

Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств

Часть 2. Перспективные конструкции головного освещения транспортных средств

Канд. физ.-мат. наук, доц. С. П. Сернов¹⁾, канд. техн. наук Д. В. Балохонов¹⁾, Л. М. Коничева²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Открытое акционерное общество «Руденск», испытательная лаборатория (Руденск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Как было показано в части 1 данной статьи, современное головное освещение ввиду объективных недостатков своей конструкции не всегда удовлетворяет требованиям существующих международных стандартов, что означает снижение безопасности дорожного движения. Чтобы устранить обнаруженные ранее недостатки существующего головного освещения транспортных средств, проведен анализ его перспективных конструкций, включая лазерные, матричные и пиксельные фары, фары с цифровым микрозеркальным устройством, а также фары типа Multibeam. Указанные типы фар в настоящее время либо проходят стадию производственных испытаний, либо применяются в крайне ограниченных по числу выпущенных единиц партиях транспортных средств. В соответствии с результатами данного анализа сформулированы рекомендации по конструированию перспективного головного освещения. Основной из этих рекомендаций является применение единичных мощных светодиодов с рефлекторами полного внутреннего отражения, которые позволят обеспечить резкую светотеневую границу при эффективном использовании светового потока источника. Чтобы увеличить устойчивость фары к повышению температуры, предлагается применять светодиоды или иные экономичные источники света вместе с деталями из люминофоров. Показано, что адаптивность является полезным, но необязательным свойством фар транспортных средств, так как ведет к усложнению конструкции, а это не всегда оправдано. Описаны достоинства фары, созданной с учетом приведенных рекомендаций, основными из которых являются упрощение ее конструкции, уменьшение массы и улучшение тепловых параметров изделия.

Ключевые слова: головное освещение транспортного средства, распределение силы света, формирование распределения силы света, адаптивное автомобильное освещение

Для цитирования: Сернов, С. П. Современное состояние и перспективы развития головного освещения транспортных средств. Часть 2: Перспективные конструкции головного освещения транспортных средств / С. П. Сернов, Д. В. Балохонов, Л. М. Коничева // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 168–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-168-174>

Current State and Prospects for Development of Head Lighting for Vehicles

Part 2. Advanced Designs for Vehicle Headlights

S. P. Sernov¹⁾, D. V. Balokhonov¹⁾, L. M. Konicheva²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Open Joint Stock Company “Rudensk”, Testing Laboratory (Rudensk, Republic of Belarus)

Abstract. As it has been shown in part 1 of this paper, modern head lighting, due to objective design flaws, does not always meet the requirements of existing international standards, which means a decrease in road safety. To eliminate the previously

Адрес для переписки

Балохонов Дмитрий Валентинович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 155-12-24
balokhonov@bntu.by

Address for correspondence

Balokhonov Dmitry V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 155-12-24
balokhonov@bntu.by

discovered shortcomings of the existing head lighting of vehicles, an analysis of its promising designs has been carried out, including laser, matrix and pixel headlights, headlights with a digital micro-mirror device, as well as headlights of the Multibeam type. These types of headlights are currently either undergoing the stage of production tests or are used in extremely limited batches of vehicles in terms of the number of produced units. According with the results of this analysis, recommendations have been formulated for the design of advanced head lighting. The main of these recommendations is the use of single high-power LEDs with total internal reflection reflectors, which will provide a sharp cut-off border with efficient use of the source light flux. To increase the resistance of the headlight to temperature rise, it is proposed to use LEDs or other economical light sources together with phosphor parts. It is shown that adaptability is a useful but optional property of vehicle headlights, since it leads to complicate the design, and this is not always justified. The advantages of the headlight, created taking into account the above recommendations, are described, the main of which are the simplification of its design, reduction in weight and improvement of the thermal parameters of the product.

Keywords: vehicle headlights, luminous intensity distribution, shaping the distribution of light intensity, adaptive automotive lighting

For citation: Sernov S. P., Balokhonov D. V., Konicheva L. M. (2023) Current State and Prospects for Development of Head Lighting for Vehicles. Part 2: Advanced Designs for Vehicle Headlights. *Science and Technique*. 22 (2), 168–174. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-168-174> (in Russian)

Введение

Как было указано в первой части статьи, широко применяемые в настоящий момент конструкции головного освещения транспортных средств имеют различные недостатки. Прежде всего, они не всегда способны сформировать резкую светотеневую границу, как этого требуют современные международные стандарты [1] и, безусловно, будут требовать международных стандарты следующих версий. Поэтому чтобы устранить обнаруженные ранее недостатки существующего головного освещения транспортных средств, проведен анализ его перспективных конструкций, а также поставлена задача выработки рекомендаций для создания новых конструкций, которые будут способны удовлетворять требованиям стандартов и обеспечивать безопасность движения вне зависимости от времени суток и погодных условий.

Перспективные конструкции головного освещения транспортных средств

Стратегически важным направлением является создание новых источников света с высокой световой эффективностью и надежностью головного освещения транспортных средств. Основными перспективными конструкциями головного освещения являются следующие.

Фары на основе полупроводниковых лазеров. Использование лазерных полупроводниковых диодов в качестве промежуточного источника света – перспективный способ формирования светотеневой границы. Такие фары уже применяются на гибридных автомобилях BMW [2]. Схема простейшей конструкции лазерных фар показана на рис. 1.

Лазерные диоды излучают синий когерентный свет, сводимый в один луч оптической системой. С помощью зеркала луч отражается

на пластину с люминофором, преобразующую синее лазерное излучение в белый свет. Металлический рефлектор отражает свет в заданном направлении.

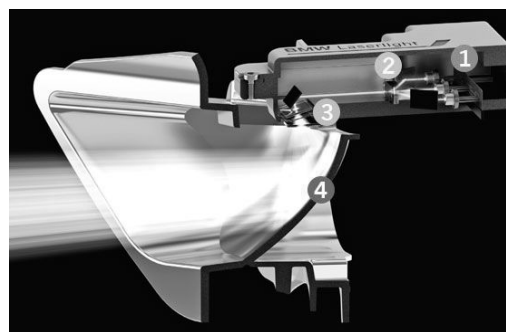


Рис. 1. Конструкция лазерной фары серийного гибридного автомобиля BMW i8 [3]: 1 – лазерные диоды; 2 – оптическая система; 3 – пластина с люминофором; 4 – металлический рефлектор

Fig. 1. Design of laser headlight of mass-produced hybrid BMW i8-vehicle: 1 – laser diodes; 2 – optical system; 3 – phosphor plate; 4 – metallic reflector

Достоинства данной конструкции заключаются в отсутствии потерь света от шторок и массивных линз из стекла. Рабочая температура такой фары ниже, так как лазерные диоды более эффективно преобразуют и концентрируют энергию. Кроме того, если нагреть фару специально, световой поток не будет уменьшаться так сильно, как у обычных светоизлучающих диодов (СИД). Дополнительным полезным свойством данной конструкции является возможность проецировать на проезжую часть различные изображения при наличии соответствующих оптических деталей [2]. Наиболее совершенные образцы такого головного освещения способны автоматически регулировать распределение силы света, специально выделяя светом ненадежные и поврежденные места на дорожном покрытии.

Недостатки конструкции заключаются в основном в том, что сложная и точная оптическая система (точность размеров и позиционирования должна быть сравнима с длиной волны лазера, то есть около 300–500 нм) потенциально является очень уязвимой к вибрации. Кроме того, КПД преобразования люминофора значительно отличается от единицы и уменьшается со временем из-за выгорания, а рефлектор все равно будет окисляться.

Интересно, что лазерные фары в отличие от светодиодных являются незаконными в некоторых странах, например в США, что служит дополнительным сдерживающим фактором для развития этого направления и барьером для импорта транспортных средств с фарами данного типа.

Матричные фары. Набирает популярность концепция адаптивного головного освещения как изделия, способного произвольно менять свое распределение силы света для обеспечения безопасности движения. Существует несколько вариантов адаптивных фар, среди которых основной в настоящее время считается конструкция матричной фары. В ней в качестве источника света используют матрицу из множества индивидуально управляемых светодиодов. Если количество светодиодов невелико (100–200), говорят о матричной фаре (англ. matrix headlight), если больше (до 16000) – о пиксельной (англ. pixel headlight). Типичный световой поток одного пикселя матрицы находится в пределах 100–150 лм.

Если применить матрицу светодиодов вместе с проекционной системой, то путем включения светодиодов в нужном порядке можно сформировать распределение силы света в

нужном виде, включая четкую светотеневую границу. Кроме того, изменяя силу света каждого пикселя, можно специально подсвечивать обочины при повороте, «вырезать» в распределении силы света фары «окна» для встречных или попутных машин, как показано на рис. 2. Матричная и пиксельная фары специально не засвечивают участок, занятый попутной машиной [4].

Информация о встречных объектах может быть получена с помощью датчиков, встроенных в бортовую вычислительную систему автомобиля.

В настоящий момент в качестве таких датчиков могут использоваться лидары, ультразвуковые детекторы, камеры для условий плохой видимости и др. Распознавание обнаруженного объекта (чтобы не оставлять неживые препятствия в тени) может осуществляться нейросетью на базе бортового компьютера транспортного средства, или искусственным интеллектом, в том числе и с применением интернет-технологий [5].

В качестве проекционной системы можно использовать массивную литую двояковыпуклую линзу, однако в идеале каждая группа пикселей (дальний/ближний свет) должна иметь свои детали вторичной оптики, что реализовано, например, фирмой Samsung, которая оснастила каждый пиксель в своей матрице отдельным микрорефлектором [4]. Первый снабженный такими светотехническими изделиями серийный автомобиль – Mercedes-Maybach S-Class – был продемонстрирован на Женевском автосалоне в 2018 г. Однако применение пиксельных фар сопряжено с некоторыми проблемами, изучению которых посвящено множество работ, например [6].



Рис. 2. Работа фары: а – обыкновенной; б – матричной; с – пиксельной

Fig. 2. Headlight operation: a – ordinary headlight, b – matrix headlight; c – pixel headlight

Недостатки данного подхода:

- выход из строя отдельных пикселей приводит к тому, что фара потеряет не только адаптивность, но и возможность реализовать стандартное, неадаптивное распределение силы света;

- позиционирование пикселей относительно оптической части проекционной системы должно быть достаточно точным, так как иначе невозможно добиться четкой светотеневой границы;

- перегрев светодиодной матрицы: один мощный СИД с таким же, как у матрицы, световым потоком выделяет меньше теплоты, чем совокупность пикселей матрицы, так как у каждого из последних есть свой корпус, свои выводы, а также другие части, которые плохо проводят теплоту;

- неодинаковое время эксплуатации (время во включенном состоянии) отдельных пикселей, что приводит к различному времени отказа (те пиксели, которые чаще используются, откажут раньше остальных). Это резко снижает надежность всей матрицы: в самом худшем случае время наработки матрицы до отказа будет в n (число пикселей в матрице) раз меньше, чем время наработки до отказа одного пикселя матрицы;

- необходимость в наличии бортового компьютера значительной вычислительной мощности, который будет быстро (за миллисекунды) и без ошибок выполнять задачи по обнаружению, идентификации и ведению цели (т. е. объекта, для которого нужно «вырезать окно» в распределении силы света фары).

Если использовать для всех пикселей общий корпус и покрыть все светодиоды одним на всех слоем люминофора, то можно улучшить конструкцию матрицы, как показано на рис. 3.

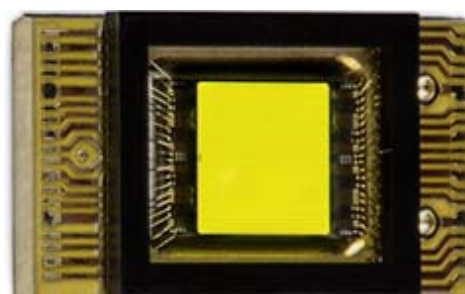


Рис. 3. Многокристальная матрица с единым корпусом и общей пленкой люминофора фирмы OSRAM [7]

Fig. 3. Multi-chip matrix with single package and common phosphor film of OSRAM Company [7]

Такой подход может значительно уменьшить потери светового потока фары от перегрева, но все еще неспособен устранить проблемы, связанные с выгоранием отдельных пикселей.

Фары с цифровым микрозеркальным устройством также относят к адаптивным. Концепция фары такого типа далеко не новая (например, работа [8] написана в 2010 г.), однако ее новые конструкции появляются и в настоящее время [9]. Фары данного типа содержат как простой рефлектор, так и цифровое микрозеркальное устройство (англ. digital micromirror device, DMD) (рис. 4).

Цифровое микрозеркальное устройство представляет собой кристалл кремния с массивом произвольно контролируемых микроэлектромеханических отражающих элементов, каждый из которых может независимо от других изменять угол своего наклона. Общее число отражающих элементов может достигать одного-двух миллионов. Схема одного пикселя DMD с двумя отражающими элементами показана на рис. 5.

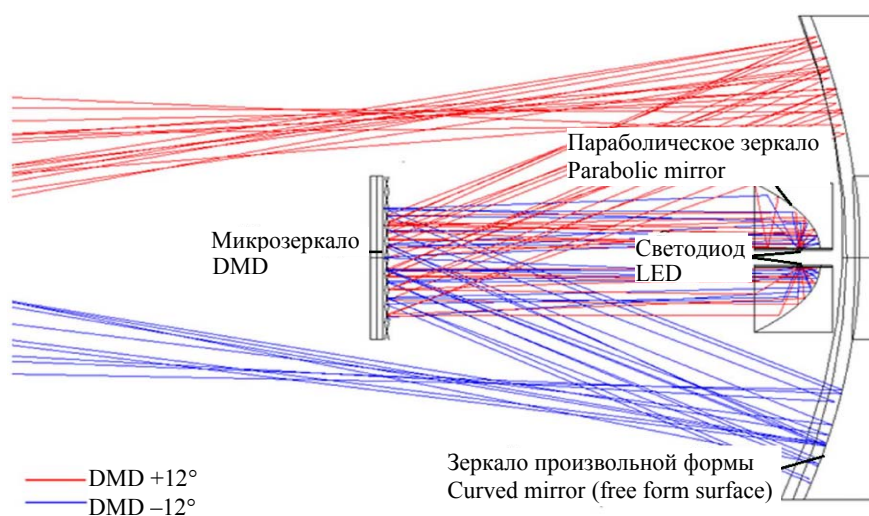


Рис. 4. Схема фары с цифровым микрозеркальным устройством [8]

Fig. 4. Scheme of headlight with digital micro-mirror device [8]

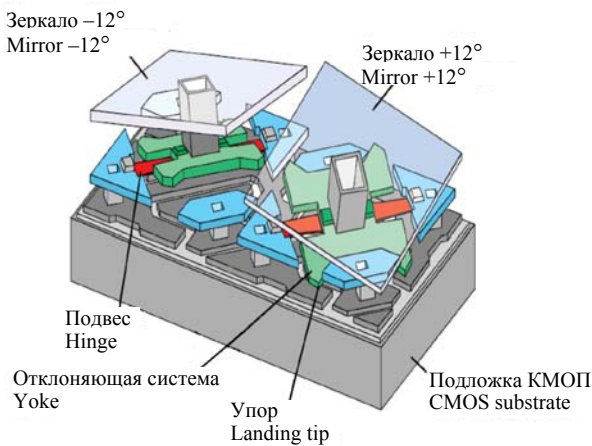


Рис. 5. Один пиксель цифрового микрозеркального устройства с двумя отражающими элементами [8]

Fig. 5. One pixel of digital micro-mirror device with two reflective elements

Фара на основе цифрового микрозеркального устройства формирует требуемое распределение силы света следующим образом: источник света (например, светодиод) создает свет нужного спектра с заданным световым потоком, детали вторичной оптики (линза или рефлектор простой формы) создают параллельный пучок света, который направляется на DMD.

Цифровое микрозеркальное устройство путем регулирования наклона каждого из отражающих элементов создает нужное распределение силы света, которое с помощью проекционной системы (рефлектор и/или линза) направляется на проезжую часть.

Управляя каждым пикселем DMD в отдельности, можно сформировать из параллельного пучка света, создаваемого светодиодом (или другим источником света), практически любое требуемое распределение силы света, например спроецировать на проезжую часть заданное изображение.

Такой подход позволяет избавиться от матрицы из светодиодов, что улучшает надежность изделия в целом и уменьшает его перегрев по сравнению с матричными фарами, однако DMD является сложным и точным устройством и поэтому стоимость его производства и эксплуатации будет велика. Кроме того, при использовании DMD в фаре появляются практически две оптические системы: система для преобразования пучка света источника к параллельному и система для проекции полученного с помощью DMD пучка света на проезжую часть. Наличие дополнительных оптических деталей, работающих на пропускание, и металлизированных поверхностей рефлекторов будет вызывать дополнительные потери светового потока источника света. Из-за необходимости точного позиционирования DMD вибрация будет потенциально самым разрушительным фактором для фар такой конструкции.

Фары Multibeam. Вместо применения в качестве адаптивных матричных фар или фар с DMD можно использовать значительно менее сложный в смысле управления и реализации подход, основным принципом которого является «каждому сектору распределения силы света – свой источник света» (лампа накаливания (ЛН)), массив светодиодов или иное). Серийная адаптивная фара, созданная по данному принципу, приводится на рис. 6.

По данным фирмы Daimler-Benz [10], главная секция имеет матрицу из 24 светодиодов, а секции меньшего размера служат для дополнения главного луча. Каждая из малых секций может поворачивать свой свет для изменения распределения силы света на угол до 12°, что достигается компьютерным управлением. Таким образом, используя все секции, можно создать почти произвольное распределение силы света.



- Дневные ходовые огни и сигнал поворота
Daytime running lights and turn signal
- Секция активного ближнего света «средней дальности» (4 светодиода, поворот на угол до 12 градусов)
Active low beam section, "middle range" (4 LEDs, up to 12 degrees turn)
- Секция дальнего света (матрица из 24 светодиодов с индивидуальным управлением)
High beam section (the matrix of 24 individually controlled LEDs)
- Три секции статичного ближнего света (2+2+4 светодиода) для освещения дороги перед автомобилем и обочины
Three static low beam sections (2+2+4 LEDs) to light the road and the roadside directly before the car
- Секция бокового освещения (2 светодиода) для освещения при поворотах и на круговых развязках
Side lighting section (2 LEDs) to tight turns and roundabouts

Рис. 6. Фара Multibeam автомобиля Mercedes CLS 500

Fig. 6. Multibeam headlight of Mercedes CLS 500 vehicle

Следует отметить, что все многосветодиодные конструкции не могут обеспечить достаточную надежность из-за требования Правил ООН по последовательному соединению всех источников света фары с одной функцией. Кроме того, секция из нескольких светодиодов – существенно неточечный источник света, что требует использования деталей вторичной оптики сложной формы.

ВЫВОДЫ

1. Проанализировав перспективные конструкции головного освещения транспортных средств, следует отметить, что они имеют увеличенную по сравнению с широко применяемыми в настоящее время конструкциями (см. первую часть данной статьи) экономичность за счет применения новых энергоэффективных источников света – светодиодов, матриц светодиодов и лазеров, однако не всегда способны обеспечивать резкую светотеневую границу. Это приводит к ненулевой вероятности ослепления пешеходов, водителей встречных и попутных транспортных средств.

2. На основе анализа существующих подходов к конструированию фар необходимо сформулировать следующие требования к конструкции фар транспортных средств:

1) источник света фары – мощный светодиод со световым потоком не менее 1000 лм при комнатной температуре (для обеспечения больших световых потоков допускается использовать два-три светодиода или многокристальный светодиод). «Точечность» светодиода позволит существенно упростить расчет деталей вторичной оптики (что даст резкую светотеневую границу и меньший шанс ослепления), а его высокая световая эффективность позволит уменьшить потребление энергии фарой. Для снижения температурных воздействий на изделие ток инжекции светодиода должен выбираться так, чтобы при любой рабочей температуре изделия световой поток не становился ниже необходимой величины, т. е. у используемого светодиода должен быть запас по световому потоку.

Кроме светодиодов в качестве источника света можно использовать лазерные диоды вместе с полупараболическими деталями из люминофора для преобразования света. Это позволит снизить зависимость от перегрева, но из-за деградации люминофора световой поток будет постепенно уменьшаться, а эффективность преобразования света люминофором невелика. Размер полупараболических деталей-преобразователей должен быть как можно

меньше, чтобы не нарушалась точечность источника света;

2) ввиду того что световой поток светодиодов уменьшается с ростом температуры, а при комнатной температуре имеет сравнительно небольшие значения, фара должна иметь эффективные детали вторичной оптики, которые максимально экономно преобразуют световой поток. Для эффективного преобразования светового потока светодиода (что позволит использовать меньшие токи инжекции и увеличит время наработки до отказа светодиода) необходимо применять металлические рефлекторы и детали вторичной оптики типа асферических неизображающих охватывающих линз или рефлекторов полного внутреннего отражения (TIR). В качестве основной отражающей детали вторичной оптики необходимо применять рефлекторы полного внутреннего отражения, так как только они имеют максимальную эффективность, а при правильном выборе материала их коэффициент отражения слабо зависит от длины волны источника. Кроме того, рефлекторы полного внутреннего отражения не окисляются и не тускнеют со временем. Металлические рефлекторы простейшей формы можно применять, если есть возможность использовать их еще и для охлаждения источника света. Активные системы охлаждения применять не рекомендуется из-за пониженной по сравнению с источником света надежности: выход вентилятора из строя повлечет за собой быстрый параметрический, а далее и катастрофический отказ всего изделия;

3) адаптивность фары как способность в реальном времени менять свое распределение силы света является лишь дополнительным полезным качеством, так как любая форма адаптивности ведет к усложнению и удорожанию конструкции, уменьшению ее времени наработки до отказа и увеличению требований к вычислительной мощности бортового компьютера транспортного средства. Последнее не позволяет осуществить замену фар у транспортных средств без бортового компьютера, оставляя их вне политики по улучшению безопасности дорожного движения, что при достаточном количестве таких транспортных средств сделает адаптивность отдельных фар просто бесполезной: обладателей адаптивных фар будут ослеплять владельцы транспортных средств, неадаптивные фары которых невозможно заменить адаптивным аналогом. В то же время неадаптивная фара при условии формирования резкой светотеневой границы в соответствии с международными стандартами не вызывает ослепления водителей как попутного, так и встречного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 148 – UN Regulation No 149. Uniform Provisions Concerning the Approval of Road Illumination Devices (Lamps) and Systems for Power-Driven Vehicles [Electronic resource] // UNECE. 2019. Mode of access: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf>. Date of access: 10.05.2022.
2. Ulrich, L. BMW Laser Headlights Slice Through the Dark [Electronic resource] / L. Ulrich // *IEEE Spectrum*. 2013. Mode of access: <https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/bmw-laser-headlights-slice-through-the-dark>. Date of access: 10.05.2022.
3. Wasef, B. How It Works: The BMW i8's Laser Headlights [Electronic resource] / B. Wasef // *Popular Mechanics*. 2014. Mode of access: <https://www.popularmechanics.com/cars/a10841/how-it-works-the-bmw-i8s-laser-headlights-16905044/>. Date of access: 10.5.2022.
4. Happich, J. Samsung Integrates Wafer-Level Microreflectors Into Multi-Pixel LEDs [Electronic resource] / J. Happich // *EE News Europe*. 2018. Mode of access: <https://www.eenewseurope.com/news/samsung-integrates-wafer-level-microreflectors-multi-pixel-leds>. Date of access: 10.05.2022.
5. New Scheme of LiDAR-Embedded smart Laser Headlight for Autonomous Vehicles / Yung-Peng Chang [et al.] // *Optics Express*. 2019. Vol. 27, No 20. P. A1481-A1489. <https://doi.org/10.1364/oe.27.0a1481>.
6. High-Resolution Pixel LED Headlamps: Functional Requirement Analysis and Research Progress / Liping Wang [et al.] // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No 8. P. 3368. <https://doi.org/10.3390/app11083368>.
7. Hammerschmidt, C. High Resolution Lighting Comes to Automotive Headlamps [Electronic resource] / C. Hammerschmidt // *EE News Europe*. 2016. Mode of access: <https://www.eenewseurope.com/news/high-resolution-lighting-comes-automotive-headlamps>. Date of access: 10.05.2019.
8. Optical Design of Automotive Headlight System Incorporating Digital Micromirror Device / Chuan-Cheng Hung [et al.] // *Applied Optics*. 2010. Vol. 49, No 22. P. 4182–4187. <https://doi.org/10.1364/ao.49.004182>.
9. Farris, J. Application Report DLPA105–February 2019. Trends in High Resolution Headlamps [Electronic resource] / J. Farris, B. Ballard // *Texas Instruments*. 2019. Mode of access: <https://www.ti.com/lit/wp/dlpa105/dlpa105.pdf>. Date of access: 10.05.2022.
10. Multibeam Led Headlamps: The future of Light [Electronic resource] // Daimler. 2014. Mode of access: <https://clck.su/EJ15G>. Date of access: 10.05.2022.

Поступила 31.08.2022
Подписана в печать 01.11.2022
Опубликована онлайн 31.03.2023

REFERENCES

1. Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations. Addendum 148 – UN Regulation No 149. Uniform Provisions Concerning the Approval of Road Illumination Devices (Lamps) and Systems for Power-Driven Vehicles. *UNECE*. 2019. Available at: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf>. (accessed 10 May 2022).
2. Ulrich L. (2013) BMW Laser Headlights Slice Through the Dark. *IEEE Spectrum*. Available at: <https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/bmw-laser-headlights-slice-through-the-dark> (accessed 10 May 2022).
3. Wasef B. (2014) How It Works: The BMW i8's Laser Head-Lights. *Popular Mechanics*. Available at: <https://www.popularmechanics.com/cars/a10841/how-it-works-the-bmw-i8s-laser-headlights-16905044/> (accessed 10 May 2022).
4. Happich J. (2018) Samsung Integrates Wafer-Level Microreflectors Into Multi-Pixel LEDs. *EE News Europe*. Available at: <https://www.eenewseurope.com/news/samsung-integrates-wafer-level-microreflectors-multi-pixel-leds> (accessed 10 May 2022).
5. Chang Y. P., Liu C.-N., Pei Z., Lee S.-M., Lai Y.-K., Han P., Shih H.-K., Cheng W.-H. (2019) New Scheme of LiDAR-Embedded Smart Laser Headlight for Autonomous Vehicles. *Optics Express*, 27 (20), A1481-A1489. <https://doi.org/10.1364/oe.27.0a1481>.
6. Wang L., Ma J., Su P., Huang J. (2021) High-Resolution Pixel LED Headlamps: Functional Requirement Analysis and Research Progress. *Applied Sciences*, 11 (8), 3368. <https://doi.org/10.3390/app11083368>.
7. Hammerschmidt C. (2016) High Resolution Lighting Comes to Automotive Headlamps. *EE News Europe*. Available at: <https://www.eenewseurope.com/news/high-resolution-lighting-comes-automotive-headlamps> (accessed 10 May 2022).
8. Hung C.-C., Fang Y.-C., Huang M.-S., Hsueh B.-R., Wang S.-F., Wu B.-W., Lai W.-S., Chen Y.-L. (2010) Optical Design of Automotive Headlight System Incorporating Digital Micromirror device. *Applied Optics*, 49 (22), 4182–4187. <https://doi.org/10.1364/ao.49.004182>.
9. Farris J., Ballard B. (2019) Application Report DLPA105–February 2019. Trends in High Resolution Headlamps. *Texas Instruments*. Available at: <https://www.ti.com/lit/wp/dlpa105/dlpa105.pdf> (accessed 10 May 2022).
10. Multibeam Led Headlamps: The Future of Light. *Daimler*. 2014. Available at: <https://clck.su/EJ15G> (accessed 10 May 2022).

Received: 31.08.2022
Accepted: 01.11.2022
Published online: 31.03.2023