

Донг Жен Ко (Dong Geun Ko) | Якоб Юн (Jacob Yoon) | Янг Хо Се (Jang Ho Seo)

Структурированные подложки

улучшают внешний квантовый выход светодиодов

В статье рассматривается вопрос, как структурированные полупроводниковые пластины могут способствовать увеличению светоотдачи в светодиодах (СИД) путем уменьшения концентрации дефектов и общих внутренних потерь на отражение.

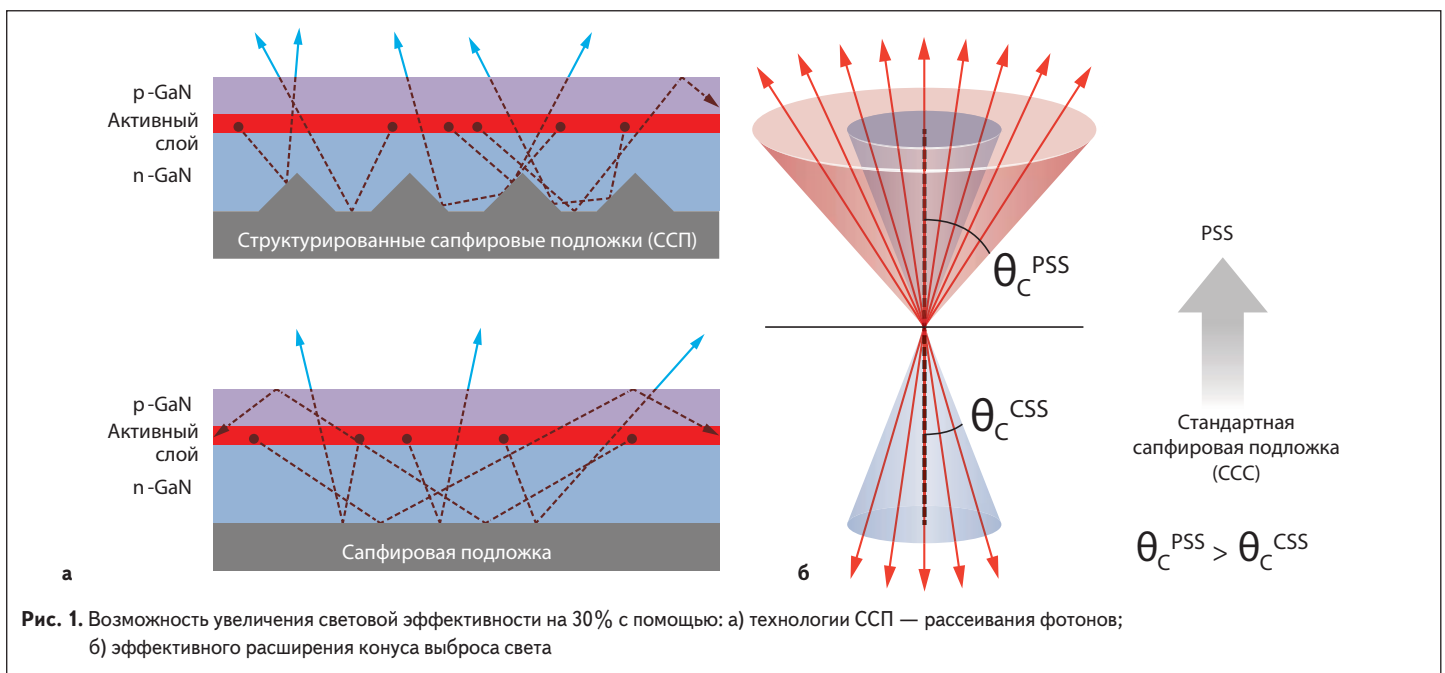
Производители быстро привыкли к нитридным полупроводниковым СИД как стандартным источникам света, предназначенным для широкого ассортимента продуктов — от общего освещения, автомобильных фар и сигналов светофоров до подсветки потребительских товаров, таких как HD-телевизоры, смартфоны и планшеты, большие и малые дисплеи. Эксплуатационные характеристики и цена светодиодов способствовали широкому распространению технологии СИД и позволили им завоевать рынок товаров широкого потребления. Изготовители СИД-кристаллов обратили взоры в сторону технологий изготовления структурированных сапфировых подложек, чтобы сделать светодиоды максимально эффективными, а возможности их применения более широкими.

Структуры, используемые для подложки светодиода или полупроводниковой пластины, могут значительно увеличить светоотдачу СИД двумя способами. Существующая технология роста структур позволяет увеличить эффективность излучения в активных слоях структуры благодаря уменьшению числа дефектов в ходе эпитаксии. Структурированные сапфировые подложки могут снизить потери света из-за общего внутреннего отражения (ОВО) за счет достижения эффекта рассеяния фотонов.

Исследователи разработали ряд способов создания полупроводниковых структур разнообразной геометрии и размеров, которые формируются на поверхности сапфировых подложек. Такие сапфировые полупроводниковые пластины с регулярными структурами различных форм (например, конус, свод, пирамида, колонна и т. д.) называются структурированными сапфировыми подложками (ССП).

Сегодня существует два способа изготовления ССП, широко применяющихся в промышленности, — сухое плазмохимическое травление и влажное химическое травление. Большинство подложек производятся методом сухого плазмохимического травления, поскольку в данном процессе предусмотрен эффективный контроль точности и однородности получаемого материала. В статье речь пойдет именно об этом методе, в частности о такой его разновидности, как сухое реактивное травление (СТР) индуктивно связанной плазмой (ИСП).

В свое время, работая над созданием 100- и 150-мм подложек совместно с наиболее известными производителями светодиодов, компания Rubicon сформулировала нормы, которым должны удовлетворять эффективные ССП. Наиболее критичными требованиями здесь являются размер структуры, форма и соотношение ширины и высоты, равномерность на протяжении всей пластины, а также целостность от пластины к пластине.



Единого универсального рецепта ССП не существует ввиду высокой степени адаптации эпитаксиальных процессов при изготовлении СИД к индивидуальным требованиям заказчиков. Проектирование структур многообразно, и стандартными формами структур считаются конусы, своды, квадраты или трехгранные пирамиды. Сегодня нормой в производстве светодиодов является размер 3 или 4 мкм, хотя академические исследования показывают, что меньшие размеры структуры (100–1000 нм) обеспечивают большую световую эффективность.

Основными технологическими параметрами, которые оказывают первостепенное влияние на характеристики структурированных подложек, являются точные размеры и равномерность фоторезистной (ФР) маски, выборочность сапфирового травления относительно маски ФР, сила ФР, давление процесса ИСП, дизайн катушки ФР для плазменной равномерности, соотношение газов трифторметана (CHF_3) и треххлористого бора (BCl_3), а также температура подложки.

Увеличение световой эффективности

Низкая эффективность процесса вывода света становится предпосылкой к созданию мощных светодиодов. Структурирование на подложке рассеивает большое количество фотонов, излучаемых за пределами выпускного конуса ОВО, обратно в конус, что позволяет выводить больше света (рис. 1а), создавая эффект, равный увеличению критического угла выходного конуса (рис. 1б). В результате эффективность выделения света увеличилась на 30%.

Фотоны излучаются из активных слоев квантовой ямы электронно-дырочной рекомбинацией и выходят из кристалла светодиода в свободное пространство. В идеале все фотоны, излучаемые активными слоями, должны выделяться светодиодом. На практике большое

количество излучаемых фотонов никогда не покидает кристалл СИД. Происходит это по самым разным причинам.

Основным препятствием на пути к такому идеальному выделению света является эффект ОВО ввиду высокого коэффициента рефракции нитрида галлия (GaN) по сравнению с коэффициентом рефракции свободного пространства (примерно от 2,5 до 1,0). Большое количество фотонов, генерируемых из активной области, направляется обратно в кристалл и удерживается внутри, окончательно рассеиваясь как тепло. В условиях выходного конуса света, определяемого критическим углом ОВО, только свет, излучаемый в выходной конус, выходит из кристалла СИД, в то время как свет, излучаемый за пределы конуса, остается внутри, как в ловушке.

Более эффективное преобразование света

По своим тепловым, механическим и химическим свойствам сапфир представляет собой прекрасную подложку для эпитаксиального роста III/V нитридных химических элементов. Однако у него не только другая кристаллическая структура (корунд), отличная от нитридной структуры III/V (вюрцит), но и значительное несоответствие периода и структуры кристаллической решетки (около 15%) с нитридом. В связи с этим эпитаксиальных нитридных слоев возникают многочисленные несовместимые дислокации, количество которых находится в пределах 10^8 – 10^{10} на см^2 . Прорастающие дислокации становятся линейными дефектами эпитаксиальных слоев, определяющими степень деградации качества кристалла. Такие дефекты характеризуются плотностью ямок травления (ПЯТ) в оптическом микроскопе и иногда измерением кривой качания рентгеновских лучей с оптическими характеристиками при полной ширине на полувысоте (ПШПВ).

Устранить подобные дефекты призвано структурирование сапфировой поверхности — это улучшает эпитаксиальный рост нитридов, сокращая плотность подобных прорастающих дислокаций. Известно, что дислокации уменьшаются, поскольку ССП способствует слоистому росту, параллельному поверхности подложки. Прорастающие дислокации появляются во время первичного эпитаксиального роста через слой зарождения кристаллов на традиционных планарных сапфировых подложках или структурированных сапфировых подложках. Уменьшенная плотность прорастающей дислокации за счет улучшенной поперечной составляющей в эпитаксиальном росте на ССП наблюдалась через просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) многими исследователями.

Поскольку электроны и дырки рекомбинируют на линиях дислокаций безызлучательно, уменьшение плотности дислокаций, особенно в активной зоне, является одним из самых важных требований для улучшения эффективности преобразования света, также известной как внутренняя квантовая эффективность. Обычно ССП приводит примерно к 30%-му увеличению эффективности преобразования света благодаря улучшенному эпитаксиальному качеству активных слоев квантовой ямы. Однако в зависимости от размера, формы, качества структуры и эпитаксиальной оптимизации относительно каждого проекта структуры возможны колебания величины данного параметра.

Эффективное исполнение ССП

Для оптимизации светоотдачи светодиодных кристаллов в проектировании ССП существует два основных вопроса. Первый — как максимизировать слоистый избыточный рост для более эффективного подавления прорастающих дислокаций в эпитаксиальном росте. Второй — как получить максимальный эффект рассеивания для улучшения выделения света.

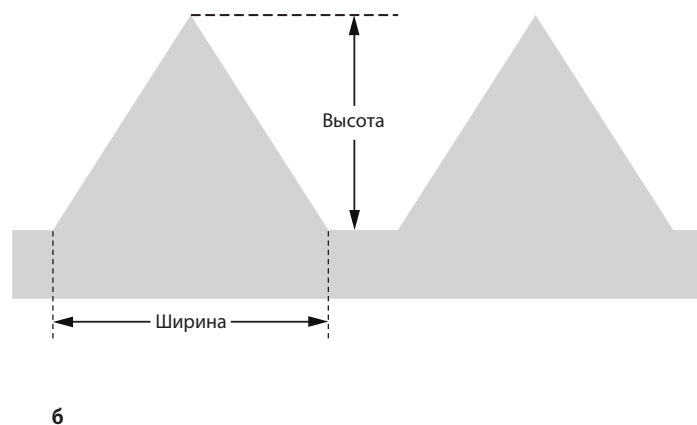
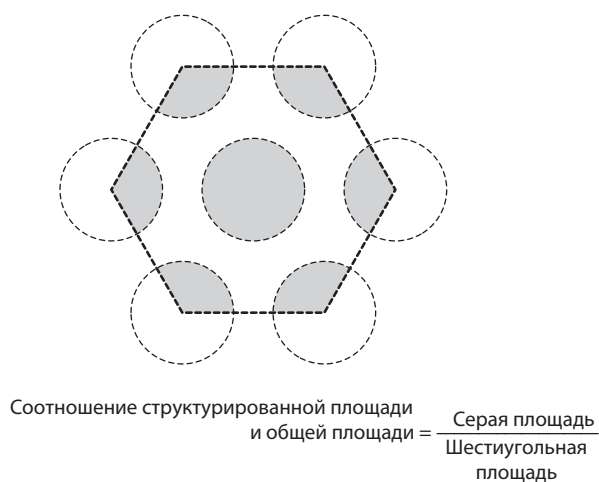


Рис. 2. а) Расчет соотношения структурированной площади и всей подложки с помощью коэффициента обведенной или серой площади относительно шестиугольной; б) соотношение высоты и ширины структур

Соотношение структурированной зоны и общей площади и соотношение высоты и ширины — две первостепенные задачи проектирования ССП для продвижения продольного эпитаксиального роста параллельно плоскости подложки. Данные структурные параметры схематически представлены на рис. 2. Оказалось, что большее соотношение структурированных площадей относительно общей площади увеличивает поперечную составляющую во время эпитаксиального роста, в результате плотность прорастающих дислокаций уменьшается, как можно видеть с помощью ПЭМ или уменьшения ПШПВ в анализе кривой качания рентгеновских лучей.

По некоторым оценкам, более высокое соотношение высоты и ширины может помочь в улучшении поперечной составляющей эпитаксиального роста, хотя для этого требуются дальнейшие исследования. Последний тренд относительно соотношения большей ширины к шагу и большей высоты к ширине может быть не совпадением, а отражением данных правил проектирования. Формы (такие как конус, свод, пирамида и т. д.) и структурированная плотность тоже являются расчетными параметрами, влияющими на слоистый рост.

Форма, соотношение высоты и ширины и структурная плотность — это основные факторы, которые учитываются проектировщиками СИД для эффекта рассеивания с целью улучшения выделения света. Однако в данной статье обсуждения ограничиваются только структурной плотностью.

Геометрия матрицы структуры и шаг структуры должны приниматься во внимание для контроля структурной плотности. Несмотря на то, что структуры могут располагаться в разных геометрических

формах, шестиугольная матрица является единственной универсальной геометрической формой, поскольку предлагает самую плотную посадку.

Однако уменьшение регулярного расстояния структуры дает возможность для дальнейшего увеличения плотности посадки. Структурирование на наноуровне широко изучалось многими исследователями на предмет потенциального воздействия, рассматривалась не только эффективность вывода света ввиду своей значительно увеличенной плотности насадки, но и внутренняя квантовая эффективность в результате улучшения качества эпитаксии.

Многие исследователи пришли к выводу о значительном улучшении светоотдачи СИД на наноструктурированных подложках — как на стандартных планарных, так и на микроструктурированных подложках. До настоящего времени ССП на наноуровне не адаптированы для производства СИД из-за высокой степени ориентированности на требования заказчика.

Обычно нано-ССП изготавливаются путем наноструктурирования ФР на сапфировых подложках посредством тиснения или оптической литографии высокого разрешения и далее травлением ИСП. Оптическая литография высокого разрешения для нано-ССП требует очень высокой степени прямолинейности подложки, что становится серьезным вызовом для существующих поставщиков сапфировых подложек. В промышленности есть некое единое мнение о том, как каждый расчетный элемент ССП работает в выведении света СИД. Но это скорее вызвано нежеланием изготовителей кристаллов СИД раскрывать деликатную, запатентованную информацию другим участникам рынка.

Основные технологические параметры

Мы рассмотрели различные расчетные параметры в профиле ССП с точки зрения характеристик вывода света в СИД. Среди наиболее важных параметров выделяют высоту, ширину, шаг (регулярное расстояние между очертаниями структур) и форму. Единообразие данных параметров стык в стык вдоль всей полупроводниковой пластины, а также от пластины к пластине является очень важным аспектом в отношении оптимальной организации производства кристаллов СИД и обеспечения работы с минимальными затратами.

Создание регулярных структур на сапфире выполняется СТР ИСП со структурированной ФР-маской наверху сапфировых подложек. Создание точных и равномерных структур высокого разрешения в ФР-маске является первым шагом на пути к созданию эффективных ССП. В равной степени важно и поддержание структурной целостности данной ФР-маски на протяжении процесса СТР ИСП. Структурная жесткость может быть достигнута путем затверждения фоторезиста и/или охлаждения подложки в системе СТР ИСП. На рис. 3 показано, насколько серьезно ухудшается качество ССП, если во время травления структурная целостность и точность фоторезиста не поддерживались должным образом.

К другим важным факторам процесса СТР ИСП, критическим для характеристик профиля ССП, относятся выборочность сапфирового травления относительно маски ФР, сила ФР, давление процесса ИСП, дизайн катушки ФР для плазменной равномерности, химия плазмы и контроль температуры подложки. Успех в создании эффективной ССП определяется тем, насколько грамотно и тщательно комбинируются и применяются все параме-

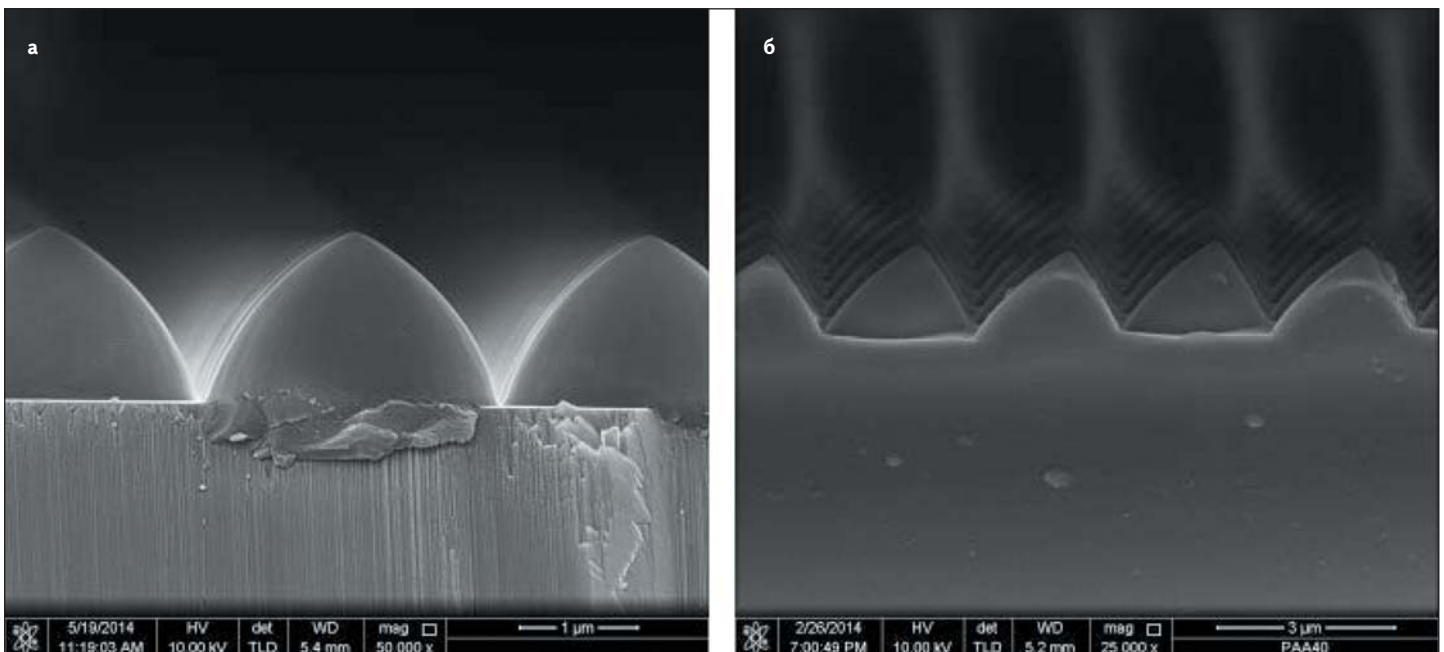


Рис. 3. ССП, обработанная с помощью ФР-маски: а) с хорошей структурной жесткостью после сухого плазменного травления; б) структурная жесткость ФР-маски не поддерживается во время процесса травления

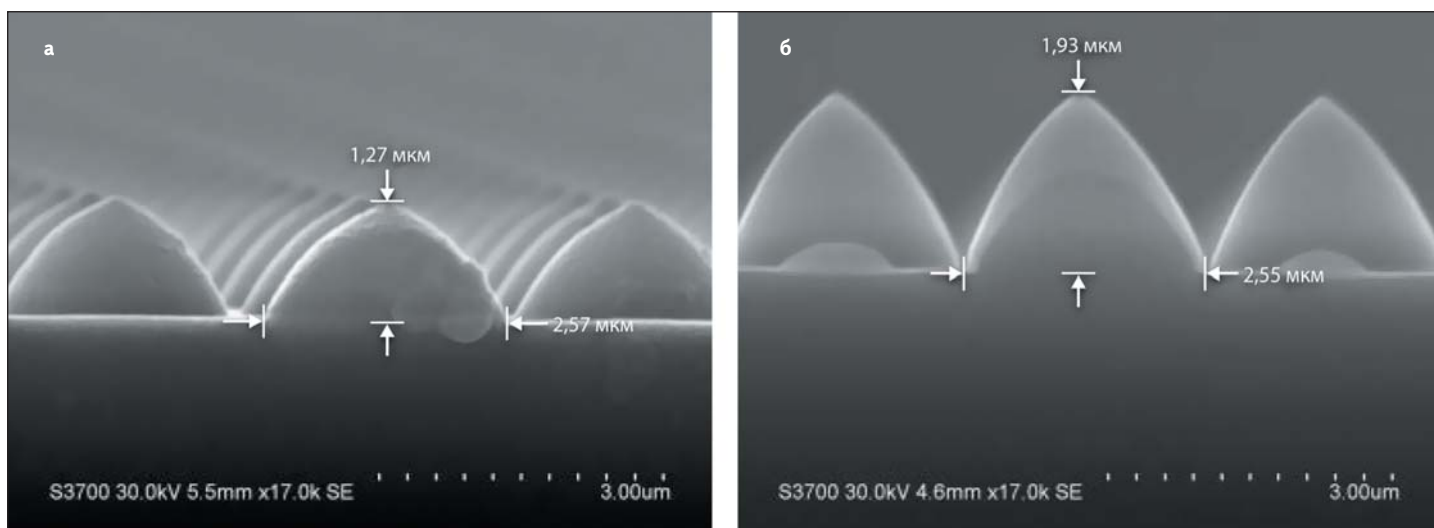


Рис. 4. Полупроводниковая пластина: а) высота 1,27 мкм, ширина 2,57 мкм; б) высота 1,93 мкм, ширина 2,55 мкм

тры. На рис. 4 показаны различные варианты спроектированных структур в зависимости от комбинирования данных параметров.

Тренды сегодняшнего рынка ССП

До сих пор в промышленности ССП доминируют изготовители кристаллов СИД. Они либо изготавливают ССП для внутреннего пользования, либо отдают производство кристаллов

на аутсорсинг сторонним предприятиям. Однако ситуация начинает меняться, и бразды правления переходят от изготовителей кристаллов СИД к производителям сапфировых подложек.

Сегодня производители сапфировых полупроводниковых пластин накладывают структуры на сапфировые полупроводниковые пластины, делая это в партнерстве с изготовителями кристаллов СИД. Однако большинство сапфировых производителей придерживаются структурирования малого диаметра в диапазоне

2–4 дюйма. Небольшое количество компаний начинают внедрять 6-дюймовые продукты. Компания Rubicon Technology запустила производство продуктов ССП большего диаметра: 4, 6 и 8 дюймов в 2013 году и дифференцировала свои предложения за счет лучшего контроля качества и вертикально интегрированного подхода в промышленности. ●

Оригинал статьи опубликован на <http://ledsmagazine.com>