

Victor Zalamai and Eduard Monaico thanks to the Alexander von Humboldt Foundation for support.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest.

REFERENCES

1. Electrodeposited tin selenide thin films for photovoltaic applications / N.R. Mathews // SolarEnergy.– 2012. – V. 86, N 4. – P. 1010–1016.
2. Investigation of SnSe, SnSe₂, and Sn₂Se₃ alloys for phase change memory applications / K.M. Chung [et.al] // J. Appl. Phys. – 2008. – V. 103. – P. 083523–083529.
3. Atmospheric pressure chemical vapour deposition of SnSe and SnSe₂ thin films on glass / N.D. Boscher [et.al] // Thin Solid Films – 2008. – V. 516, N 15. – P. 4750–4757.
4. Preparation and characterization of vacuum evaporated SnSe and SnSe₂ multilayer thin films / P.M. Manonmani [et.al] // AIP Conf. Proc. – 2012. – V. 1451. – P. 206–208.
5. Structural Phase Transitions and the Equation of State in SnSe at High Pressures up to 2 Mbar / A.G. Ivanova [et.al] // J. Exp. Theor. Phys. – 2018 – V. 108, N 6. – P. 414–418.
6. Tin Selenide (SnSe): Growth, Properties, and Applications / W. Shi [et.al] // Adv. Sci. – 2018. – V. 5. – P. 1700602.
7. Near-Edge Optical Properties of Layered Tin Sulfide (Selenide) Crystals / V.V. Zalamai, [et.al] // 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2019 / September 18–21, 2019 in Chisinau, Republic of Moldova / Ed. I.Tiginyanu [et al.]. / Springer – 2020. – V. 77. – P. 117–120.

ПЕРВИЧНАЯ И ВТОРИЧНАЯ ОПТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Д. В. Балохонов, С. П. Сернов

*Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 63, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: ssernov@bntu.by*

Рассматриваются виды деталей первичной и вторичной оптики для полупроводниковых светодиодов, изучается применимость этих деталей для создания различного светотехнического оборудования транспортных средств. Предлагаются рекомендации по выбору вида деталей первичной и вторичной оптики для использования в различных типах светотехнического оборудования транспортных средств.

Ключевые слова: светодиод; первичная оптика; вторичная оптика; светотехническое изделие транспортных средств.

PRIMARY AND SECONDARY SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING DIODE OPTICS TO BE USED IN VEHICLE LIGHTING DEVICES

D. V. Balokhonov, S. P. Sernov

*Belarusian National Technical University, Nezavisimosti av. 63, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: S. P. Sernov (ssernov@bntu.by)*

Primary and secondary optics types for semiconductor light-emitting diodes are considered and their usability for vehicle lighting devices is studied. Recommendations to choose the right type of optics to use in different vehicle lights are provided.

Key words: light-emitting diode; primary optics; secondary optics; vehicle lighting device.

ВВЕДЕНИЕ

В современных светотехнических изделиях транспортных средств в качестве основного источника света все чаще используются светодиоды. Из-за отсутствия общепринятых стандартов по распределению силы света светодиодов и их световому потоку (например, как у ламп накаливания) появляется множество конструкций светотехнического оборудования транспортных средств, в которых световой поток светодиодов используется нерационально. Для компенсации потерь светового потока количество светодиодов в конструкции увеличивают и повышают их ток инжекции, из-за чего изделия практически всегда работают при слишком высокой температуре. При таком режиме работы ресурс светодиодов и их эффективность уменьшается, что не дает реализовать их ключевые преимущества – экономичность и высокое время наработки до отказа.

Для того, чтобы сэкономить световой поток светодиодов, можно применять детали первичной и вторичной оптики, что позволит уменьшить ток инжекции, рабочую температуру и количество применяемых светодиодов. От этого повысится надежность изделия в целом и уменьшится его потребляемая мощность

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Практически все мощные (со световым потоком больше 10 лм и потребляемой мощностью больше 0,5 Вт) светодиоды, применяемые в настоящее время в светотехнических изделиях транспортных средств, имеют равномерное (ламбертовское) распределение силы света. При этом распределение силы света светотехнических изделий транспортных средств жестко регламентировано соответствующими стандартами (на территории Республики Беларусь эта область регулируется Правилами ООН) и сильно отличается от равномерного. Поэтому для создания требуемого стандартами распределения силы света применяют различные оптические детали, которые можно разделить на следующие типы:

1. Первичная оптика – оптические детали, которые находятся в непосредственной близости (на расстоянии, сравнимом с размером кристалла) от излучающего кристалла светодиода.

2. Вторичная оптика – оптические детали, находящиеся достаточно далеко от светодиодов (расстояние больше (как правило, значительно больше) размера излучающего кристалла).

Детали первичной оптики чаще всего исполняются в виде полимерной линзы, одновременно являющейся крышкой корпуса светодиода, и отвечают также за защиту кристалла от вредного воздействия окружающей среды [1]. Из-за этого внешняя поверхность первичной оптики светодиода обычно представляет собой выпуклую поверхность как минимум второго порядка без существенной неравномерности (впадины, пересечения и т.п.). Внутренняя (обращенная к кристаллу) поверхность может иметь разнообразную форму.

Расчет формы внутренней и внешней поверхности деталей первичной оптики – нетривиальная задача даже для достаточно простых распределений силы света (например, прямоугольного). Как правило, при расчете широко применяются мощные компьютеры и специализированное программное обеспечение. Расчет проводится в основном разностными методами, причем в качестве начальных условий для расчета применяют не распределение силы света светодиода с деталью (как это регламентировано в стандартах), а распределение освещенности на заданном расстоянии от светодиода с деталью [2]. В реальных условиях распределение силы света светодиода с деталью может сильно изменяться уже при незначительном смещении плоскости, на которой производят измерение освещенности.

Первичная оптика – миниатюрное изделие, которое требует достаточно развитых технологий для изготовления: широко применяют прецизионное литье под давлением, фотополимеризацию, фотолитографию и импринт-литографию, пленочное наращивание [3]. Изготовление первичной оптики отдельно для применения в небольшой партии изделий влечет за собой большие затраты ресурсов, времени и средств.

Детали вторичной оптики, как правило, являются отдельными от светодиодов деталями и имеют макроскопические размеры. Поверхности деталей вторичной оптики могут иметь практически произвольную форму, причем на эту форму влияют не только оптические требования, но и требования по устойчивости детали к механическим, температурным и другим нагрузкам.

При расчете деталей вторичной оптики вполне можно считать весь излучающий кристалл светодиода точечным источником (он находится достаточно далеко от поверхностей детали вторичной оптики), и поэтому расчет деталей вторичной оптики проще по сравнению с первичной оптикой. В случае типовых распределений силы света этот расчет иногда можно проводить даже вручную, без применения компьютерных средств [4].

Детали вторичной оптики достаточно массивны и имеют большой размер (это обусловлено в том числе требованиями по равномерности засветки выходной поверхности детали), что позволяет легко их изготавливать с помощью широко распространенных технологий, например, полимерного литья или точения. Использование простых технологий четвертого и пятого технологических укладов позволяет производить детали вторичной оптики массово с минимальными затратами, а применение технологий шестого уклада (например, аддитивные технологии [5]) позволяет сравнительно дешево изготавливать их прототипы или небольшие партии этих изделий.

Первичная и вторичная оптика светодиодов представлена на рисунке.

В настоящее время нет сложившегося подхода к конструированию светотехнического оборудования транспортных средств, поэтому применение первичной и вторичной оптики носит беспорядочный характер (и зачастую сильно зависит от предпочтений конструктора), что приводит к неоптимальным с точки зрения массы, потребляемой мощности, рабочей температуры и надежности конструкциям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим ключевые особенности применения оптических деталей при создании различных типов светотехнического оборудования транспортных средств в зависимости от заданного распределения силы света и требуемого светового потока.

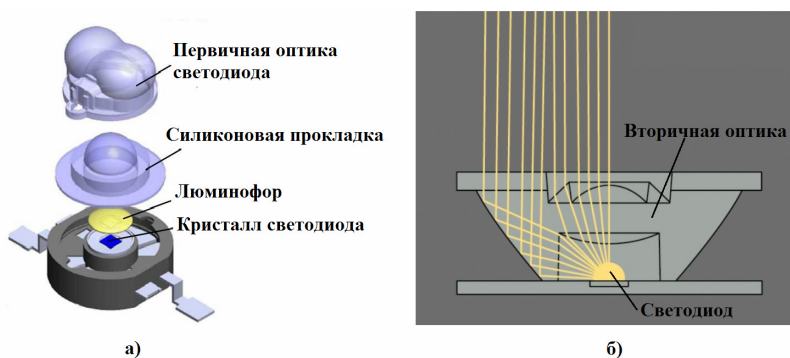


Рисунок – Первичная и вторичная оптика мощных светодиодов (схема)
а) – светодиод с первичной оптикой, расположенной как можно ближе к излучающему кристаллу [1]; б) – светодиод со вторичной оптикой в виде неизображающей линзы, расположенной сравнительно далеко от светодиода [6].

При создании светотехнических изделий с функцией сигнальных огней (стоп-сигнал, указатели поворота, габаритные огни) требуемое распределение силы света достаточно узкое (граничный угол от оптической оси изделия в пределах 20 градусов по вертикали и горизонтали), а осевая сила света редко превышает 150 кд. Таким образом, световой поток источника света находится в пределах 20 лм, что позволяет теоретически реализовать это изделие с использованием одного мощного светодиода, который работает при небольшом токе инжекции и не перегревается. В существующих конструкциях используются несколько маломощных светодиодов без оптических деталей (или с использованием неправильно подобранных деталей), что уменьшает надежность изделия. Для ликвидации этой проблемы предлагается использовать детали вторичной оптики минимальной толщины (для уменьшения потерь на пропускание), построенные в основном на полном внутреннем отражении (для минимизации потерь на отражение). Изготовление деталей первичной оптики специально для таких изделий нецелесообразно, так как это подразумевает заказ больших партий светодиодов с этими деталями. Это не окупится, так как сами светодиоды с такими световыми потоками слишком дешевы.

При изготовлении светотехнических изделий с нестандартными распределениями силы света и не слишком большими световыми потоками (например, задний противотуманный огонь или фара заднего хода) в настоящее время применяют в основном специальные детали вторичной оптики. Из-за нестандартного (слишком узкого, и при этом равномерного в пределах своего граничного угла в 10 градусов от оптической оси у заднего противотуманного огня) распределения силы света эти детали получаются слишком толстыми, что ведет к увеличению габаритов и массы всего изделия. Гораздо более рациональным кажется применение деталей первичной оптики, приводящих распределение силы света светодиодов к узкому промежуточному распределению, и легких специализированных деталей вторичной оптики для «тонкой настройки» распределения силы света в соответствии с требованиями. Это позволит уменьшить затраты при производстве светодиодов с деталями первичной оптики, уменьшить толщину деталей вторичной оптики и улучшить таким образом все изделие. Кроме того, при отсутствии в конструкции изделия оптических деталей с предельными углами преломления уменьшаются потери на пропускание.

При изготовлении светотехнических изделий с большими световыми потоками (от 150 лм, в среднем в пределах 1000–2000 лм), и узким распределением силы света, выполняющих скорее функцию осветителя (фары и прожекторы различных видов) в настоящее время чаще всего применяют проекционные системы со шторками и достаточно толстыми деталями вторичной оптики, работающими на пропускание. Это обусловлено крайне жесткими требованиями к границе «свет-тень» у таких изделий, и практически всегда это приводит к значительным потерям светового потока. Поэтому большинство таких изделий работает при значительной (до 80 °С) температуре и снабжено системой принудительного охлаждения. Из-за этого ресурс этих изделий очень мал (время наработки до отказа в пределах 5000 ч), а надежность невелика, и определяется в основном надежностью системы охлаждения. Вместо этого целесообразно применять мощные светодиоды с пропускающими деталями первичной оптики из устойчивых к нагреву и ультрафиолету полимеров (например, кремнийорганических), которые будут формировать предварительное распределение силы света. «Доводка» распределения силы света до нужного вида должна осуществляться деталями вторичной оптики, построенными по принципу полного внутреннего отражения, чтобы сформированная изделием светотеневая граница была максимально резкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение одних только деталей первичной оптики или исключительно деталей вторичной оптики не способно обеспечить заданные распределения силы света при рациональном применении существующих технологий и разумных затратах при серийном производстве светотехнических изделий транспортных средств.

Для того, чтобы обеспечить рациональное использование светового потока полупроводниковых светодиодов и достичь максимальной надежности и минимальной рабочей температуры светотехнических изделий транспортных средств, можно использовать следующие рекомендации при выборе и создании деталей первичной и вторичной оптики полупроводниковых светодиодов:

1. Для создания светотехнических изделий транспортных средств необходимо применять комбинации деталей первичной и вторичной оптики, так как только это позволит целиком использовать световой поток светодиода и избежать его потерь.

2. Выбор деталей первичной оптики производится вместе со светодиодом, причем основными критериями выбора являются световой поток и близость распределения силы света светодиода с деталью первичной оптики к требуемому стандартному распределению силы света изделия.

3. Первичная оптика светодиодов должна разрабатываться с учетом многоцелевого применения, причем ее разработка наиболее целесообразна для мощных (от 100 лм) светодиодов. Она должна обеспечивать распределение силы света с граничным углом порядка 45 градусов от оптической оси и возможно большей равномерностью распределения внутри этого угла. Материалы деталей первичной оптики должны иметь максимальный коэффициент пропускания, устойчивость к нагреву и ультрафиолету. Это позволит использовать светодиоды с этой оптикой в максимальном количестве применений при сохранении сравнительно простой формы деталей первичной оптики.

4. Вторичная оптика должна разрабатываться отдельно для каждого применения. Основой для ее разработки должна быть типовая первичная оптика и заданное распределение силы света изделия. Она должна по возможности работать на принципе полного внутреннего отражения, иметь минимальную толщину и быть способной за счет минимального отклонения лучей светодиода сформировать заданное распределение силы света.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging / Kai Wang [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2010. – V.18, №2. – P. 413–425.
2. Catadioptric freeform optical system design for LED off-axis road illumination applications / Zhengbo Zhu [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2018. – V.26, №2. – P. 54–65.
3. Roll-to-Roll UV Nanoimprint Lithography for Large-Area Nano- and Micro-Structuring of Flexible Substrates / C. Leiner [et al.] // LED Professional [Electronic resource].-2018. – Mode of access: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/roll-to-roll-uv-nanoimprint-lithography-for-large-area-nano-and-micro-structuring-of-flexible-substrates>. – Date of access: 14.08.2020.
4. Сернов, С.П. Метод расчета вторичной оптики несменных источников света адаптивных оптических систем транспортных средств / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, А.А. Журавок // Приборы и методы измерений. – 2014. – №1(8). – С.86–93.
5. de Visser, M. Additive Optics Design and Fabrication for Smart Lighting Systems and Tailored Project Solutions / M. de Visser, R. van der Hilst // LED Professional [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/additive-optics-design-and-fabrication-for-smart-lighting-systems-and-tailored-project-solutions>. – Date of access: 14.08.2020.
6. Scully, T. LED Optics Explained / T. Scully // LEDSupply [Electronic resource]. – 2019. –Mode of access: <https://www.ledsupply.com/blog/led-optics-explained/>. – Date of access: 09.09.2020.

СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА InSb-FeSb

С. М. Барайшук¹, А. И. Туравец², О. М. Михалкович²
Р. Н. Рагимов³, В. К. Долгий¹, Д. Г. Араслы³, А. А. Халилова³

¹⁾ Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023 Минск, Беларусь, e-mail: baraishuksm@gmail.com

²⁾ Белорусский государственный педагогический университет им. М.Танка ул. Советская, 18, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: physbober@tut.by

³⁾ Институт Физики им. Г. М. Абдуллаева, НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, AZ1143, г. Баку, e-mail: rashadrahim@gmail.com

Методом «мгновенного испарения» получены тонкие пленки полупроводниково-эвтектического композита InSb-FeSb. Изучены микроструктура, рельеф поверхности, определен элементный состав. Распределение атомов In, Sb и Fe равномерное и соответствует стехиометрическому составу. Подтверждена равномерность нанесения покрытий, оценена толщина наносимого покрытия методом атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: эвтектика; тонкая пленка; топология поверхности; фрактальная размерность; толщина покрытия; атомно-силовая микроскопия; сканирующая электронная микроскопия.