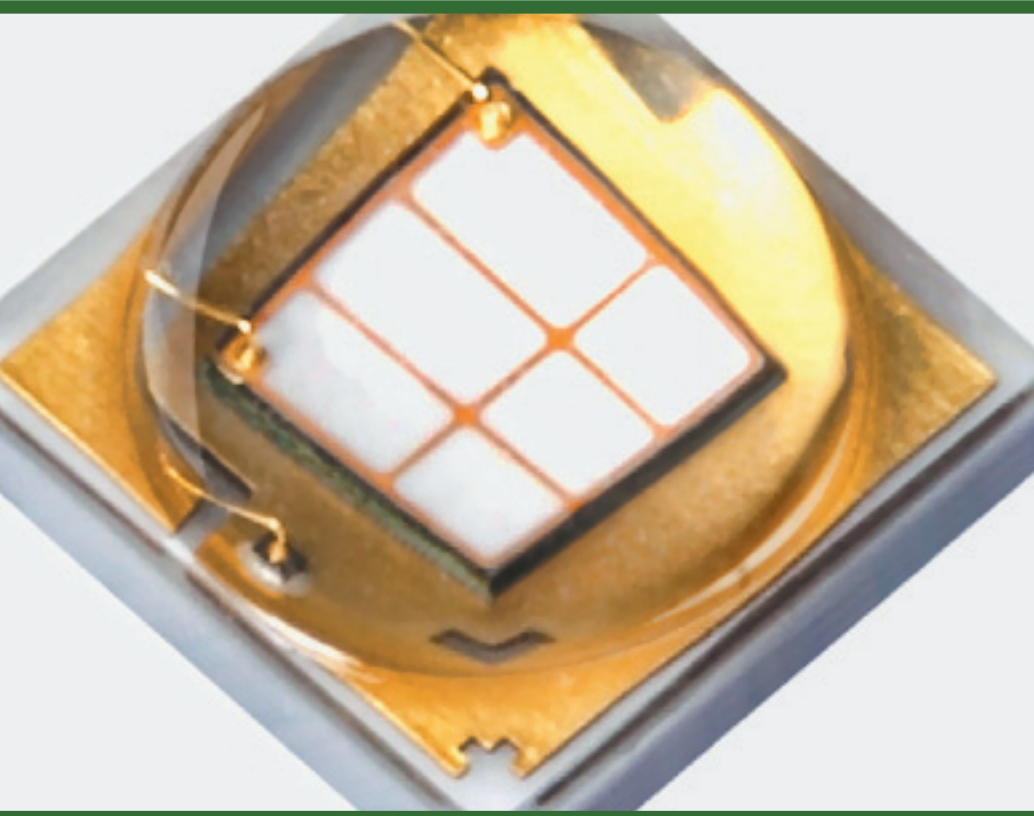


Андрей Туркин, к. ф.-м. н.

Светодиоды в коротковолновой области спектра: реальность и перспективы

➔ Приводится обзор исследований светодиодов, излучающих в коротковолновом спектральном диапазоне — фиолетовой области видимого спектра и ультрафиолетовой области. Дается краткое описание современного состояния проблемы, а также описываются технологические пути ее решения и перспективы применения. Также приводится краткий обзор светодиодов коротковолнового диапазона в линейках продукции основных производителей.



Развитие физики и технологии соединений $A^{III}B^V$ — нитридов алюминия, индия и галлия (AlInGaN) — показало, как научные исследования и технологические разработки новых материалов, а также реализация приборов на их основе приводят к экономически эффективному внедрению этих результатов в промышленность [1, 2]. Наглядным примером здесь может служить применение светодиодов (СД) белого цвета свечения на основе гетероструктур GaN и его твердых растворов в общем освещении, которое за последние десять лет прошло путь от пробных проектов до широкого использования [3]. Кроме того, в последнее время СД проникли и стали активно применяться в специальных областях освещения, например в освещении растений [4], что дало развитие целому направлению в науке, получившему название агрофотоника.

В последнее десятилетие наблюдается также значительный прогресс в создании СД коротковолновой части спектра — ультрафиолетовых (УФ) и фиолетовых — и приборов на их основе. Данные СД разрабатываются на основе AlInGaN-гетероструктур. Исследования были направлены как на продвижение в более коротковолновую область, так и на увеличение мощности излучения этих СД. Развитие в этих направлениях обусловлено не только стремлением заменить традиционные для ультрафиолетового диапазона газоразрядные лампы, но и возможностью применения УФ-диодов в новых областях, таких как системы безопасности и связь с неяркой видимостью.

Перспективы применения светодиодов коротковолновой области спектра

В настоящее время актуальным является требование создания источников света с более короткими длинами волн в УФ-области, применение которых востребовано в таких направлениях, как, например, фотолитография, разработка датчиков обнаружения токсичных веществ, создание устройств с высокой плотностью хранения данных в оптическом диапазоне, биомедицинские исследования, очистка и стерилизация воды и воздуха. Современные тенденции

в области миниатюризации устройств, обеспечения их максимальной энергоэффективности и безопасности для здоровья человека и окружающей среды требуют разработки принципиально новых видов источников излучения взамен традиционно используемых для УФ-диапазона газоразрядных ламп.

Спектральный диапазон УФ СД на основе гетероструктур AlInGaN лежит в пределах длин волн $\lambda = 210\text{--}400$ нм. Их внешний квантовый выход в длинноволновой части в настоящее время достигает 10–20% [5], а в более коротковолновой, вблизи длины волны 250–280 нм, он составляет порядка 0,5–2,0% [6]. Получается, что уровень выходной оптической мощности и внешний квантовый выход УФ СД падают при уменьшении длины волны, а для большинства важных практических применений необходимо увеличивать их мощность и эффективность. В связи с этим современные мировые проблемы разработок УФ СД заключаются в увеличении их эффективности и мощности излучения.

В настоящее время в мире достигнуты существенные успехи в области исследования и разработки УФ нитридных гетероструктур. Последние исследования показывают, что разработка данного направления является весьма многообещающей для создания УФ СД. А именно, увеличение эффективности может быть достигнуто путем дальнейшей оптимизации этих устройств: сокращением плотности дефектов и улучшением легирования слоев AlGaIn с высоким содержанием Al. Необходимо также исследовать использование подложек из AlN, равно как и осуществлять поиск новых подложек. Другой важной проблемой является вывод света. Для решения этой задачи необходим поиск материалов, прозрачных вплоть до 200 нм и совместимых со структурами для СД. Важным направлением также является углубление понимания фундаментальных свойств твердых растворов AlGaIn и свойств квантовых ям с высоким содержанием Al.

Для решения упомянутых проблем в настоящее время используется технология дискретной субмонослойной молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота (Plasma Assisted MBE, PAMBE), которая показала свою

применимость для выращивания слоев AlGaIn высокого качества [7]. В этом режиме в светодиодных гетероструктурах выращиваются квантовые ямы шириной 1–3 нм, каждая из которых представляет собой сверхрешетку из нескольких, обычно от двух до шести, слоев GaN/AlGaIn, с номинальной толщиной GaN-вставок менее одного монослоя. Процесс позволяет путем варьирования числа вставок и времени закрытия заслонки источника Ga изменять концентрацию Al в структуре до 30%. Данная технология позволяет реализовать как трехмерный механизм роста эпитаксиальных слоев при N-обогащенных условиях, так и двумерный механизм с атомарно-гладкой поверхностью в случае сильно Ga-обогащенных условий.

Однако остается еще достаточно трудностей, которые необходимо преодолеть на пути практического внедрения УФ-излучателей. При этом необходимо отметить, что многие ведущие компании — производители светодиодов в последние несколько лет активно занимаются решением описанных выше проблем. Результатом этого является появление в их линейке новых светодиодов в УФ-диапазоне спектра. Некоторые из них будут рассмотрены далее.

Мощные светодиоды УФ-диапазона компании SemiLEDs

Одной из компаний — производителей светодиодов, серьезно занимающейся в последние годы расширением своей линейки УФ СД, является SemiLEDs. До конца 2014 г. эта компания выпускала СД УФ-диапазона в линейке серии C35, например C35L-U-A (рис. 1) [8]. Данные СД перекрывали три диапазона длин волн: 390–400, 400–410 и 410–420 нм, номинальный рабочий ток составлял 350 мА, значения их мощности излучения при номинальном токе составляли от 320 мВт до, соответственно, 440, 480 и 520 мВт. Максимальный рабочий ток данных СД составлял 800 мА, а тепловое сопротивление (как и всех СД серии C35) не превышало 8°C/Вт. Угол светораспределения составлял 125° [8].

Примерно с начала 2015 г. компания SemiLEDs доработала данные приборы, выпустив серию УФ СД C3535U-UNx1. Они имеют идентичные размеры основания, однако являются более новой

серией, которая, например, имеет модели с двумя значениями углов светораспределения — 125° (рис. 2) и 55° (рис. 3) [8]. Они перекрывают четыре диапазона длин волн: 380–390, 390–400, 400–410 и 410–420 нм, номинальный рабочий ток составляет 500 мА, значения их мощности излучения при номиналь-

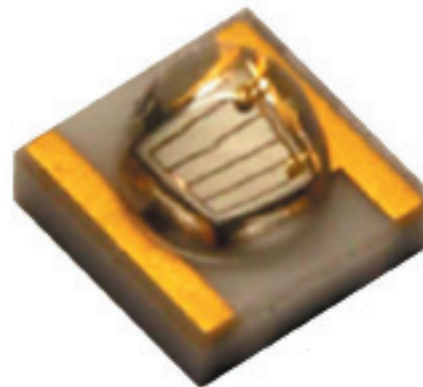


Рис. 1. Мощные УФ-светодиоды C35L-U-A компании SemiLEDs [8]

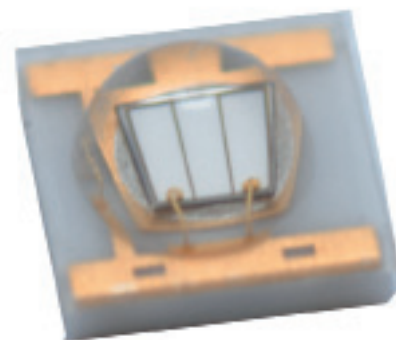


Рис. 2. Мощные УФ-светодиоды серии C3535U-UNx1 с углом светораспределения 125° компании SemiLEDs [8]

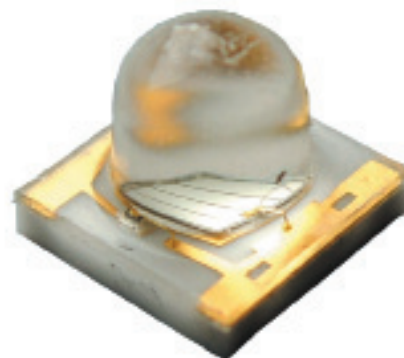


Рис. 3. Мощные УФ-светодиоды серии C3535U-UNx1 с углом светораспределения 55° компании SemiLEDs [8]

ном токе составляют, соответственно, для первого из диапазонов от 560 до 750 мВт, для второго и третьего диапазонов — от 650 до 850 мВт, для четвертого диапазона — от 700 до 900 мВт [8]. Максимальный рабочий ток СД серии С3535U-UNx1 составляет также 800 мА. Тепловое сопротивление данных приборов, как и всех СД серии С35, не превышает 8°С/Вт [8].



Рис. 4. Мощные УФ-светодиоды серии BC3535U-VNL1 компании SemiLEDs [8]

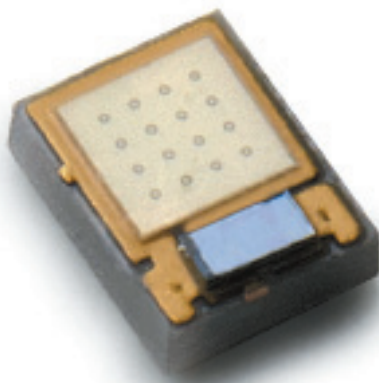


Рис. 5. Мощный светодиод серии Luxeon Z UV компании Lumileds [9]



Рис. 6. Мощный светодиод серии Luxeon Flip Chip UV компании Lumileds [9]

Светодиоды серий С35L-U и С3535U-UNx1 изготавливаются на основании размером 3,45×3,45 мм [8]. Основания аналогичного размера и формы используются многими известными производителями, поэтому при разработке приборов для УФ-области спектра специалисты могут использовать стандартные печатные платы и менять только СД. Стоит также отметить, что наличие у СД серии С3535U-UNx1 двух вариантов углов светораспределения существенно облегчает работу разработчикам, позволяя использовать соответствующие типы данных СД в случаях, когда требуется более широкая или более узкая кривая светораспределения конечного прибора даже без использования вторичной оптики. Это является неоспоримым преимуществом данной серии СД, так как большинство линз для СД изготавливаются из полимерного материала, который может деградировать при длительном воздействии УФ-излучения.

Также новой серией УФ СД компании SemiLEDs является BC3535U-VNL1 (рис. 4) [8], которая начала выпускаться примерно с начала 2015 г. Данные СД перекрывают два диапазона длин волн: 365–370 и 370–375 нм, номинальный рабочий ток составляет 350 мА. Значения мощности излучения данных СД при номинальном токе составляют для обоих диапазонов от 60 до 120 мВт [8]. Максимальный рабочий ток СД серии составляет 500 мА, их тепловое сопротивление — примерно 20–22°С/Вт. Угол светораспределения — 145° [8].

СД серии BC3535U-VNL1 также изготавливаются на основании размером 3,45×3,45 мм. Это означает, что при разработке приборов для УФ-области спектра можно использовать стандартные печатные платы и менять только СД [8].

Развивая линейку УФ СД, компания SemiLEDs занимает новые ниши их использования, укрепляя тем самым свои позиции на светодиодном рынке. Из приведенных характеристик видно, что, например, серия BC3535U-VNL1 перекрывает достаточно коротковолновый диапазон, тем самым позволяя расширить область применения УФ СД. СД данной серии, длина волны излучения которых, как уже отмечалось выше, лежит в диапазоне 365–375 нм, являются оптимальным вариантом для применения в приборах и системах проверки

денежных знаков, в системах очистки и обеззараживания воды, например для бассейнов и аквариумов. Также они могут применяться в различных специальных решениях, требующих источников света в УФ-диапазоне, в том числе и в осветительных системах, где предполагается использовать несколько люминофоров, максимум спектра возбуждения которых лежит в УФ-области.

УФ- и фиолетовые светодиоды компании Lumileds

Другой компанией, активно развивающей свою линейку УФ СД, является компания Lumileds. На данный момент СД указанного диапазона представлены в сериях Luxeon Z и Luxeon Flip Chip [9].

СД серии Luxeon Z UV (рис. 5) имеют размеры корпуса 1,3×1,7 мм. Они перекрывают диапазон длин волн от 380 до 400 нм в УФ-области и от 400 до 430 нм в фиолетовой области видимого спектра. Номинальный ток данных СД — 500 мА, максимальное значение рабочего тока соответствует 1 А [9]. Тепловое сопротивление этих СД для УФ-диапазона составляет примерно 6°С/Вт, а для фиолетового диапазона — порядка 4°С/Вт. Видимый угол равен 125° [9].

Мощность излучения УФ СД при номинальном токе в диапазоне длин волн 380–390 нм составляет 175–375 мВт, в диапазоне 390–400 нм — 330–525 мВт [9]. Мощность фиолетовых СД при номинальном токе — 435–675 мВт [9].

СД серии Luxeon Flip Chip UV (рис. 6) перекрывают диапазон длин волн 380–410 нм [9]. Они выпускаются в корпусе размерами 1×1 мм, что практически совпадает с размерами кристалла. Номинальный ток данных СД равен 500 мА, максимальное значение рабочего тока составляет 1 А [9]. Тепловое сопротивление данных светодиодов — 2°С/Вт. Видимый угол — примерно 150° [9].

Мощность излучения светодиодов Luxeon Flip Chip UV при номинальном токе в диапазоне длин волн 380–390 нм составляет 250–450 мВт, в диапазоне 390–400 нм — 450–650 мВт, в диапазоне 400–410 нм — 550–750 мВт [9].

Можно сделать вывод, что коротковолновые СД обеих серий имеют достаточно высокий внешний квантовый выход для данной области длин волн,

что делает их достаточно перспективными для разработки изделий на их основе.

Заключение

Из вышесказанного следует, что продвижение светодиодов в коротковолновые, УФ- и фиолетовую области спектра является достаточно перспективным, поскольку обусловлено не только стремлением заменить традиционные для УФ-диапазона газоразрядные лампы, но и возможностью применения в новых областях, таких как системы безопасности и связь с непрямой видимостью. Это предположение также подтверждается тем, что ведущие компании, разрабатывающие СД в видимой области спектра, стали развивать и линейки УФ СД. Пока налажен выпуск СД в ближней УФ-области, но стоит еще раз подчеркнуть, что даже там заметно падение эффективности с продвижением в более коротковолновый диапазон, в особенности при больших токах. А нужно идти дальше, в область далекого УФ, до 260 нм. Исследования такой возможности ведутся по всему миру, и надо отметить, что и в России есть все возможности производства УФ-диодов. Результаты российских исследователей в данном направлении показывают, что для УФ СД можно создать конкурентоспособное отечественное промышленное производство. Оно не такое массовое, но это потребует совместной работы исследователей и разработчиков. ●

Литература

1. А. Н. Туркин. Полупроводниковые светодиоды: история, факты, перспективы // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 5.
2. А. Н. Туркин. Обзор развития технологии полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия (GaN) // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 6.
3. С. Маркова, А. Туркин. Актуальные направления применения мощных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. 2016. № 3.
4. С. Маркова, А. Туркин. Особенности применения светодиодов в растениеводстве // Полупроводниковая светотехника. 2017. № 5.
5. Л. П. Авакянц, А. Э. Асланян, П. Ю. Боков, В. В. Волков, И. С. Матешев, А. Н. Туркин, А. В. Червяков, А. Э. Юнович. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов из гетероструктур на основе нитрида галлия // Ученые записки физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. 2016. № 3.
6. III-Nitride Ultraviolet Emitters. Technology and Application. M. Kneissl, J. Rass editors.
7. В. Н. Жмерик, А. М. Мизеров, Т. В. Шубина, А. В. Сахаров, А. А. Ситникова, П. С. Копьев, С. В. Иванов, Е. В. Луценко, А. В. Данильчик, Н. В. Ржеуцкий, Г. П. Яблонский // ФТП, Т. 42. В. 12. 2008.
8. А. Туркин. Новинки на рынке светодиодной продукции от компании SemiLEDs // Полупроводниковая светотехника. 2015. № 3.
9. А. Туркин. Обзор новых продуктов в линейке мощных и сверхъярких светодиодов Lumileds // Полупроводниковая светотехника. 2016. № 5.