

07:09

Синхронизация мод в лазере со связанными дисковыми резонаторами

© А.А. Леонидов¹, В.В. Шерстнев¹, Е.А. Гребенщикова¹,
Н.Д. Ильинская¹, О.Ю. Серебренникова¹, Р. Teissier²,
А.Н. Баранов², Ю.П. Яковлев¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

E-mail: v.sherstnev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2014 г.

Созданы и исследованы лазеры, работающие на модах шепчущей галереи, (whispering gallery mode — WGM) со сдвоенными оптически связанными дисковыми резонаторами и полукольцевыми контактами к ним, излучающие в среднем инфракрасном диапазоне (2.2–2.4 μm). Показано, что раздельное включение полукольцевых контактов WGM-лазера демонстрирует только многомодовый характер излучения, в то время как одновременное включение всех четырех контактов приводит к одномодовому режиму генерации. Обсуждаются механизмы синхронизации мод в созданных WGM-лазерах.

В последнее время резко возрос интерес к созданию и исследованию дисковых лазеров в ближней и средней ИК-области [1–4]. Появились работы по применению дисковых лазеров в нетрадиционных областях, например для контроля биологических объектов и идентификации штаммов вирусов [5].

Для детектирования ядовитых и взрывоопасных газов и жидкостей успешно применяется оптический метод, основанный на диодно-лазерной спектроскопии [6]. Для спектрометров высокого разрешения необходимы в качестве источников когерентного излучения одночастотные лазеры. Однако успешно разрабатываемые лазеры с резонатором Фабри–Перо и дисковые лазеры обладают, как правило, многомодовым спектром излучения.

Нами ранее были созданы и исследованы дисковые лазеры с резонатором в форме диска в средней ИК-области спектра (2.0–2.4 μm)

и исследован диапазон их частотной перестройки. Как оказалось, такие дисковые лазеры имеют ограниченный диапазон частотной перестройки ($\sim 30 \text{ \AA}$) [7], что резко сужает возможность их применения.

В работе [8] предложен новый подход к созданию дискового лазера с управляемым поглотителем с большим диапазоном частотной перестройки (соизмеримым с полушириной спектра спонтанного излучения $\sim 400 \text{ \AA}$), что важно для диодно-лазерной спектроскопии. Однако такая конструкция работает в многомодовом режиме генерации, что затрудняет применение перестраиваемых лазеров в диодно-лазерной спектроскопии.

В работе [9] были созданы и исследованы лазеры с двумя оптически связанными резонаторами. Такая конструкция позволила получить одномодовый режим излучения.

Цель данной работы — поиск конструкции дискового лазера, которая обеспечивала бы одномодовый режим генерации с частотной перестройкой. Для этого мы объединили идеи, заложенные в [8,9] и создали лазер с двумя оптически связанными резонаторами, каждый из которых содержал два полукольцевых контакта (управляемый поглотитель).

Резонаторы для исследуемых WGM-лазеров были сформированы из квантово-размерной гетероструктуры, выращенной на подложке $n\text{-GaSb}$ (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E. Активная область общей толщиной 800 nm состояла из двух напряженных квантовых ям состава $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$, каждая толщиной 10 nm , разделенных слоем 30 nm состава $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$. Волноводные слои, изготовленные из $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$, имели толщину по 375 nm . Активная область преднамеренно не легировалась. Волноводные слои были ограничены широкозонными слоями p - и $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ легированными соответственно Ве и Те толщиной по $1.2 \mu\text{m}$. С внешней стороны широкозонных слоев были выращены два тонких, по 100 nm варизонных слоя AlGaAsSb для улучшения инжекции носителей заряда в активную область. Верхний контактный слой GaSb p -типа проводимости имел толщину 300 nm и был легирован до концентрации дырок $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [10].

Из созданных структур методом фотолитографии и химического травления изготавливались лазерные чипы, в центре которых на расстоянии $5 \mu\text{m}$ друг от друга были расположены два резонатора в форме дисков диаметром $400 \mu\text{m}$ и высотой $15 \mu\text{m}$ (рис 1, а). Металлические

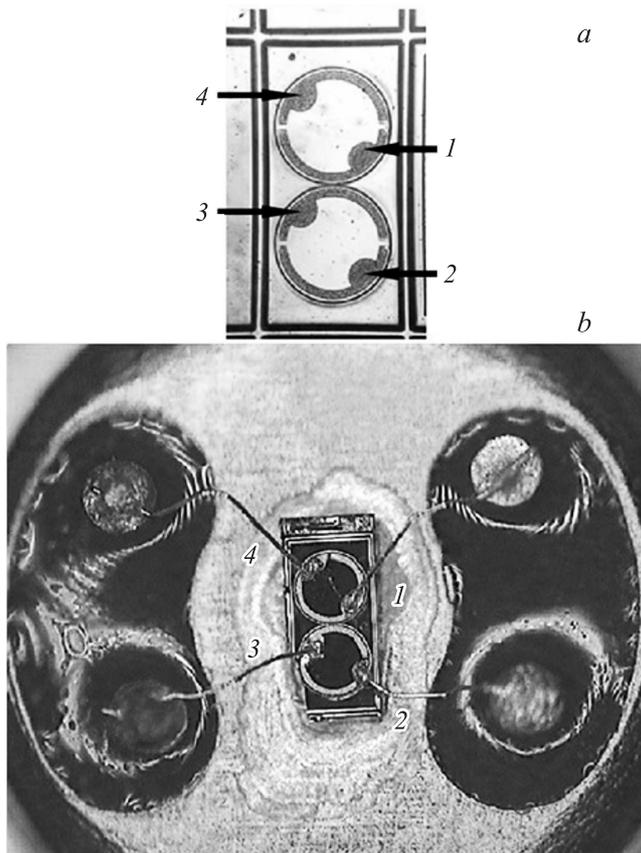


Рис. 1. Микрофотография лазерного чипа с нумерацией контактов (*a*) и микрофотография лазера в сборе (*b*).

контакты (Cr/Au(Zn)/Au) к *p*-слою и (Cr/Au(Te)/Au) к подложке *n*-GaSb создавались методом термического вакуумного напыления с использованием технологии взрывной фотолитографии. После напыления структура подвергалась термообработке в среде водорода для получения омического контакта. Верхние омические контакты (к *p*-слою) в виде кольца шириной $30\ \mu\text{m}$ располагались на плоской верхней поверхности

резонаторов и отстояли от края резонатора на $10\ \mu\text{m}$. Со стороны подложки наносился сплошной контакт. Чипы площадью $1000 \times 500\ \mu\text{m}^2$ с двумя дисковыми резонаторами в центре напаивали подложечной стороной на корпус ТО-18 с плоским столиком (рис. 1, *b*).

Измерения выполнялись на специально созданной для этого установке при пропускании различных токов и при использовании различных схем подключения контактов лазеров. Юстировка производилась при пропускании тока через все контакты, при этом дисковые резонаторы располагались таким образом, что плоскость щели спектрометра была перпендикулярна плоскости дисковых резонаторов и располагалась между дисками. Ширина как входной, так и выходной щели спектрометра была доведена до $5\ \mu\text{m}$, что позволило получить спектры с разрешением по длине волны $2\text{--}5\ \text{\AA}$. Измерения проводились в диапазоне токов от 70 до 370 мА.

Исследовались спектры излучения лазера со сдвоенными дисковыми резонаторами при включении каждого из четырех полукольцевых контактов отдельно (рис. 2, *a-d*), а также при включении всех контактов одновременно (рис. 2, *e*).

Характерно, что включение контактов отдельно показало многомодовый режим генерации во всем исследованном диапазоне токов от 70 до 370 мА. В то же время включение одновременно всех четырех полукольцевых контактов дисковых резонаторов показало одномодовый режим генерации излучения, что свидетельствует о синхронизации мод в лазере со связанными дисковыми резонаторами.

Рассмотрим, какие факторы могут приводить к синхронизации мод в лазере со связанными дисковыми резонаторами.

В работах [11,12] приведены результаты расчета интенсивности излучения, выходящего за пределы дискового резонатора и направленного в плоскости диска, из которых видно, что пик интенсивности электромагнитного поля находится вблизи края мезы, а ее „хвост“ выходит за пределы резонатора. Можно предположить, что именно это оказывает влияние на синхронизацию мод и приводит к одномодовому режиму излучения, поскольку в работе [9] приведены результаты, согласно которым оптическая связь между двумя резонаторами на одной подложке имеет место при расстоянии между резонаторами не более 4λ (т.е. $10\ \mu\text{m}$ для обсуждаемой в данной работе системы).

Другой возможной причиной синхронизации мод является расположение двух связанных дисковых резонаторов на одной монокристаллической подложке GaSb. Излучение от одного резонатора частично

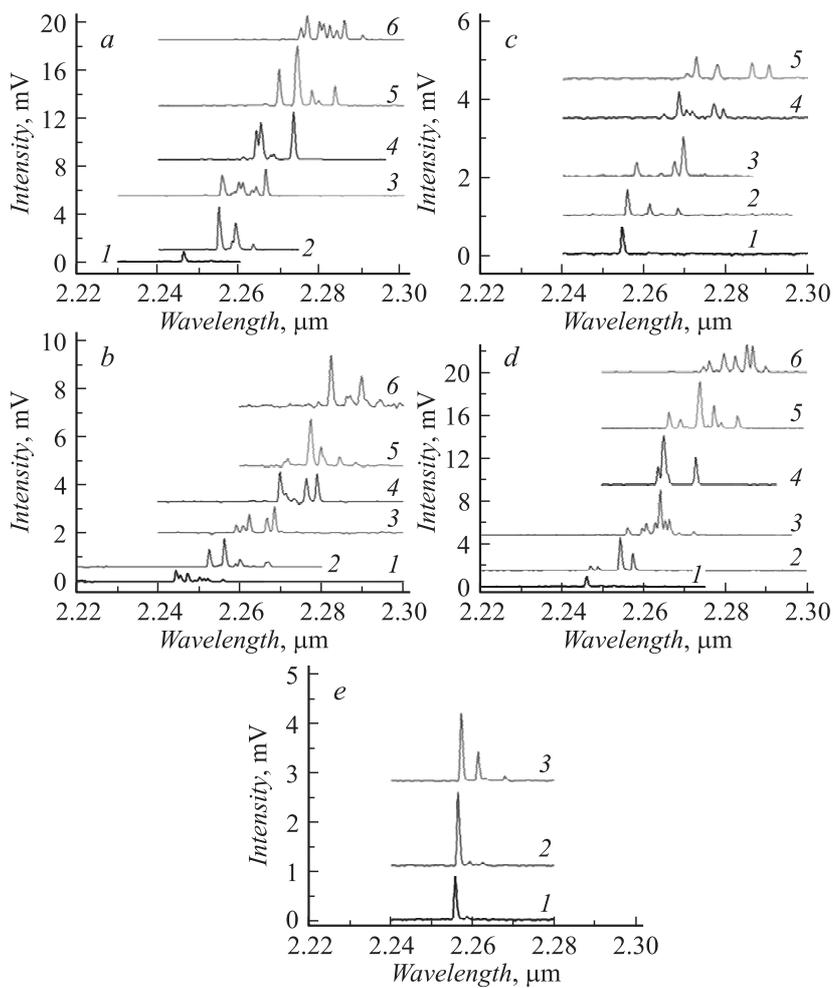


Рис. 2. Спектр излучения лазера при включении полукольцевых контактов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c) и № 4 (d) в отдельности и при совместном включении всех полукольцевых контактов (e). Линии соответствуют токам: 1 — 100 мА, 2 — 130 мА, 3 — 160 мА, 4 — 190 мА, 5 — 220 мА и 6 — 250 мА. Приведенные спектры получены для лазера V1079SN#112 при температуре 293 К, частоте импульсов 500 Hz, скважности 2 и ширине щелей монохроматора $100 \times 100 \mu\text{m}$.

выходит за пределы диска, а частично проникает в глубь монокристалла (тем более что энергия излучаемого фотона ($h\nu \sim 0.5 \text{ eV}$) существенно меньше ширины запрещенной зоны GaSb ($E_g \sim 0.72 \text{ eV}$)), отражается от металлизированной стороны подложки и попадает в другой дисковый резонатор, способствуя синхронизации мод, что приводит к работе лазера в одномодовом режиме генерации.

Исследование WGM-лазеров с оптически связанными дисковыми резонаторами показало, что при отдельном включении каждого из четырех контактов, позволяющем получить многомодовый режим генерации, возможен вход в режим синхронизации с выделением одной моды генерируемого излучения при подаче напряжения на все полукольцевые контакты лазера одновременно (при величине тока до 160 mA).

Наиболее вероятной причиной синхронизации можно считать отражение излучения от подложки и попадание его в парный резонатор. Это предположение имеет право на существование, поскольку ширина запрещенной зоны материала подложки ($E_g(\text{GaSb}) \sim 0.72 \text{ eV}$) больше энергии излучаемого фотона ($h\nu \sim 0.5 \text{ eV}$), следовательно излучение не будет поглощаться подложкой.

Таким образом, в данной статье представлены результаты исследования по созданию лазера с одночастотной генерацией — это первый этап работы. Создание одночастотного широкоперестраиваемого лазера, излучающего в среднем инфракрасном диапазоне, — это второй этап работы, который будет представлен в следующей нашей публикации.

Авторы благодарят А.М. Монахова за полезные обсуждения работы.

Работа частично поддержана программой № 81 „Физика и технология полупроводниковых наногетероструктур и приборов на их основе“ и частично поддержана программами президиума РАН № 1 и 7, а также государственным контрактом № 11705.004.11.001.

Список литературы

- [1] Жуков А.Е., Крыжановская Н.В., Максимов М.В., Липовский А.А., Савельев А.В., Шостак И.И., Моисеев Э.И., Кудашова Ю.В., Кулагина М.М., Трошков С.И. // ФТП. 2015. Т. 49. В. 5. С. 688–692.
- [2] Doolin C., Doolin P., Lewis B.C., Davis J.P. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 081 104.
- [3] Голубничая Г.В., Кириченко А.Я., Кривенко Е.В., Луценко В.И. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 6. С. 50–57.

- [4] *Zhi Y, Meldrum A* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 031 902.
- [5] *Lei Huang, Zhixiong Guo* // Biomicrofluidics. 2011. V. 5. P. 034 114.
- [6] *Надеждинский А.И.* // 10-й Общероссийский семинар по диодной лазерной спектроскопии им. А.М. Прохорова (ДЛС-10). 2008.
<http://www.dls.gpi.ru/rus/sem/10/Nad.pdf>
- [7] *Sherstnev V.V., Imenkov A.N., Astakhova A.P., Sipovskaya M.A., Grebenshchikova E.A., Kizhaev S.S., Baranov A.N., Yakovlev Yu.P.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 38. В. 8. С. 7.
- [8] *Baranov A.N., Boissier G., Teissier R., Monakhov A.M., Sherstnev V.V., Larchenkov M.I., Yakovlev Yu.P.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 061 112.
- [9] *Гребеницкова Е.А., Шерстнев В.В., Ларченков М.И., Серебренникова О.Ю., Ильинская Н.Д., Монахов А.М., Teissier R., Баранов А.Н., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 7. С. 7.
- [10] *Yarekha D.A., Glastre G., Perona A., Rouillard Y., Genty F., Skouri E.M., Boissier G., Grech P., Joullie A., Alibert C., Baranov A.N.* // Electron. Lett. 2000. V. 36 (6). P. 537.
- [11] *Matsko A.B., Savchenkov A.A., Strekalov D., Ilchenko V.S., Maleki L.* // PN Progress Report. 42–162. August 15, 2005.
- [12] *Wen Lei, Chennupati Jagadish* // J. Phys. 2008. V. 104. P. 091 101.