

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОНОХРОМНЫХ ЧИПОВ И ЧИПОВ С ЛЮМИНОФОРОМ

К.А. Виноградова^{1,2,3*}, Л.А. Никулина², К.Д. Мынбаев^{1,2,3}, А.Р. Ковш^{1,2},
М.А. Одноблюдов^{1,2}, В.И. Николаев^{1,3,4}, В.Е. Бугров^{1,2}

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики, Кронверкский пр. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия

²Группа компаний «Оптоган», Таллинское ш. 206, Санкт-Петербург, 198205, Россия

³Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Политехническая ул. 26,
Санкт-Петербург, 194029, Россия

⁴ООО "Совершенные Кристаллы", Политехническая ул. 28 Литер А, Санкт-Петербург, 194064, Россия

*e-mail: Kseniia.Vinogradova@niuitmo.ru

Аннотация. Проведено сравнение энергоэффективности двух красно–синих светодиодных систем, перспективных для применения в качестве источников света для растениеводства закрытого грунта. В первой системе использовано три вида светодиодных чипов, излучавших на длинах волн соответственно 455, 660 и 730 нм, а во второй – синие светодиодные чипы (455 нм) и красный люминофор с длиной волны излучения 670 нм. Исследования показали, что при одинаковых пропорциях излучения на заданных длинах волн, «чиповая» система эффективнее «люминофорной» на 5 % при концентрации люминофора в защитном полимере 1 %, и на 8 % при концентрации люминофора 10 %.

1. Введение

Светодиодные излучатели в настоящее время привлекают всё больший интерес как источники света для использования в специальных приложениях, где требуются особые спектральные характеристики излучателей. Например, известно, что кривая фоточувствительности растений (фотосинтеза) имеет два основных максимума, приходящихся на область синего и красного света, поэтому облучение растений в теплицах белым светом энергетически неэффективно [1–3]. Кроме того, использование белого света не позволяет использовать регуляторную функцию света, то есть управлять процессами жизнедеятельности растений для целей повышения урожайности и сокращения сроков их вызревания путем использования определенных спектральных линий (см., например, [4, 5]).

Особые свойства светодиодов, такие, как узкий спектр излучения (полуширина линии порядка 10–40 нм) и возможность излучения в диапазоне длин волн от ультрафиолетового до инфракрасного, сделали их привлекательными для разработки осветительных устройств для агропромышленных технологий. В настоящее время светодиодные технологии приблизились к порогу массовой коммерциализации, что обусловлено проявившейся около 5 лет назад тенденцией к резкому увеличению

эффективности синих светодиодных чипов, изготавливаемых на основе твердых растворов нитридов галлия, алюминия и индия [6]. Красные светодиодные чипы, изготавливаемые на основе более узкозонных полупроводниковых материалов (например, AlInGaP), также обладают эффективностью, достаточной для использования в тепличных облучателях [7]. Большинство коммерчески доступных светодиодных систем для теплиц базируется на комбинации синих и красных светодиодных чипов, причем пропорции интенсивности синего и красного света могут изменяться. Недостатки таких систем, аналогично стандартным RGB–системам получения белого света, связаны с необходимостью разработки раздельных схем питания красных и синих светодиодов или светодиодных сборок, и различной стабильностью работы этих светодиодов во времени. В связи с этим представляет интерес разработка светодиодных устройств для тепличных облучателей, использующих для получения красного спектра не специальные чипы, а люминофоры. Такой подход позволил бы снизить расходы на изготовление тепличных светодиодных излучателей и упростить технологию их изготовления. Однако поскольку при люминофорном преобразовании длины волн света часть его энергии теряется на стоксов сдвиг, эффективность подобных систем требует особого внимания. Целью настоящего исследования и являлось определение энергоэффективности двух осветительных систем, первая из которых использовала в качестве осветительного элемента набор светодиодных чипов, а вторая — синие светодиодные чипы и красный люминофор.

2. Эксперимент

2.1. Экспериментальные образцы. Для исследований эффективности были изготовлены две осветительные системы. В первой из них, «чиповой», были использованы стандартные светодиодные чипы синего света с пиковой длиной волны излучения $\lambda = 455$ нм, красные чипы с $\lambda = 660$ нм и чипы дальнего красного света с $\lambda = 730$ нм. Вторая система, которую мы будем далее называть «люминофорной», базировалась на синих чипах с $\lambda = 455$ нм и красном нитридном люминофоре с пиковой длиной волны излучения 670 нм.

Образцы для «чиповой» системы были изготовлены следующим образом. Чипы помещались в идентичные корпуса с использованием термоочувствительного адгезива, по одному в каждый корпус. Корпуса нагревались до температуры полимеризации адгезива. После плазменной очистки к чипам методом термоультразвуковой микросварки приваривались контакты, и чипы в корпусах покрывались прозрачным двухкомпонентным полимером. Формирование оптического покрытия на основе этого полимера осуществлялось при помощи технологии молдинга одновременно для всех 72 образцов, вовлеченных в исследование; получившееся в результате покрытие имело коэффициент преломления 1.4 и толщину 0.8 мм.

«Люминофорные» системы изготавливались аналогичным образом, с той лишь разницей, что использовались только синие чипы, а в полимер, наносимый на корпуса, добавлялся порошок красного нитридного люминофора в количестве, требуемом для достижения необходимой концентрации: 1, 2, 4, 6, 8 и 10 %. Для экспериментов было изготовлено по 72 образца для каждой концентрации люминофора.

2.2. Методика измерений. Электрические и оптические параметры образцов измерялись на номинальном токе в 350 мА для каждого чипа. Для исключения тепловых эффектов измерения проводились в импульсном режиме. Измерительная система включала спектрорадиометр ORB Optronix SP-75, позволявший производить измерения в спектральном диапазоне 250–1000 нм, 50-санитметровую интегрирующую сферу Gamma Scientific, источник питания Keithley 2601A и программный пакет обработки экспериментальных данных Spectral Suite 3.0.

3. Экспериментальные результаты

Для того чтобы можно было сравнивать эффективность «люминофорной» и «чиповой» систем, из полученных спектров распределения оптической мощности по длинам волн излучения вычислялись мощности, приходящиеся на следующие диапазоны: 400–500 нм (синий), 580–690 нм (красный), 691–770 нм (дальний красный). Полученные мощности суммировались для определения общей мощности. Усредненные по 72 образцам оптические и электрические характеристики люминофорных систем представлены в таблице 1.

Измеренные характеристики единичных чипов, при объединении которых получается чиповая система, представлены в таблице 2. Дополнительно в таблицах введена графа с общей мощностью излучения для демонстрации мощности, не учитываемой в расчётах.

В таблице 1 обозначены: С — концентрация люминофора, ΔP — оптическая мощность в заданном диапазоне длин волн, P_c — приведенная оптическая мощность, рассчитанная для диапазонов длин волн 400–500 нм, 580–690 нм и 691–770 нм, P_{opt} — оптическая мощность в диапазоне длин волн 350–900 нм, I — ток через светодиодный чип в прямом направлении, U — падение напряжения при заданном токе, P_{el} — электрическая мощность, WPE — эффективность (КПД), рассчитанная по формуле: $WPE = 100 \cdot (P_c / P_{el})$. В таблице 2 λ — пиковая длина волны чипа, остальные обозначения соответствуют обозначениям, принятым в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения оптических и электрических характеристик люминофорных систем при концентрации люминофора С, равной 1, 2, 4, 6, 8 и 10 %.

C, %	ΔP , Вт			P_c , Вт	P_{opt} , Вт	I, А	U, В	P_{el} , Вт	WPE, %
	400-500 нм	580-690 нм	691-770 нм						
1	0.197	0.112	0.057	0.366	0.38	0.35	3.17	1.1	33
2	0.133	0.134	0.068	0.336	0.35	0.35	3.15	1.1	30
4	0.061	0.147	0.076	0.284	0.297	0.35	3.16	1.1	26
6	0.035	0.144	0.077	0.256	0.268	0.35	3.15	1.1	23
8	0.013	0.137	0.075	0.225	0.237	0.35	3.16	1.1	20
10	0.005	0.127	0.071	0.204	0.215	0.35	3.15	1.1	19

Видно, что с увеличением концентрации люминофора в системе КПД снижается. Это связано с тем, что эффективность преобразования энергии чипом выше по сравнению с эффективностью преобразования энергии люминофором.

Таблица 2. Результаты измерения оптических и электрических характеристик образцов с чипами с пиковой длиной волны λ , равной 660, 730 и 456 нм.

λ , нм	ΔP , Вт			P_c , Вт	P_{opt} , Вт	I, А	U, В	P_{el} , Вт	WPE, %
	400-500 нм	580-690 нм	691-770 нм						
456	0.559	0	0	0.559	0.509	0.35	3.18188	1.1137	44
660	0	0.298	0	0.298	0.306	0.35	2.14565	0.751	40
730	0	0	0.118	0.118	0.174	0.35	2.01404	0.7049	24

Из результатов измерений видно, что наибольшим КПД обладают образцы на основе синих чипов — 44 %, эффективность образцов с пиковой длиной волны $\lambda = 660$ нм составляет 40 %, а эффективность образцов с чипами дальнего красного

света составляет только 24 %.

На рис. 1(а) показаны спектры индивидуальных светодиодных чипов с длинами волн 450, 660, 730 нм, а на рис. 1(б) представлены спектры светодиодов на базе синих чипов и красных люминофоров с концентрацией последних 1, 2, 4, 6, 8 и 10 %. Эти спектры получены от отдельных образцов, не объединенных в общую систему.

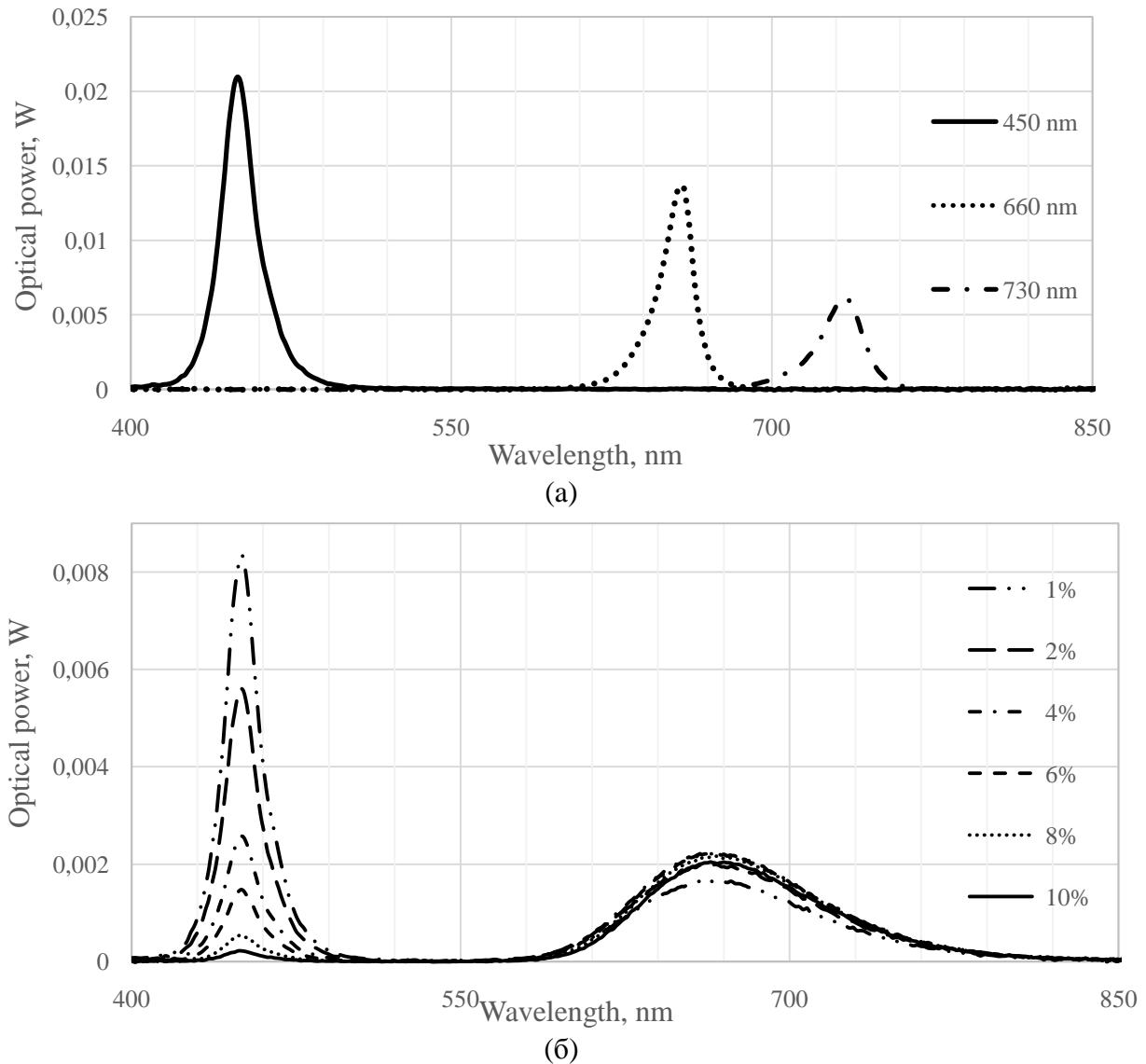


Рис. 1. Спектры светодиодных чипов с пиковыми длинами волн излучения 450, 660 и 730 нм (а) и спектры источников излучения на основе синих чипов и красного люминофора с концентрацией 1, 2, 4, 6, 8 и 10 % (б).

Для того чтобы иметь возможность сравнивать эффективности систем, нужно чтобы они обладали одинаковой мощностью излучения в трех рассматриваемых диапазонах. Поскольку мощность излучения в указанных диапазонах у «люминофорных» систем ниже по сравнению с мощностями излучения образцов чипов, для сравнения в ряде случаев использовано 3-х, 4-х или 5-ти кратное увеличение мощности «люминофорных» систем. На практике такая мощность реализуется использованием 3-х, 4-х или 5-ти «люминофорных» образцов, что приведёт к увеличению мощности потребления, но не скажется на КПД.

На основании проведенных вычислений были сформированы таблицы сравнения данных. Они сведены в таблицу 3, где использованы следующие обозначения: С —

«люминофорная» система, с которой проводится сравнение («люминофорные» системы различаются по концентрации люминофора), N — количество «люминофорных» систем для достижения сравнимой мощности излучения в трех рассматриваемых диапазонах и общей мощности излучения, X — коэффициент использования оптической и электрической мощности чипов для получения мощности излучения, равной мощности излучения «люминофорной» системы, P_{opt} — мощность излучения полученных систем, P_{el} — мощность потребления полученных систем, η — превышение мощности потребления «люминофорной» системы по сравнению с «чиповой», определяемое как: $\eta = 100 \cdot (P_{el(phosphor)} - P_{el(chip)})/P_{el(chip)}$, где $P_{el(phosphor)}$ — мощность потребления «люминофорной» системы, $P_{el(chip)}$ — мощность потребления «чиповой» системы, WPE — эффективность (КПД); ΔWPE — разница в КПД, равная $\Delta WPE = WPE_{(chip)} - WPE_{(phosphor)}$, где $WPE_{(chip)}$ и $WPE_{(phosphor)}$ есть КПД «чиповой» и «люминофорной» систем соответственно.

Таблица 3. Конструктивные, электрические и оптические характеристики изготовленных систем.

C	Конструктивные характеристики систем		Электрические и оптические характеристики систем					
			P_{opt} , Вт	P_{el} , Вт	WPE, %	η , %	ΔWPE , %	
1%	N	3	1.1	3.32	33	29	5	
	X	445 нм	1	0.98	2.57	38		
		660 нм	1					
		730 нм	1					
2%	N	3	1.01	3.31	30	29	8	
	X	445 нм	1	0.98	2.57	38		
		660 нм	1					
		730 нм	1					
4%	N	4	1.14	4.42	26	17	4	
	X	445 нм	0.44	1.14	3.79	30		
		660 нм	0.59					
		730 нм	0.31					
6%	N	4	1.02	4.41	23	24	6	
	X	445 нм	0.25	1.02	3.56	29		
		660 нм	1.93					
		730 нм	2.59					
8%	N	5	1.12	5.53	20	35	7	
	X	445 нм	0.12	1.12	4.09	27		
		660 нм	2.30					
		730 нм	3.17					
10%	N	5	1.02	5.50	19	45	8	
	X	445 нм	0.05	1.02	3.78	27		
		660 нм	2.13					
		730 нм	3.02					

Как видно из таблицы 3, для того, чтобы сравнить «люминофорную» систему с концентрацией люминофора 1 % и систему, состоящую из 3-х видов чипов, нужно

взять три единичные «люминофорные» системы и по одному образцу различных чипов, в этом случае мощность излучения в диапазонах 400-500 нм, 580-690 нм, 691-770 нм будет равной, равной будет и суммарная мощность излучения систем P_{opt} . Электрическая мощность P_{el} «люминофорной» системы возрастёт в три раза, в то время как мощность излучения «чиповой» системы будет складываться из мощности потребления образцов, созданных на разных чипах. Из полученных значений видно, что при меньшем на 5 % значении КПД у люминофорной системы (ΔWPE), мощность электропотребления у неё на 29 % выше (η).

Использование доли оптической и электрической мощности чипов в рассматриваемых системах, характеризуемое коэффициентом X , приведенным в таблице 3, обусловлено принятым в расчетах допущением о том, что мощность излучения в рабочем режиме светодиодов линейно зависит от потребляемой мощности, как показано на рис. 2(а) [8].

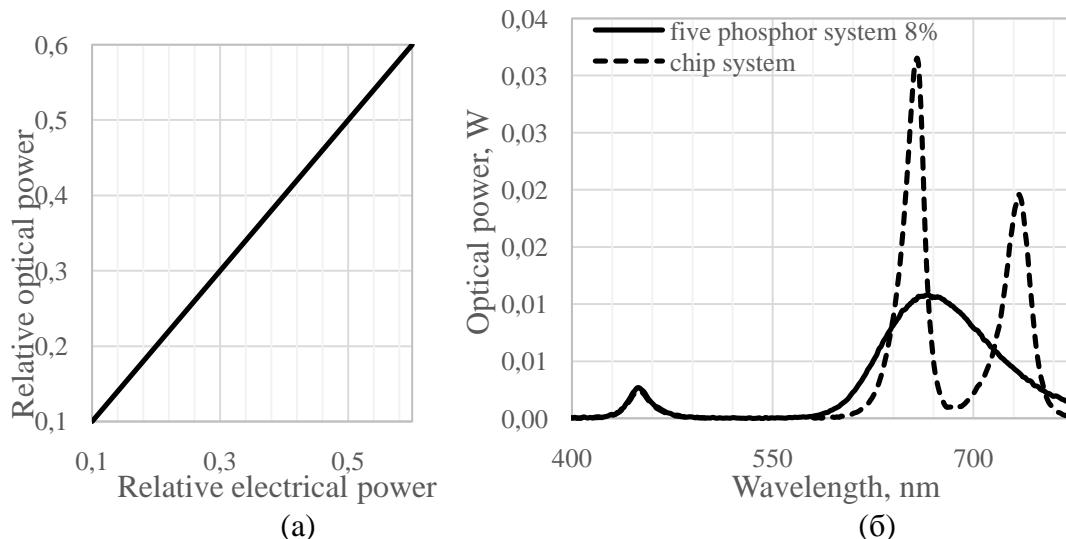


Рис. 2. Изменение оптической мощности при изменении электрической, применяемое при расчёте коэффициента использования мощности чипов различных видов (а) и спектры излучения 8 %-ной «люминофорной» системы и «чиповой» системы при равенстве мощности излучения в рассматриваемых диапазонах (б).

В качестве наглядной демонстрации сравнения спектров двух систем на рис. 2(б) приведён спектр «люминофорной» системы с концентрацией люминофора 8 % и спектр «чиповой» системы, мощности излучения которых в рассматриваемых диапазонах 400 - 500 нм, 580 - 690 нм, 691 - 770 нм равны.

На рис. 3 показаны зависимости КПД «люминофорной» и «чиповой» систем и избыточно потребляемой электрической мощности «люминофорной» системы по отношению к «чиповой» η от концентрации люминофора. Для «чиповых» систем представлен КПД систем, у которых мощность излучения в рассматриваемых диапазонах равна мощности «люминофорных» систем с соответствующей концентрацией люминофора. Рисунок визуализирует тенденции, представленные в таблице 3. Как видно, КПД «чиповой» системы выше КПД «люминофорной» для всех использованных концентраций люминофора, причем разница в КПД становится выше при использовании концентрации люминофора 8 % и 10 %. Что касается потребления электрической энергии, она всегда выше для «люминофорных» систем и составляет, например, 29 и 45 % при концентрациях люминофора 1 и 10 % соответственно. В то же время, проведенное исследование показало, что это различие имеет минимум при концентрации люминофора 4 %.

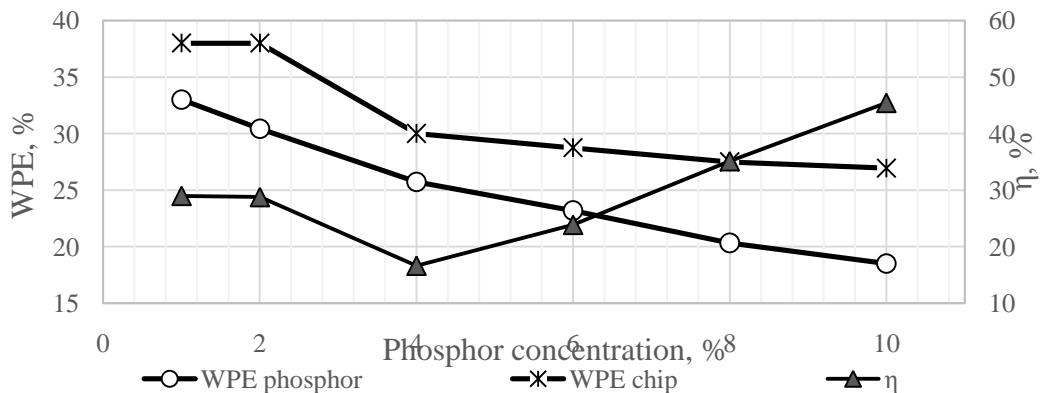


Рис. 3. Зависимости от концентрации люминофора КПД «люминофорной» и «чиповой» систем (левая ось ординат) и избыточного потребления электрической мощности «люминофорной» системой по сравнению с «чиповой» системой η (правая).

4. Заключение

В работе было проведено сравнение эффективности (КПД) двух светодиодных систем, предназначенных для изготовления тепличных излучателей: «чиповой» на основе трёх светодиодных чипов, излучавших на пиковых длинах волн 455, 660 и 730 нм, и «люминофорной», на основе синего светодиодного чипа и красного люминофора с концентрацией последнего в прозрачном полимере, варьировавшейся от 1 до 10 %. Было установлено, что КПД «чиповой» системы во всех случаях был выше, чем «люминофорной». Электрическая мощность, потребляемая «люминофорной» системой, возрастала по мере увеличения концентрации люминофора и достигала 145 % от мощности, потреблявшейся «чиповой» системой, при концентрации люминофора 10 %. Тем не менее, результаты работы в целом говорят о перспективности «люминофорных» систем для создания светодиодных тепличных излучателей и необходимости проведения дальнейших исследований по увеличению эффективности преобразования света в оптическом покрытии с люминофором и влиянию полученного спектра на жизнедеятельность растений.

Работа выполнена на кафедре светодиодных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту «Интеллектуальные системы энергоэффективного сельскохозяйственного производства в закрытом грунте с использованием светодиодного освещения», договор № 02.Г25.31.0090 в рамках постановления Правительства РФ № 218.

Литература

- [1] K.J. Bergstrand, H.K. Schussler // *European Journal of Horticultural Science* **78** (2013) 119.
- [2] M. Olle, A. Viršille // *Agricultural and Food Science* **22** (2013) 223.
- [3] C.A. Mitchell, A.-J. Both, C.M. Bourget, J.F. Burr, C. Kubota, R.G. Lopez, R.C. Morrow, E.S. Runkle // *Chronica Horticulturae* **52** (2012) 6.
- [4] M.A. Islam, G. Kuwar, J.L. Clarke, D.-R. Blystad, H.R. Gislerod, J.E. Olsen, S. Torre // *Scientia Horticulturae* **147** (2012) 136.
- [5] K.M. Folta, K.S. Childers // *HortScience*. **43** (2008) 1957.
- [6] В.Е. Бугров, *Физические основы оптимизации нитридных полупроводниковых гетероструктур для их применения в высокоэффективных светодиодных устройствах*. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт - Петербург, 2013).

- [7] G. Tamulaitis, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, K. Breivé, R. Ulinskaitė, A. Brazaitytė, A. Novičkovas, A. Žukauskas // *Journal of Physics D: Applied Physics* **38** (2005) 3182.
- [8] Ф.Е. Шуберт, *Светодиоды* (Издательство «Физматлит», Москва, 2008).

EFFICIENCY COMPARISON OF LIGHT EMITTING DIODES BASED ON MONOCHROMATIC CHIPS AND CHIPS WITH PHOSPHOR

**K.A. Vinogradova^{1,2,3*}, L.A. Nikulina¹, K.D. Mynbaev^{1,2,3}, A.R. Kovsh^{1,2},
M.A. Odnoblyudov^{1,2}, V.I. Nikolaev^{2,3,4}, V.E. Bougrov^{1,2}**

¹Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,

Kronverskii avenue 49, St. Petersburg, 197101, Russia

²Optogan Gpoup, Tallinskoe shosse 206, St. Petersburg, 198205, Russia

³Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Polytechnicheskaya street 26,
St. Petersburg, 194029, Russia

⁴LLC Perfect Crystals, Polytechnicheskaya street 26 A, St. Petersburg, 194064, Russia

*e-mail: Kseniia.Vinogradova@niuitmo.ru

Abstract. We have considered energy efficiency of two red-blue LED-based lighting systems prospective for use in horticulture. The first one used LED chips emitting at 455, 660 and 730 nm, and the second one was based on blue 455 nm chips and a red phosphor with peak emission wavelength of 670 nm. The research has shown that at equal emission proportions at the specified peak wavelengths, the chip solution was 5 % more energy-efficient at phosphor concentration of 1 %, and 8 % more efficient at 10 % of phosphor.

This work has been carried out at the Department of LED technology of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, with financial support by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the project “Intelligent system of energy-efficient agricultural production using LED lighting” according to the contract with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 02.G25.31.0090 in accordance with the Resolution of the Russian Government # 218.

References

- [1] K.J. Bergstrand, H.K. Schussler // *European Journal of Horticultural Science* **78** (2013) 119.
- [2] M. Olle, A. Viršille // *Agricultural and Food Science* **22** (2013) 223.
- [3] C.A. Mitchell, A.-J. Both, C.M. Bourget, J.F. Burr, C. Kubota, R.G. Lopez, R.C. Morrow, E.S. Runkle // *Chronica Horticulturae* **52** (2012) 6.
- [4] M.A. Islam, G. Kuwar, J.L. Clarke, D.-R. Blystad, H.R. Gislerod, J.E. Olsen, S. Torre // *Scientia Horticulturae* **147** (2012) 136.
- [5] K.M. Folta, K.S. Childers // *HortScience* **43** (2008) 1957.
- [6] V.E. Bougrov, *Physical basis for optimization of nitride semiconductor heterostructures for highly efficient LED devices*. Post-doctorate Habilitation thesis (Ioffe Institute, St.Petersburg, 2013).
- [7] G. Tamulaitis, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, K. Breivé, R. Ulinskaitė, A. Brazaitytė, A. Novičkovas, A. Žukauskas // *Journal of Physics D: Applied Physics*. **38** (2005) 3182.
- [8] E.F. Schubert, *Light Emitting Diodes* (Cambridge University Press, 2003).