

УДК 621.382:539.1.04

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -СВЕТОДИОДОВ

© 2023 г. О. В. Ткачев^а, С. М. Дубровских^{а, *}, К. Д. Кокшарова^а, А. В. Федорец^а

^аРоссийский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, 456770 Россия

*e-mail: dep5@vniitf.ru

Поступила в редакцию 17.06.2022 г.

После доработки 09.09.2022 г.

Принята к публикации 09.09.2022 г.

Представлены результаты исследования влияния нейтронного излучения на спектральные характеристики светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Определен механизм, ответственный за изменение спектра излучения светодиодов при воздействии нейтронов. Показана связь между радиационной чувствительностью спектральных характеристик активных областей образцов и составом твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Проведен аналитический расчет для оценки возможного максимального смещения спектра свечения светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ после нейтронного воздействия.

Ключевые слова: светодиод $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, спектр свечения, пиковая длина волны, квантовая яма, флуктуация индия, ширина запрещенной зоны, флуенс нейтронов.

DOI: 10.31857/S1028096023040192, **EDN:** JMXNSY

ВВЕДЕНИЕ

Спектр излучения является одной из основных характеристик полупроводниковых светодиодов и лазерных диодов, поэтому с времен появления первых образцов исследователей интересовало влияние ионизирующих излучений на спектральные характеристики данных приборов. В одной из первых работ [1] отмечено изменение спектра лазерных диодов, изготовленных на основе GaAs, в результате воздействия электронов и протонов. Облучение привело к расщеплению исходного спектра излучения на две группы мод, одна из которых сместилась в коротковолновую, а другая — в длинноволновую часть спектра относительно центральной длины волны до облучения. Авторы не дают объяснения данному факту. Более поздние работы также посвящены исследованию светоизлучающих структур и приборов, изготовленных главным образом на основе GaAs и его твердых растворов с Al и In. В [2–4] наблюдали коротковолновое смещение спектра излучения после облучения светодиодов и лазерных диодов на основе AlGaAs гамма-квантами изотопа ^{60}Co и быстрыми нейтронами. В [3] авторы связывают наблюдаемые изменения с размытием границ гетерослоев вследствие диффузии Al, вызванной воздействием комптоновских электронов, что приводит к росту ширины запрещенной зоны активной области. В [2, 4] наблюдаемое смещение в область меньших длин волн, по мнению исследователей,

вызвано гибелью хвостов плотности состояний в запрещенной зоне активной области. В современных работах исследовали спектры излучения лазерных диодов, на основе напряженных гетероструктур InGaAlP после воздействия гамма-квантов [5], спектры фотолюминесценции напряженных структур InGaAs после облучения быстрыми нейтронами [6] и импульсами УФ-излучения [7]. В [5] наблюдали коротковолновое смещение спектра, в [6, 7] — длинноволновое. Все исследователи связывают изменение спектра излучения напряженных структур с релаксацией механических напряжений в активной области структур.

В настоящее время широко используемым полупроводниковым материалом помимо GaAs является GaN и его твердые растворы. В [8], где представлены результаты исследования влияния нейтронного излучения на характеристики светодиодов и лазерных диодов на основе GaN и GaAs, показано, что радиационная стойкость светоизлучающих GaN-структур, оцениваемая по деградации квантового выхода, более чем на порядок выше аналогичных структур на основе GaAs. Полученные в [8] данные говорят о перспективе создания на основе нитрида галлия приборов оптоэлектроники, стойких к ионизирующему излучению. Следует отметить, что радиационная реакция светоизлучающих структур на основе GaN имеет ряд особенностей. Так, в [9] показано, что воздействие нейтронного излучения на све-

одиод GaN приводит к увеличению ширины спектра электролюминесценции и сдвигу его максимума в длинноволновую область шкалы оптического излучения. Влияние радиационного воздействия на спектральные характеристики светоизлучающих структур в ряде случаев может иметь принципиальное значение: например, при их использовании в системах накачки лазерных систем, где важно оптимальное перекрытие спектров излучения накачки и поглощения активной среды лазера.

При создании GaN-излучателей варьируют доли Al и In в твердых растворах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, что приводит к изменению ширины запрещенной зоны в диапазоне 0.8–6 эВ и, следовательно, позволяет получить различные спектры свечения. В случае излучателей видимого диапазона квантовые ямы выполнены на основе раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Активная область современной светодиодной структуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ состоит из нескольких квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ шириной 2–5 нм, разделенных барьерами GaN шириной ~10 нм, необходимых для снятия механических напряжений, которые вызваны рассогласованием решеток.

Целью настоящей работы было исследование влияния нейтронного излучения на спектральные характеристики светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в зависимости от доли In x в твердом растворе.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве образцов были взяты светодиоды $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фирмы Nichia с различным содержанием In в активной области прибора (значением x в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) и, следовательно, излучающих на различных длинах волн: 363 ± 1 нм (ультрафиолетовые), 445 ± 5 нм (синие) и 500 ± 5 нм (зеленые), по пять образцов каждого типа. Изначально содержание x было неизвестно, и его определяли в ходе исследований.

Необходимо отметить, что для исследования влияния облучения на спектральные характеристики были выбраны именно светодиоды, так как наличие у лазера резонатора, имеющего собственные частоты, накладывает дополнительные особенности на изменение спектральных характеристик: пиковая длина волны излучения лазерного диода может изменяться немонотонно. Так, например, пиковая длина волны имеет ступенчатую зависимость от температуры.

Исследуемые в работе образцы подвергали воздействию нейтронного излучения импульсного растворного ядерного реактора. Длительность импульса воздействия ~1 мс, средняя энергия нейтронов 0.8 МэВ.

Для повышения информативности исследований и достоверности получаемых результатов до и после нейтронного облучения спектр светодиодов контролировали при вариации температуры в диапазоне от –60 до 70°C. Спектры электролюминесценции светодиодов регистрировали с помощью компактного спектрометра, погрешность измерения длины волны составляла ± 0.5 нм. Вариацию температуры обеспечивали термокамерой тепла/холода, погрешность установки температуры составляла $\pm 1^\circ\text{C}$. Излучение светодиода выводили из камеры с помощью оптоволокну. Для уменьшения возможного температурного отжига радиационных дефектов измерения всегда проводили, начиная с отрицательных температур. Как показали более ранние исследования, для облученных светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ характерен инжекционный отжиг радиационных дефектов. Для его минимизации светодиод запитывали одиночными импульсами тока длительностью 100 мкс. Также импульсное питание исключало дополнительный разогрев светодиода протекающим током.

В одном из экспериментов регистрацию спектра и выходной мощности светодиода осуществляли непосредственно после импульсного воздействия реактора. Светодиод располагался в канале активной зоны реактора в специальном термостате при температуре 0°C. Его излучение выводили из канала реактора в приборный бокс с помощью специального радиационно-стойкого оптоволокну.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлены спектры зеленого светодиода, измеренные до облучения и через 1 мин после воздействия импульса нейтронного излучения. Из рисунка видно, что после воздействия импульса нейтронного излучения увеличивается ширина спектра светодиода, пиковая длина волны λ_{max} смещается в длинноволновую область. Дальнейшие измерения показали, что характеристики облученного светодиода частично восстанавливаются. Так, на рис. 2 и 3 представлены значения λ_{max} и относительной мощности излучения светодиода (A), зарегистрированные в разные моменты времени после воздействия нейтронного импульса. Из сравнения кинетики восстановления спектра и выходной мощности светодиода видно, что после воздействия импульса нейтронного излучения характеры релаксации пиковой длины волны и восстановления интенсивности схожи: наиболее интенсивная релаксация происходит в течение 10 мин после воздействия, в дальнейшем отжиг практически отсутствует. Остаточные изменения пиковой длины волны составили порядка 30% от наблюдавшихся непосредственно после воздействия.

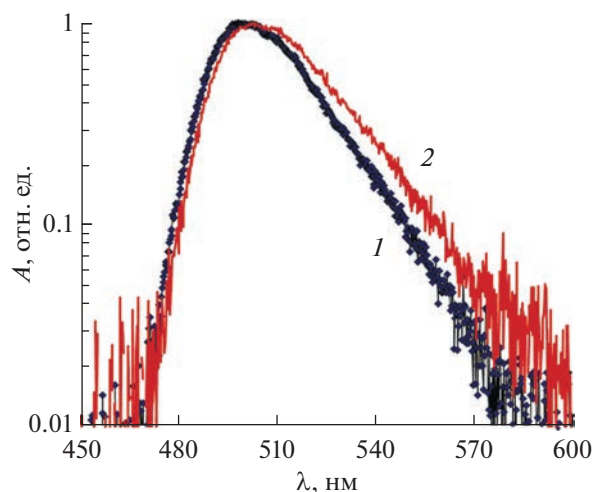


Рис. 1. Спектры зеленого светодиода: 1 — до облучения; 2 — через 1 мин после импульса нейтронного излучения ($\Phi_n = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$).

Результаты влияния нейтронного облучения на светодиоды различного спектра излучения, представленные далее, получены путем измерения в лабораторных условиях через трое суток после облучения — после завершения стадии быстрого отжига радиационных дефектов.

На рис. 4 представлены зависимости пиковой длины волны λ_{max} от температуры T светодиодов различного спектра излучения до облучения и после воздействия флуенса нейтронов $0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При нагреве светодиода наблюдалось увеличение пиковой длины волны и ширины спектра излучения. Увеличение пиковой длины волны обусловлено влиянием температуры на ширину запрещенной зоны полупроводника. На практике для учета данного эффекта используют формулу Варшни [10]. Как видно из рис. 4, при увеличении температуры образцов пиковая длина волны линейно возрастает. Влияние нейтронного облучения на зависимости Варшни для светодиодов разного спектра излучения различно: облучение приводит к параллельному сдвигу зависимости в сторону увеличения длин волн на $\approx 4 \text{ нм}$ для синего и $\approx 2.7 \text{ нм}$ для зеленого светодиода соответственно. В случае ультрафиолетового светодиода изменения зависимости в пределах погрешности измерений не наблюдаются.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изменение спектральных характеристик диодов по эффекту эквивалентно изменению ширины запрещенной зоны полупроводника, что, вообще говоря, при данных уровнях воздействия ($\Phi_n \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}$) исключено, поскольку элементарные оценки показывают, что число структурных

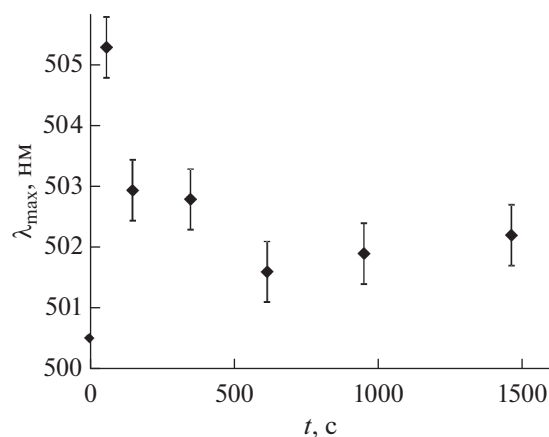


Рис. 2. Значения пиковой длины волны светодиода, зарегистрированные в различные моменты времени после воздействия импульса нейтронного излучения ($\Phi_n = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$), исходное значение $\lambda_{\text{max}} = 500.5 \text{ нм}$.

дефектов составляет приблизительно $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при концентрации атомов $10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$, и такой концентрации дефектов недостаточно для значимого изменения ширины запрещенной зоны полупроводника [11]. Известно, что падение выходной мощности светоизлучающих структур при облучении быстрыми нейтронами в первую очередь связано с образованием структурных повреждений в активной области прибора [12]. Данные дефекты выступают центрами безызлучательной рекомбинации, что приводит к уменьшению внутренней квантовой эффективности структуры [13]. Схожий характер релаксации спектральных характеристик и интенсивности свечения светодиода после воздействия импульса нейтронов

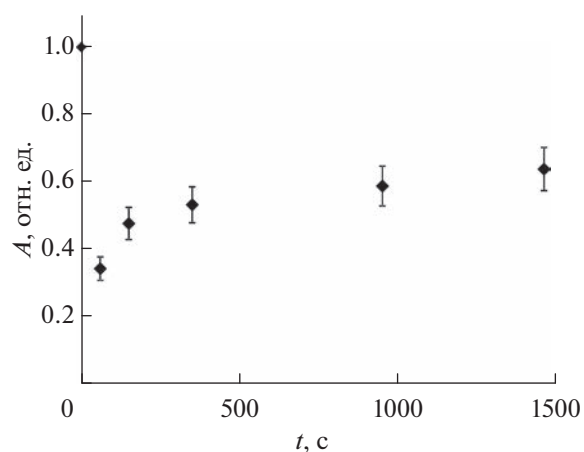


Рис. 3. Относительное изменение мощности излучения светодиода в различные моменты времени после воздействия нейтронного импульса ($\Phi_n = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$), исходное значение $A = 1 \text{ отн. ед.}$

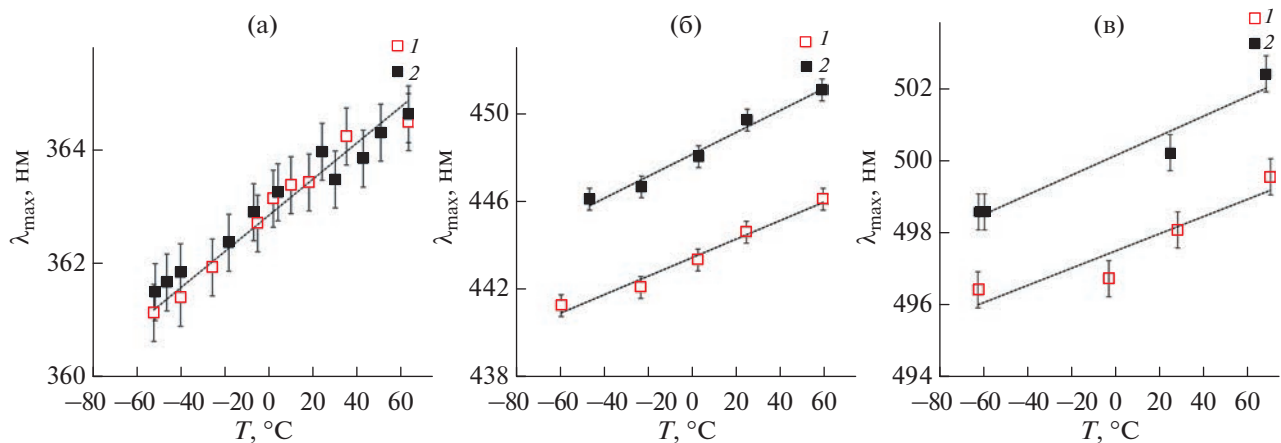


Рис. 4. Зависимости пиковой длины волны излучения ультрафиолетового (а), синего (б) и зеленого (в) светодиодов от температуры: 1 – до облучения; 2 – после воздействия флуенса нейтронов $0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

(рис. 2, 3) свидетельствует о том, что наблюдаемые изменения спектров светодиодов также связаны со структурными повреждениями. В более ранней работе [9] высказано предположение, принятое в настоящем исследовании в качестве рабочей гипотезы, что изменение спектра светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ при воздействии нейтронного излучения обусловлено наличием неоднородностей в распределении индия – в виде доменов размером 3–5 нм [14, 15]. Эти скопления индия проявляют себя в квантовых ямах светодиодов как квантовые точки, в которых локализируются носители, что препятствует их безызлучательной рекомбинации с радиационными центрами. Таким образом, после облучения квантовая эффективность областей с большим содержанием индия (и меньшей шириной запрещенной зоны) менее подвержена деградации, чем областей, где индия меньше, что и является причиной смещения спектра электролюминесценции в длинноволновую область.

Определим влияние нейтронного излучения на спектральные характеристики светодиодов с различным составом растворов квантовых ям. Ширина запрещенной зоны $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ зависит от доли индия (x) согласно [10] как:

$$E_g = 3.42 - 2.65x - 2.4(1-x)x, \quad (1)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны [эВ].

На рис. 5 представлены полученные в экспериментах усредненные значения приращения пиковой длины волны ($\Delta\lambda$) электролюминесценции в зависимости от доли индия (x) в активной области приборов при облучении светодиода флуенсом нейтронов $0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Каждая точка на рис. 5 получена путем усреднения данных по пяти образцам одного оптического диапазона. При обработке результатов долю индия определяли по выражению (1), полагая, что энергия фотонов оп-

тического излучения (без учета квантово-размерных эффектов) равна ширине запрещенной зоны E_g , а, следовательно, E_g [эВ] можно оценить, как

$$E_g \approx hc/\lambda_{\max} \approx 1.24/\lambda_{\max}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка [Дж · с], c – скорость света [м/с], $\lambda_{\max}$ – пиковая длина волны излучения образца [мкм]. Из данных, представленных на рис. 5, видно, что величина сдвига пиковой длины волны зависит от состава твердого раствора, из которого выполнена активная область прибора, т.е. от содержания индия в слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Наиболее значимые изменения спектра наблюдаются для диодов с долей индия в квантовой яме $x \approx 0.13$ (синие) и составляют в среднем ≈ 4 нм. Для ультрафиолетовых светодиодов, изготовленных практически без индия ($x \approx 0.001$) изменения спектра отсутствуют. На рис. 6 представлены приращения пиковой длины волны $\Delta\lambda$ в зависимости от уровня воздействия для синих и зеленых светодиодов. С увеличением уровня нейтронного нагружения величина длинноволнового сдвига спектра $\Delta\lambda$ также возрастает, а производная этой характеристики уменьшается.

Как было отмечено выше, изменение спектра GaN-светодиодов при облучении нейтронами связано с наличием доменов индия, что может приводить к различным эффектам. В данных областях имеет место локальное уменьшение ширины запрещенной зоны, и в этих локальных потенциальных ямах могут локализоваться носители заряда, что препятствует их диффузии к центрам безызлучательной рекомбинации, созданных ионизирующим излучением, что, вероятно, имеет место в случае синих и зеленых светодиодов. Если гипотеза верна, то возможное максимальное смещение спектра определяется максимальными флуктуациями распределения индия в активной обла-

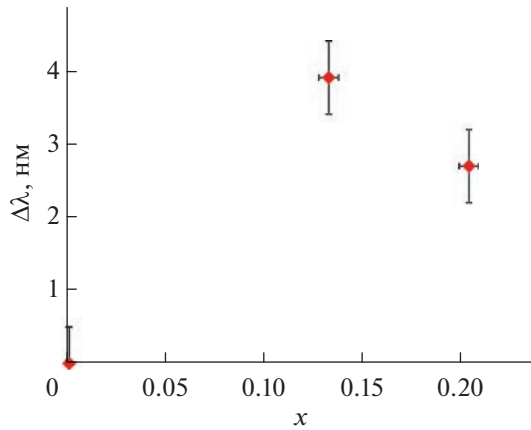


Рис. 5. Приращение пиковой длины волны светодиодов в зависимости от доли индия в активной области прибора при воздействии нейтронного излучения ($\Phi_n = 0.8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$).

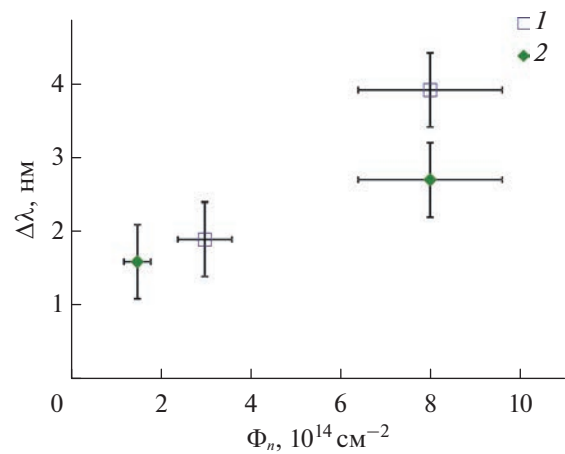


Рис. 6. Зависимость от флуенса нейтронов приращения пиковой длины волны светодиода: 1 – синего; 2 – зеленого.

сти прибора и, соответственно, флуктуациями ширины запрещенной зоны.

Для оценки величины неоднородностей в распределении индия используем предложенный А.Э. Юновичем и соавторами метод [16]. В качестве примера проводимых по нему расчетных оценок представим результаты для синего светодиода. Неоднородность в распределении индия оценивается из спектра свечения диода, а именно по его длинноволновой ветви, которая аппроксимируется выражением:

$$I(E) \sim [1 + \exp(-(E - E_g)/E_0)]^{-1}, \quad (3)$$

где E_0 – показатель экспоненциального спада, его величина характеризует флуктуацию эффективной ширины запрещенной зоны образца определенного спектра свечения, E_g – определяемая по выражению (2) ширина запрещенной зоны. На рис. 7 представлен спектр излучения синего светодиода до облучения и аппроксимация низкоэнергетической ветви спектра выражением (3). Из рисунка видно, что левая ветвь спектра удовлетворительно описывается выражением (3) при величине параметра $E_0 \approx 55 \times 10^{-3} \text{ эВ}$.

В общем случае изменение ширины запрещенной зоны определяется флуктуациями ширины квантовой ямы δD_w и флуктуациями индия в квантовой яме δx [16]:

$$\delta E_g = \sqrt{\delta E_{gw}^2 + \delta E_{gx}^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_g}{\partial D_w} \delta D_w\right)^2 + \left(\frac{\partial E_g}{\partial x} \delta x\right)^2}. \quad (4)$$

Энергию частицы, находящейся в прямоугольной потенциальной яме на нижнем энергетическом уровне, можно оценить выражением:

$E_{gw} = \pi^2 \hbar^2 / (2m_e D_w^2)$, где m_e – эффективная масса электрона в материале данного твердого рас-

творя [10]. Используя эту зависимость, оценим первый член выражения (4): $\delta E_{gw} = (\partial E_g / \partial D_w) \delta D_w = -\pi^2 \hbar^2 / (m_e D_w^3) \delta D_w$. Флуктуации ширины ямы δD_w определяются шероховатостью гетерограниц, и их мерой является постоянная решетки $a_{11} = 0.52 \text{ нм}$. Наиболее типичная в гетероструктуре $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ширина квантовой ямы $\sim 3 \text{ нм}$ [17–20], однако, учитывая возможный технологический разброс разных производителей 2–5 нм, разумно взять среднее значение $D_w = 3.5 \text{ нм}$. Таким образом, получаем $\delta E_{gw} \approx 46 \times 10^{-3} \text{ эВ}$. Из выражения (4), учитывая, что $\delta E_g \approx E_0$ [16], находим неопределенность энергии, вызванную неоднородным распределением состава (для синего светодиода): $\delta E_{gx} \approx 31 \times 10^{-3} \text{ эВ}$. Флуктуация ширины запре-

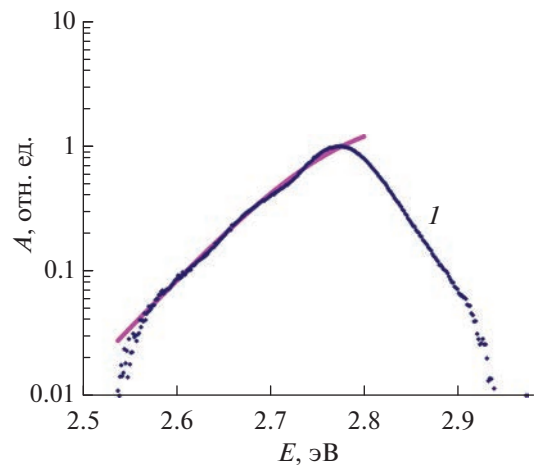


Рис. 7. Спектр излучения синего светодиода до облучения 1 и аппроксимация низкоэнергетической ветви выражением (3).

Таблица 1. Результаты расчетной оценки флуктуаций индия в активной области и величины максимального смещения спектра светодиодов

Светодиод	$\lambda_{\max}$, нм	x	E_0 , 10^{-3} эВ	δE_{gx} , 10^{-3} эВ	$\Delta\lambda$, нм
Ультрафиолетовый	363	0.001	48	15	1.6
Синий	447	0.14	55	31	4.9
Зеленый	498	0.20	58	36	7.2

щенной зоны определяет возможные величины изменений спектра. Дифференцируя выражение, связывающее длину волны фотона с его энергией, получим $\delta E_{gx} \approx (1.24/\lambda_{\max}^2)\Delta\lambda$. В случае $\lambda_{\max} = 0.447$ мкм и учитывая, что $\delta E_{gx} \approx 31 \times 10^{-3}$ эВ, получим $\Delta\lambda \approx 4.9$ нм. Таким образом, неоднородность в распределении индия синего светодиода может привести к максимальному смещению спектра на $\Delta\lambda \approx 4.9$ нм. Данный алгоритм расчетных оценок был применен также к одному из партии фиолетовых и зеленых светодиодов. Промежуточные параметры и конечная величина максимально возможного изменения спектра светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с различным содержанием In приведены в табл. 1.

При сравнении экспериментальных данных, представленных на рис. 5, 6, и результатов расчета, полученных на основании оценки флуктуации индия в активной области светодиода, видно, что в целом экспериментальные и расчетные данные не противоречат друг другу. Следует отметить, что, по расчетным оценкам наиболее существенные изменения спектров следует ожидать в случае зеленых светодиодов с максимальным содержанием индия в квантовых ямах, однако по результатам эксперимента наибольшие изменения претерпели спектральные характеристики синих светодиодов. Возможно, данные несоответствия связаны с различной степенью отжига радиационных дефектов в структурах с различным содержанием индия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что воздействие нейтронного излучения на светодиоды, выполненные на основе структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, приводит к смещению пиковой длины волны оптического излучения образцов в длинноволновую область. Величина смещения зависит от доли индия в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, из которого изготовлена активная область структур. Например, при воздействии флуенсом нейтронов $\sim 10^{15}$ см $^{-2}$ на синий светодиод с содержанием In $x \approx 0.13$ пиковая длина волны смещается в среднем на ≈ 4 нм в длинноволновую область, тогда как в случае фиолетовых светодиодов ($x \approx 0.001$) смещение не наблюдается. Анализ спектров светодиодов до и

после нейтронного облучения показал, что наблюдаемый эффект вызван структурными повреждениями, обусловленными воздействием нейтронов и неравномерным распределением индия в квантовых ямах светодиода. В областях скопления индия имеет место локальное уменьшение ширины запрещенной зоны, и в этих потенциальных ямах могут локализоваться носители заряда, что препятствует их диффузии к центрам безызлучательной рекомбинации, созданных ионизирующим излучением. Аналитический расчет, проведенный в работе, показал хорошую согласованность с экспериментальными данными, что дает основание его использовать для оценки возможного максимального смещения спектра свечения светодиодов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, ожидаемого после воздействия нейтронного облучения.

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Compton D.M.J., Cesena R.A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1967. V. 14. № 6. P. 55.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1967.4324775>
2. Polimadei R.A., Share S., Epstein A.S., Lynch R.J., Sullivan D. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1974. V. 21. P. 96.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1974.6498911>
3. Hava S., Lam R. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. № 6. P. 2229.
<https://doi.org/10.1063/1.336364>
4. Comparo J.C., Delcamp S.B., Frueholz R.P. // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. № 11. P. 5323.
<https://doi.org/10.1063/1.350548>
5. Hava. S. // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. № 1. P. 8.
<https://doi.org/10.1063/1.1419266>
6. Байдусь Н.В., Вихрова О.В., Звонков Б.Н., Малышева Е.И., Труфанов А.Н. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 3. С. 370.
7. Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Калентьева И.Л., Нежданов А.В., Парафин А.Е., Хомицкий Д.В., Антонов И.Н. // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54. Вып. 12. С. 1336.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2020.12.50234.9484>
8. Шукайло В.П., Ткачев О.В., Дубровских С.М., Басаргина Н.В., Ворожцова И.В. // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на РЭА. 2012. Вып. 4. С. 41.

9. Оболенский С.В., Шукайло В.П., Ткачев О.В., Дубровских С.М., Басаргина Н.В., Ворожцова И.В. // Вестн. ННГУ. 2012. № 6(1). С. 51.
10. Шуберт Ф. Светодиоды / Ред. Юнович А.Э. М.: Физматлит, 2008. 495 с.
11. Brudnyi V.N., Boiko V.M., Kolin N.G., Kosobutsky A.V., Korulin A.V., Brudnyi P.A., Ermakov V.S. // *Semiconductor Sci. Technol.* 2018. V. 33. № 9. P. 095011. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aad53b>
12. Johnston A.N. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2003. V. 50. № 3. P. 689. <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.812926>
13. Рыжиков В.И. Контроль радиационной стойкости мощных светодиодов на основе широкозонных полупроводников: Дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13. М.: МИРЭА, 2004. 100 с.
14. Сошников И.П., Лундин В.В., Усиков А.С., Калмыкова И.П., Леденцов Н.Н., Rosenauer A., Neubauer B., Gerthsen D. // *Физика и техника полупроводников.* 2000. Т. 34. Вып. 6. С. 647.
15. Gerthsen D., Hahn E., Neubauer B., Potin V., Rosenauer A., Schowalter M. // *Phys. Stat. Sol. C.* 2003. V. 0. № 6. P. 1668. <https://doi.org/10.1002/pssc.200303129>
16. Кудряшов В.Е., Мамакин С.С., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И. // *Физика и техника полупроводников.* 2001. Т. 35. Вып. 7. С. 861.
17. Еришов Е.В., Иванов А.Ф., Найдин А.А., Рогачков О.А., Пермяков В.О., Фомина Е.В. // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2013. Т. 4. № 1. P. 17. <https://doi.org/10.1134/S207956291301003X>
18. Пацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Сеницын М.А., Черкашин Н.А., Карпов С.Ю. // *Физика и техника полупроводников.* 2015. Т. 49. Вып. 11. С. 1563. <https://doi.org/10.1134/S1063782615110238>
19. Бочкарева Н.И., Шретер Ю.Г. // *Физика и техника полупроводников.* 2018. Т. 52. Вып. 7. С. 796. <https://doi.org/10.21883/FTR.2018.07.46055.8790>
20. Зиновьев Р.А. Исследование дефектов в GaN светодиодах: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10. М.: МИСиС, 2020. 147 с.

Neutron Irradiation Effect on the Spectral Characteristics of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ LEDs

O. V. Tkachev¹, S. M. Dubrovskikh¹*, K. D. Koksharova¹, A. V. Fedorets¹

¹Russian Federal Nuclear Center – VNIITF (Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk region, 456770 Russia

*e-mail: dep5@vniitf.ru

The results of studying the neutron irradiation effect on the spectral characteristics of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ LEDs are presented. The mechanism responsible for the shift of the emission spectra maximum of LEDs under the neutron influence has been determined. The coherence is shown between the radiation sensitivity of the spectral characteristics of the sample active layers and the composition of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ solid solution. An analytical calculation has been carried out to estimate the possible maximum shift of the luminescence spectrum of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ LEDs after neutron exposure.

Keywords: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ LED, luminescence spectrum, peak wavelength, quantum well, indium fluctuation, band gap, neutron fluence.