

К АНАЛИЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

© 2021 г. С. М. Зуев^{a,*}, Д. О. Варламов^b, В. В. Кукса^b

^a *Российский технологический университет МИРЭА
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78*

^b *Московский политехнический университет
Россия, 432700, Москва, ул. Б. Семёновская, 38*

*e-mail: sergei_zuev@mail.ru

Поступила в редакцию 09.05.2021 г.

После доработки 02.07.2021 г.

Принята к публикации 05.07.2021 г.

Проведен анализ графических зависимостей спектрального распределения мощности лазерного осветительного устройства. Представлены данные по световому потоку этих систем. Обозначены перспективы оптимизации спектра лазерных осветительных устройств малой мощности. Исследование спектров проведено с использованием модернизированного спектрометра. Показано, что оптимизация конструкции спектрометра позволяет обеспечить его регулировку и калибровку для получения более точных значений спектров.

DOI: 10.31857/S0032816221060148

Мировая энергетика расходует порядка 20% мощности на освещение. В 2021 г. затраты на освещение составят порядка 23 млрд долларов. Рынок осветительных приборов растет в среднем на 15% в год и в 2021 г. составит 12 млрд долларов. На глобальном рынке в настоящее время широко представлены осветительные устройства трех типов. К первому типу можно отнести лампы накаливания, включая галогенные, ко второму – люминесцентные лампы, а третий тип – это светодиодные лампы. В настоящее время светильники первого и второго поколений активно замещаются светодиодными лампами, более высокая стоимость которых компенсируется снижением энергопотребления по сравнению со светильниками первых двух типов. Применение светодиодных ламп приведет в 2021 г. к двукратному сокращению всей потребляемой в мире энергии на освещение относительно периода начиная с 2001 г. Однако светодиодная технология, которая начала разрабатываться в 60-е годы XX века, постепенно выходит на насыщение в части повышения светотдачи и к.п.д. устройств, поэтому в перспективе их должны будут заменить осветительные системы нового типа.

Альтернативным источником света, превосходящим светодиоды по энергосбережению и ряду других характеристик, является лазерный диод. В настоящее время все больше научных групп и высокотехнологичных компаний уделяют этому

направлению пристальное внимание. В РФ также ведутся работы по созданию современных лазерных осветительных устройств, в том числе авторами данной научной работы, которыми разработан лазерный светильник малой мощности [1, 2]. Анализ спектрального распределения лазерного светильника малой мощности может дать важную информацию о направлениях применения и перспективах развития устройств данного типа.

Хорошо известно, что видимое излучение – воспринимаемые человеческим глазом электромагнитные волны [1] – занимает участок спектра с длиной волны от ~380 (фиолетовый) до ~780 нм (красный) и частотный диапазон 400–790 ТГц [2].

Для исследования спектров излучения используются спектрометры [3]. Авторами в ходе работы был изготовлен спектрометр, позволяющий анализировать спектры излучения источников всех типов [4–7]. Общий вид поворотного спектрометра и лазерной лампы в нерабочем и включенном состояниях показан на рис. 1.

Спектрометр включает в себя 3 датчика: AS72651, AS72652 и AS72653, каждый из которых имеет 6 независимых каналов измерения.

Рассмотрим работу спектрометра более подробно. Каждый датчик содержит аналого-цифровой преобразователь с 16-битным разрешением, который интегрирует ток от фотодиода каждого канала. По завершении цикла преобразования ин-

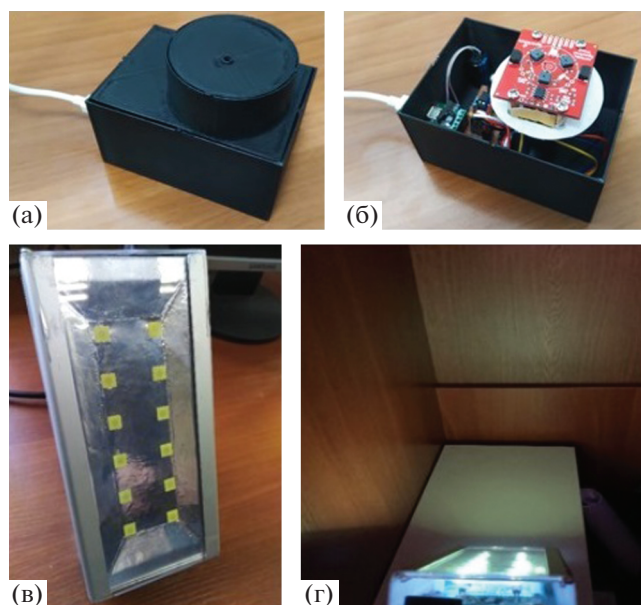


Рис. 1. Общий вид поворотного спектрометра (а, б) и лазерной лампы в нерабочем (в) и включенном (г) состояниях.

тегральный результат передается в соответствующие регистры данных. Передача данных осуществляется с двойной буферизацией для обеспечения их целостности [8].

По каждому каналу измерения установлен электронный гауссов фильтр с полной шириной спектра на уровне половинной амплитуды 20 нм. Фильтры имеют интерференционную топологию, обеспечивающую высокую стабильность работы. Спектральная характеристика всех 18-ти каналов определяется в диапазоне от 410 до 940 нм.

Точность фильтра зависит от угла падения света, который ограничен интегрированной апертурой и внутренней структурой микролинзы. Ограниченное апертурой среднее поле зрения составляет $\pm 20.5^\circ$ для обеспечения заданной точности. Все оптические характеристики оптимизированы для рассеянного света. При использовании точечного источника или коллимированного света измерительное отверстие датчика должно быть закрыто ламбертовским рассеивателем с ахроматическими характеристиками [9]. Для этой цели был выбран диффузор Tsujiden типа D121UP. При измерении рассеянного света, например, от отражающей поверхности дополнительный рассеиватель не требуется [10].

Чтобы компенсировать влияние изменения температуры на процесс измерения, в каждый из датчиков спектрометра интегрирован датчик температуры.

Датчик AS72651 является ведущим. Его программное обеспечение и заводские калибровки фильтров записаны во внешней Flash-памяти [11], подключенной к нему по интерфейсу SPI. Этот датчик собирает показания с других датчиков по интерфейсу I2C и отправляет результат измерения (по запросу) на микросхему-преобразователь USB/UART.

В каждый из датчиков спектрометра встроен тактирующий генератор импульсов на 16 МГц. Датчики AS72651, AS72652 и AS72653 предварительно калибруются с помощью определенного источника света.

Каждый датчик имеет два встроенных светодиодных драйвера (один – на мощный, а другой – на индикаторный светодиод) с программируемым значением тока в случае измерения спектра не излучающего свет объекта.

Питание поворотного спектрометра и его связь с персональным компьютером осуществляются через преобразователь USB/UART на основе микросхемы CH340E. Напряжение питания спектрометра 3.3 В. Для уменьшения амплитуды сигнала высокого логического уровня с 5 до 3.3 В, подаваемого с вывода передатчика (TX) интерфейса UART микросхемы CH340 на приемник (RX) спектрометра, используется делитель напряжения на резисторах R_1 и R_2 . Серводвигатель RDS3115 обеспечивает поворот рабочей части спектрометра на $\pm 120^\circ$ относительно центрального положения. Чтобы скомпенсировать кратковременные “просадки” напряжения, которые происходят от стартовых импульсов тока серводвигателя, в его цепь питания установлен электролитический конденсатор C_4 емкостью 10 мФ. Схема управления серводвигателем построена на микроконтроллере Attiny85, такты которого задаются внешним кварцевым резонатором с частотой 16 МГц. Для отсека гармоник высшего порядка к кварцевому резонатору подключены конденсаторы C_1 и C_2 . Конденсатор C_3 служит для фильтрации высокочастотных помех по питанию Attiny85. Управляющие сигналы с UART-передатчика TX микросхемы CH340E поступают на вывод PB1 микроконтроллера, на основе которого программно реализован приемник RX интерфейса UART. Для установки нужного углового положения спектрометра на вход PWM серводвигателя с вывода PB2 микроконтроллера Attiny85 поступают широтно-импульсно-модулированные сигналы на частоте 50 Гц с длительностью импульсов, пропорциональной углу поворота серводвигателя. Для внутрисхемного программирования микроконтроллера на плате распаян стандартный 6-выводный ISP-разъем. Электрическая схема поворотного спектрометра показана на рис. 2.

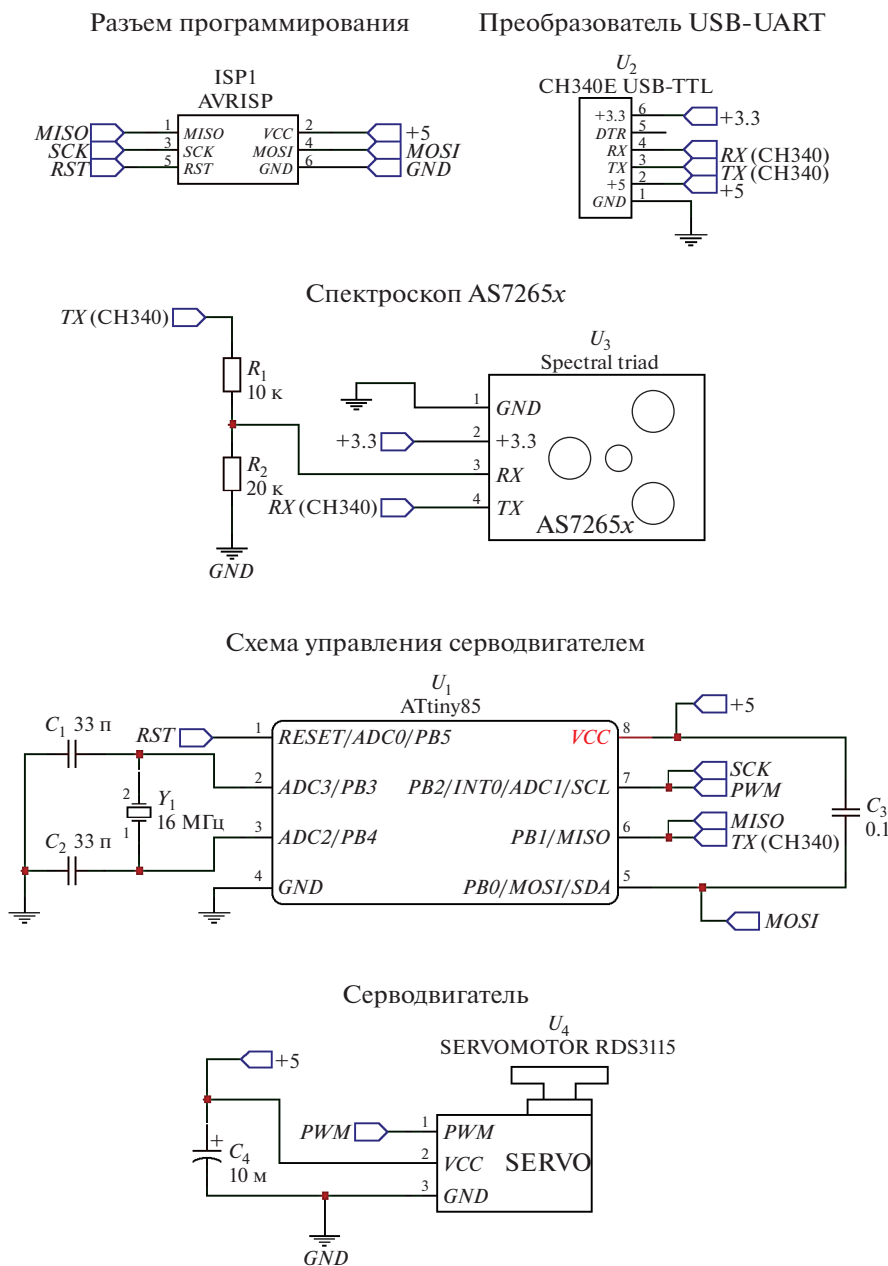


Рис. 2. Электрическая схема поворотного спектрометра.

Каждый из трех датчиков является инновационным цифровым 6-канальным спектральным сенсорным устройством. Все 6 каналов имеют характеристики гауссова фильтра с полосой пропускания, равной половине максимальной ширины (FWHM) 20 нм. Спектральная характеристика всех 18-ти каналов определяется в диапазоне 410–940 нм (рис. 3). Разрешающая способность спектрометра равна 35 [8].

Для оптимизации работы спектрометра датчики AS72651, AS72652 и AS72653 размещены на поворотной установке, которая с помощью шагового двигателя может поворачиваться на угол 270°. Данная оптимизация позволяет регулировать и калибровать спектрометр для получения более точных значений спектров.

Спектр излучения лазерного светильника малой мощности собственной запатентованной разработки [9–12], полученный в ходе эксперимен-

та, представлен на рис. 4. Некоторые характеристики данного светильника приведены ниже:

– мощность лазерного диода, мВт	50
– длина волны лазерного диода, нм	405
– количество лазерных диодов в лазерной лампе, шт.	12
– тип используемого люминофора	ИАГ Ce^{3+}
– угол обзора, градус	~180
– цветовая температура (CCT), К	~6000
– индекс цветопередачи CRI	70
– прямой ток, мА	60
– прямое напряжение, В	4.2
– максимальная рабочая температура (корпуса) без радиатора, °С	40–50
– срок службы, ч	~20000

Рассмотрим узкий пучок монохроматического фиолетового излучения ($\lambda = 405$ нм) мощностью $P = 50 \cdot 10^{-3}$ Вт, с временем излучения $t = 1$ с и углом расходимости $\varphi = 2^\circ$, который падает перпендикулярно на люминофор ИАГ Ce^{3+} . Показатель рассеивания $\rho = 0.5$, расстояние между лазерным диодом и люминофором $d = 0.02$ м (рис. 5).

Рассчитаем количество фотонов N , попавших на люминофор, а также световой поток $\Phi_{\text{сп}}$, освещенность E , яркость B , энергию одного фотона $E_{\text{ф}}$, светимость R_c и полную энергию W светового излучения.

Поскольку поток излучения Φ равен энергии $E_{\text{об}}$, переносимой через поверхность за единицу времени t , мы можем вычислить искомое количество фотонов, участвующих в излучении, мощность P которого знаем, с использованием следующего соотношения [13]:

$$P = E_{\text{об}}/t. \quad (1)$$

Исходя из теории Планка, энергию светового излучения можно представить в виде множества парциальных значений энергии квантов:

$$E_{\text{об}} = NE_{\text{ф}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{ф}}$ – энергия одного фотона.

Учитывая все сказанное выше, для значения N получаем

$$E_{\text{ф}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4.05 \cdot 10^{-7}} \approx 5 \cdot 10^{-19}; \quad (3)$$

$$P = \frac{E_{\text{об}}}{t} \Rightarrow E_{\text{об}} = Pt = 5 \cdot 10^{-2}; \quad (4)$$

$$N = \frac{E_{\text{об}}}{E_{\text{ф}}} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-19}} = 10^{17}. \quad (5)$$

Далее найдем световой поток данного лазерного излучения $\Phi_{\text{сп}}$. Световым потоком является вели-

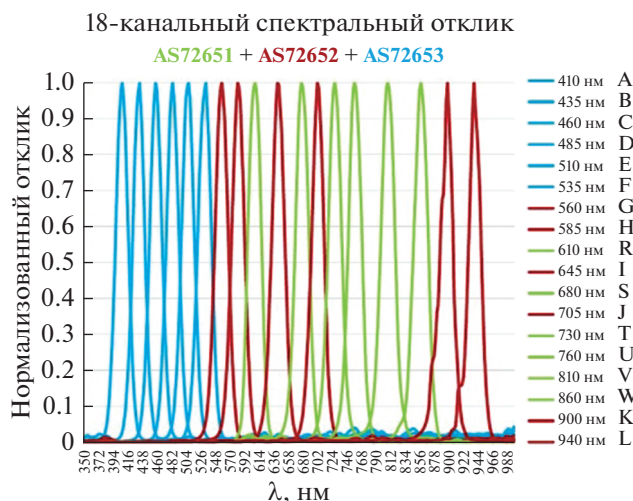


Рис. 3. Диаграмма чувствительности датчиков AS72651, AS72652 и AS72653 спектрометра [8].

Интенсивность излучения (нормализованная), отн. ед.

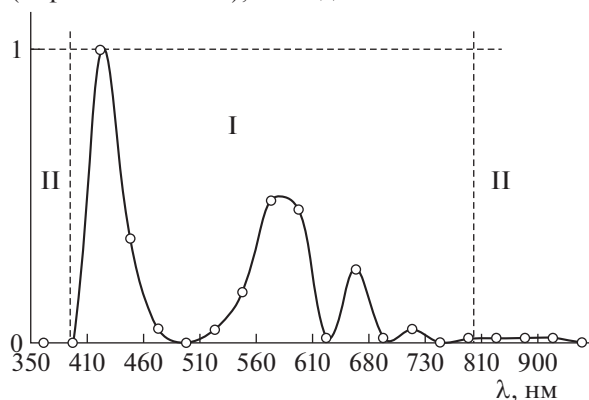


Рис. 4. Спектральное распределение мощности излучения лазерного светильника малой мощности. I, II – соответственно области спектра видимого и невидимого для глаза человека излучения.

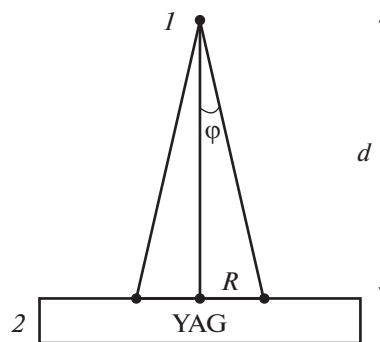


Рис. 5. Схема размещения лазера относительно люминофора. 1 – лазерная головка, 2 – люминофор.

чина, пропорциональная потоку излучения, оцененному в соответствии с относительной спектральной чувствительностью среднего человеческого глаза. Иными словами, световой поток можно определить как световую величину, оценивающую поток излучения по его действию на селективный приемник света. Причем спектральная чувствительность данного потока определяется функцией относительной спектральной световой эффективности излучения $V(\lambda)$. Таким образом, если имеется монохроматическое излучение с длиной волны λ , поток которого равен Φ , то в соответствии с вышеприведенным определением световой поток $\Phi_{сп}$ такого излучения определяется следующим равенством:

$$\Phi_{сп} = K_m V(\lambda) \Phi, \quad (6)$$

где K_m – коэффициент, величина которого определяется используемой системой единиц (в системе СИ этот коэффициент равен 683 лм/Вт), а $V(\lambda)$ берут нормированной в максимуме на единицу чувствительности среднего человеческого глаза при дневном зрении.

Учитывая это, получим

$$\Phi_{сп} = K_m V(\lambda) \Phi = 683 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \approx 34.2 \text{ лм}. \quad (7)$$

Полная же энергия W испускаемого светового потока определяется как произведение мощности излучения P на время излучения t : $W = Pt = 50 \text{ мВт} \cdot \text{с}$.

По характеристикам отдельного лазерного диода, входящего в состав лазерной лампы, обнаружено, что через 150 с работы при токе 60 мА устанавливается падение напряжения 4.15 В в установившемся режиме. Суммарно по 12-ти лазерным диодам выходная мощность составляет 249 мВт.

Что касается выходного напряжения светильника, то при расчете следует учитывать количество светодиодов и к.п.д. отдельных линейных стабилизаторов на каждый лазерный диод. Ориентировочно этот к.п.д. составляет 70% при напряжении питания 9 В, а при 12 В он будет в районе 50% (в линейных стабилизаторах излишки падают на регулирующем элементе, он греется, следовательно, больше разница в напряжениях – меньше к.п.д.). В итоге получаем $12 \cdot 0.249 \cdot 0.7 = 2.1 \text{ Вт}$.

На рис. 6а приведены зависимости $U(t)$ для лазерного диода при различной токовой нагрузке, а на рис. 6б – зависимости электрической мощности лазерного диода от приложенной токовой нагрузки.

Анализ зависимостей на рис. 6 показал, что имеется небольшой спад, 10–12%, электрической мощности диода с нормализацией эффективности работы лазерных диодов с течением времени при приложении токовой нагрузки. Данный спад сказывается на показателях яркости и светового

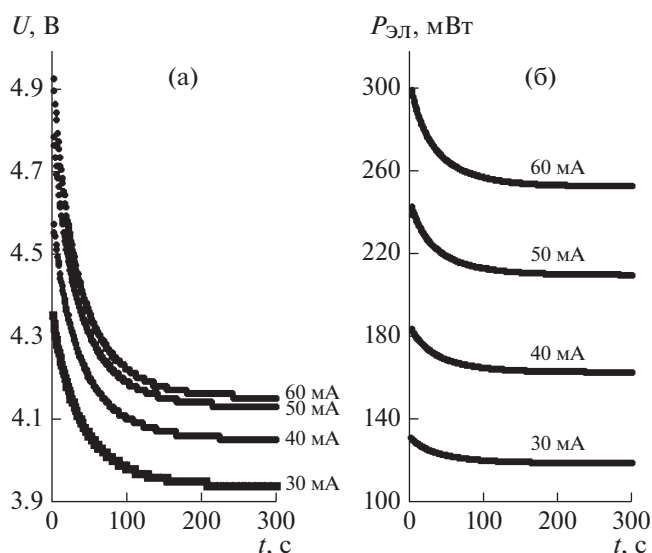


Рис. 6. Зависимости от времени работы: а – напряжения на лазерном диоде (405 нм, 50 мВт) и б – электрической мощности лазерного диода – при различной токовой нагрузке (цифры у кривых).

потока лазерной лампы ввиду их пропорциональности электрической мощности, но изучение этого эффекта выходит за рамки данной работы.

Проведенный анализ полученного спектра излучения лазерной лампы (см. рис. 4) показал, что 87% площади под кривой графика относится к спектру видимого излучения (380–740 нм). У данного источника света наблюдаются наименьшие потери энергии в инфракрасном спектре по срав-



Рис. 7. Спектральные распределения мощности излучения различных осветительных устройств: 1 – лампы накаливания, 2 – светодиода холодного белого света (6000 К), 3 – лазерной лампы малой мощности. I, II – соответственно области спектра видимого и невидимого для глаза человека излучения.

нению с другими источниками, представленными на рынке (рис. 7).

Особенностью спектра лазерной лампы является значительный пик в области излучения 410–435 нм, что можно нивелировать использованием дихроичных фильтров или заменой люминофора (в данном случае использовался иттрий-алюминиевый гранат, легированный церием (YAG+)). Интенсивность фотостимулированного люминесцентного излучения лазерной лампы может быть повышена за счет увеличения толщины слоя люминофора, однако это требует отдельного исследования.

Таким образом, проведенный анализ полученных экспериментально спектров излучения современных осветительных устройств показал, что с точки зрения эффективности генерации видимого спектра излучения наилучшими являются лазерные лампы. Расчет светового потока и других оптических величин по формулам (1)–(7) для данного лазерного светильника показал его высокую эффективность по сравнению с осветительными устройствами других типов. Так, для лазерного диода с электрической мощностью 50 мВт световой поток составил 34.2 лм, в то время как, например, у обычного светодиода с цветовой температурой 4000 К и мощностью 5 Вт (в режиме 2.2 Вт) [14] – порядка 407 лм.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хортон В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент № 167485 РФ // Бюл. № 1. Оpubл. 10.01.2017 г.
2. Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент №197045 РФ // Бюл. № 9. Оpubл. 26.03.2020 г.
3. Hitz T., Graeff-Hönniger S., Munz S., Henke M. // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Т. 156. С. 540. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.043>
4. Xu G., Zhang J., Cao G., Xing M., Li D., Yu J., Zou N. // Zhenkong Kexue yu Jishu Xuebao (Journal of Vacuum Science and Technology). 2016. Т. 36. № 1. С. 1. <https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2016.01.01>
5. Хортон В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент № 184953 РФ // Бюл. № 32. Оpubл. 15.11.2018 г.
6. De Boer J.B., Schreuder D. // Light Res. Technol. 1967. № 32. P. 117.
7. Bullough J.D., van Derlofske J., Fay C.R., Dee P. Discomfort glare from headlamps: interactions among spectrum, control of gaze and background light level. SAE Technical Paper 2003-01-0296. 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-0296>
8. www.ams.com. Дата обращения: 01.06.2021 г.
9. Dorleans G. World Harmonization and Procedures for Lighting and Signaling Products. SAE Technical Paper 970913. 1997. <https://doi.org/10.4271/970913>
10. Хортон В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Патент № 167452 РФ // Бюл. № 1. Оpubл. 10.01.2017 г.
11. Woerdenweber B., Wallaschek J., Boyce P. Automotive Lighting and Human Vision. Springer, 2010. P. 95–96. ISBN 3540366970.
12. Зуев С.М., Варламов Д.О., Лавриков А.А., Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Электрооборудование и электроника автомобилей. Краткий толковый русско-английский терминологический словарь / Под ред. канд. физ.-мат. наук С.М. Зуева. М.: ИНФРА-М, 2021.
13. Hu L.-Y., Xu X.-X., Wang Z.-S., Xu X.-F. // Physical Review A: Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2010. Т. 82. № 4. С. 043842. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.043842>
14. www.led.com. Дата обращения: 01.07.2021 г.