

УДК 628.9.037
EDN: QXNXUU

PACS: 42.79.-e

Разработка полупроводникового источника белого света с высоким индексом цветопередачи

Ю. С. Жидик, И. Ф. Гарипов, С. Р. Карпов, М. А. Романова, П. Е. Троян

Приведены результаты разработки полупроводникового источника белого света, обладающего нейтральной цветовой температурой и высоким индексом цветопередачи. Разработанный источник белого света состоит из двух светодиодных гетероструктурных кристаллов на основе GaN синего и зеленого цветов свечения, установленных в общий металл-полимерный корпус и покрытых люминофорной композицией из красного и желтого люминофоров. Показано, что подбор оптимального соотношения между красным и желтым люминофорами и между связующим силиконом позволяет достичь высокий индекс цветопередачи и обеспечить необходимую цветовую температуру. В частности, использование в люминофорной композиции 9 % желтого люминофора, 1 % красного люминофора и 90 % силиконового наполнителя позволило обеспечить цветовую температуру двухкристального источника света 4500 К и индекс цветопередачи на уровне 94.

Ключевые слова: полупроводниковый источник белого света; светодиод; люминофорная композиция.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-81-88

Введение

Полупроводниковые источники света белого цвета свечения в настоящее время являются наиболее перспективными источниками

освещения благодаря низкой стоимости, высокой светоотдаче и высокой надёжности [1, 2]. Важнейшими характеристиками полупроводниковых источников света белого цвета свечения являются эффективность светоотдачи и индекс цветопередачи (CRI). Обеспечение высокого индекса CRI важно для правильного восприятия цвета предметов при их освещении в магазинах, художественных галереях, фотостудиях, полиграфических предприятиях и т. д. Кроме того, полупроводниковые источники света белого цвета свечения с высоким CRI и правильной цветовой температурой могут повысить комфорт и производительность труда человека, поскольку правильное освещение способствует улучшению настроения и комфорта для глаз. Такие источники света также могут быть использованы для подсветки предметов, чтобы они выглядели более реалистично и привлекательно.

Традиционно для получения белого цвета при использовании полупроводниковых источников света реализуется несколько способов, изображенных на рисунке 1 [3].

Жидик Юрий Сергеевич^{1,2}, в.н.с., н.с., к.т.н.

E-mail: zhidikyur@mail.ru

Гарипов Иван Фаритович^{1,3}, н.с., инженер-технолог.

E-mail: ivan.f.garipov@tusur.ru

Карпов Семен Романович^{1,3}, студент.

Романова Мария Андреевна^{1,4}, н.с.

Троян Павел Ефимович¹, профессор, д.т.н.

¹ ТУСУР.

Россия, 634050 г. Томск, пр. Ленина 40.

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

³ АО «НИИПП».

Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а.

⁴ ИПУ РАН.

Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65.

Статья поступила в редакцию 26.09.2024

После доработки 15.10.2024

Принята к публикации 12.12.2024

Шифр научной специальности: 2.2.6

© Жидик Ю. С., Гарипов И. Ф., Карпов С. Р.,
Романова М. А., Троян П. Е., 2024

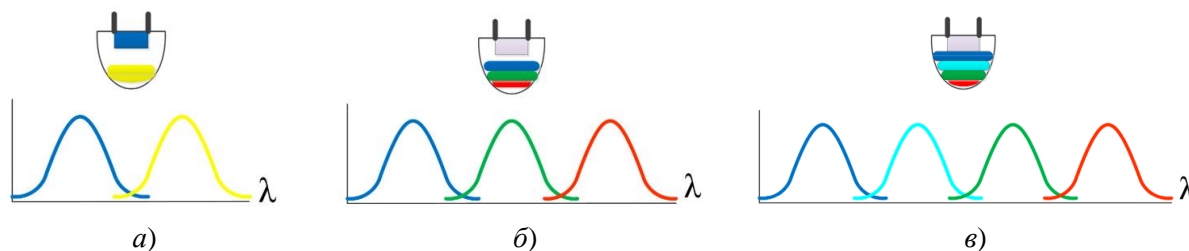


Рис. 1. Способы получения белого света с использованием полупроводниковых источников излучения: а) – двухцветный источник (синий светодиод + жёлтый люминофор); б) трехцветный источник (ультрафиолетовый светодиод + синий, зеленый и красный люминофоры); в) – четырехцветный источник (ультрафиолетовый светодиод + синий, голубой, зеленый и красный люминофоры)

Первый метод заключается в применении кристалла светоизлучающего диода синего цвета свечения и композитов с желтым люминофором (рис. 1а) [4]. Кристалл светоизлучающего диода преобразует электрическую энергию в оптическое излучение синего цвета, часть которого преобразуется люминофором в желтый свет. Смешение непреобразованного синего света с желтым в заданных пропорциях дает возможность получить белый свет необходимой цветовой температуры [5]. Двухцветные источники белого света, как правило, имеют самые высокие значения световой эффективности. Однако отсутствие красной составляющей в полученном таким способом спектре излучения приводит к низкому индексу цветопередачи.

Второй используемой технологией получения белого цвета свечения является трехцветная RGB-схема, состоящая из трёх кристаллов светодиодов красного, зеленого и синего цветов свечения, установленных в один общий корпус (рис. 1б). Трёхкристалльные источники излучения обладают приемлемыми параметрами цветопередачи ($CRI > 80$) и средними показателями световой эффективности. Недостатками данного метода получения белого цвета свечения с использованием трех полупроводниковых источников света являются большие габаритные размеры SMD-корпуса, содержащего три установленных полупроводниковых кристалла, а также необходимость обеспечения режима работы и, следовательно, питания каждого кристалла индивидуально для получения белого цвета свечения с необходимой цветовой температурой. Указанные недостатки ограничивают применение RGB-схем только в устройствах декоративной подсветки и не позволяют их

эффективно применять в устройствах освещения.

Наибольшим индексом цветопередачи ($CRI > 90$) обладают четырехцветные источники белого света (рис. 1в). В таких источниках белого света используются светодиоды ультрафиолетового свечения с композицией из синего, голубого, зеленого и красного люминофоров. Однако, световая отдача источников белого света с ростом числа используемых люминофоров, как правило, снижается. Это препятствует созданию четырехцветных источников белого света высокой эффективности. Помимо этого, применение светодиодных кристаллов ультрафиолетового свечения увеличивает себестоимость производства светодиодов, а также добавляет дополнительные технологические трудности на этапе промежуточного контроля при сборке в связи с вредным воздействием данного излучения на организм человека.

Устранение указанных недостатков четырехцветных источников белого света возможно при их построении не на базе светодиодного кристалла ультрафиолетового свечения, а на базе светодиодного кристалла синего свечения с одновременной заменой некоторых люминофоров излучением второго дополнительного кристалла светодиода с соответствующим цветом свечения, то есть применение так называемых двухкристалльных источников света.

Таким образом, актуальной задачей является разработка двухкристалльного источника белого света с люминофорной композицией, обладающего нейтральной цветовой температурой и высоким индексом цветопередачи ($CRI > 90$).

Объекты и методы исследований

Разработка двухкристального полупроводникового источника света с высоким индексом цветопередачи сводилась к подбору люминофорной композиции, покрывающей кристаллы светодиодов синего и зеленого цветов свечения.

Для проведения исследований в данной работе использовались светодиодные гетероструктурные кристаллы на основе нитрида галлия (GaN) синего и зеленого цвета свечения (пики излучения находятся на длинах волн 460 и 520 нм соответственно) установленные в общий металл-полимерный корпус с размерами 5×5 мм и обеспечивающий рассеиваемую мощностью 1 Вт на токопроводящий клей Diemat 6030HK-SD с последующей сушкой в печи СНОЛ 3.5, 3.5, 3.5/3.5-И5Л при температуре (200 ± 10) °С в течении 1 часа (рис. 2а). После установки кристаллов в корпус осуществлялось электрическое соединение их контактных площадок с контактами корпуса золотой проволокой диаметром 30 мкм на установке ЭМ-4320-1 (рис. 2б).

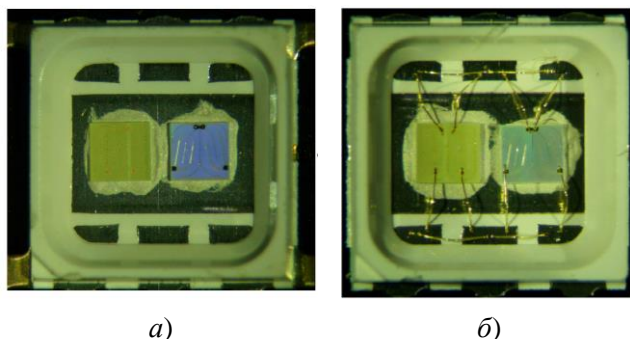


Рис. 2. Экспериментальные образцы после посадки кристаллов (а) и после разварки выводов (б)

После отбраковки тестовые образцы покрывались люминофорными компози-

циями, подготовленными на основе смешения желтого люминофора L-4500 S (ТУ 6365-036-21984621-2016, пик излучения приходится на длину волны 557 нм), красного люминофора LP650N1-R (ТУ 26.11.40.190-002-61702549-2018, пик излучения приходится на длину волны 651 нм) и силикона Duroptix OE-6636 в разных пропорциях. Полученная композиция заливалась ровно до краев корпуса, образуя с краями корпуса гладкую поверхность.

Измерение светового потока, спектральной плотности потока излучения, координат цветности, коррелированной цветовой температуры исследуемых полупроводниковых источников света осуществлялось с помощью измерительного комплекса IS-2 (Instrument System GmbH, Германия) [6]. Комплекс состоит из фотометрического шара ISP500-100, спектрометра CAS 120-151 и персонального компьютера с установленной программой управления и обработки результатов SpecWin Pro. Фотометрический шар ISP500-100 представляет собой сферу диаметром 500 мм с нанесённым на внутренней поверхности белым рассеивающим покрытием. Спектрометр CAS 120-151 предназначен для измерений параметров спектральной плотности потока излучения источника света в диапазоне длин волн от 380 до 830 нм, а также для определения координат цветности и коррелированной цветовой температуры.

Результаты

Первоначально для получения заполненного спектра излучения были исследованы оптические характеристики двухкристального полупроводникового источника света с добавлением в связующий силикон красного люминофора разной концентрации (таблица 1).

Таблица 1

Колориметрические характеристики двухкристальных полупроводниковых источников света с добавлением красного люминофора

№ образца	Концентрация люминофора LP650N1-R (красный), %	Концентрация связующего силикона OE-6636, %	Световой поток, Лм	Цветовая температура, К	Координаты цветности		CRI
					x	y	
1	4	96	67,05	3117,35	0,38	0,30	36,04
2	5	95	72,09	2218,63	0,40	0,27	34,82
3	6	94	73,13	2015,71	0,42	0,27	50,66
4	7	93	68,60	1712,92	0,47	0,29	42,77
5	8	92	56,41	1363,30	0,53	0,31	56,53

На рисунке 3 представлена цветовая диаграмма МКО 1931 г., построенная по координатам цветности подготовленных образцов двухкристалльных полупроводниковых источников света с добавлением красного люминофора. Спектральные характеристики полученных образцов представлены на рисунке 4.

Положение на цветовой диаграмме координат цветности исследуемых двухкристалльных источников света с композицией на основе красного люминофора (рисунок 3) показывает, что при увеличении концентрации люминофора в композиции положение координат цветности на цветовой диаграмме значительно отдалены от кривой Планка и сдвигаются в область красного цвета, то есть растёт значение координаты x , при этом значение координаты y не приближается к области белых цветов. Полученные полупроводниковые источники света с использованием кристаллов синего и зелёного цветов свечения

в совокупности с красным люминофором не обладают светом белого свечения, а также показывают низкий индекс цветопередачи на уровне 60. Низкий индекс цветопередачи обусловлен недостаточной заполненностью спектров излучения полученных образцов (рисунок 4).

Для увеличения цветовой температуры, повышения индекса цветопередачи и смещения координат цветности ближе к кривой Планка в дальнейшем исследовались двухкристалльные полупроводниковые источники света с добавлением композиции из смеси красного LP650N1-R и желтого L4500 S люминофоров с разным процентным соотношением. Концентрация люминофоров в люминофорной композиции и результаты измерения колориметрических характеристик соответствующих двухкристалльных полупроводниковых источников света приведены в таблице 2.

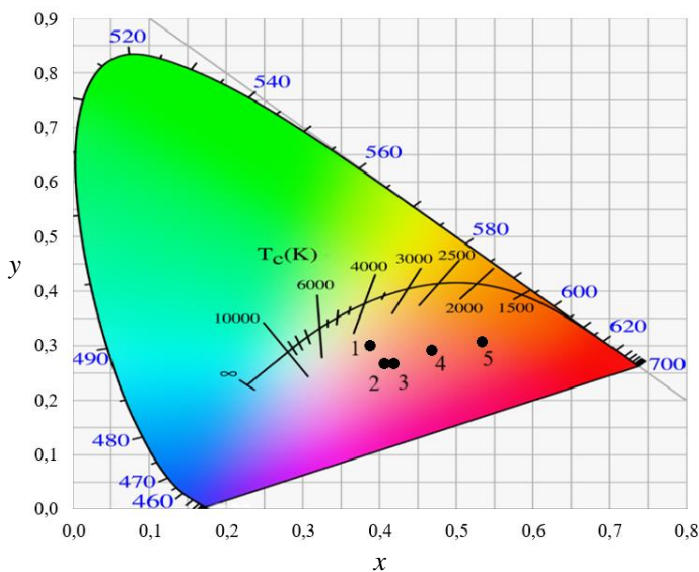


Рис. 3. Цветовая диаграмма исследуемых двухкристалльных источников света с композицией на основе красного люминофора

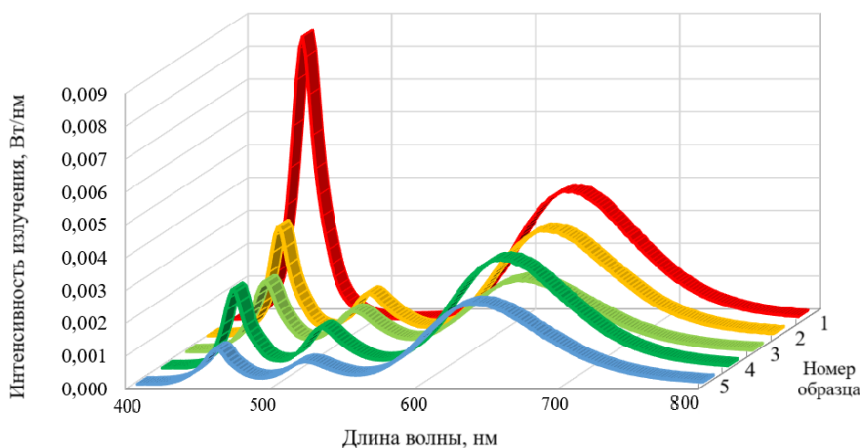


Рис. 4. Спектральные характеристики излучения двухкристалльных источников света с композицией на основе красного люминофора

Таблица 2

Колориметрические характеристики двухкристалльных полупроводниковых источников света с добавлением композиции из смеси красного и желтого люминофоров

№ образца	Концентрация люминофора L4500 S в композиции, %	Концентрация люминофора LP650N1-R в композиции, %	Концентрация связующего силикона OE-6636, %	Координаты цветности		Цветовая температура, К	CRI
				x	y		
1	5	–	95	0,22	0,28	29851	76
2	4,5	0,5	95	0,26	0,30	11516	94
3	4	1	95	0,27	0,28	12143	87
4	3,5	1,5	95	0,29	0,28	9023	70
5	3	2	95	0,31	0,28	7386	59
6	2,5	2,5	95	0,28	0,24	16229	49
7	2	3	95	0,52	0,34	1596	51

Анализ колориметрических характеристик двухкристалльных полупроводниковых источников света с добавлением композиции из красного и желтого люминофоров показал, что наибольшим индексом цветопередачи обладают образцы номер 2 (табл. 2) с соотношением желтого и красного люминофоров в люминофорной композиции 9:1. В связи с этим дальнейшая работа была связана с определением оптимального соотношения между люминофорной композицией с указанным соотношением (9 частей желтого люминофора и 1 часть красного люминофора) и связующим силиконом Duroptix OE-6636 в разных пропорциях. Результаты измерения колориметрических характеристик таких двухкристалльных полупроводниковых источников света и используемые соотношения люми-

нофорной композиции и связующего силикона приведены в таблице 3.

Анализ полученных значений индекса цветопередачи двухкристалльных полупроводниковых источников света с соотношением желтого и красного люминофоров в люминофорной композиции 9:1 показывает, что при таком соотношении люминофоров индекс цветопередачи действительно больше 90. На рисунке 5 представлена цветовая диаграмма, построенная по координатам цветности приведенных в таблице 3 образцов. Спектры излучения исследуемых двухкристалльных полупроводниковых источников света с добавлением композиции из красного и желтого люминофоров в соотношении 9:1 представлены на рисунке 6.

Таблица 3

Колориметрические характеристики двухкристалльных полупроводниковых источников света с различным соотношением люминофорной композиции и связующего силикона

№ образца	Концентрация люминофора L4500 S в композиции, %	Концентрация люминофора LP650N1-R в композиции, %	Концентрация связующего силикона OE-6636, %	Координаты цветности		Цветовая температура, К	CRI
				x	y		
1	6,3	0,7	93	0,32	0,32	6409,5	88,2
2	7,2	0,8	92	0,32	0,34	5846,9	90,1
3	8,1	0,9	91	0,33	0,35	5637,3	94,6
4	9,0	1,0	90	0,36	0,37	4469,3	94,4
5	9,9	1,1	89	0,39	0,40	3906,1	93,7

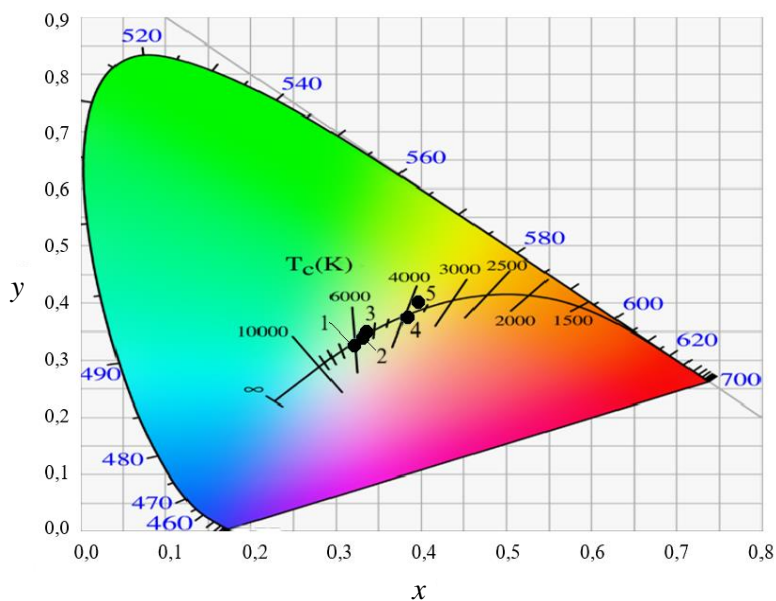


Рис. 5. Спектральные характеристики исследуемых двухкристальных источников света с композицией на основе смеси желтого и красного люминофоров

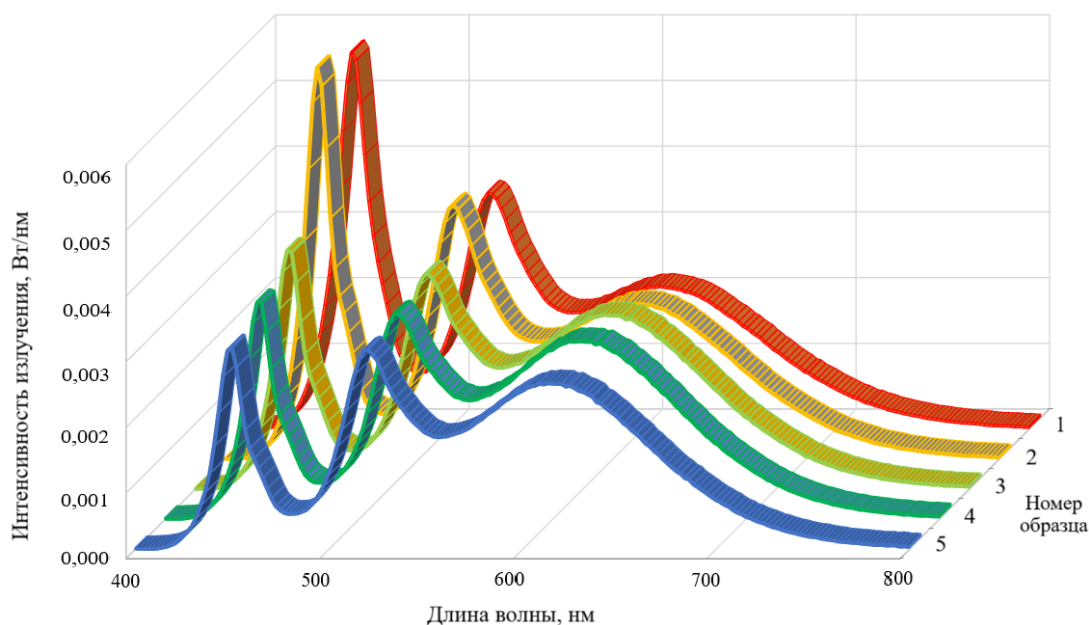


Рис. 6. Спектральные характеристики исследуемых двухкристальных источников света с композицией на основе смеси желтого и красного люминофоров в соотношении 9:1

Анализ полученных результатов показал, что полупроводниковые источники белого света с люминофорной заливкой, соответствующей экспериментальному образцу номер 3 (табл. 3), обладает нейтральной цветовой температурой и индексом цветопередачи выше 94. Координаты цветности данного образца полупроводникового источника света хорошо укладываются на кривую Планка (рис. 5). Анализ спектра свечения таких полупроводниковых источников белого света (рис. 6) показывает хорошую заполненность цветами, в том числе и оттеночными, что подтверждает полученную высокую цветовую передачу.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для получения белого цвета свечения, координаты цветности которого будут лежать на кривой Планка, на основе установленных в один корпус светодиодных кристаллов синего и зеленого цветов свечения необходимо использование люминофорной композиции из красного и желтого люминофоров, излучение которых хорошо заполняет спектр результирующего свечения. Подбор соотношений между красным и желтым люминофорами и между связующим силиконом позволил вы-

брать оптимальную композицию, обеспечивающую высокий индекс цветопередачи.

В результате проделанной работы был разработан, изготовлен и исследован двухкристальный источник белого света с люминофорной композицией в составе 9 % люминофора L4500 S, 1 % люминофора LP650N1-R и 90 % связующего силикона OE-6636, обладающий нейтральной цветовой температурой 4500 К и индексом цветопередачи на уровне 94.

*Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования РФ
в рамках проекта FEWM 2024-0004.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Schubert E. F., Kim J. K., Luo H., Xi J. Q. / Rep. Prog. Phys. 2006. Vol. 69. P. 3069–3099.
2. Cengiz C., Azarifar M., Arik M. / Micromachines. 2022. Vol. 13. P. 1615.
3. Jargus J., Vitasek J., Nedoma J., Vasinek V., Martinek R. / Materials. 2019. Vol. 12. P. 2095.
4. Xie B., Wang Y. J., Liu H. C., Ma J. L., Zhou S. L., Yu X. J., Lan W., Wang K., Hu R., Luo X. B. / Chem. Eng. J. 2022. Vol. 427. P. 130958.
5. Nair G. B., Swart H. C., Dhoble S. J. Device Fabrication and Characterization. Prog. Mater. Sci. 2020. Vol. 109. P. 100622.
6. Комплекс измерительный IS-2 [Электронный ресурс]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/73266-18-is-2> (дата обращения: 12.07.2024).

PACS: 42.79.–e

Development of a semiconductor white light source with a high color rendering index

Yu. S. Zhidik, I. F. Garipov, S. R. Karpov, M. A. Romanova and P. E. Troyan

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenina prospect, Tomsk, 634050, Russia
E-mail: zhidikyur@mail.ru

² V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS
1 Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russia

³ JSC NIIPP
99a Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, 634034, Russia

⁴ V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
65 Profsoyuznaya st., Moscow, 117997, Russia

Received 26.09.2024; revised 15.10.2024; accepted 12.12.2024

The paper presents the results of developing a semiconductor white light source characterized by a neutral color temperature and a high color rendering index. The white light source comprises two LED heterostructure crystals based on GaN, emitting blue and green light, which are housed in a common metal-polymer casing and coated with a phosphor composition containing red and yellow phosphors. The study demonstrates that optimizing the ratio of red to yellow phosphors, as well as the binding silicone, enables the achievement of a high color rendering index while maintaining the desired color temperature. Specifically, the formulation consisting of 9 % yellow phosphor, 1 % red phosphor, and 90 % silicone filler in the phosphor-

composition resulted in a color temperature of 4500 K for the dual-crystal light source, along with a color rendering index of 94.

Keywords: semiconductor white light source; LED; phosphor composition.

REFERENCES

1. Schubert E. F., Kim J. K., Luo H. and Xi J. Q., Rep. Prog. Phys. **69**, 3069–3099 (2006).
2. Cengiz C., Azarifar M. and Arik M., Micromachines **13**, 1615 (2022).
3. Jargus J., Vitasek J., Nedoma J., Vasinek V. and Martinek R., Materials **12**, 2095 (2019).
4. Xie B., Wang Y. J., Liu H. C., Ma J. L., Zhou S. L., Yu X. J., Lan W., Wang K., Hu R. and Luo X. B., Chem. Eng. J. **427**, 130958 (2022).
5. Nair G. B., Swart H. C. and Dhoble S. J., Device Fabrication and Characterization. Prog. Mater. Sci. **109**, 100622 (2020).
6. Measuring complex IS-2 [Electronic resource]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/73266-18-is-2> (date of access: 12.07.2024).