

Низкочастотные флуктуации интенсивности в мощных одномодовых гребнёвых полупроводниковых лазерах на основе квантоворазмерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs

А.П.Богатов*, А.Е.Дракин*, С.А.Плисюк**, А.А.Стратонников**, М.Ш.Кобякова***,
А.В.Зубанов***, А.А.Мармалюк***, А.А.Падалица***

Показано, что при средней выходной мощности 60 мВт спектральная плотность низкочастотных флуктуаций в одномодовых полупроводниковых лазерах находится в диапазоне $6 \times 10^{-17} - 10^{-15} \text{ Вт}^2/\text{Гц}$. Этот уровень флуктуаций обусловлен наличием подпороговых продольных мод и переключением генерации между ними, что является причиной появления в их спектре значительной $1/f$ -компоненты.

Ключевые слова: квантоворазмерный лазер, одномодовая генерация, флуктуации интенсивности, $1/f$ -шум.

1. Введение

Флуктуации интенсивности в лазере представляют интерес по двум причинам. Во-первых, это характеристика лазерного излучения, способная определять нижнюю границу чувствительности любого устройства, в котором используется лазер. Во-вторых, флуктуации интенсивности могут нести физическую информацию о процессах, происходящих в самом лазере.

Исследование флуктуаций интенсивности излучения полупроводниковых лазеров имеет большую историю. Однако в низкочастотной области спектра основное внимание уделялось так называемым $1/f$ -шумам, причем измерения шумов проводились на лазерах, работающих при выходных мощностях до десятка милливатт (см., напр., [1–3] и ссылки там). Амплитуда флуктуаций в низкочастотной области чувствительна к технологическому качеству лазеров, к режиму их работы, например к количеству возбужденных поперечных и продольных мод, и т. д. Поэтому в исследованных ранее полупроводниковых лазерах уровень низкочастотных флуктуаций имел значительный разброс от образца к образцу, что чрезвычайно затрудняло анализ шумов. Особенно запутанным выглядело поведение лазера, работающего с выходной мощностью свыше нескольких милливатт. Как правило, лазер в этом случае работал в многомодовом режиме, и число возбужденных мод могло сильно различаться от образца к образцу.

Прогресс, достигнутый в настоящее время в области создания поперечно-одномодовых лазеров, позволяет по-новому взглянуть на возможности исследования низкочастотных флуктуаций. Действительно, современные

лазеры на основе квантоворазмерных гетероструктур с оптическим волноводом «гребнёвого» типа способны работать в режиме одной поперечной моды, а в некоторых случаях – и одной продольной моды с выходной мощностью на уровне сотен милливатт [4,5]. Настоящий уровень технологии обеспечивает получение лазеров с воспроизводимыми параметрами. Высокое качество излучения таких лазеров с расходимостью, близкой к дифракционному пределу, а также большая временная когерентность (однотонный режим работы) делают их привлекательными для различных применений, круг которых непрерывно расширяется.

Можно надеяться, что поведение флуктуаций интенсивности в этих лазерах будет определяться скорее физическими причинами, чем технологическим качеством последних, соответственно уровень флуктуаций в них будет достаточно воспроизводимой величиной для анализа. Целью настоящей работы явилось измерение уровня низкочастотных флуктуаций в мощных одномодовых гребнёвых лазерах, а также выяснение его близости к теоретическому пределу, т. е. к уровню естественных флуктуаций.

2. Методика измерений

В настоящей работе использовались лазеры, изготовленные на основе квантоворазмерных InGaAs/GaAs/AlGaAs-гетероструктур. Параметры слоев указаны в табл.1. Оптический волновод в плоскости слоев создавался гребнем с шириной в верхней его части $w = 3.5$ мкм. Вне гребня остаточная толщина травления до волноводного слоя составляла 0.1–0.2 мкм. Из этих структур изготавливались лазерные диоды с длиной резонатора $L = 600 - 800$ мкм и коэффициентами отражения зеркал, нанесенных на грани диода, $\sim 10\%$ и 95% . Длина волны излучения была ~ 980 нм.

Упрощенная схема установки для регистрации флуктуаций интенсивности излучения показана на рис.1. Измерения флуктуаций проводились с помощью схемы фотодетектирования, в которой использовался фотодиод ФД-24К; сигнал с фотодиода подавался на низкошумя-

*Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

**Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., 9

***ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стедьмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

Табл.1.

Слой		Толщина (нм)
GaAs:Zn	p^+	500
Al _{0,45} Ga _{0,55} As:Zn	p	1500
Al _{0,3} Ga _{0,7} As	н/л	400
GaAs	н/л	7
In _{0,2} Ga _{0,8} As	н/л	5.3
GaAs	н/л	10
In _{0,2} Ga _{0,8} As	н/л	5.3
GaAs	н/л	7
Al _{0,3} Ga _{0,7} As	н/л	400
Al _{0,45} Ga _{0,55} As:Si	n	3000
GaAs:Si	n	500
GaAs:Si	n	350×10^3

Примечание: н/л – нелегированный слой.

щий предусилитель Unipan 233-6, затем поступал на вход усилителя-нанольтметра Unipan 232В с полосой пропускания 500 – 15000 Гц и далее вводился в компьютер с помощью АЦП. Установленные на держателе лазера элемент Пельтье и терморезистор позволяли производить измерения при температуре в диапазоне 10 – 40 °С.

С использованием представленной автоматизированной установки осуществлялся сбор данных, соответствующих одной или нескольким реализациям случайного процесса, отвечающего изменению мощности излучения P во времени. Затем проводилась обработка этих данных. Исходными величинами были отклонения мощности δP от среднего значения \bar{P} , измеренные в последовательные моменты времени t_i :

$$\delta P = P(t) - \bar{P}. \tag{1}$$

Набор данных состоял из N значений $\delta P_i = \delta P(t_i)$, измеренных в моменты времени $t_i = \Delta i$, где $\Delta = 25$ мкс и $0 \leq i \leq N - 1$. При измерениях использовалось $N = 1024$. Далее проводилось дискретное преобразование Фурье

$$C^n(f_j) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \delta P_k \exp\left(\frac{2\pi i k j}{N}\right), \tag{2}$$

которое давало нам дискретный спектр одной реализации процесса при частотах $f_j = j/\Delta N$, где j находится в диапазоне $-N/2 \leq j \leq N/2$; n – номер реализации случайного процесса. В результате мы получали спектральную плотность флуктуаций

$$g(f_j) = \Delta \left[C^2(f_j) + C^2(f_{N-j}) \right],$$

где $j = 0, \dots, N/2$, причем усреднение проводилось как среднеарифметическое по числу реализаций процесса n . Для большинства измерений бралось $n = 64$.



Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Измерялись основные излучательные характеристики лазеров (спектр, дальнее поле, ватт-амперная зависимость). Для снятия спектра использовался монохроматор МДР-41, поворотом решеток которого управлял компьютер, а сигнал с выходной щели попадал на фотодиод и тоже передавался в компьютер. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне регистрировалось автоматизированной установкой, описанной ранее в работе [6].

3. Результаты эксперимента

Типичные излучательные характеристики лазеров представлены на рис.2. Пороговые токи диодов I_{th} находились в диапазоне 20 – 35 мА. Ширина по полувысоте диаграммы направленности в перпендикулярном и па-

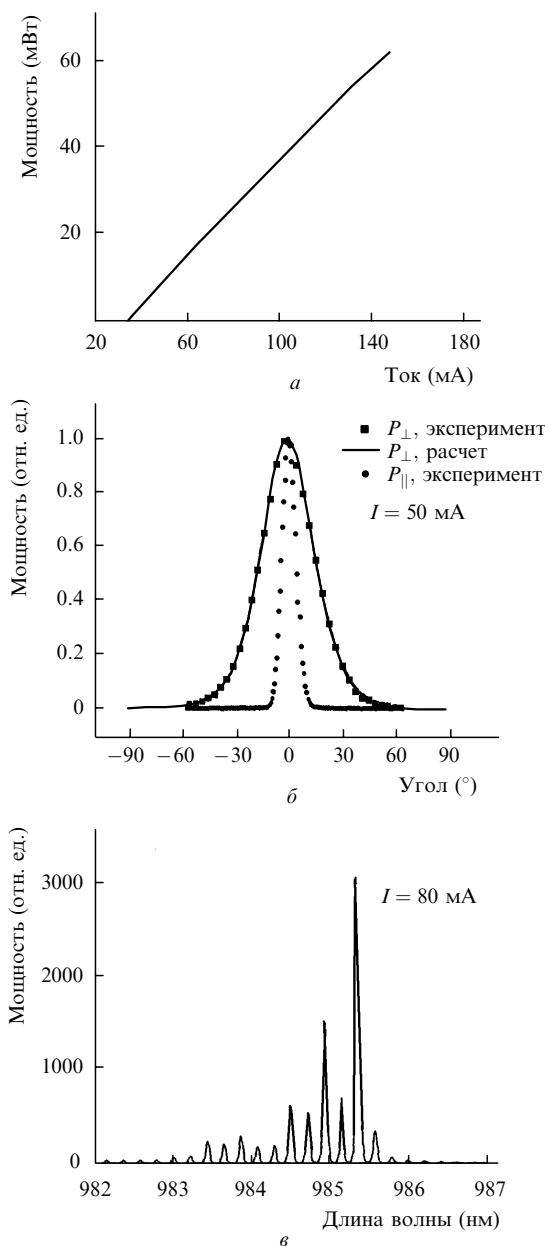


Рис.2. Излучательные характеристики лазера – ватт-амперная (а), распределение мощности излучения в дальней зоне в вертикальной плоскости P_{\perp} (перпендикулярно слоям структуры) и в горизонтальной плоскости P_{\parallel} (параллельно слоям структуры) (б), а также спектр излучения лазера при токе 80 мА (в).

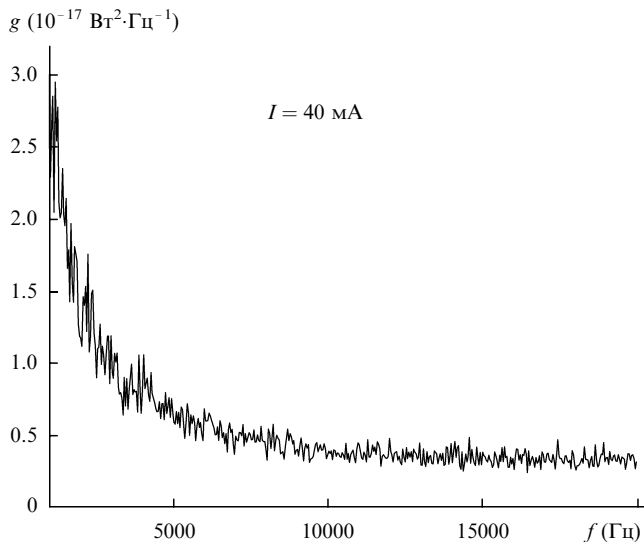


Рис.3. Спектральная плотность интенсивности флуктуаций при токе накачки 40 мА.

параллельном слоем лазерной структуры направления составляла соответственно $\sim 34^\circ$ и $\sim 9^\circ$. Данные по распределению интенсивности в дальней зоне (рис.2,б) находятся в удовлетворительном (с погрешностью не хуже 1° для полуширины) согласии с результатами численного расчета волноводной структуры лазера для параметров слоев, указанных в табл.1.

В исследованных образцах режим генерации на одной нижней поперечной моде сохранялся, как правило, при токах I , не превышающих 160 мА, выходная мощность при этом составляла более 60 мВт. Следствием поперечно-одномодового режима являлась линейность ватт-амперной характеристики (рис.2,а). Типичный спектр оптического излучения, состоящий из нескольких продольных мод, показан на рис.2,в. Следует отметить, что время регистрации спектра составляло ~ 1 мин, и поэтому он представлял собой некую «усредненную» картину. В этих измерениях «мгновенный» спектр мог выглядеть близким к одночастотному.

Результаты обработки флуктуаций интенсивности представлены на рис.3. Видно, что в диапазоне частот $f \leq 5$ кГц спектр флуктуаций имеет характер $1/f$ -шума, а на частотах $f > 5$ кГц – «белого» шума со спектральной плотностью в виде плато. Распределение плотности вероятности ρ флуктуаций δP близко к нормальному, что продемонстрировано на рис.4. Поскольку полоса пропускания системы регистрации составляет 500–15000 Гц, то среднеквадратичная флуктуация $\overline{\delta P^2}$ соответствует интегралу от $g(f)$ в указанном частотном диапазоне. Нормальный закон распределения амплитуды флуктуаций свидетельствует в пользу того, что измеряемая случайная величина $P(t)$ есть результат сложений большого числа более мелких парциальных изменений мощности.

Спектральная компонента $g(f)$, зависящая в области низких частот от частоты как $1/f$, зависит также от режима работы лазера и не является воспроизводимой от образца к образцу величиной. Возникновение $1/f$ -шума связано с резкими одиночными флуктуациями мощности, что можно видеть из рис.5, где представлены три реализации случайного процесса для одного и того же лазера. Хотя для всех трех реализаций средняя мощность

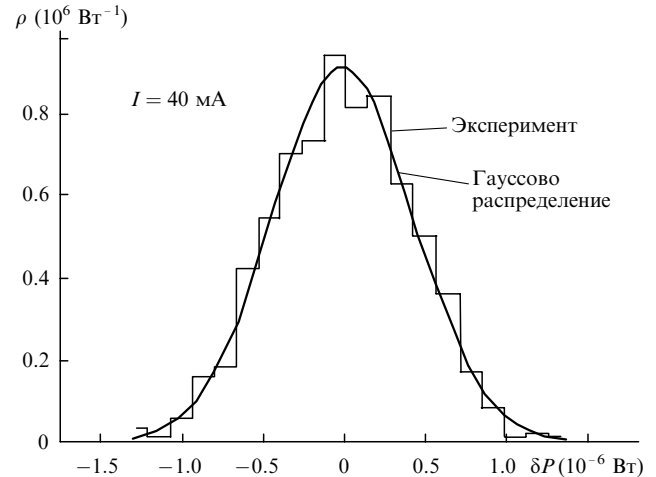


Рис.4. Зависимость распределения плотности вероятности ρ от амплитуды флуктуаций δP интенсивности лазера при токе накачки 40 мА. Гистограмма – экспериментальное распределение, гладкая кривая – гауссово распределение с дисперсией, равной дисперсии экспериментальных данных.

(~ 30 мВт) и ток накачки (~ 90 мА) одинаковы, тем не менее с точки зрения флуктуаций они соответствуют разным режимам работы лазера. Реализация на рис.5,а отвечает «спокойному процессу» лазерной генерации, при котором почти отсутствуют резкие и значительные флуктуации мощности δP . В этом случае распределение амплитуды флуктуаций $W(\delta P)$ близко к нормальному, а спектр $g(f)$ имеет вид почти «белого шума». На рис.5,в, напротив, представлен режим генерации с наличием резких и значительных флуктуаций мощности. Распределение амплитуды флуктуаций уже заметно отличается от нормального закона распределения и в спектре присутствует хорошо выраженная $1/f$ -компонента. Реализация на рис.5,б соответствует промежуточному случаю.

Таким образом, в настоящих измерениях $1/f$ -компонента шума в частотной области до 5 кГц связана с наличием резких и значительных по амплитуде флуктуаций. Что касается компоненты $g(f)$ в частотном диапазоне, соответствующем плато, то ее значения имели существенно меньший разброс и определялись в основном режимом работы лазера.

На рис.6 показано поведение спектральной плотности на частоте $f \approx 10$ кГц, соответствующей плато спектральной кривой, в зависимости от тока накачки. Нарастание спектральной плотности с увеличением тока (средней мощности лазера) происходит, как правило, немонотонным образом. Из рис.6 видно, что в области токов $I \approx 70 - 80$ мА наблюдается значительный пик зависимости $g(I)$, который соответствует возрастанию флуктуаций более чем на порядок (до 10^{-15} Вт²/Гц). После пика при увеличении тока накачки спектральная плотность имеет тенденцию к насыщению, и при токе $I \approx 140$ мА, который соответствует выходной мощности 60 мВт, $g(I)$ не превышает 6×10^{-17} Вт²/Гц.

Наличие пика на рис.6 свидетельствует о существовании дополнительного параметра, влияющего на амплитуду флуктуаций. Оказалось, что таким параметром является температура активной области лазера. Это подтвердилось непосредственным измерением зависимости g от температуры хладопровода лазера при фиксированной частоте, $f = 10$ кГц, результаты которого представлены на рис.7. Несмотря на довольно нерегулярный вид

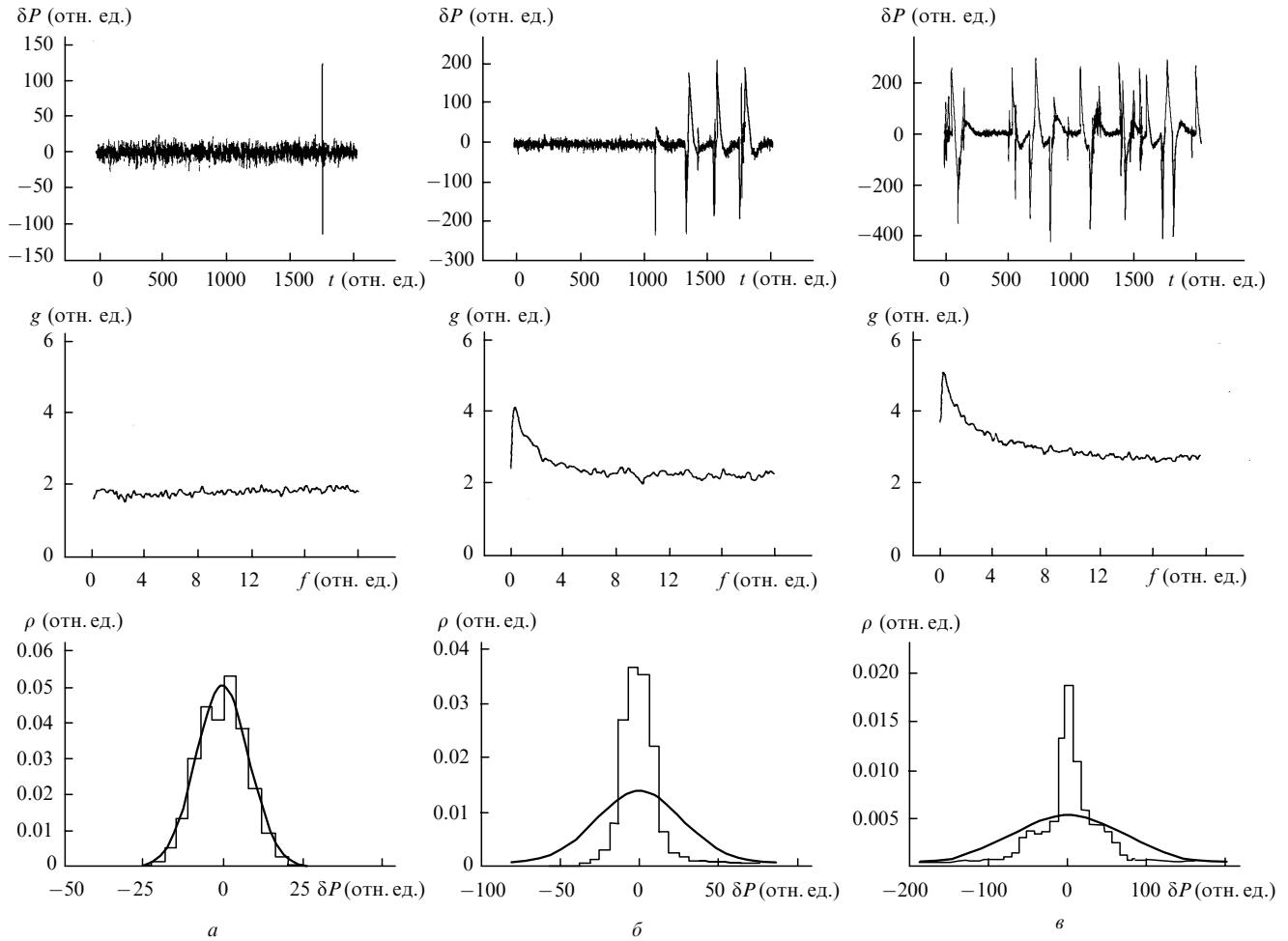


Рис.5. Флуктуации интенсивности излучения (верхний ряд), спектр флуктуаций интенсивности (средний ряд), а также распределение плотности вероятности для трех реализаций процесса и гауссово распределение (сплошная кривая) с дисперсией, равной дисперсии экспериментальных данных (нижний ряд).

зависимости, она испытывает некоторые осцилляции с характерным масштабом изменения температуры порядка 3 К. Такое изменение ΔT соответствует температурной перестройке частоты генерации отдельной продольной моды на один межмодовый интервал.

В наших экспериментах отсутствовала статическая стабилизация температуры лазерного диода, поэтому в процессе измерений (длительность каждого измерения

5–10 с) медленные изменения температуры активной области лазера могли привести к некоторой невоспроизводимости результатов. Это было особенно заметно, когда средняя температура лазера была близка к «границной» области, соответствующей резкому возрастанию флуктуаций. Как раз такой ситуации отвечают данные, представленные на рис.5 в виде различных реализаций случайного процесса.

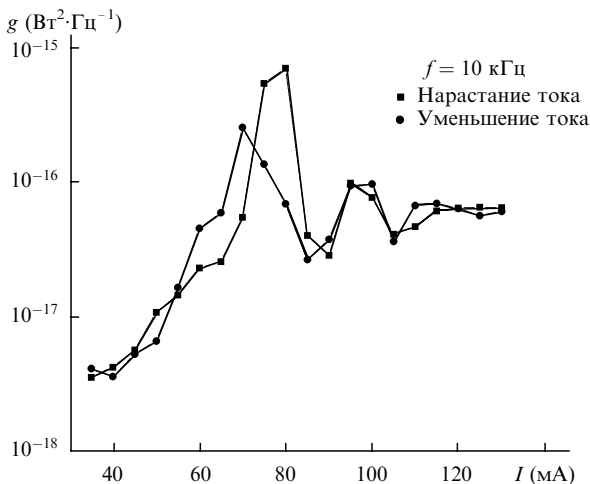


Рис.6. Зависимости спектральной плотности (частота 10 кГц) от тока накачки.

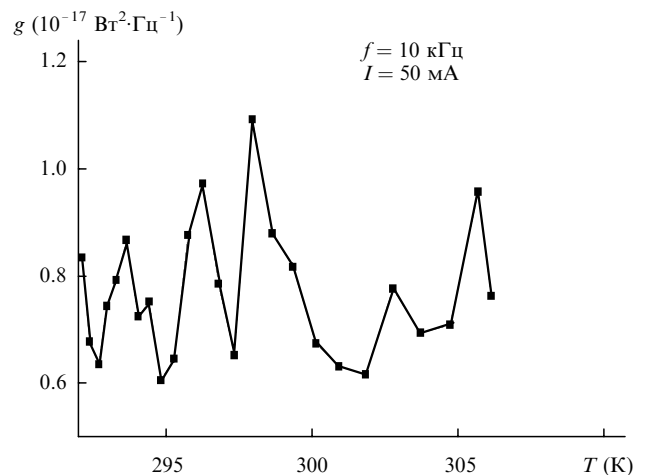


Рис.7. Зависимость спектральной плотности флуктуаций интенсивности (ток 50 мА, частота 10 кГц) от температуры хладопровода.

4. Обсуждение результатов

Таким образом, в настоящей работе зарегистрированы низкочастотные флуктуации интенсивности излучения лазера – как $1/f$ -типа, так и в виде «белого» шума. Спектральная плотность последних находится в диапазоне $4 \times 10^{-18} - 10^{-15}$ Вт²/Гц в зависимости от режима работы лазера. Наиболее критичным к изменению уровня флуктуаций параметром оказалась температура, причем это изменение носит осциллирующий характер. Поскольку рост тока накачки всегда сопровождается увеличением температуры, то наряду с изменением уровня флуктуаций за счет роста средней оптической мощности всегда неявно имеет место и изменение уровня флуктуаций, обусловленное изменением температуры. Последнее проявляется в виде резкого пика на кривой плавного роста флуктуаций с увеличением средней мощности лазера.

Причиной осцилляций флуктуаций мощности при изменении температуры является, по-видимому, переключение генерации по продольным модам [7] (mode-hopping). Частота таких переключений зависит от устойчивости генерации той или иной спектральной моды. В свою очередь эта устойчивость определяется положением моды относительно максимума спектрального контура кривой усиления среды лазера. Изменение температуры сопровождается последовательным прохождением частот продольных мод через максимум спектрального контура, соответственно периодическим образом изменяется и устойчивость генерации.

При совпадении частоты продольной моды с максимумом кривой усиления устойчивость наибольшая и переключение мод маловероятно. Напротив, когда две ближайшие моды расположены симметрично относительно спектрального максимума, устойчивость минимальна и резко повышается вероятность переключения генерации с одной моды на другую. Этим можно объяснить квазипериодичность изменения флуктуаций с температурой, что связано с квазипериодическим изменением темпа переключения мод. Заметим, что аналогичная ситуация была отмечена ранее в [8], и она также объяснялась переключением мод.

Сравнение амплитуды флуктуаций в режиме наиболее «спокойной» генерации, т. е. вне пика $g(I)$, с результатами [8], которые были получены для лазера, работающего с меньшей (5–12 мВт) мощностью, показали, что максимальные значения амплитуды флуктуаций в обеих работах близки и составляют $\sim 6 \times 10^{-17}$ Вт²/Гц. Из этого следует, что в нашем случае многократное увеличение средней мощности не привело к значительному увеличению максимального уровня флуктуаций, т. е. относительные флуктуации мощности наших лазеров уменьшились по сравнению с данными [8] на порядок.

Интересно также сравнить экспериментальные значения флуктуаций с теоретическим пределом, обусловленным «естественными» флуктуациями за счет спонтанного излучения для одночастотного режима генерации. Согласно [9], в пределе низких частот спектральная плотность

$$g(f) = \frac{2a(1+\eta)^2 P^2 \tau}{\eta^3}, \quad (3)$$

где a – фактор спонтанного излучения из [10] (в нашем случае $a \approx 10^{-5}$); $\eta = (I - I_{th})/I_{th}$ – относительное превышение накачки над порогом лазерной генерации; P – мощность излучения лазера; τ – время жизни фотона в резонаторе (в нашем случае $\tau \approx 3.3 \times 10^{-12}$ с). Для наибольшей мощности $P = 60$ мВт (рис.2,а) и $\eta = 3.2$ получим $g(f) \approx 1.3 \times 10^{-19}$ Вт²/Гц, что на два порядка меньше экспериментального значения.

Из этой оценки следует, что спонтанное излучение само по себе не является причиной флуктуаций интенсивности в исследованных лазерах. Тем не менее оно может играть косвенную роль, вызывая переключения лазерной генерации с одной моды на другую в неустойчивой рабочей точке. Соотношение (3) было получено для лазера с одночастотным резонатором, и поэтому в нем не учитывается наличие других подпороговых мод. Однако в нашем случае лазер работает на нескольких модах, и переключение мод оказалось основным источником флуктуаций. В связи с этим теоретическая оценка в соответствии с (3) может дать только предельное значение спектральной плотности флуктуаций, когда подавлено переключение мод и, более того, наличие подпороговых мод несущественны.

5. Заключение

Таким образом, исследования показали, что в пространственно-одномодовых лазерах низкочастотные флуктуации мощности излучения находятся в диапазоне $6 \times 10^{-17} - 10^{-15}$ Вт²/Гц при средней выходной мощности ~ 60 мВт и определяются стабильностью режима генерации. Нижнему пределу соответствует «спокойный» режим генерации в спектрально-устойчивой рабочей точке, тогда как верхний предел соответствует режиму частого переключения мод. В «спокойном» режиме генерации $1/f$ -компонента флуктуаций минимальна, а амплитуда флуктуаций распределена по нормальному закону. Однако даже в «спокойном» режиме генерации спектральная плотность флуктуаций на 2 порядка превышает теоретический предел, обусловленный для лазера с одной модой спонтанным излучением. Это свидетельствует о том, что, по всей видимости, наличие подпороговых мод в реальном лазере приводит к значительному росту флуктуаций.

Показано, что в исследованных лазерах $1/f$ -компонента шума связана с переходами из «спокойного» режима генерации в режим частого переключения мод. При этом возрастает также и компонента «белого» шума, а закон распределения амплитуды флуктуаций становится отличным от нормального.

Дальнейшее снижение уровня флуктуаций может быть достигнуто при использовании не только пространственно-, но и спектрально-одномодовых волноводов. Это позволило бы исключить режим переключения мод и существенно подавить подпороговые моды, соответственно уменьшив их роль в лазере.

Работа выполнена в рамках федеральных целевых научно-технических программ «Квантовые и нелинейные процессы» и «Физика твердотельных наноструктур», а также программы «Интеграция» (проект «Фундаментальная оптика квантоворазмерных полупроводниковых структур») и при частичной финансовой поддержке гранта ведущих научных школ (№ 00-15-96624).

1. Бессонов Ю.Л., Курленхов С.С., Морозов В.Н., Сапожников С.М., Чан Минь Тхай, Шидловский В.Р. *Квантовая электроника*, **12**, № 2, 347 (1985).
2. Бессонов Ю.Л., Корнилова Н.Б., Курносов В.Д., Морозов В.Н., Нароленко С.Д., Чан Минь Тхай, Шидловский В.Р. *Квантовая электроника*, **12**, № 11, 2370 (1985).
3. Fronen R.J., Vandamme L.K.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 724 No.5 (1988).
4. Schmidt B., Pawlik S., Mauschek N., Miller J., Pliska T., Troger J., Lichtenstein N., Wittmann A., Moldriek S., Sverdlov B., Harder C. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. OFC-2002. Techn. Digest* (Anaheim, USA, 2002, paper THGG64, p.702).
5. Поповичев В.В., Давыдова Е.И., Мармалюк А.А., Симаков А.В., Успенский М.Б., Челный А.А., Стратонников А.А., Плисюк С.А., Богатов А.П., Дракин А.Е. *Квантовая электроника*, **32**, № 12 (2002).
6. Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Коняев В.П. *Квантовая электроника*, **30**, № 5, 401 (2000).
7. Ohtsu M., Teramachi Y., Otsuka Y., Osaki A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, No.4, 535 (1986).
8. Васильев В.В., Hollberg L., Keilbach K., Величанский В.Л. *Исследование низкочастотных флуктуаций полупроводниковых лазеров* (частное сообщение).
9. Богатов А.П. *Препринт ФИАН № 256* (М., 1988).
10. Newstein M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **20**, No. 11, 1270 (1984).