

# Влияние особенностей гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/(Al)GaAs, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии, на спектр излучения одномодовых лазерных диодов

П.В.Булаев, О.И.Говорков, И.Д.Залевский, В.Г.Кригель,  
А.А.Мармалюк, Д.Б.Никитин, А.А.Падалица, А.В.Петровский

*Методом МОС-гидридной эпитаксии изготовлены лазерные гетероструктуры с активной областью, состоящей из двух напряженных InGaAs квантовых ям. Из указанных гетероструктур изготовлены одномодовые лазерные диоды с шириной полоскового контакта 3–4 мкм и изучены их спектральные характеристики. Установлено, что спектр диодов состоит из двух групп продольных мод, наличие которых вызывает уширение спектра. Распределение мощности излучения между этими группами мод носит динамический характер и зависит от тока накачки и температуры активной области. Высказано предположение, что такой характер спектра диодов связан с асимметрией состава их активной области, возникающей вследствие сегрегации индия из-за сложного механизма его вхождения в твердый раствор в процессе эпитаксиального роста. Данное предположение было подтверждено исследованием активной области с помощью модифицированного метода оже-спектроскопии.*

**Ключевые слова:** МОС-гидридная эпитаксия, лазерный диод, квантовая яма, оже-спектроскопия.

## 1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке лазерных диодов (ЛД), излучающих в диапазоне 900–1000 нм одну пространственную моду и имеющих выходную мощность 100 мВт и более. Такие диоды позволяют сформировать пучок выходного излучения с низкой расходимостью и высокой плотностью мощности. Как правило, эти ЛД изготавливаются на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs со сверхтонкими активными слоями (квантовыми ямами) InGaAs.

В настоящей работе из гетероструктур с двумя квантовыми ямами были изготовлены ЛД с длиной волны излучения 980 нм и выходной мощностью 100 мВт. Наибольшее внимание уделялось изучению спектра ЛД, содержащего две группы продольных мод, что приводило к значительному его уширению.

Этот факт наряду с тем, что распределение мощности между модами менялось с температурой активной области и током накачки, может оказаться критическим для ряда применений таких лазеров. Предположение о зависимости спектра от асимметрии состава квантовых ям, что, в свою очередь, обусловлено особенностями вхождения In в процессе эпитаксии, было подтверждено после изучения активной области ЛД с помощью модифицированного метода оже-спектроскопии. Модификация метода, заключающаяся в оптимизации энергии и угла падения травящего ионного и возбуждающего электронного пучков, позволила добиться достаточно высокого разрешения и проанализировать профиль гетероструктуры, включая сверхтонкие слои активной области толщиной ~ 5 нм.

## 2. Эксперимент

Гетероструктуры для одномодовых лазерных диодов с длиной волны излучения 980 нм выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении. Выращивание осуществлялось в системе с горизонтальным прямоугольным кварцевым реактором SigMOС-130, разработанным специалистами ООО «Сигм Плюс». Подложки размещались на вращающемся графитовом подложкодержателе. Его вращение, необходимое для обеспечения повышенной однородности структур, осуществлялось с помощью потока газа. Температура роста структур составляла 650–750 °С. Типичное рабочее давление в камере реактора было 60–70 Тор. В качестве источников элементов третьей группы использовались триэтилгаллий, триметилалюминий и триметилиндий. Источником элементов пятой группы был 100 %-ный арсин (AsH<sub>3</sub>). Диэтилцинк и моносилан служили источниками легирующих примесей р- и n-типа соответственно.

Перед подачей в газовую систему арсин проходил двухступенчатую очистку продувкой через цеолит и суперочиститель «Сигма-ХИМ-1.0». Это позволило снизить содержание кислорода и воды в арсине до 0.1 ppm. В качестве газа-носителя использовался водород, очищенный методом диффузии через нагретый до 450 °С палладиевый фильтр; водород имел точку росы не выше –100 °С. Выращивание производилось на подложках GaAs, легированных Si, которые были ориентированы по плоскости (100) и имели небольшую разориентацию (1–2°) в направлении [110].

Типичная структура состояла из двух квантовых ям In<sub>z</sub>Ga<sub>1-z</sub>As (z = 0.15 – 0.18), окруженных промежуточными слоями GaAs, волноводными слоями Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (x = 0.18 – 0.24) и эмиттерными слоями Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As. В качестве контакта использовался слой GaAs с высоким уровнем легирования. Оптимизация режимов роста, про-

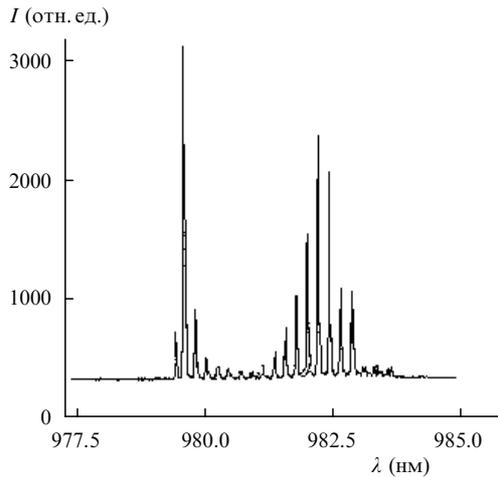


Рис.1. Типичный спектр ЛД с двумя группами продольных мод.

филя легирования и состава слоев позволила добиться низких оптических потерь и высокой внутренней квантовой эффективности.

На основе выращенных гетероструктур были изготовлены лазерные диоды с длиной резонатора и шириной полоскового контакта 600–800 мкм и 3–4 мкм соответственно. Коэффициенты отражения покрытий передней и задней торцевых граней кристалла составляли 5–10 % и 96–97 %. Пороговый ток был равен 15–20 мА, выходная мощность излучения составляла 100 мВт при токе накачки 130–150 мА. Распределения излучения в дальнем поле в плоскостях, параллельной и перпендикулярной плоскости  $p-n$ -перехода, хорошо аппроксимировались гауссовыми кривыми, что свидетельствует о том, что излучение ЛД имело одну пространственную моду. В то же время спектр излучения ЛД состоял из двух явно выраженных групп продольных мод (рис.1.)

Активная область выращенных структур исследовалась с помощью оже-спектроскопии в Аналитическом центре ФГУП НИИ «Полус». Концентрационный профиль состава был получен на сканирующем оже-спектрометре РНИ-560 (фирма «Физикал Электроникс», США). Модернизированная конструкция держателя образцов позволяла осуществлять режим ионного травления под скользящим углом ( $80^\circ$  по отношению к нормали к плоскости образца), прецизионную юстировку и совмещение ионного и электронного пучков в фокальной плоскости анализатора, что обеспечивало высокое пространственное разрешение получаемых оже-профилей по глубине. Энергия пучка ионов  $Ag^+$  составляла 1.5 кэВ. Для повышения разрешения на глубине залегания активных слоев верхние слои образца (контактный и  $p$ -эмиттер) были удалены с помощью ионного травления [1].

### 3. Результаты и их обсуждение

Типичный концентрационный профиль исследуемого образца представлен на рис.2. Концентрационный профиль In сдвинут по отношению к профилю Al в направлении к поверхности образца. Этот сдвиг (ширина переходной области при гетероэпитаксии) составляет порядка 3 нм. Аналогичный сдвиг концентрации In был отмечен в работах [3, 4]. Из рис.2 следует, что концентрация In в верхней квантовой яме больше, чем в нижней. Вероятной причиной такого концентрационного профиля

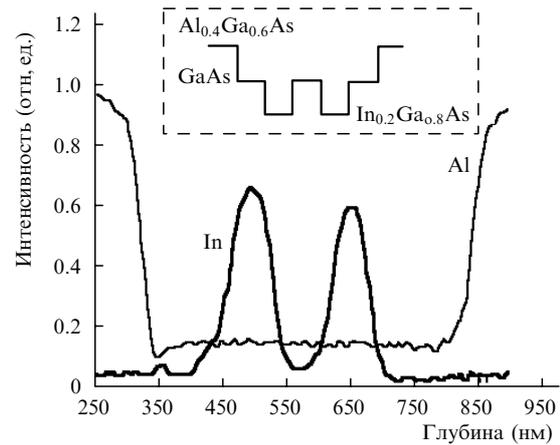


Рис.2. Типичный оже-профиль активной области ЛД. На вставке – профиль зоны проводимости.

In может быть сегрегация атомов индия при эпитаксиальном росте [5]. Известно, что атомы индия накапливаются в приповерхностном слое до тех пор, пока не достигается их равновесная концентрация [6]. После этого состав твердого раствора становится эквивалентным составу газовой фазы.

Эффект сегрегации приводит к уширению переходного слоя барьер–яма, к искажению (отклонению от идеальной прямоугольной формы) потенциального профиля ямы, а также к увеличению содержания индия во второй близкорасположенной квантовой яме. Все это является результатом достаточно продолжительного времени остаточного встраивания индия в кристаллическую решетку из приповерхностного слоя аккумулированных атомов.

С помощью уравнения Шредингера нами был проведен расчет положения энергетических квантовых уровней в двух близкорасположенных квантовых ямах. Потенциальные профили ям были описаны с учетом данных оже-спектра образцов. При расчете не учитывалось напряжение смещения, которое подается на структуру при инжекционной накачке лазерного диода. Тем не менее результаты расчетов могут служить основой для объяснения эффекта появления двух групп мод в спектре излучения.

Вследствие наличия двух квантовых ям основной квантовый уровень (как в валентной зоне, так и в зоне проводимости) в каждой из них расщепляется на два подуровня. Излучательные переходы происходят с участием именно этих двух подуровней. В связи с этим излучаемые кванты имеют несколько различную энергию, причем разница соответствует расщеплению основного уровня и в случае одинаковых ям составляет около 1 нм. Если же вследствие разного содержания индия ямы имеют разную глубину (как в реальном оже-спектре на рис.2), то это различие, по нашим оценкам, составляет около 3–4 нм. Это и является причиной появления в спектре двух четко выраженных групп продольных мод.

### 4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что спектр излучения лазерных диодов, изготовленных на основе гетероструктур с активной областью, образуемой двумя напряженными InGaAs квантовыми ямами,

состоит из двух групп продольных мод с расстоянием между ними около 3 нм. Изучение активной области ЛД с помощью модифицированного метода оже-спектроскопии показало, что содержание индия в квантовых ямах неодинаково вследствие особенностей его вхождения в процессе эпитаксиального роста. Анализ полученного потенциального профиля активной области гетероструктуры позволил объяснить особенности спектра изготовленных лазерных диодов. Из приведенных исследований следует, что для улучшения характеристик лазерных диодов необходимо разработать специальные технологические приемы эпитаксиального выращивания сверх-

тонких напряженных слоев InGaAs для подавления сегрегации индия.

1. Davidova E.I, Govorkov O.I., Krigel V.G. et al. *Abs. of ECASIA'97* (Göteborg, 1997, p.67).
2. Procop M., Klein A., Reechnberg I., Kruger D. *Surf.Interface Anal.* **25**, 458 (1997).
3. Bulaev P.V., Govorkov O.I. et al. *Techn. Dig NANO-5* (Birmingham, UK, 1998, p.87).
4. Bugge F. et al. *J.Crystal Growth*, **183**, 511 (1998).
5. Marmalyuk A.A. et al. *Nanotechnology*, **12**, 434 (2001).
6. Kaspi R., Evans K.R. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 819 (1995).