

Диодный лазер с активной синхронизацией мод со стабильностью межмодовой частоты $\sim 6 \times 10^{-14}$

В.Ф.Захарьяш, А.В.Каширский, В.М.Клементьев

Сообщаются результаты исследования стабильности межмодовой частоты в полупроводниковом лазере с внешним резонатором, работающим в режиме активной синхронизации мод. Показано, что в этом режиме при наличии эффекта затягивания межмодовой частоты к частоте внешнего высокостабильного СВЧ сигнала, формируемого от водородного стандарта (стабильность 4×10^{-14} за время усреднения $\tau = 10$ с), достигается стабильность межмодовой частоты 5.92×10^{-14} ($\tau = 10$ с).

Ключевые слова: диодный лазер, активная синхронизация мод, спектр биений, стабильность межмодовой частоты.

В ряде статей [1–11] исследуется работа многомодовых полупроводниковых лазеров с внешним резонатором (ПЛВР), которые являются удобным инструментом для изучения многих физических процессов в лазерном диоде. В работе [8] исследовалось влияние частоты СВЧ накачки f_{mw} на спектры межмодовых биений ПЛВР f_{im} . Показано, что при накачке на частоте $f_{mw} \approx 2f_{im}$ имеет место эффект затягивания межмодовой частоты. В настоящей работе приводятся результаты дальнейших экспериментов, связанных с использованием этого эффекта для стабилизации межмодовой частоты. Существенно усовершенствованная экспериментальная установка позволила измерять стабильность частот с точностью $\sim 10^{-14}$.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Для упрощения схемы была выбрана межмодовая частота, равная 150 МГц (длина резонатора ~ 1 м), с тем чтобы накачку ПЛВР производить на частоте $f_{mw} \approx 300$ МГц. Как и ранее в [8], применялась СВЧ модуляция на удвоенной межмодовой частоте, которая позволяет избежать перекрытия СВЧ частоты f_{mw} с межмодовыми биениями на частоте f_{im} и, следовательно, избежать паразитного влияния f_{mw} на результат измерения параметров межмодовой частоты. Длина внешнего резонатора подобрана таким образом, чтобы значение $f_{mw}/2$ попадало в диапазон, в котором ширина спектра межмодовых биений минимальна [8]. Использовался полупроводниковый лазер ИЛПН-820-100 с коэффициентом отражения передней грани $\sim 3\%$ и порогом генерации ~ 40 мА.

Сигнал на частоте 100 МГц от водородного (H) стандарта 1 (стабильность 4×10^{-14} за время усреднения $\tau = 10$ с и 1×10^{-14} за $\tau = 100$ с) умножается до частоты 300 МГц (блок 2) и подается через СВЧ усилитель мощности 5 на полупроводниковый лазер 9 через емкостную развязку (источник тока накачки лазера стандартный и не показан). С H-стандарта также подается высокостабильный сигнал

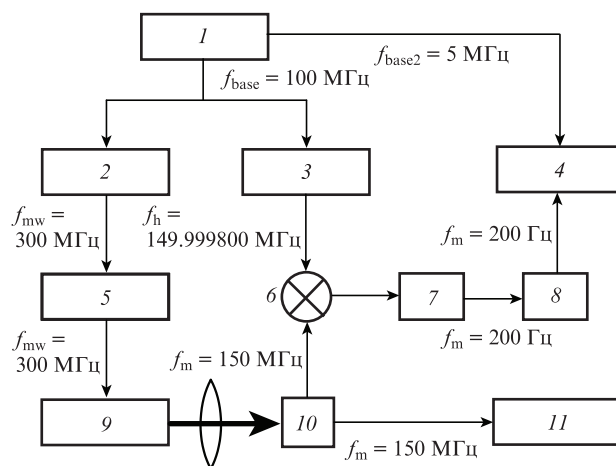


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – водородный стандарт частоты; 2 – умножитель; 3 – синтезатор частоты; 4 – частотомер; 5 – СВЧ усилитель мощности; 6 – смеситель; 7 – ФНЧ; 8 – усилитель-ограничитель; 9 – ПЛВР; 10 – фотоприемник; 11 – анализатор спектра.

(5 МГц) на частотомер 4 с целью синхронизации его собственной базы времени с базой времени сигнала СВЧ накачки. Излучение ПЛВР фокусируется на фотоприемник 10, далее сигнал поступает на анализатор спектра 11 и смеситель 6, на который также приходит высокостабильный сигнал синтезатора частоты 3 ($f_n = 149999800$ Гц). Затем сигнал направляется на фильтр низких частот (ФНЧ) 7, где выделяется сигнал с частотой $f_m = 200$ Гц. Далее низкочастотный сигнал поступает на усилитель-ограничитель 8 и частотомер 4.

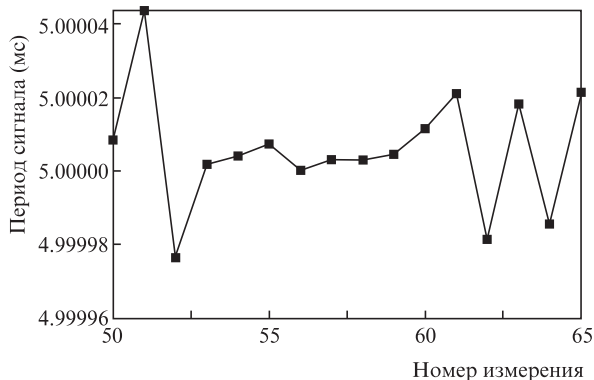
В эксперименте измерялся период сигнала ($f_m = 200$ Гц) при временах усреднения $\tau = 10$ и 100 с. Количество измерений N для каждого значения τ составило 100 и 40 соответственно. Результаты эксперимента приведены в табл.1, из которой следует, что при $\tau = 10$ с среднеквадратичное отклонение (СКО) от среднего значения межмодовой частоты составляет 8.889×10^{-6} Гц. Детальный анализ выборки ($N = 100$) показывает, что она состоит из чередую-

В.Ф.Захарьяш, А.В.Каширский, В.М.Клементьев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: valera@laser.nsc.ru, kavg@ngs.ru

Поступила в редакцию 11 сентября 2014 г., после доработки – 9 февраля 2015 г.

Табл.1. Зависимость стабильности частоты от времени.

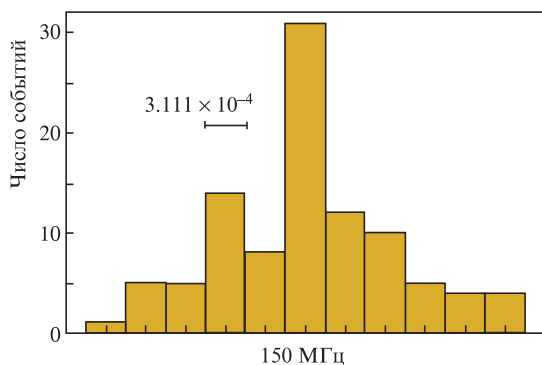
Среднее значение частоты (Гц)	СКО от среднего значения сигнала с $f_m = 200$ Гц (Гц)	Время усреднения (с)	Количество измерений	Стабильность
1.5×10^8	8.889×10^{-6}	10	100	5.928×10^{-14}
1.5×10^8	8.602×10^{-5}	100	40	6.807×10^{-13}
1.5×10^8	8.025×10^{-6}	10	7	5.35×10^{-14}

Рис.2. Временной разброс периода измеряемого частотомером сигнала (200 Гц, $\tau = 10$ с) в пределах участков измерений внутри экспериментальной выборки.

щихся участков измерений, для которых значение СКО меняется (рис.2). Такие последовательности состоят из нескольких (5 – 7) идущих подряд измерений, при которых СКО составляет 8.025×10^{-6} Гц (см. табл.1). Стабильность на таких промежутках достигает 5.355×10^{-14} .

Сравнение стабильности частоты за $\tau = 10$ и 100 с показывает, что при увеличении τ стабильность межмодовой частоты падает, тогда как стабильность задающего Н-стандарта возрастает с 4×10^{-14} при $\tau = 10$ с до 10^{-14} при $\tau = 100$ с. Причиной этого, возможно, является слабая расстройка внешнего резонатора в диапазоне затягивания частот (± 2 МГц [8]), что приводит к появлению систематической ошибки и, как следствие, к ухудшению условий синхронизации мод (нарушению постоянства амплитуды). В пользу этого вывода говорит наличие асимметрии гистограммы (рис.3), на которой показано распределение значений межмодовой частоты относительно центрального значения 150 МГц.

Обсудим кратко некоторые особенности работы ПЛВР, проявившиеся в процессе экспериментов. Прежде всего, в трехзеркальной системе лазера, при определенных условиях [8], устанавливается многомодовый режим.

Рис.3. Гистограмма распределений значений межмодовой частоты f_{im} относительно центральной частоты 150 МГц ($N = 100$, $\tau = 10$ с).

При этом из-за значительной нелинейности показателя преломления полупроводника [9] в среде возникает динамическая решетка концентрации носителей на межмодовой частоте f_{im} . Взаимодействие активной среды с полем резонатора приводит к многомодовому режиму в зависимости от тока накачки. При подаче на лазер с нелинейной средой внешнего сигнала, модулирующего ток инжекции на частоте f_{mw} , близкой к межмодовой частоте f_{im} , происходит взаимодействие волновых процессов, приводящее к активной синхронизации мод. Процесс синхронизации сопровождается уширением оптического спектра (от 1 до 10 нм) и существенным сужением наблюдаемых отдельных компонент спектра межмодовых биений (от ~ 20 МГц при свободной генерации до ~ 1 кГц при синхронизации мод), что также было показано в [8]. При сближении частот f_{mw} и f_{im} наблюдается дальнейшее взаимодействие колебательных процессов, приводящее к эффекту затягивания межмодовой частоты к частоте более сильного внешнего сигнала.

Эффект затягивания столь существенный, что даже при относительно небольшом ослаблении внешних возмущений (например, при помещении лазера в специальный контейнер) удается получить высокую стабильность частоты межмодовых биений и достаточно широкий оптический спектр в полосе фазового захвата.

Таким образом, стабильность межмодовой частоты в значительной степени определяется стабильностью СВЧ генератора, что может быть использовано для построения полупроводникового лазера, работающего в режиме активной синхронизации мод с высокостабильной межмодовой частотой. Вместе с тем для обеспечения надежной работы лазера в режиме активной синхронизации мод требуется детальное изучение влияния акустических шумов, а также ряда параметров внешнего резонатора (угловые расстройки внешнего зеркала, эффективность обратной связи) на стабильность межмодовой частоты.

1. Van der Ziel J.P. *J. Appl. Phys.*, **52** (7), 4435 (1981).
2. Miller A., Sibbert W. *J. Modern Opt.*, **35** (12), 1871 (1988).
3. Browsers D., Finch A., Sleat W., Sibbert W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (11), 1860 (1990).
4. Богатов А.П., Елисеев П.Г., Охотников О.Г. и др. *Труды ФИАН*, **141**, 74 (1983).
5. Peterman K. *Laser diode modulation and noises* (Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1988, p. 315).
6. Богатов А.П., Елисеев П.Г., Охотников О.Г., Пак Г.Т. и др. *Труды ФИАН*, **141**, 62 (1983).
7. Багаев С.Н., Захарьяш В.Ф., Каширский А.В., Клементьев В.М., Кузнецов С.А., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **34** (7), 623 (2004).
8. Захарьяш В.Ф., Каширский А.В., Клементьев В.М., Кузнецов С.А., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **35** (9), 821 (2005).
9. Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **35** (9), 791 (2005).
10. Колачевский Н.Н. *УФН*, **174** (11), 1171 (2004).
11. Коляда Н.А., Ньюшков Б.Н., Иваненко А.В., Кобцев С.М., Харпер П., Турицын С.К., Денисов В.И., Пивцов В.С. *Квантовая электроника*, **43** (2), 95 (2013).