

## Электр люминесцентные свойства лазера на модах шепчущей галереи со сдвоенными резонаторами

© А.Н. Именков<sup>+</sup>, Е.А. Гребенщикова<sup>+</sup>, В.В. Шерстнев<sup>†</sup>, А.А. Леонидов<sup>+</sup>, Н.Д. Ильинская<sup>+</sup>,  
О.Ю. Серебренникова<sup>+</sup>, R. Teissier<sup>\*</sup>, А.Н. Баранов<sup>\*</sup>, Ю.П. Яковлев<sup>+</sup>

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

<sup>\*</sup> Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2, CNRS, IES (UMR CNRS 5214),  
34095 Montpellier, France

(Получена 18 марта 2014 г. Принята к печати 26 марта 2014 г.)

На основе квантово-размерной наногетероструктуры GaInAsSb/GaAlAsSb созданы дисковые лазеры (длины волн излучения  $\lambda = 2.1\text{--}2.4\text{ мкм}$ ) со сдвоенными резонаторами, соединенными между собой перемычкой, и исследованы их спектры и диаграммы направленности излучения при комнатной температуре. Наблюдается практически одномодовая генерация излучения в одной пространственной моде в широком интервале питающих токов. Длина волны излучения увеличивается с ростом тока при нагревании лазера, и это явление может быть использовано в диодной лазерной спектроскопии. Высказано предположение, что в таких лазерах поток генерируемого излучения может переходить из одного резонатора в другой и обратно по соединяющей их перемычке. Обнаружено сильное сужение диаграммы направленности лазерного излучения с ростом тока, происходящее вблизи плоскости, разделяющей сдвоенные резонаторы.

### 1. Введение

Лазеры, работающие на модах шепчущей галереи (whispering gallery mode — WGM), привлекают к себе большое внимание в связи с существенно большей добротностью резонатора по сравнению с полосковыми резонаторами Фабри–Перо [1–4]. В WGM-лазере с резонатором в форме диска генерируется одновременно несколько пространственных радиальных мод в слое, прилегающем к внешнему краю диска [5,6]. Ширина этого слоя составляет до 10% от радиуса резонатора. Каждой радиальной моде соответствует свой набор спектральных мод излучения. Добротность резонатора для различных пространственных мод имеет примерно одинаковую величину, что затрудняет получение одномодовой генерации. В сдвоенных дисковых резонаторах, имеющих общую границу, излучение может переходить из одного диска в другой в разных соотношениях для различных радиальных мод. При этом, из исследования полудисковых лазеров [5] следует, что только периферийная мода дает максимум излучения перпендикулярно радиусу диска в плоскости  $p-n$ -перехода. Это излучение способно без потерь распространяться в другом диске. Луч более глубоких мод, чем периферийная, раздваивается. Поэтому в соединенных вместе двух дисковых резонаторах создаются наиболее благоприятные условия для перехода излучения только периферийной моды из одного диска в другой. Условия для перехода излучения пространственных мод с большим количеством полуволн ( $i > 1$ ) из одного диска в другой менее благоприятны.

Цель настоящей работы заключалась в создании WGM-лазеров со сдвоенными дисковыми резонаторами,

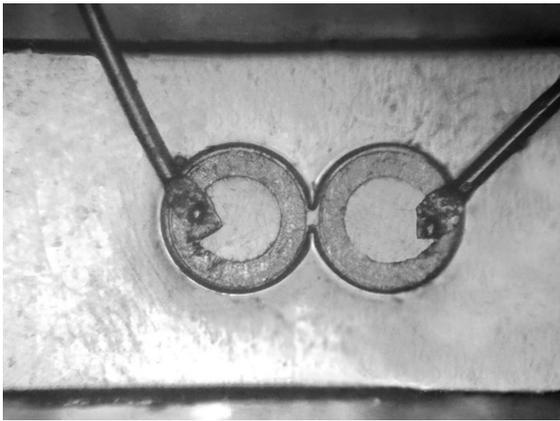
соединенными специальной перемычкой, и изучении электр люминесцентных свойств таких лазеров.

### 2. Методика эксперимента

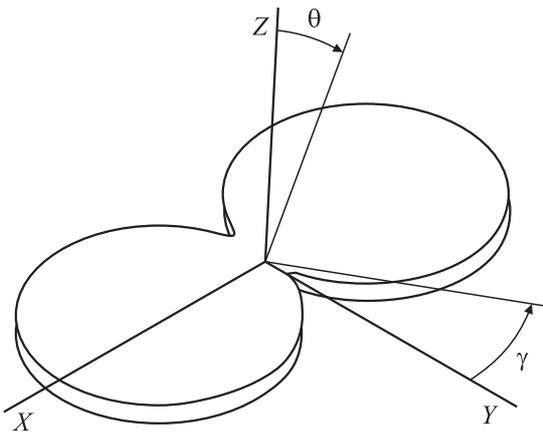
Лазерная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E на подложке GaSb (100)  $n$ -типа проводимости. Активная область толщиной 856 нм состояла из 2 квантовых ям состава  $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$  толщиной 13 нм, разьединенных слоем  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$  толщиной 30 нм. Волноводные слои, изготовленные из  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ , имели толщину 400 нм. Активная область преднамеренно не легировалась. Волновод был ограничен широкозонными слоями  $p(\text{Be})$ - и  $n(\text{Te})\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$  толщиной 1.0 мкм. Широкозонные слои  $n$ - и  $p$ -типа проводимости легировались до концентрации носителей заряда  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . С внешней стороны к широкозонным слоям примыкали варизонные слои AlGaAsSb толщиной 100 нм для улучшения инжекции носителей заряда в активную область. В качестве верхнего контактного слоя структуры выращивался слой  $p\text{-GaSb}$  толщиной 475 нм, легированный до  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Более подробно процесс выращивания лазерной структуры описан в статье [7].

Лазерные чипы со сдвоенными дисковыми резонаторами изготавливались методом фотолитографии и жидкостного химического травления. После травления в растворе состава  $\text{CrO}_3/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$  при комнатной температуре высота резонаторов составила 7 мкм. Активная область структуры в таких резонаторах выступает за пределы эмиттерных слоев, что создает дополнительное оптическое ограничение [8]. Из рис. 1 видно, что резонаторы имеют общую границу, ее протяженность 15 мкм, ширина 5 мкм. Для формирования омических контактов

<sup>†</sup> E-mail: vic2sherstnev@gmail.com



**Рис. 1.** Фотография WGM-лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами высотой  $h = 7$  мкм и диаметром  $D = 200$  мкм. Протяженность перемычки между резонаторами 15 мкм. Вид со стороны  $p$ -области.



**Рис. 2.** Схема конструкции WGM-лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами.

методом термического вакуумного напыления наносили сплошной многослойный контакт Cr/Au : Te/Au на подложку  $n$ -GaSb. Нижний слой Cr служил для улучшения адгезии последующих слоев. На эпитаксиальный слой методом термического вакуумного напыления наносили Cr/Au : Zn/Au. Контакты представляли собой два кольца шириной 30 мкм, отстоящие от края дисков на 10 мкм. В целях увеличения толщины контактного слоя до  $\sim 2$  мкм сверху электрохимическим методом осаждали золото.

Затем структура подвергалась термообработке в среде водорода для сплавления металлических слоев. Структура разделялась на чипы площадью  $(0.9 \times 0.9)$  мм с резонаторами в центре. Исследовались два типа WGM-лазеров — с резонаторами диаметром 200 мкм и с резонаторами диаметром 400 мкм. Микрофотография изготовленного таким образом лазерного диода приведена на рис. 1. Кристалл припаивался на корпус ТО-18 с плоским

столиком. Была собрана и измерена серия лазеров, все они имели нормальные диодные характеристики.

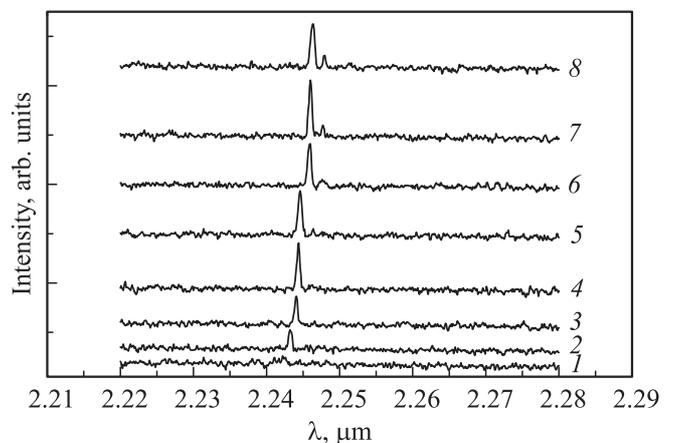
Измерялись спектры излучения лазеров при комнатной температуре в интервале токов от 0.1 до 0.4 А с заполнением 0.5 на частоте  $\sim 500$  Гц (CW-режим). Ток подавался через один резонатор или через оба. Измерения проводились на спектрометре МДР-32 с разрешением 2 Å.

Для изучения характера выхода излучения измерялось распределение излучения в дальней зоне (диаграмма направленности по мощности) лазеров. Для этого лазер либо вращался вокруг оси Z, перпендикулярной плоскости резонатора (рис. 2), либо вокруг осей X или Y, лежащих в плоскости резонатора. Фотоприемник располагался в плоскости, проходящей через лазер перпендикулярно оси вращения. Излучение регистрировалось фотосопротивлением из PbS с шириной фоточувствительной площадки 0.87 мм на расстоянии 3.5 см от лазера, что обеспечивало угловое разрешение  $1.5^\circ$ . Питание лазера осуществлялось импульсами тока с длительностью 0.8 мкс и частотой повторения 31 кГц. Питание прерывалось с заполнением 0.5 на частоте 330 Гц, на которой проводилось синхронное детектирование сигнала.

### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Спектры электролюминесценции

На рис. 3 представлены спектры излучения лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами диаметром по 200 мкм, показанного на рис. 1, при пропускании тока через оба лазерных резонатора. Генерация появляется при амплитудном значении тока 0.26 А на длине волны  $\lambda = 2.2425$  мкм. При увеличении тока длина волны основной линии излучения плавно увеличивается и достигает  $\lambda = 2.2463$  мкм при токе 0.40 А. Наблюдаемое



**Рис. 3.** Спектры излучения WGM-лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами диаметром  $D = 200$  мкм, измеренные при комнатной температуре и различных токах, А: 1 — 0.26, 2 — 0.28, 3 — 0.30, 4 — 0.32, 5 — 0.34, 6 — 0.36, 7 — 0.38 и 8 — 0.40.

увеличение длины волны объясняется повышением температуры лазера вследствие его нагрева питающим током. Общее увеличение длины волны составляет  $38 \text{ \AA}$ . При токах  $> 0.30 \text{ А}$  становится заметной слабая линия (см. рис. 3), отстоящая от основной линии на расстояние  $22 \text{ \AA}$ , равное межмодовому расстоянию для одного диска и соответствующая той же пространственной моде, что и преобладающая спектральная линия.

В лазерах со сдвоенными дисковыми резонаторами диаметром  $400 \text{ мкм}$  межмодовое расстояние составило  $13 \text{ \AA}$ . Длина волны основной линии в лазерах с диаметром резонаторов  $400 \text{ мкм}$  на  $\sim 0.1 \text{ мкм}$  меньше, чем в лазерах с диаметром резонаторов  $200 \text{ мкм}$ , а пороговый ток приблизительно такой же, что объясняется большей добротностью резонатора.

Следует отметить, что преобладание одной линии излучения сохраняется в широком интервале токов, несмотря на плавный сдвиг этой линии с током. Поэтому WGM-лазеры со сдвоенными резонаторами являются, по-видимому, перспективными для диодной лазерной спектроскопии.

Обращает на себя внимание отсутствие излучения глубинных пространственных мод, что говорит об их подавлении в соединенных дисковых резонаторах.

При питании только одного диска также возникает генерация, соответствующая прохождению излучения по обоим дискам, однако плотность порогового тока оказывается повышенной. Излучение в этом случае генерируется только в одном диске, но проходит и по второму диску. При увеличении тока в  $1.5\text{--}2$  раза длина волны резко увеличивается, на  $\sim 100 \text{ \AA}$ , по-видимому, вследствие достижения инверсии заселенности и во втором диске. Это показывает, что излучение проходит по двум дискам.

### 3.2. Диаграммы направленности излучения

Угловое распределение излучения в плоскости сдвоенных дисковых резонаторов с диаметрами по  $200 \text{ мкм}$  показано на рис. 4. Значение угла  $\gamma = 0$  соответствует оси  $Y$ , разделяющей диски (см. рис. 2). В этом направлении мощность излучения максимальна. В направлении оси  $X$  мощность минимальна. Кривые 1 и 2 соответствуют спонтанному режиму, кривые 3 и 4 — лазерному. В спонтанном режиме мощность излучения в направлении оси  $Y$  приблизительно в 2 раза больше, чем в направлении оси  $X$ , что соответствует отношению видностей лазера. В лазерном режиме прирост мощности в направлении оси  $Y$  с увеличением тока больше приблизительно в 3 раза, чем в направлении оси  $X$ . Можно сказать, что появляется направленность излучения. В лазерном режиме заметна модулированность углового распределения мощности излучения периодическими функциями с периодом  $5\text{--}15^\circ$ . Ширина диаграммы направленности на половине высоты при токе  $0.40 \text{ А}$  составляет  $130^\circ$ .

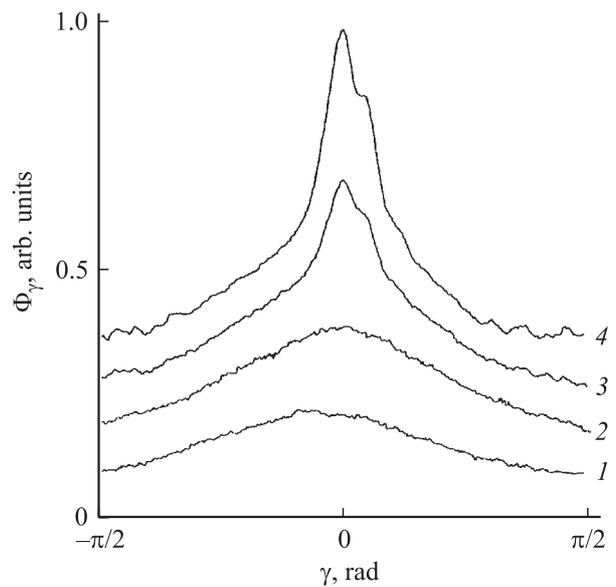


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения  $\Phi_\gamma$  от величины угла  $\gamma$  в плоскости резонатора для WGM-лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами диаметром  $200 \text{ мкм}$  при различных токах, А: 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3 и 4 — 0.4.

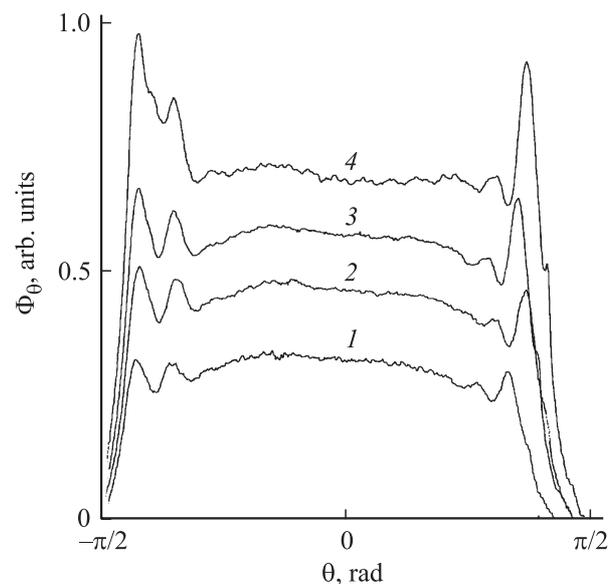
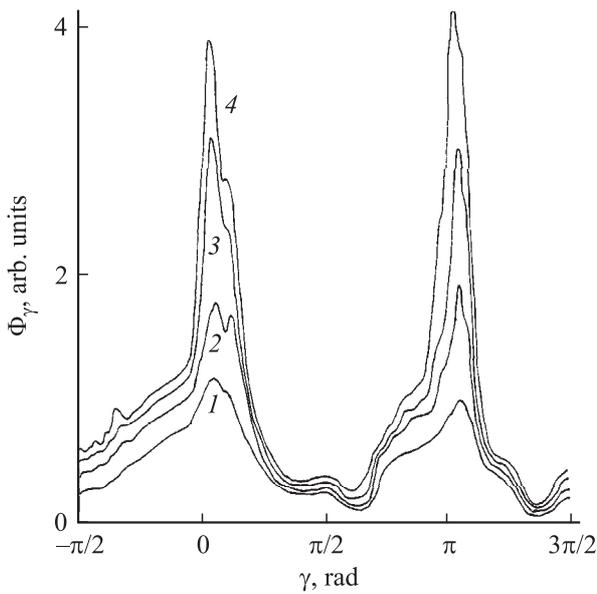


Рис. 5. Зависимости интенсивности излучения  $\Phi_\theta$  от величины угла  $\theta$  в плоскости, включающей оси  $Y$  и  $Z$ , для WGM-лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами диаметром  $200 \text{ мкм}$  при различных токах, А: 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3 и 4 — 0.4.

Появление направленности излучения и его угловой модулированности говорит о наличии интерференции излучения, исходящего из разных дисков, т.е. говорит о когерентности лазерного излучения в разных дисках. Угловое распределение излучения в плоскости, включающей в себя оси  $Y$  и  $Z$  (рис. 2), показано на рис. 5 в зависимости от угла  $\theta$ . В распределении проявляется интерференция прямого луча, исходящего из диска, с лучом,



**Рис. 6.** Зависимости интенсивности излучения  $\Phi_\gamma$  от величины угла  $\gamma$  в плоскости резонатора для WGM-лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами диаметром 200 мкм при больших токах, А: 1 — 0,4, 2 — 0,6, 3 — 0,8, 4 — 1,0.

отраженным от подложки, на которой лежит основание диска. Угловое расстояние между интерференционными пиками составляет  $\Delta\theta = 0,25$  рад, по которому можно определить возвышение излучающей области диска над подложкой [9] по формуле

$$h = \lambda/2\Delta\theta. \quad (1)$$

При  $\lambda = 2,4$  мкм вычислим  $h = 4,8$  мкм, что соответствует действительной величине. Интерференция наблюдается и для спонтанного излучения благодаря достаточной узости спектра спонтанного излучения. С увеличением тока мощность излучения сильнее возрастает при значении  $|\theta|$ , близком к  $\pi/2$ , чем при значении, близком к нулю. Это объясняется тем, что лазерное излучение выходит наружу через края дисков.

На рис. 6 показано угловое распределение излучения в плоскости сдвоенных дисковых резонаторов при большом превышении тока над пороговым значением (до 5 раз). При углах  $\gamma$  около  $0,6\pi$  и  $1,3\pi$  происходит затенение фотоприемника контактными проводами. При углах  $\gamma$  около  $0$  и  $\pi$  видно сильное сосредоточение излучения вблизи плоскости, включающей оси  $Y$  и  $Z$ . Ширина диаграммы направленности уменьшается от  $130^\circ$  до  $25^\circ$  с увеличением тока от  $0,40$  до  $1,00$  А. Надо отметить, что диаграмма направленности сужается только в узкой угловой области, шириной  $\sim 40^\circ$ . Внутри этой угловой области присутствует и может интерферировать не только первоначально исходящее от дисков излучение, но и излучение, отраженное от соседнего диска, давая свой вклад в общую интенсивность. Однако этот вклад недостаточен, так как отражается только  $\sim 30\%$

падающего излучения, а  $\sim 70\%$  излучения проходит внутрь и вызывает местное повышение уровня возбуждения. По-видимому, основной прирост интенсивности происходит из-за того, что лазерное излучение, распространяющееся по перемычке, частично попадает на ее наружную стенку и выходит из кристалла.

В результате в соединенных в пару дисковых WGM-резонаторах появляются условия для сужения диаграммы направленности излучения.

#### 4. Заключение

Относительно новых физических процессов, происходящих в сдвоенных дисковых резонаторах, можно сказать следующее. Когерентное излучение, которое возникает в дисковом резонаторе, циркулирует по краю диска и входит в перемычку, соединяющую сдвоенные резонаторы. При этом все излучение, вошедшее в перемычку, разделяется на три потока. Один из потоков достигает противоположной стороны перемычки, выходит из кристалла и дает основной вклад в направленность излучения (рис. 6). Второй поток переходит из одного диска в другой диск по соединяющей их перемычке, а третий поток остается в первом дисковом резонаторе.

В пользу такого распределения потоков лазерного излучения указывает как исследование диаграммы направленности излучения (рис. 4–6), так и сравнение величин порогового тока дисковых резонаторов. При подаче напряжения на два диска одновременно наблюдается минимальное значение порогового тока, а при включении только одного дискового резонатора пороговый ток увеличивается почти в 2 раза, т. е. вместо уменьшения порогового тока мы наблюдаем его увеличение, которое связано с увеличением поглощения лазерного излучения, перешедшего в невозбужденный диск.

Таким образом, созданы WGM-лазеры с соединенными дисковыми резонаторами. Показано, что лазерное излучение может переходить из одного диска в другой по соединяющей их перемычке. В исследованных лазерах почти все излучение сосредоточено в одной спектральной линии.

Обнаружено сильное сужение диаграммы направленности лазерного излучения вблизи плоскости, разделяющей резонаторы.

Работа частично поддержана программой президиума РАН № 24 „Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов“, программой фундаментальных исследований ОФН РАН Ш-7, а также государственным контрактом № 11705.004.11.001.

#### Список литературы

- [1] V.V. Sherstnev, A. Krier, A.M. Monakhov, G. Hill. Electron. Lett., **39**, 916 (2003).
- [2] P.-T. Lee, T.-W. Lu, F.-M. Tsai, T.-C. Lu. Appl. Phys. Lett., **89**, 231 111 (2006).

- [3] G. Norris, A. Krier, V.V. Sherstnev, A.M. Monakhov, A.N. Baranov. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 011 105 (2007).
- [4] J.S. Xia, K. Nemoto, Y. Ikegami, Y. Shiraki, N. Usami. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 011 104 (2007) .
- [5] А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, Е.А. Гребенщикова, М.А. Сиповская, М.И. Ларченков, Д.И. Тарасов, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **45** (3), 365 (2011).
- [6] M.S. Dunaevskiy, P.A. Alekseev, A.N. Baranov, A.M. Monakhov, R. Teissier, R. Aginero, P. Girard, A.N. Titkov. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 053 120 (2013).
- [7] D.A. Yarekha, G. Glastre, A. Perona, Y. Rouillard, F. Genty, E.M. Skouri, G. Boissier, P. Grech, A. Joullic, C. Alibert, A.N. Baranov. *Electron. Lett.*, **36** (6), 537 (2000).
- [8] Е.А. Гребенщикова, Н.Д. Ильинская, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, А.П. Астахова, Ю.П. Яковлев, G. Boissier, R. Teissier, А.Н. Баранов. *Письма в ЖТФ*, **34** (21), 27 (2008).
- [9] А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, Е.А. Гребенщикова, А.С. Головин, М.А. Сиповская, Д.А. Старостенко, М.И. Ларченков, С.И. Трошков, Д.И. Тарасов, А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **36** (13), 89 (2010).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **Electroluminescent properties of whispering-gallery mode laser with coupled disk cavities**

*A.N. Imenkov<sup>+</sup>, E.A. Grebenshchikova<sup>+</sup>,  
V.V. Sherstnev<sup>+</sup>, A.A. Leonidov<sup>+</sup>, N.D. Il'inskaya<sup>+</sup>,  
O.Yu Serebrennikova<sup>+</sup>, R. Teissier\*,  
A.N. Baranov\*, Yu.P. Yakovlev<sup>+</sup>*

<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* Institut d'Electronique du Sud (IES),  
Universite Montpellier 2, CNRS,  
IES (UMR CNRS 5214),  
34095 Montpellier, France

**Abstract** Whispering-gallery mode (WGM) lasers with coupled disk cavities have been fabricated from quantum well GaInAsSb/AlGaAsSb nanoheterostructure. Emission spectra and optical far field patterns were studied at room temperature. In practice, single-mode generation is obtained in one space mode in wide range of current values. Emission wavelength is increasing due to laser heating as the current increases. This phenomenon can be applied in diode-laser spectroscopy. It is supposed that light from one disk cavity can penetrate into the other disk cavity through the dam. As the current increases, a great narrowing of the radiation diagram is observed near the place of cavities coupling.