

МИКРОСВЕТОДИОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ОСВЕЩЕНИЯ ДОРОГИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С. П. Сернов, Д. В. Балохонов

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

Рассматриваются перспективы применения микросветодиодов в устройствах освещения дороги механических транспортных средств. Приводится сравнительный анализ микросветодиодов с другими источниками света, обсуждаются физические причины ограничивающие их эффективность и возможности применения.

Ключевые слова: микросветодиод; устройство освещения дороги транспортных средств.

MICROLEDS AND THEIR USAGE PROSPECTS IN MECHANICAL VEHICLE ROAD LIGHTING DEVICES

S. P. Sernov, D. V. Balokhonov

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

MicroLEDs and their usage prospects in mechanical vehicle road lighting devices are considered. Physical reasons of said prospects and MicroLEDs usage pro et contra are analysed.

Key words: MicroLED; mechanical vehicle road lighting device.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время светодиодные источники света доминируют в устройствах освещения дороги механических транспортных средств, причем к устройствам освещения дороги механических транспортных средств относят фары головного освещения и сигнальные огни транспортных средств. Это позволяет обеспечивать требуемые в ТНПА световые потоки с высокой эффективностью, определяемой внешним квантовым выходом электролюминесценции, который достигает у лучших промышленных образцов светодиодов порядка 40 %.

Существующая тенденция уменьшения габаритных размеров современных устройств освещения дороги вынуждает искать пути дальнейшего повышения их эффективности за счет применения принципиально новых источников света: применение однокристалльных светодиодов в современных фарах порождает проблему отвода тепла, а перегрев светодиодов до температур, превышающих 100 °С, ограничивает ресурс и эффективность светодиодов в результате процессов безызлучательной рекомбинации.

Кроме проблемы перегрева, использование многокристалльных матриц или специально сконструированных для этой цели четырехкристалльных светодиодов с линейным расположением кристаллов увеличивает сложность конструкции устройств ос-

вещения: в проекционных фарах необходимо применять сложные асферические линзы, компенсирующие протяженность источника света.

В то же время внутренний квантовый выход электролюминесценции в современных светодиодах с гетероструктурами приближается к 100 %, и основной проблемой является повторное поглощение испущенных фотонов по пути к поверхности кристалла, что особенно актуально для ультрафиолетовых и синих светодиодов, предназначенных для работы вместе с люминофором.

Для решения этой проблемы в технологии светодиодов применяются прозрачные для излучаемых квантов света специальные ограничивающие слои в гетероструктурах светодиода. Применение органических светодиодов ограничено сигнальными огнями с малой силой света.

В связи с этим актуальной задачей является разработка технологии производства светодиодов, у которых излучающая поверхность была бы расположена как можно ближе к поверхности кристалла, чтобы избежать сильного поглощения излучаемых квантов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Одним из способов удовлетворить данную потребность являются микросветодиоды. Микросветодиоды представляют собой светодиоды, размер кристаллов которых составляет 100 мкм или менее (в отличие от т.наз. мини-светодиодов, размеры кристалла которых лежат в пределах от 100 до 200 мкм) [1]. Этот вид светодиодов появился в 2000 г. в качестве источника света для дисплеев (особенно смартфонов), причем микросветодиоды в этом применении отличались высокими характеристиками (например, размер пикселя у дисплея с микросветодиодами является субмикронным, при яркости порядка одного миллиона нит, в то время как у современных дисплеев на основе органических светодиодов эти показатели соответственно равны 18 мкм и 5000 нит [2]).

Потенциально светодиоды такого типа, собранные в виде матрицы произвольной формы с требуемым световым потоком, могут стать альтернативным источником света для любого устройства освещения и световой сигнализации, при этом это устройство будет иметь малую габаритную толщину, а распределенный источник света обеспечит заданный световой поток без ослепляющего эффекта точечного источника и без оптических деталей сложной конструкции.

Проекционные фары при использовании микросветодиодов в перспективе могут превзойти современные фары с обычными светодиодами по резкости светотеневой границы, выше которой свет фар головного освещения не должен распространяться во избежание ослепления встречных водителей. Это особенно важно, поскольку качество светотеневой границы является одним из ключевых параметров, контролируемых при сертификации фар, на соответствие требованиям Правил ООН, которые постоянно ужесточаются для обеспечения безопасности дорожного движения в темное время суток.

Оптические детали для создания заданного распределения силы света в случае применения микросветодиодов могут быть тоже уменьшены до размеров кристалла. Соответствующие технологии по производству микролинз уже разработаны многими компаниями, например, MICLEDI Microdisplays [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При разработке и изготовлении микросветодиодов с большой силой света и устройств на их основе были обнаружены следующие проблемы.

1. Эффективность эмиссии фотонов уменьшается с уменьшением размера кристалла. Так, например, кристалл размером 5×5 мкм при измерении фотометрических характеристик фактически имел эффективную площадь всего 1×1 мкм [4], что обусловлено наличием дефектов, расположенных как на фронтальной, так и на боковых поверхностях кристалла, возникающих в процессе разделения пластины на кристаллы, низкого качества эпитаксии с плотностью дефектов хуже $0,1 \text{ см}^{-2}$ и т.п. и усиливающими процессы безызлучательной рекомбинации. Для решения проблемы уменьшения яркости с уменьшением размеров кристалла можно использовать столбиковые наноструктуры, как описано в работе [5]. При использовании структур, отличных от планарных, расстояние до поверхности кристалла для фотона сокращается, при этом длина волны излучаемого света определяется размером (диаметром) столбика. Перестают играть определяющую роль поверхностные дефекты, возникающие в процессе производстве кристалла. Материал наностолбиков (InGaN или GaN) устойчив к перегреву и надежно работает при повышенных температурах.

2. Монтаж массива микросветодиодов на подложку или печатную плату оказался затруднен: кристаллы малого размера нельзя подобрать вакуумным захватом, поэтому вскоре появились методы монтажа с применением клейких пленок, жидких сред и с применением самосборки [6], [7].

3. Управление сформированной матрицей должно реализовываться с применением микроконтроллеров или микропроцессоров, чтобы каждым пикселем матрицы можно было бы управлять отдельно, иначе матрица будет бесполезна в качестве источника света проекционной фары. Даже если не планируется применять проекционные системы, для каждого микросветодиода следует подобрать ток инжекции, поскольку разброс характеристик и малые размеры могут привести к выходу светодиода из строя. В соответствии с требованиями Правил ООН необходимо предусмотреть возможность обеспечения минимальных значений световых характеристик в случае параметрического отказа устройств сигнализации и освещения.

4. При изменении размера кристалла появляются сдвиги максимума в спектре излучения в красную или в синюю область в зависимости от материала кристалла и его размеров. Вероятнее всего, это связано с поверхностной рекомбинацией, так как на поверхности неизбежно будут возникать дополнительные электронные состояния по сравнению с объемом кристалла.

5. Проблема «мертвых пикселей», характерная для дисплеев. Для адекватного восприятия изображения количество неработающих пикселей на весь дисплей не должно быть больше пяти, поэтому годных микросветодиодов в каждой матрице должно быть не меньше 99,9999 % [8]. Эта проблема менее серьезна, когда количество пикселей на фару 20 000 (как у совместного изделия h-Digi® microLED фирм OSRAM и Marelli, выпущенного в 2023 г.), но не следует забывать о конечном времени наработки до отказа у каждого микросветодиода, а также о значительно более жестких условиях эксплуатации проекционных фар по сравнению с дисплеями. При создании дисплеев на основе микросветодиодов эти проблемы не столь сильно влияют на результат, как при создании источников света для устройств освещения

дороги, так как плотность тока в микросветодиодах для дисплеев меньше, чем в светодиодах для фар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, микросветодиоды являются одним из многообещающих кандидатов на роль основного источника света устройств освещения и световой сигнализации механических транспортных средств. Достоинства микросветодиодов следующие:

- внешний квантовый выход выше по сравнению со светодиодами традиционного размера;
- время наработки до отказа сравнимо с традиционными светодиодами и больше, чем у органических светодиодов;
- технология изготовления, материалы и принцип работы незначительно отличаются от традиционных светодиодов (в основном применением нанообъектов, например, квантовых точек, а также структур типа наностолбиков);
- допускается применение микросветодиодов как отдельными кристаллами, так и матрицей на одной подложке, что позволяет создавать как изделия с произвольной формой светящейся поверхности, так и изделия типа проекционных систем;

Недостатки микросветодиодов как источника света для устройств освещения дороги механических транспортных средств следующие:

- уменьшение эффективности экстракции фотонов при уменьшении размера кристалла из-за дефектов и сдвиги спектра по сравнению с традиционными светодиодами. Возможные способы устранения – применение жидкостного травления как средства разделения пластины на кристаллы при производстве вместо плазменного, использование наностолбиковых структур для уменьшения влияния поверхностных состояний на рекомбинацию;
- сложность монтажа кристаллов светодиодов за счет их малого размера. Возможные способы устранения – монтаж с помощью клейких пленок или с помощью жидкости с использованием самоорганизации;
- сложность управления матрицами микросветодиодов требует, как минимум, специализированного микроконтроллера, а лучше микропроцессора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Mini-LED and Micro-LED: Promising Candidates for the Next Generation Display Technology / Wu, T. [et al.] - Appl. Sci. – 2018. – Vol. 8, № 9. – P. 1557
2. Technological Breakthroughs in Chip Fabrication, Transfer, and Color Conversion for High-Performance Micro-LED Displays / Ryu, J. [et al.]. - Adv. Mater. – 2023. – Vol. 25. - P 2204947.
3. MicroLED Devices with Integrated Micro-lenses // LED Professional [Electronic resource].-2022.- Mode of access: <https://www.led-professional.com/all/microled-devices-with-integrated-micro-lenses>. – Date of access: 21.09.2024
4. Progress of Micro-LED Display Technology / Zhang, S. [et al.] // Crystals. – 2023. – Vol. 13, № 7. – P.1001(1-32).
5. Two-dimensional multicolor (RGBY) integrated nanocolumn micro-LEDs as a fundamental technology of micro-LED display / Kishino, K. [et al.]// Applied Physics Express. – 2020.- № 13. – P. 014003(1-5)
6. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp / Meitl, M.A. [et al.] // Natural Material. - 2006. - № 5. – P. 33–38.
7. System and Method for the Fluidic Assembly of Emissive Displays [Electronic resource]: pat. US 10418527 / Sasaki, K.; Schuele, P.J.; Ulmer, K.; Lee, J.J. - Publ.date: 11.05.2017. – Mode of access: <https://patents.google.com/patent/US20170133558A1/en>. – Date of access: 21.09.2024.
8. Micro-LEDs, a Manufacturability Perspective / Kai Ding [et al.] - Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 1206(1-15)