

УДК 621.382; 535.015

**ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННЫХ
БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР****канд. физ.-мат. наук, доц. Ю.А. БУМАЙ, канд. физ.-мат. наук, доц. Д.С. БОБУЧЕНКО,
О.С. ВАСЬКОВ****(Белорусский национальный технический университет, Минск);****канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ****(Полоцкий государственный университет);****канд. физ.-мат. наук, С.Б. ЛАСТОВСКИЙ****(ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск);****канд. техн. наук Ю.В. ТРОФИМОВ, В.И. ЦВИРКО****(РНПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси», Минск)**

Исследовано влияние облучения быстрыми электронами (4 МэВ) на электрические и оптические свойства светоизлучающих диодов (СИД) на основе нитридов и фосфидов. Установлены закономерности изменения при облучении в вольтамперных характеристиках, спектрах электролюминесценции и тепловых свойствах СИД. Обнаружено изменение в спектрах электролюминесценции ультрафиолетовых и синих СИД, связанное возбуждением в люминесценции в поврежденных облучением полимерных линзах СИД в области ~2 эВ. Обнаружено восстановление в процессе работы оптической мощности облученных СИД на основе нитридов, подчиняющееся кинетике мономолекулярной реакции первого порядка.

Введение. Современные светоизлучающие диоды (СИД) на основе гетероструктур широко используются в различных осветительных системах и системах индикации. Облучение заряженными частицами высоких энергий, создающих дефекты в полупроводниковых слоях и элементах структуры СИД, позволяет получить информацию о характере изменений параметров СИД при работе в условиях повышенной радиации [1–3].

Цель настоящей работы – изучение изменений оптических и электрических свойств СИД, облученных быстрыми электронами, обладающими высокой проникающей способностью. Облучение – один из методов достижения быстрой деградации СИД наряду с ускоренными тепловыми испытаниями, позволяющими оценить срок службы СИД, и др.

Методика эксперимента. Облучение быстрыми электронами (4 МэВ, плотность потока электронов $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, флюенсами до $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) СИД Helio (1 Вт) различного свечения (синих, зеленых, красных) и ультрафиолетовых, а также маломощных СИД Nichia (90 мВ) синего свечения проведено на ускорителе ЭЛУ-4. Энергия быстрых электронов оказалась достаточной для глубокого проникновения в СИД, т.е. для создания радиационных дефектов как в линзе СИД, так и в кристалле [4]. Вольтамперные характеристики (ВАХ) и спектры электролюминесценции СИД измерялись в режиме стабилизации тока СИД:

- ВАХ – с помощью программируемого источника питания Agilent-E3640A;
- спектры электролюминесценции – радиометрического комплекса для определения светотехнических характеристик светодиодов, светодиодных модулей и дисплеев производства Instrument Systems.

Методом переходных электрических процессов исследованы изменения тепловых свойств СИД, облученных быстрыми электронами.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Зависимость энергетической эффективности исследуемых СИД Helio от флюенса приведена в таблице 1, из которой видно, что деградация оптических свойств СИД на основе нитридов (ультрафиолетовых, синих, зеленых) при облучении происходит значительно слабее, чем красных (на основе фосфидов). Энергетическая эффективность заметно уменьшилась, особенно для красных светодиодов, которые после набранной дозы $4,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ практически полностью деградировали. При этом существует различие в характере изменении спектров данных групп СИД. Необходимо отметить, что после облучения произошло визуально наблюдаемое помутнение линз, они приобрели желтый оттенок. В целом радиационная стойкость зеленых, синих и ультрафиолетовых светодиодов, изготовленных на основе соединений InGaN, оказалась примерно одинаковой и значительно более высокой, чем у красных светодиодов на основе AlInGaP [1].

Спектры электролюминесценции синих и, для сравнения, красных СИД приведены на рисунках 1, а, б. Как показало исследование нормированных зависимостей спектрального потока излучения,

форма спектра от дозы облучения меняется незначительно, но спектры смещаются в низкоэнергетическую область. Это смещение для синих светодиодов составляет 8–17 мэВ, для зеленых – 42–47 мэВ, для ультрафиолетовых – 13–23 мэВ, для красных – 15–17 мэВ (при дозе облучения $4,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$). Сдвиг максимума спектров обусловлен, по-видимому, уменьшением уровня возбуждения СИД и/или уменьшением эффективной ширины запрещенной зоны вследствие повышения температуры активной области облученных СИД из-за уменьшения их энергетической эффективности.

Таблица 1 – Энергетическая эффективность СИД

СИД	Энергетическая эффективность, %		
	Исходный	Доза облучения $D, 10^{16} \text{ см}^{-2}$	
		4,7	12
Ультрафиолетовый	23	6	2
Синий	32	18	3
Зеленый	16	8	2
Красный	14	1	0

По низкоэнергетическому фронту спектров электролюминесценции $I(h\nu) \sim \exp(h\nu/E_g)$ определены энергии Урбаха E_g , а по высокоэнергетическому фронту $I(h\nu) \sim \exp(-h\nu/kT)$ проведена оценка температуры электронной подсистемы T [5]. На рисунках 1, а, б приведены данные E_g, T для синих и красных светодиодов InGaN при различных флюенсах облучения и величине тока СИД 350 мА.

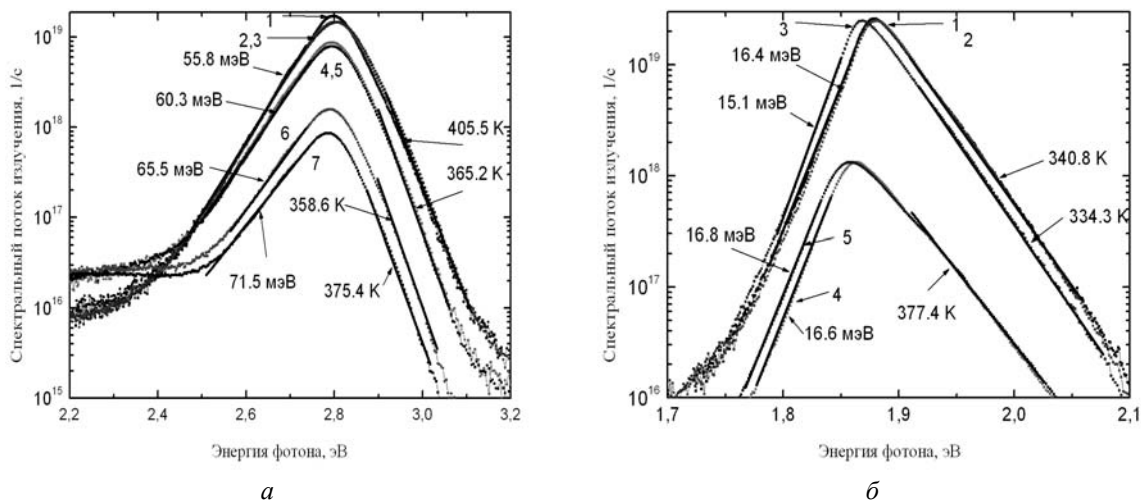


Рисунок 1– Зависимость потока излучения от энергии фотона (ток 350 мА):
 а – для синего СИД при флюенсах, см^{-2} : 1 – 0; 2, 3 – $5 \cdot 10^{15}$; 4 – $4,7 \cdot 10^{16}$; 5 – $4,6 \cdot 10^{16}$; 6, 7 – $1,2 \cdot 10^{17}$;
 б – для красного СИД при флюенсах, см^{-2} : 1 – 0; 2, 3 – $5 \cdot 10^{15}$; 4 – $4,7 \cdot 10^{16}$; 5 – $4,6 \cdot 10^{16}$

Как видно из рисунков 1, а, б, с увеличением флюенса облучения энергии Урбаха E_g у светодиодов на основе нитридов увеличиваются, а у светодиодов на основе фосфидов остаются постоянными. Энергию Урбаха связывают с локальными состояниями на гетерограницах (флуктуациями состава соединений, примесей, дефектов), поэтому можно предположить, что увеличение E_g объясняется увеличением дефектов на границах раздела. Этот фактор существенен для светодиодов на основе соединений InGaN , для которых хвосты плотности состояний и большие энергии Урбаха в большей степени обусловлены флуктуациями концентрации In .

С увеличением флюенса быстрых электронов температура электронной подсистемы T у светодиодов на основе нитридов уменьшается, что можно объяснить снижением числа рекомбинирующих излучательно электронов и, следовательно, понижением уровня возбуждения электролюминесценции. У красных СИД температура электронной подсистемы T увеличивается с флюенсом, так как светодиоды деградируют при облучении в большей степени, более сильное снижение их энергетической эффектив-

ности приводит к более сильному нагреву кристалла, что сказывается и на температуре электронной подсистемы. Кроме того, при наибольшем флюенсе облучения у всех светодиодов на основе GaN увеличилась спектральная плотность излучения в области ~ 2 эВ, которую обычно связывают с дефектами структуры в слоях СИД [6].

Необходимо отметить, что при длительной работе СИД, помимо оптической и электрической деградации их кристаллов из-за роста количества дефектов структуры, происходит также деградация полимерных линз СИД, формирующих определенную диаграмму направленности излучения. В данных исследованиях деградация полимерных линз происходит при облучении. В связи с этим необходимо рассмотреть влияние деградации полимерных линз СИД, вызванной облучением быстрыми электронами, на спектры электролюминесценции.

Спектры электролюминесценции при разных токах ультрафиолетового СИД, облученного быстрыми электронами, показаны на рисунке 2, а. На спектрах СИД с линзой наблюдаются две полосы. Одна из них с максимумом в интервале 3,08–3,09 эВ принадлежит основному излучению СИД, вторая (широкая) с максимумом в интервале $\sim 2,0$ – $2,1$ эВ связана с радиационными дефектами. После удаления линзы интенсивность основной полосы возрастает приблизительно в ~ 170 – 190 раз (в исследованном диапазоне токов). Это значит, что ультрафиолетовое излучение эффективно поглощается материалом линзы облученного СИД. Интенсивность второй полосы после удаления линзы, наоборот, уменьшается в несколько раз. В этом случае широкая полоса полностью обусловлена радиационными дефектами в кристалле СИД и представляет собой, вероятно, «желтую дефектную полосу», наблюдаемую в этом спектральном диапазоне в несовершенных кристаллах СИД на базе нитридов [6]. В связи с этим наиболее вероятной причиной увеличения интенсивности широкой полосы в облученных СИД при наличии линзы является фотолюминесценция радиационных дефектов материала линзы, возбуждаемая ультрафиолетовым излучением кристалла. При этом она наблюдается приблизительно в том же диапазоне спектра, что и «желтая дефектная полоса» в кристалле СИД. Необходимо отметить, что из-за наличия данной полосы, связанной с дефектами как в кристалле, так и линзе, свечение ультрафиолетового СИД становится подобным свечению белого, т.е. сильно изменяются цветовые координаты излучения.

Спектры электролюминесценции при разных токах зеленого СИД, облученного быстрыми электронами, показаны на рисунке 2, б. В отличие от ультрафиолетовых СИД в спектрах зеленых наблюдается одна полоса с максимумом в интервале 2,32–2,37 эВ (в зависимости от уровня возбуждения, определяемого током), принадлежащая основному излучению. Удаление линзы приводит лишь к небольшому ($\sim 1,5$ – 2 раза) возрастанию потока излучения в максимуме. Это значит, что повреждение линзы не сказывается существенным образом на эффективности излучения зеленого СИД. По-видимому излучение зеленого СИД не возбуждает люминесценцию радиационных дефектов материала линзы (имеющую максимум вблизи $\sim 2,0$ – $2,1$ эВ) ввиду близости к энергии основной полосы. Необходимо отметить, что «дефектная желтая полоса» кристалла лежит также в диапазоне излучения данного СИД и ее вклад мало заметен, в отличие, например, от ультрафиолетового или синего СИД.

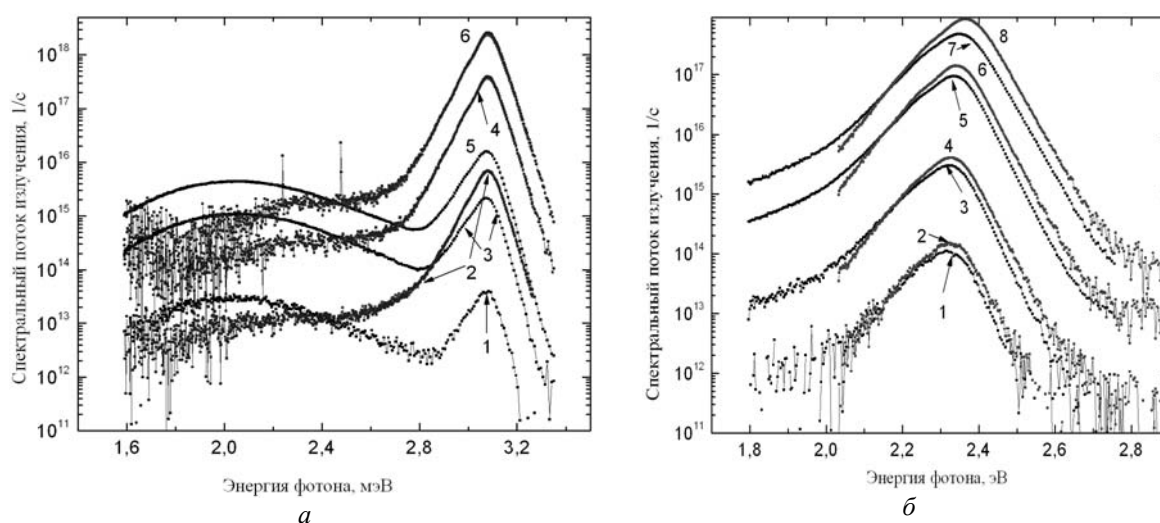


Рисунок 2 – Спектр электролюминесценции СИД, облученного флюенсом быстрых электронов $D = 1,2 \cdot 10^{17}$ см⁻²:
 а – ультрафиолетового: 1, 3, 5 – с линзой; 2, 4, 6 – без линзы; ток: 1, 2 – 10 мА; 3, 4 – 100 мА; 5, 6 – 350 мА;
 б – зеленого: 1, 3, 5, 7 – с линзой; 2, 4, 6, 8 – без линзы; ток: 1, 2 – 1 мА; 3, 4 – 10 мА; 5, 6 – 100 мА

Установлено, что деградация линз может приводить к отказу СИД вследствие образования проводящего канала по краю линзы и отражателя, приводящего к короткому замыканию электродов, т.е. шунтированию кристалла. На термограммах таких СИД между электродами отчетливо наблюдался разогрев проводящего канала по краю линзы. Вольтамперная характеристика СИД после отказа становится линейной с сопротивлением ~1–2 Ом. Отметим, что аналогичные отказы появлялись и при ускоренных тепловых испытаниях (температурах СИД порядка 130°C и токах 330 мА после 110 ч работы). Это свидетельствует о том, что облучение и сильный нагрев СИД во время работы приводят к примерно одинаковым последствиям – генерации дефектов, вызывающих деградацию электрических и оптических параметров СИД.

Вольтамперные характеристики исследованных синих и красных СИД HeIio приведены на рисунках 3, а, б. Анализ и подгонка ВАХ СИД на основе гетероструктур проведены на основе приближенного уравнения [7]:

$$U = \frac{mkT}{e} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + IR_s + CI^{0.5} + \phi_k \tag{1}$$

и его первых производных – dU/dI и $dU/d\ln I$ [8]:

$$\frac{dU}{dI} = \frac{mkT}{e} \frac{1}{I} + R_s + \frac{C}{2} I^{-0.5}, \tag{2}$$

$$\frac{dU}{d \ln I} = I \frac{dU}{dI} = \frac{mkT}{e} + IR_s + \frac{C}{2} I^{0.5}. \tag{3}$$

где m – фактор неидеальности диода, T – температура, I_0 – независящая от температуры доля тока насыщения, R_s – последовательное сопротивление, $CI^{0.5}$ – слагаемое, учитывающее двойную инжекцию и описывающее степенной участок ВАХ, ϕ_k – контактная разность потенциалов.

Необходимо отметить, что подгонка ВАХ только в рамках формулы (1) чаще всего является неоднозначной, ввиду наличия большого числа подгоночных параметров, поэтому определение параметров ВАХ СИД осуществлено на основе построения зависимостей напряжения U и производных по току dU/dI и $dU/d\ln I$ от I , $I^{1/2}$, I^1 , $I^{1/2}$, и анализа линейных участков полученных зависимостей. Из рисунка 3, а видно, что облучение приводит к снижению прямого напряжения смещения на СИД на основе нитридов, при этом сдвиг напряжения для синего и ультрафиолетового СИД достигал ~50 мВ, для зеленого ~75 мВ. Вероятно, это связано с повышением тока насыщения данных СИД в связи с увеличением при облучении количества ловушек в области пространственного заряда. Это подтверждается также увеличением малых прямых токов (в ~2 раза для синих и зеленых СИД и в ~1,5 раза для ультрафиолетового СИД) на участке ВАХ 1 мкА – 1 мА. Результаты анализа ВАХ СИД с использованием формул (1)–(3) приведены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что в ВАХ СИД на базе нитридов наблюдается небольшое ослабление инжекционной составляющей на максимальном флюенсе (увеличение коэффициента C), при этом фактор неидеальности экспоненциальной части ВАХ, контактная разность потенциалов СИД и последовательное сопротивление изменяются слабо.

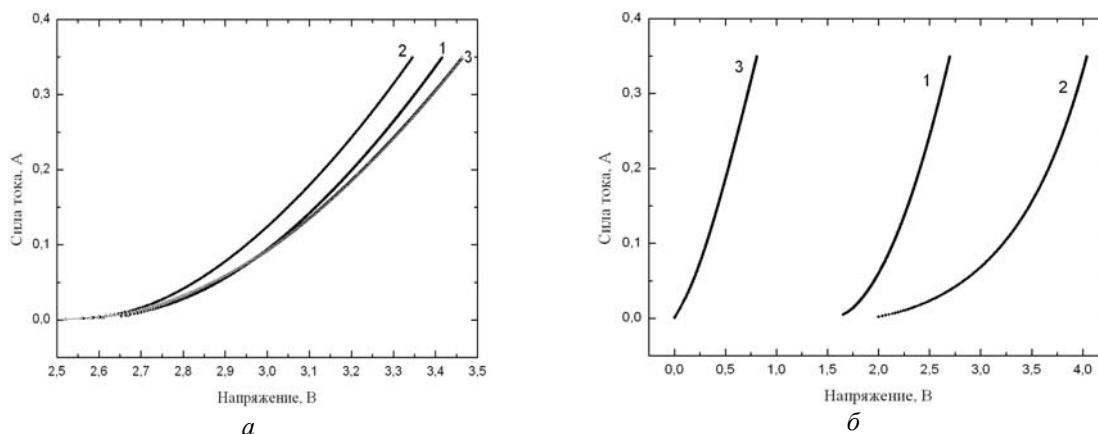


Рисунок 3 – Вольт амперная характеристика СИД при флюенсах быстрых электронов: а – синего; б – красного; 1 – исходный; 2 – $D = 4,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 – $D = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Изменения ВАХ красных СИД на основе фосфидов при облучении имеют противоположную тенденцию (рис. 3, б). Наблюдается сильное изменение ВАХ красного СИД, сильно увеличиваются контактная разность потенциалов, последовательное сопротивление и существенно уменьшается степенной участок ВАХ, соответствующий двойной инжекции. При этом на последнем флюэнсе ВАХ красного СИД имеет практически линейный наклон, соответствующий сопротивлению $R = \sim 1,5$ Ом. Сдвиг ВАХ в сторону высоких напряжений смещения при облучении красных диодов можно объяснить образованием на гетерограницах кристаллов СИД интерфейсных состояний с высокой поверхностной плотностью, вызывающих сильное повышение барьеров для носителей заряда.

Таблица 2 – Результаты анализа ВАХ

СИД	Исходный	Доза облучения, $D = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$
Ультрафиолетовый	$m = 2,7$ $C = 1,30 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 2,78 \text{ В}$ $R_s = 0,42 \text{ Ом}$	$m = 2,7$ $C = 1,34 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 2,74 \text{ В}$ $R_s = 0,35 \text{ Ом}$
Синий	$m = 2,0$ $C = 1,45 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 2,56 \text{ В}$ $R_s = 0,14 \text{ Ом}$	$m = 2,1$ $C = 1,62 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 2,51 \text{ В}$ $R_s = 0,14 \text{ Ом}$
Зеленый	$m = 1,6$ $C = 2,13 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 1,90 \text{ В}$ $R_s = 0,91 \text{ Ом}$	$m = 1,7$ $C = 2,31 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 1,80 \text{ В}$ $R_s = 0,93 \text{ Ом}$
Красный	$m = 2,5$ $C = 2,01 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 1,51 \text{ В}$ $R_s = 0,06 \text{ Ом}$	– $C = 2,64 \text{ В/А}^{0,5}$ $\Phi_k = 2,49 \text{ В}$ $R_s = 0,36 \text{ Ом}$ (для дозы облучения $D = 4,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$)

С использованием метода переходных электрических процессов [9, 10] проведено исследование тепловых свойств (тепловых сопротивлений, сечений теплового потока) зеленых СИД Helio, облученных быстрыми электронами. Основные тепловые параметры образцов и режимы их измерения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры СИД и режимы их измерения

СИД	Доза облучения $D, \text{ см}^{-2}$		
	0	$4,7 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{17}$
Сечение теплового потока (измерение при нагреве) $S_a, \text{ мм}^2$	0,62	0,49	0,51
Сечение теплового потока (измерение при остывании) $S_b, \text{ мм}^2$	0,98	0,85	0,83
Температурный коэффициент напряжения, мВ/К	5,64	3,95	4,54
Напряжение на СИД, В	3,7	3,84	4,06
Сила тока СИД, А	0,750	0,744	0,729
Энергетическая эффективность СИД, %	30	6	1,9
Температура перегрева активной области СИД, °С	26,1	32,1	37,6
Тепловое сопротивление СИД (включая слой посадки), К/Вт	9,72	11,46	11,86

Из таблицы 3 видно, что, несмотря на сильное уменьшение оптической мощности СИД, тепловые сопротивления компонентов СИД на основе нитридов лишь немного увеличились после облучения. В облученных образцах происходит сужение теплового потока при переходе через слой посадки кристалла на теплоотводящее основание и заметное изменение температурного коэффициента напряжения. Сужение теплового потока, вероятно, связано с уменьшением (в результате облучения) теплопроводности областей отражателя и теплоотводящего основания, незакрытых кристаллом СИД, что ухудшило условия растекания тепла.

С использованием облучения быстрыми электронами проведена деградация маломощных СИД Nichia синего свечения. С увеличением флюенса быстрых электронов свыше $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдались достаточно сильные изменения в ВАХ (рис. 4) и видимое почернение линзы СИД (эпоксидная смола), сильно уменьшающее его оптическую мощность. Необходимо отметить, что существенной разницы в изменениях электрических и оптических параметров СИД от его положения при облучении (фронтальное или боковое) не наблюдалось. Флюенс, при котором наблюдался отказ СИД, составил $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, при этом его ВАХ становилась линейной, сопротивление составило $\sim 10 \text{ кОм}$.

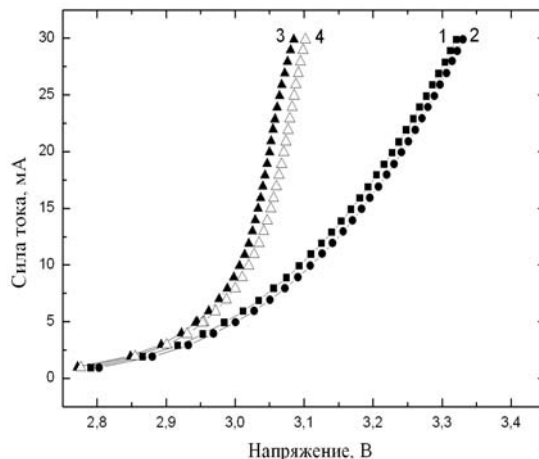


Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика синего СИД Nichia после облучения быстрыми электронами: 1 – исходный; 2 – облученный флюенсом $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 4 – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (повторное измерение через 10 мин)

После облучения СИД Nichia с увеличением флюенса первоначально наблюдается смещение ВАХ в сторону больших напряжений смещения (см. рис. 4), затем после определенного флюенса (в области $\sim (3-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) для разных СИД одной партии происходит резкое смещение ВАХ в сторону низких напряжений. Вероятно, на первом этапе облучения происходит компенсация областей СИД радиационными дефектами, что приводит к увеличению последовательного сопротивления СИД. Второй этап, вероятно, обусловлен пробойными явлениями. На рисунке 4 видно, что ВАХ после больших флюенсов является нестабильной и для некоторых СИД может при больших токах проявлять отрицательное дифференциальное сопротивление, которое обусловлено разогревом СИД в области каналов пробоя.

Обнаружена особенность в спектрах электролюминесценции СИД и динамике их изменения после облучения небольшим флюенсом $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. На рисунке 5 видно существенное уменьшение спектрального потока излучения сразу же после облучения (мощность излучения уменьшилась в 2,6 раза), ВАХ СИД при этом практически не изменилась.

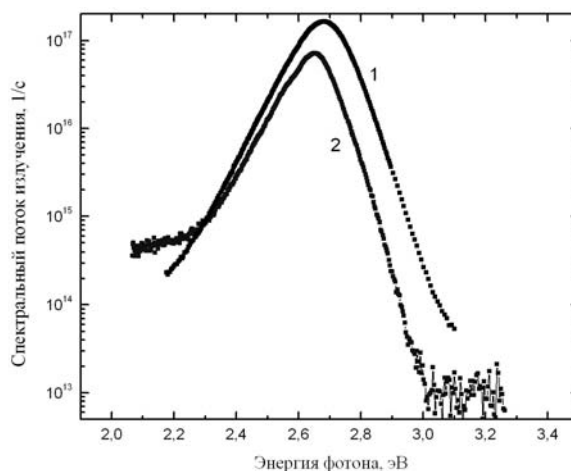


Рисунок 5 – Зависимость спектрального потока излучения от энергии фотона СИД Nichia до и после облучения быстрыми электронами: 1 – до облучения быстрыми электронами; 2 – после облучения быстрыми электронами флюенсом $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Установлено (рис. 6 и 7), что в процессе работы облученного СИД оптическая мощность СИД постепенно возрастает и выходит на стабильные значения спустя 3–4 ч (возрастание достигает 50%).

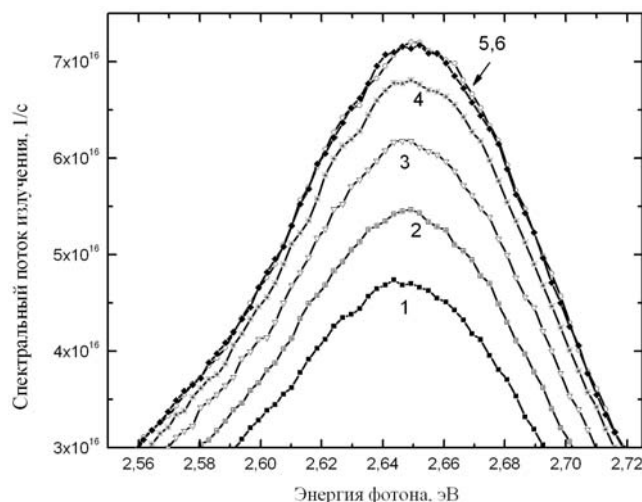


Рисунок 6 – Зависимость спектрального потока излучения облученного образца СИД Nichia (сила ток 20 мА) от энергии фотона для различных времен наработки. Время наработки в минутах: 1 – 0; 2 – 16,8; 3 – 54,1; 4 – 117,4; 5 – 166,5; 6 – 172,2

Форма спектра при этом практически не изменяется, однако длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения, со временем работы СИД уменьшается (рис. 8).

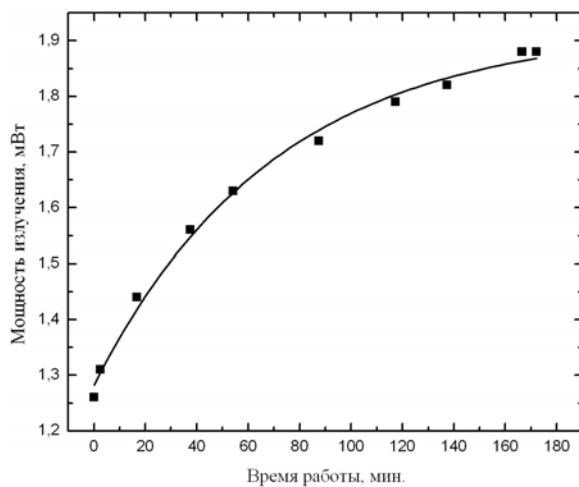


Рисунок 7 – Зависимость мощности излучения облученного СИД Nichia от времени работы

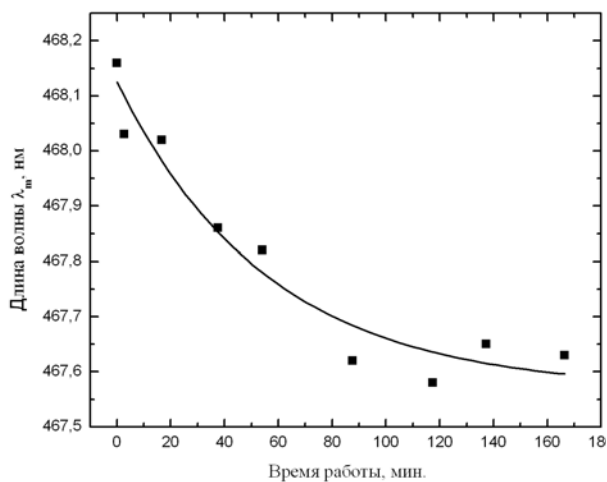


Рисунок 8 – Зависимость длины волны, соответствующей максимальному значению спектральной плотности потока излучения облученного СИД Nichia, от времени работы

Примечание. Сплошная линия (рис. 7 и 8) представляет результат подгонки в рамках мономолекулярной реакции.

Эту особенность можно объяснить повышением уровня возбуждения СИД, что, в свою очередь, связано с отжигом во время работы радиационных дефектов, вносимых облучением. Кинетика восстановления как оптической мощности СИД, так и длины волны, соответствующая максимуму спектральной плотности излучения, имеет экспоненциальный вид, характерный для мономолекулярной реакции первого порядка с постоянной времени $\tau = 70$ мин. Такое поведение связано, вероятнее всего, с инъекционно стимулированным и/или светоиндуцированным отжигом введенных электронным облучением дефектов структуры СИД.

Заключение. Исследовано влияние облучения быстрыми электронами (4 МэВ, флюенсами до $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) на электрические и оптические свойства мощных синих, зеленых, красных и ультрафиоле-

товых СИД Helio (1 Вт), а также маломощных СИД Nichia (90 мВ) на основе соединений InGaN и AlInGaP. Установлены закономерности изменений при облучении в ВАХ и спектров электролюминесценции СИД. Обнаружено изменение в спектрах электролюминесценции ультрафиолетовых и синих СИД, связанное возбуждением в люминесценции в поврежденных облучением полимерных линзах СИД. Обнаружено восстановление в процессе работы оптической мощности облученных СИД на основе нитридов с кинетикой, характерной для мономолекулярной реакции первого порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриндин, Н.В. Исследование воздействия быстрых нейтронов и электронов на светодиоды с белым и синим цветом свечения / Н.В. Гриндин., И.В. Рыжиков, В.С. Виноградов // Известия вузов. Электроника. – 2009. – Т. 76, № 1. – С. 27–32.
2. Hwang, Y. Effect of electron irradiation on AlGaIn/GaN and InAlN/GaN heterojunctions / Ya-Shi Hwang [et al.] // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2013. – Vol. 31. – P. 022206/1-1022206/6.
3. Градобоев, А.В. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaIn/GaN при облучении гамма-квантами / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, И.М. Скакова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – № 1. – С. 190–194.
4. Павленко, В.И. Воздействие высокоэнергетических пучков быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты / В.И. Павленко [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (95). – 2010. – № 1. – С. 129–134.
5. Шуберт, Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича – М. : Физматлит. 2008. – 496 с.
6. Юнович, А.Э. Дивакансия азота возможная причина желтой полосы в спектрах люминесценции нитрида галлия / А.Э. Юнович // ФТП. – 1998. – Т. 32, Вып. 10. – С. 1181–1183.
7. Мамакин, С.С. Электрические свойства и спектры люминесценции светодиодов на основе гетеропереходов InGaIn/GaN с модулированно-легированными квантовыми ямами / А.Э. Юнович, А.Б. Ваттана, Ф.И. Маняхин // ФТП. – 2003. – Т. 37, Вып. 9. – С. 1131–1137.
8. Бумай Ю.А. Температурные изменения импульсных вольт-амперных характеристик GaN светодиодов / Ю.А. Бумай [и др.] // Сборник материалов 2-ой междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, ПСФ «Приборостроение – 2009», Минск, 11-13 нояб. 2009 г. – Минск : БНТУ, 2009. – С. 262–263.
9. Bumai, Y.A. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes / Y.A. Bumai, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko // Metrology and Measurement Systems. – 2010. – Vol. 17, № 1. – P. 39–46.
10. Zakgeim, A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim [et al.] // EuroSimE 2013 : 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – 2013. – № 1. – P. 1/7–7/7.

OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF GETEROSTRUCTURE BASED LIGHT EMMITING DIDODES AFTER FAST ELECTRON IRRADIATION

**Y. BUMAI, D. BOBUCHENKO, A. VASKOW, S. VABISHCHEVICH,
S. LASTOVSKII, U. TROPHIMOV, V. ZVIRKO**

An influence of fast electron irradiation (4 MeV) on the electrical and optical properties of light emitting diodes (LEDs) on the basis of nitride and phosphide heterostructures have been studied. The features of volt-ampere characteristics, electroluminescence spectra and thermal characteristics of LEDs after irradiation have been established. The wide band at ~ 2 eV in electroluminescence spectra of ultraviolet and blue LED related to polymer lens damage has been found. The recovery of optical power during LED operating following to monomolecular first order reaction has been observed.