

Спектры электролюминесценции ультрафиолетовых светодиодов на основе $p-n$ -гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами¹

© Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, Н.П. Социн,* С.С. Широков,† А.Э. Юнович[¶]

Научно-производственный центр оптико-электронных приборов «ОПТЭЛ»,
105187 Москва, Россия

* Федеральное государственное унитарное предприятие «НИИ „Платан“»,
141190 Фрязино, Россия

† Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
119899 Москва, Россия

(Получена 5 декабря 2006 г. Принята к печати 25 декабря 2006 г.)

Изучены спектры электролюминесценции светодиодов на основе $p-n$ -гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN в ближней ультрафиолетовой области спектра (360–405 нм). Максимумы спектров излучения лежат вблизи 385 и 395 нм, интенсивность излучения спадает экспоненциально с энергией квантов в коротковолновой и длинноволновой областях. Исследованы излучатели в зеленой и желтой спектральной области на основе этих светодиодов, покрытых силикатными люминофорами. Спектры люминесценции люминофоров имеют гауссову форму и максимумы в диапазоне от 525 до 560 нм. Цветовые характеристики излучателей зависят от отношения интенсивностей ультрафиолетовой и желто-зеленой полос. Обсуждаются возможности создания светодиодов видимого свечения на основе ультрафиолетовых светодиодов, возбуждающих цветные люминофоры.

PACS: 78.60.Fi, 85.60.Jb

1. Введение

Исследования и разработка ультрафиолетовых (УФ) светодиодов (СД) на основе гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN проводились в последние годы как для ближней части УФ спектра (длина волны максимума излучения $360 \leq \lambda_{\max} < 405$ нм) [1–3], так и для более далекой части ($210 \leq \lambda_{\max} < 360$ нм) [4,5].

В СД для ближней части УФ спектра активной областью являются структуры с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, технология выращивания которых освоена лучше, чем технология структур типа $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, необходимых для более далекой части спектра [1,6,7].

Коэффициент полезного действия (η_p) и внутренний квантовый выход излучения (η_i) СД достигают максимума на границе видимой и ультрафиолетовой областей $\lambda_{\max} \approx 400$ нм ($\eta_p \approx 43\%$, $\eta_i \approx 60\%$). С уменьшением λ_{\max} (и соответствующим уменьшением содержания In в активной области) величина η_p уменьшается. Это обусловлено меньшими потенциальными барьерами для инжектируемых носителей тока на гетерограницах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ при малых значениях x [8]. Вблизи $\lambda_{\max} \approx 405$ нм и $\lambda_{\max} \approx 382$ нм достигнуты значения $\eta_p = 43$ и 24% соответственно [8,9]. Такая эффективность может быть достаточна для практических приложений. В частности, представляет интерес использование УФ СД для создания СД белого свечения, в которых УФ излучение возбуждает люминофоры (красный,

зеленый, голубой — RGB) для видимой области [10,11]. Следует заметить, что в работах [1,2,6,8,9,12] форма спектров УФ СД не была изучена достаточно подробно.

Преобразование УФ излучения в видимое с помощью люминофоров исследовалось с целью создания газоразрядных люминесцентных ламп в течение нескольких десятилетий. Были созданы эффективные люминофоры, спектры возбуждения которых были согласованы с линиями излучения разрядов в различных газах и парах ртути [13]. В связи с созданием эффективных УФ СД возникла проблема разработки источников света, в которых спектры СД и возбуждаемых люминофоров согласованы. Это необходимо для получения эффективного преобразования электрической энергии в видимое излучение в сине-зеленой и зелено-желтой частях спектра, где эффективность СД на основе InGaIn (без люминофоров) недостаточно высока (20–50 лм/Вт) [11,14–16].

Цель настоящей работы — исследование спектров излучения СД в ближней УФ области и покрывающих диоды силикатных люминофоров для создания источников видимого света. Работа продолжает исследования СД белого свечения, в которых использованы голубые СД, покрытые люминофорами из алюмо-иттриевых гранатов [17,18].

2. Объекты исследования

2.1. Ультрафиолетовые светодиоды

Ультрафиолетовые СД с длинами волн излучения 385 и 395 нм были изготовлены в НПЦ „Оптэл“ на основе кристаллов с $p-n$ -гетероструктурами ти-

¹ Работа частично доложена на VIII Международной конференции „Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы“ (Ульяновск, июнь 2006).

[¶] E-mail: yunovich@phys.msu.ru

па InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InGaIn/GaN. Кристаллы имели разную площадь и разные подложки. Образцы с площадью $p-n$ -перехода $S = 0.1 \text{ мм}^2$ имели подложку SiC (фирма Cree), кристаллы с $S = 1 \text{ мм}^2$ — сапфир, Al_2O_3 (фирма Tekcore). Рабочий ток СД с малой площадью был $J = 30 \text{ мА}$, с большой — $J = 350 \text{ мА}$. Кристаллы монтировались в теплоотводящий корпус, излучение выводилось через полимерный купол (показатель преломления $n = 1.55$) или через излучающий люминофор и полимерный купол.

2.2. Люминофоры

Для создания СД видимого свечения кристаллы покрывались силикатными люминофорами [19,20]. Были использованы четыре группы люминофоров.

Первая партия люминофора (S161) имеет состав $(\text{Ba}_{1.4}\text{Sr}_{0.55}\text{Eu}_{0.05})\text{SiO}_4$ и дополнительно содержит оксиды Y и Eu, а также фториды Mg и Ba. Материал синтезировался по керамической технологии из порошковых карбонатов Sr, Ba, ультрадисперсного кремнезема, фторидов Mg, Sr и Eu при температуре $T = 1250^\circ\text{C}$ в восстановительной атмосфере. Кристаллическая структура синтезированного ортосиликата — орторомбическая. Порошок люминофора имеет интенсивный зеленый цвет с поглощением в фиолетово-синей области спектра, длины волн $\lambda = 440\text{--}490 \text{ нм}$. Поглощение обусловлено переходами между основным состоянием $^8S_{7/2}(4f^7)$ и возбужденным состоянием $^6P_1(4f^6(7F)5d_1)$ иона Eu^{2+} в несимметричном кристаллическом поле матрицы люминофора. Спектр возбуждения для излучения с $\lambda_{\text{max}} = 519 \text{ нм}$ представляет собой гауссову полосу с полушириной 110–115 нм и максимумом при $\lambda_{\text{max}} = 395 \text{ нм}$.

Интенсивность возбуждения люминофора синим излучением с $\lambda = 460 \text{ нм}$ составляет 50% от максимального значения при возбуждении с $\lambda = 395 \text{ нм}$. При введении в состав люминофора ионов галогенидов — F или Cl — интенсивность возбуждения синим излучением возрастает до 65–70%. Спектр излучения люминофора S161 представляет собой гауссову кривую с максимумом при 519 нм и полушириной 60 нм. С ростом концентрации активирующих ионов Eu^{2+} спектр уширяется до 70 нм.

Вторая партия люминофора (S380) имеет состав $(\text{Sr}_{1.625}\text{Ba}_{0.30}\text{Ca}_{0.03}\text{Eu}_{0.045})\text{SiO}_4$. При этом увеличенное содержание ионов Sr^{3+} в основе сопровождается длинноволновым сдвигом максимума излучения в желто-оранжевый диапазон к $\lambda_{\text{max}} = 565 \text{ нм}$, полуширина полосы составляет 80 нм. Люминофор имеет яркий желтый цвет, интенсивность которого возрастает при дополнительном введении в состав Sr–Ba-ортосиликата ионов Cl и F. Спектр возбуждения люминофора S380 имеет один раздвоенный экстремум: коротковолновый при $\lambda = 395 \text{ нм}$ (интенсивность $I = 100\%$) и длинноволновый при $\lambda = 465 \text{ нм}$ ($I = 65\text{--}80\%$). Соотношение этих двух полос определяет интенсивность фотолюми-

несценции, возрастающую с увеличением возбуждения на длинноволновом краю.

Фотолюминофоры партий S34 и S181 имеют промежуточные концентрации ионов Sr^{3+} в решетке (0.98 и 1.2 атомной доли).

3. Спектры электролюминесценции

3.1. Ультрафиолетовые светодиоды

На рис. 1 представлены спектры электролюминесценции УФ СД с большой площадью кристаллов при малом и рабочем токах (5 и 350 мА соответственно). Максимум ультрафиолетовой линии излучения находится на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 382 \text{ нм}$ (энергия $\hbar\omega_{\text{max}} = 3.246 \text{ эВ}$). Длина волны максимума электролюминесценции практически не изменяется при вариации тока от 5 до 350 мА, что свидетельствует о малом влиянии пьезоэлектрических полей в квантовых ямах исследованных структур. Как и в синих и зеленых СД [21], интенсивность излучения $I(\hbar\omega)$ спадает от максимума по экспоненциальному закону. В длинноволновой области величина $I(\hbar\omega)$ спадает $\propto \exp(\hbar\omega/E_0)$, в коротковолновой области $\propto \exp(-\hbar\omega/E_1)$. Характерные значения энергий: $E_0 = 55\text{--}59 \text{ мэВ}$, $E_1 \approx kT$ (T — температура, k — постоянная Больцмана).

Однако спектры имеют некоторые особенности.

При малом токе ($J = 5 \text{ мА}$) в спектрах СД большой площади наблюдается слабая полоса около $\lambda = 450 \text{ нм}$ ($\hbar\omega = 2.75 \text{ эВ}$), которая может быть объяснена примесными состояниями с глубокими уровнями в запрещенной зоне [7]. При увеличении тока происходит насыщение этих состояний, и интенсивность полосы становится пренебрежимо малой. Для диодов, покрытых люминофорами, в этой спектральной области наблюдается излучение люминофора, и данная полоса не обнаруживается.

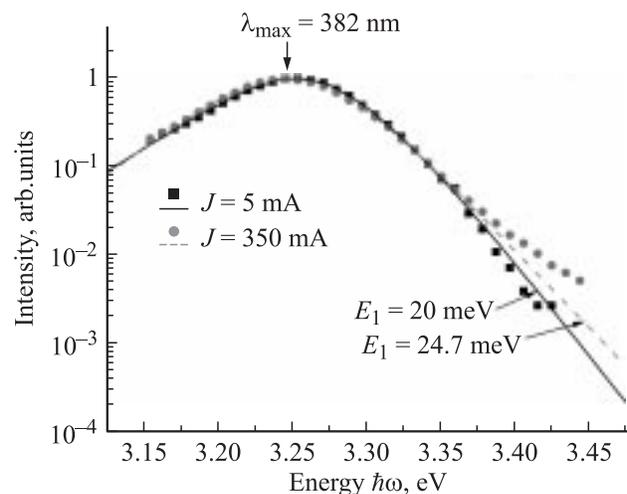


Рис. 1. Нормированные спектры электролюминесценции УФ СД без люминофора при малом и большом токе. Точки — эксперимент, линии — аппроксимационный расчет.

Для описания спектров излучения синих и зеленых СД была использована 4-параметрическая модель [21], учитывающая хвосты плотности состояний и степени их заполнения электронами и дырками в активной области структуры. Мы сделали попытку применить эту модель к описанию спектров УФ СД без люминофоров, поскольку они существенно искажают спектр. Аппроксимация показана на рис. 1 (линия — теория, точки — эксперимент). Необычным оказалось поведение коротковолновой части спектра: значения параметра коротковолнового спада E_1 были меньше kT при комнатной температуре для всех значений тока ($E_1 = 20$ мэВ при малом и 24.7 мэВ при большом токе).

Это может быть объяснено поглощением излучения либо пластиковой фокусирующей линзой, либо более широкозонными слоями в самой структуре [7]. Для видимой части спектра поглощение в пластике несущественно, поскольку его край поглощения находится вблизи 390 нм. Для более коротковолновых СД ($\lambda_{\text{max}} \approx 380$ нм) существенно поглощение слоями нитрида галлия (ширина запрещенной зоны $E_g(\text{GaN}) = 3.4$ эВ (364 нм) при комнатной температуре). Следует заметить, что в диодах с люминофорами большая часть УФ излучения поглощается люминофорами, а для наблюдаемого видимого света роль УФ части спектра незначительна. Поэтому применение пластика, непрозрачного в УФ области спектра, следует учитывать в конструкциях источников видимого света.

Измерения мощности излучения УФ СД проводились калиброванной интегрирующей сферой. Мощность при рабочих токах была 10 мВт ($S = 0.1$ мм², $J = 30$ мА, подложка — SiC) и 32 мВт ($S = 1$ мм², $J = 350$ мА, подложка — сапфир).

3.2. Светодиоды с люминофорами

На рис. 2, 3 представлены спектры СД с большой площадью при малом (5 мА) и рабочем (350 мА) токах с люминофорами S380 и S161. Полосы в спектрах, связанные с излучением люминофоров, расположены в желто-зеленой области спектра. Для образца S380 при изменении тока от 5 до 350 мА максимум полосы сдвигается от 541 нм (2.29 эВ) до 538 нм (2.3 эВ). Для образца S161 максимум полосы сдвигается от 524 нм (2.37 эВ) до 525 нм (2.36 эВ), что показывает слабую зависимость свойств люминофора от температуры. На рисунках показана пунктиром гауссова аппроксимация полос:

$$I \propto \exp[-(\hbar\omega - \hbar\omega_{\text{max}})^2/2\sigma^2].$$

Величина параметра σ , характеризующего ширину спектральной полосы на половине интенсивности, равна для разных люминофоров 127–138 мэВ (по шкале длин волн $\Delta\lambda_{1/2} = 81$ –69 нм), что существенно меньше, чем для излучения иона Ce^{+3} в $(\text{Y, Gd})_3\text{Al}_2\text{O}_3$: 114–125 нм.

На рис. 4, 5 представлены спектры электролюминесценции СД малой площади, покрытых разными люминофорами. Пик УФ полосы находится на длине вол-

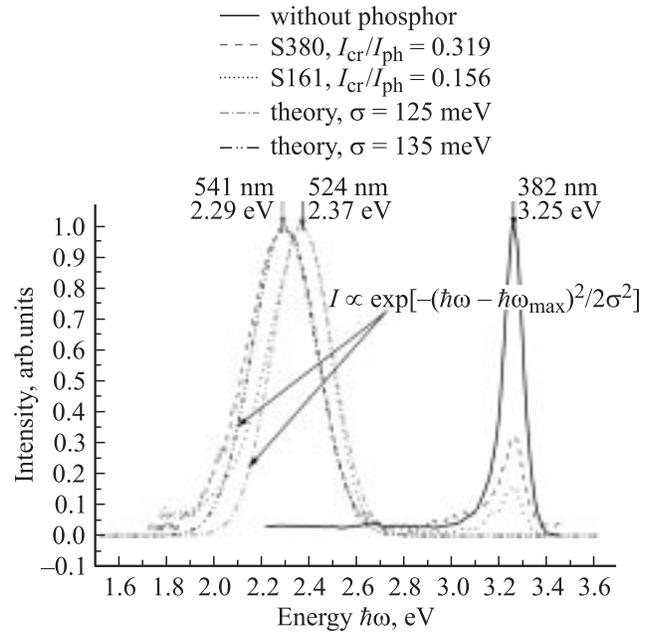


Рис. 2. Спектры электролюминесценции СД S380, S161 большой площади (подложка — сапфир) при малом токе $J = 5$ мА (плотность тока $j = 0.005$ А/мм²) и гауссова аппроксимация пиков люминофоров.

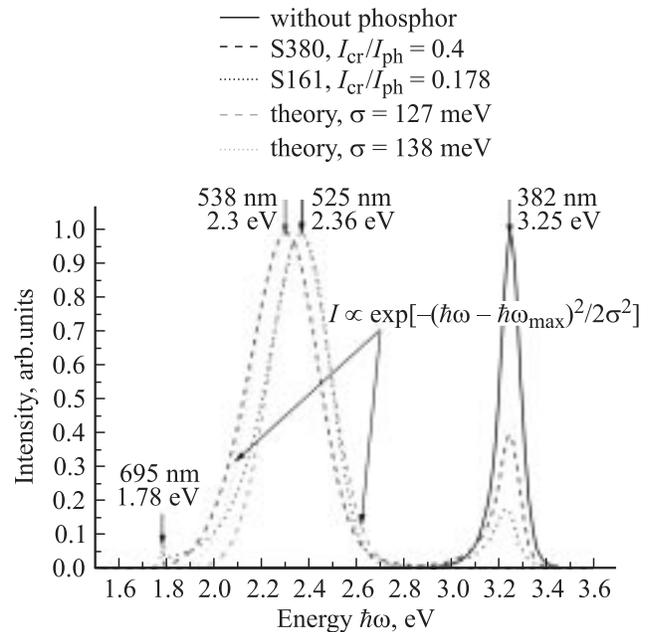


Рис. 3. Спектры электролюминесценции СД S380, S161 большой площади (подложка — сапфир) при рабочем токе $J = 350$ мА (плотность тока $j = 0.35$ А/мм²) и гауссова аппроксимация пиков люминофоров.

ны 391 нм (3.17 эВ) при малом токе ($J = 0.2$ мА) и смещается до 394 нм (3.15 эВ) при увеличении тока до $J = 30$ мА. В зависимости от типа применяемого люминофора длина волны зеленой полосы лежит в интервале от 528 до 560 нм (2.35–2.21 эВ) при $J = 0.2$ мА. При

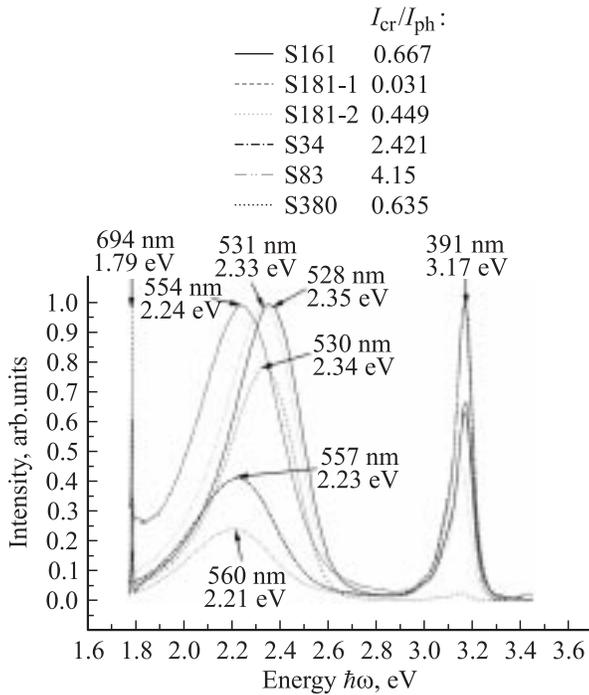


Рис. 4. Спектры электролюминесценции СД малой площади (подложка — SiC) при малом токе, $J = 0.2$ мА (плотность тока $j = 0.003$ А/мм²).

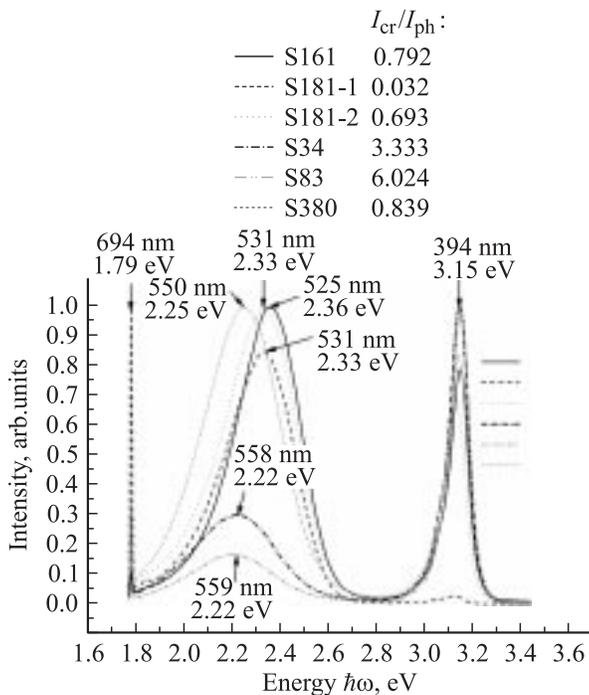


Рис. 5. Спектры электролюминесценции СД малой площади (подложка — SiC) при рабочем токе $J = 30$ мА (плотность тока $j = 0.5$ А/мм²).

увеличении тока до 30 мА этот интервал изменяется (525–559 нм, 2.22–2.36 эВ), что обусловлено слабой зависимостью спектра излучения люминофора от температуры.

Пик на длине волны ~ 694 нм (~ 1.79 эВ) связан с излучением редкоземельных элементов, содержащихся в люминофоре в малых концентрациях.

Следует обратить внимание на отношение максимума интенсивности излучения кристалла I_{cr} к максимуму интенсивности излучения люминофора I_{ph} . Значения I_{cr}/I_{ph} приведены на вставках к рисункам, при увеличении тока они увеличиваются для спектров всех образцов. Это свидетельствует о „насыщении“ люминофора при увеличении интенсивности УФ полосы. Также следует отметить, что для образцов S34 и S83 это отношение больше единицы для всех значений тока. Это значит, что при использованной толщине покрытия люминофор недостаточно эффективно преобразует УФ излучение в видимый свет. Для всех остальных образцов отношение I_{cr}/I_{ph} меньше единицы, значение этого отношения варьировалось толщиной покрытий и дисперсностью порошка люминофора.

4. Цветовые характеристики

Координаты цветности СД, характеризующие восприятие излучения системой человеческого зрения, представлены на рис. 6 для исследованных образцов при рабочем токе. Они лежат в зеленой и желто-зеленой области диаграммы МКО 1931 г. В табл. 1 представлены значения координат (X, Y) для спектров 6 образцов малой площади при разных токах. В табл. 2 даны значения для СД большой площади.

Отношение максимумов интенсивностей пика кристалла и пика люминофора I_{cr}/I_{ph} и длинноволновый спад УФ полосы существенно влияют на координаты цветности образцов. При большей интенсивности УФ излучения координаты цветности сдвигаются в синюю область, поскольку даже слабая чувствительность глаза в коротковолновой области достаточна для восприятия цвета. Если интенсивность излучения люминофора боль-

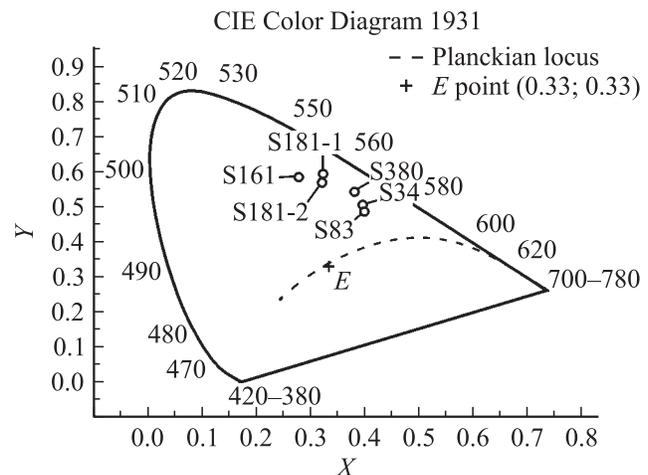


Рис. 6. Цветовая диаграмма МКО 1931 г. с отмеченными на ней цветовыми координатами СД малой площади (подложка — SiC) с люминофорами. Указаны длины волн в нм.

Таблица 1. Основные параметры СД малой площади (подложка — SiC) с люминофорами

СД	I_{cr}/I_{ph}		Координаты цветности				Люмен-эквивалент, лм/Вт
			X		Y		
	0,2 мА	30 мА	0,2 мА	30 мА	0,2 мА	30 мА	
S34	2.421	3.333	0.419	0.396	0.515	0.509	289
S83	4.15	6.024	0.421	0.399	0.501	0.49	224
S161	0.667	0.792	0.316	0.278	0.579	0.588	381
S181-1	0.031	0.032	0.342	0.323	0.593	0.597	479
S181-2	0.449	0.693	0.348	0.321	0.569	0.572	405
S380	0.635	0.839	0.41	0.381	0.526	0.546	416

Таблица 2. Основные параметры СД большой площади (подложка — сапфир) с люминофорами

СД	I_{cr}/I_{ph}		Координаты цветности				Люмен-эквивалент, лм/Вт
			X		Y		
	1 мА	350 мА	1 мА	350 мА	1 мА	350 мА	
S161	0.156	0.178	0.282	0.273	0.602	0.614	441
S380	0.319	0.4	0.341	0.331	0.58	0.593	456

ше, то координаты сдвигаются в желтую область. Из табл. 1 и 2 видно, что во всех образцах при увеличении тока отношение I_{cr}/I_{ph} увеличивается и, как следствие, цветовые координаты сдвигаются в синюю область. В табл. 1 и 2 также представлены значения люмен-эквивалента L_{eq} [лм/Вт] — параметра, характеризующего спектры при предельном коэффициенте полезного действия, равном единице. Значения L_{eq} увеличиваются при смещении координат цветности в зеленую область. Они больше для образцов S181-1, S181-2; для люминофоров S181 и S380 значение люмен-эквивалента близко или превышает 66% от максимального значения $\eta_L = 683$ лм/Вт для $\lambda = 555$ нм. Это в 1.3–1.5 раза превышает значение $\eta_L = 330$ лм/Вт для люминофоров на основе алюмо-иттриевых гранатов $(Y,Gd)_3Al_5O_{12}$.

Световой поток для диодов с люминофором зеленого свечения S380 достигал 32 лм при $J = 350$ мА, что соответствует световой отдаче 23 лм/Вт. Приборы с этими люминофорами имеют силу света до ≈ 30 кд для угла $2\theta_{1/2} = 10^\circ$.

5. Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты показывают, что спектры излучения СД на основе $p-n$ -гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с максимумом в ближней УФ области ($\lambda_{max} \approx 380$ и 395 нм) согласуются со спектрами возбуждения силикатных желто-зеленых люминофоров типа $(BaSrEu)SiO_4$ с добавками оксидов Y и Eu, а также фторидов Mg и Ba. При этом достаточно эф-

фективно преобразование УФ излучения в видимое. Коротковолновый спад интенсивности УФ линии частично обусловлен поглощением в слое GaN, что влияет на квантовый выход излучения. Возможно дальнейшее увеличение эффективности преобразования на основе этих пар оптимизацией составов и количества люминофора на поверхности кристалла.

Увеличение отношения интенсивностей УФ и желто-зеленой полос с увеличением тока показывает, что эффективность преобразования УФ излучения в видимое уменьшается. Это, по-видимому, обусловлено динамическим насыщением центров свечения в люминофоре при больших плотностях мощности возбуждения; не исключено небольшое уменьшение эффективности люминофоров при повышении температуры. Это должно быть учтено в дальнейших разработках конструкций СД.

Цветовые характеристики спектров излучения исследованных СД с люминофорным покрытием соответствуют желто-зеленой области спектра, в которой велик люмен-эквивалент ($L_{eq} > 400$ лм/Вт). Это определяет световую отдачу диодов до 32 лм/Вт при токе 350 мА (плотность тока ~ 0.35 А/см²). Эта величина несколько уступает светоотдаче зеленых СД с узкой спектральной полосой ($\Delta\lambda_{1/2} = 35$ нм) на основе гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN (до 20–50 лм/Вт при токе 350 мА для $\lambda_{max} = 525$ нм). Однако она достаточна для тех практических применений, в которых нужен более широкополосный спектр, $\Delta\lambda_{1/2} = 70–80$ нм (например, аварийная сигнализация).

Положение координат цветности на цветовой диаграмме для изученных СД дает ориентировку в подборе красных и голубых люминофоров с полосами возбуждения вблизи 380 и 395 нм, в сочетании с которыми можно будет получить СД белого свечения на основе УФ СД.

6. Заключение

Исследованы СД, разработанные на основе $p-n$ -гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN с длинами волн излучения в ближней УФ области, мощность излучения которых для $\lambda_{max} \approx 380$ нм достигает 32 мВт при токе 350 мА (кпд $\approx 3\%$), а для $\lambda_{max} \approx 395$ нм 11 мВт при токе 30 мА (кпд $\approx 10\%$). Спектры излучения этих СД согласуются со спектрами возбуждения силикатных люминофоров типа $(BaSrEu)SiO_4$ с добавками оксидов Y и Eu, а также фторидов Mg и Ba.

Спектры излучения исследованных силикатных люминофоров с различным составом имеют максимумы в желто-зеленой области ($\lambda_{max} \approx 525–560$ нм) и описываются гауссовыми распределениями с параметром $\sigma = 0.125–0.137$ эВ.

Светоотдача светодиодов (до 23 лм/Вт при токе 350 мА) желто-зеленого свечения на основе ультрафиолетовых СД с силикатными люминофорными покрытиями и их цветовые характеристики достаточны для многих возможных применений.

Список литературы

- [1] S. Kamiyama, M. Iwaya, H. Amano, I. Akasaki. Optoelectronics Rev., **10** (4), 225 (2002).
- [2] T. Taguchi. J. Light & Visual Environment, **27** (3), 131 (2003).
- [3] С.С. Широков, А.Э. Юнович. Тез. докл. XVIII Межд. науч.-техн. конф. по фотозлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2004) с. 27.
- [4] V. Adivarahan, S. Wu, A. Chitnis, R. Pachipulusu, V. Mandavilli, M. Shatalov, J.P. Zhang, M. Asif Khan, G. Tamulaitis, A. Sereika, I. Yilmaz, M.S. Shur, R. Gaska. Appl. Phys. Lett., **81** (19), 3666 (2002).
- [5] Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto. Nature, **441**, 325 (18 May 2006).
- [6] C. Chen, V. Adivarahan, J. Yang, M. Shatalov, E. Kuokstis, M.A. Khan. Jap. J. Appl. Phys., **42**, L1039 (2003).
- [7] С.С. Широков, А.Э. Юнович. Тез. докл. 5 Росс. конф. по физике полупроводников (Звенигород, 2005) с. 285.
- [8] K. Tadatomo, H. Okagawa, Y. Ohuchi, T. Tsunekawa, Y. Imada, M. Kato, T. Taguchi. Jap. J. Appl. Phys., **40**, L583 (2001).
- [9] K. Tadatomo, H. Okagawa, Y. Ohuchi, T. Tsunekawa, H. Kudo, Y. Sudo, M. Kato, T. Taguchi. Proc. SPIE, **5187**, 243 (2004).
- [10] *Light Emitting Diodes for General Illumination. Tutorial materials* (OIDA), ed. by Jeff I. Tsao (2002). <http://lighting.sandia.gov/>.
- [11] А.Э. Юнович. Светотехника, **3**, 2 (2003).
- [12] U. Kaufmann, M. Kunzer, K. Köhler, H. Obloh, W. Pletschen, P. Schlotter, R. Schmidt, J. Wagner, A. Ellens, W. Rossner, M. Kobusch. Phys. Status Solidi A, **188** (1), 143 (2002).
- [13] Л.Я. Марковский, О.Н. Казанкин. *Неорганические люминофоры* (М., Химия, 1976).
- [14] Z. Wang, H. Liang, M. Gong, Q. Su. Electrochem. Solid-State Lett., **8** (4), 33 (2005).
- [15] K. Yamada, M. Ohta, T. Taguchi. J. Light & Visual Environment, **28** (2), 73 (2004).
- [16] Cheng-Huang Kuo, Jinn-Kong Sheu, Shouou-Jinn Chang, Yan-Kuin Su, Liang-Wen Wu, Ji-Ming Tsai, C.H. Liu, R.K. Wu. Jap. J. Appl. Phys., **42**, 2284 (2003).
- [17] М.Л. Бадгутдинов, Н.А. Гальчина, Е.В. Коробов, Л.М. Коган, Ф.А. Лукьянов, И.Т. Рассохин, Н.П. Сощин, А.Э. Юнович. ФТП, **40**, 758 (2006).
- [18] М.Л. Бадгутдинов, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, Н.П. Сощин, А.Э. Юнович. Светотехника, **3**, 36 (2006).
- [19] А.Д. Азоров, Н.П. Сощин. Электронная промышленность, **1**, 24 (2006).
- [20] Н.П. Сощин, В.А. Большухин. Электронная промышленность, **1**, 39 (2006).
- [21] С.С. Мамакин, А.Э. Юнович, А.Б. Ваттана, Ф.И. Маняхин. ФТП, **39**, 1131 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Electroluminescence spectra of ultraviolet light-emitting diodes based on $p-n$ -heterostructures InGaAlGaN/GaN coated with phosphors

N.A. Galchina, L.M. Kogan, N.P. Soschin,*
S.S. Shirokov,† A.E. Yunovich†

Optel Center,
105187 Moscow, Russia
* Research Institute „Platan“,

141190 Moscow, Russia

† M.V. Lomonosov Moscow State University

(Department of Physics),

119899 Moscow, Russia

Abstract Electroluminescence spectra of light-emitting diodes (LED) based on InGaN/AlGaIn/GaN $p-n$ -heterostructures were studied in the near ultraviolet (UV) region (360–405 nm). Spectral maxima were situated near 385 and 395 nm, emission intensity decreased exponentially with quantum energy in short-wave and long-wave ranges. Green and yellow light emitters based on this LED's covered with silicate phosphors were studied. Luminescence spectra of these phosphors have Gaussian shape and peaks at wavelengths from 525 to 560 nm. Color characteristics of emitters depended on of UV to yellow-green spectral lines ratio. Possibilities of development of visible light LEDs based on UV LED exciting various phosphors are discussed.