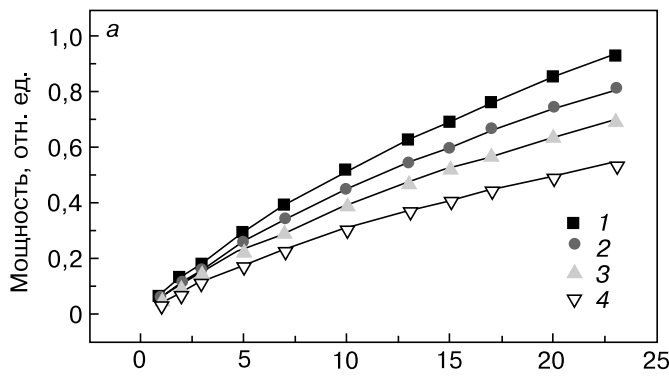


Рис. 3. Зависимость интегральной оптической мощности излучения СИД на основе InGaN на подложке SiC (а, в) и Al_2O_3 (б, г) при частоте УЗ 64 (а, б) и 106 (в, г) кГц от прямого тока до (1) и после (2—4) УЗВ различной длительности: а, б — 3 ч; в, г — 1,5 ч

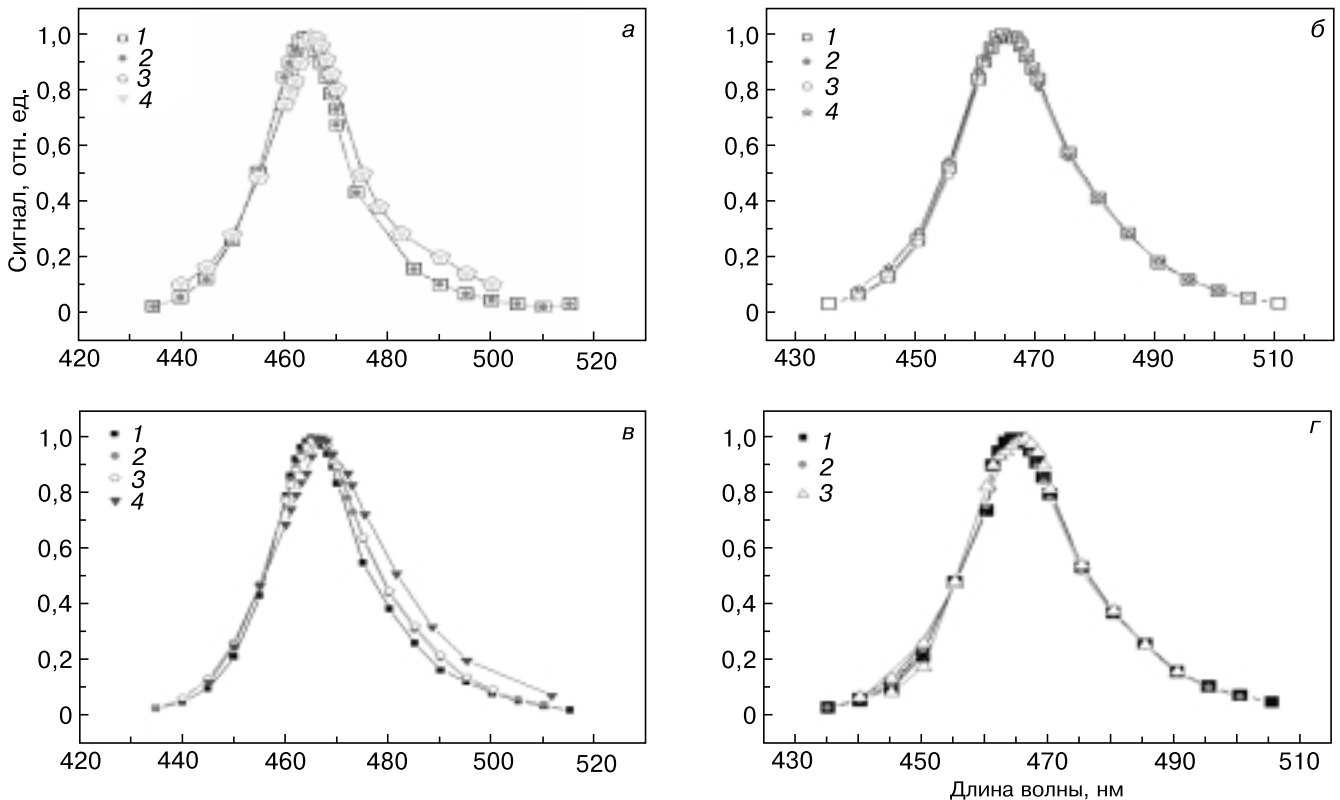


Рис. 4. Влияние УЗВ на изменение спектрального состава излучения СИД на основе InGaN на подложке SiC (а, в) и Al₂O₃ (б, г) при частоте УЗ 64 (а, б) и 106 (в, г) кГц от прямого тока до (1) и после (2—4) УЗВ различной длительности: а, б — 3 ч; в, г — 1,5 ч

InGaN представляет собой параллельное соединение площадок с различным содержанием индия в активном слое. Тогда различие в механических свойствах кристалла (жесткости) и степени проявления пьезоэффекта и спонтанной поляризации секторов с разным содержанием атомов индия будет определять степень появления в них шунтирующих элементов. Данная модель хорошо согласуется с выводами работы [4], в которой отмечается, что свойства приборов (СИД) в значительной степени зависят от содержания металла в активном слое кристалла, в нашем случае — от содержания атомов In в слое In_xGa_{1-x}N. В работе [5] показано, что в СИД зеленого цвета свечения присутствуют области шириной 1—3 нм с повышенным содержанием атомов In по сравнению с усредненным значением, где содержание атомов In варьируется в диапазоне $x = 0,3 \div 0,4$. Причем эти области действуют как локальные ловушки для мигрирующих носителей заряда, создающих фотоны, улучшающие общее качество прибора.

Сказанное выше иллюстрируется рис. 4, на котором показано влияние УЗВ на изменение спектрального состава излучения и сдвига его в «красную» (длинноволновую) область. «Красный» сдвиг является следствием того, что области с низким содержанием атомов In, отвечающие за коротковолновую часть спектра излучения, подвержены разрушению и как бы «выгорают» или

перераспределяются при больших плотностях тока. Появляется больше областей с повышенным содержанием атомов In, в результате чего увеличивается доля их вклада в длинноволновую часть спектра электролюминесценции. Отметим, что аналогичный результат может быть вызван также током или фактором длительного времени наработки, а также эффектами Штарка и Франца—Келдыша. Этим хорошо объясняется и существенное уменьшение прямого напряжения ВАХ при больших плотностях тока после воздействия УЗВ (см. рис. 2).

Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что степень изменения спектрального состава излучения зависит от частоты УЗВ. Рост длинноволновых составляющих приводит к увеличению эффективности излучения, однако из-за существенной деградации излучательной способности секторов с центральными длинами волн интегральный световой поток уменьшается: после УЗВ появляется шунтирующий эффект, о чем было сказано выше.

При большой плотности тока значительно увеличивается разница в квантовой эффективности центров излучательной рекомбинации по отношению к исходной, что также является следствием шунтирующего действия «пробитых» участков, возникших вследствие пьезоэффекта. Протекание тока сопровождается существенно боль-

шей долей безызлучательных актов. При этом оптическая мощность излучения кристаллов в зависимости от вида подложки может различаться, что обусловлено разной степенью рассогласования периодов решеток подложки и структуры. Большому падению оптической мощности соответствует большее рассогласование периодов решеток. Механическое воздействие УЗВ усиливает это рассогласование путем образования дефектов структуры, вызванного различием в механических параметрах используемых материалов.

Как отмечалось выше, скорость деградации рабочих характеристик СИД с учетом различия в пьезоэлектрических свойствах материала кристалла и степени рассогласования периодов кристаллических решеток подложек и выращенных на них гетероструктур зависит от частоты УЗВ. Так, при УЗВ на частоте 106 кГц для достижения схожих деградационных изменений параметров СИД потребовалось в 1,5—2,0 раза меньше времени, чем при УЗВ на частоте 64 кГц. Этот результат можно объяснить следующим образом.

Как показывают оценки, при амплитуде механического напряжения $\sigma_0 \approx 2,8 \cdot 10^6$ Па, достигаемого при УЗВ, значение напряженности пьезоэлектрического поля составляет порядка 10^5 В/см. Согласно работе [3], это поле, изменяясь с частотой УЗВ, создает «горячие» носители заряда с энергией, значительно большей средней тепловой энергии $3kT/2$. Такие «горячие» носители заряда способны смещать атомы решетки, создавая точечные дефекты и таким образом уменьшая квантовый выход излучения. Закон изменения концентрации смещенных атомов ΔN со временем описывается выражением

$$\Delta N(t) = N_0 - N(t) = N_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{avnNVw}, \quad (2)$$

где τ — «эффективное время деградации»; $v = 2fb/l_{св}$; f — частота УЗВ; b — линейный размер кристалла; $l_{св}$ — длина свободного пробега носителей заряда; n — концентрация свободных носителей заряда; N — число несмещенных атомов в объеме кристалла V ; w — вероятность смещения одного атома «горячими» носителями заряда; a — константа, учитывающая, что пьезоэлектрическое поле изменяется во времени по синусоидальному закону ($a < 1$).

Из выражений (1) и (2) следует, что концентрация смещенных атомов ΔN в равной степени зависит как от времени наработки t , так и от частоты УЗВ f . Другими словами, число смещенных атомов (при прочих равных условиях) будет одним и тем же за меньшее время наработки при

большой частоте УЗВ и, наоборот, за большее время наработки при меньшей частоте УЗВ, что и наблюдается в эксперименте.

С увеличением плотности тока эффект уменьшения квантового выхода излучения в соответствии с принятой моделью будет усиливаться сходным образом как при увеличении общего времени воздействия УЗВ, так и при наработке без УЗВ. Этот вывод наглядно демонстрируют результаты измерений квантового выхода излучения СИД, представленные на рис. 5.

Следствием неоднородности излучающей структуры по составу индия в активном слое является изменение плотности распределения светового потока с течением времени наработки СИД. УЗВ оказывает дополнительное влияние на ход этого распределения. Исследования проводили путем снятия комплекса фотометрических характеристик двух типов СИД на основе многокомпонентных гетероструктур InGa_N, выращенных на подложках SiC, в процессе наработки за определенные промежутки времени (рис. 6). Из рис. 6, а и б видно, что в процессе наработки, вплоть до 4500 ч, световой поток у двух исследованных типов образцов СИД имеет существенно отличающиеся изменения в распределении плотности по-

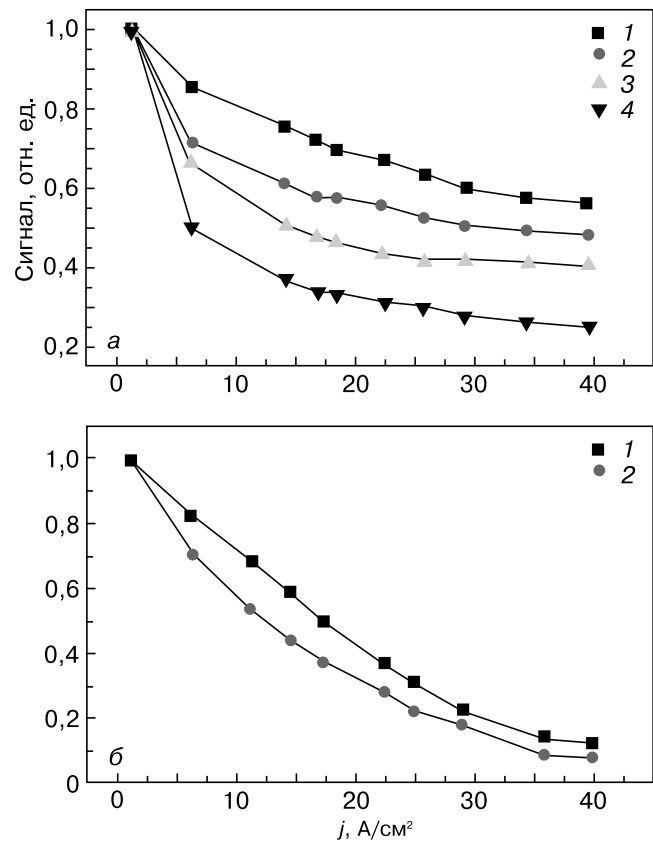


Рис. 5. Зависимости квантового выхода излучения СИД на основе гетероструктур InGa_N, выращенных на подложке SiC от плотности тока: а — при УЗВ: 1 — исходная; 2—4 — после циклов УЗВ по 1,5 (3) ч; б — при протекании тока: 1 — исходная; 2 — после 15 тыс. ч наработки

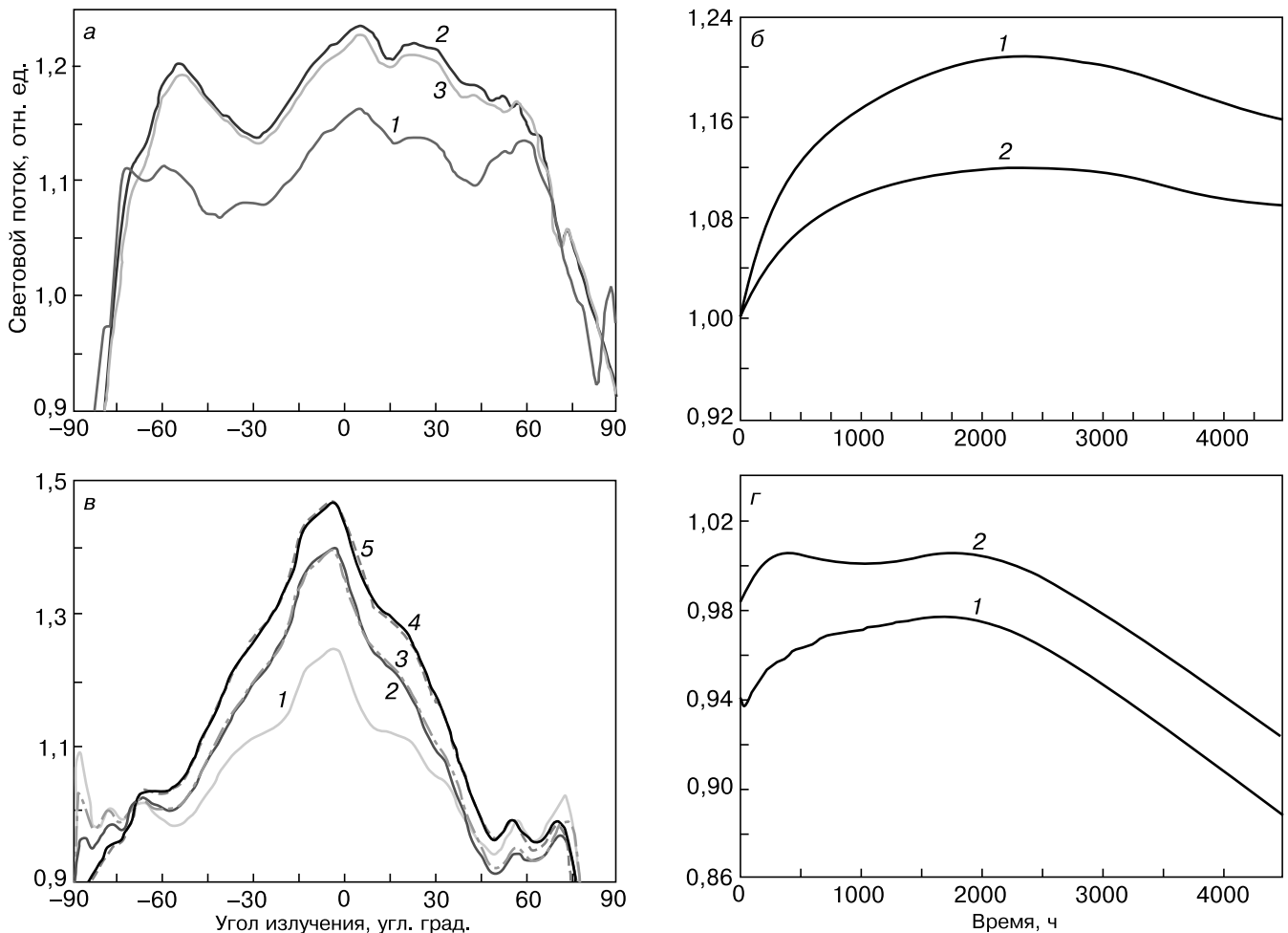


Рис. 6. Фотометрические характеристики СИД на основе многокомпонентных гетероструктур InGaN в процессе наработки до (а, б) и после (в, г) воздействия УЗВ: а, в — относительное распределение плотности светового потока Φ по углу излучения (а: 1 — время наработки $t = 600$ ч; 2 — 2000 ч; 3 — 4500 ч; в: 1 — время наработки $t = 0$; 2 — 300 ч; 3 — 1000 ч; 4 — 2300 ч; 5 — 4500 ч); б, г — деградационные характеристики светового потока Φ (1) и максимальной силы света $I_{V_{max}}$ (2)

тока по углу излучения. Так, у образца СИД, фотометрические характеристики которого приведены на рис. 6, а, световой поток практически во всем диапазоне углов, исключая самые крайние области ($> \pm 70^\circ$), не претерпевает перераспределения, изменяя лишь свое интегральное значение. У образца СИД с центральным омическим контактом (см. рис. 6, в) относительный рост доли светового потока наблюдается именно в области этого контакта (область от -45 до $+30^\circ$). Некоторое смещение семейства кривых в сторону отрицательных углов связано с особенностями измерения диаграмм пространственного распределения силы света и не имеет других причин такого сдвига.

Продолжая сравнение эффекта перераспределения светового потока для разных типов образцов СИД, стоит отметить, что одно только воздействие УЗВ (без наработки) уже значительно влияет на поведение описанных зависимостей. Этот факт может служить основанием для вывода о том, что УЗВ будет оказывать существенное влияние на работу излучающей структуры

и, как следствие, на светотехнические и электрофизические характеристики СИД в процессе дальнейшей наработки.

Рассмотренные выше механизмы, приводящие к изменению хода ВАХ СИД при воздействии УЗВ, хорошо объясняют также особенности в поведении фотометрических характеристик СИД, представленных на рис. 6. Действительно, относительное увеличение доли светового потока в центральной (приконтактной) части кристалла со временем наработки (см. рис. 6, в), вызвано не чем иным, как значительным увеличением плотности тока в этой области. По этой причине боковые составляющие потока, напротив, существенно снижают свою долю в суммарном эффекте, что незамедлительно сказывается на ходе деградационной характеристики светового потока (см. рис. 6, г). При сравнении с теми же характеристиками образца СИД, не испытывавшего воздействия УЗВ (см. рис. 6, а и б), можно заметить следующее. Во-первых, на деградационной характеристике отсутствует участок резкого падения

величины светового потока в начальный момент, который связан именно с воздействием УЗВ. Во-вторых, пропорциональное (по всей диаграмме излучения) увеличение светового потока с минимальной степенью его перераспределения вызывает такое же увеличение суммарного значения светового потока (~20 %).

Дальнейшая деградация рабочих характеристик СИД будет определяться различными механизмами старения, например: механизмом Шокли—Холла—Рида; диффузией материала омического контакта в нижележащие слои полупроводника (его металлизацией); снижением квантового выхода отдельных секторов, неоднородно распределенных по составу индия в объеме активной области материала структуры; образованием заряженных центров в области дислокаций, другими механизмами, не приводящими, однако, к катастрофическим или хотя бы к значительным изменениям величины светового потока (как показали исследования, эта цифра может составить ~2—3 % в год).

Согласно работе [6], возрастание светового потока в начале деградационной характеристики (при первых 2000—3000 ч наработки) объясняется общим увеличением квантового выхода структуры, связанным с повышением концентрации заряженных акцепторов в области пространственного заряда. На деградационных характеристиках это практически всегда означает окончание периода стабилизации параметров. Далее начинают доминировать механизмы, связанные с дефектами структуры [7]. В итоге через одинаковое время наработки разница в значениях светового потока у различных образцов СИД достигает почти 30 % (см. рис. 6, б и г). Особо отметим, что у образцов СИД, проходивших наработку без УЗВ, процесс деградации всегда происходит значительно медленнее.

Деградационные характеристики максимального значения силы света, также показанные на рис. 6, б и г, в основном определяются теми же механизмами, что и перераспределение светового потока, и в случае широкоугольной диаграммы направленности излучения СИД в целом повторяют ход деградационных характеристик светового потока.

Заключение

Установлено, что УЗВ оказывает существенное влияние на деградацию всех характеристик СИД; степень и скорость деградации зависят от продолжительности воздействия и частоты УЗВ.

Показано, что при малой (до 40 А/см²) плотности тока через СИД уменьшение прямого напряжения ВАХ вызвано действием пьезоэффекта и спонтанной поляризации; при больших плотностях тока (до 120 А/см²) — сильным влиянием увеличенного переходного сопротивления в области омического контакта, появляющегося в результате действия УЗВ.

Обнаружено, что влияние УЗВ на изменение интегральной оптической мощности излучения СИД, приводящее к сдвигу в «красную» область спектра, обусловлено возникновением неоднородности излучающей структуры по составу атомов индия в активном слое.

Эффект уменьшения квантового выхода излучения усиливается сходным образом как при увеличении общего времени воздействия УЗВ, так и при наработке без УЗВ. У образцов СИД, проходивших наработку в присутствии УЗВ, процесс деградации всегда происходит значительно быстрее.

Качественное объяснение наблюдаемым эффектам деградации рабочих характеристик СИД может быть дано на основе модели, предполагающей, что многокомпонентная гетероструктура InGaN представляет собой параллельное соединение площадок с различным содержанием атомов индия в активном слое, меняющем соответствующим образом свои свойства под воздействием УЗВ.

Библиографический список

1. Маняхин, Ф. И. Подпороговый механизм образования дефектов инжектированными носителями заряда в полупроводниковых структурах / Ф. И. Маняхин // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. — 1998. — № 1. — С. 63—69.
2. Наими, Е. К. Влияние ультразвукового воздействия на характеристики светодиодов зеленого свечения на основе GaP / Е. К. Наими, О. И. Рабинович, В. П. Сушков // Там же. — 2004. — № 4. — С. 61—63.
3. Маняхин, Ф. И. Динамически-емкостной метод измерения концентрации неподвижных зарядовых центров в полупроводниковых материалах типа A^{III}B^V, подвергаемых ультразвуковому воздействию / Ф. И. Маняхин, Е. К. Наими, О. И. Рабинович, В. П. Сушков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2006. — Т. 72, № 5. — С. 20—25.
4. Morkoc, H. Large-band-gap SiC, III—V nitride, and II—VI ZnSe-based semiconductor device technologies. / H. Morkoc // J. Appl. Phys. (A). — 1994. — V. 76. — P. 1363—1398.
5. Jinschek, J. R. Local indium segregation and band gap variations in high efficiency green light emitting InGaN/GaN diodes / J. R. Jinschek et al // Solid State Commun. — 2006. — V. 137. — P. 230—234.
6. Ковалев, А. Н. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе / А. Н. Ковалев, Ф. И. Маняхин, В. Е. Кудряшов // Физика и техника полупроводников. — 1999. — Т. 33, Вып. 2. — С. 224—232.
7. Никифоров, С. Г. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp / С. Г. Никифоров // Компоненты и технологии. — 2006. — № 11. — С. 42—49.

