

**А. М. Акульшин, Н. Г. Басов, В. Л. Величанский, А. С. Зибров, М. В. Зверков,
В. В. Никитин, О. Г. Охотников, Н. В. Сенков, В. А. Саутенков,
Д. А. Тюриков, Е. К. Юркин**

ГЕТЕРОДИННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЛИНИИ ГЕНЕРАЦИИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ В РЕЖИМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ БИЕНИЙ

При захвате с помощью сервосистемы частоты биений инжекционных лазеров, работающих в условиях автостабилизации одночастотного режима генерации с аномально большим диапазоном плавной перестройки, зарегистрирована ширина спектра биений ~ 500 Гц.

В [1] предложено и реализовано сужение ширины линии генерации инжекционного лазера (ИЛ) с помощью внешнего резонатора. Измерения проводились методом гетеродинного смешения излучения двух ИЛ одного типа. Этим же методом получены ширины линии генерации лазеров с внешним резонатором (ЛВР) порядка 15—50 кГц [2]. Однако в [1, 2] лазеры работали в режиме свободной генерации и точность измерений ограничивалась флюктуациями разностной частоты. В настоящей работе ширина линии ЛВР измеряется в режиме стабилизации частоты биений.

Установка. Все элементы двух ЛВР были идентичны, размещались на ситалловых платах и включали ИЛ, работавшие при 300 К, согласующие объективы с числовой апертурой 0,65 и фокусным расстоянием 6,2 мм, поворотные зеркала на пьезокерамике и hologрафические селекторы. Аналогичная схема описана в [3]. Для увеличения пределов перестройки селектором одно зеркало ИЛ просветлялось. Из-за неполного просветления генерация была возможна только при совпадении полосы селектора и моды ИЛ. Для сплошного перекрытия спектра положение мод регулировалось температурой хладопровода. Частоты лазеров сводились с помощью дифракционной решетки и двух сканирующих интерферометров с областями дисперсии 40 и 1,5 ГГц. Методика согласования волновых фронтов и детали установки описаны в [1].

Излучения ЛВР смешивались на лавинном фотодиоде, сигнал с которого поступал на анализатор спектра С4-27 или С4-12 и на блок АПЧ. Частота биений в режиме захвата определялась частотой опорного генератора АПЧ и могла меняться в пределах 6—20 МГц. Частота следящего ЛВР регулировалась по двум каналам: изменением напряжения на пьезокерамике, т. е. изменением длины внешней части резонатора (полоса 1,5 кГц) и изменением тока инжекции (полоса 20 кГц).

Режим работы лазеров. Для управления частотой очень удобен режим «автостабилизации» одночастотной генерации, поскольку он отличается повышенной устойчивостью к возбуждению соседних мод [4] и, как оказалось, значительно увеличивает интервал непрерывной перестройки частоты генерации как в случае изменения длины внешней части резонатора, так и при модуляции оптической длины ИЛ. Использовались ИЛ с обычным полосковым контактом и лазеры с волноводом, нагруженным мезаструктурой. Признаком одночастотного режима является резкая асимметрия характеристики [5], наблюдаемая при перестройке моды резонатора ИЛ по контуру селектора (рис. 1, а), а особенностью режима автостабилизации является отсутствие ступенчатой структуры [4] и аномально большая перестройка.

Область непрерывной перестройки оценивалась с помощью интерферометров (рис. 1, б, в). Нижняя осциллограмма на рис. 1, б подтверждает непрерывность перестройки частоты в широком диапазоне при изменении длины внешней части (перескоки мод привели бы к разрывам кривой), а верхняя — позволяет измерить интервал перестройки. Максимальная девиация частоты при изменении длины внешней части составляла 2 ГГц при длине внешнего резонатора $L=60$ см, что в восемь раз больше диапазона перестройки в обычном режиме (250 МГц). Соответствующая величина при пере-

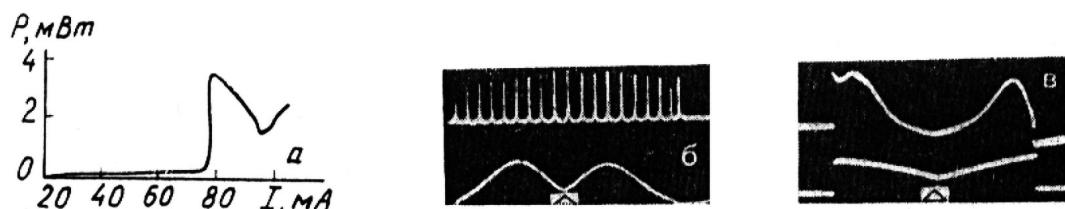


Рис. 1. Ватт-амперная характеристика ЛВР (а), резонансы пропускания интерферометров с аппаратными ширинами 16 МГц (вверху) и 1,2 ГГц (внизу), прописанные ЛВР при изменении длины внешней части (б) и зависимости пропускания интерферометра с аппаратной шириной 30 МГц (вверху) и мощности генерации (внизу) от тока (в)

Длина резонатора и ток модулируются по пилообразному закону, стрелка указывает вершину пилы

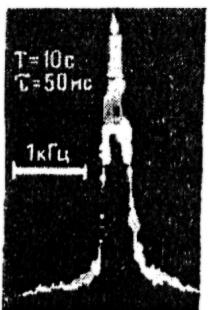


Рис. 2. Спектр сигнала биений в режиме взаимной привязки частот двух ЛВР (мощность генерации ~ 3 мВт). Канал обратной связи с пьезокерамикой включен, управление по току максимальное
Частота сигнала биений 6 МГц, длительность развертки 10 с, постоянная времени интегрирования 50 мс

стройке током составляла 60 МГц, что превышает область нормальной перестройки почти на два порядка.

Резонанс пропускания интерферометра (верхняя осциллограмма рис. 1, б), прописанный при изменении тока ЛВР, демонстрирует непрерывность перестройки частоты. Полный интервал перестройки в этом случае оценивался по ширине резонанса интерферометра. Смена знака перестройки, происходящая после резкого включения генерации (ватт-амперная характеристика приведена в нижней части рис. 1, б), связана с нестационарным охлаждением из-за соответствующего скачкообразного уменьшения мощности, рассеиваемой в активной области, которое постепенно сменяется ростом температуры из-за увеличения тока.

Спектр биений. Регистрация спектра биений с высоким разрешением без захвата частоты практически невозможна. При стабилизации частоты с помощью первого канала сигнал биений устойчиво наблюдался на экране анализатора в течение 10—100 минут (в зависимости от дрейфа температуры в комнате). Ширина спектра биений в таком режиме для десяти пар лазеров лежала в пределах 20—200 кГц. Расширение полосы при включении второго канала сужает спектр биений. Минимальная ширина спектра по уровню 0,5 составила 500 Гц (рис. 2). Спектр зарегистрирован на анализаторе С4-12 с разрешением 30 Гц.

Обсуждение. Согласно [6] ширина линии ЛВР $\Gamma = \Gamma'_0 \chi^2 + \Gamma''_0 \chi$ где Γ'_0 — вклад спонтанного шума; Γ''_0 — вклад флюктуаций числа электронов в активной области в ширину линии ИЛ при отсутствии внешнего резонатора; $\chi = Q_0/Qk$; Q , Q_0 — добротности внешнего и собственного резонаторов соответственно; k — коэффициент связи резонаторов по мощности. Приведенное выражение справедливо для одночастотного режима, если оба механизма уширения статистически независимы и приводят к лоренцевскому контуру линии (Γ , Γ'_0 и Γ''_0 — полные ширины) и если вклад технических флюктуаций пренебрежимо мал. Использовавшиеся ИЛ без внешнего резонатора работали в многомодовом режиме, так что прямое определение Γ'_0 и Γ''_0 было невозможно. Для оценки порядка величины χ воспользуемся экспериментальными значениями $\Gamma'_0 = 20$ МГц и $\Gamma''_0 = 2$ МГц [7], полученными для одночастотного режима (разумно предположить, что при генерации на выделенном типе колебаний ЛВР механизмы уширения, связанные с многомодостью, подавляются). При выборе оценочных значений Γ'_0 и Γ''_0 учтены незначительные поправки, связанные с различием параметров ИЛ. Величины Q , Q_0 определяются длинами резонаторов и примерно равны между собой потерями на зеркалах, так что $Q/Q_0 = L/n'l = 6 \cdot 10^2$ (n' — эффективный показатель преломления материала ИЛ; l — длина резонатора ИЛ). Тогда, полагая $k = 0,1 - 0,3$, имеем $\Gamma'_0 \chi^2 = 5 - 0,5$ кГц; $\Gamma''_0 \chi = 30 - 10$ кГц. Видно, что сумма этих величин заметно превышает экспериментальную ширину линии. Возможно, что вклад второго типа возмущений уменьшается за счет автоподстройки. Для дальнейшего сужения линии необходимо увеличить длину резонатора или эффективное число проходов в нем [7].

Отметим в заключение, что если внешние резонаторы сужают спектры каждого из лазеров, то электронная автоподстройка в описанном эксперименте устраняет лишь флюктуации разностной частоты. В действительности спектры ЛВР уширены из-за технических низкочастотных флюктуаций несущих. Важно, однако, что для разработанных схем ЛВР и управляющих элементов эти возмущения можно устраниć при стабилизации частоты по атомной линии или добротному резонатору. В настоящее время осуществляется стабилизация частоты двух ЛВР по соседним модам конфокального интерферометра с межмодовым интервалом 240 МГц.

Выводы. Реализованная методика позволяет устранять технические флюктуации в спектре биений ИЛ и получить рекордно малую ширину спектра биений ЛВР ~ 500 Гц. Впервые измерены перестроочные характеристики ЛВР в режиме автостабилизации. Стабилизация частоты биений ЛВР в сочетании со стабилизацией по атомным линиям и добротным интерферометрам, открывает возможности применения ЛВР в прецизионной спектроскопии сверхвысокого разрешения.

1. В. Л. Величанский и др. *Письма ЖТФ*, 4, 1087 (1978).
2. В. Ю. Баженов и др. *Квантовая электроника*, 7, 2642 (1980).
- S. Saito, Y. Yamamoto. *Electron. Letts.*, 17, 325 (1981); A. Mooradian et al. *Intern. Conf. on Laser Spectroscopy*, 1982, p. 68.

3. А. С. Зибров и др. *Квантовая электроника*, 9, 804 (1982).
4. V. Yu. Bazhenov et al. *Proc. IEEE*, 72, 77 (1982).
5. В. Л. Величанский и др. *Квантовая электроника*, 8, 1925 (1981).
6. Э. М. Беленов и др. *Квантовая электроника*, 10, 1232 (1983).
7. D. Welford, A. Mooradian. *Appl. Phys. Letts*, 40, 560 (1982).

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН ССР, Москва

Поступило в редакцию
24 марта 1983 г.

A. M. Akul'shin, N. G. Basov, V. L. Velichanskiy, A. S. Zibrov, M. V. Zverkov, V. V. Nikitin, O. G. Okhotnikov, N. V. Sennikov, V. A. Sautenkov, D. A. Tyurikov, E. K. Yurkin. **Heterodyne Measurement of the Width of the Injection Laser Emission Line Under Beat Frequency Stabilization.**

Under trapping (with the use of a servo system) of a frequency of beats of injection lasers operating under conditions of self-stabilization of the single-frequency stimulated emission with an anomalously wide range of continuous tuning the beat spectrum width of ~ 500 Hz has been recorded.