



Контроль качества VCSEL с помощью электронной микроскопии

Ключевые слова: VCSEL, масс-спектроскопия, распределенный отражатель Бэгга, электронная микроскопия.

Благодаря активному развитию смартфонов, лидаров и волоконно-оптических систем передачи данных объем рынка инфракрасных устройств постепенно растет. Большое внимание здесь привлекают излучающие с поверхности полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL), обладающие такими преимуществами, как низкий начальный ток, почти круглый луч, малый угол ориентации луча и т. д. В 2017 г. корпорация Apple впервые применила эти приборы с низким энергопотреблением в смартфоне iPhone X для распознавания лиц, а в соответствии с тенденциями развития искусственного интеллекта VCSEL вскоре могут стать одним из основных источников излучения для 3D-сенсорных модулей.

С точки зрения технологического процесса качество VCSEL определяется по трем аспектам:

- многослойные распределенные отражатели Брэгга (DBR);
- множественные квантовые ямы (MQW);
- окислительно-кислородные диффузионные слои.

Все эти структуры состоят из нескольких слоев, толщина каждого из них составляет всего несколько нанометров. Из-за низкой контрастности этих слоев, сходных по химическому составу, наблюдать за границами подобных многослойных структур традиционными методами, с помощью электронного микроскопа, довольно затруднительно, не говоря уже о последующем анализе материала. Для преодоления проблемы корпорация MSS (MSSCorps, Синьчжу, Тайвань) разрабаты-

ет новую технологию визуализации на базе электронного микроскопа. Методика ориентирована в первую очередь на полупроводниковые соединения типа A^mB^v . Предполагается, что новый подход позволит увидеть неразличимые с помощью традиционных методов многослойные изображения, за счет чего может быть произведена точная интерпретация полученных данных.

Недавно новая методика корпорации MSS была проверена на коммерчески доступном VCSEL, купленном на открытом рынке. Речь идет о модуле VCSEL фирмы Vixar (дочерняя фирма корпорации Osram) – модели PLPVCC2 940A_P. Спецификации прибора, извлеченного из корпуса, приведены в табл. 1. Процесс анализа начинается после извлечения модуля из корпуса и осуществляется поэтапно – от макро- к микропредставлению, что позволяет дать подробную информацию о VCSEL.

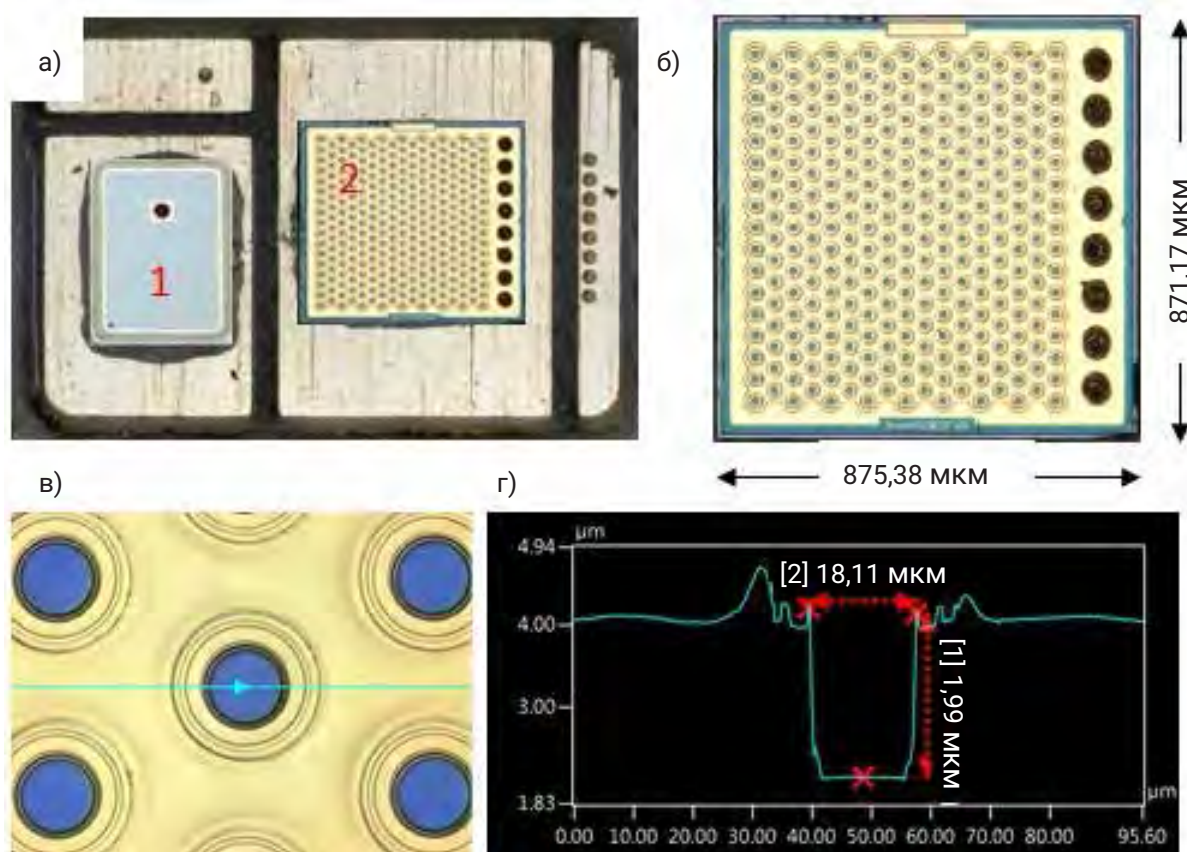
ТАБЛИЦА 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ VCSEL КОМПАНИИ VIXAR, МОДЕЛЬ PLPVCC2 940A_P

Источник: MSScorpс

Корпус	Керамический корпус для поверхностного монтажа (SMD) с окном рассеивателя из стекла
Технология реализации кристалла	Массив ИБП GaAs VCSEL
Длина волны ИК-лазера	940 нм
Класс оптической мощности	2 Вт в импульсном режиме; 7 мВт на апертуру
Профиль излучений	60°×45°

На рис. 1 показано изображение модуля VCSEL после его извлечения из корпуса, полученное при помощи методов оптической

микроскопии. Модуль состоит из двух основных частей – фотодиода и кристалла матрицы VCSEL. Увеличенное изображение (1б) пока-



Источник: MSScorpс

Рисунок 1. Обозначения: а – изображение модуля VCSEL после извлечения из корпуса, полученное при помощи оптической микроскопии (ОМ); 1 – диод контроля мощности, 2 – матрица импульсных VCSEL; б – ОМ-изображение VCSEL матричной ИС; в – топография VCSEL, боковой разрез, полученный при помощи 3D-конфокального лазера; г – поперечный разрез апертуры, показанной в части в (синяя линия)



ТАБЛИЦА 2 ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ АПЕРТУРЫ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ В СТАТЬЕ

Площадь кристалла	726125 мкм ²
Число отверстий	281
Размер отверстия	1028,7 мкм ²
Спейсер апертуры	90,5 мкм
Высота слоя металлизации	1,99 мкм

Источник: MSScorps

зывает, что в матрице насчитывается 281 отверстие с находящимися в них поверхностями излучения VCSEL, каждое из которых выдает излучение мощностью 7 мВт, суммарной мощностью 2 Вт. Такая высокая выходная мощность может быть связана с высокой стабильностью управления технологическим процессом. 3D-топография апертуры может быть построена с помощью 3D-лазерного конфокального профиля. Также на рисунке (1в) представлено изображение излучающей поверхности VCSEL крупным планом. Исходя

из измерения топографии поверхности, диаметра и высоты слоя металлизации апертурной структуры, специалисты MSScorps сформировали табл. 2.

Как уже упоминалось ранее, формирование изображения многослойных структур в полупроводниковых приборах на основе материалов группы A^{III}B^V традиционными методами электронной микроскопии достаточно проблематично. Плохая контрастность слоев и нечеткость их границ резко затрудняет аналитику.

ВЫСОКОКОНТРАСТНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ РАЗРЕЗОВ СТРУКТУР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ГРАНИЦ

Поперечная структура апертуры VCSEL может быть четко проанализирована при помощи высококонтрастного растрового сканирующего электронного микроскопа (SEM). На рис. 2 представлено поперечное сечение одной из апертур матрицы VCSEL, а также основные внутренние структуры. Из увеличенных изображений SEM (здесь не показаны) видно, что VCSEL имеют в общей сложности 21 пару Р-легированных и 44 пары N-легированных многослойных DBR. Данные о размерах и соответствующих материалах многослойных DBR приведены в табл. 3, а локальные увеличенные SEM-изображения представлены в частях а–д на рис. 3.

Новейшая методика формирования изображения электронным микроскопом в соче-

тании с применением технологии электронно-энергетического фильтра позволяет не только обеспечить эффективное увеличение контраста внутри многослойной структуры. Главное в этом случае, пожалуй, то, что пространственное разрешение изображения остается неизменным.

Таким образом, границы в многоуровневой слоистой структуре могут быть четко различены (зеленая скобка – 3г и граница конца оксидного слоя – 3д). В отличие от этого, применение традиционных методов визуализации SEM (нормальная визуализация, рис. 3г' и 3д') дает размытое изображение многослойной структуры, и определение границ становится невыполнимой задачей.



Рисунок 2. Изображение поперечного разреза VCSEL, описываемого в данной статье, полученное при помощи растрового электронного микроскопа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ДИАПАЗОНА

Один из важных процессов при изготовлении VCSEL – боковая диффузия кислорода в многослойном DBR. Она играет ключевую роль в обеспечении равномерного распределения выходного излучения и угла расхождения, что в свою очередь влияет на точность восстановления

3D-волнового фронта излучения. В общем случае диффузия элементов может быть определена с помощью масс-спектрометрии вторичных ионов (secondary ion mass spectrometer, SIMS). Однако из-за ограниченного пространственного разрешения (около 40 нм) и сложной подготов-

ТАБЛИЦА 3 РАЗМЕРЫ МНОГОСЛОЙНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ И НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛЫ

Структура	Материал	Толщина, нм
Пассивация	SiN_x	168,2
Верхний GaAs-слой	GaAs (чистый)	51,3
Слой окна	AlGaAs	121,4
Р-легированный DBR	$\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}$	60,7
	$\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$	75,5
Слой оксида	Al_2O_3	42,5
Спейсер	$\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	140,3
Напряженные квантовые ямы	GaAs	85,1
Спейсер	$\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	78,2
N-легированный DBR	$\text{Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$	58,7
	$\text{Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}$	73,5
Базовая область	GaAs	Нет данных

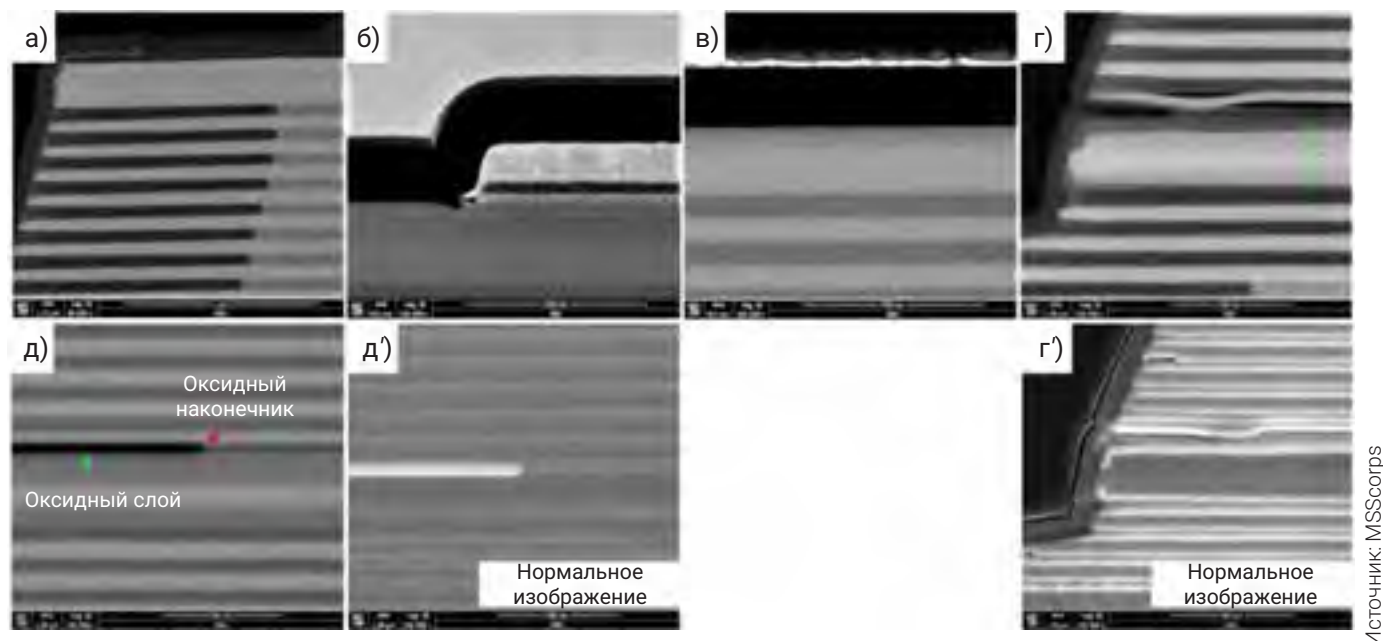


Рисунок 3. От а до д – изображения растрового электронного микроскопа, взятые из помеченных в рис. 2 красными прямоугольниками участков. Изображения д' и г' взяты из тех же самых зон д и г, но при помощи традиционных методов формирования изображения

ки образцов в зоне диффузии SIMS – не самое подходящее для этой цели инструментальное средство. Методика MSS предоставляет передовую технологию визуализации для анализа диффузионной области в боковых частях многослойных структур DBR, обеспечивая контрастную дифференциацию между диффузионной областью (областью высокого сопротивления) и недиффузионными областями (рис. 4а). Дифференциация может быть еще усилена с помощью полноцветного отображения (4б), на котором визуально можно наблюдать границу между диффузионными и недиффузион-

ными областями. Тот факт, что в диффузионной области обнаружен равномерный контраст, свидетельствует о высокой стабильности диффузионного процесса. Кроме того, если внимательно наблюдать контраст на границах и поверхностях раздела (синяя пунктирная линия на рис. 4в), можно заметить, что это не крутое изменение на границе раздела, а постепенный (ступенчатый) процесс с различными градиентами в каждом слое (черная стрелка на рис. 4в). Этот результат дает инженерам-технологам полезную и важную информацию для корректировки диффузионных процессов.

МИКРОСТРУКТУРА

Микроструктура VCSEL анализируется при помощи растрового просвечивающего электронного микроскопа (STEM). Благодаря высокому пространственному разрешению и высокой контрастности при сопоставлении состава и дефектов, STEM может быть надежным инструментальным средством

анализа тонких структур и их границ раздела, особенно для полупроводников типа $A^III B^IV$. С помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS¹⁶), используемой в STEM, можно получить информацию о распределении элементов в исследуемых структурах (рис. 5).

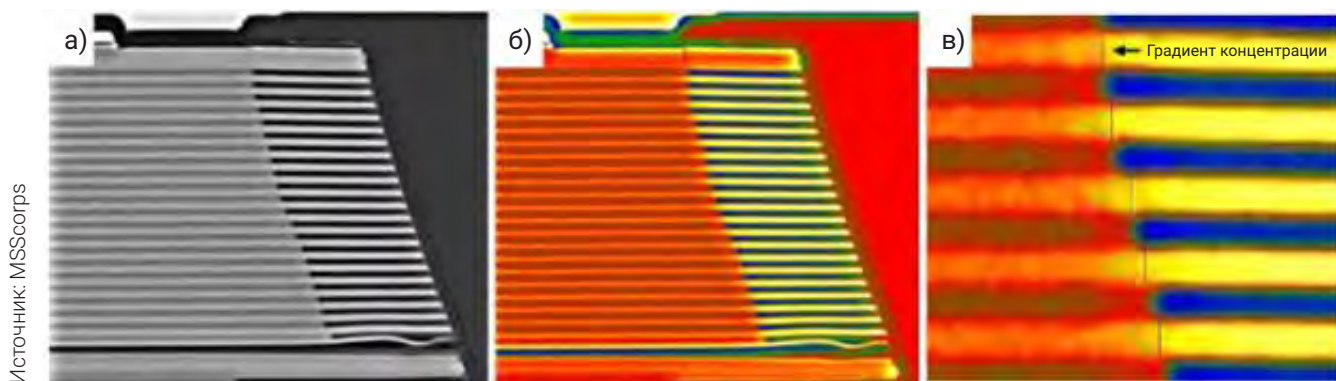


Рисунок 4. Обозначения: а – SEM-изображение, полученное при помощи перспективных методов формирования изображения; б – полноцветное изображение части а; в – масштабированное изображение части а

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

На рис. 5б–д представлены изображения VCSEL, сделанные STEM в местах, отмечен-

ных на рис. 5а. Эти изображения можно подробно сопоставить с предшествующими SEM-

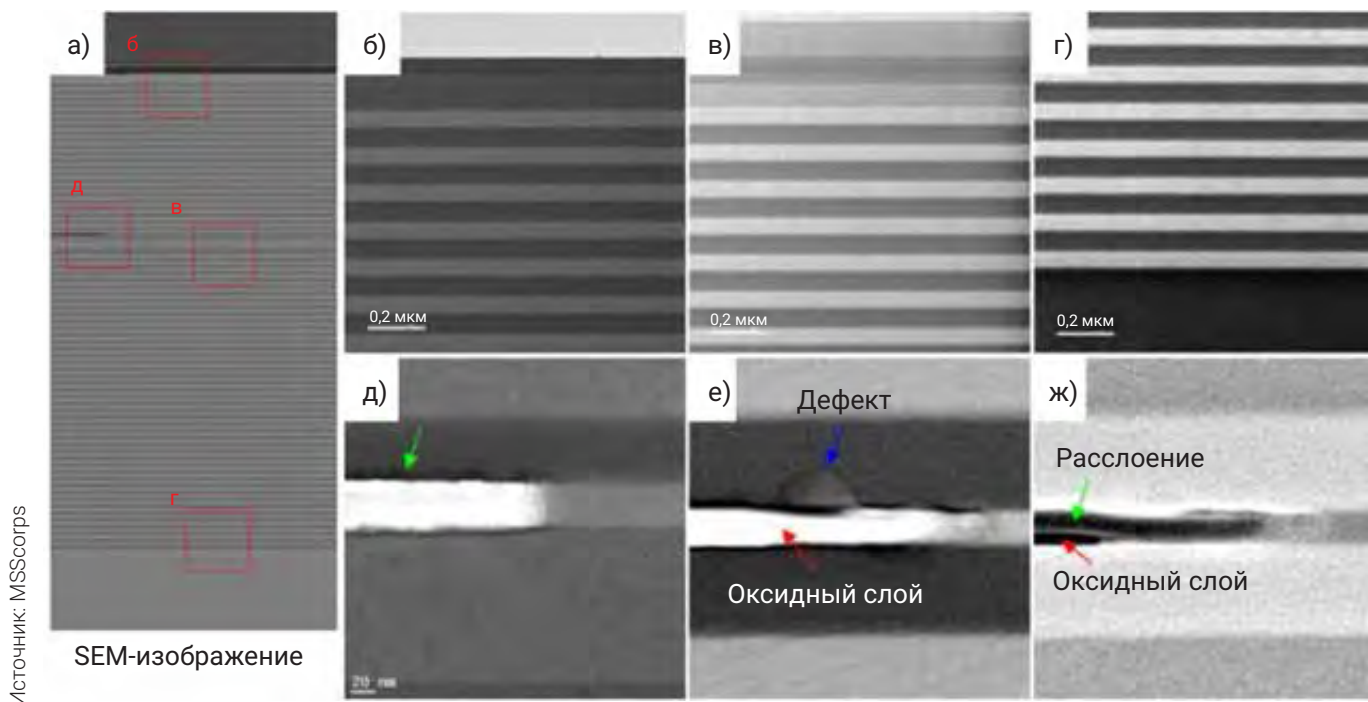


Рисунок 5. Обозначения: а – поперечное SEM-изображение VCSEL; б–д – STEM-изображения, взятые из мест, помеченных на части а красными прямоугольниками; е – STEM-изображение, взятое из образца оксидного слоя в месте обнаружения дефекта; ж – изображение расслоения в оксидном слое, полученное в режиме TEM ZC (взято из другого образца)



МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

За последнее десятилетие рынок сканирующих электронных микроскопов значительно увеличился. Сегодня системы активно используются в центральных заводских лабораториях современных производственных предприятий и научно-исследовательских институтах. Они стали более эргономичны и экономичны по сравнению с традиционными достаточно дорогими стационарными приборами. Кроме того, современные устройства имеют интуитивно понятный интерфейс, и специалистам-операторам не требуется длительного специального обучения.

Наиболее широкое применение данный вид оборудования получил в следующих видах исследований: металлографических, порошков и композитов, фрактографических, а также при проведении локального микрорентгено-спектрального анализа химического состава образцов.

В полупроводниковой промышленности, микро- и радиоэлектронике данные приборы в основном служат для создания контрастных изображений с высоким разрешением, снятий микрохарактеристик, изучения макрообразцов для нанометрической метрологии, обнаружения и снятия параметров частиц, корректиров-



ки микроэлектронных изделий в ходе их создания, дефектоскопии и анализа неисправностей сверхминиатюрных устройств.

Александр Фролов, начальник группы технической микроскопии Направления неразрушающего контроля и научно-исследовательского оборудования ООО «Остек-АртТул»

изображениями (рис. 2 и 3), особенно вблизи оксидного слоя (рис. 5д, оксид галлия). Здесь можно четко наблюдать локальную область напряженности, вызванную внедрением оксида галлия (обозначено зеленой стрелкой). Одна из важных задач для инженеров-технологов – добиться понимания процессов и управления областью напряженности внутри оксида галлия, это обеспечит улучшение энергетических характеристик. Неоднородная локальная напряженность, вызванная недостаточным контролем технологического процесса формирования слоя оксида галлия,

может стать причиной возникновения неожиданных дефектов, снижения выхода годных и выходящей мощности излучения. На рис. 5е и 5ж показаны два примера, взятые из разных образцов.

На рис. 6 отображен результат формирования топограмм при помощи ЭЦП вблизи оксидного слоя. На нем можно наблюдать распределение соответствующих элементов. Дело в том, что равномерный сигнал кислорода, показанный в оксиде галлия (рис. 6б), безусловно указывает на высокую стабильность производства в процессе окисления.

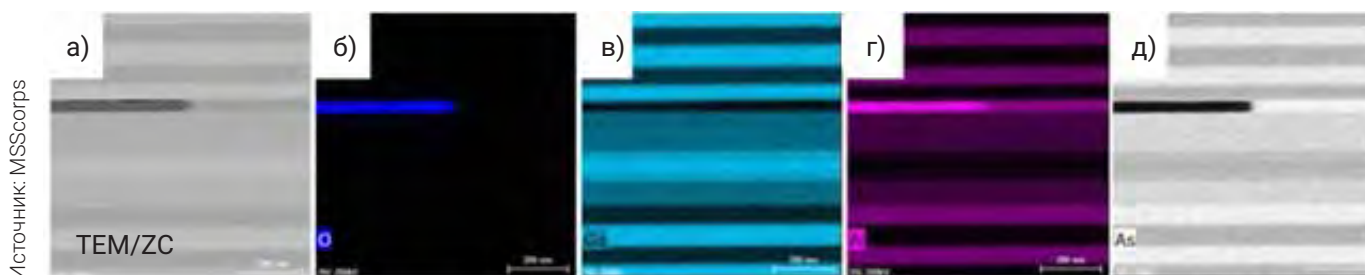


Рисунок 6. Анализ отображения различных мест оксидного слоя, осуществленный при помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

ИЗУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТА СОСТАВА

Один из важных факторов, определяющих качество VCSEL в дополнение к однородности оксидного слоя и контролю напряженностей, – технологическая однородность многослойного DBR. В процессе изготовления неизбежна взаимная диффузия атомов между соседними слоями. Нет никаких сомнений в том, что SIMS – лучший инструмент для получения количественных данных о диффузии атомов. Однако для качественного понимания хорошим выбором все еще оста-

ется электронный микроскоп, благодаря которому можно непосредственно наблюдать результаты. Как уже упоминалось ранее, наиболее сложным представляется четкое различение границ многослойного DBR (рис. 7б, зеленая пунктирная линия). Для решения этой проблемы корпорация MSS разрабатывает уникальную технологию обработки изображений, с помощью которой можно ясно увидеть более детализированную многослойную структуру (рис. 7в). Таким образом,

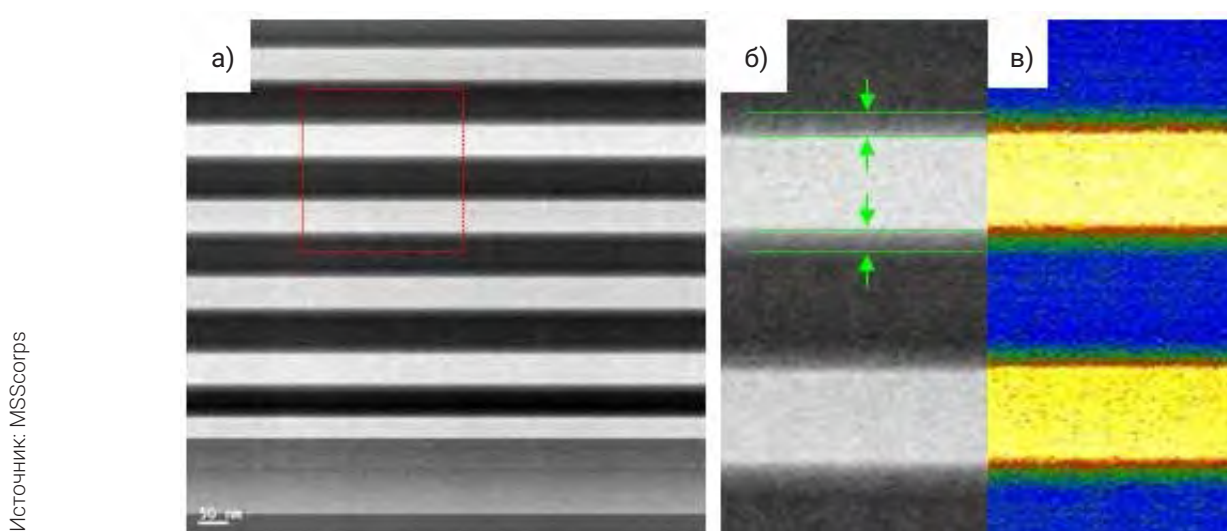


Рисунок 7. Поперечное сечение VCSEL: а – поперечное сечение многослойного распределенного отражателя Брэгга, полученное при помощи STEM; б – увеличенная область части а, отмеченной красным прямоугольником; в – полноцветное отображение части б



разработчики получают качественное представление о градиенте состава в многослойном DBR.

Изображения на рис. 5–7 и результаты анализа микроструктуры позволяют сделать вы-

вод о высокой стабильности процессов формирования оксида галлия и многослойного DBR, что убедительно доказывает, почему современные VCSEL могут иметь такую высокую выходную мощность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В описанной работе специалисты корпорации MSS для анализа внутренней структуры VCSEL использовали два электронных микроскопа – SEM и STEM. Благодаря перспективной технологии визуализации и методу обработки изображений они сумели проанализировать тонкие структуры оксид-

ного слоя и многослойного DBR, изображения которых не удавалось получить традиционными методами визуализации. Эту ценную информацию инженеры-технологи смогут использовать для проектирования и производства более качественных и производительных изделий.



Advanced Electron Microscope Imaging Technology for Unveiling VCSEL Fabrication Process Details. EE Times magazine, July 29, 2020: <https://www.eetimes.com/advanced-electron-microscope-imaging-technology-for-unveiling-vcsel-fabrication-process-details/>