

Коллективные моды в сдвоенных полупроводниковых дисковых лазерах на модах шепчущей галереи

© М.А. Ройз¹, А.Н. Баранов², А.Н. Именков¹, Д.С. Буренина¹, А.А. Пивоварова¹,
А.М. Монахов¹, Е.А. Гребенщикова¹, Ю.П. Яковлев¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Institut d'Electronique du Sud (IES), Universite Montpellier 2,
34095 Montpellier, France

E-mail: michaelroyz11@gmail.com

(Получена 13 февраля 2017 г. Принята к печати 20 февраля 2017 г.)

На основе квантово-размерной наногетероструктуры GaInAsSb/AlGaAsSb изготовлены и исследованы образцы сдвоенных полупроводниковых дисковых лазеров (длина волны излучения $\lambda \approx 2.28$ мкм), работающих на модах шепчущей галереи. Изучены спектры излучения и диаграммы направленности лазерных систем двух типов — с наличием перемычки между резонаторами и без нее. Обнаружено появление коллективных мод в обоих типах сдвоенных дисковых лазеров с межмодовым расстоянием, в 2 раза меньшим, чем у одиночных лазеров. Высказано предположение, что данный эффект обусловлен перетеканием излучения из одного дискового лазера в другой.

DOI: 10.21883/FTP.2017.09.44894.8549

1. Введение

Моды шепчущей галереи (whispering gallery modes, WGM) уже нашли множество применений в различных областях науки и техники [1,2]. Однако в сфере полупроводниковых лазеров данные моды используются относительно недавно [3]. Отличительной чертой WGM-лазеров является высокая добротность резонатора. Большая добротность резонатора позволяет получать лазерное излучение из структур с малым оптическим усилением, например, в системах на основе полупроводниковых материалов среднего инфракрасного (ИК) диапазона (длины волн $\lambda \approx 2-5$ мкм) [4]. Также стоит отметить, что лазеры с большой добротностью априори имеют узкую ширину полосы генерации, что может найти свое применение, например, в создании оптических стандартов частоты.

В настоящее время фокус исследований в области мод шепчущей галереи сместился к так называемым связанным резонаторам. В таких системах резонаторы различной формы (диски, тороиды, кольца) непосредственно соединены или находятся друг от друга на таком расстоянии, которое обеспечивает оптическую связь между ними. Эти системы принято называть термином „photonic molecules“, и им посвящено множество работ [5,6]. Однако в подавляющем большинстве таких работ рассматриваются системы с оптической накачкой резонаторов, которые работают в терагерцовом или видимом диапазонах электромагнитного излучения.

Настоящая работа посвящена исследованию электролюминесцентных свойств сдвоенных инжекционных WGM-лазеров на основе материалов среднего ИК диапазона, так как данные о механизмах работы подобных систем отсутствуют.

2. Изготовление образцов и постановка эксперимента

Приборы были изготовлены из полупроводниковой гетероструктуры на основе твердых растворов GaInAsSb/AlGaAsSb, описанной в работах [7]. Изготовленные образцы представляли собой лазеры со сдвоенными дисковыми резонаторами (радиус диска 100 и 200 мкм) с различными расстояниями между ними 0–6 мкм. Расстоянию в 0 мкм соответствует случай образования соединительной перемычки между резонаторами. Ее появление обусловлено спецификой процесса травления. Если на фотошаблоне разместить два диска достаточно близко (1–3 мкм), то процесс отвода вещества за счет диффузии в прилегающей к дискам области затрудняется. Вследствие этого часть материала остается на прежнем месте и не вытравливается, формируя перемычку. Рис. 1 представляет собой микрофотографию лазерной системы на основе сдвоенных WGM-лазеров радиусом 100 мкм с перемычкой длиной в 5 мкм и шириной в 15 мкм.

Эксперимент включал в себя измерение спектров и диаграмм направленности излучения рассматриваемых лазерных систем. Измерение спектров излучения проводилось на монохроматоре ДФС-32 при комнатной температуре в импульсном режиме питания с частотой 10 кГц и длительностью импульса 2.7 мкс. При этом проводились серии измерений спектров при разных токах накачки для случаев подачи тока только на первую мезу, только на вторую и на обе мезы сразу. Для регистрации сигнала использовался фотодиод серии ФТД24 с диапазоном спектральной чувствительности 1.15–2.32 мкм, изготовленный фирмой ООО „АИБИ“ на основе твердых растворов GaInAsSb/GaAlAsSb [8].

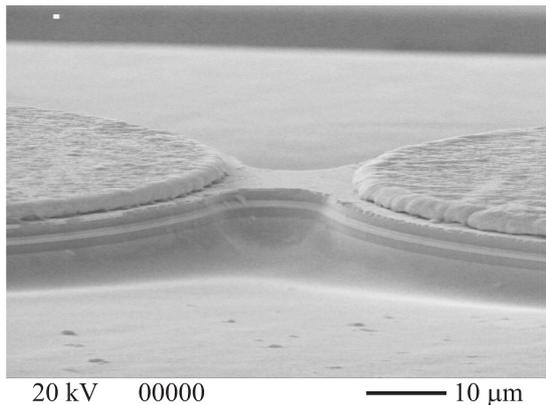


Рис. 1. Микрофотография лазерной системы на основе двоянных WGM-лазеров диаметром 200 мкм с перемычкой.

Диаграммы направленности излучения также измерялись при комнатной температуре в том же режиме питания, что и спектры излучения, однако питание прерывалось со скважностью 2 на частоте 31 кГц, на которой проводилось синхронное детектирование сигнала.

3. Экспериментальные результаты

В исследованных нами образцах дисковых лазеров со двоянными резонаторами обнаружен режим генерации, который до того не наблюдался. На рис. 2, *a* и *b* изображены спектры дискового лазера без перемычки (расстояние между дисками 6 мкм). Видно, что при подаче тока только на одну из мез наблюдается многомодовый спектр, характерный для одиночных дисковых WGM-лазеров. При подаче малых токов накачки (близких к пороговому току) на оба лазера сразу спектры излучения представляют собой сумму спектров одиночных дисков, т.е. лазеры в данном случае работают независимо друг от друга (рис. 2, *c*). Однако в случае подачи достаточно большого тока накачки на оба лазера сразу (рис. 2, *c*, кривая 5) в спектре проявляются моды, межмодовое расстояние которых в 2 раза меньше (13 \AA), чем межмодовое расстояние в лазерах, включенных по отдельности (27 \AA для диска радиуса 100 мкм). Это означает, что длина оптического пути для мод в 2 раза больше длины оптического пути в одиночном резонаторе. Можно предположить, что излучение в данном случае перетекает из одного диска в другой и подобного рода моды распространяются в обоих резонаторах сразу. Эти моды мы будем называть коллективными модами двоянных резонаторов.

Механизм перетекания излучения из одного диска в другой однозначно установить не удалось. Возможно, что подобная связь резонаторов возникла из-за перекрытия хвостов интенсивности мод, выходящих за пределы резонатора, либо за счет отражения излучения от подложки.

На рис. 3, *a* и *b* изображены спектры дискового лазера с перемычкой. Можно видеть, что при подаче тока накачки только на одну из мез наблюдается характерный многомодовый спектр, как и в предыдущем случае. Но при подаче даже малых токов накачки на оба лазера сразу спектр излучения уже не является суммой спек-

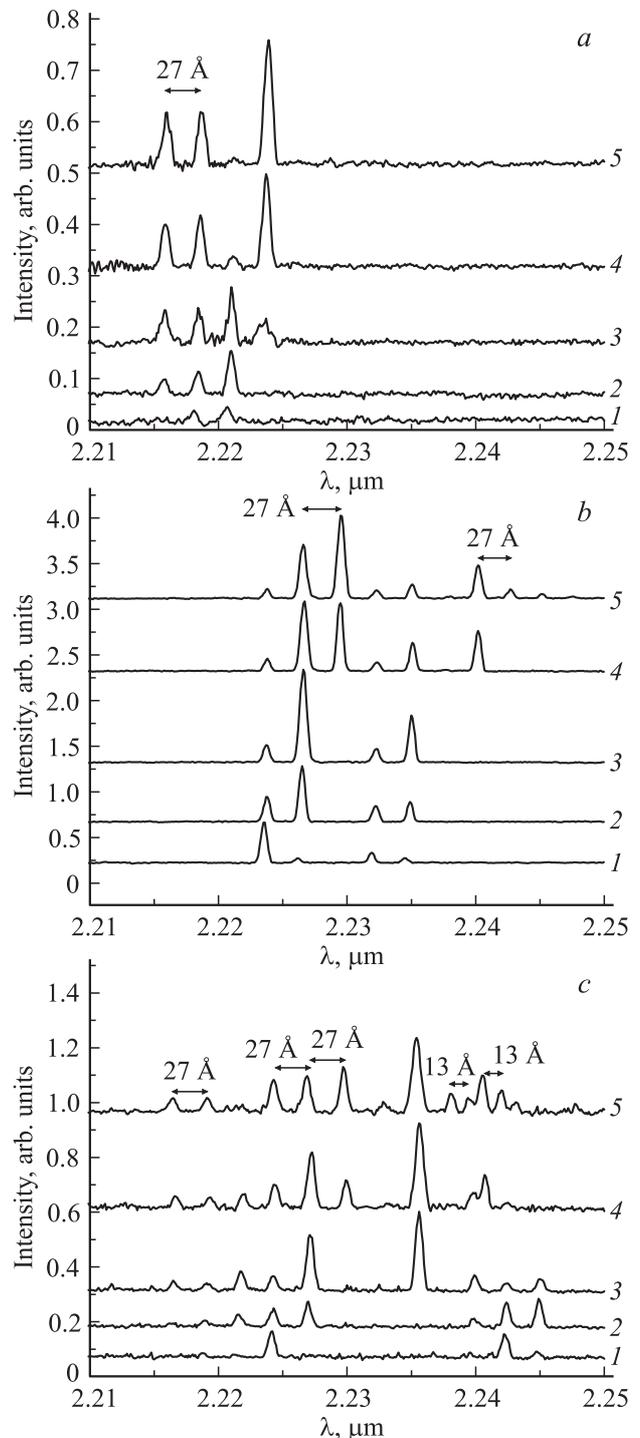


Рис. 2. Спектры излучения образца #6 при подаче тока на первый лазер (*a*), на второй лазер (*b*) и на оба лазера сразу (*c*). Плотность тока накачки, $\text{A} \cdot \text{см}^{-2}$: 1 — 333, 2 — 416, 3 — 500, 4 — 583, 5 — 666. *c*: указанный ток подавался на каждую мезу.

тров одиночных лазеров (рис. 3, *c*). Чем вызвано данное различие, пока не известно. При подаче относительно больших токов накачки в образцах с перемычкой также проявляются коллективные моды сдвоенных резонато-

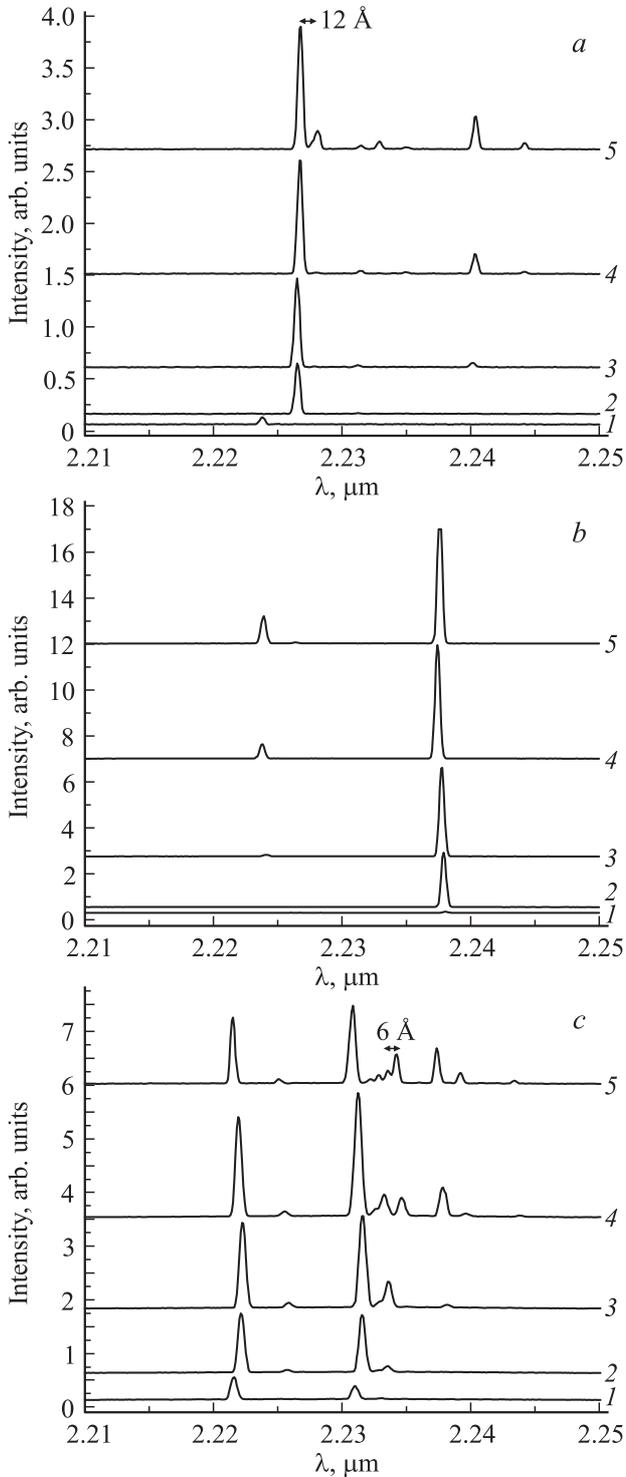


Рис. 3. Спектры излучения образца #T7 при подаче тока только на первый лазер (*a*), на второй лазер (*b*) и на оба лазера сразу (*c*). Плотность тока накачки, $A \cdot cm^{-2}$: 1 — 160, 2 — 175, 3 — 200, 4 — 219, 5 — 239. *c*: указанный ток подавался на каждую мезу.

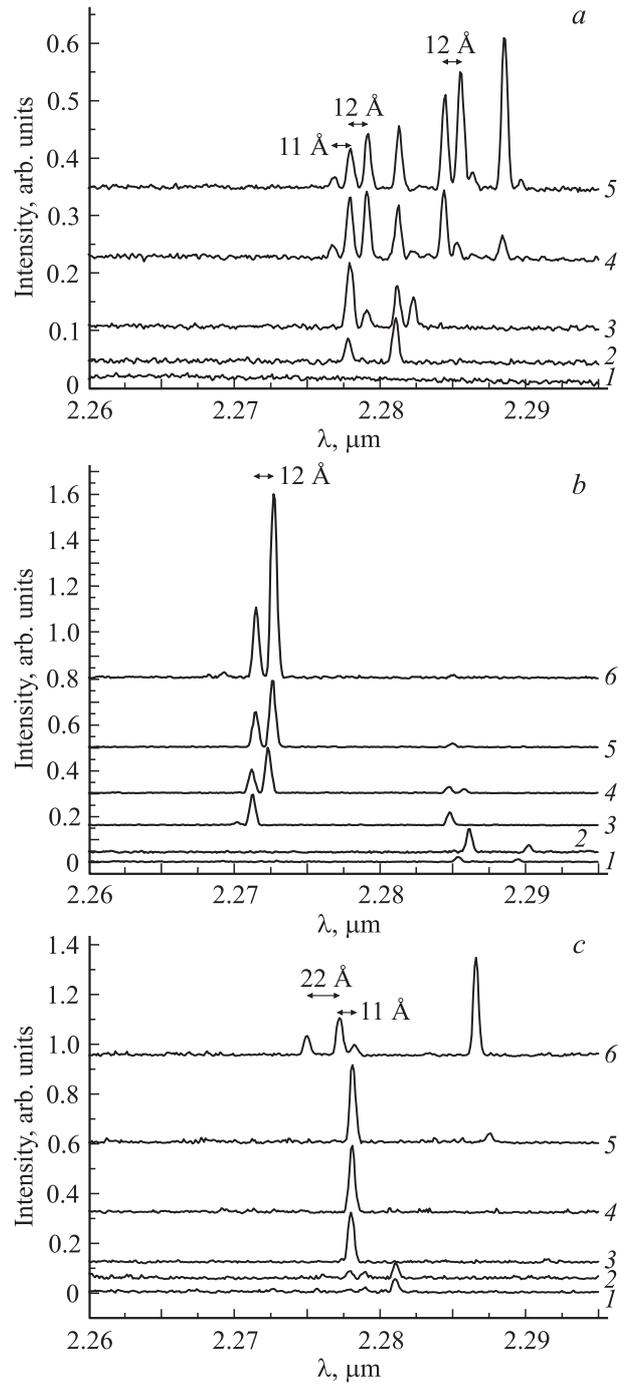


Рис. 4. Спектры излучения образца #115 при подаче тока только на первый лазер (*a*), на второй лазер (*b*) и на оба лазера сразу (*c*). Плотность тока накачки, $A \cdot cm^{-2}$: 1 — 160, 2 — 168, 3 — 175, 4 — 180, 5 — 191, 6 — 200. *c*: ток подавался на каждую мезу.

ров (рис. 3, *c*, кривая 5) с межмодовым расстоянием, в 2 раза меньшим (6 Å), чем у одиночного дискового лазера радиуса 200 мкм (12 Å).

Для ряда образцов сдвоенных WGM-лазеров с перемычкой наблюдался вход в иной режим генерации. Из рис. 4, *a* и *b* видно, что при подаче тока только на

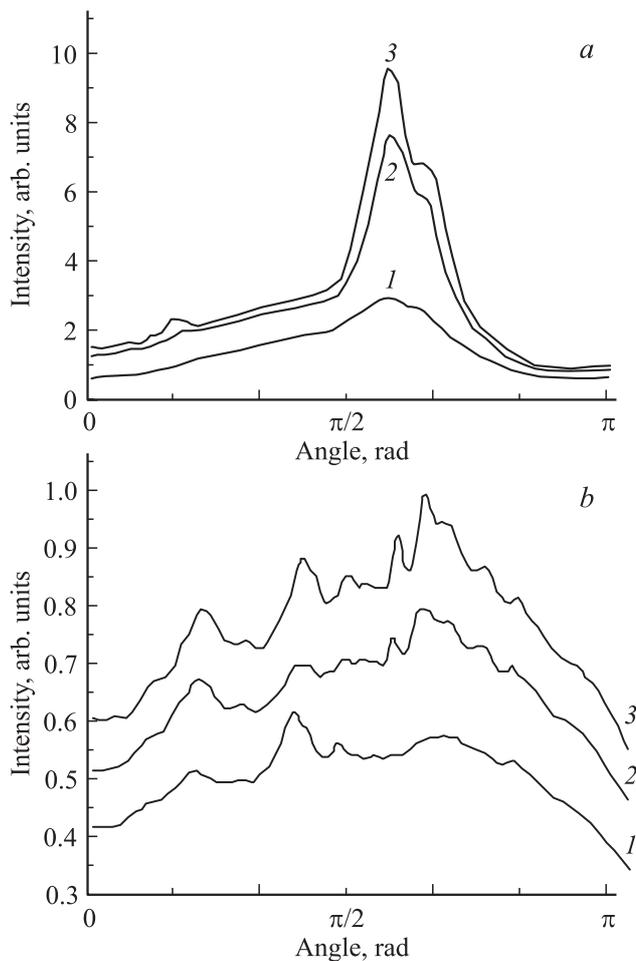


Рис. 5. Диаграммы направленности излучения в случае подачи электрического тока на обе мезы образцов #115 (*a*) при плотности тока 175 (1), 200 (2), 219 (3), 239 $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ (4) и #6 (*b*) при плотности тока 333 (1), 477 (2), 637 $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ (3). Измерения проводились в плоскости двух мез, углу 0 соответствует край второй мезы, углу π — край первой мезы, углу $\pi/2$ — вид на переемычку.

один из лазеров система генерирует характерный многомодовый спектр излучения (межмодовое расстояние 12 \AA для радиуса мезы 200 мкм). Однако при подаче тока на оба лазера сразу (рис. 4, *c*) система входит в одномодовый режим генерации в широком диапазоне плотностей токов накачки (175–191 $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$).

В ранее опубликованной работе [9] говорилось, что появление одномодового режима связано с эффектом затягивания частоты. Однако для затягивания частоты необходимо, чтобы и в одном, и в другом лазере было по одной моде, которые находились бы друг от друга на расстоянии, меньшем межмодового расстояния. Однако, как видно из рис. 4, *b*, у второй мезы отсутствуют моды, которые бы находились в данном диапазоне длин волн (рис. 4, *c*). Таким образом, здесь проявляется другой эффект. Можно предположить, что появление одномодового режима связано с возникновением одной высоко-

добротной коллективной моды, которая забирает на себя всю мощность. Существование такой моды невозможно при работе двух лазеров по отдельности, так как нерабочий лазер является поглощающей средой. При высоких токах накачки наблюдается срыв одномодового режима и переход в многомодовый режим генерации (см. рис. 4, *c*, кривая *b*).

На рис. 5 приведено сравнение диаграмм направленности излучения, характерного для образцов с переемычкой (рис. 5, *a*) и без нее (рис. 5, *b*) на примере образцов #115 и #6 соответственно (спектры излучения данных лазеров изображены на рис. 4 и 2). Видно, что для образцов с переемычкой характерно наличие направленного излучения, выходящего из переемычки. Образцы без переемычки, напротив, характеризуются более однородным пространственным распределением излучения. Такое различие в диаграммах вызвано тем, что переемычка в лазерных системах не только обеспечивает связь между резонаторами, но также дает возможность излучению свободно выходить из них, так как в этой области нарушается условие полного внутреннего отражения.

4. Заключение

Из полученных результатов следует, что в рассматриваемых сдвоенных дисковых лазерах излучение способно переходить из одного диска в другой, при этом формируются коллективные моды сдвоенных резонаторов. Межмодовое расстояние таких мод в 2 раза меньше, чем мод одиночных дисковых лазеров, что говорит об удлинении оптического пути таких мод. Поэтому можно утверждать, что такие моды распространяются в обоих лазерах одновременно. Также установлено, что образцы с переемычкой способны работать в одномодовом режиме генерации при подаче тока накачки на оба лазера сразу. Высказано предположение, что данный режим возникает в связи с появлением одной высокодобротной коллективной моды, которая берет на себя всю излучаемую мощность.

Диаграммы направленности показывают, что в случае образцов с переемычкой излучение стремится выходить именно в области переемычки, т.е. наблюдается направленность излучения. Напротив, в образцах без переемычки такой направленности не наблюдается.

Список литературы

- [1] A.B. Matsko, A.A. Savchenkov, D. Strekalov, V.S. Ilchenko, L. Maleki. IPN Progress Report, 42–162 (2005).
- [2] F. Vollmer, S. Arnold, D. Keng. Proc. National Academy Sci., **105**, 20701 (2008).
- [3] S.L. McCall, A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan. Appl. Phys. Lett., **60** (3), 289 (1992).
- [4] *Semiconductor lasers*, ed. by A. Baranov, E. Tournié (Woodhead Publishing Limited, 2013).
- [5] C. Schmidt, A. Chipouline, T. Käsebier, E.-B. Kley, A. Tünnermann, T. Pertsch. Phys. Rev. A, **80**, 043841 (2009).

- [6] S. Preu, H.G.L. Schwefel, S. Malzer, G.H. Dohler, L.J. Wang, M. Hanson, J.D. Zimmerman, A.C. Gossard. *Opt. Express*, **16**, 7336 (2008).
- [7] D.A. Yarekha, G. Glastre, A. Perona, Y. Rouillard, F. Genty, E.M. Skouri, G. Boissier, P. Grech, A. Joullie, C. Alibert, A.N. Baranov. *Electron. Lett.*, **36** (6), 537 (2000).
- [8] <http://www.ibsg.ru/>
- [9] A.A. Leonidov, V.V. Sherstnev, E.A. Grebenschikova, N.D. Il'inskaya, O.Yu. Serebrennikova, R. Teissier, A.N. Baranov, Yu.P. Yakovlev. *Techn. Phys. Lett.*, **41**, 801 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

Collective modes in coupled semiconductor disk lasers operation on whispering gallery modes

*M.A. Royz*¹, *A.N. Imenkov*¹, *A.N. Baranov*²,
*D.S. Burenina*¹, *A.A. Pivovarova*¹, *A.M. Monakhov*¹,
*E.A. Grebenschikova*¹, *Yu.P. Yakovlev*¹

¹ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

² Institut d'Electronique du Sud (IES),

Universite Montpellier 2,

CNRS, IES (UMR CNRS 5214),

34095 Montpellier, France

Abstract Coupled semiconductor disc lasers based on quantum heterostructure GaInAsSb/AlGaAsSb (wavelength $\lambda \approx 2.28 \mu\text{m}$) and operating on whispering gallery modes (WGM) have been fabricated and studied. Emission spectra and directional patterns of the coupled disc lasers with a conjunction between resonators and without it have been investigated. It is shown that these lasers generate collective modes with twice as small free spectral range as a single disc laser. This effect can be explained in terms of light propagation inside of both resonators at the same time.