РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

DOI: 10.17725/rensit.2020.12.329

Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения

температуры и плотности тока в гетероструктуре ^{1,2}Сергеев В.А., ¹Ходаков А.М., ^{1,2}Фролов И.В.

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, http://ulireran.ru/

Ульяновск 432071, Российская Федерация

²Ульяновский государственный технический университет, http://www.ulstu.ru/

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: sva@ulstu.ru, ln23al@yandex.ru, ilya-frolov88@mail.ru

Поступила 08.06.2020, рецензирована 22.06.2020, принята 30.06.2020

Аннотация: Представлена диффузионная кинетическая модель деградации мощности оптического излучения светодиода на основе двойной InGaN/GaN гетероструктуры в процессе испытаний под действием прямого тока. Согласно модели, основным процессом, вызывающим спад оптической мощности светодиода, является диффузия атомов примеси Mg из барьерного p-слоя гетероструктуры в активную область. Модель учитывает эффект неоднородного распределения тока вследствие неравномерного разогрева кристалла током высокой плотности и может быть использована для прогнозирования срока службы светодиода при работе в непрерывном и импульсном режиме.

Ключевые слова: светодиод, испытания, спад мощности излучения, модель

УДК 621.382

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта №19-47-730002.

Для цитирования: Сергеев В.А., Ходаков А.М., Фролов И.В. Модель деградации InGaN/GaN светодиода при токовых испытаниях с учетом неоднородного распределения температуры и плотности тока в гетероструктуре. *РЭНСИТ*, 2020, 12(3):329-334. DOI: 10.17725/ rensit.2020.12.329.

Model of degradation of InGaN/GaN LED during current tests taking into account the inhomogeneous distribution of temperature and current density in the heterostructure Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Hodakov, Ilya V. Frolov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, http://ulireran.ru/

Ulyanovsk 432071, Russian Federation

E-mail: sva@ulstu.ru, ln23al@yandex.ru, ilya-frolov88@mail.ru

Received June 08, 2020; peer reviewed June 22, 2020; accepted June 30, 2020

Abstract: A diffusion kinetic model of the optical power degradation of an LED based on a double InGaN/GaN heterostructure during direct current tests is presented. According to the model, the main process causing a decrease in the optical power of the LED is the diffusion of Mg impurity atoms from the p-layer barrier of the heterostructure into the active region. The model takes into account the effect of non-uniform current distribution due to non-uniform heating of the chip by high-density current and can be used to predict the lifetime of the LED when operating in continuous and pulsed mode.

Keywords: LED, tests, decrease of emission power, model UDC 621.382

Acknowledgements: This work was carried out as part of a state assignment with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Ulyanovsk Region as part of scientific project No. 19-47-730002.

For citation: Vyacheslav A. Sergeev, Alexander M. Hodakov, Ilya V. Frolov. The model of degradation of InGaN/GaN LED during current tests taking into account the inhomogeneous distribution of temperature and current density in the heterostructure. *RENSIT*, 2020, 12(3):329-334. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.329.

Содержание

- 1. Введение (330)
- 2. Модель деградации светодиода (331)
- Экспериментальное подтверждение модели (333)
- 4. Заключение (333)

Литература (333)

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности И увеличение срока службы светодиодных устройств является одной из ключевых задач при проектировании. Стабильность ИХ электрооптических характеристик светоизлучающих диодов (СИД) во многом зависит от режима работы и условий время эксплуатации. В настоящее ДЛЯ прогнозирования службы СИД срока применяются математические модели, основанные на экстраполяции результатов экспериментальных исследований спада мощности излучения при ускоренных испытаниях под действием повышенной температуры и тока [1-3], и модели, построенные на основании теоретического анализа физических процессов В светоизлучающей гетероструктуре при длительном протекании тока [4,5].

В процессе роста светоизлучающей InGaN/GaN гетероструктуры в барьерном

p-GaN слое, легированном магнием, образуются электрически нейтральные магний-водородные комплексы Mg-Н. Поэтому в готовой структуре часть магния выступает в качестве акцепторной примеси, а часть оказывается в связанном состоянии [5]. Под действием повышенной температуры электрического И тока комплексы Mg-H могут разрушаться, что приводит к увеличению эффективной концентрации акцепторов и образованию свободного В водорода. литературе процессе работы отмечается, ЧТО В светодиода возможно протекание следующих диффузионных механизмов в гетероструктуре: диффузия водорода и диффузия магния [4-8]. Диффузия магния из p-GaN барьерного слоя в активную гетерострутуры область приводит образованию дополнительных центров безызлучательной рекомбинации и спаду мощности излучения светодиода [9,10].

Основными фактором, ускоряющим диффузию примеси и спад оптической мощности СИД, является повышенная температура активной области кристалла. Известно, что неоднородное распределение тока вызывает перегрев структуры в областях кристалла с повышенной плотностью тока [11]. За счет действия положительной обратной тепловой СВЯЗИ плотность тока в отдельных областях кристалла может существенно превысить среднее значение, что приведет к ускорению темпа деградации оптической мощности. В известных моделях деградации InGaN СИД не учитывается эффект положительной тепловой обратной связи, а коэффициенты влияния тока и температуры на зависимость мощности излучения СИД от времени работы применяются независимо друг от друга [2].

Целью работы является развитие диффузионной модели оптической деградации СИД на основе двойной InGaN/ GaN гетероструктуры, работающего в режиме постоянного тока [12], для импульсного режима работы при повышенной плотности тока с учетом неоднородного распределения температуры по площади активной области.

2. МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ Светодиода

Одномерная геометрия кинетической модели деградации СИД (**рис. 1**) представляет собой часть структуры полупроводникового кристалла, которая состоит из следующих элементов: 1 – слой р-GaN:Mg; 2 – активный слой In_xGa_{1-x}N толщиной *d* (относительная концентрация In_x изменяется в пределах 0.2-0.43; 3 – слой п-GaN:Si.

Математическая модель состоит из следующих уравнений:

1) уравнение баланса для нахождения концентрации неравновесных носителей *n*(*t*) в активной области гетероструктуры СИД



Рис. 1. Геометрия кинетической модели деградации светодиода.

$$\frac{J(t)}{ed} - \left(An(t)N_{2av}(t) + Bn(t)^2 + Cn(t)^3\right) = 0, \quad (1)$$

n(0) = n₀,

где J – плотность инжекционного тока; A, B, C – безызлучательный, излучательный и Оже рекомбинационный коэффициенты соответственно [13]; $N_{2av}(t)$ – средняя концентрация примесных атомов в активной области структуры; n_0 – начальная концентрация носителей; e – заряд электрона; 2) уравнения диффузии примесных атомов

$$\frac{\partial N_i(x,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 N_i(x,t)}{\partial x^2} - D_i^{el} \frac{\partial N_i(x,t)}{\partial x}, \qquad (2)$$

где $i = 1, 2, 3; N_i(x, l)$ – концентрация примесных атомов в *i*-ой области структуры СИД; D_i , $D_i^{el} = \frac{D_i Eq_{eff}}{k_B T}$ – коэффициенты диффузии и электродиффузии в *i*-ой области; E – напряженность внешнего электрического поля; k_B – постоянная Больцмана; T – температура кристалла; $q_{eff} = q_i - |e| n_{el}^2 \sigma_{in}$ – эффективный заряд [14]; n_i, l_e – концентрация и длина свободного пробега электронов; σ_{in} – среднее сечение рассеяния электронов на ионах.

В качестве начальных и граничных условий задаются начальные концентрации примесных атомов в рассматриваемых областях структуры N_{i0} и непрерывность плотности потока вещества на внутренних границах структуры.

Модель была построена при следующих предположениях: неравновесные концентрации *n* и *p* в активной области приблизительно равны; рекомбинационные коэффициенты А, В, С не зависят от концентраций *n* и *p*; активная область гетероструктуры предполагается однородной Уравнение средой. (1)рассматривается В квазистационарном приближении, так как плотность носителей достигает своего равновесного значения очень быстро по сравнению со скоростью деградации СИД.

Задача (1) – (2) решалась численным методом конечных элементов С помощью Comsol моделирующей среды Multiphysics. Плотность инжекционного тока моделировалась функциональной зависимостью

$$J(t) = J_0 \sum_{m=0}^{M} \left(H\left(t - m\frac{t_p}{K}\right) - H\left(t - t_p\left(\frac{m}{K} + 1\right)\right) \right), \quad (3)$$

где H(t) – функция Хэвисайда; M – полное число импульсов в рассматриваемом промежутке времени; m – число импульсов; t_p – длительность импульса; K – коэффициент заполнения.

Расчетные исследования спада оптической СИД мощности при испытаниях под действием импульсного тока повышенной плотности проводились для СИД зеленого свечения производства фирмы Arlight. Геометрические размеры кристалла 340×270×100 мкм, сапфировая максимальная плотность подложка, постоянного тока 35 A/см², длина волны в максимуме спектра излучения 525 нм (относительное содержание ИНДИЯ В активной области x = 0.37). Значения плотности тока J, длительности импульса t и коэффициента заполнения К задавались в следующих интервалах: J = (100÷500) A/ см², $t_{p} = (100 \div 500)$ мкс, $K = (0.01 \div 0.1)$.

Для учета эффекта положительной тепловой обратной СВЯЗИ при больших плотностях расчет ТОКОВ D. коэффициентов диффузии И электродиффузии D_i^{el} проводился исходя из условия неоднородного распределения области плотности тока ПО активной СИД и полупроводниковой структуры соответствующего ей распределения температуры.Сэтойцельюбылопроизведено тепловое 3D моделирование структуры СИД и сделан расчет температурного поля с неоднородной плотностью тока по активной области СИД по методике, представленной в работе [11]. На рис. 2 показаны результаты расчета изменений максимальных значений плотности тока (*a*) и температуры активной области кристалла (*b*) за время действия одного импульса тока для одного из расчетных вариантов: J= 500 A/см², K = 0.1; t_p = 500 мкс. Видно, что максимальное значение температуры перегрева активной области относительно температуры окружающей среды (300 K) составляет 78 K, а максимальная плотность тока нелинейно возрастает, и к моменту окончания импульса на 35% превышает среднее значение плотности тока J = 500 A/см².

Значение коэффициента диффузии путем решения обратной определялось одномерной диффузионной задачи. Для решения использовались профили распределения носителей концентрации гетероструктуре, заряда измеренные В методом вольт-фарадных характеристик на различных временных интервалах деградации СИД в течение 12 000 ч на постоянном 30 A/cm^2 , токе плотностью которые брались в качестве решения уравнения (2) в рассматриваемые моменты времени [12].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МОДЕЛИ

На **рис. 3**(*a*) сплошными линиями показаны зависимости оптической мощности СИД в процессе его работы в импульсном



Рис. 2. Максимальные температура (а) и плотность тока (b) активной области светодиода: $J = 500 \ A/cm^2$, $t_p = 500 \ Mkc$, K = 0.1.

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



Рис. 3. Зависимость оптической мощности светодиодов от времени (a) и зависимость времени спада $t_{0.7}$ оптической мощности до 70% от плотности тока (b) при работе в импульсном режиме ($t_p = 500$ мкс, K = 0.1).

режиме при трех значениях плотности тока, длительности импульса $t_p = 500$ мкс и коэффициенте заполнения K = 0.1, полученные с помощью разработанной модели. Точками на графике обозначены результаты испытаний в указанных режимах трех групп СИД по 5 шт. в каждой группе. Пунктиром отмечены границы среднего квадратического отклонения. Из графика видно, что экспериментальная зависимость $P(t)/P_0$ хорошо согласуется с зависимостью, рассчитанной по диффузионной кинетической модели.

Кривые на представленном рисунке аппроксимируются функцией вида

$$P_{opt}(t) / P_{opt0} = -0,08 \ln(f(J)t + 3.73e-6), \quad (4)$$

где $f(J) = 1.084e-7 \times \exp(7.66e-3 \times J).$

Проведена оценка времени работы $t_{0.7}$, при котором оптическая мощность уменьшается до 70% от начального значения при разных значениях плотности тока *J* (рис. 3(*b*)). Зависимость $t_{0.7}(J)$ описывается экспоненциальной функцией вида

$$t_{0,7}(J) = \tau e^{-J/J_0},\tag{5}$$

где $\tau = 14\,600$ ч и $J_0 = 130$ А/см² для указанного режима работы исследованных СИД.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная диффузионная модель деградации СИД на основе двойной InGaN/GaN гетероструктуры позволяет получить зависимость оптической мощности излучения от времени работы на постоянном и/или импульсном токе, в том числе при повышенных плотностях тока, вызывающих перегрев активной области. Модель может быть использована для прогнозирования срока службы СИД при работе в номинальном режиме при известном значении коэффициента диффузии примеси Mg из барьерного слоя в активную область гетероструктуры, которое может быть получено по результатам ускоренных испытаний в импульсном режиме при повышенной плотности тока.

ЛИТЕРАТУРА

- Xu L-W, Qian K-Y A. Fast Method for Lifetime Estimation of Blue Light-emitting Diode Chips Based on Nonradiactive Recombination Defects. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4):8201309.
- Becirovic V, Helac V, Arslanagic B, Samic H. Effects on LEDs during the Accelerated

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Ageing Test. 2019, 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), 20-22 March 2019, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

- Ruschel J, Glaab J, Beidoun B, Ploch NL, Rass J, Kolbe T, Knauer A, Weyers M, Einfeldt S, Kneissl M. Current-induced degradation and lifetime prediction of 310 nm ultraviolet light-emitting diodes. *Photonics Research*, 2019, 7(7):B36-B40.
- Xu L, Qian K. Aging mathematical model of InGaN/GaN LEDs based on non-radiative recombination. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1864:020172.
- De Santi C, Meneghini M, Meneghesso G, Zanoni E. Degradation of InGaN laser diodes caused by temperature- and currentdriven diffusion processes. *Microelectronics Reliability*, 2016, 64:623-626.
- Renso N, De Santi C, Caria A, Dalla Torre F, Zecchin L, Meneghesso G, Zanoni E, Meneghini M. Degradation of InGaN-based LEDs: Demonstration of a recombinationdependent defect-generation process. *Journal* of Applied Physics, 2020, 127:185701.
- Lee S-N, Paek HS, Son JK, Kim H, Kim KK, Ha KH, Nam OH, Park Y. Effects of Mg dopant on the degradation of InGaN multiple quantum wells in AlInGaN-based light emitting devices. *J Electroceram*, 2009, 23:406-409.
- Orita K, Meneghini M, Ohno H, Trivellin N, Ikedo N, Takigawa S, Yuri M, Tanaka T, Zanoni E, Meneghesso G. Analysis of Diffusion-Related Gradual Degradation of InGaN-Based Laser Diodes. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(9).
- Lee S-N, Paek HS, Son JK, Kim H, Kim KK, Ha KH, Nam OH, Park Y. Effects of Mg dopant on the degradation of InGaN multiple quantum wells in AlInGaN-based light emitting devices. *Journal of Electroceramics*, 2009, 23(2):406-409.

- Made RI, Gao Y, Syaranamual GJ, Sasangka WA, Zhang L, Nguyen XS, Tay YY, Herrin JS, Thompson CV, Gan CL. Characterization of defects generated during constant current InGaN-on-silicon LED operation. *Microelectronics Reliability*, 2017, 76-77:561-565.
- Sergeev VA, Khodakov AM. Thermoelectric Models of High-Power Bipolar Semiconductor Devices. Part II. Nonlinear Model of LEDs. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, 60(12):1328-1332.
- 12. Фролов ИВ, Ходаков АМ, Сергеев ВА, Радаев ОА. Оптическая деградация InGaN/GaN светоизлучающего диода, вызванная диффузией атомов примеси. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2018, 18(1):33-36.
- 13. Schubert EF. Light-Emitting Diodes. Great Britain, Cambridge University Press, 2006.
- 14. Болтакс БИ. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Ленинград, Наука, 1972, 384 с..

Сергеев Вячеслав Андреевич

д.т.н., доцент, член-корр. РАЕН

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал **48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия** sva@ulstu.ru

Ходаков Александр Михайлович

к.ф.-м.н.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал **48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия ln23al@yandex.ru**

Фролов Илья Владимирович

к.т.н.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал **48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия ilya-frolov88@mail.ru.**