
ОПТИЧНА І КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА В КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 621.315.592.2

В.И. ОСИНСКИЙ¹, П.В. ДЕМИНСКИЙ^{1,4}, Н.Н. ЛЯХОВА¹, А.П. МОТОРНЫЙ², И.В. МАСОЛ³,
Н.О. СУХОВИЙ⁴

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

SI/A^{III}B^V RGB ИСТОЧНИКОВ СВЕТА.

¹Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт микроприборов»
НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины,
ул. Северо-Сырецкая, 3, г. Киев, 04136,
тел./факс +38(044)434-72-77, E-mail: osinsky@imd.org.ua

²Винницкий национальный технический университет
ул. Хмельницкое шоссе 95, г. Винница, E-mail: flashmp@rambler.ru

³Компания «Росток»
бул. Лепсе, 4, Киев, 0306, E-mail: rostok@ak-rostok.kiev.ua

⁴Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
ул. пр. Победы 37, г. Киев, 03056, E-mail: p.deminskiy@gmail.com

Аннотация. На основании исследований среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллической решетки твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, обоснована необходимость использования последних для реализации монокристаллических $\text{Si}/\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ RGB источников света в одном технологическом процессе. На базе разработанных гибридно-интегральных RGB, RGBW, RGBO источников света, экспериментально подтверждена целесообразность использования каналов излучения в диапазонах 450-455, 525-535, 600-615 нм для повышения индекса цветопередачи. Предложена методика и разработано программное обеспечение, позволяющее задавать процентное соотношение распределения активных слоев для R, G, B-каналов излучения по поверхности чипа.

Ключевые слова: RGB, источник белого света, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, индекс цветопередачи, Si, $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

ВСТУПЛЕНИЕ

Технический и научный поиски в области монокристаллической интеграции светоизлучающих гетероструктур привел к разработке основ для создания RGB-светодиодов с использованием буферных и темплетных нанослоев со специфическими свойствами, реализация которых оказалась возможной в результате управления механизмами роста III-нитридов и III-оксидов. Поставленные задачи привели к разработке нескольких технологий создания монокристаллических RGB источников белого света на одном кристалле [1].

Для создания полноцветовой гаммы светодиодов существенной является разработка технологии выращивания гетероструктур с минимальным количеством дефектов на границах [2]. Важной особенностью при росте эпитаксиальных пленок является то, что в сверхтонких слоях несоответствие параметров решеток в определенных случаях влечет лишь упругую деформацию растяжения или сжатия на гетерограницах. При этом чисто упругая деформация не сопровождается образованием дислокаций и дефектов – центров безизлучательной рекомбинации.

Поставленная задача для реализации RGB источников света на одном кристалле заключается в получении эпитаксиальных структур высокого качества с хорошим согласованием кристаллических решеток разнородных материалов. Решение поставленной задачи связано с необходимостью снижения плотности дефектов в светоизлучающих кристаллах на границах материалов, что приводит к низкому тепловому разогреву кристаллической структуры и, как результат - росту эффективности излучения.

Базовым процессом получения светодиодных структур для систем освещения является газофазная эпитаксия III-нитридов из металлоорганических соединений алюминия, галлия, индия и аммиака. Гетероструктуры инжекторов электронов и дырок формируются молекулярно-лучевой (МЛЭ) или МОС-гидридной эпитаксией. Излучающий слой формируется лазерным или ионно-плазменным воздействием на процесс роста, последующего отжига и формирования p-n перехода который пересекает всю толщину активной области таким образом, что переход формируется планарной или другой формы.

Современные методы планарной технологии микро- и наноструктур позволяют создавать большое количество плоских p-n переходов с различной топологией в одном чипе, что обеспечивает оптимизацию протекания электрического тока и выходного излучения из светодиодной структуры. Смешивание белого света в кристалле светодиода может быть реализовано включением нескольких активных слоев с разными энергиями запрещенных зон для создания смешанного света широкого спектра излучения.

ВЫБОР ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ R, G, B АКТИВНЫХ СЛОЕВ

За последние несколько лет исследований в области твердых растворов, в том числе свойств системы материалов Ga-Al-In-N для светодиодного применения, большое внимание уделялось исследованию возможностей получения излучающих диодов на основе гетероструктур InGaN/GaN [3]. Это вызвано, в значительной мере, наличием уникальных физических свойств нитрида галлия и гетеропары InGaN/GaN, из которых на сегодняшний день изготавливают активную область светодиодных чипов синего и зеленого диапазонов излучения. Ширина запрещенной зоны InGaN может варьироваться в пределах от 0,7 до 3,4 эВ, расширяя возможности для их применения [4].

Исследования спектров электролюминесценции СД на основе GaN (рис. 1) на монохроматоре МДР-23 при изменении температуры от -40 до +60 °С с использованием климатической камеры теплехолода *Mini Subzero* MC71 показали расширение длинноволнового крыла спектра 5 нм/100К и смещение пика длины волны 3-10 нм/100К, что вызвано рекомбинацией через примесные уровни внутри запрещенной зоны.

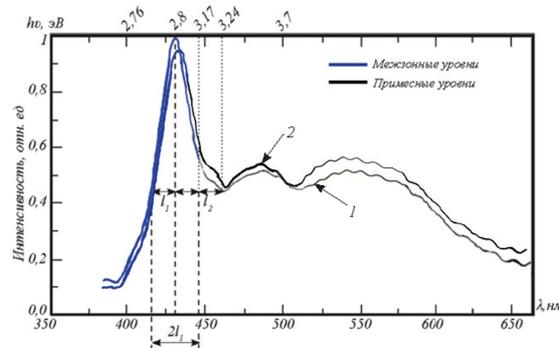


Рис. 1. Спектры электролюминесценции СД на основе GaN. 2I1 – гармоническая часть спектра, I2 – ангармоническая часть спектра. 1- 273 К, 2 – 333К

Увеличение температуры активной области привело к увеличению интенсивности спектров примесных уровней. При этом интенсивность спектра, которая отвечает за межзонные переходы уменьшается на 0,05 отн. ед/100 К, что вызвано смещением атомов кристаллической решетки.

Для определения влияния динамики кристаллической решетки при различных температурах, впервые были проведены расчеты среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллических решеток соединения GaN и твердого раствора InGaN.

Для определения закономерностей температурного влияния на динамику кристаллической решетки использовано выражение для определения среднеквадратических динамических смещений атомов:

$$\sqrt{U_{дин}^2} = \frac{3h^2T}{4\pi^2 km\Theta^2} \left[\Phi\left(\frac{\Theta}{T}\right) + \frac{\Theta}{4T} \right],$$

где $\Phi\left(\frac{\Theta}{T}\right)$ – функция Дебая (определяется для каждого значения $x = \frac{\Theta}{T}$), m – усредненная эффективная масса ионов.

В результате проведенных расчетов показано (рис. 2), что динамика кристаллической решетки GaN вдвое стабильнее по сравнению с InP при аналогичных температурах, что подтверждено так же проведенными экспериментальными исследованиями интенсивности излучения при изменении температуры в диапазоне -40°C $+60^{\circ}\text{C}$, которые показали вдвое большее падение интенсивности излучения СД на основе InP в сравнении с GaN.

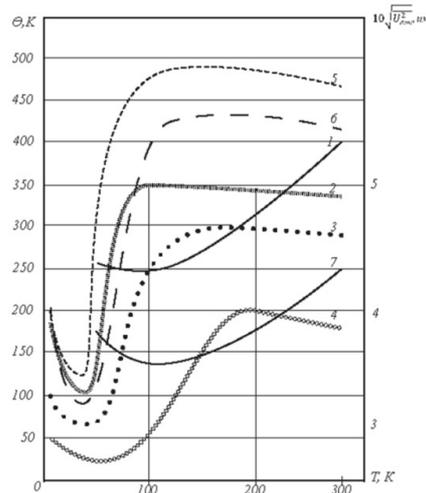


Рис. 2. Зависимости дебаевской температуры (2 – GaAs; 3 – GaN; 4 – InGaN; 5 – AlGaInP; InP - 6) в системе AlGaInNPAs и среднеквадратическими динамическими смещениями атомов ($U_{дин}^2$) для AlGaInP (1) и GaN (7)

При повышении температуры интенсивность излучательной рекомбинации уменьшается по экспоненциальному закону, что соответствует увеличению среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллической решетки. Между относительным квантовым выходом излучательной рекомбинации и среднеквадратическими динамическими смещениями существует зависимость:

$$\ln \frac{1}{\Phi} = A + R \sqrt{U_{дин}^2(T)}$$

исходя из которой относительный квантовый выход излучения GaN меньше зависит от среднеквадратических динамических смещений чем для твердых растворов AlInGaP (рис. 3)

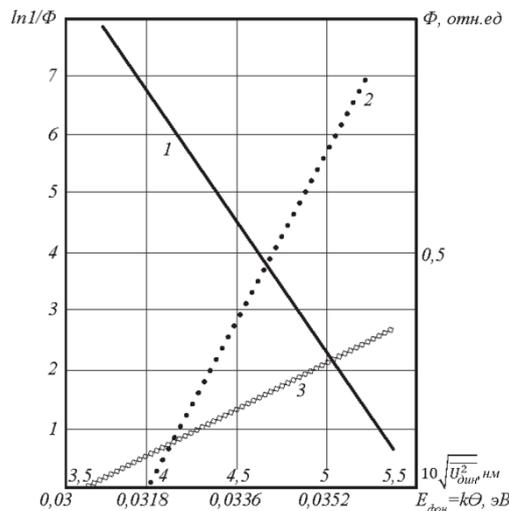


Рис. 3. Зависимость относительного квантового выхода излучательной рекомбинации от энергии фононов фосфида индия (1), среднеквадратичных динамических смещений атомов решетки AlGaInP (2) и GaN (3)

Проведенные исследования обосновывают целесообразность замены зачастую используемых твердых растворов AlInGaP на $In_xGa_{1-x}N$ с содержанием индия ~ 30-40%.

Реализация системы InGaN с тремя каналами излучения из микрокластерных структур позволяет, за счет технологического управления концентрацией индия и, как следствие шириной запрещенной зоны твердого раствора, изготавливать структуры, способные излучать во всем видимом диапазоне длин волн [5,6], что способствует технологической интеграции RGB излучающих структур на одном кристалле. Преимущества в использовании однотипной системы твердых растворов InGaN заключается в уменьшении количества технологических операций, использовании одинаковых реагентов, схожих технологических маршрутов и условий внутри эпитаксиального реактора в процессе изготовления.

Несмотря на это, одной из главных проблем в технологии изготовления RGB источника света на одном кристалле с использованием InGaN в качестве активного слоя для трех каналов остается изготовление светодиодов красного диапазона излучения, а именно, в увеличении содержания индия в слоях InGaN [7] в активной области светодиода, необходимое для сдвига излучения в длинноволновую сторону, что вызвано значительным рассогласованием параметров кристаллической решетки в системе GaN-InN (10.7% для *a* 15.0% для *c* параметров решетки, соответственно) [8].

Большое различие в параметрах решетки приводит к двум важным эффектам. Во-первых, из-за различных длин связей в кристаллической решетке тройного соединения InGaN возникают значительные механические напряжения, что проявляется в фазовом распаде твердого раствора. Во-вторых, даже невысокая концентрация In в слое InGaN достаточно сильно изменяет величину постоянной решетки InGaN (по сравнению с GaN), что в результате приводит к высокой степени напряженности слоя InGaN по отношению к буферному слою GaN.

На основании математического моделирования, проведенного в работе [9] в структурированных нанопорах анодированного оксида алюминия (диаметр пор порядка 60 нм), были получены твердые растворы $In_{0,31}Ga_{0,69}N$, (рис. 4 (4)). Данные структуры были выращены на установке газовой эпитаксии EPIQUIP в нанопорах пленки Al_2O_3 , сформированной на подложке Si с ориентацией (100) с использованием металлоорганических соединений триметилгаллия и –индия в потоке азота в качестве газа носителя, что обосновывает возможность получения бездефектных переходов в системе Si/ Al_2O_3 por/ $In_xGa_{1-x}N$.

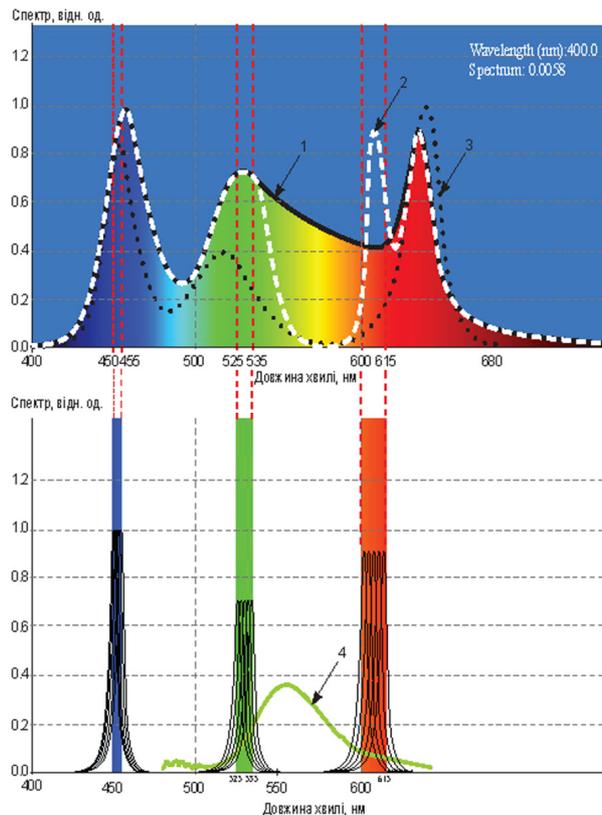


Рис. 4. Спектры RGB источников света и области перекрытия длин волн для достижения значений индекса передачи (90-95). 1, 2, 3 – спектры электролюминесценции RGBW, RGBO и RGB источников света, 4 – спектр фотолюминесценции пленки Si/ Al_2O_3 por/ $In_{0,31}Ga_{0,69}N$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СООТНОШЕНИЯ RGB КАНАЛОВ НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕМ ЧИПЕ

В качестве лабораторных образцов для определения процентного соотношения между RGB каналами излучения использовались СД GaN, InGaN, AlInGaP 1×1 мм, на основании которых, с помощью экспериментальной установки (Люксметр и цилиндрическая труба длиной 1м с черным матовым покрытием внутри) были определены значения освещенности. Исследования проводились отдельно для 5 образцов красного, зеленого и синего диапазонов излучения.

Расчет значения цветовой температуры, на основании экспериментально полученных независимо друг от друга источников красного, зеленого и синего цветов был проведен на основании формулы Мак Адама (6) с максимальной абсолютной погрешностью приблизительно 2 К для определения цветовой температур в диапазоне от 2856 до 6500 К (что согласуется с МКО источниками света D65), по координатам цветности x, y [10].

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823.3n + 5520.33, \quad (6)$$

где $n = (x - 0.3320) / (0.1858 - y)$.

Из уравнений, основанных на преобразовании матрицы, составленной из корреляции для различных источников света, коэффициент n примет вид:

$$n = ((0.23881)R + (0.25499)G + (-0.58291)B) / ((0.11109)R + (-0.85406)G + (0.52289)B).$$

За счет алгоритма расчета цветовой температуры, процентного соотношения R, G, B каналов и экспериментально полученных структур, представляется возможным на основании исследования светоизлучающих характеристик, таких как освещенность, сила света, яркость получать структуры с нужным значением цветовой температуры, а так же индекса цветопередачи.

В результате были установлены средние значения для излучающих гетероструктур AlInGaP, InGaN, GaN, которые составили: R – 20,572 лк, G – 52,164 лк, B – 0,735 лк, что соответствует процентному соотношению 28% : 71% : 1%. Значение цветовой температуры в данном приближении равняется $3224 \pm 2\text{K}$. Для процентного соотношения 15% : 81% : 4% значение цветовой температуры – $3614\text{K} \pm 2\text{K}$.

Определение цветовой температуры, соответствующей рассчитанным процентным соотношениям между RGB- каналами излучения дает возможность определения равномерного распределения каждого R-, G-, B- канала на поверхности чипа заданных размеров. Для реализации такой возможности было реализовано программное обеспечение (рис. 5). В программе вручную задаются: размеры СД чипа; размеры поры (диаметр); расстояние между порами; расстояние между R, G, B-каналами излучения; диаметр подложки; толщина реза между чипами; процентное соотношение красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) каналов; сторона квадрата (СД чипа) на графике (для наглядности).

С ее помощью представляется возможным:

1. Рассчитывать количество светодиодных чипов, которое возможно получить на подложках с размерами, которые задаются в программе с учетом толщины реза между выращенными светодиодными чипами.
2. Рассчитывать приблизительное (погрешность $\pm 10\%$) количество нанопор с учетом технологического маршрута, которым возможно манипулировать диаметром нанопор, расстоянием между ними и разделительным пространством между системой микрокластеров заполненным диэлектрическим слоем.
3. Задавать процентное соотношение распределения активных слоев каждого из 3-х каналов по поверхности чипа.
4. Рассчитывать структуру микрокластеров с учетом расстояния между ними.
5. Задавать толщину маски необходимой или возможной длины и ширины для вскрытия окон под зарращивание определенной площади одним из трех активных слоев при определенных технологических режимах.

Погрешность распределения зависит от качества буферных слоев со структурированными нанопорами и составляет ($\pm 7\%$), что было установлено в результате оценки качества полученных пленок.

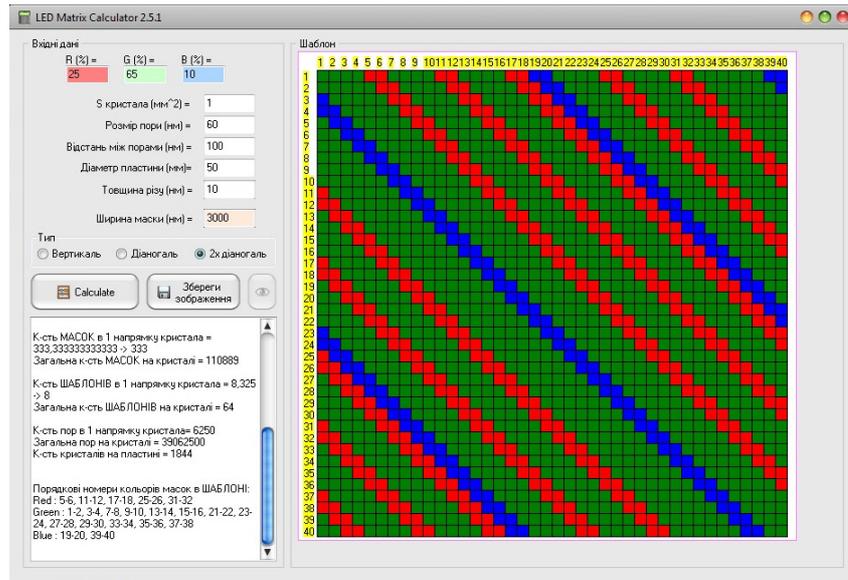


Рис. 5. Інтерфейс програмного забезпечення для розрахунку розподілення активних шарів на поверхності кристала

РАЗРАБОТКА ОСНОВ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АПВУ RGB-ИСТОЧНИКОВ БЕЛОГО СВЕТА С ВЫСОКИМ ИНДЕКСОМ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ

Необходимость исследования данного параметра при создании RGB-источников белого света обусловлена тем, что два различных источника света могут иметь одну и ту же цветовую температуру, но передавать цвета по-разному [11]. Согласно исследованиям индекса цветопередачи дискретных RGB-источников света [10], для получения индекса цветопередачи вплоть до CRI = 90–95 необязательно перекрыть весь видимый диапазон длин волн. Достаточно реализовать перекрытие спектральных диапазонов для синего $\lambda_1 = 450\text{--}455$ нм, для зеленого $\lambda_2 = 525\text{--}535$ нм и для красного $\lambda_3 = 600\text{--}615$ нм.

Таблица 1.

Технические характеристики многокристалльных гибридно-интегральных RGB матриц

№	Параметр	RGB/Si	RGBO	RGBW
1.	Угол обзора, град., мин	120	115	115
2.	Длина волны, нм (мин–макс)			
	• Синий	445–450 нм	450–465 нм	450–465 нм
	• Зеленый	515–520 нм	520–535 нм	520–535 нм
	• Оранжевый	–	605–620	–
	• Красный	625–635 нм	620–630	620–630 нм
	• Белый LED	–	–	5700–7000 К
	• Цветовая температура	2900–7000 К	2900–7000 К	2900–7000 К
	• Индекс цветопередачи, R_a	25–30	80–82,5	91
3.	Максимальное значение тока $I_{пр}$, мА	350	700	700
4.	Источник питания, Вт	12,5	12,5	12,5
6.	Наработка на оказ, не менее, час.	100 000	100 000	100 000
7.	Тип цоколя	E27 (d = 27 мм)	E27 (d = 27 мм)	E27 (d = 27 мм)

Для исследования индекса цветопередачи, были изготовлены RGB, RGBW, RGBO источники света и проведены экспериментальные исследования спектров их электролюминесценции (рис. 4) с помощью гониофотометра. Для исследований использовались чипы с подобранными диапазонами излучения, с целью достижения условий, максимально приближенных к необходимому. Получены сравнительные характеристики (табл. 1), которые показали значительное снижение индекса цветопередачи при использовании красного, зеленого и синего источников света без дополнительного источника света с люминофорным покрытием. В то же время, использование дополнительного источника света в диапазоне 605–620 нм повышает индекс цветопередачи до 80. Предполагается, что значения 90–95 удастся достичь при

использовании источников света, полностью перекрывающих диапазон для синего $\lambda_1 = 450\text{--}455$ нм, для зеленого $\lambda_2 = 525\text{--}535$ нм и для красного $\lambda_3 = 600\text{--}615$ нм. Данные исследования являются основой для разработки АПВВ RGB источников белого света на одном кристалле в одном технологическом процессе.

На основе аналитических исследований а так же уравнения Вегарда, проведены расчеты ширины запрещенной зоны и длины волны от молярной концентрации In в системе твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (рис. 4, табл. 2), в результате чего представляется возможным получить RGB светодиодные структуры в интегральном исполнении на подложке Si с возможностью регулировки баланса белого света начиная от базовой цветовой температуры и значением индекса цветопередачи 1A, что согласно данным Международной комиссии по освещению соответствует характеристике «Очень хорошо».

Таблица. 2.

Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны и длины волны от молярной концентрации In в системе твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ при 300 К для достижения индекса цветопередачи 90-95 Ra.

№	Канал излучения	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	λ , нм	E_g
1	Синий	$\text{In}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$	435	2,98
		$\text{In}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$	435	2,98
		$\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{N}$	450	2,78
		$\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{N}$	452	2,77
		$\text{In}_{0,19}\text{Ga}_{0,81}\text{N}$	455	2,76
2	Зеленый	$\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{N}$	495	2,72
		$\text{In}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{N}$	500	2,68
		$\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,72}\text{N}$	525	2,39
		$\text{In}_{0,19}\text{Ga}_{0,71}\text{N}$	532	2,34
		$\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$	535	2,32
3	Желто-оранжевый	$\text{In}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}$	552	2,29
		$\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{N}$	590	2,2
4	Оранжевый	$\text{In}_{0,37}\text{Ga}_{0,63}\text{N}$	600	2,04
		$\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{N}$	610	2,03
5	Красный	$\text{In}_{0,39}\text{Ga}_{0,61}\text{N}$	615	2,02

ВЫВОДЫ

В результате проведенного в работе теоретического анализа влияния динамики кристаллической решетки на квантовый выход рекомбинационного излучения впервые рассчитаны среднеквадратические динамические смещения атомов кристаллических решеток соединения GaN и твердого раствора InGaN.

Определены температурные зависимости атомного состава активной области светоизлучающих структур от среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллических решеток GaN и InGaN; экспериментально определенных значений интенсивностей излучения 0,05 отн. ед/100 К, длин волн в максимуме излучения, ширин спектральных линий электролюминесценции 5нм/100К и для для GaN выполнены расчеты вероятностей безызлучательной рекомбинации в диапазоне температур -40°C $+60^\circ\text{C}$.

Проведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными исследованиями для соединений фосфида индия, исходя из которого оптическая генерация от температуры в два раза стабильнее для соединений на основе GaN чем InP при тех же температурах, что обосновывает целесообразность замены твердых растворов AlInGaP на $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в монолитно-интегрированных RGB источниках света.

В ходе выполнения работы на установке МОС-гидридной эпитаксии были экспериментально получены пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0,31$ %), что коррелирует с расчетами и экспериментальными исследованиями спектров фотолюминесценции и соответствует $\lambda = 550$ нм и $E_g = 2,3$ эВ. Разработано распределение атомных составов твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в микрокластерных структурах чипа.

Для $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ RGB источников белого света на кремнии разработана методика и создано прикладное программное обеспечение с графическим интерфейсом, позволяющее моделировать процентное распределение микрокластерных RGB структур на поверхности структурированных буферных нанослоев в чипе, что позволяет считать такое моделирование имитационным.

Работа проводилась при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований (Проект №. Ф41.2/018).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осинский В.И., Масол И.В., Ляхова Н.Н., Деминский П.В. На пути создания умного освещения интеграцией Si/III-N светодиодных структур // Материалы 8-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия, алюминия - структуры и приборы", С.-Петербург, 2011, с. 190-191.
2. И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев. Информационные нанотехнологии: К. – Макрос. – 2011. – 560 стр.
3. Осинский В.И., Деминский П.В. Si/Al₃B₅ интегральные источники света: третий этап информатизации / В.И. Осинский, П.В. Деминский // Материалы VI Международной конференции оптоэлектронных информационных технологий «Фотоника – ODS 2012», Винница, 2012, с. 45
4. Moses P. G., Van de Walle Chris G. Band bowing and band alignment in InGaN alloys / P. G. Moses, Chris G. Van de Walle // Appl. Phys. 96. - 2010. – P. 21908
5. S. Nakamura, S. Pearton, and G. Fasol, *The Blue Laser Diode: The Complete Story* Springer-Verlag, Heidelberg, 2000.
6. T. Kuykendall, P. Ulrich, S. Aloni, and P. Yang, Nature Mater. 6, 951 2007.
7. Шуберт Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; [пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича]. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9221-0851-5.
8. O Ambacher "Growth and applications of Group III-nitrides" J. Phys. D: Appl. Phys. 31 (1998) 2653–2710.
9. Ляхова Н.О. Моделирование влияния темплетных размеров на дислокационность наноструктур при селективной эпитаксии III-нитридов №3, 2011 г., с. 205.
10. McCamy C. S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates / C. S. McCamy // Color Research & Application. – 1992. – Vol. 17(2). – Pp. 142–144.
11. Cangeloso S. LED Lighting / S. Cangeloso // O'Reilly Media, Inc. S.: Gravenstein Highway North. – 2001. – P. 1005. ISBN: 978-1-449-33476-5.

Надійшла до редакції 10.12.2012 р.

ОСИНСКИЙ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ – д.т.н, профессор, директор Центра оптоэлектронных технологий, НИИ Микроприборов НАН Украины, г. Киев, Украина.

ДЕМИНСКИЙ ПЕТР ВИТАЛЬЕВИЧ – аспирант факультета электроники, Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт». Младший научный сотрудник НИИ Микроприборов НАН Украины, г. Киев, Украина.

ЛЯХОВА НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА – старший научный сотрудник, НИИ Микроприборов НАН Украины, г. Киев, Украина

МОТОРНЫЙ АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ – ассистент кафедры «Общей физики и фотоники», Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

МАСОЛ ИГОРЬ ВИТАЛЬЕВИЧ – директор компании «Росток», г. Киев, Украина.

СУХОВИЙ НИНА ОЛЕГОВНА – аспирант факультета электроники, Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт», г. Киев, Украина