

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

УТВЕРЖДАЮ
Председатель СПбНЦ РАН
академик



Ж. И. Алфёров

О Т Ч Е Т


по теме 41.1

**«Проведение комплексных междисциплинарных
исследований в области управления выводом излучения из
оптических микрорезонаторов с квантоворазмерной
активной областью»**

по Государственному заданию СПбНЦ РАН в 2014–2016 гг.

Этап 2014 года

Научный руководитель
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН



(Жуков А.Е.)

Санкт-Петербург

2014

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

А.Е. Жуков

в.н.с., д.ф.-м.н., член-корр. РАН

Исполнители темы:

н.с., к.ф.-м.н.

А.В. Савельев

н.с., к.ф.-м.н.

Ю.М. Шерняков

н.с., к.ф.-м.н.

Н.Ю. Гордеев

РЕФЕРАТ

Отчет 32 стр., 1 том, 14 рис., 0 табл., 9 ист., 1 прил.

МИКРОРЕЗОНАТОР, КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, МИКРОДИСК, МОДЫ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ, ЛАЗЕР

Целью работы является проведение междисциплинарных комплексных исследований по следующим основным направлениям:

- 1) Достижение узкой диаграммы направленности излучения в планарных микрорезонаторах с активной областью на основе InAs/InGaAs квантовых точек;
- 2) Разработка конструкций лазеров для реализации квази-одночастотной генерацией при повышенных температурах;
- 3) Разработка метода направленного вывода излучения из торца микролазера в прямоугольный волновод и гибридной интеграции микролазера.

В соответствии с техническим заданием, в течение этапа 2014 года были проведены следующие исследования:

- Разработана конструкция и осуществлен эпитаксиальный синтез III-V гетероструктур с эффективным вертикальным оптическим ограничением, излучающих в спектральном диапазоне до 1.3 мкм, предназначенных для формирования микрорезонаторов, исследованы их оптические характеристики;

- Изготовлены оптические микролазеры с осевой симметрией различной конструкции;

- Исследован модовый состав полученных лазеров в широком диапазоне температур с помощью спектроскопии микрофотолюминесценции;

- Исследованы характеристики излучения и исследовано влияние конструкции микрорезонатора на добротность излучаемых мод и пороговую мощность лазерной генерации;

- Проведена оценка температурной стабильности характеристик лазеров.

Основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований, опубликованы в работе:

- А.Е. Жуков, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.А. Липовский, А.В. Савельев, А.А. Богданов, И.И. Шостак, Э.И.Моисеев, Д.В. Карпов, J. Laukkanen, J. Tommila, Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра, Физика и техника полупроводников 48 (12), 1666-1670 (2014).

Таким образом, в результате выполнения исследований в течение этапа 2014 года все задачи, поставленные на данном этапе, выполнены полностью.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	7
1	Разработка конструкции, эпитаксиальный синтез и оптические характеристики гетероструктур, предназначенных для формирования микрорезонаторов...	9
2	Исследования модового состава микролазеров.....	15
3	Влияние конструкции микрорезонатора на добротность излучаемых мод и пороговую мощность лазерной генерации.....	19
4	Оценка температурной стабильности характеристик лазера.....	26
	Список литературы	30
	Заключение.....	31
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Титульная страница публикации А.Е. Жуков и др., Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра, ФТП 48 (12), 1666-1670 (2014).....	33

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Русскоязычные сокращения

КТ	- квантовые точки
МДР	- микродисковый резонатор
МКР	- микрокольцевой резонатор
МШГ	- мода шепчущей галереи
Отн. ед.	- относительные единицы
ФЛ	- фотолюминесценция

Англоязычные термины

ES	– excited state – возбужденное состояние
GS	– ground state – основное состояние
TE	– transverse electric – поперечные электрические
TM	– transverse magnetic – поперечные магнитные
QW	– quantum well – квантовая яма

ВВЕДЕНИЕ

В микролазерах, имеющие резонатор в форме микрокольца (МКР) или микродиска (МДР) наивысшей добротностью, в отличие от вертикально-излучающих лазеров, обладают моды шепчущей галереи (МШГ), распространяющиеся по окружности резонатора. Благодаря тому, что отражение волны от боковой поверхности структуры происходит под скользящим углом, в резонаторах с МШГ возможно достижение низкопороговой генерации при размерах, гораздо меньших по сравнению с типичными для лазерных резонаторов Фабри-Перо. Кроме того, малые размеры МШГ-резонатора, обеспечивая большое расстояние между соседними резонансными длинами волн, способствуют достижению одночастотной генерации. Все это, в сочетании с выводом излучения в плоскости структуры, делает МКР и МДР привлекательными кандидатами для использования в будущих системах оптической связи на плате.

Одним из ключевых параметров микролазера является его высокая температурная стабильность. Особенно перспективным представляется использование в качестве активной области массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ). Благодаря глубокой локализации носителей заряда в структурах с КТ латеральный транспорт носителей затруднен и, как результат, влияние безызлучательной рекомбинации на боковых стенках микрорезонатора подавлено.

Наибольший интерес представляют микролазеры возможно меньшего размера, поскольку спектральное расстояние между соседними модами растет с уменьшением диаметра, способствуя достижению одночастотной генерации. В то же время потери, связанные с изгибом волновода (кривизной его боковой поверхности), экспоненциально растут при уменьшении радиуса микродискового/микрокольцевого резонатора [1] и оказываются

доминирующими в микрорезонаторах малых размеров. Например, выполненные в работе [2] расчеты добротности кольцевого резонатора на основе кремния на изоляторе дают для длины волны вблизи 1.5 мкм значения потерь около 4 см^{-1} для радиуса 1.5 мкм, тогда как при уменьшении радиуса до 1 мкм потери возрастают до 100 см^{-1} . Поскольку оптическое усиление, которое может быть достигнуто на основном оптическом переходе квантовых точек, ограничено (так называемое «насыщенное усиление»), должен существовать минимальный размер резонатора, до которого может быть реализована лазерная генерация в микролазере с квантовыми точками.

В настоящей работе нами исследованы микрорезонаторы с КТ предельно малого диаметра (до 1 мкм).

ОСНОВАЯ ЧАСТЬ

1. Разработка конструкции, эпитаксиальный синтез и оптические характеристики гетероструктур, предназначенных для формирования микрорезонаторов

Схематическое изображение гетероструктуры, используемой для формирования микрорезонаторов, приведено на рисунке 1. Гетероструктур содержит активную область на основе квантовых точек, помещенных в оптический волновод на основе GaAs на буферном слое AlGaAs.

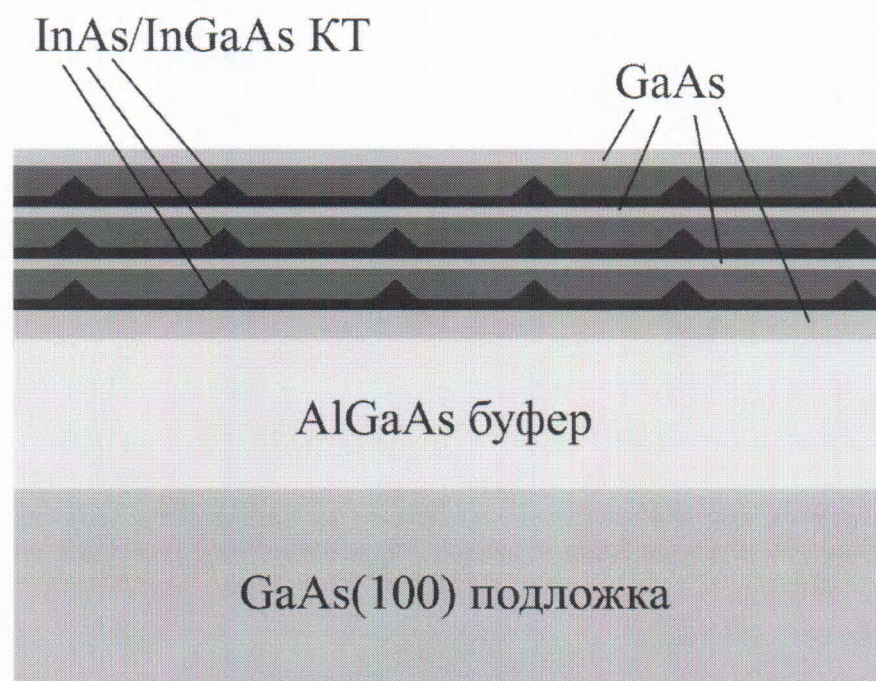


Рисунок 1 Схематическое изображение конструкции гетероструктуры на основе квантовых точек, предназначенной для формирования микрорезонатора

Эпитаксиальный синтез гетероструктуры был осуществлен методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 49 на полуизолирующей подложке GaAs (100).

Квантовые точки формируются в результате спонтанной трансформации слоя InAs, толщина которого превышает критическую толщину в 1.7 монослоя, в массив островков. Затем сформированные островки InAs покрываются тонким слоем (квантовой ямой) InGaAs. Эффективная толщина осажденного InAs, а также толщина покрывающей квантовой ямы и содержание InAs в ней выбираются таким образом, чтобы энергия основного оптического перехода в квантовых точках среднего размера составляла при комнатной температуре около 0.96 эВ.

Слои квантовых точек разделяются спейсерами (прослойками) GaAs толщиной 30 нм. В активной области структуры было использовано пять рядов квантовых точек, помещенных в середину волноводного слоя GaAs. Толщина волноводного слоя составляет около 0.2 мкм. Со стороны подложки и со стороны поверхности волноводный слой с квантовыми точками ограничен слоями AlGaAs толщиной 5 нм. Мольная доля арсенида алюминия в этих ограничивающих слоях составляет около 30%.

Волноводный слой ограничен со стороны подложки буферным слоем $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ толщиной 400 нм. Этот слой предназначен для формирования ограничения оптической моды внутри волноводного слоя за счет разницы показателей преломления между волноводным слоем GaAs, имеющим вблизи длины волны 1.3 мкм показатель преломления около 3.4 и $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$, имеющим в этом спектральном диапазоне показатель преломления около 3. Оптическое ограничение сверху достигается за счет скачка показателя преломления между полупроводниковой частью структуры и воздухом.

На рисунке 2 представлен спектр излучения (фотолюминесценции) гетероструктуры с квантовыми точками. Спектр получен при комнатной температуре при возбуждении структуры с помощью YAG:Nd-лазера.

Максимум излучения основного перехода квантовых точек, обозначенного GS, находится при комнатной температуре на длине волны около 1.28 мкм. Кроме основного перехода, в спектре также наблюдается серия возбужденных оптических переходов квантовых точек, обозначенных ES1, ES2, ES3, а также оптический переход, обусловленный состояниями, локализованными в покрывающей квантовые точки квантовой яме InGaAs. Длина волны первого возбужденного перехода (ES1) при комнатной температуре составила около 1.2 мкм.

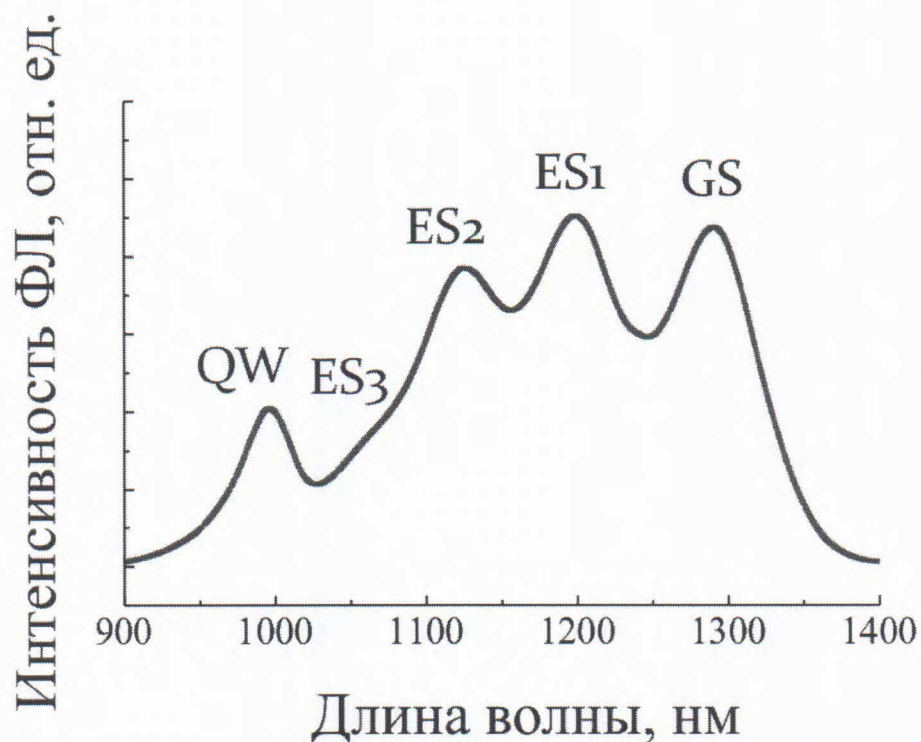


Рисунок 2 Спектр фотолюминесценции гетероструктуры с квантовыми точками

Последовательность технологических операций, используемых при изготовлении микрокольцевых (МКР) и микродисковых резонаторов (МДР) представлена на рисунке 3.

После эпитаксиального роста гетероструктуры (рисунок 3,а) МДР и МКР были сформированы с использованием SiO_2 маски, полученной с помощью атомно-слоевого осаждения, поверх которой наносился слой негативного резиста (рисунок 3,б). Затем выполнялась электронно-лучевая литография (рисунок 3,в), с помощью которой задавалась желаемая геометрия микрорезонаторов. Затем выполнялось реактивное ионное травление (рисунок 3,г), после чего проводилось снятие остатков окисного слоя SiO_2 и отмывка полупроводниковой структуры.

Высота сформированных полупроводниковых микрорезонаторов составила около 0.5 мкм. Внешний диаметр D варьировался от 1 до 5 мкм, внутренний диаметр d изменялся от 0 (в МДР) до приблизительно 85% от величины внешнего диаметра D . Таким образом, минимальная ширина волновода составила 0.3 мкм. Буферный слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ не подвергался преднамеренному окислению.

На рисунке 4 приведена полученная с помощью растрового электронного микроскопа фотография массива микрорезонаторов различного размера. На вставке к рисунку 4 приведено изображение МКР, имеющего внешний диаметр $D = 1.5$ мкм, внутренний диаметр $d = 0.9$ мкм.

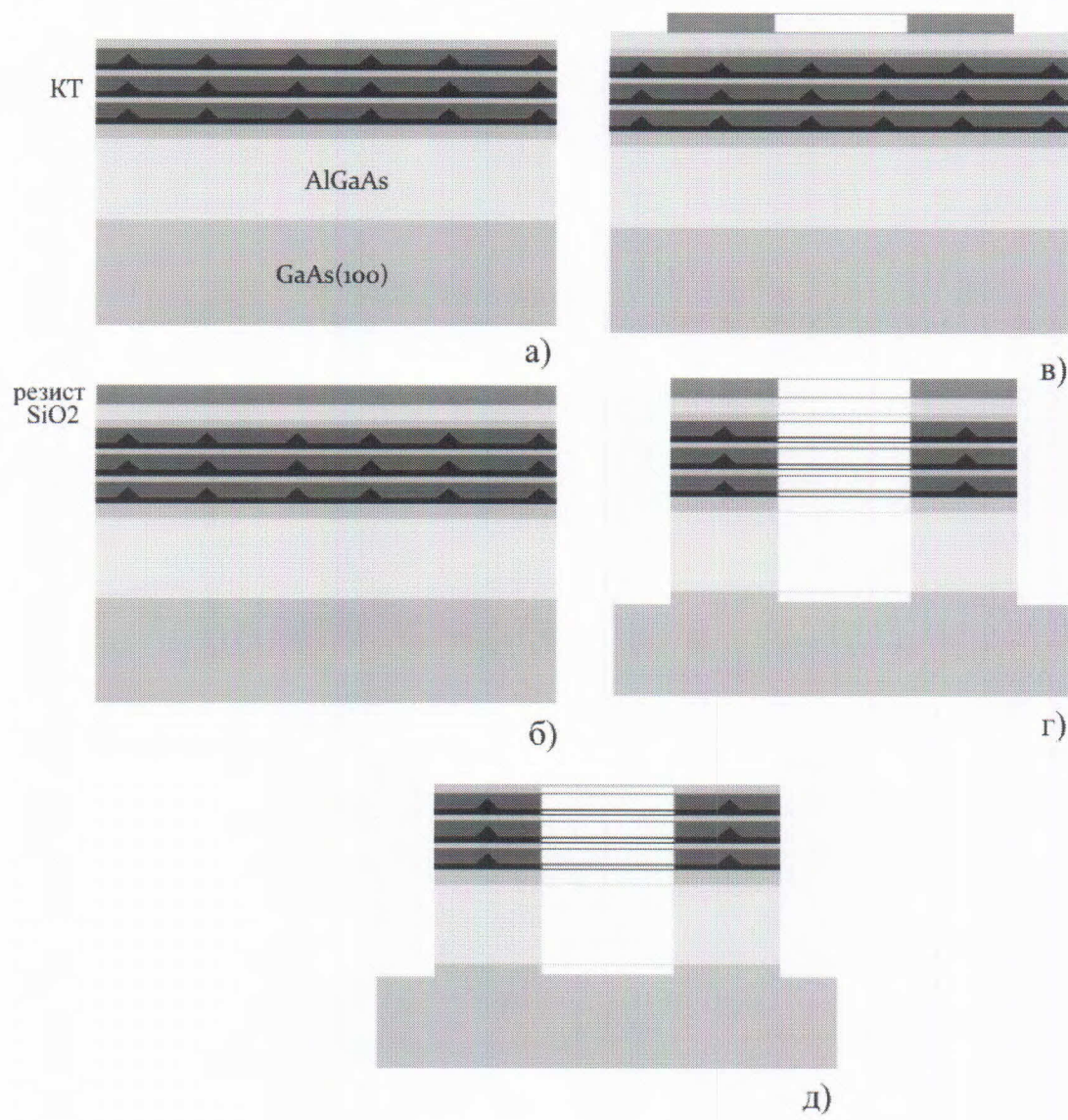


Рисунок 3 Последовательность технологических операций при изготовлении микрокольцевого резонатора: а) эпитаксиальный синтез гетероструктуры; б) осаждение оксида кремния и нанесение резиста; в) электронно-лучевая литография; г) травление; д) удаление оксида и очистка полупроводниковой структуры.

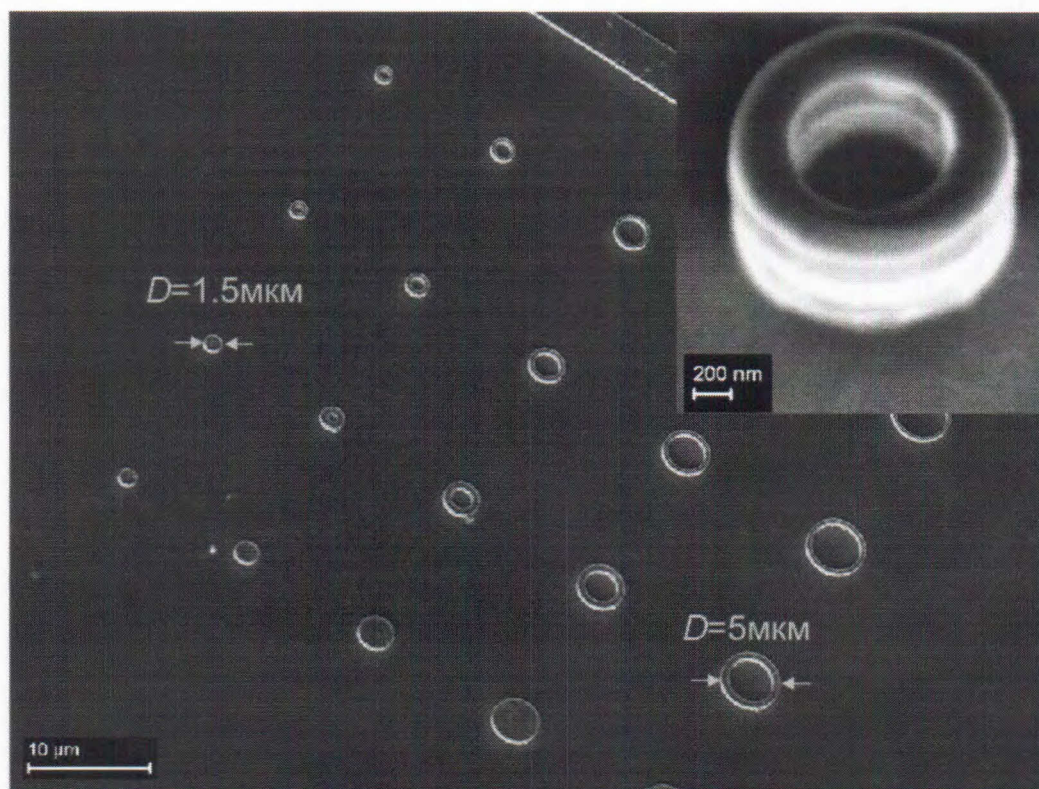


Рисунок 4 Полученная с помощью растрового электронного микроскопа фотография массива микрорезонаторов различного размера. Вставка: изображение МКР, имеющего $D = 1.5\text{ мкм}$, $d = 0.9\text{ мкм}$.

2. Исследования модового состава микролазеров

Модовый состав изготовленных микродисковых и микрокольцевых лазеров был исследован с помощью спектроскопии микрофотолюминесценции.

Оптические исследования проводились при накачке YAG:Nd-лазером, работающим в непрерывном режиме на длине волны 532 нм. Мощность накачки, падающая на поверхность образца, варьировалась от 0.1 мкВт до единиц мВт. Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром около 3 мкм с помощью объектива Olympus LMPlan IR 100 NA 0.8. Этот же объектив использовался для сбора сигнала. Детектирование проводилось с помощью монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого InGaAs-фотодетектора Horiba Symphony. Спектральное разрешение составило около 0.05 нм.

В спектрах излучения микрорезонаторов наблюдается серия узких одиночных пиков или дублетов, обусловленных модами шепчущей галереи (МШГ) различных порядков. Число возбуждаемых мод уменьшается при уменьшении внешнего диаметра микрорезонатора и росте его внутреннего диаметра.

На рисунке 5 приведен пример спектра излучения микролазера, записанный при комнатной температуре. Показан спектр микрокольцевого лазера, имеющего $D = 2$ мкм, $d = 1.2$ мкм. На рисунке 5 отмечены стрелками два дублета – на длине волны 1290.7 нм, доминирующего в спектре излучения, а также на длине волны 1221.1 нм.

На приведенном на рисунке 5 спектре излучения спектральное положение доминирующей линии излучения попадает в полосу основного перехода квантовых точек. Более коротковолновая линия излучения соответствует МШГ, отличающейся значением азимутального индекса m на 1.

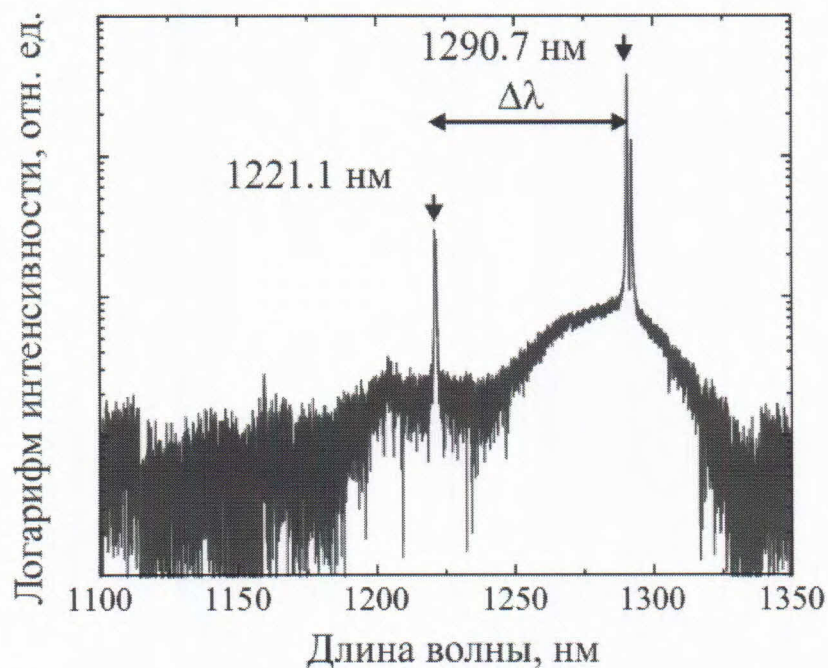


Рисунок 5 Спектр излучения при комнатной температуре микрокольцевого лазера, имеющего $D = 2$ мкм, $d = 1.2$ мкм. Отмечены спектральные положения между доминантной и дополнительной модами генерации.

Спектральное расстояние $\Delta\lambda$ между соседними модами шепчущей галереи в рассматриваемом примере составило 69.6 нм. Спектральное расстояние зависит от внешнего диаметра микрорезонатора, а также от эффективного группового индекса моды N_{eff} в микрорезонаторе:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\pi D N_{eff}}. \quad (1)$$

Знание величины $\Delta\lambda$ позволяет оценить эффективный групповой индекс N_{eff} равным 3.61 с использованием выражения (1).

На рисунке 6 приведена зависимость эффективного группового индекса от внешнего диаметра микрорезонатора, определенная с помощью измерений, аналогичных обсуждавшимся в связи с рисунком 5. Каждая точка, соответствующая некоторому значению D , представляет собой среднее значение N_{eff} , оцененное для всей совокупности таких микрорезонаторов, в том числе и отличающихся внутренним диаметром d . Как видно, в пределах погрешности, которую мы оцениваем не превышающей ± 0.15 , групповой индекс не зависит от размеров резонатора, в том числе и в наименьших исследованных микрорезонаторах, имеющих диаметр 1 мкм. Его среднее значение определено равным 3.67.

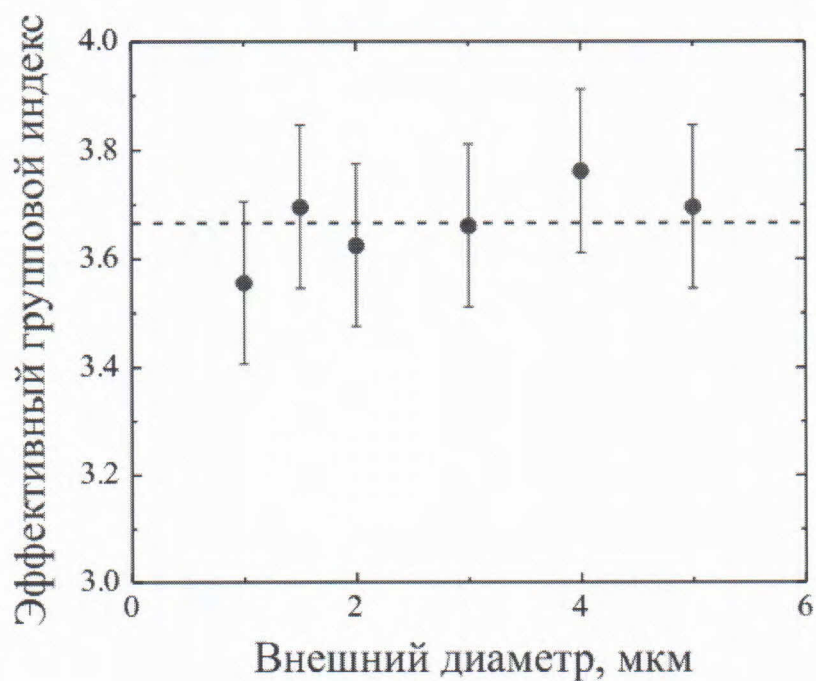


Рисунок 6 Эффективный групповой индекс в зависимости от внешнего диаметра микрорезонатора. Штриховая линия – среднее значение N_{eff}

Следует отметить, что показатель преломления GaAs на длине волны 1.31 мкм составляет около 3.4-3.5 [3, 4]. Более высокое значение группового индекса обусловлено зависимостью показателя преломления слоев, образующих структуру микрорезонатора, от длины волны. К примеру, в изготовленном из кремния МКР диаметром 3 мкм эффективный групповой индекс был определен 4.2 [5], при том, что показатель преломления кремния вблизи 1.55 мкм составляет 3.48 [3].

3. Влияние конструкции микрорезонатора на добротность излучаемых мод и пороговую мощность лазерной генерации

При увеличении мощности накачки интенсивность доминирующей линии (дублета) демонстрирует характерное пороговое поведение, свидетельствующее о переходе в режим лазерной генерации. Измеренная полуширина линий излучения при этом могла составлять 0.05-0.07 нм, будучи ограниченной спектральным разрешением оптической системы. При дальнейшем увеличении накачки зависимость интенсивности линии излучения от мощности возбуждения насыщается, а линии уширяются, как правило, до 0.2-0.3 нм.

На рисунке 7 показан пример такой зависимости интенсивности линии от мощности накачки для микрокольцевого резонатора с внешним диаметром 2 мкм и внутренним диаметром 0.8 мкм.

Пороговая мощность лазерной генерации для микрорезонаторов с внешним диаметром 1.5-2 мкм и различными значениями внутреннего диаметра приведена на рисунке 8. Как видно, пороговая мощность лазерной генерации составляет от единиц до десятков микроватт. При этом с ростом внутреннего диаметра порог генерации сперва уменьшается, а затем начинает возрастать. Аналогичное поведение наблюдалось раньше и в микролазерах, имеющих внешний диаметр 6-7 мкм [6].

Наименьшее значение пороговой мощности составило 1 мкВт. Оно было достигнуто в микрокольцевом лазере, имеющим размеры $D/d = 2/0.8$ мкм.

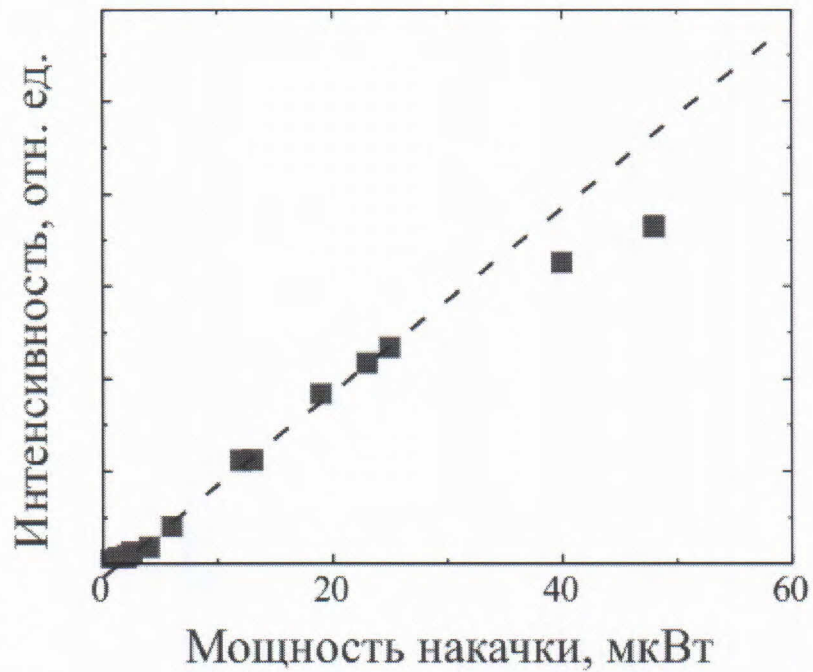


Рисунок 7 Зависимость интенсивности доминантного пика от мощности возбуждения при комнатной температуре для МКР, имеющего $D = 2$ мкм, $d = 0.8$ мкм.

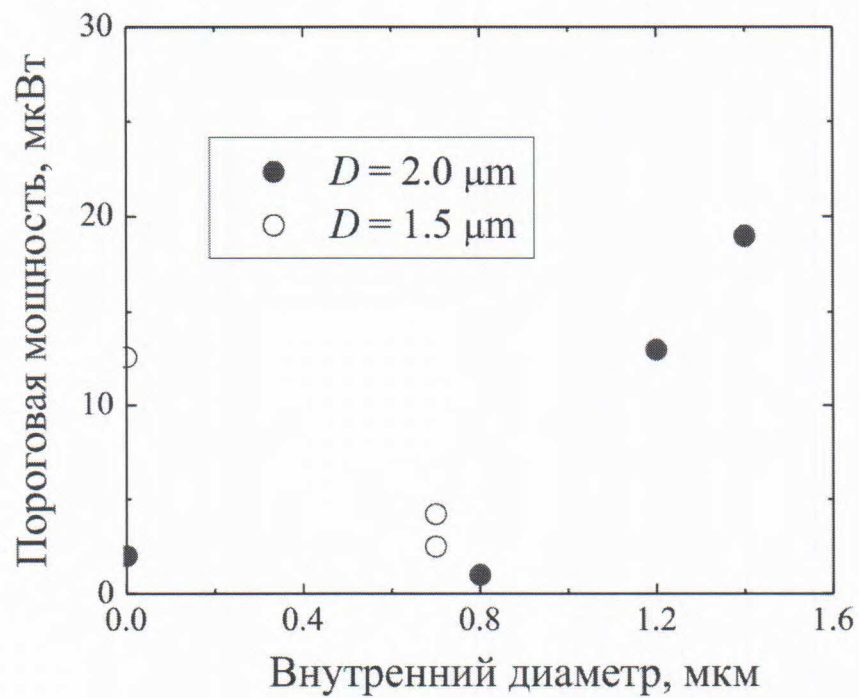


Рисунок 8 Пороговая мощность для микрорезонаторов различных размеров.

Нами не было обнаружено какой-либо закономерности в поведении спектрального положения доминантной линии излучения при изменении внутреннего диаметра микрорезонатора d , при условии, что внешний диаметр D фиксирован. На рисунке 9 показан пример такой зависимости для случая $D = 2$ мкм.

В некоторых случаях разброс положения линии составил несколько десятков нанометров. Так, например, для МКР/МДР с внешним диаметром 2 мкм линия генерации в различных образцах имела длину волны от 1264 до 1322 нм.

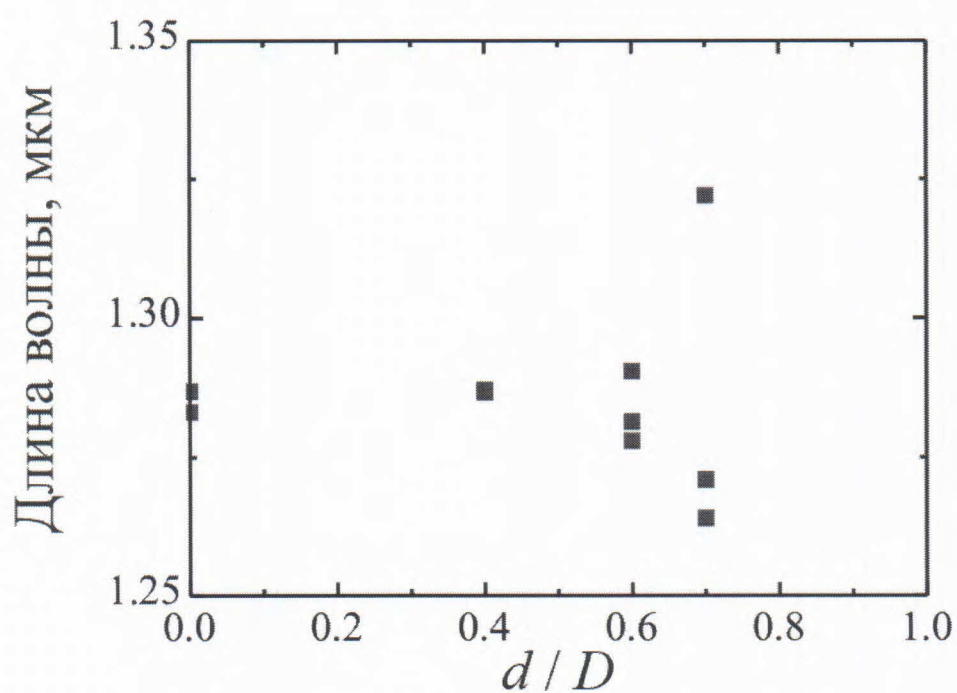


Рисунок 9 Положение доминантной линии в микрорезонаторах с внешним диаметром $D = 2$ мкм при различном значении d .

В то же время, нами было обнаружено, что длина волны лазерной генерации сильно зависит от размера внешнего диаметра микрорезонатора. Зависимость среднего значения длины волны генерации от внешнего диаметра представлена на рисунке 10.

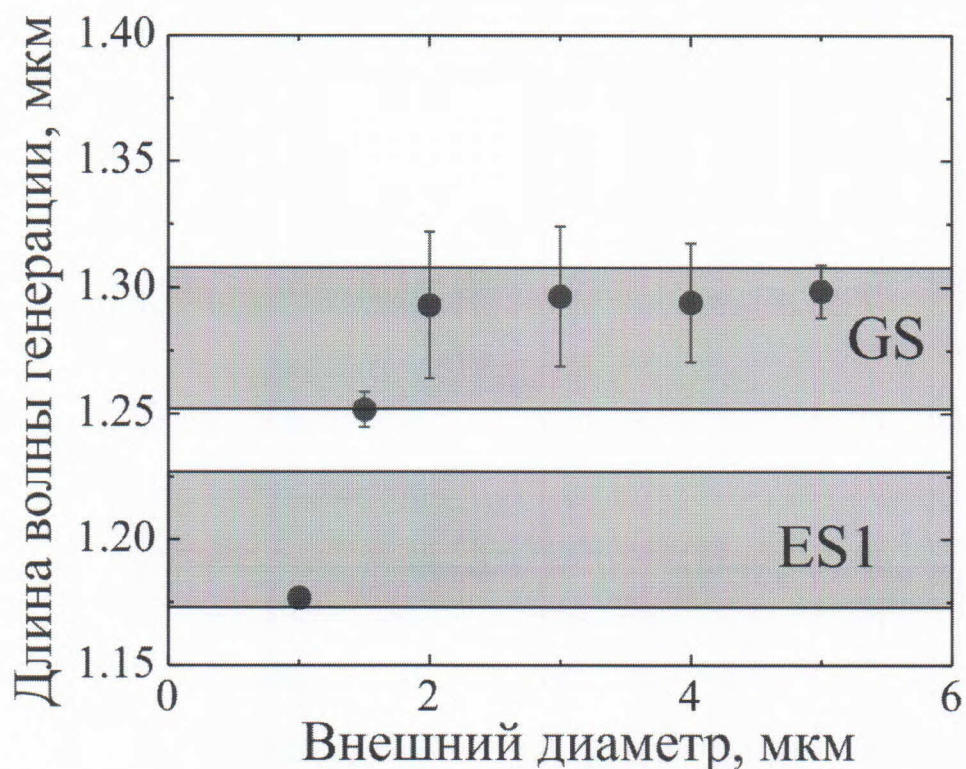


Рисунок 10 Длина волны доминантной моды (символы) в зависимости от внешнего диаметра микрорезонатора. Затененные области отвечают спектральной полосе основного (GS) или первого возбужденного (ES) переходов КТ.

Во всех микрорезонаторах, внешний диаметр которых D был больше либо равен 1.5 мкм, линия генерации находилась в пределах полосы основного перехода квантовых точек. Следует отметить, что в наименьшем микрорезонаторе из этой группы (1.5 мкм) линия генерации находилась на самом коротковолновом края полосы, отвечающей основному оптическому переходу. В то же время в наименьшем из

исследованных микрорезонаторов ($D = 1$ мкм) лазерная генерация возникала на длине волны 1177 нм, что попадает в полосу первого возбужденного оптического перехода КТ.

Такое поведение аналогично перескоку длины волны, который имеет место в лазерах полосковой конструкции при уменьшении длины их резонатора.

Внутренняя (или излучательная) добротность, т.е. добротность, ограниченная исключительно оптическими потерями вследствие утекания моды из искривленного волновода, может быть оценена для мод шепчущей галереи с помощью выражения [7]:

$$Q \approx be^{2mJ}, \quad (2)$$

где $J = \text{arth}(s) - s$, $s = \sqrt{1 - 1/n_{eff}^2}$, $b \approx 1/7$, m – азимутальный порядок МШГ, который в первом приближении может быть найден из условия обращения поля в ноль на границе резонатора радиуса R :

$$(2\pi n_{eff} / \lambda)R = T_{mq}. \quad (3)$$

Здесь, T_{mq} обозначает q -й по счету корень функции Бесселя m -го порядка (для МШГ первого радиального порядка, $q = 1$), λ – резонансная длина волны, которую для доминирующей моды можно полагать близкой к длине волны λ_0 оптического перехода активной области.

При больших m и не слишком больших q корни функции Бесселя приближенно равны m , так что азимутальный порядок моды m оказывается прямо пропорционален радиусу резонатора, а внутренняя добротность, соответственно, оказывается экспоненциально возрастающей с ростом диаметра.

В [8] приведено несколько иное выражение для оценки величины излучательной добротности диэлектрического цилиндра, которое с использованием выше введенных обозначений запишется в виде:

$$Q \approx Be^{mJ}, \quad (4)$$

где $B = (1/2)Pn_{eff}^2sm$, $P = 1$ или $1/n^2$ для мод ТЕ и ТМ-типа, соответственно. Как видно, отличие выражения (4) от (2) заключается в ином предэкспоненциальном множителе, а также в отсутствии коэффициента 2 в показателе экспоненты.

Нами был выполнен расчет излучательных потерь в микролазерах различного размера. На рисунке 11 приведена зависимость потерь, возникающих вследствие искривления волновода, от его диаметра, вычисленная с использованием (2) и (4). Мы воспользовались известным соотношением между оптическими потерями α в резонаторе и добротностью $\alpha = 2\pi n_{eff}/(\lambda Q)$. Ступенчатый характер зависимостей обусловлен дискретным характером изменения порядка моды m .

На рисунке 11 также приведена оценка насыщенного усиления G_{sat} на основном оптическом переходе квантовых точек, использованных в качестве активной области исследуемых в настоящей работе микрорезонаторов. Оценка основывается на обобщении экспериментальных значений G_{sat} , полученных в торцевых лазерах на основе многослойных массивов квантовых точек спектрального диапазона 1.3 мкм [9] с учетом влияния числа рядов КТ и геометрии вертикального волновода на фактор оптического ограничения.

Как видно, даже без учета других видов потерь помимо возникающих вследствие утекания моды из изогнутого волновода, достижимое на основном переходе КТ оптическое усиление окажется недостаточным для преодоления потерь в микродисках диаметром около 1.1 мкм и меньше. Соответственно, переход в режим лазерной генерации мод шепчущей галереи на основном переходе квантовых точек окажется невозможным в резонаторах столь малого размера.

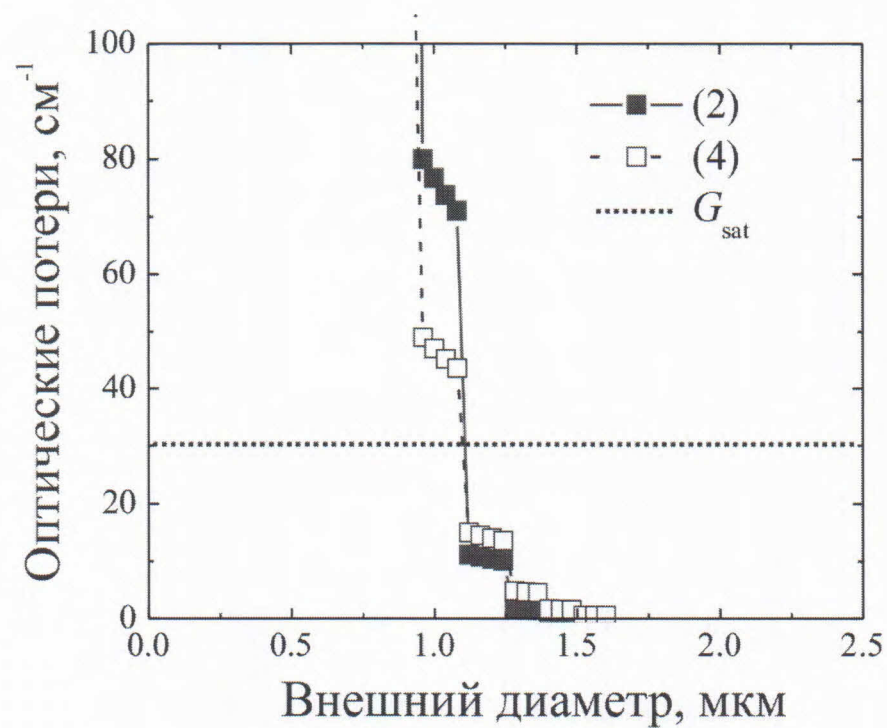


Рисунок 11 Зависимость излучательных потерь в микродисковом резонаторе от его диаметра (расчет с помощью (2) – открытые символы, (4) – закрашенные символы); пунктирная линия – насыщенное усиление на основном переходе КТ.

Расчеты, приведенные на рисунке 11 превосходно согласуются с экспериментально наблюдаемым отсутствием генерации на основном оптическом переходе в микрорезонаторах, диаметр которых меньше 1.5 мкм.

4. Оценка температурной стабильности характеристик лазера

Нами было исследовано влияние температуры на спектральные и пороговые характеристики микролазеров с квантовыми точками. Следует отметить, что лазерная генерация в микролазерах столь малого размера как 2 мкм наблюдалась вплоть до 100°C.

На рисунке 12 приведены спектры излучения МКР при температуре 20 и 100°C. Как видно, спектральное положение наблюдаемых МШГ сдвигается в сторону больших длин волн при увеличении температуры наблюдения. Например, положение моды TE_{12,1} растет от 1271.4 нм при 20°C до 1276.9 нм при 100°C.

При этом максимум интенсивности спонтанного излучения сдвигается с ростом температуры значительно сильнее. В исследованном диапазоне температур от меняется приблизительно от 1.29 до 1.34 мкм.

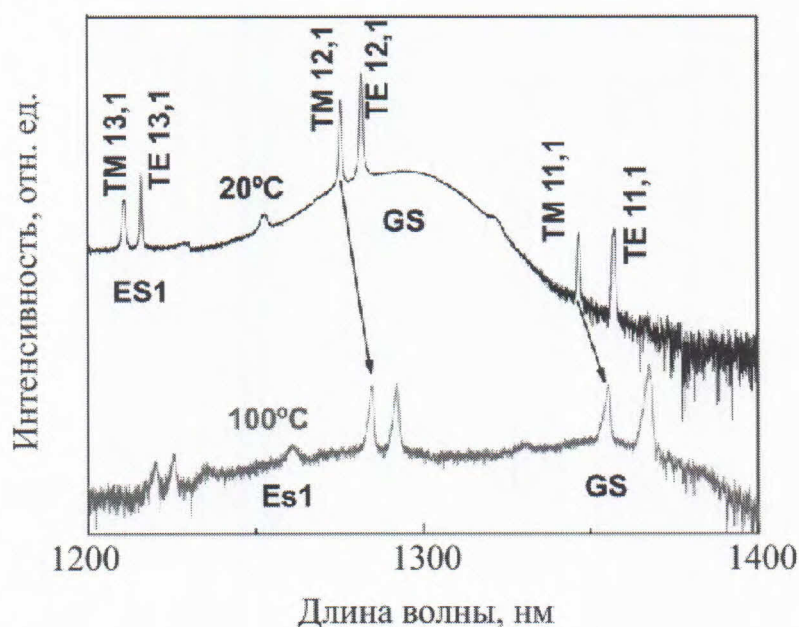


Рисунок 12 Изменение спектра излучения МКР с размерами 2.0/0.8 мкм при изменении температуры от 20° до 100°C. Отмечены порядки наблюдаемых МШГ

Температурная зависимость линий излучения обобщена на рисунке 13. Температурный сдвиг максимума спонтанного излучения следует за изменением ширины запрещенной зоны и составляет около 0.5 нм/К. В то же время сдвиг положения МШГ обусловлен слабым изменением с температурой показателей преломления материалов, образующих микрорезонатор. Величина сдвига составляет менее 0.1 нм/К.

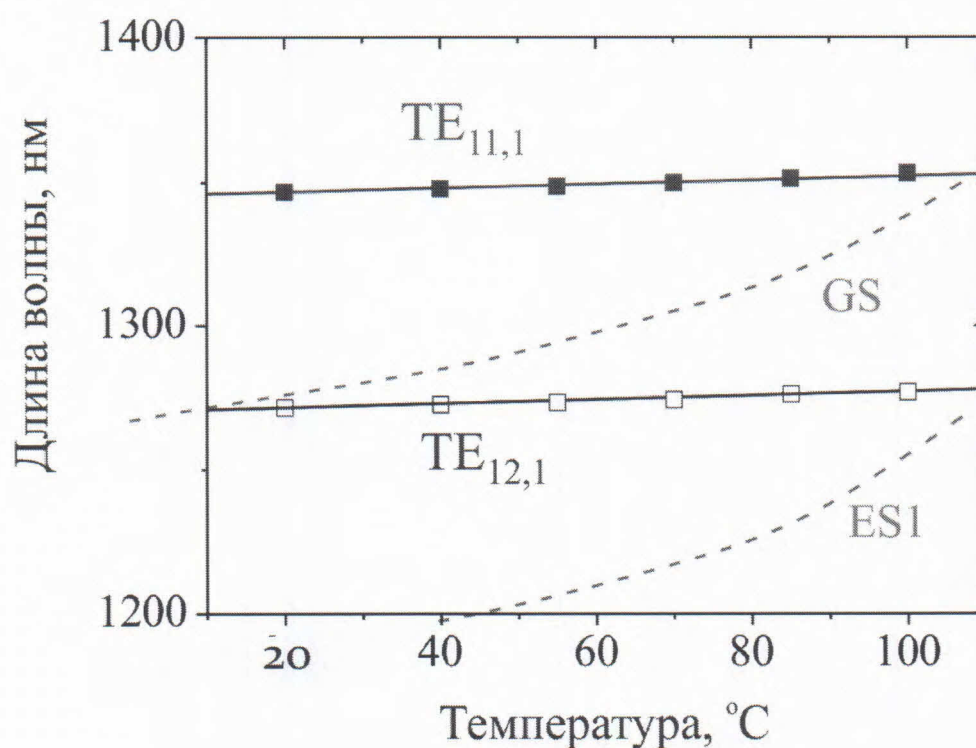


Рисунок 13 Температурная зависимость МШГ различного порядка (сплошные линии и символы), а также максимумов спонтанного излучения (штриховые линии) основного (GS) и первого возбужденного (ES1) переходов КТ.

В результате различной скорости изменения спектрального положения МШГ и максимума спонтанного излучения, относительное положение некоторой моды относительно пика усиления меняется при

изменении температуры. В результате, различные моды могут оказываться ближе к максимуму усиления и, соответственно, демонстрировать наименьший порог лазерной генерации.

Рисунок 14 обобщает полученные данные по зависимости порога лазерной генерации от температуры для микрорезонатора с внешним диаметром 2 мкм. При комнатной температуре длина волны моды $TE_{12,1}$ приблизительно соответствует максимуму основного оптического перехода, в результате чего порог генерации на этой моде минимален среди прочих МШГ. В интервале температур 45-85°C эта мода оказывается между пиками основного и возбужденного переходов, где усиление минимально. В результате лазерная генерация на этой моде в указанном диапазоне температур невозможна.

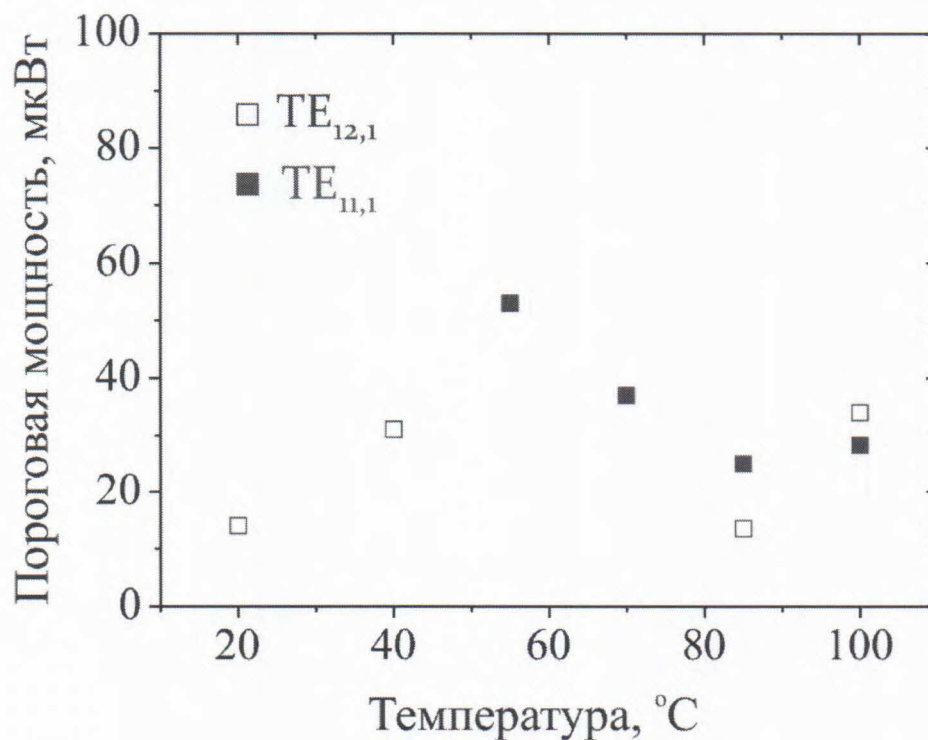


Рисунок 14 Температурная зависимость пороговой мощности для $TE_{12,1}$ и $TE_{11,1}$ мод шепчущей галереи

При температуре 50°C на длинноволновый край оптического перехода основного состояния КТ попадает мода $\text{TE}_{11,1}$, в результате чего для этой моды лазерная генерация наступает с наименьшим порогом среди прочих мод шепчущей галереи.

Наконец при 85°C и 100°C длины волн мод $\text{TE}_{12,1}$ и $\text{TE}_{11,1}$ оказываются вблизи максимумов возбужденного и основного оптических переходов КТ, соответственно. Как следствие, лазерная генерация возможна для обеих мод, причем пороговая мощность начала генерации приблизительно одинакова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.A. Marcatili, Bends in optical dielectric guides, Bell Syst. Tech. J. 48, 2103 (1969).
2. Q. Xu, D. Fattal, R.G. Beausoleil, Silicon microring resonators with 1.5- μm radius, Optics Express 16(6), 4309 (2008).
3. J.A. McCaulley, V.M. Donnelly, M. Vernon, I. Taha, Temperature dependence of the near-infrared refractive index of silicon, gallium arsenide, and indium phosphide, Phys. Rev. B 49(11), 7408 (1994).
4. S. Adachi (ed.), Properties of Aluminium Gallium Arsenide (EMIS Datareviews Series No.7). 1993: INSPEC, the Institution of Electrical Engineers (London, UK).
5. Q. Xu, D. Fattal, R.G. Beausoleil, Silicon microring resonators with 1.5- μm radius, Optics Express 16(6), 4309 (2008).
6. A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, A.V. Savelyev, A.M. Nadtochiy, E.M. Arakcheeva, F.I. Zubov, V.V. Korenev, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, M.M. Kulagina, I.A. Slovinskiy, D.A. Livshits, A. Kapsalis, Ch. Mesaritakis, D. Syvridis, A Mintairov, Quantum dot lasers and relevant nanoheterostructures, Proc. SPIE. 8552, 855202 (2012).
7. R.E. Slusher, A.F.J. Levi, U. Mohideen, S.L. McCall, S.J. Pearton, R.A. Logan, Threshold characteristics of semiconductor microdisk lasers, Appl. Phys. Lett. 63(10), 1310 (1993).
8. М.Л. Городецкий, Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью, М. Физматлит, 2011.
9. А.Е. Жуков, М.В. Максимов, А.Р. Ковш, Приборные характеристики длинноволновых лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек. Обзор. ФТП 46(10), 1249 (2012).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- 1) Разработана конструкция микролазеров с активной областью на основе квантовых точек, излучающих в спектральном диапазоне около 1.3 мкм.
- 2) Осуществлен эпитаксиальный синтез гетероструктур и изготовлены микродисковые и микрокольцевые лазеры с внешним диаметром вплоть до 1 мкм.
- 3) С помощью спектроскопии микрофотолюминесценции исследованы оптические свойства изготовленных микролазеров в широком диапазоне температур (до 100°C) и мощности накачки. Значение эффективного группового индекса микрорезонаторов определено равным 3.67 независимо от размеров резонатора микрорезонатора вплоть до 1 мкм.
- 4) Исследованы характеристики излучения и исследовано влияние конструкции микрорезонатора на добротность излучаемых мод и пороговую мощность лазерной генерации. Продемонстрирована возможность достижения лазерной генерации при комнатной температуре на основном переходе КТ даже в резонаторах столь малого размера, как 1.5 мкм. При этом порог лазерной генерации остается в мкВт-диапазоне. В микролазерах размером 1 мкм лазерная генерация происходит на первом возбужденном переходе квантовых точек.
- 5) Проведена оценка температурной стабильности характеристик лазеров. Продемонстрирована возможность достижения лазерной генерации в микролазерах с размером 2 мкм вплоть до 100°C. Продемонстрирована высокая стабильность (менее 0.1 нм/К) линий излучения.

Основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований, опубликованы в работе:

- А.Е. Жуков, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.А. Липовский, А.В. Савельев, А.А. Богданов, И.И. Шостак, Э.И.Моисеев, Д.В. Карпов, J. Laukkanen, J. Tommila, Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра, Физика и техника полупроводников 48 (12), 1666-1670 (2014).

Таким образом, в результате выполнения исследований в течение этапа 2014 года все задачи, поставленные на данном этапе, выполнены полностью.

Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра

© А.Е. Жуков^{***†}, Н.В. Крыжановская^{†*}, М.В. Максимов^{**}, А.А. Липовский^{**}, А.В. Савельев^{***},
А.А. Богданов^{**}, И.И. Шостак^{*}, Э.И. Моисеев^{*}, Д.В. Карпов[‡], J. Laukkanen[‡], J. Tommila[‡]

^{*} Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук,
199034 Санкт-Петербург, Россия

^{**} Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Institute of Photonics, University of Eastern Finland,
80130 Joensuu, Finland

[‡] Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology,
33101 Tampere, Finland

(Получена 5 июня 2014 г. Принята к печати 16 июня 2014 г.)

Проведены расчеты и представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие возможность достижения лазерной генерации при комнатной температуре на основном оптическом переходе квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs в оптических микрорезонаторах, имеющих рекордно малый диаметр 1.5 мкм. В резонаторах размером 1 мкм генерация возникает на длине волны одной из мод испускающей галереи в пределах полосы первого возбужденного перехода.

1. Введение

В последнее время активно исследуются микролазеры, имеющие резонатор в форме микрокольца (МКР) или микродиска (МДР) [1,2]. В них в отличие от вертикально излучающих лазеров наивысшей добротностью обладают моды шепчущей галереи (МШГ), распространяющиеся по окружности резонатора. Благодаря тому, что отражение волны от боковой поверхности структуры происходит под скользким углом, в резонаторах с МШГ возможно достижение низкого порога генерации при размерах, гораздо меньших по сравнению с типичными для лазерных резонаторов Фабри-Перо. Кроме того, малые размеры МШГ-резонатора, обеспечивая большое расстояние между соседними резонансными длинами волн, способствуют достижению одночастотной генерации. Все это в сочетании с выводом излучения в плоскости структуры делает МКР и МДР привлекательными кандидатами для использования в будущих системах оптической связи на плате.

Особенно перспективным представляется использование в качестве активной области массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ) [3]. Благодаря глубокой локализации носителей заряда в структурах с КТ латеральный транспорт носителей затруднен и как результат влияние безызлучательной рекомбинации на боковых стенках микрорезонатора подавлено. В последние годы в МКР и МДР на основе КТ спектрального диапазона около 1.3 мкм продемонстрирована возможность лазерной генерации в структурах, перенесенных на поверхность кремния [4], лазерная генерация вплоть до 107°C [5], а

также достижение генерации при комнатной температуре вплоть до диаметра 2.7 мкм [6].

Следует отметить, что наибольший интерес представляют микролазеры возможно меньшего размера, поскольку спектральное расстояние между соседними модами растет с уменьшением диаметра, способствуя достижению одночастотной генерации. В то же время потери, связанные с изгибом волновода (кривизной его боковой поверхности), экспоненциально растут при уменьшении радиуса микродискового/микрокольцевого резонатора [7] и оказываются доминирующими в микрорезонаторах малых размеров. Например, выполненные в работе [8] расчеты добротности кольцевого резонатора на основе кремния на изоляторе дают для длины волны вблизи 1.5 мкм значения потерь около 4 см^{-1} для радиуса 1.5 мкм, тогда как при уменьшении радиуса до 1 мкм потери возрастают до 100 см^{-1} . Поскольку оптическое усиление, которое может быть достигнуто на основном оптическом переходе квантовых точек, ограничено (так называемое „насыщенное усиление“), должен существовать минимальный размер резонатора, до которого может быть реализована лазерная генерация в микролазере с квантовыми точками.

В настоящей работе нами исследованы микрорезонаторы с КТ предельно малого диаметра (до 1 мкм). Показано, что вплоть до внешнего диаметра микрорезонатора 1.5 мкм генерация происходит на длине волны МШГ, попадающей в полосу основного оптического перехода КТ InAs/InGaAs/GaAs. Насколько нам известно, это является наименьшим сообщением к настоящему времени размером МШГ-резонатора с квантовыми точками, в котором лазерная генерация достигнута при комнатной

[†] E-mail: zhuikale@gmail.com