

УДК 629.78; 621.32

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-734-746

Для цитирования: Специализированная светодиодная сборка имитатора внеатмосферного солнечного излучения / А. А. Шевчук, В. В. Двирный, М. С. Майбах и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 4. С. 734–746. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-734-746.

For citation: Shevchuk A. A., Dvirnyi V. V., Maybakh M. S. et al. [Specialized LED assembly for out-atmospheric solar simulator]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 4, P. 734–746. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-4-734-746.

Специализированная светодиодная сборка имитатора внеатмосферного солнечного излучения

А. А. Шевчук^{1,2*}, В. В. Двирный^{1,2,3}, М. С. Майбах⁴, С. А. Санько⁴, А. А. Павлова⁴

¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31

³Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

⁴АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»
Российская Федерация, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а

*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Традиционные имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов построены на основе газоразрядных ламп, которые в силу своих особенностей могут быть размещены только за пределами термовакуумной камеры. Альтернативные твердотельные источники – высокоэффективные светодиоды – могут быть размещены непосредственно в термовакуумной камере, что позволит значительно повысить световые и эксплуатационные характеристики имитаторов солнечного излучения. Одной из первоочередных и наиболее сложных задач при обеспечении соответствия световых характеристик имитатора солнечного излучения предъявляемым требованиям следует считать получение спектра, близкого к спектру Солнца внеатмосферных условий (АМ0). В статье рассмотрены спектральные характеристики предложенной ранее модели комбинированного излучателя, состоящего из галогенных ламп и сборок высокоэффективных светодиодов различных длин волн. Предложена методика определения спектрального соответствия для имитаторов солнечного излучения АМ0. Определены требования к светодиодным сборкам для применения в предложенном комбинированном излучателе. В экспериментальной части измерены спектральные характеристики образцов галогенных ламп и светодиодных сборок, по результатам измерений проведено моделирование комбинированного излучателя. При моделировании с образцом наиболее подходящей серийно производимой светодиодной сборки, на номинальном уровне мощности галогенных ламп достигнуто хорошее спектральное соответствие, которое со снижением мощности ламп значительно ухудшается. В то же время многие программы и методики термовакуумных испытаний требуют имитации солнечного излучения с различными уровнями энергетической освещенности. С учетом полученных результатов авторами разработана экспериментальная светодиодная сборка, предназначенная для применения в комбинированном излучателе. Моделирование с экспериментальной светодиодной сборкой показало лучшие результаты; требуемое спектральное соответствие сохраняется на различных уровнях световой мощности. Достигнутые характеристики разработанной светодиодной сборки не предельны и могут быть улучшены путем дальнейшей оптимизации.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения, светоизлучающий диод, светодиодная сборка, галогенная лампа, спектральное соответствие.

Specialized LED assembly for out-atmospheric solar simulator

A. A. Shevchuk^{1,2*}, V. V. Dvirnyi^{1,2,3}, M. S. Maybakh⁴, S. A. San'ko⁴, A. A. Pavlova⁴

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³Siberian Federal University
79, Svobodnyi prospekt, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

⁴JSC “Research Institute of Semiconductor Devices”
99a, Krasnoarmeyskaya St., Tomsk, 634034, Russian Federation

*E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru

Traditional solar simulators for thermal vacuum tests of spacecraft are based on gas-discharge lamps. Due to the characteristics of such lamps, they can only be installed outside the thermal vacuum chamber. High-efficiency LEDs can be installed directly in the thermal vacuum chamber, which can significantly improve the luminous and operational characteristics of solar simulators. Obtaining a spectrum close to the spectrum of the extraterrestrial Sun (AM0) is one of the primary and most difficult tasks in ensuring that the luminous characteristics of the solar simulator meet the requirements. The article considers a previously proposed model of a combined emitter consisting of halogen lamps and assemblies of high-performance LEDs of various wavelengths. We have proposed a method for determining the spectral match for AM0 solar simulators and determined the requirements for LED assemblies intended for use in the combined emitter. Simulation with a sample of the most suitable commercially available LED assembly, at the nominal power level of halogen lamps, showed a good spectral match, which deteriorates significantly with decreasing lamp power. At the same time, many programs and methods of thermal vacuum tests require simulation of different irradiance levels. Taking this into account, the authors developed an experimental LED assembly. Simulation of the combined emitter with this LED assembly showed the best results. The required spectral match is maintained at various irradiance levels. The achieved characteristics of the developed LED assembly are not limiting and can be improved by further optimization.

Keywords: thermal vacuum tests, solar simulator, light emitting diode, LED assembly, halogen lamp, spectral match.

Введение

В предыдущих работах [1; 2] показано, что основным препятствием к дальнейшему повышению световых и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения (ИСИ) для термовакуумных испытаний (ТВИ) космических аппаратов (КА) является размещение световых источников ИСИ за пределами термовакуумной камеры. В свою очередь, это обусловлено особенностями практически безальтернативно применяемых в качестве световых источников газоразрядных ксеноновых ламп, крайне редко – газоразрядных металлогалогенных ламп [3]. Для получения рабочего поля в термовакуумной камере применяют сложную оптическую систему с большим количеством отражающих и преломляющих оптических элементов, что приводит к высоким потерям светового потока. Как правило, даже при тщательном изготовлении элементов таких ИСИ их КПД составляет около 10 % [4].

К отечественным ИСИ для ТВИ КА, в частности, к действующим в Акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»), в части основных световых характеристик предъявляются следующие требования:

- непараллельность светового потока до 4°;
- уровень энергетической освещенности (ЭО) 1340-1440 Вт/м²;
- неравномерность распределения ЭО в пределах рабочего поля до 15 %;
- спектральный диапазон, близкий к диапазону солнечного излучения, в области 200–2000 нм [5].

Появление в последнем десятилетии новых разработок высокоэффективных светодиодов делает возможным создание на их основе простого и эффективного ИСИ [6; 7]. В отличие от традиционных, такой ИСИ может быть адаптирован к работе в условиях термовакуумных испытаний, непосредственно в термовакуумной камере [1; 2]. Как один из наиболее рациональных вариантов, в [2] предложена конструкция излучателя ИСИ в виде двухмерного массива (матрицы) с распределенными параметрами из множества точечных световых источников. Каждый такой источник оснащен простым первичным оптическим элементом. В случае, если расстояние до объекта испытаний (ОИ) многократно превышает расстояние между соседними точечными источниками матрицы, их световые потоки, многократно смешиваясь, образуют на ОИ однородное рабочее поле (рис. 1).

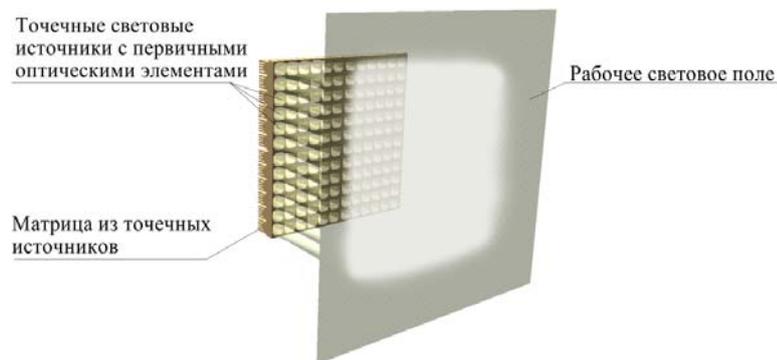


Рис. 1. Излучатель ИСИ в виде матрицы из точечных источников

Fig. 1. Emitter of solar simulator in the form of a matrix of point sources

Для полноценной имитации теплового воздействия Солнца на ОИ необходимо имитировать солнечное излучение в широком, включающем инфракрасную область, диапазоне. Для этого в матрице с равномерным чередованием размещены светодиодные сборки высокой мощности из кристаллов различных длин волн преимущественно видимой области и галогенных ламп преимущественно инфракрасной области солнечного спектра. Такое решение известно [8; 9] и оправдано, в частности, тем, что в настоящий момент наиболее отработаны, эффективны и коммерчески доступны светодиоды видимой части спектра. Низкая эффективность, узкая полоса излучения и высокая стоимость инфракрасных светодиодов делает их применение неоправданным. В то же время галогенные лампы являются практически идеальными и недорогими источниками инфракрасного излучения.

В работах [2; 10] проведены измерения световых характеристик двух выбранных образцов зарубежного производителя OSRAM – светодиодной сборки высокой мощности и галогенной лампы. На основе этих измерений в специализированном ПО для оптического проектирования Zemax выполнено моделирование комбинированного матричного излучателя ИСИ. Результаты показали, что световые характеристики модели в части непараллельности светового потока, уровня и неравномерности распределения ЭО соответствуют предъявляемым к ИСИ для ТВИ КА требованиям или превосходят их. Но не менее важны спектральные характеристики ИСИ. Так, при использовании на ОИ различных спектрально селективных отражающих и поглощающих покрытий низкое спектральное соответствие ИСИ неизбежно увеличит общую погрешность имитации теплового воздействия на ОИ реального солнечного излучения.

Непараллельность светового потока и неравномерность распределения ЭО определяются геометрическими параметрами матрицы и свойствами первичных оптических элементов. В свою очередь, спектральный диапазон и спектральное соответствие ИСИ определяются соответствующими характеристиками применяемых световых источников – галогенных ламп и светодиодныхборок.

Максимум излучения галогенных ламп сосредоточен в инфракрасной области. Спектр галогенных ламп весьма равномерен и, подобно спектру Солнца, близок к спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ), но с более низкой цветовой температурой. Наоборот, результирующий спектр светодиодной сборки в видимой области более сложен и значительно отличается от спектра АЧТ, поскольку складывается из излучения нескольких кристаллов различных длин волн.

Равномерность спектра сборки находится в прямой зависимости от количества длин волн используемых кристаллов. С другой стороны, ИСИ для ТВИ КА должен обеспечивать высокую направленность светового потока. Это ограничивает количество кристаллов в сборке, поскольку она должна иметь малый, приближающийся к точечному, размер излучающей поверхности, позволяющий установить на сборку единый первичный оптический элемент с малым углом распределения [2; 10].

Таким образом, обязательным требованием к светодиодным сборкам для комбинированного ИСИ, вместе с соответствием световых характеристик, следует считать оптимальное сочетание количества составляющих сборку кристаллов, длин их волн и минимально возможного размера излучающей поверхности.

Спектральное соответствие ИСИ и методика его определения

Следует отметить, что на сегодняшний день световые характеристики ИСИ для ТВИ КА не регламентируются государственными стандартами. Также не регламентируются спектральные характеристики применяемых в таких ИСИ газоразрядных, в подавляющем большинстве случаев - ксеноновых ламп, поскольку считается, что их спектр достаточно близок к внеатмосферному спектру Солнца. Однако при использовании альтернативных световых источников с другими характеристиками неизбежно возникает необходимость в подтверждении спектрального соответствия ИСИ.

Наиболее близок действующий ГОСТ 60904, идентичный международному стандарту МЭК 60904, который классифицирует характеристики ИСИ наземных условий АМ 1,5 (англ. Air Mass 1,5) для испытания фотоэлектрических устройств, главным образом – солнечных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), и определяет методы измерения световых характеристик таких ИСИ [11].

Так, спектральное соответствие ИСИ условий АМ1,5 оценивается в диапазоне длин волн 400–1100 нм по следующей методике:

– спектр ИСИ в общем диапазоне 400–1100 нм разделен на шесть отдельных поддиапазонов: 400–500, 500–600, 600–700, 700–800, 800–900 и 900–1100 нм. Измеряют значения спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) ИСИ как в общем диапазоне, так и в каждом поддиапазоне. Методы измерения могут быть основаны на использовании спектрометра, состоящего из дифракционного монохроматора и приемника излучения; спектрометра на основе ПЗС-матрицы или светодиодной линейки; набора приемников с полосовыми фильтрами; единичного приемника с набором полосовых фильтров. Интегрируют полученные данные СПЭО и получают таким образом значение ЭО во всем диапазоне 400–1100 нм и значения ЭО каждого из шести отдельных поддиапазонов:

$$E = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где E – ЭО всего диапазона или отдельного поддиапазона, Вт/м²; λ_{\min} и λ_{\max} – начальная и конечная длины волн общего диапазона или поддиапазона, нм; $I(\lambda)$ – СПЭО или интенсивность солнечного излучения на единицу длины волны, Вт/м²·нм;

– определяют процентный вклад ЭО каждого поддиапазона в ЭО всего диапазона 400–1100 нм:

$$K_E = \frac{E_N}{E_{\text{общ}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где K_E – вклад ЭО отдельного поддиапазона в ЭО всего диапазона, %; E_N – ЭО отдельного поддиапазона, рассчитанная по формуле (1), Вт/м²; $E_{\text{общ}}$ – ЭО всего диапазона, рассчитанная по формуле (1), Вт/м²;

– для каждого отдельного поддиапазона ИСИ находят значение спектрального соответствия:

$$K_C = \frac{K_{E(\text{ИСИ})}}{K_{E(\text{AM1,5})}}, \quad (3)$$

где K_C – спектральное соответствие отдельного поддиапазона; $K_{E(\text{ИСИ})}$ – вклад ЭО данного поддиапазона в общую ЭО в спектре ИСИ в диапазоне 400–1100 нм; $K_{E(\text{AM1,5})}$ – известный, указанный в [11] вклад ЭО того же поддиапазона в общую ЭО в спектре Солнца AM1,5;

– определяют класс спектрального соответствия ИСИ по наихудшему значению спектрального соответствия K_C всех шести отдельных поддиапазонов. Для высшего класса А значение спектрального соответствия должно находиться в пределах 0,75–1,25, для класса В – в пределах 0,6–1,4; для класса С – в пределах 0,4–2,0.

По нашему мнению, данная методика корректна и может быть принята за основу для определения спектрального соответствия ИСИ для ТВИ КА с небольшими изменениями:

– ФЭП крайне чувствительны к спектру принимаемого излучения. Для оценки теплового воздействия ИСИ на ОИ классы спектрального соответствия А и В избыточны и критерием соответствия может быть принят начальный класс С;

– узкий спектральный диапазон 400–1100 нм соответствует границам спектральной чувствительности ФЭП. Тепловое воздействие Солнца происходит в более широком диапазоне длин волн, включающем инфракрасную область. Поэтому соответствие следует определять в более широком диапазоне – как минимум, до 2000 нм;

– при расчете спектрального соответствия по формуле (3) следует учитывать отличие спектрального распределения солнечного излучения внеатмосферных условий AM0 (англ. Zero Air Mass) от спектрального распределения наземных условий AM1,5, для чего применять соответствующие значения $K_{E(\text{AM0})}$.

Авторами предложена следующая методика определения спектрального соответствия ИСИ для ТВИ КА (далее – методика):

– спектральное соответствие ИСИ определяется в диапазоне длин волн 400–2000 нм, который делится на восемь отдельных поддиапазонов. Вклады ЭО каждого поддиапазона в общую ЭО всего диапазона 400–2000 нм $K_{E(\text{AM0})}$ рассчитаны в соответствии с описанием внеатмосферного солнечного спектра AM0 в международном стандарте ASTM E490-2022 [12]. Границы поддиапазонов и соответствующие им значения $K_{E(\text{AM0})}$ приведены в табл. 1;

– условием подтверждения спектрального соответствия ИСИ считать определенные по формулам (1)–(3) значения $K_{E(\text{AM0})}$ всех восьми поддиапазонов, не выходящие за пределы 0,4–2,0.

Таблица 1

Распределение ЭО солнечного спектра AM0 в диапазоне 400–2000 нм

Распределение спектра	Поддиапазон, нм								Весь диапазон, 400–2000 нм
	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100	1100-1400	1400-2000	
$K_{E(\text{AM0})}$, %	15,8	15,7	13,5	10,8	8,7	12,7	11,8	11,0	100

Пользуясь методикой, определим спектральное соответствие газоразрядных ксеноновых ламп серии XBO производителя OSRAM [13], применяемых, в частности, в ИСИ для ТВИ КА, действующих в АО «ИСС». Спектральные распределения внеатмосферного солнечного

излучения условий АМ0 в соответствии с [12] и газоразрядных ксеноновых ламп OSRAM XBO с равными ЭО показаны на рис. 2. Рассчитанные в соответствии с методикой значения соответствия всех восьми поддиапазонов K_c находятся в пределах 0,6–1,7; условие спектрального соответствия ИСИ выполняется (табл. 2).

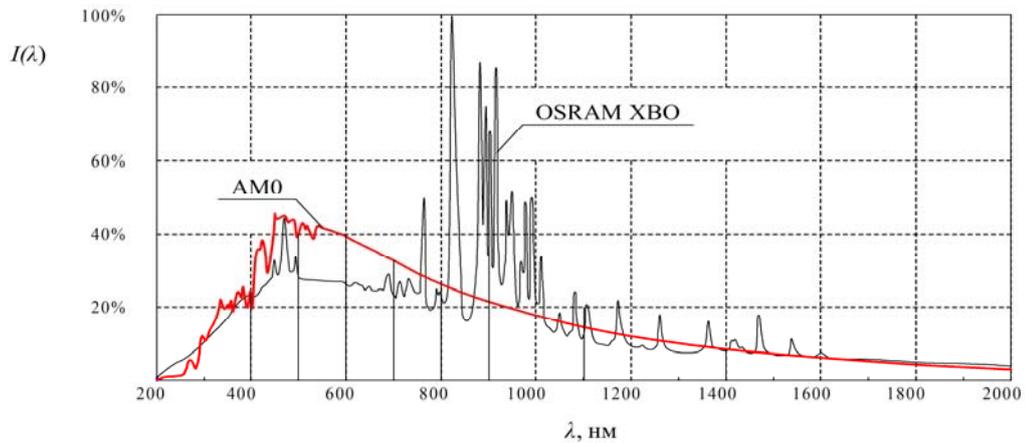


Рис. 2. Спектральные распределения солнечного излучения условий АМ0 и газоразрядных ксеноновых ламп OSRAM XBO

Fig. 2. AM0 and gas-discharge xenon lamps OSRAM XBO spectral distributions

Таблица 2

Спектральное соответствие АМ0 газоразрядных ксеноновых ламп OSRAM XBO

Распределение спектра и соответствие АМ0	Поддиапазон, нм								Весь диапазон, 400–2000 нм
	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100	1100-1400	1400-2000	
$K_{E(ИСИ)}$, %	10,8	10,1	9,5	9,4	15,2	20,3	11,2	13,5	100
K_c	0,7	0,6	0,7	0,9	1,7	1,6	0,9	1,2	0,6 – 1,7

Моделирование (серийно производимые образцы)

На первом этапе экспериментальной части за основу принято моделирование комбинированного излучателя ИСИ, проведенное ранее в работе [2]. Для моделирования выбраны автомобильные галогенные лампы дальнего света Н1 с осевым расположением нити накаливания производителя OSRAM. При номинальной потребляемой мощности 55 Вт цветовая температура T_c ламп равна 3500 К. После анализа последних разработок зарубежных производителей выбраны высокоэффективные светодиодные сборки LED Engin LZ7 производителя OSRAM [14] из семи кристаллов шести длин волн. Краткие характеристики составляющих сборку кристаллов приведены в табл. 3.

Спектральные распределения выбранных световых источников определены в нормальных условиях системой измерения спектра, в состав которой входят два монохроматора МДР-206 и ПК со специализированным ПО. Монохроматоры откалиброваны по эталонным световым источникам на основе лампы накаливания и дейтериевой лампы. Моделирование результирующего спектра комбинированного излучателя выполнено в математическом инженерном ПО Mathcad, при этом световые мощности кристаллов различных длин волн подобраны отдельно по отношению к световой мощности галогенных ламп. Такой способ регулировки спектра светодиодного ИСИ известен и реализован, в частности, в работе [15].

Полученный результирующий спектр модели комбинированного ИСИ и спектр солнечного излучения условий АМ0 с равными ЭО показаны на рис. 3. Раздельной регулировкой получено спектральное соответствие в пределах 0,6–1,4 (табл. 4, строка 1).

Состав светодиодной сборки LED Engin LZ7

Кристалл	Длина волны, нм	Количество в сборке	Прямое напряжение, В	Максимальный прямой ток, А
Синий	449	1	3,2	3
Бирюзовый	495	1	3,8	1
Зеленый	519	1	3,5	2,5
Салатовый	522	2	3,2	1,5
Янтарный	600	1	3,6	2,5
Красный	622	1	2,4	2,5

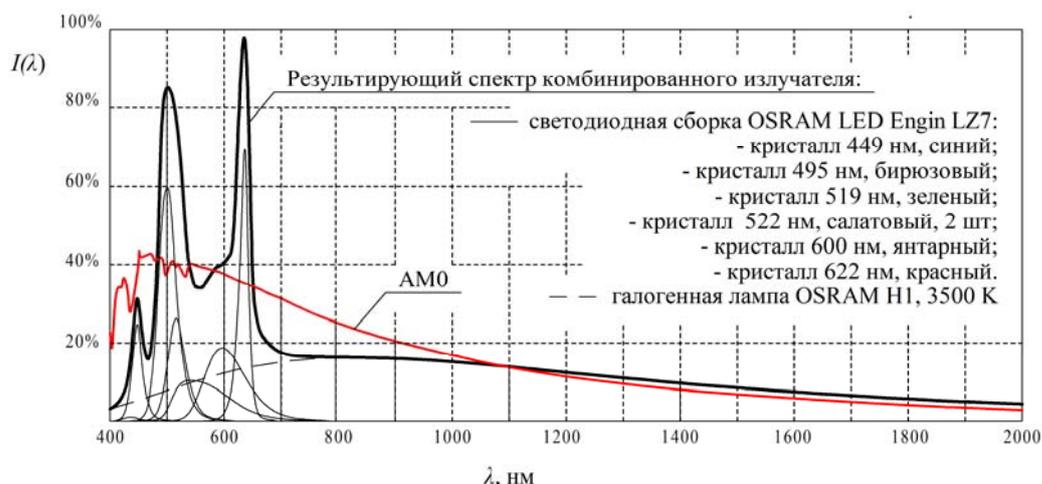


Рис. 3. Спектральные распределения солнечного излучения условий AM0 и комбинированного излучателя со светодиодной сборкой LED Engin LZ7 и галогенной лампой 3500 К

Fig. 3. Spectral distributions of AM0 and combined emitter with LED Engin LZ7 assembly and halogen lamp, 3500 K

Следует отметить, что цветовая температура галогенных ламп 3500 К достигается только при их номинальной мощности. Однако имитация солнечной постоянной с уровнем ЭО 1366 Вт/м² является частным случаем ТВИ КА. Многие программы и методики испытаний предусматривают снижение уровня ЭО, например, для имитации затенения ОИ или его поворота относительно Солнца [16]. Это требует снижения уровня ЭО ИСИ, а значит, и мощности световых источников.

Спектр светодиодов практически не зависит от уровня их мощности, чего нельзя сказать о галогенных лампах. Вместе со снижением мощности галогенной лампы происходит снижение ее цветовой температуры со смещением максимума излучения в сторону больших длин волн. Это может привести к рассогласованию галогенных ламп и светодиодных сборок и ухудшению спектрального соответствия ИСИ.

Известно также, что ресурс галогенных ламп находится в обратной зависимости от рабочей температуры нити накаливания. По этой причине в ИСИ крайне желательно применение галогенных ламп с более низкой, чем в модели, цветовой температурой.

В ходе дальнейшего моделирования цветовая температура $T_{Ц}$ галогенной лампы была снижена до значений 3000 и 2500 К (табл. 4, строки 2 и 3). Результаты показали ухудшение спектрального соответствия модели. При снижении $T_{Ц}$ до 3000 К спектральное соответствие ухудшилось до границ допустимых пределов, а при снижении до 2500 К – вышло за допустимые пределы 0,4–2,0. Это объясняется провалом результирующего спектра в области 700–900 нм, где и происходит согласование светодиодной сборки и галогенных ламп. Следовательно, для лучшего согласования с галогенными лампами спектр светодиодной сборки необходимо расширить в сторону дальней красной – ближней инфракрасной области.

Таблица 4

Спектральное соответствие модели со светодиодной сборкой LED Engin LZ7 и галогенными лампами 3500, 3000 и 2500 К

$T_{ц}, K$	Распределение спектра и соответствие АМО	Поддиапазон, нм								Весь диапазон, 400–2000 нм
		400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100	1100-1400	1400-2000	
3500	$K_{E(ИСИ)}, \%$	10,0	19,2	16,9	6,2	6,6	11,8	13,7	15,6	100
	K_C	0,6	1,2	1,3	0,6	0,8	0,9	1,2	1,4	0,6–1,4
3000	$K_{E(ИСИ)}, \%$	10,6	21,4	16,4	4,4	5,5	11,1	14,2	16,4	100
	K_C	0,7	1,4	1,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,5	0,4–1,5
2500	$K_{E(ИСИ)}, \%$	9,1	19,2	13,7	1,8	3,3	10,9	17,9	24,1	100
	K_C	0,6	1,2	1,0	0,2	0,4	0,9	1,5	2,2	0,2–2,2

Наконец, приобретение светодиодных сборок высокой мощности зарубежного производства сегодня крайне затруднено. Поэтому еще одним основным требованием, в соответствии с государственной политикой импортозамещения, является применение отечественных разработок электронной компонентной базы.

Экспериментальный образец светодиодной сборки

С учетом всех перечисленных выше требований, авторами разработан и изготовлен экспериментальный образец светодиодной сборки.

Внешний вид экспериментальной сборки с теплоотводящим основанием показан на рис. 4. Компоновка сборки показана на рис. 5. Размеры излучающей поверхности составляют 4×4 мм. Сборка состоит из семи кристаллов шести длин волн: пяти в видимой области и одной в инфракрасной; питание кристаллов выполнено отдельным. Краткие характеристики составляющих сборку кристаллов приведены в табл. 5.

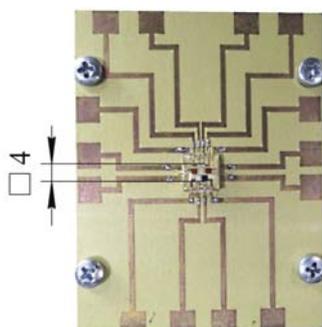


Рис. 4. Светодиодная сборка с теплоотводящим основанием

Fig. 4. LED assembly with the heat sink base

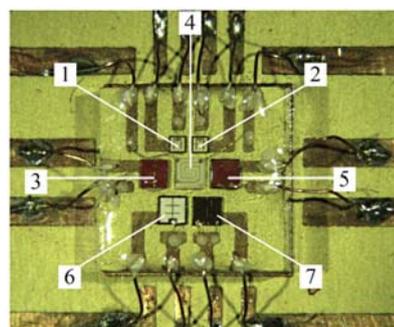


Рис. 5. Компоновка светодиодной сборки (увеличено)

Fig. 5. Layout of the LED assembly (increased)

Таблица 5

Состав экспериментальной светодиодной сборки

№ кристалла на рис. 5	Длина волны, нм	Напряжение, В (при прямом токе, мА)	Размер кристалла, мм	Конструкция
1, 2 (голубой)	506	3,45 (150)	0,610×0,610	Вертикальная
3 (янтарный)	592	2,08 (250)	1,070×1,070	Вертикальная
4 (зеленый)	521,3	3,21 (350)	1,143×1,143	Планарная
5 (красный)	622,8	2,24 (350)	1,070×1,070	Вертикальная
6 (синий)	455	3,1 (350)	1,143×1,143	Планарная
7 (инфракрасный)	855	1,6 (350)	1,066×1,066	Вертикальная

Световые характеристики экспериментальной сборки определены при помощи измерительного комплекса IS-2 производителя Instrument Systems GmbH (номер в Государственном реестре средств измерений РФ 73266-18). Пределы допускаемой относительной погрешности измерений спектральной плотности потока излучения в диапазоне длин волн 380–830 нм не превышают $\pm 5\%$. В состав комплекса входят спектрометр CAS 120-151, фотометрический шар ISP500-100 и ПК со специализированным ПО SpecWin Pro.

Спектральное распределение экспериментальной светодиодной сборки при равном токе всех кристаллов (последовательное включение) показано на рис. 6.

При изменении прямого тока в широких, от 20 до 200 мА, пределах результирующий спектр сборки остается практически неизменным (рис. 7).

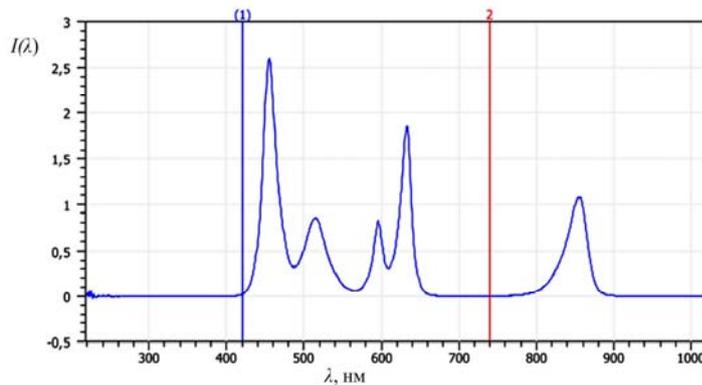


Рис. 6. Спектральное распределение экспериментальной светодиодной сборки

Fig. 6. Spectral distribution of the experimental LED assembly

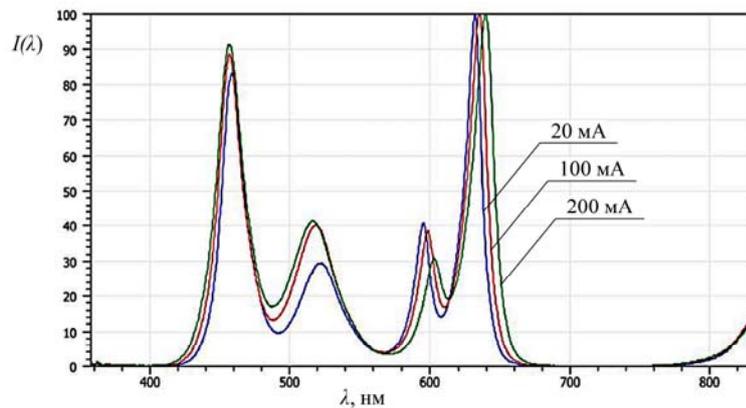


Рис. 7. Спектральное распределение экспериментальной светодиодной сборки при различных значениях прямого тока

Fig. 7. Spectral distribution of the experimental LED assembly at different values of the direct current

Моделирование (экспериментальный образец)

На втором этапе экспериментальной части выполнено аналогичное моделирование результирующего спектра комбинированного излучателя с экспериментальной светодиодной сборкой в ПО Mathcad. Для случая с цветовой температурой галогенных ламп $T_{ц} = 3500$ К, как и на первом этапе моделирования, отдельной регулировкой световой мощности кристаллов различных длин волн по отношению к световой мощности галогенных ламп получено спектральное соответствие в пределах 0,6–1,4 (табл. 6, строка 1). Результирующий спектр модели комбинированного ИСИ и спектр солнечного излучения условий АМ0 с равными ЭО показаны на рис. 8.

Далее так же, с отдельной регулировкой мощности, смоделирован результирующий спектр для галогенных ламп с $T_{ц} = 3000$ и 2500 К (табл. 6, строки 2 и 3). Рассчитанные в соответствии

с методикой значения спектрального соответствия поддиапазонов и общего спектрального соответствия ИСИ сведены в табл. 6. Во всех рассмотренных случаях K_c находятся в пределах 0,4–2,0; условие спектрального соответствия ИСИ выполняется.

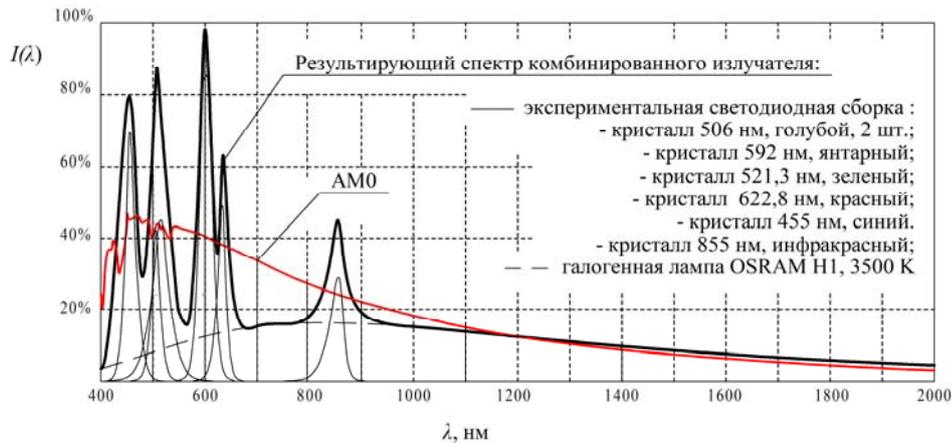


Рис. 8. Спектральные распределения солнечного излучения AM0 и комбинированного излучателя с экспериментальной светодиодной сборкой и галогенной лампой 3500 К

Fig. 8. Spectral distributions of AM0 and combined emitter with experimental LED assembly and halogen lamp, 3500 K

Таблица 6

Спектральное соответствие модели с экспериментальной светодиодной сборкой и галогенными лампами 3500, 3000 и 2500 К

$T_{ц}, K$	Распределение спектра и соответствие AM0	Поддиапазон, нм								Весь диапазон, 400–2000 нм
		400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1100	1100-1400	1400-2000	
3500	$K_{E(ИСИ)}, \%$	10,0	19,2	16,9	6,2	6,6	11,8	13,7	15,6	100
	K_c	0,6	1,2	1,2	0,6	0,8	0,9	1,2	1,4	0,6–1,4
3000	$K_{E(ИСИ)}, \%$	17,1	20,7	6,7	10,8	11,7	8,8	11,2	13,0	100
	K_c	1,1	1,3	0,5	1,0	1,3	0,7	1,0	1,2	0,5–1,3
2500	$K_{E(ИСИ)}, \%$	19,7	19,6	6,6	10,8	11,7	6,5	10,7	14,4	100
	K_c	1,2	1,2	0,5	1,0	1,3	0,5	0,9	1,3	0,5–1,3

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования комбинированного излучателя ИСИ показали, что серийно производимые светодиодные сборки высокой мощности недостаточно точно согласуются по спектральным характеристикам с галогенными лампами; рассогласование усиливается по мере снижения мощности световых источников. Это объясняется предназначением таких светодиодных сборок для работы в других условиях – исключительно в видимом диапазоне.

Лучшие результаты получены с экспериментальной светодиодной сборкой, специально разработанной для применения в комбинированном излучателе ИСИ. Спектральное соответствие сохраняется на разных уровнях ЭО, для чего в сборке достаточно пяти кристаллов различных длин волн в видимом диапазоне и одного – в инфракрасном.

Несмотря на выполнение критерия спектрального соответствия, спектр излучения светодиодной сборки в видимой области весьма неравномерен. Повысить равномерность можно добавлением кристаллов других длин волн, что приведет к усложнению системы управления и увеличению общей стоимости ИСИ. Более рациональным путем выравнивания общего спектра может быть применение люминофорных, в том числе белых, кристаллов с более широкой полосой излучения. Кроме этого, анализ результатов моделирования показывает, что вклад

кристаллов с длиной волны 506 нм в результирующий спектр комбинированного излучателя незначителен. Представляется более целесообразным ввести вместо них в состав сборки еще один кристалл с максимумом излучения в дальней красной – ближней инфракрасной области.

Спектральное соответствие в ходе экспериментов достигнуто путем отдельной регулировки мощности кристаллов различных длин волн. Значительно упростить или исключить сложную систему управления можно на стадии проектирования светодиодной сборки путем оптимизирования световой мощности, количества и размеров кристаллов различных длин волн, чтобы при их последовательном включении и равном прямом токе, без отдельного регулирования, результирующий спектр сборки был максимально приближен к спектру солнечного излучения АМ0.

Заключение

Создание адаптированного к условиям термовакуумных испытаний космических аппаратов имитатора солнечного излучения с использованием альтернативных световых источников - высокоэффективных светодиодов – требует решения ряда неординарных задач. В первую очередь необходимо обеспечить требуемую точность имитации теплового воздействия излучения Солнца на объект испытаний. Необходимое соответствие внеатмосферному спектру Солнца может быть получено комбинированием излучения галогенных ламп и высокоэффективных светодиодов различных длин волн. При этом необходимо обязательно учитывать особенности спектральных характеристик светодиодных источников.

Для подтверждения спектрального соответствия авторами предложена методика оценки на основе существующей методики для имитаторов солнечного излучения наземных условий, приведенной в ГОСТ 60904–9.

На основании проведенных измерений, моделирования и оценки результатов с использованием предложенной методики можно сделать следующие выводы:

- комбинированный излучатель из сборок высокоэффективных светодиодов различных длин волн и галогенных ламп способен обеспечить спектральное соответствие, близкое к спектральному соответствию традиционных световых источников – газоразрядных ксеноновых ламп;
- наилучшие результаты получены с разработанной специально для использования в комбинированном излучателе экспериментальной светодиодной сборкой из кристаллов шести длин волн и размером излучающей поверхности 4×4 мм;
- полученные характеристики экспериментальной светодиодной сборки не предельны и могут быть значительно повышены путем дальнейшей оптимизации;
- серийное производство разработанных светодиодных сборок может быть полностью выполнено силами отечественного производителя.

Библиографические ссылки

1. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов / Г. В. Двирный, А. А. Шевчук, В. В. Двирный и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 271–280.
2. Шевчук А. А. Альтернативный метод имитации солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 672–686. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-4-672-686.
3. Tawfikab M., Tonnelliera X., Sansoma C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. P. 802–813.
4. Крат С. А. Повышение эффективности имитаторов солнечного излучения // Сибирский журнал науки и технологий. 2011. № 2 (35). С. 124–127.
5. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов / С. В. Кравченко, С. Б. Нестеров, В. А. Романько и др. // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 149–175.

6. Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations // *Photonics Spectra*. March 2015. P. 54–58.
7. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.
8. Grandi G., Ienina A. Analysis and realization of a low-cost hybrid LED-halogen solar simulator // *Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013*. P. 794–799.
9. Карпенко А. В., Базилевский А. Б. Имитатор солнечного излучения на базе комбинированных непрерывных источников света // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2012. № 8. С. 40.
10. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Пастушенко О. В. Пути повышения технических и эксплуатационных характеристик имитаторов солнечного излучения для наземной отработки космических аппаратов // *Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (10–13 нояб. 2020, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. – СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. Ч. 1. С. 268–270.*
11. ГОСТ Р МЭК 60904-9-2016. Приборы фотоэлектрические. Ч. 9. Требования к характеристикам имитаторов солнечного излучения. Введ. 2017-10-01. М., Стандартинформ, 2017. 12 с.
12. ASTM International. ASTM E490-22. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables [Электронный ресурс]. URL: <https://www.astm.org/e0490-22.html> (дата обращения: 19.10.2022).
13. XBO® – лампы для кинотеатров. Технология и применение [Электронный ресурс]. URL: <https://smart-story.ru/files/products/multimedia/Projectors/Lamps/Osram/Docs/osram-xbo-lamp-technology-and-using.pdf> (дата обращения: 19.10.2022).
14. Сайт производителя OSRAM. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (дата обращения: 19.10.2022).
15. Solid-State Solar Simulator / A. M. Bazzi, Z. Klein, M. Sweeney et al. // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012. No. 48. P. 1195–1202.
16. ГОСТ Р 56469–2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. Введ. 2015-01-15. М. : Стандартинформ, 2015. 11 с.

References

1. Dvirnyi G. V., Shevchuk A. A., Dvirnyi V. V., Elfimova M. V., Krushenko G. G. [Analysis of LED-based solar simulator development capability for spacecraft ground testing applications]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2018, vol. 19, no. 2, p. 271–280 (In Russ).
2. Shevchuk A. A. [Alternative method of solar simulation for thermal vacuum tests of spacecraft]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 672–686 (In Russ).
3. Tawfikab M., Tonnelliera X., Sansoma C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, Vol. 90, P. 802–813.
4. Krat S. A. [Increase of solar radiation simulator efficiency]. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii*. 2011, No. 2 (35), P. 124–127 (In Russ.).
5. Kravchenko S. V., Nesterov S. B., Roman'ko V. A., Testodov N. A., Khalimanovich V. I., Khristich V. V. [Approaches to creating integrated systems for optimization and testing of spacecraft]. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013, No 1 (13), P. 149–175 (In Russ.).
6. Reynolds K. LED-based sun-simulator design: technical and commercial considerations. *Photonics Spectra*. March 2015, P. 54–58.
7. Plita F. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis. Loughborough, Loughborough University, July 2015. 186 p.

8. Grandi G., Ienina A. Analysis and realization of a low-cost hybrid LED-halogen solar simulator. Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013. P. 794–799. 10.1109/ICRERA.2013.6749861.
9. Karpenko A. V., Bazilevskii A. B. [Solar simulator based on combined continuous luminous sources]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki*. 2012, No. 8, P. 40 (In Russ).
10. Dvirnyi G. V., Shevchuk A. A., Pastushenko O. V. [Ways to improve the technical and operational characteristics of solar simulators for ground testing of spacecraft]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. 14th Int. scient. and pract. conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2020, vol. 1, p. 268–270 (In Russ).
11. GOST R MEK 60904–9–2016. *Pribory fotoelektricheskie. Chast' 9. Trebovaniya k karakteristikam imitatorov solnechnogo izlucheniya*. [State Standard R IEC 60904–9–2016. Photovoltaic devices. Part 9. Solar simulator performance requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 12 p.
12. ASTM International. ASTM E490-22. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. Available at: <https://www.astm.org/e0490-22.html> (accessed 19.10.2022).
13. XBO® – *lampy dlya kinoteatrov. Tekhnologiya i primeneniye* [XBO® cinema lamps. technology and application]. Available at: <https://smart-story.ru/files/products/multimedia/Projectors/Lamps/Osram/Docs/osram-xbo-lamp-technology-and-using.pdf> (accessed 19.10.2022).
14. OSRAM LED Engin LuxiGen™ LED Emitters. OSRAM, 2021. URL: <https://www.osram.us/ledengin/products/luxigen/lz7.jsp> (accessed: 19.10.2022).
15. Bazzi A. M., Klein Z., Sweeney M. et al. Solid-State Solar Simulator. IEEE Transactions on Industry Applications. 2012, No. 48, P. 1195–1202.
16. GOST R 56469–2015. *Apparaty kosmicheskkiye avtomaticheskkiye. Termobalansnyye i termovakuumnyye ispytaniya*. [State Standard R 56469-2015. Automatic spacecrafts. Thermal balance and thermal vacuum tests]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 11 p.

© Шевчук А. А., Двирный В. В., Майбах М. С.,
Санько С. А., Павлова А. А., 2022

Двирный Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры ТМС; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева; профессор межинститутской базовой кафедры прикладной физики и космических технологий; Сибирский федеральный университет; E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru.

Шевчук Андрей Александрович – аспирант; инженер по наладке и испытаниям отдела термовакуумных испытаний; Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru.

Майбах Максим Сергеевич – аспирант; инженер-конструктор отдела 110, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов». E-mail: majbah_ms@niipp.ru.

Санько Сергей Александрович – аспирант; инженер-конструктор отдела 110, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов». E-mail: sanko_sa@niipp.ru.

Павлова Александра Анатольевна – магистрант; техник отдела 110, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов». E-mail: pavlova_aa@niipp.ru.

Dvirnyi Valerii Vasil'evich – Dr. Sc., professor of the department “Technology of mechanical engineering”; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; professor of the interinstitutional basic department “Applied Physics and Space Technologies”; Siberian Federal University. E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru.

Shevchuk Andrey Aleksandrovich – postgraduate; testing engineer of the thermal vacuum tests department; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: shevchukaa@iss-reshetnev.ru.

Maybakh Maksim Sergeevich – postgraduate; design engineer of department 110, JSC “Research Institute of Semiconductor Devices”. E-mail: majbah_ms@niipp.ru.

San'ko Sergei Aleksandrovich – postgraduate; design engineer of department 110, JSC “Research Institute of Semiconductor Devices”. E-mail: sanko_sa@niipp.ru.

Pavlova Aleksandra Anatol'evna – graduate student; technician of department 110, JSC “Research Institute of Semiconductor Devices”. E-mail: pavlova_aa@niipp.ru.
