

Высококогерентный инжекционный лазер с оптической обратной связью через микрорезонатор с модами типа «шепчущей галереи»

В.В.Васильев, В.Л.Величанский, М.Л.Городецкий*, В.С.Ильченко*, Л.Хольберг**, А.В.Яровицкий

Реализовано сужение линии генерации инжекционного лазера с помощью внешнего высокодобротного микрорезонатора, представляющего собой кварцевый шарик диаметром 370 мкм. Ввод-вывод излучения и согласование с модой типа «шепчущей галереи» шарика осуществлялись методом нарушенного полного внутреннего отражения, а оптическая обратная связь формировалась за счет релеевского рассеяния. Ширина спектров биений исследуемого и опорного лазеров не превышала 100 кГц.

В последние годы область применения инжекционных лазеров (ИЛ) значительно расширилась благодаря развитию методов сужения линии генерации. Одним из наиболее эффективных является метод с использованием оптической обратной связи (ООС). Известны две его модификации, дающие примерно одинаковое сужение спектра излучения: увеличение добротности резонатора за счет увеличения его длины практически без изменения числа проходов (сильная (~ 0.1) связь с внешним отражателем или дифракционной решеткой) [1] и использование слабой (на уровне 10^{-4}) связи с внешним высокодобротным (многопроходным) резонатором. В последнем случае для этих целей применялся конфокальный [2] или кольцевой волоконный [3] интерферометр. К сожалению, увеличение когерентности сопровождается потерей компактности и повышением чувствительности к механическим возмущениям.

В данной работе исследован новый вариант внешнего высокодобротного резонатора – кварцевая микросфера, в которой возбуждаются моды типа мод «шепчущей галереи». Свойства таких микрорезонаторов (МР), характеризующихся высокой добротностью и компактностью, описаны в [4]. Ввод и вывод излучения в МР осуществлялся согласующей призмой методом нарушенного полного внутреннего отражения. Диаметр кварцевой сферы $D = 370$ мкм, а область свободной дисперсии $\Delta\nu = c/\pi Dn = 170$ ГГц, где $n = 1.4$ – показатель преломления кварца. Юстировочное устройство позволяло менять зазор между согласующей призмой и сферой и тем самым уровень связи с «шепчущей модой» (ШМ). Внутренние распределенные потери ШМ очень малы, и ее добротность сильно зависит от уровня связи. При достаточно малом уровне связи, когда ширина ШМ (измеренная независимым опорным лазером) переставала от него зависеть, добротность составляла $\sim 10^9$.

Схема оптической части установки (рис.1) включала в себя инжекционный лазер (ИЛ) LT024MDO фирмы

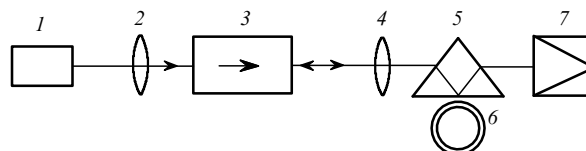


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – инжекционный лазер; 2 – коллимирующий объектив; 3 – оптическая развязка; 4 – фокусирующий объектив; 5 – призма ввода; 6 – микрорезонатор с модами типа «шепчущей галереи»; 7 – фотодиод.

«Шарп» ($\lambda = 780$ нм, выходная мощность 20 мВт), коллимирующий объектив ($N_A = 0.5$), оптическую развязку с регулируемой степенью подавления обратной волны (максимум 30 дБ), фокусирующий объектив ($N_A = 0.4$), согласующую призму, МР и фотоприемник. При максимальном подавлении обратной связи ИЛ работает автономно, на собственном резонаторе; при этом модуляция тока обеспечивает перестройку частоты излучения. В таком режиме наблюдался резонанс ШМ (рис.2). Ширина резонанса, не возмущенного ООС, в основном определяется шириной спектра ИЛ и в нашем случае составила ~ 20 МГц. Внутри кварцевой микросферы за счет релеевского рассеяния формируется волна, распространяющаяся в обратном направлении [5, 6]. На рис.2 кривая 1 соответствует случаю, когда обратная волна блокируется развязкой. При уменьшении подавления развязкой (при повороте одного из поляризаторов) обратная волна по-

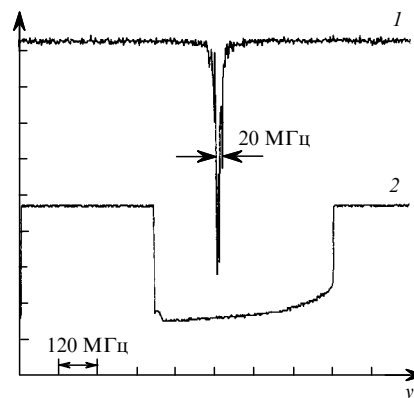


Рис.2. Демонстрация оптического захвата инжекционного лазера по моде «шепчущей галереи»: резонанс МР с ШМ, не возмущенный ООС (1), и затягивание частоты ИЛ резонансной ООС (2).

Физический институт им.П.Н.Лебедева, Москва

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

**Национальный институт стандартов и технологий, Боулдер, 80303 Колорадо, США

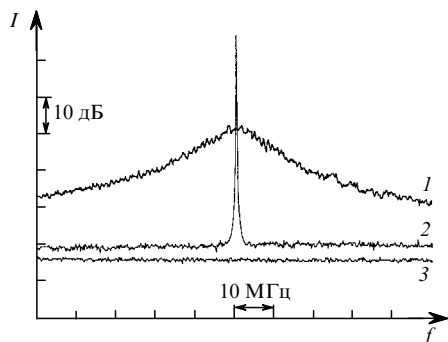


Рис.3. Спектры биений опорного и исследуемого лазеров в отсутствие ООС (1) и при наличии ООС (2), а также сигнал на фотоприемнике в отсутствие света (шум аппаратуры) (3) при разрешении $\Delta f = 100$ кГц, времени записи 0.5 с и видеофильтре с полосой 300 Гц.

падает в лазер и возникает захват частоты (рис.2, кривая 2). Измерения с помощью независимого опорного лазера с внешним резонатором ширины линии ШМ при связи, соответствующей захвату (рис.2, кривая 2), дали ~ 4 МГц. Сравнение кривых 1 и 2 дает для отношения скоростей перестройки частоты излучения при изменении тока накачки без внешней связи к скорости перестройки в режиме захвата $S = (dv_0/dI) / (dv_{ext}/dI) \geq 100$. В предположении, что фазовые шумы, определяющие ширину спектра генерации, равномерно распределены по частотам, ширина спектра должна уменьшаться при этом более чем в $(1 + S)^2$ раз, т. е. не превышать 2 кГц.

Для устойчивости режима захвата расстояние между лазером и МР стабилизировалось с помощью дополнительного зеркала на пьезокерамике [2] (на рис.1 не показано), что позволяло проводить прямое измерение ширины спектра гетеродинным методом. В качестве гетеродина служил опорный лазер с внешним резонатором. На рис.3 показаны спектры биений в отсутствие ООС и при оптимальной связи с МР. Сравнение двух спектров показывает, что ширина спектра генерации лазера с внешним МР уменьшается более чем на два порядка и не превышает 100 кГц. Измерения проводились без специальной защиты от вибраций и акустических возмущений, поэтому спектр биений дополнительно уширен техническими шумами. Для их подавления были проведены гетеродинные измерения ширины спектра генерации двух лазеров,

независимо захваченных по двум ортогональным ШМ микросферы. Согласование осуществлялось через одну и ту же призму. В этом случае часть технических шумов оказывалась скоррелированной, и ширина спектра биений составляла 20 кГц, что уже достаточно близко к приведенной выше оценке.

В представленной схеме эксперимента не предпринимались попытки использования компактности МР для уменьшения габаритов всей системы. Проблемы создания миниатюрных лазеров с шириной линии порядка 1 кГц, а также подробное описание экспериментов, включающее описание опорного лазера с двумя петлями ООС, спектра мод МР, схемы захвата двух лазеров по ШМ, будут рассмотрены позднее.

Таким образом, резонансная ООС от МР с модами «шепчущей галереи» является эффективным способом сужения линии инжекционного лазера и стабилизации частоты излучения.

Данная работа выполнена при поддержке Международного фонда Сороса (грант № MQR300).

1. Беленов Э.М., Величанский В.Л., Зибров А.С., Никитин В.В., Саутенков В.А., Усков А.В. *Квантовая электроника*, **10**, 1232 (1983).
2. Dahmani B., Hollberg L., Drullinger R. *Optics Letts*, **12**, 876 (1987); Laurent P., Clairon A., Breant C. *IEEE J. Quantum Electron*, **25**, 1131 (1989).
3. Булушев А.Г., Дианов Е.М., Кузнецов А.В., Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **16**, 733 (1989).
4. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. *Phys.Letts A*, **137**, 393 (1989).
5. Ilchenko V.S., Gorodetsky M.L. *Laser Phys.*, **2**, 1004 (1992).
6. Weiss D.S., Sandoghdar V., Hare J. et al. *Optics Letts*, **20**, 1835 (1995).

V.V.Vasil'ev, V.L.Velichansky, M.L.Gorodetsky, V.S.Ilchenko, L.Hollberg, A.V.Yarovitsky. **High-coherence diode laser with optical feedback via a microcavity with 'whispering gallery' modes.**

Narrowing of the linewidth of a diode laser was achieved by an external high- Q microcavity, which was a fused silica sphere 370 μm in diameter. Coupling of the radiation in and out, and matching to a 'whispering gallery' mode of this sphere, were ensured by the method of frustrated total internal reflection. Optical feedback was provided by the Rayleigh scattering. The width of the beat-note spectra of the investigated and reference lasers did not exceed 100 kHz.