

Ки Донг Ли (Ki Dong Lee) | Роберт Сжодин (Robert Sjodin) | Торбджорн Эрикссон (Torbjorn Eriksson)

Нанотекстурирование увеличивает эффективность светодиодов

По мнению сотрудников шведской фирмы **Obducat**, занимающейся разработками в области литографии, в целях повышения светоотдачи светодиодов могут быть применены технологии, использующие формовку с наноразмерами.

Популярность применения светодиодов в подсветке ЖК-панелей и ожидаемая высокая востребованность их в качестве замены флуоресцентных ламп и ламп накаливания отражается в скачкообразном, но неуклонном росте спроса на эту продукцию. Коммерческий успех связан с непрерывным совершенствованием всех составляющих процесса создания светодиодов — от эпитаксиального выращивания и обработки кристаллов до корпусирования.

Эффективность светодиода — это отношение мощности светового излучения к потребляемой мощностью светодиода. Она определяется, как минимум, следующими факторами:

- внутренняя квантовая эффективность (показывает, сколько фотонов может быть создано при заданном числе сгенерированных электронно-дырочных пар, и в основном определяется качеством эпитаксиального слоя);
- эффективность вывода света (отношение числа фотонов, излученных светодиодом, к общему числу полученных в результате рекомбинации электронов и дырок; зависит от структуры кристалла и корпуса).

Традиционные подходы к повышению эффективности СД

Кристаллам светодиодов изначально присуща низкая светоотдача, связанная с высоким коэффициентом преломления полупроводниковой среды. Большая часть сгенерированного света отражается внутрь на границе раздела полупроводник–воздух, и только небольшая его доля попадает наружу. Для исправления ситуации было предложено много идей. Два основных подхода, применяемых сейчас в светодиодной индустрии, — это технологии случайного текстурирования (*random texturing*) и отформованной сапфировой подложки (*patterned sapphire substrate*). Чтобы выявить среди них метод, дающий лучший эффект по светоотдаче, рассмотрим конструкции реальных кристаллов. В зависимости от наличия сапфировой подложки и способа кре-

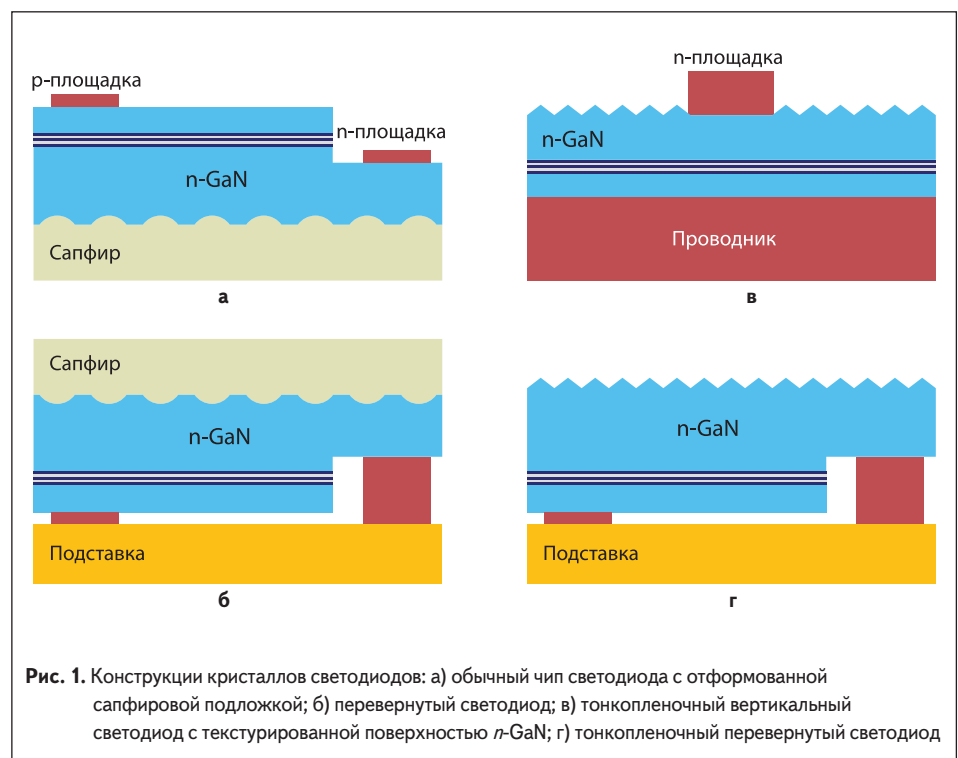
пления в корпусе чипы светодиодов делятся на четыре категории (рис. 1).

В кристалле стандартного светодиода (рис. 1а) слой *p*-GaN вместе с *n*- и *p*-электродами находится наверху. Последние присоединяются к выводам корпуса с помощью проволоки. В перевернутом светодиоде (рис. 1б) сапфировая подложка находится сверху, и электроды присоединяются к подложке. Избавление от сапфировой подложки и использование проводящей основы дают ряд преимуществ в светоотдаче и рассеянии тепла. Для этого обычно применяется специальная технология отслаивания, называемая *Laser-lift-off*, позволяющая с помощью лазерного излучения и последующей обработки отделить сапфировую подложку от эпитаксиального слоя и создать тонкопленочный светодиод.

В вертикальном тонкопленочном светодиоде (рис. 1в) *n*-электрод располагается наверху,

а поддерживающий проводник работает как *p*-контакт. Еще одним преимуществом такой конструкции является лучшее распределение тока, который распространяется вертикально. Когда кристалл светодиода без сапфировой подложки подключается посредством специальной подставки, это называется тонкопленочным перевернутым светодиодом (рис. 1г). В данном случае, как и у обычного или перевернутого светодиода, *n*- и *p*-электроды расположены с одной стороны.

Наиболее распространенным в индустрии методом повышения светоотдачи обычных кристаллов (рис. 1а) является случайное текстурирование верхнего слоя *p*-GaN. Оно обычно выполняется в том же месте, где происходит выращивание эпитаксиального слоя в ходе МОСVD-процесса (*metal-organic chemical vapor deposition* — металло-органическое химическое паровое осаждение. — Прим. пер.). Это экономичный процесс, не требующий дополнительных усилий. Однако с ростом размеров подложки ее пропускная способность



и однородность свойств могут стать проблемой для текстурирования.

В случае перевернутого или тонкопленочного светодиода слой *n*-GaN находится сверху. Для повышения светоотдачи он должен быть неровным или обработанным. Для текстурирования поверхности *n*-GaN обычно применяется техника мокрого травления. Большинство производителей светодиодов высокой яркости используют эту технологию: известно, что перевернутые тонкопленочные приборы с текстурированным слоем *n*-GaN имеют самую высокую эффективность светоотдачи, превышающую 80%.

Технология отформованной сапфировой подложки (ОСП) также широко распространена при производстве светодиодов. Идея состоит в выращивании эпитаксиальных слоев GaN не на гладкой, а на подвергнутой микрообработке подложке, что дает два преимущества. Во-первых, благодаря более низкой плотности винтообразных изменений в пространственной решетке (threading dislocation) эпитаксиальных слоев, выращенных по технологии ОСП, повышается внутренняя квантовая эффективность. Во-вторых, формы границы эпитаксия-сапфир работают в качестве центров рассеивания или преломления, что снижает общее внутреннее отражение, а следовательно, повышается эффективность светоотдачи.

Нанотформованные сапфировые поверхности

Существует несколько новых подходов, в которых для повышения эффективности светодиодов используется нанотформовка. Один из них — метод нанотформованной сапфировой подложки (НФСП) — может рассматриваться как расширение привычной технологии микро-ОСП. Однако, поскольку НФСП требует литографии с более высоким разрешением, он может иметь явные преимущества по сравнению с предшественником. Хотя нет данных о том, что какой-то производитель светодиодов применяет этот способ, в ряде статей приводятся данные о том, что эффективность сделанных с его помощью приборов примерно на 10–20% выше полученных по методу микро-ОСП.

Если рассматривать технологический процесс, то, кроме повышения эффективности, у метода НФСП есть и другие плюсы: используются структуры существенно меньших размеров, соответственно, уменьшается время, требуемое на травление сапфира. Что касается процесса выращивания эпитаксиального слоя, то и здесь при методе НФСП достижение плоского слоя происходит быстрее. Другой интересной идеей является объединение этого подхода с лазерным отслаиванием (Laser-lift-off). Если это сделать, то можно получить текстурированные формы вертикальных или тонкопленочных светодиодов без дополнительных этапов литографии и травления. Более того, качество выращиваемых при НФСП эпитаксиальных слоев может быть выше, что даст дополнительный потенциал для повышения эффективности СД.

Технология фотонных кристаллов

Технология фотонных кристаллов (Photonic crystal, ФК) разрабатывается уже достаточно давно, и возможно, с ее помощью удастся достичь максимальной светоотдачи. Идея, на которой зиждется данный метод, состоит в использовании периодических или квазипериодических структур с размерами, сравнимыми с длиной волны света, в качестве дифракционных решеток.

Несмотря на активность научно-исследовательских работ в этом направлении, ведущихся как в академических лабораториях, так и на производстве, пока что технология ФК не получила широкого распространения при изготовлении светодиодов. Реальные результаты значительно отличаются — в зависимости от конструкции чипов, от того, как применяется фотонный кристалл, от метода корпусирования и т. д. В одних случаях показатели оказываются лучше, чем при обычном случайном нанесении шероховатостей, в других — нет. Фирма Philips Lumileds недавно сообщила в журнале *Nature Photonics*, что метод ФК может обеспечить более высокую эффективность светоотдачи, особенно в случае очень тонких (~700 нм) слоев GaN, не помещенных в капсулу.

Скорее всего, технология ФК даст хорошие результаты для кристаллов, не отягощенных корпусом и фосфорами. Однако когда последние используются так, как в случае белых светодиодов, этот метод вряд ли принесет какие-либо выгоды. Его достоинства сводят на нет действие фосфоров, распределяющих свет в капсуле случайным образом. Принимая это во внимание, можно сделать вывод, что преимущества технологии ФК станут ощутимо заметны лишь в том случае, когда кристалл светодиода корпусирован так, чтобы испускать свет прямо в воздух. Также могут быть и другие выгоды от использования этой технологии, например в выходе готовых изделий или в производительности, которые смогли бы компенсировать более высокие, чем у процесса случайного нанесения шероховатостей, производственные затраты. Уже сейчас некоторые производители светодиодов применяют технологию ФК для улучшения выхода света. Фирма Luminus Devices использует ее для мощных светодиодов с большой площадью, применяемых в разнообразных проекторах и модулях задней подсветки телевизоров. Структуры ФК изготавливаются с помощью нанотисковой литографии (Nanoimprint lithography).

Эпитаксиальное боковое приращивание (ЭБП)

Эпитаксиальное боковое приращивание (Epitaxial lateral overgrowth) не является новинкой и уже применяется для производства синих диодов для лазеров. Суть технологии состоит во внедрении отформованных диэлектриков (SiC_b или SiN_x) вовнутрь слоя GaN. Они блокируют винтовые дислокации (threading dislocations) и не дают им прорастать выше слоя изолятора. Эпитаксиальные слои GaN могут быть увеличены только через открытые пло-

щадки в диэлектрике и сливаются друг с другом боковыми поверхностями. В результате плотность винтообразных искажений кристаллической структуры значительно снижается. Технология ЭБП из-за своей очевидной высокой затратности вряд ли нравится производителям светодиодов. Однако на нее вновь обратили внимание, поскольку считается, что она может стать основой для решения многих проблем, возникающих при создании светоизлучающих полупроводников, например, таких как падение эффективности, неполярные GaN и выращивание на кремниевых подложках.

В ходе недавних исследований, связанных с технологией ЭБП, был изучен эффект нанотформованных диэлектриков. Интересно то, что такой диэлектрик может работать как встроенный фотонный кристалл, обладающий лучшей светоотдачей, чем микроформованный. Уже сообщалось о многообещающих результатах, полученных для ЭБП с размерами порядка нанометров. Однако вызывает сомнение, что эта технология из-за довольно высоких производственных затрат получит широкое распространение в крупносерийном производстве приборов, создаваемых на основе 2-дюймовых сапфировых подложек. Но грядущий переход к производству на основе пластин большего диаметра (4- или 6-дюймовых) открывает интересные возможности использования ЭБП для повышения эффективности светодиодов.

Поверхностный плазмон (ПП)

Поверхностный плазмон (Surface plasmon) — это квант групповых колебаний электронов на поверхности металла. В случае металла с размерами порядка нанометров или нанотформованного этот эффект возрастает в огромной степени. ПП является одной из горячих тем для исследований в нанотехнологической области. Технология уже нашла коммерческое применение в биодатчиках и в сердце разработок фотонных интегральных схем. Некоторые специалисты показали, что ПП может повысить эффективность солнечных батарей. Другие данные демонстрируют повышение с помощью этой технологии эффективности светодиодов. Было обосновано, что поверхностный плазмон может напрямую взаимодействовать с электронно-дырочными парами в квантовых колодцах (quantum wells) — областях кристалла светодиода, генерирующих свет, — улучшая коэффициент испускающей рекомбинации (radiative recombination rate). На практике, однако, существует проблема, состоящая в том, что металлический слой должен быть расположен менее чем в 100 нм от области квантовых колодцев. Когда он располагается на верхней поверхности светодиода, это ограничение означает, что слой *p*-GaN должен быть очень тонким, что оборачивается трудностями при распространении тока.

Нанотисковая литография (NIL)

Приход нанотисковой литографии (Nanoimprint lithography, NIL) в производство светодиодов сулит большие выгоды. Доказано, что из-за наличия волнообразности и дефектов



Рис. 2. Высокопроизводительная установка Sindre для нанооттисковой литографии

наноформовка подложек является довольно сложной задачей. Методы оптической литографии страдают потерей фокуса, вызванной этими нерегулярностями, а электронная литография слишком медленна и дорога. Технология NIL, использующая жесткие штампы, также дает сбои, вызванные перечисленными выше дефектами.

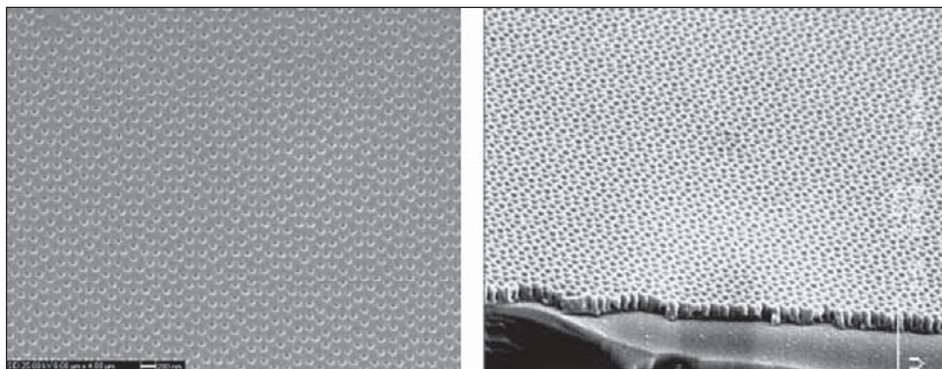


Рис. 3. Измерения на сканирующем электронном микроскопе квазикристаллической структуры, напечатанной на эпитаксиальном слое GaN

Процесс оттиска, разработанный фирмой Obducat для наноформовки светодиодов, состоит из двух этапов. На первом штамп воспроизводится на подходящей пленке из мягкого полимера, образуя промежуточный полимерный штамп (ППШ). Далее, на следующем этапе, он используется для переноса изображения на нужную подложку. Делается это в ходе проприетарного совместного термического и ультрафиолетового процесса, позволяющего комбинировать термическую и ультрафиолетовую нанооттисковую литографии.

Патентованная технология ППШ, устраняющая прямой контакт с подложкой, дает возможность управлять износом и продлевать время жизни эталонного штампа. Это в значительной степени влияет на общие затраты, связанные с NIL, и делает решение экономически выгодным.

Soft Press — еще одна технология фирмы Obducat, когда давление прикладывается к штампу посредством сжатого воздуха, что обеспечивает равномерность прижима по всей поверхности оттиска. Это позволяет штампу и поверхности равномерно соприкасаться друг с другом, устраняя отрицательное влияние неравномерности толщины, наклонов и волнистости штампа и подложки. Технология Soft Press позволяет на большой площади

получить тонкий и однородный остаточный слой, что является критически важным для печати высокого разрешения и верности переноса образа.

Основываясь на требованиях к нанооттискам, сформулированных индустрией светодиодов, фирма Obducat разработала высокопроизводительную установку нанооттисковой литографии Sindre (рис. 2), в которой реализуются три описанные выше технологии, имеющую производительность 30 пластин в час. На рис. 3 показан оттиск на подложке из GaN, полученный на системе Sindre 400. Несмотря на дефект выращивания, который можно видеть, она покрывает всю поверхность. Диаметр отверстия составляет 90 нм.

Выводы

Наноформовка открывает много возможностей для дальнейшего совершенствования светодиодных технологий. Фотонный кристалл на поверхности чипа исследуется много лет, но до сих пор не удалось снизить высоту, по сравнению со случайным текстурированием, стоимость процесса. Концепция ФК может выжить, будучи скомбинирована с технологиями наноформовки сапфировой подложки и эпитаксиального бокового выращивания. НФСП имеет наибольший потенциал для коммерческого успеха, поскольку является естественным расширением существующей технологии и обнадеживающие результаты были продемонстрированы множеством исследований. Также ожидается, что НФСП может иметь и другие преимущества по сравнению с микро-ФСП, выраженные исключительно в показателях обработки. Благодаря экономичности в сочетании с прекрасным качеством нанооттисковой литографии будет играть решающую роль в движении светодиодной индустрии к нанооттисковым светодиодам с ультравысокой эффективностью. ●

Примечание. Оригинал статьи опубликован на сайте www.ledsmagazine.com.