

Низкочастотные шумы мощности и диаграммы направленности излучения диодного лазера со спектрально-селективным внешним резонатором

В.В.Бруевич, С.Г.Елизаров, Д.Ю.Паращук

В области частот до 1 кГц исследована спектральная плотность низкочастотных шумов мощности и флуктуаций диаграммы направленности выходного излучения одномодового диодного AlGaAs/GaAs-лазера с внешним резонатором, выполненного по схеме Литтмана–Меткалфа. Относительный уровень шума мощности и флуктуаций диаграммы направленности в режиме работы на одной продольной моде внешнего резонатора составлял $\sim 10^{-6}$ Гц $^{-1/2}$ и при выключении обратной связи существенно не изменялся. Долговременные флуктуации интенсивности, связанные с переключением между модами, не превышали 2%.

Ключевые слова: диодный лазер, внешний резонатор, низкочастотные шумы.

1. Введение

Диодные лазеры с внешним резонатором (ДЛВР) применяются в спектроскопических исследованиях, когда требуется перестраиваемый лазерный источник средней (1–100 мВт) мощности с узкой (от 10^9 до 10^3 Гц) линией излучения [1]. Принцип их действия основан на использовании спектрально-селективной оптической обратной связи, которая влияет как на спектральные характеристики излучения диодного лазера, так и на его динамические параметры [2]. Для формирования резонатора используются просветляющие покрытия, нанесенные на грань диодного лазера, и внешние частотно-селективные оптические элементы, в качестве которых чаще всего применяют дифракционные решетки.

На рис.1 схематически изображены спектры излучения, возвращаемого при помощи селективной оптической обратной связи, и продольные моды основного и внешнего резонаторов. Захват продольной моды составного резонатора происходит в результате того, что излучение на частоте этой моды возвращается в основной резонатор, повышая его добротность для соответствующей длины волны. При этом, даже если не использовать спектрально-селективный элемент (случай простой оптической связи), можно значительно улучшить условия генерации на одной или нескольких модах за счет совпадения моды внешнего резонатора с модой основного резонатора лазера. В зависимости от величины обратной связи и других параметров лазер может работать в одном из нескольких режимов. Соотношение времен жизни различных мод лазера является основным параметром, определяющим его поведение [3]. Расчеты показывают, что при достаточной величине простой оптической связи (от

зеркала) спектр лазера может состоять из одной продольной моды [3]. Спектральная ширина излучения на этой моде также уменьшается. Однако при некоторой определенной величине обратной связи лазер может либо находиться в хаотическом режиме (при этом спектр сильно уширяется), либо стабильно работать на нескольких продольных модах.

В поведении ДЛВР могут проявляться динамические нестабильности, включая динамический хаос. Это может привести к ухудшению характеристик лазера, например к уширению его спектральной линии [4]. Одной из проблем, возникающих вследствие внешней оптической обратной связи, является увеличение уровня шумов лазерного излучения [5, 6]. Во-первых, под действием обратной связи меняется спектр шумов, присущих самому лазеру (квантовых шумов) [7]. Во-вторых, нарастают шумы во всей низкочастотной (менее нескольких сотен мегагерц) области. Нарастание низкочастотных шумов связывают с переключениями продольных мод ДЛВР [4, 6]. Увеличение шума в этом случае происходит из-за развития неустойчивости, обусловленной внешней обратной связью. Следует различать переключения мод как собственного, так и внешнего резонатора. Такие шумы были подробно исследованы экспериментально [8]. Показано, что уровень флуктуаций обусловлен температурой резонатора. При определенных температурах лазер переходит в

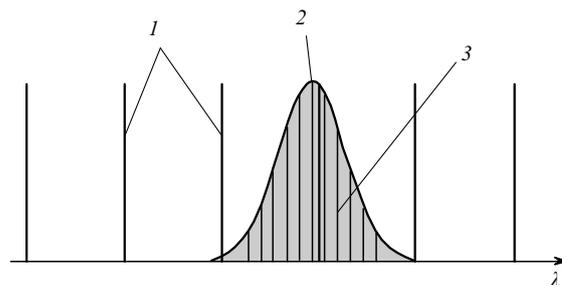


Рис.1. Спектры мод основного резонатора (1), возвращаемого с помощью оптической обратной связи излучения (2) и мод внешнего резонатора (3).

В.В.Бруевич, С.Г.Елизаров, Д.Ю.Паращук. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: selizar@yandex.ru, paras@polys.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 28 ноября 2005 г., после доработки – 11 апреля 2006 г.

неустойчивый режим и происходит переключение генерации между его продольными модами.

На практике переключения между модами собственного резонатора сравнительно легко подавляются. С экспериментальной точки зрения интересен характер поведения шумов при использовании обратной связи с высокой спектральной селективностью.

В нелинейной спектроскопии широко применяется метод возбуждения – зондирования (pump-probe). Шумы на частоте синхронного детектирования в канале зондирования определяют чувствительность измерений. Обычно эту частоту удобно выбрать в диапазоне звуковых частот в той области, где шумы $1/f$ незначительны. В ряде измерений, например фотодефлекционных [9], чувствительность определяют не только шумы мощности, но и флуктуации диаграммы направленности лазерного пучка.

В настоящей работе в диапазоне частот до 1 кГц измерена спектральная плотность низкочастотных шумов мощности и флуктуаций диаграммы направленности выходного излучения одномодового AlGaAs/GaAs-ДЛВР, выполненного по схеме Литтмана – Меткалфа. Исследовано влияние спектрально-селективной внешней обратной связи на шумовые характеристики лазера; показано, что обратная связь влияет на уровень низкочастотных шумов незначительно.

2. Техника эксперимента

Внешний резонатор был сконструирован по схеме Литтмана – Меткалфа (рис.2) [10]. Дифракционная решетка располагалась под углом скольжения по отношению к излучению лазера, зеркало устанавливалось перпендикулярно излучению, отраженному в первый порядок дифракции. Во внешнем резонаторе такой конфигурации частоту излучения можно регулировать поворотом зеркала.

Была разработана компактная конструкция внешнего резонатора, рассчитанная на установку диодных лазеров, работающих в диапазоне длин волн 650 – 900 нм (без замены решетки). Длина внешнего резонатора составляла 12 см. Основные элементы конструкции: дифракционная решетка (1800 штр./мм), асферическая линза (GELTECH) (фокусное расстояние 8 мм, числовая апертура 0.5) и подвижный держатель для зеркала с электроприводом.

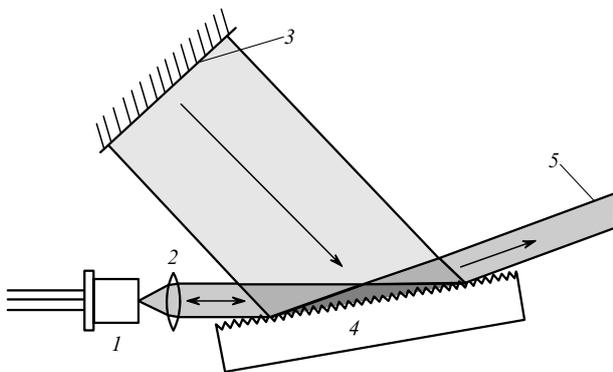


Рис.2. Диодный лазер с внешним резонатором по схеме Литтмана – Меткалфа:

1 – лазерный диод; 2 – линза; 3 – зеркало; 4 – дифракционная решетка; 5 – выходное излучение.

Лазерный диод устанавливался так, чтобы плоскость $p-n$ -перехода была практически перпендикулярна штрихам решетки. В таком положении эффективность решетки максимальна, что позволяет устанавливать ее под большим углом по отношению к падающему излучению, улучшая спектральную селективность резонатора. При этом нежелательно устанавливать ее строго перпендикулярно, т. к. в этом случае вследствие протяженности излучающей области спектральная селективность сильно падает.

Внешний резонатор управляется при помощи оригинального электронного блока. Перестройка по длине волны осуществляется поворотом зеркала с помощью привода, работающего в микрошаговом режиме; шаг перестройки составляет около 0.001 нм. Температура и ток через диодный лазер задаются и контролируются блоком питания диодного лазера.

Использовался коммерческий одномодовый лазерный AlGaAs/AlGaAs/GaAs-диод со следующими характеристиками: центральная длина волны 825 нм, рабочий ток 102 мА, мощность 50 мВт, угловая апертура $30^\circ \times 10^\circ$, размер излучающей области 1×50 мкм. Оптическая длина резонатора лазерного диода равна около 2.5 мм.

Спектр ДЛВР исследовался при помощи спектрометра MSDD1000 (Solar TI), оснащенного ПЗС-линейкой. Ширина аппаратной функции спектрометра при измерении спектров составляла 0.05 нм.

Для измерения низкочастотных шумов лазера использовались синхронный детектор SR830 (Stanford Research) и двухсекционный кремниевый фотодетектор со схемой вычитания и сложения фототоков на основе фотодиода S4204 (Hamamatsu). При измерении шума фотодетектор располагался так, что все излучение попадало в его апертуру и среднее значение разностного сигнала было равно нулю. Значение $\delta I/I$ разностного канала фотодетектора пропорционально отношению стандартного отклонения величины смещения пучка к его среднему диаметру, а для суммарного канала $\delta I/I$ – плотность шума мощности излучения лазера.

При исследовании стабильности ДЛВР использовался встроенный в конструкцию внешнего резонатора откалиброванный по мощности кремниевый фотодетектор.

3. Результаты

В спектре излучения диодного лазера в режиме свободной генерации всегда имеется пьедестал из большого числа продольных мод вблизи спектрального центра. При введении оптической обратной связи этот пьедестал удается существенно уменьшить. В зависимости от условий работы лазера, таких как фокусировка, влияющая на величину обратной связи, юстировка зеркала, поворот зеркала, ток лазерного диода, лазер работает в разных режимах. Можно выделить три характерных режима работы ДЛВР (рис.3): первый – на одной моде внешнего резонатора (за время усреднения фотодетектора длина волны излучения находится в пределах одной моды внешнего резонатора), второй – на нескольких модах внешнего резонатора в пределах одной моды основного резонатора и третий – близкий к свободной генерации, в котором спектр излучения содержит одну или несколько (в зависимости от температуры лазерного диода) выраженных продольных мод резонатора лазера, а также пьедестал из относительно слабых продольных мод.

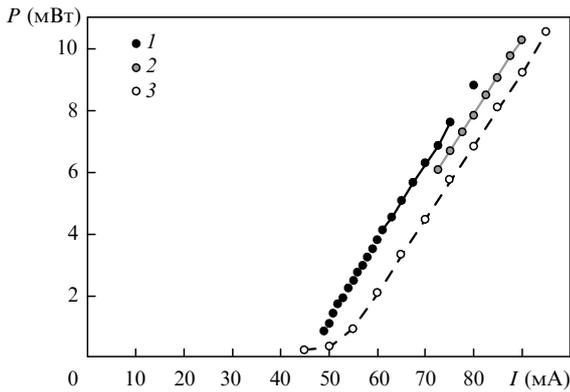
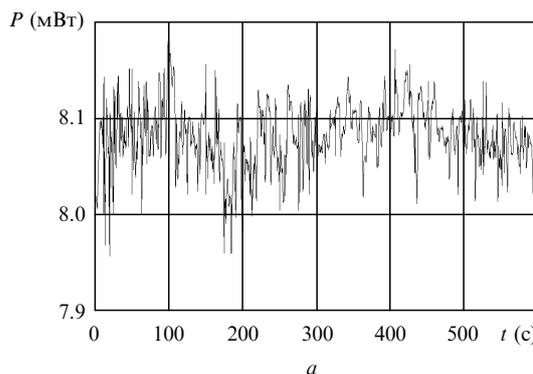


Рис. 3. Зависимости мощности излучения диодного лазера с внешним резонатором от тока при работе лазера на одной продольной моде внешнего резонатора (1), на одной моде основного резонатора (2) и в свободном режиме (3).

При недостаточной величине обратной связи лазер работает в третьем режиме, и в этом случае заметных изменений спектра излучения не происходит. В первом и втором режимах лазер работает на длине волны, близкой к длине волны внешнего резонатора. Проведенные измерения спектров не позволяют определить ширину линии (менее 0.05 нм) в этих режимах, тем не менее они существенно различаются выходной мощностью (см. рис.3), а также ее стабильностью. Предполагается, что во втором режиме в излучении лазера содержатся несколько продольных мод внешнего резонатора (возможно, между ними происходит быстрое переключение), близких по интенсивности, а в первом режиме лазер стремится работать на одной продольной моде внешнего резонатора. Во втором режиме эффективность снижается из-за переключения между продольными модами.

В первом режиме порог генерации понижается вследствие того, что потери световой энергии за проход на выбранной длине волны в составном резонаторе ниже, чем потери в основном резонаторе в третьем режиме. Таким образом, существует возможность контролировать режим работы лазера и мощность выходного излучения.

ДЛВР может стабильно работать на одной продольной моде основного резонатора в области перестройки 20 нм около центра линии усиления. Ширина спектра излучения диодного лазера составляет менее 0.05 нм. При этом мощность выходного излучения слабо зависит от длины волны при ее перестройке (для заданного значения тока лазерного диода).



4. Стабильность выходного излучения

На рис.4 представлены зависимости мощности выходного излучения от времени в первом режиме, в котором лазер работает на одной продольной моде внешнего резонатора (см. рис.3, кривая 1). Видно, что амплитуда флуктуаций мощности много меньше изменения мощности излучения при переходе между режимами генерации на одной продольной моде основного или внешнего резонаторов. Таким образом, можно считать, что флуктуации длины волны излучения лазера много меньше расстояния между двумя продольными модами основного резонатора. Среднеквадратичное отклонение в полосе 0–5 Гц составляет 0.4 %, а максимальные отклонения интенсивности, связанные с переключением между модами внешнего резонатора, не превышают 2 %.

Вид графика на рис.4,б позволяет предположить, что переключение между продольными модами внешнего резонатора может происходить на временах порядка единиц секунд. Поэтому измерение низкочастотных шумов интенсивности и диаграммы направленности (см. ниже) проводилось с усреднением на временах не менее нескольких десятков секунд.

Поскольку внешний резонатор не термостабилизирован, то, скорее всего, переключение между продольными модами связано с тепловыми флуктуациями оптической длины внешнего резонатора лазера. Известно, что возможны несколько сценариев переключения [6], при этом в областях изменения параметров резонатора (это области, в которых происходит переключение) могут нарастать низкочастотные шумы.

5. Низкочастотные шумы лазера

Спектры низкочастотных шумов лазера, работающего в первом и третьем режимах, представлены на рис.5. Мощность выходного излучения составляет 12 мВт. В пределах точности эксперимента шум при включении обратной связи не увеличивается. В области частот менее 1 кГц он имеет характер $1/f$ -шума и его уровень не превышает 10^{-6} Гц $^{-1/2}$ в области 1 кГц, что примерно на порядок выше уровня дробовых шумов фототока, составляющего 65 мкА.

На рис.5 приведен также спектр флуктуаций диаграммы направленности. Измерения проводились для флуктуаций в плоскости р–п-перехода. Спектр флуктуаций диаграммы направленности, как и шум мощности, монотонно спадает с ростом частоты. В пределах точности эксперимента при включении обратной связи шум не уве-

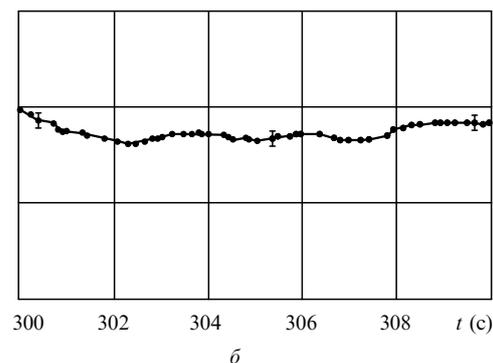


Рис. 4. Зависимости выходной мощности лазера в режиме одночастотной генерации от времени за 10 мин (а) и 10 с (б).

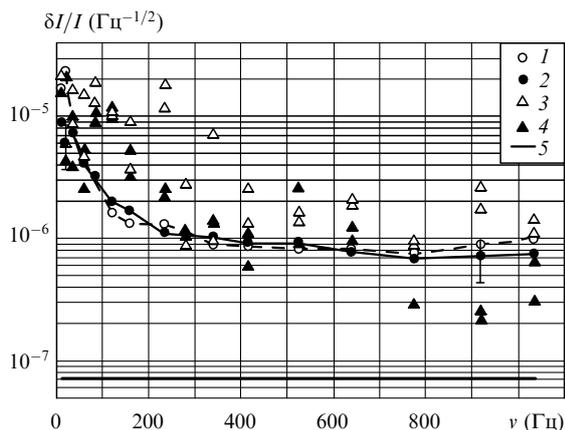


Рис. 5. Спектральная плотность мощности шума, нормированная на полную мощность излучения. Шум интенсивности выходного излучения в первом (1) и третьем (2) режимах, а также шум дрейфа направления выходного излучения в первом (3) и третьем (4) режимах; 5 – уровень дробовых шумов.

личивается. Было также замечено, что при изменении температуры активной среды происходят скачкообразные изменения направления выходного излучения.

Возрастание шумов в низкочастотной области, как отмечалось во Введении, в основном связано с переключениями между продольными модами резонатора. Набор мод составного резонатора определяется длинами основного и внешнего резонаторов. Поскольку длина внешнего резонатора много больше длины основного, то расстояние между модами внешнего резонатора много меньше расстояния между модами основного резонатора. Поэтому введение внешнего резонатора с малой спектральной селективностью приводит к возникновению целого ряда мод, для которых выполнены условия генерации. Переключения между этими модами могут приводить к увеличению шумов. Если же спектральная селективность внешнего резонатора достаточна для обе-

спечения условий генерации на одной продольной моде составного резонатора, то такое переключение будет маловероятно. По-видимому, по этой причине в изучаемом ДЛВР не происходит заметного увеличения шумов интенсивности и диаграммы направленности при включении обратной связи.

6. Заключение

Для диодных лазеров с внешним резонатором на основе AlGaAs/GaAs исследована спектральная плотность мощности низкочастотных шумов интенсивности и диаграммы направленности излучения в области частот до 1 кГц. Измерения проведены в режиме генерации на одной продольной моде внешнего резонатора. Показано, что на частоте 1 кГц относительный шум мощности и диаграммы направленности выходного излучения лазера составляет $10^{-6} \text{ Гц}^{-1/2}$. Установлено, что в этой области частот уровень шумов не зависит (в пределах точности измерения) от наличия или отсутствия обратной связи. Долговременные флуктуации мощности лазера, связанные с переключением между модами внешнего резонатора, не превышают 2 %.

1. Wieman C.E., Hollberg L. *Rev. Sci. Instrum.*, **62**, 1 (1991).
2. Salathe R.P. *Appl. Phys.*, **20**, 1 (1979).
3. Pierce I., Rees P., Spencer P.S. *Phys. Rev. A*, **61**, 053801 (2000).
4. Buldu J.M., Trull J., Torrent M.C., Garcia-Ojalvo J., Mirasso C.R. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, **4**, L1 (2002).
5. Nilsson B.O. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **41**, 2139 (1994).
6. Камия Т., Оцу М., Ямамото В. и др. *Физика полупроводниковых лазеров* (М.: Мир, 1989).
7. Hjelme D.R., Mickelson A.R., Beausoleil R.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 352 (1991).
8. Богатов А.П., Дракин А.Е., Плисюк С.А., Стратонников А.А., Кобякова М.Ш., Зубанов А.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А. *Квантовая электроника*, **32**, 809 (2002).
9. Olmstead M.A., Amer N.M., Kohn S., Fournier D., Vocca A.C. *Appl. Phys. A.*, **32**, 141 (1983).
10. McNicholl P., Metcalf H. *J. Appl. Opt.*, **24**, 2757 (1985).