

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



**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 2015 года**

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

---

(Жуков А.Е.)



Санкт-Петербург

2015

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по теме 41.1 «Проведение комплексных междисциплинарных исследований в области управления выводом излучения из оптических микрорезонаторов с квантоворазмерной активной областью» в рамках Государственного задания СПбНЦ РАН в 2014–2016 гг., этап 2015 года

Организация-Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук (СПбНЦ РАН)

Руководитель темы: В.н.с., д.ф.-м.н., член- корр. РАН	 <hr/> 28.11.2015	А.Е. Жуков (все разделы)
Исполнители темы: н.с., к.ф.-м.н.	 <hr/>	Н.Ю. Гордеев (все разделы)

## РЕФЕРАТ

Отчет 25 стр., 1 том, 10 рис., 0 табл., 5 ист., 1 прил.

### МИКРОРЕЗОНАТОР, КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ, МИКРОДИСК, МОДЫ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ, МИКРОЛАЗЕР, ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

В соответствии с техническим заданием, в течение этапа 2015 года были проведены следующие исследования:

- Разработка конструкции оптических микродисковых резонаторов с эффективным вертикальным ограничением оптической моды для микролазеров с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм.

- Изготовление оптических микродисковых резонаторов предельно малого диаметра (менее 2 мкм) с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм;

- Исследования оптических и пороговых характеристик микролазеров на основе микрорезонаторов предельно малого диаметра с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм;

- Исследование возможности использования в качестве активной области микродисковых лазеров плотных массивов квантовых точек InGaAs спектрального диапазона около 1-1.1 мкм;

- Расчет и экспериментальное исследование теплового сопротивления микролазеров.

Основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований, опубликованы в 4 работах, изданных в журналах перечня Web of Science.

Таким образом, в результате выполнения исследований в течение этапа 2015 года все задачи, поставленные на данном этапе, выполнены полностью.

## СОДЕРЖАНИЕ

Раздел	Наименование	Стр
	Список исполнителей.....	2
	Реферат.....	3
	Содержание.....	5
	Обозначения и сокращения.....	7
	Введение.....	8
	Основная часть.....	10
1	Разработка конструкции оптических микродисковых резонаторов с эффективным вертикальным ограничением оптической моды для микролазеров с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм.....	10
2	Изготовление оптических микродисковых резонаторов предельно малого диаметра (менее 2 мкм) с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм.....	13
3	Исследования оптических и пороговых характеристик микролазеров на основе микрорезонаторов предельно малого диаметра с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм.....	15
4	Исследование возможности использования в качестве активной области микродисковых лазеров плотных массивов квантовых точек InGaAs спектрального диапазона около 1-1.1 мкм .....	18
5	Расчет и экспериментальное исследование теплового сопротивления микролазеров.....	20

Список литературы .....	24
Заключение.....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сведения о публикациях по проекту	

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

### *Русскоязычные сокращения*

КТ	- квантовые точки
МДР	- микродисковый резонатор
МКР	- микрокольцевой резонатор
МОГФЭ	- металл-органическая газофазная эпитаксия
МПЭ	- молекулярно-пучковая эпитаксия
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.

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. 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 микролазеры AlGaAs/GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs, имеющую конструкцию типа «подвешенный диск» (suspended disk), позволяющую реализовать эффективное оптическое ограничение моды в вертикальном направлении. Диаметр активной области исследованных микролазеров варьировался от 1 до 6 мкм. Нами также были исследованы микрорезонаторы с активной областью на основе плотных массивов квантовых точек  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  с длиной волны излучения около 1-1.1 мкм.

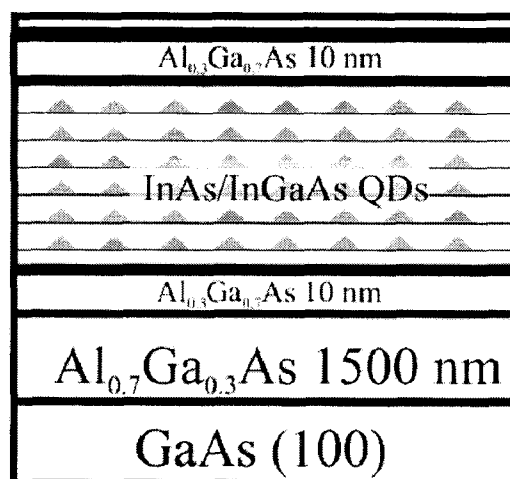
Для стабильной работы лазера в непрерывном режиме требуется достижение низкого теплового сопротивления  $R_T$ . В то же время тепловые свойства микродисковых лазеров в литературе практически не освещены. Для микродисков диаметром  $D = 3$  мкм на основе GaInAsP материалов на подложках InP сообщалось высокое значение  $R_T = 150^\circ\text{C}/\text{мВт}$ ; было высказано предположение об изменении теплового сопротивления пропорционально  $D^{-1.5}$  [2]. В работе [3] для микродиска с КТ на подложке GaAs было получено  $R_T = 30^\circ\text{C}/\text{мВт}$  при  $D = 4.5$  мкм. В настоящей работе нами были исследованы тепловое сопротивление микродисковых лазеров типа подвешенная меза, сформированных на подложках GaAs.

## ОСНОВАЯ ЧАСТЬ

### 1. Разработка конструкции оптических микродисковых резонаторов с эффективным вертикальным ограничением оптической моды для микролазеров с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм

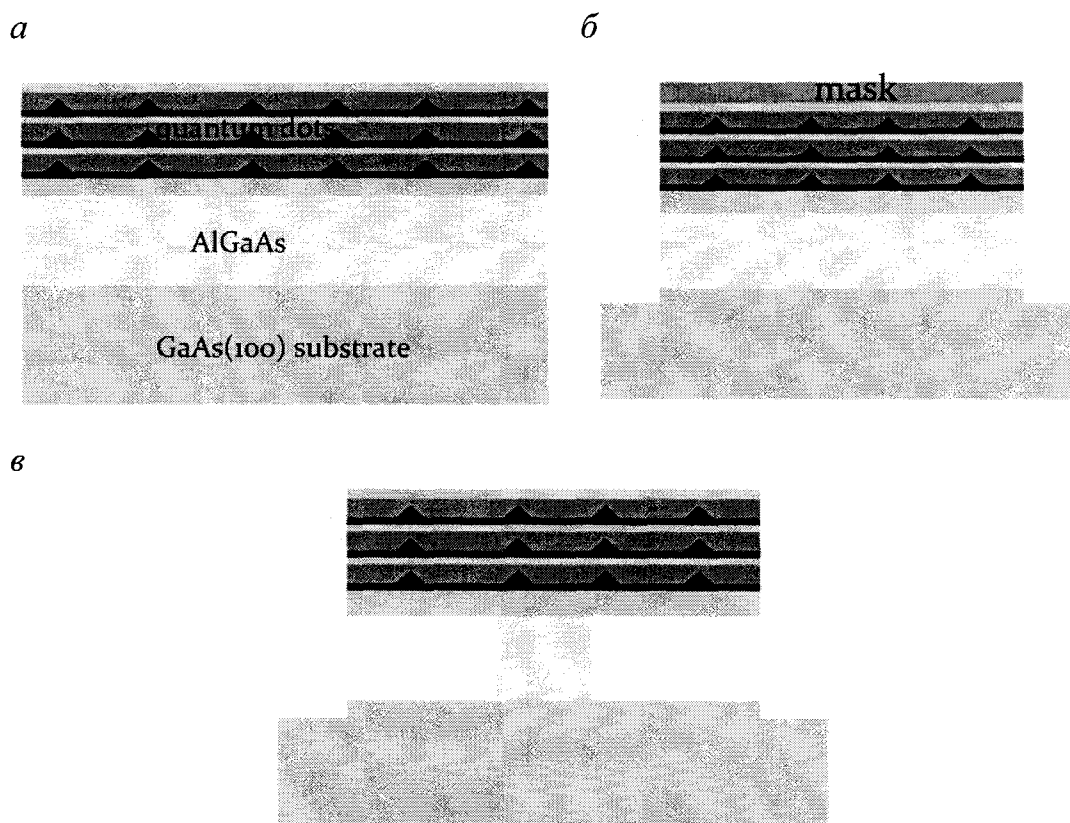
Активная область эпитаксиальной структуры для изготовления микродисков содержит несколько рядов КТ InAs/InGaAs, разделенных спейсерами GaAs. Такие квантовые точки, при соответствующем подборе условий осаждения, обладают при комнатной температуре длиной волны излучения основного оптического перехода около 1.3 мкм.

Активная область помещается в волноводный слой GaAs, ограниченный с обеих сторон слоями AlGaAs с малым содержанием алюминия (около 30%). Непосредственно под волноводом располагался буферный слой Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As. Схематическое изображение эпитаксиальной структуры приведено на рисунке 1.



**Рисунок 1** Слоевая конструкция эпитаксиальной структуры с квантовыми точками, использованной для изготовления микродисков

Последовательность технологических операций изготовления микрорезонаторов типа «подвешенный диск» из эпитаксиальной структуры приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2** Основные технологические операции, используемые при формировании микрорезонаторов типа «подвешенный диск»: *a* – эпитаксиальный синтез; *б* – нанесение маски и травление глубокой мезы; *в* – селективное травление основания и снятие маски

На первом этапе (рисунок 2,*a*) происходит эпитаксиальный синтез структуры методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) или газфазной эпитаксии из металл-органических соединений (МОГФЭ). На втором этапе (рисунок 2,*б*) на поверхности эпитаксиальной структуры формируется круговая маска, задающая диаметр микродиска, после чего

происходит травление эпитаксиальной структуры в областях, не прикрытых маской, на глубину, достаточную для вхождения в подложку. В результате, формируется глубокая мезаструктура диаметром  $D$ .

На заключительном этапе (рисунок 2,в) происходит селективное травление структуры, при этом жидкий травитель и условия травления подбираются таким образом, что скорость травления буферного слоя  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  существенно превосходит скорость травления других слоев структуры, контактирующих с травителем. В результате происходит уменьшение диаметра основания  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ . Подбирая время селективного травления, можно сформировать основание нужного диаметра  $d < D$ .

В результате выполнения всех технологических операций, формируется диск диаметром  $D$ , лежащий на основании меньшего диаметра  $d$ . Микродиски подобной конструкции обладают тем преимуществом, что вертикальное ограничение оптической моды на периферии диска, где и локализованы моды шепчущей галереи, реализуется за счет оптического контраста полупроводник–воздух. Это позволяет более чем на 30% увеличить фактор оптического ограничения по сравнению с меза-структурой, в которой GaAs волновод ограничен снизу полупроводниковым слоем  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ . Учитывая, что максимальное усиление массива квантовых точек ограничено эффектом насыщения усиления и, как правило, существенно меньше, чем в квантовых ямах, увеличение фактора оптического ограничения имеет решающее значение для возможности достижения лазерной генерации на основном оптическом переходе, особенно в случае микролазеров предельно малых размеров.

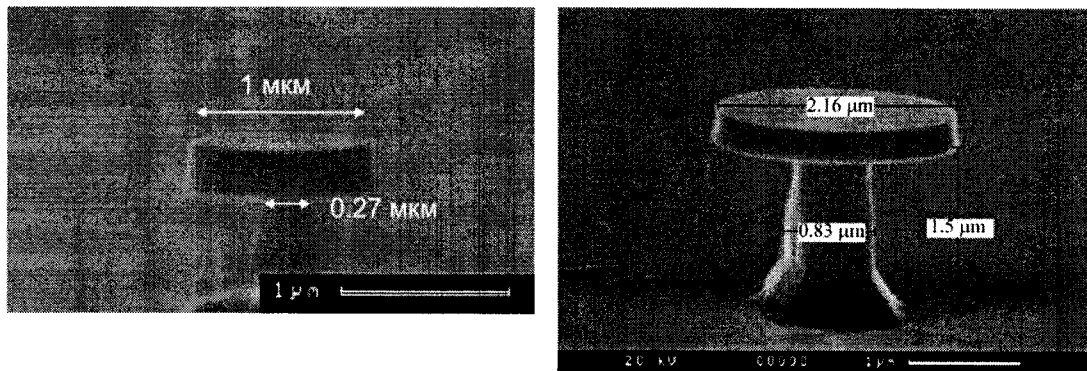
## 2. Изготовление оптических микродисковых резонаторов предельно малого диаметра (менее 2 мкм) с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм

Эпитаксиальная структура для изготовления микродисков была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs(100). Активная область содержала 6 рядов КТ InAs/InGaAs, разделенных спейсерами GaAs толщиной 30 нм. Активная область была помещена в волноводный слой GaAs, ограниченный с обеих сторон слоями  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  толщиной 10 нм. Полная толщина волновода с активной областью составила 0.28 мкм. Толщина буферного слоя  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  была 1.5 мкм.

Микродисковые резонаторы были сформированы с помощью двухступенчатого химического травления. На первой стадии осуществлялось изотропное травление в смеси  $HBr:K_2Cr_2O_7:CH_3COOH$  с использованием маски из фоторезиста, сформированной с помощью фотолитографии. Диаметр маски примерно соответствовал желаемому диаметру микродиска. На второй стадии происходило формирование основания с помощью селективного травления буферного слоя  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  в 48%-ом растворе HF. Время селективного травления подбиралось таким образом, чтобы диаметр основания составлял не более 1/2 диаметра диска.

Были изготовлены микродиски с диаметром, варьируемым в пределах от 1 до 6.2 мкм. На рисунке 3 приведены микрофотографии двух микродисковых резонаторов, имеющих диаметр  $D = 1$  и 2.16 мкм. При этом диаметр основания  $d$  составляет в диске большего размера приблизительно 0.7 мкм, соответственно, в месте непосредственного примыкания к микродиску, 0.83 мкм в средней части, и около 1.2 мкм в области контакта с подложкой; таким образом  $(D/d)^2$  меняется от 9.5 до

3.2. В микродиске меньшего диаметра ( $D = 1 \text{ мкм}$ ) размер основания  $d$  в месте непосредственного примыкания к микродиску составляет  $0.27 \text{ мкм}$ .



**Рисунок 3** Микрофотографии микродисков диаметром около 1 и 2.2 мкм, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа.

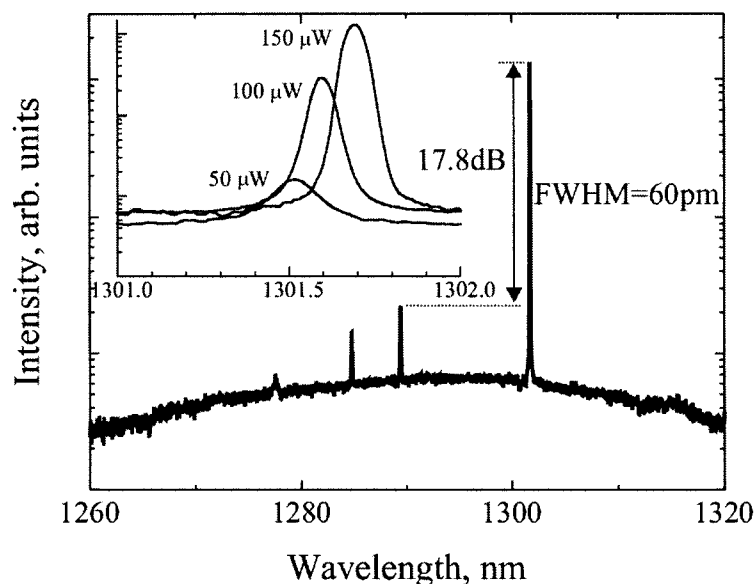
### **3. Исследования оптических и пороговых характеристик микролазеров на основе микрорезонаторов предельно малого диаметра с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм**

Оптические исследования проводились при непрерывной накачке линией 532 нм YAG:Nd-лазера при комнатной температуре. Мощность накачки, падающая на поверхность образца, могла варьироваться приблизительно от 1 мкВт до 1 мВт. Диаметр возбуждающего луча составлял около 1-2 мкм. Детектирование проводилось с использованием объектива Olympus LMPlan IR 100 NA 0.8, монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого InGaAs-фотодетектора Horiba Symphony с разрешением 0.05 нм. Длина волны излучения массива КТ при комнатной температуре (основное состояние) составила 1283 нм.

На рисунке 4 приведен спектр излучения в режиме лазерной генерации одного из микродисков диаметром 2.6 мкм при накачке 150 мкВт. В спектре наблюдаются три узких пика излучения от мод шепчущей галереи разных порядков на длинах волн 1301.7, 1289.4 и 1284.8 нм. Наиболее интенсивный (доминантный) пик 1301.7 нм имеет полную ширину на половине высоты 60 пм, коэффициент подавления боковых мод составляет 17.8 дБ. Зависимость интенсивности доминантного пика и его спектральной ширины от накачки позволяет определить порог генерации около 90 мкВт.

Рисунок 5 обобщает зависимость пороговой мощности от диаметра микродиска  $D$ . В микродисках не слишком малых диаметров (2 мкм и более) зависимость пороговой мощности от диаметра описывается зависимостью  $\sim D^2$ . Это свидетельствует о том, что пороговая плотность мощности остается приблизительно неизменной, и изменение порога в

этих микролазерах обусловлено простым масштабированием размеров активной области.

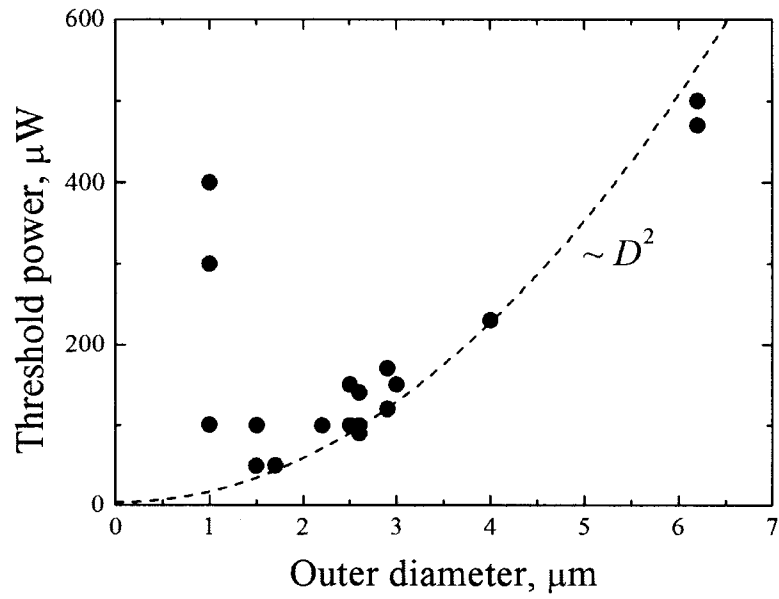


**Рисунок 4** Спектр излучения одного из микродисков диаметром 2.6 мкм при мощности накачки 150 мкВт. Вставка: спектр вблизи доминирующего пика при различной мощности накачки.

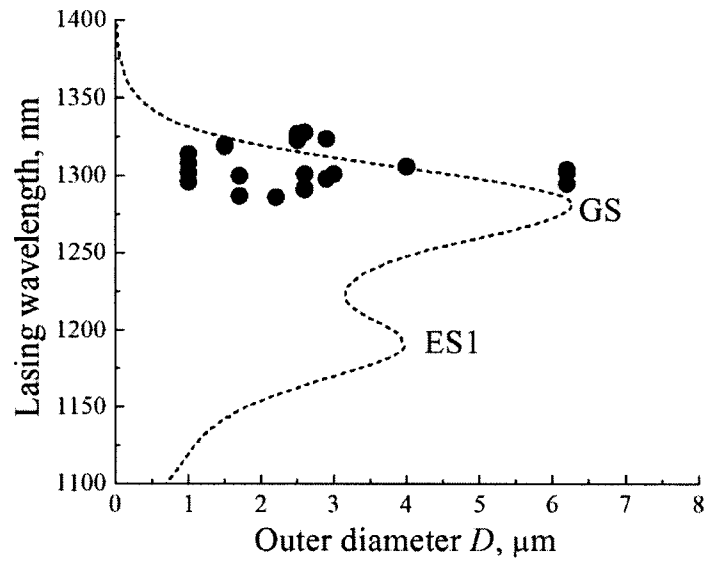
Минимальная пороговая мощность достигается в микролазерах размером около 1.5 мкм и составляет около 50 мкВт. При дальнейшем уменьшении размеров микрорезонатора порог генерации резко возрастает, что, вероятно, обусловлено ростом волноводных потерь на изгиб.

На рисунке 6 представлены данные по длине волны лазерной генерации в микродисках различного диаметра, а также показан спектр излучения активной области в спонтанном режиме. Из сравнения приведенных данных следует, что во всем исследованном диапазоне размеров микрорезонаторов, вплоть до 1 мкм включительно, лазерная генерация в них реализуется через основной оптический переход КТ, обозначенный на рисунке как GS.





**Рисунок 5** Зависимость пороговой мощности от внешнего диаметра микродиска. Штриховая линия: зависимость  $D^2$



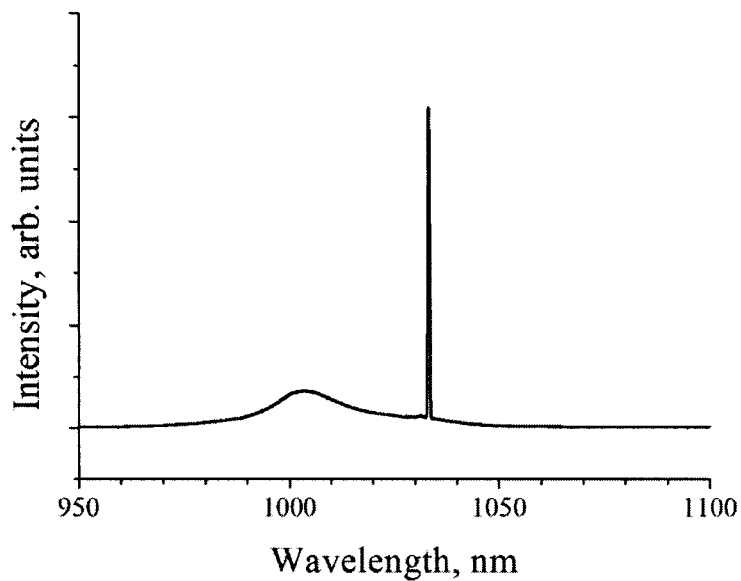
**Рисунок 6** Зависимость длины волны лазерной генерации от внешнего диаметра микродиска. Штриховая линия: спектр спонтанного излучения

#### **4. Исследование возможности использования в качестве активной области микродисковых лазеров плотных массивов квантовых точек InGaAs спектрального диапазона около 1-1.1 мкм**

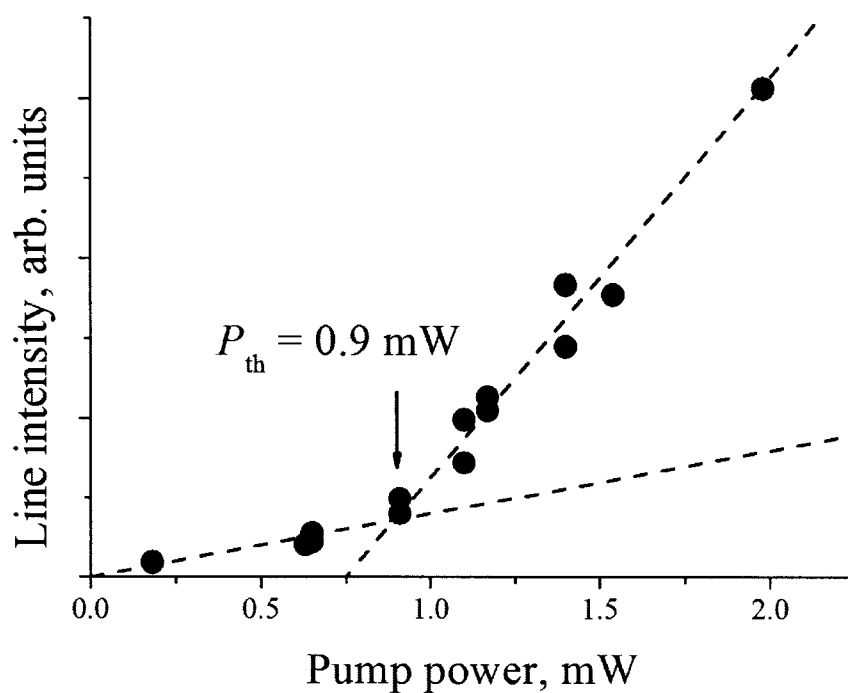
Нами была исследована возможность использования в качестве активной области микролазеров плотных массивов квантовых точек, формируемых методом МОГФЭ и излучающих в спектральном диапазоне 1-1.1 мкм. Поверхностная плотность таких квантовых точек оценена равной  $(3-5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  на один ряд КТ, что в 6-10 раз превышает плотность КТ, формируемых традиционным способом по механизму Странского-Крастанова.

Эпитаксиальная структура содержала 5 рядов квантовых точек, полученных осаждением слоев  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  и разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 30 нм. Условия осаждения были выбраны таким образом, что пик излучения при комнатной температуре находился вблизи 1.06 мкм. Активная область была помещена в волноводный слой GaAs толщиной 0.2 мкм, ограниченный с обеих сторон барьерными слоями  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  толщиной 20 нм. Под волноводной частью структуры располагался буферный слой  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  толщиной 0.8 мкм. Цилиндрические микрорезонаторы были сформированы с помощью травления ионами  $\text{Ar}^+$ .

Оптические исследования проводились при температуре жидкого азота. Пример спектра генерации приведен на рисунке 7. Линия лазерной генерации с длиной волны около 1033 нм возникает на длинноволновом склоне пика основного перехода квантовых точек. Было обнаружено, что порог лазерной генерации составляет около 1 мВт, рисунок 8.



**Рисунок 7** Спектр лазерной генерации при 78К микрорезонатора диаметром 4 мкм



**Рисунок 8** Зависимость интегральной интенсивности линии излучения от мощности накачки

## 5. Расчет и экспериментальное исследование теплового сопротивления микролазеров

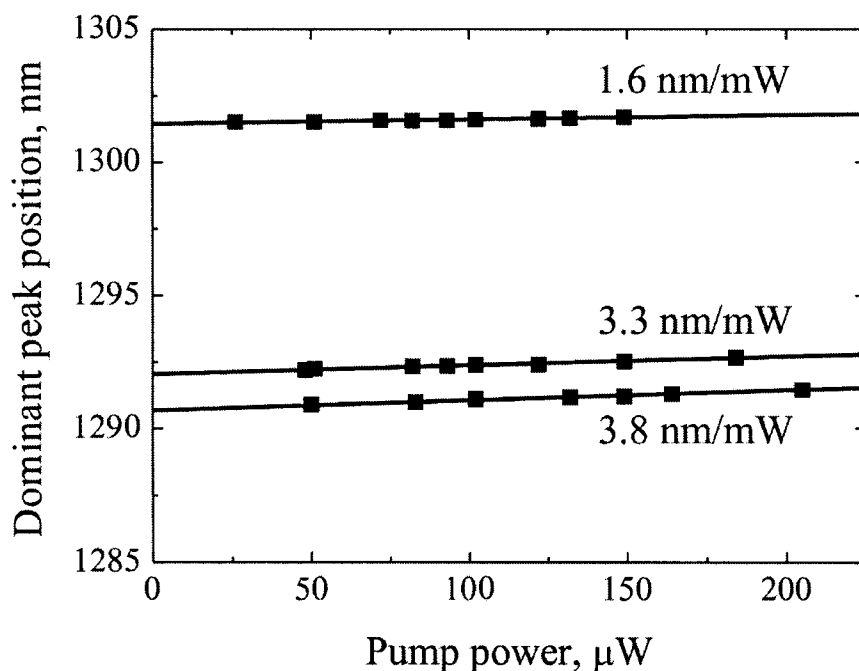
Нами было исследовано тепловое сопротивление микролазеров типа «подвешенный диск» с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs (разделы 1-3).

На вставке к рисунку 4 показан участок спектра вблизи доминантного пика при различной накачке. Как видно, с увеличением мощности  $P_{\text{pump}}$  наблюдается длинноволновый сдвиг линии, обусловленный увеличением температуры  $T$  микродиска. На рисунке 7 показана зависимость положения  $\lambda$  доминантного пика от  $P_{\text{pump}}$  для нескольких микродисков диаметром 2.6 мкм. Коэффициент  $d\lambda/dP_{\text{pump}}$ , определенный с помощью линейной аппроксимации экспериментальных данных, лежит в диапазоне 1.6–3.8 нм/мВт.

Ранее проведенные исследования [4] микродисковых лазеров позволили установить, что в исследуемых структурах обусловленный температурой сдвиг длины волны моды шепчущей галереи  $d\lambda/dT$  составляет  $0.075 \pm 0.005$  нм/°С в температурном диапазоне 20–80°С. Используя это значение совместно с данными рисунка 9 можно оценить коэффициент  $dT/dP_{\text{pump}} = (d\lambda/dP_{\text{pump}})/(d\lambda/dT)$ , описывающий рост температуры с мощностью накачки, для исследуемых микродисков как приблизительно равный 20–50°С/мВт.

Тепловое сопротивление  $R_{\text{th}}$  по определению есть отношение приращения  $dT$  температуры прибора к вызвавшей этот разогрев приращению рассеиваемой мощности  $dP_{\text{diss}}$ . Поскольку мощность излучения, выходящего из микродиска, пренебрежимо мала, можно считать, что рассеиваемая мощность  $P_{\text{diss}}$  равна той части накачки, которая фактически поглощается в структуре. Доля поглощаемой накачки

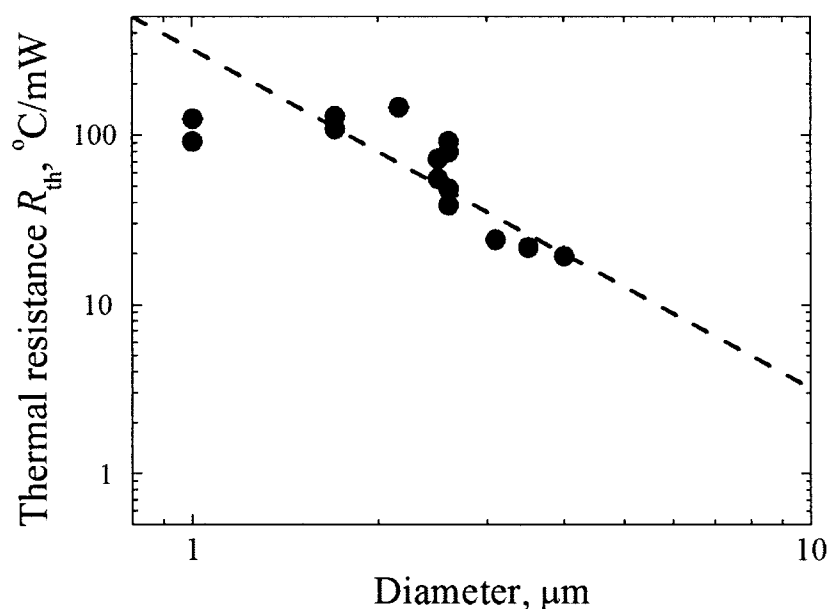
была оценена равной 0.55 с помощью выражения  $P_{\text{diss}}/P_{\text{pump}} = (1 - R)[1 - \exp(-\alpha d)]$ . Коэффициент отражения  $R$  от верхней поверхности диска мы полагали равным 0.3, коэффициент поглощения  $\alpha$  лазерной накачки в GaAs части волновода равным  $6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , толщину поглощающей области  $d = 0.26 \text{ мкм}$ .



**Рисунок 9** Положение доминирующего пика в зависимости от мощности накачки для нескольких микродисков диаметром 2.6 мкм

Таким образом, рассеиваемая мощность, которая приводит к увеличению температуры активной области, приблизительно в 2 раза меньше падающей мощности накачки, так что тепловое сопротивление, вычисляемое по формуле  $R_{\text{th}} = (P_{\text{diss}}/P_{\text{pump}})^{-1}(dT/dP_{\text{pump}})$ , оказывается примерно в 2 раза больше ранее определенного коэффициента  $dT/dP_{\text{pump}}$ . Для описанных выше микродисков диаметром 2.6 мкм получаем значение  $R_{\text{th}}$  в диапазоне 38–92°C/мВт.

Аналогичные измерения и расчеты были выполнены для других изготовленных микродисков. Полученные данные систематизированы на рисунке 10. Как видно, для дисков диаметром 1.7 мкм и более прослеживается тенденция снижения теплового сопротивления при уменьшении диаметра микродиска. Наклон зависимости  $R_{th}$  от диаметра диска  $D$  приблизительно соответствует  $\propto D^{-2}$ . Для наименьших из исследованных микродисков (1 мкм) тепловое сопротивление перестает убывать с диаметром.



**Рисунок 10** Тепловое сопротивление в зависимости от диаметра микродиска. Штриховая линия:  $R_{th} = C_{th} / D^2$ , где  $C_{th} = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{Вт}$

В случае микролазера типа «подвешенный диск» боковым отводом тепла можно пренебречь, поскольку теплопроводность воздуха мала. Таким образом, его тепловое сопротивление будет обратно пропорционально площади основания. В исследованных структурах типа подвешенный диск эффективный диаметр основания  $d$  масштабируется

с диаметром самой активной области  $D$  и можно ожидать, что  $R_{th} = C_{th}D^{-2}$ . Для оценки величины коэффициента пропорциональности  $C_{th}$  будем полагать, что тепловое сопротивление полностью определяется теплопроводностью ( $\kappa_{AlGaAs}$ ) буферного слоя AlGaAs, так что  $C_{th} \approx (D/d)^2 4h(\pi\kappa_{AlGaAs})^{-1}$ , где  $h$  – высота основания. Зависимость теплопроводности  $Al_xGa_{1-x}As$  от мольной доли AlAs в твердом растворе приближенно является квадратичной:  $\kappa_{AlGaAs} \approx A + Bx + Cx^2$ , где коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  равны соответственно 0.44,  $-1.79$  и  $2.26$  Вт/(см·К) [5]. Для использованного химического состава ( $x = 0.7$ )  $\kappa_{AlGaAs} \approx 0.3$  Вт/(см·К). Полагая  $h = 1.5$  мкм и  $(D/d)^2 \approx 5$ , получаем  $C_{th} \approx 3.2 \cdot 10^{-3}$  К·см<sup>2</sup>/Вт.

Расчетная зависимость, описываемая выражением  $R_{th} = C_{th}D^{-2}$  с найденным коэффициентом  $C_{th}$ , показана на рисунке 8. Она находится в хорошем согласии с экспериментальными значениями теплового сопротивления, оцененного в исследуемых микродисках с  $D \geq 1.7$  мкм. Отклонение от пропорциональности  $\propto D^{-2}$  в самых малых из исследованных структур обусловлено на наш взгляд с тем, что диаметр диска становится меньше пятна возбуждения, так что отношение реально поглощаемой оптической мощности к мощности накачки,  $P_{diss}/P_{pump}$ , снижается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.A. Marcatili, Bends in optical dielectric guides, *Bell Syst. Tech. J.* 48, 2103 (1969).
2. M. Fujita, A. Sakai, T. Baba, Ultrasmall and ultralow threshold GaInAsP–InP microdisk injection lasers: Design, fabrication, lasing characteristics, and spontaneous emission factor, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 5, 673 (1999).
3. T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, S. Iwamoto, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Room temperature continuous wave lasing in InAs quantum-dot microdisks with air cladding *Opt. Exp.* 13, 1615 (2005).
4. A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, M.V. Maximov, A.A. Lipovskii, I.S. Mukhin, E.I. Moiseev, I.I. Shostak, A.V. Savel'ev, A.A. Bogdanov, D.V. Karpov, J. Laukkanen, J. Tommila, D. Livshits, Quantum dot microring lasers, *Int. Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW)*, St Petersburg & Luge, Russia, August 11–22, 2014
5. “Properties of Aluminium Gallium Arsenide” (Ed: S. Adachi), INSPEC, London, UK. 1993



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- 1) Разработана конструкция оптических микродисковых резонаторов типа «подвешенный диск», обеспечивающих эффективное вертикальное ограничение оптической моды.
- 2) Созданы микролазеры типа «подвешенный диск» с активной областью на основе квантовых точек InAs спектрального диапазона около 1.3 мкм, исследованы их оптические свойства.
- 3) Продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре в микродисковых лазерах типа «подвешенный диск» рекордно-малого диаметра 1 мкм. Вплоть до наименьшего размера, генерация происходит через основной оптический переход вблизи длины волны 1.3 мкм
- 4) Продемонстрирована возможность достижения лазерной генерации в микродисковых лазерах с активной областью на основе плотных массивов квантовых точек InGaAs спектрального диапазона около 1-1.1 мкм.
- 5) Проведены экспериментальные и теоретические исследования теплового сопротивления микролазеров. Показано, что для микролазеров типа «подвешенный диск» тепловое сопротивление обратно пропорционально квадрату диаметра с коэффициентом пропорциональности  $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ .

Основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований, опубликованы в 4 работах, входящих в списки цитирования системы Web of Science.

Таким образом, в результате выполнения исследований в течение этапа 2015 года все задачи, поставленные на данном этапе, выполнены полностью.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Сведения о публикациях по проекту

Основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований, опубликованы в 4 работах, изданных в журналах перечня Web of Science:

1. WOS:000354103400022

А.Е. Жуков, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, А.А. Липовский, А.В. Савельев, И.И. Шостак, Э.И. Моисеев, Ю.В. Кудашова, М.М. Кулагина, С.И. Трошков, Тепловое сопротивление дисковых микролазеров сверхмалого диаметра, Физика и техника полупроводников 49(5), 688-692 (2015).

2. WOS:000360810200026

A. A. Bogdanov, I. S. Mukhin, N. V. Kryzhanovskaya, M. V. Maximov, Z. F. Sadrieva, M. M. Kulagina, Yu. M. Zadiranov, A. A. Lipovskii, E. I. Moiseev, Yu. V. Kudashova, and A. E. Zhukov, Mode selection in InAs quantum dot microdisk lasers using focused ion beam technique, Optics Letters 40(17), 4022-4025 (2015).

3. WOS:000358517000001

N. V. Kryzhanovskaya, A. E. Zhukov, M. V. Maximov, E. I. Moiseev, I. I. Shostak, A. M. Nadtochiy, Yu. V. Kudashova, A. A. Lipovskii, M. M. Kulagina, S. I. Troshkov, Room Temperature Lasing in 1- $\mu$ m Microdisk Quantum Dot Lasers, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 21(6), 1900905 (2015).

4. WOS:000358834400012

Н.В.Крыжановская, М.В.Лебедев, Т.В.Львова, Ю.В.Кудашова, И.И.Шостак, Э.И.Моисеев, А.Е.Жуков, М.В.Максимов, М.М.Кулагина, А.М.Надточий, С.И.Трошков, А.А.Блохин, М.А.Бобров, Влияние сульфидной пассивации на люминесценцию микродисков с квантовыми

ямами и квантовыми точками, Письма в журнал технической физики  
41(13), 86-94 (2015).

*Физика и техника полупроводников, 2015, том 49, вып. 5*

## Тепловое сопротивление дисковых микролазеров сверхмалого диаметра

© А.Е. Жуков<sup>++†‡</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>†‡</sup>, М.В. Максимов<sup>\*†‡</sup>, А.А. Липовский<sup>†‡</sup>, А.В. Савельев<sup>++†</sup>,  
И.И. Шостак<sup>+</sup>, Э.И. Моисеев<sup>+</sup>, Ю.В. Кудашова<sup>+</sup>, М.М. Кулагина<sup>\*</sup>, С.И. Трошков<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> Санкт-Петербургский Академический университет —  
научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук,  
199034 Санкт-Петербург, Россия

<sup>†</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

<sup>‡</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 6 ноября 2014 г. Принята к печати 12 ноября 2014 г.)

Обнаружено, что тепловое сопротивление микролазеров AlGaAs/GaAs типа „подвешенный диск“ диаметром 1.7–4 мкм с квантовыми точками InAs/InGaAs в активной области обратно пропорционально квадрату диаметра микродиска с коэффициентом пропорциональности  $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$  и составляет 120–20°С/мВт.

4022 Vol. 40, No. 17 / September 1 2015 / Optics Letters

Letter

# Optics Letters

## Mode selection in InAs quantum dot microdisk lasers using focused ion beam technique

A. A. BOGDANOV,<sup>1,2,3,\*</sup> I. S. MUKHIN,<sup>1,4</sup> N. V. KRYZHANOVSKAYA,<sup>1,3</sup> M. V. MAXIMOV,<sup>1,2,3</sup> Z. F. SADRIEVA,<sup>1,4</sup>  
M. M. KULAGINA,<sup>2</sup> YU. M. ZADIRANOV,<sup>2</sup> A. A. LIPOVSKII,<sup>1,3</sup> E. I. MOISEEV,<sup>1</sup> YU. V. KUDASHOVA,<sup>1</sup> AND  
A. E. ZHUKOV<sup>1,3,5</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg Academic University, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup>St. Petersburg Scientific Center RAS, St. Petersburg, Russia

\*Corresponding author: bogdanov@mail.ioffe.ru

Received 15 July 2015; accepted 28 July 2015; posted 10 August 2015 (Doc. ID 246038); published 21 August 2015

# Room Temperature Lasing in 1- $\mu\text{m}$ Microdisk Quantum Dot Lasers

Natalia V. Kryzhanovskaya, Alexey E. Zhukov, Mikhail V. Maximov, Eduard I. Moiseev, Ivan I. Shostak, Alexey M. Nadochiy, Yulia V. Kudashova, Andrey A. Lipovskii, Marina M. Kulagina, and Sergey I. Troshkov

N. V. Kryzhanovskaya, M. V. Maximov, E. I. Moiseev, I. I. Shostak, A. M. Nadochiy, Y. V. Kudashova, and A. A. Lipovskii are with the St. Petersburg Academic University, 194021 St. Petersburg, Russia, with the St. Petersburg State Polytechnical University, 194064 St. Petersburg, Russia, and also with the Ioffe Physical-Technical Institute, 194021 St. Petersburg, Russia (e-mail: kryj@mail.ioffe.ru; Maximov@beam.ioffe.ru; moisei-90@mail.ru; porunacabeza@mail.ru; al.nadochy@mail.ioffe.ru; yu.v.kudashova@mail.ru; lipovskii@mail.ru).

A. E. Zhukov is with the St. Petersburg Scientific Center of RAS, 197110 St. Petersburg, Russia, with the St. Petersburg Academic University, 194021 St. Petersburg, Russia, with the St. Petersburg State Polytechnical University, 194064 St. Petersburg, Russia, and also with the Ioffe Physical-Technical Institute, 194021 St. Petersburg, Russia (e-mail: zhukale@gmail.com).

M. M. Kulagina and S. I. Troshkov are with the Ioffe Physical-Technical Institute, 194021 St. Petersburg, Russia (e-mail: marina.kulagina@mail.ioffe.ru; serge\_i\_t@mail.ru).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JSTQE.2015.2439156

*Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 13*

*12 июля*

08

## Влияние сульфидной пассивации на люминесценцию микродисков с квантовыми ямами и квантовыми точками

© Н.В. Крыжановская<sup>1,2</sup>, М.В. Лебедев<sup>3</sup>, Т.В. Львова<sup>3</sup>, Ю.В. Кудашова<sup>1</sup>, И.И. Шостак<sup>1</sup>, Э.И. Моисеев<sup>1,2</sup>, А.Е. Жуков<sup>1,2,4</sup>, М.В. Максимов<sup>1,2,3</sup>, М.М. Кулагина<sup>3</sup>, А.М. Надточий<sup>1</sup>, С.И. Трошков<sup>3</sup>, А.А. Блохин<sup>2</sup>, М.А. Бобров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский научный центр РАН

E-mail: kryj@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2015 г.