

06;07

Генерация π -мод в полупроводниковых поверхностно-излучающих лазерах с вертикальным резонатором

© Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, А.М. Монахов, А.Ю. Савенко,
С.А. Блохин, А.Г. Дерягин, С.А. Золотовская, А.Г. Кузьменков,
С.Н. Лосев, В.В. Лучинин, Н.А. Малеев, Э.У. Рафаилов,
В. Сиббет, В.И. Кучинский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“, Россия

Carnegie Laboratory of Physics, Division of Electronic Engineering and
Physics, University of Dundee, Nethergate, Dundee, DD1 4HN, UK

School of Physics and Astronomy, University of St Andrews, St Andrews,
KY16 9SS, UK

E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2009 г.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования оптического излучения с боковых поверхностей меза-структур поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL). На основании результатов спектральных измерений излучения, выполненных с пространственным разрешением, можно утверждать, что нами обнаружен новый тип мод для VCSEL с меза-структурами круглой формы, соответствующих π -образному распространению излучения по диаметру мезы с отражением от наклонных стенок и нижнего брэгговского зеркала.

PACS: 42.55.Px

В последние годы огромный прогресс в технологии создания полупроводниковых поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL — англ.) позволил снизить значения пороговых токов и повысить эффективность VCSEL до уровня, обеспечившего их широкое применение в волоконно-оптических системах связи, оптических устройствах ввода–вывода, а также в датчиках и сенсорах различного типа [1,2]. Вместе с тем известно, что для большинства

конструкций современных VCSEL, помимо оптических мод вертикального микрорезонатора, могут существовать также моды, связанные с дисковым резонатором, ограниченным краями круглой меза-структуры. Полупроводниковые лазеры с дисковым микрорезонатором, рабочей модой которых является „мода шепчущей галереи“ (от „whispering gallery mode“ (WGM) — англ.), привлекают к себе большой научный и практический интерес [3], так как отличаются более высокой добротностью и относительно простой технологией изготовления, что, в частности, позволило недавно продемонстрировать WGM-генерацию в непрерывном режиме при температуре до 125 K на длине волны $3.04\ \mu\text{m}$ [4]. В связи с этим представляет интерес исследование модового состава излучения, выходящего через боковую поверхность мезаструктуры VCSEL, и изучение возможности генерации WGM мод в VCSEL структурах.

Одним из наиболее перспективных направлений развития технологии VCSEL является использование в качестве активной области массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ), что, в сочетании с использованием селективно-окисленных апертурных слоев AlGaAs, позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения VCSEL на подложках арсенида галлия при величине порогового тока на уровне долей миллиампера [5]. Снижение порогового тока в данном случае достигается как за счет использования квантовых точек в качестве материала активной области, так и за счет уменьшения предельно допустимых размеров токовой апертуры, поскольку латеральная диффузия носителей для структур с КТ существенно ниже, чем для традиционных структур VCSEL с квантовыми ямами. Однако для эффективного использования потенциальных преимуществ активной области на основе КТ требуется тщательная оптимизация конструкции оптического микрорезонатора.

В рамках настоящей работы был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение нескольких ключевых вопросов, связанных с особенностями излучения с боковых поверхностей цилиндрического оптического микрорезонатора VCSEL, образованного меза-структурой с наклонными стенками: 1) возможна ли генерация WGM мод в таком микрорезонаторе и как зависит межмодовое расстояние от диаметра мезы и наклона стенок; 2) является ли излучение из боковых стенок микрорезонатора VCSEL модами шепчущей галереи или спонтанным излучением, распространяющимся из центра структуры?

Для ответа на первый вопрос нами была рассмотрена модель усеченного конического резонатора. Анализ подтвердил возможность существования WGM-мод, причем межмодовое расстояние для мод шепчущей галереи в таком резонаторе равно межмодовому расстоянию в цилиндрическом резонаторе с диаметром цилиндра, равным большому диаметру усеченного конуса. Подробности анализа опубликованы в [6]. Таким образом, при диаметре мезы $48\ \mu\text{m}$ и эффективном показателе преломления 3.5 межмодовое расстояние для WGM мод в области длин волн $1\ \mu\text{m}$ составляет $1.9\ \text{nm}$.

Экспериментально исследованные структуры VCSEL были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs [1]. Легированные нижнее и верхнее (выходное) брэгговские зеркала содержали соответственно 33 и 20 пар четвертьволновых слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As с градиентным изменением состава на границах. В нелегированном Al_{0.15}Ga_{0.85}As оптическом резонаторе была размещена активная область на основе трех слоев InGaAs КТ, помещенных в области максимума оптического поля, и апертурный слой *p*-(AlAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As), расположенный в минимуме оптического поля [1]. Толщины и состав слоев структуры рассчитывались для получения длины волны генерации $980\ \text{nm}$. Меза-структуры диаметром $36\text{--}48\ \mu\text{m}$ с глубиной травления около $3.6\ \mu\text{m}$ были изготовлены методом сухого травления в пучке ионов Ar⁺. После этого выполнялось селективное окисление апертурного слоя и формирование контактов к *p*- и *n*-легированным брэгговским отражателем. Для изучения возможности генерации WGM мод заданное число слоев верхнего зеркала удалялось сухим травлением с точностью по глубине не хуже 5%. В случае удаления нечетного числа четвертьволновых слоев это позволяло подавить генерацию в вертикальном микрорезонаторе за счет уменьшения коэффициента отражения верхнего зеркала.

При исследовании ближнего поля VCSEL нами была экспериментально обнаружена лазерная генерация из боковых стенок круглой мезы (рис. 1, *a*), в полном соответствии с рассмотренной выше моделью. Зарегистрировать это излучение ранее не удавалось, по-видимому, из-за его недостаточной интенсивности по сравнению с основным излучением вертикального резонатора. Следует отметить, что отсутствие излучения из некоторой части кольца (рис. 1, *a*) связано с тем, что его регистрация в этой области невозможна из-за поглощения электрическим контактом. Излучение из боковых стенок наблюдалось для всех исследованных

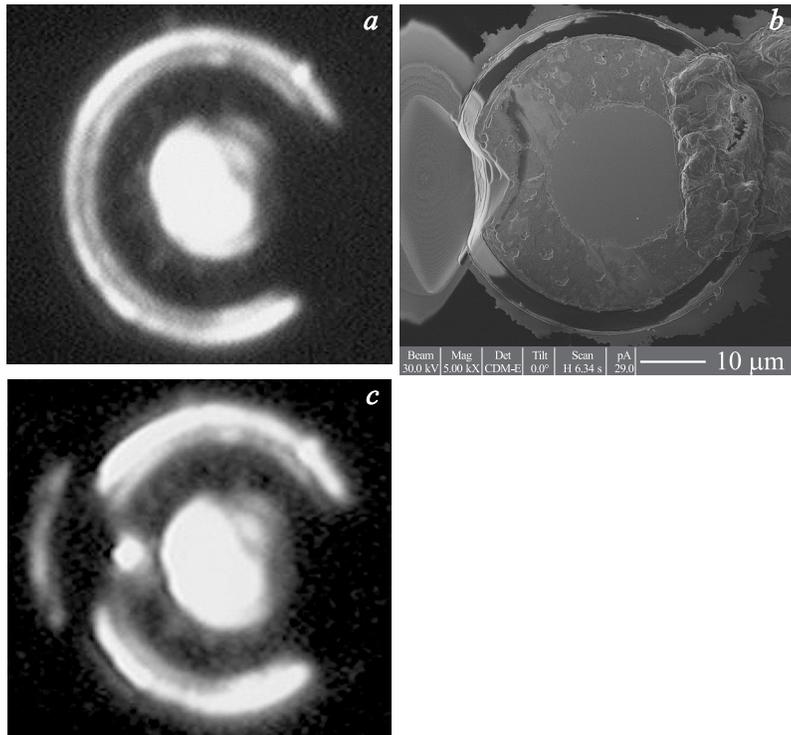


Рис. 1. Типичное распределение интенсивности ближнего поля VCSEL при накачке на уровне порога генерации $I = 0.2 \text{ mA}$ (a). Изображение круглой мезы с вытравленным сегментом (b). Типичное распределение интенсивности ближнего поля VCSEL с вытравленным из мезы сегментом при накачке на уровне порога генерации $I = 0.2 \text{ mA}$ (c).

лазеров независимо от числа удаленных слоев в верхнем зеркале. Однако в образцах VCSEL с четным числом четвертьволновых слоев из-за доминирования генерации на модах вертикального микрорезонатора, излучение из стенок меза-структуры поддавалось регистрации лишь вблизи порога генерации (из-за недостаточного динамического диапазона использовавшейся нами ПЗС-матрицы).

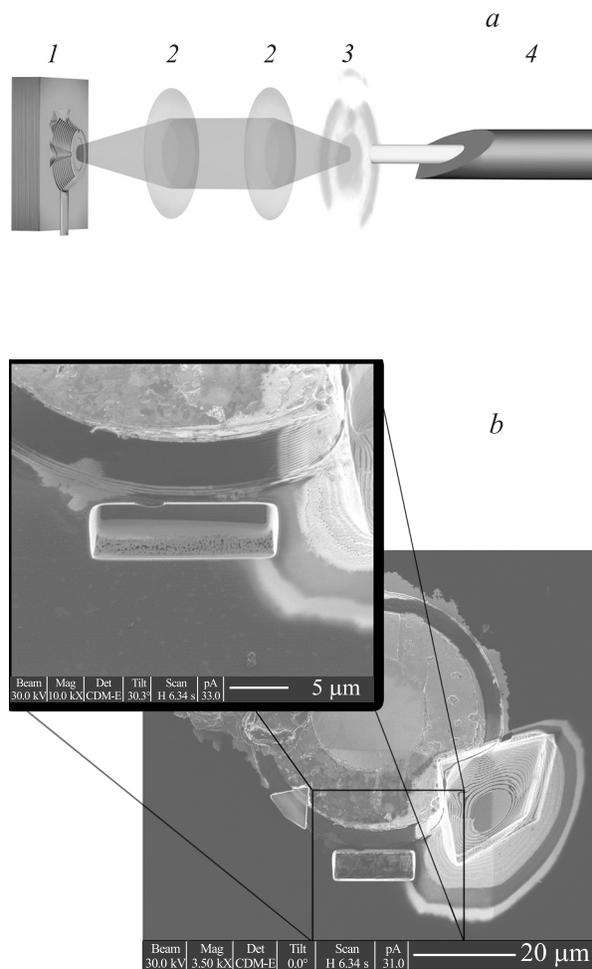


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерений спектров генерации с пространственным разрешением (*a*): 1 — VCSEL, 2 — микрообъектив, 3 — плоскость изображения, 4 — одномодовое оптическое волокно. Изображение круглой мезы с вытравленными сегментами и подтравленным нижним брегговским зеркалом для исключения π -образного распространения излучения (показано на вставке с увеличением) (*b*). Схематическое изображение π -образного резонатора в VCSEL (*c*).

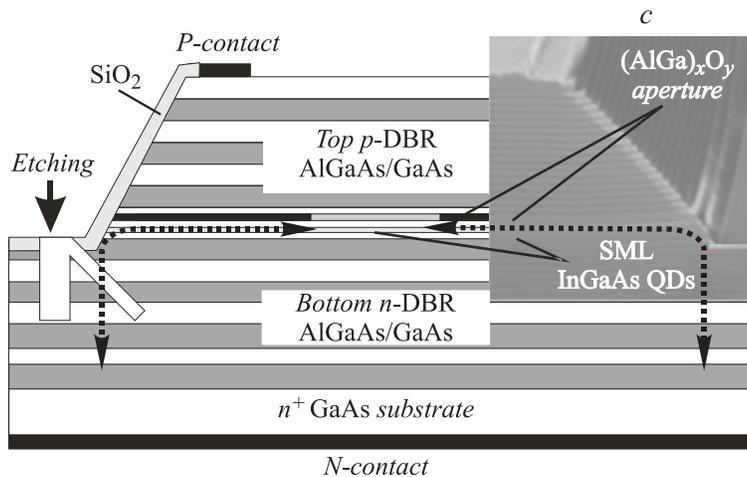


Рис. 2 (продолжение).

С целью проверки предположения о генерации мод шепчущей галереи было выполнено разрушение WGM-резонатора с помощью вытравливания сегмента из круглой меза-структуры сфокусированным ионным пучком на установке Strata FIB 205 [7] (рис. 1, *b*). При этом ожидалось нарушение генерации из боковых стенок, однако распределение интенсивности ближнего поля не претерпело видимых изменений (рис. 1, *c*). Для окончательного ответа на вопрос, является ли излучение из боковых стенок VCSEL рассеянным излучением вертикального резонатора, модами шепчущей галереи или излучением, связанным с модами резонатора другого типа, были проведены спектральные измерения с пространственным разрешением. Для этого использовалась экспериментальная установка, схематически изображенная на рис. 2, *a*. Излучение VCSEL при помощи двух микробъективов с 30-кратным увеличением проецировалось в плоскость изображения, где в качестве апертуры использовалось входное отверстие одномодового оптического волокна, что, при его прецизионном позиционировании, обеспечивало пространственное разрешение около $5\ \mu\text{m}$, определяемое эффективным диаметром волоконного волновода. Второй разъем оптического волокна был подключен к оптическому спектроанализатору, обеспечивавшему

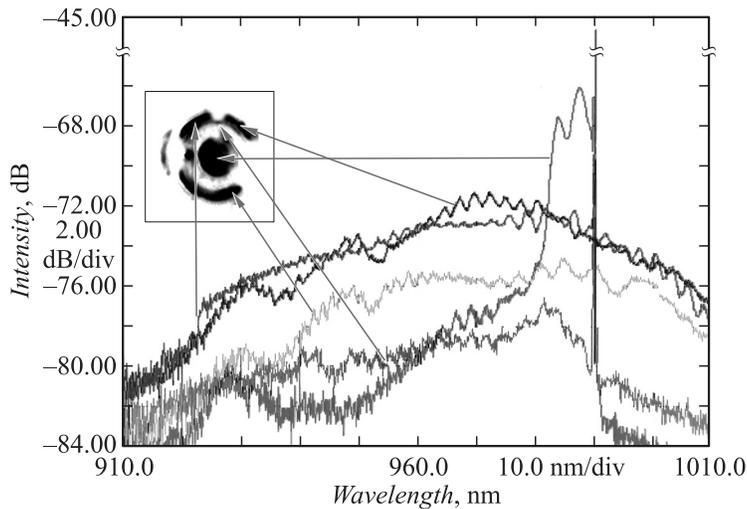


Рис. 3. Спектры генерации VCSEL с пространственным разрешением.

спектральные измерения с точностью 0.1 nm при уровне сигнала -90 dBm. Кроме того, дополнительно была проведена специальная подготовка экспериментальных образцов: вытравлен еще один сегмент из круглой мезы, расположенный таким образом, чтобы обеспечить возможность регистрации излучения с противоположной стороны круглого резонатора, а также подтравлено нижнее брегговское зеркало (рис. 2, *c*) таким образом, чтобы исключить возможность π -образного распространения излучения по диаметру круглой мезы с отражением от наклонных стенок и нижнего брегговского зеркала (рис. 2, *c*).

Сравнение спектров генерации из различных участков мезы (рис. 3) показывает, что нарушение WGM-резонатора за счет вытравливания сегмента круга не приводит к существенному изменению спектра излучения из боковых стенок, в то время как исключение возможности отражения от нижнего брегговского зеркала приводит к исчезновению спектральных линий в области 960–980 nm. Эти линии соответствуют конкурирующим модам π -образного резонатора, радиально распространяющимся по круглой мезе с отражением от наклонных стенок и нижнего брегговского зеркала (рис. 2, *c*). Длина π -образного резонатора равна сумме диаметра основания мезы (48 μm) и удвоенной

эффективной глубины проникновения излучения в брэгговское зеркало (около $2\ \mu\text{m}$ для исследуемой структуры), что, принимая эффективный коэффициент преломления равным 3.5, соответствует межмодовому расстоянию $2.7\ \text{nm}$ в полном соответствии с экспериментом.

Таким образом, на основании полученных результатов можно утверждать, что нами обнаружено излучение, соответствующее модам π -образного резонатора в VCSEL лазерах с наклонными стенками цилиндрической меза-структуры. Учет генерации π -мод может быть важен при оптимизации микрорезонаторов VCSEL лазеров для повышения их эффективности и улучшения динамических характеристик.

Список литературы

- [1] Блохин С.А., Малеев Н.А., Кузьменков Н.Г., Шерняков Ю.М., Новиков И.И., Гордеев Н.Ю., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Кучинский В.И., Кулагина М.М., Максимов М.В., Устинов В.М., Ковш А.Р., Михрин С.С., Леденцов Н.Н. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 5. С. 633–638.
- [2] Wilmsen C.W., Temkin H., Coldren L.A. Vertical cavity surface emitting lasers. New York: Cambridge Univ. Press, 1999.
- [3] Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С., Krier A., Hill G. // ФТП. 2005. Т. 39. В. 9. С. 1122–1128.
- [4] Аверкиев Н.С., Астахова А.П., Гребенищикова Е.А., Ильинская Н.Д., Калинина К.В., Кижжаев С.С., Кислякова А.Ю., Монахов А.М., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 1. С. 124–127.
- [5] Ustinov V.M., Maleev N.A., Kovsh A.R., Zhukov A.E. // Phys. Stat. Sol. (a). 2005. V. 202. N 3. P. 396–402.
- [6] Алексеенко Я.В., Монахов А.В., Рожанский И.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 11. С. 72–76.
- [7] Лучинин В.В., Савенко А.Ю. // Вакуумная техника и технология. 2008. Т. 18. В. 3. С. 191–195.