

На правах рукописи

Батрак Дмитрий Викторович

УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И  
КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва – 2007

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева  
Российской Академии Наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Богатов Александр Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Балыкин Виктор Иванович

кандидат физико-математических наук  
Величанский Владимир Леонидович

Ведущая организация: ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Защита состоится 15 октября 2007 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д002.023.02 в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) по адресу: 119991, Москва, Ленинский просп., 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Шиканов А.С.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Полупроводниковый лазер – компактный, надёжный, высокоэффективный источник когерентного излучения, нашедший широкое применение во многих областях науки и техники. Для таких стремительно развивающихся сейчас областей его применения как диодная лазерная спектроскопия и оптическая связь важнейшей его характеристикой является ширина спектра излучения. С точки зрения получения максимально узкого спектра излучения оптимальным является обеспечение генерации только на одной продольной моде резонатора, т.е. генерации в одночастотном режиме. Поэтому определение условий, при которых формируется одночастотная генерация, а также исследование характеристик этого режима является чрезвычайно важной задачей.

Вследствие того, что квазиоднородная линия усиления полупроводниковой активной среды очень широка (порядка нескольких десятков нанометров), и различия в коэффициентах усиления для продольных мод резонатора, расположенных в спектре вблизи максимума контура усиления, очень малы ( $10^{-2}$ – $10^{-4}$  см<sup>-1</sup>), спектр генерации полупроводникового лазера чувствителен к малым изменениям контура модового усиления. Соответственно, на формирование спектра может оказывать существенное влияние остаточная оптическая неоднородность лазера, определяющаяся технологическими факторами. Значительный прогресс в технологии изготовления полупроводниковых лазеров, достигнутый к настоящему времени, уменьшает однако роль технологических несовершенств в формировании спектра генерации, делая актуальным анализ влияния на формирование спектра фундаментальных физических факторов, таких как оптическая нелинейность активной среды. Одним из основных механизмов нелинейности полупроводниковой среды является механизм, связанный с эффектом насыщения. Влияние его на устойчивость одночастотной генерации рассматривалось ранее для случая полупроводникового лазера с внешним резо-

натором. Для одного же из самых распространённых типов полупроводникового лазера – гребневого лазера (без внешней обратной связи), соответствующий анализ остаётся актуальной задачей.

Современные одночастотные полупроводниковые лазеры – это, в основном, лазеры с узкой – порядка нескольких микрон – активной областью (обычные гребневые лазеры и лазеры с распределённой обратной связью – т.н. РОС-лазеры). Это связано с необходимостью обеспечения устойчивого поперечного распределения поля. Относительно недавно была предложена новая конструкция полупроводникового лазера, способная обеспечить поперечно одномодовую генерацию при широкой (порядка 100 мкм) активной области. Отличительной особенностью этого т.н.  $\alpha$ -DFB лазера является наличие в плоскости резонатора встроенной решётки показателя преломления, наклонённой на небольшой угол по отношению к оси резонатора. Для такой конструкции лазера экспериментально достигнуты значения выходной мощности более 2 Вт в одночастотном режиме генерации с качеством выходного пучка, близким к дифракционному. Таким образом, резонатор  $\alpha$ -DFB лазера должен обладать значительной спектральной селективностью. Величина этой селективности является важной характеристикой, определяющей диапазон возможных применений  $\alpha$ -DFB лазера. Её теоретические оценки производились только в рамках очень упрощённых аналитических моделей, более же аккуратный анализ с учётом всех основных факторов влияющих на распространение излучения в резонаторе, в силу сложной картины распространения излучения, возможен только с использованием численного моделирования.

Теория ширины линии полупроводникового лазера предсказывает обратно пропорциональную зависимость естественной ширины линии генерации, обусловленную спонтанным излучением, от выходной мощности лазера. Поскольку  $\alpha$ -DFB лазер способен работать в одночастотном режиме при значениях выходной мощности значительно больших, чем другие лазеры, то можно ожидать, что ширина линии  $\alpha$ -DFB лазера может достигнуть рекордно низких значений. Однако непосредственное применение существующих способов рас-

чѐта ширины линии для случая  $\alpha$ -DFB лазера затруднительно в силу сложной двумерной структуры поля в резонаторе, включающей две пары связанных волн, и сильно неоднородного распределения носителей (так, например, неясно, как определить в этом случае т.н. фактор амплитудно-фазовой связи). С математической точки зрения сложность данной задачи заключается в том, что модовый подход к описанию динамики поля в резонаторе неприменим для открытого резонатора, поскольку моды открытого резонатора не являются ортогональными в традиционном понимании этого слова. Модель же закрытого резонатора для полупроводникового лазера в большинстве случаев не адекватна, поскольку коэффициенты отражения зеркал для него могут достигать 1% и менее. Предложенные к настоящему времени способы для описания динамики поля в открытом резонаторе менее удобны, чем стандартный модовый подход, и имеют свои ограничения, поэтому модификация модового подхода для использования его в случае открытого резонатора является методологически важной задачей.

### **Цель работы**

1. Модификация модового подхода к описанию динамики генерации полупроводникового лазера для учёта потерь, локализованных на зеркалах резонатора, и произвольного (нефакторизуемого) распределения поля в резонаторе.
2. Поиск условий установления одночастотного режима генерации гребневого полупроводникового лазера с учётом оптической нелинейности активной среды, обусловленной эффектом насыщения.
3. Теоретическое исследование спектральных свойств резонатора  $\alpha$ -DFB лазера.
4. Оценка принципиально достижимой степени когерентности излучения  $\alpha$ -DFB лазера.

### **Научная новизна**

1. Для мод открытого объёмного резонатора получено приближённое условие

ортогональности. Относительная точность этого условия порядка отношения длины волны излучения к длине резонатора и, таким образом, достаточна для многих применений.

2. Показано, что параметрическое взаимодействие продольных мод через бие-ния носителей на межмодовых частотах является существенным фактором, влияющим на формирование спектра генерации полупроводникового лазера с собственным резонатором. Указанное взаимодействие может как способствовать, так и препятствовать установлению одночастотной генерации в зависимости от материальных параметров активной среды.

3. Проведено исследование спектральных свойств резонатора полупроводникового  $\alpha$ -DFB лазера в рамках реалистичной численной модели с учётом неоднородного пространственного распределения усиления среды и температурного волновода.

4. Получены выражения для эффективного фактора спонтанного излучения и эффективного фактора уширения линии (фактора амплитудно-фазовой связи) для случая произвольно сложного распределения поля в резонаторе полупроводникового лазера.

5. Произведены теоретические оценки естественной ширины линии и интенсивности низкочастотных флуктуаций выходной мощности  $\alpha$ -DFB лазера.

### **Практическая значимость работы**

1. Полученное в работе условие ортогональности позволяет строить теоретические и численные модели полупроводниковых лазеров с торцевым выводом излучения со сложными конструкциями резонаторов в рамках традиционного модового подхода, корректно учитывая при этом потери, локализованные на зеркалах резонатора.

2. Критерий устойчивости одночастотной генерации может быть использован для оптимизации конструкции полупроводниковых лазеров, используемых в диодной лазерной спектроскопии.

3. Расчитанная величина естественной ширины линии  $\alpha$ -DFB лазера позволяет оценить перспективы его использования в качестве источника излучения для целей оптической связи.

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на 5-ом Белорусско-Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Беларусь, Минск, 2005 г.), Российско-немецком симпозиуме по лазерной физике RGLS-2005 (Нижний Новгород, 2005 г.), на семинарах отделения ОКРФ ФИАН и отдела оптоэлектроники ФИАН, а также на XLV научной конференции МФТИ (2002 г.).

### **Положения выносимые на защиту**

1. Полученное в работе условие ортогональности позволяет использовать стандартный модовый подход для теоретического описания динамики генерации полупроводниковых лазеров со сложными конструкциями резонатора, корректно учитывая при этом потери, локализованные на зеркалах.
2. Механизм взаимодействия продольных мод резонатора, связанный с эффектом насыщения, является причиной гистерезисных эффектов в процессе перестройки частоты генерации одночастотного полупроводникового лазера. Кроме того, он обуславливает существование предельной выходной мощности, при которой возможна одночастотная генерация.
3. Внесение в резонатор полупроводникового лазера продольной неоднородности с коэффициентом отражения на уровне  $10^{-5}$  приводит к значительному (более чем на порядок) возрастанию предельной выходной мощности, при которой возможна одночастотная генерация.
4. Резонатор полупроводникового  $\alpha$ -DFB лазера обладает спектральной селективностью, которую можно охарактеризовать спектральным контуром шириной порядка нескольких нанометров.
5. Естественная ширина линии полупроводникового  $\alpha$ -DFB лазера может до-

стигать значений менее 10 кГц.

## Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 98 страницах и содержит 18 рисунков. Список литературы состоит из 67 наименований.

### Краткое содержание диссертации

В **первой главе** рассмотрена задача описания динамики генерации лазера с открытым резонатором в терминах мод резонатора. Основной проблемой при этом является то, что традиционное условие ортогональности

$$\int U_m(\vec{r})U_{m'}^*(\vec{r})dV=0 \text{ для } m \neq m'$$

не выполняется для мод открытого резонатора. В работе показано, что для них имеет место приближённое условие ортогональности

$$\int n(\vec{r})n_g(\vec{r})U_m(\vec{r})U_{m'}^*(\vec{r})dV=0 \text{ для } m \neq m'$$

где  $n$  и  $n_g$  – соответственно фазовый и групповой показатели преломления среды. Относительная точность этого условия определяется отношением  $\lambda/L$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения, а  $L$  – длина резонатора. Для полупроводниковых лазеров с торцевым выводом излучения длина резонатора на два порядка и более превышает длину волны излучения, и, следовательно, для них точность полученного условия вполне достаточна. С использованием данного условия получена система дифференциальных уравнений, описывающая изменения амплитуд мод со временем, обусловленные спонтанным излучением и изменением диэлектрической проницаемости среды. Эта система уравнений взята за основу при описании динамики лазерной генерации в последующих главах диссертации.

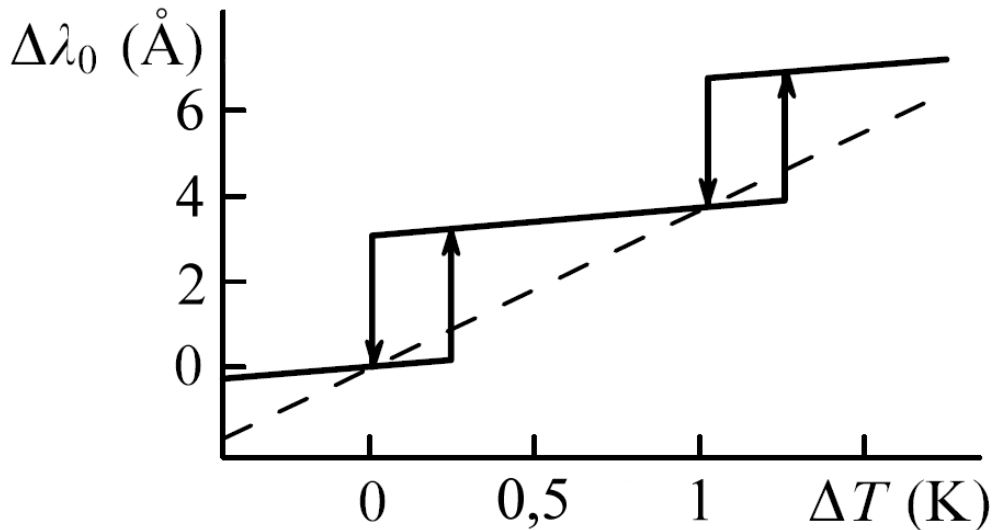
Во **второй главе** рассматривается вопрос об устойчивости одночастотной



генерации гребневого полупроводникового лазера с учётом оптической нелинейности активной среды, обусловленной эффектом насыщения, и проявляющейся в биениях концентрации носителей в активной области лазера на межмодовых частотах. Получена система уравнений для амплитуд слабых подпороговых мод при наличии сильной лазерной моды. Эта система состоит из пар уравнений, связывающих моды, расположенные в спектре симметрично относительно лазерной моды:

$$\begin{aligned} \frac{d C_m}{d t} + \frac{c}{2 n_g} \Delta_m C_m + \chi_m (C_m + C_{-m}^*) &= 0 \\ \frac{d C_{-m}^*}{d t} + \left[ \frac{c}{2 n_g} \Delta_{-m} + i \kappa_m \right] C_{-m}^* + \chi_{-m}^* (C_m + C_{-m}^*) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

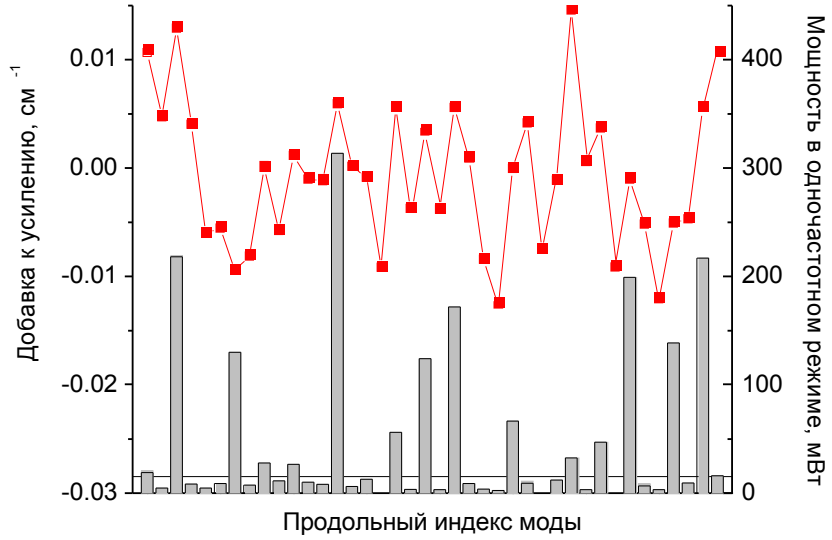
Здесь  $C_{\pm m}$  – амплитуды подпороговых мод,  $\Delta_{\pm m}$  – их дефициты усиления (соответствующие линейному приближению),  $\kappa_m$  – величина, характеризующая неэквидистантность мод в спектре,  $\chi_{\pm m}$  – величины, пропорциональные интенсивности лазерной моды, описывающие влияние нелинейности. Одночастотная генерация является устойчивой, когда амплитуды подпороговых мод затухают со временем, т.е. когда эффективные дефициты усиления, определяемые коэффициентами линейной системы (1), положительны. При заданной выходной мощности лазера этот критерий определяет область отстройки частоты лазерной моды от частоты максимума контура усиления, в которой одночастотная генерация является устойчивой. Показано, что рассматриваемый механизм нелинейности, существенно влияет на устойчивость одночастотной генерации уже при уровне выходной мощности на уровне нескольких милливатт, несмотря на то, что частота биений на два порядка превосходит обратное время жизни носителей. Влияние нелинейности, в частности, может приводить к возникновению эффекта автостабилизации, состоящем в увеличении области непрерывной перестройки длины волны генерации при изменении какого либо внешнего параметра, например температуры. В зависимости длины волны от внешнего параметра при этом возникают гистерезисные петли (Рис. 1). Кроме того, показано, что влияние нелинейности обуславливает, при типичных параметрах греб-



**Рис. 1** Проявление эффекта автостабилизации одночастотной генерации полупроводникового лазера при перестройке длины волны излучения с изменением температуры.

нового лазера, наличие максимального значения выходной мощности, выше которого одночастотная генерация становится абсолютно неустойчивой. При наличии в резонаторе гребневого лазера случайных оптических неоднородностей максимальная выходная мощность, достижимая в одночастотном режиме, возрастает (Рис. 2). Добиться увеличения предельного значения мощности можно также путём намеренного внесения микронеоднородности в резонатор лазера.

В **третьей главе** изложены результаты численного моделирования спектральной селективности резонатора  $\alpha$ -DFB лазера. Приводятся результаты расчёта спектральной зависимости модового усиления резонатора  $\alpha$ -DFB лазера в модели, учитывающей пространственный профиль накачки и неоднородный разогрев лазера. Модовое усиление для  $\alpha$ -DFB лазера можно определить, вычислив величину  $A$  – коэффициент усиления по амплитуде для волны, совершившей проход туда и обратно по резонатору, содержащему наклонную фазовую решетку. Коэффициент  $A$  вычислялся следующим образом. Поле излучения с длиной волны  $\lambda$ , распространяющегося вдоль резонатора (вдоль оси  $z$ ) можно представить как сумму двух волн:



**Рис. 2** Модификация контура модового усиления (линия с точками) и максимальный уровень выходной мощности лазера, при котором возможна одночастотная генерация на различных продольных модах (столбики) при наличии в резонаторе случайных продольных неоднородностей. Горизонтальной линией показан уровень максимальной мощности (одинаковый для всех мод) в отсутствие неоднородностей.

$$E^+(y, z, t) = e^{-i\frac{2\pi c}{\lambda}t} \left[ u_0^+(y, z) e^{ik_0 z} + u_1^+(y, z) e^{i\vec{k}_1 \vec{r}} \right] + \text{к.с.}$$

где  $k_0 = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$ ,  $n_0$  – среднее значение эффективного показателя преломления,  $\vec{k}_1 = (0, k_{1y}, k_{1z}) = (0, 0, k_0) + \vec{Q}$ ,  $\vec{Q}$  – вектор решётки. Распространение этой пары волн в резонаторе описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} (-2ik_0) \frac{\partial u_0^+}{\partial z} &= \frac{k_0^2}{n_0^2} \delta \epsilon_M u_0^+ + \frac{\partial^2 u_0^+}{\partial y^2} + \frac{k_0^2}{n_0} \delta n_G u_1^+ \\ (-2ik_{1z}) \frac{\partial u_1^+}{\partial z} &= \frac{k_0^2}{n_0^2} \delta \epsilon_M u_1^+ + (2ik_{1y}) \frac{\partial u_1^+}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial y^2} + \frac{k_0^2}{n_0} \delta n_G u_0^+ \end{aligned} \quad (2)$$

где комплексная добавка к эффективной диэлектрической проницаемости среды  $\delta \epsilon_M$  включает в себя вклады, обусловленные носителями и неоднородным нагревом резонатора:

$$\delta \epsilon_M(y, z) = \delta \epsilon_N(y, z) + \delta \epsilon_T(y, z)$$

Вначале на одном из зеркал (при  $z=0$ ) произвольным образом задаётся функция  $u_0^+(y, 0) = u_0^{+(0)}(y)$ , для функции  $u_1^+(y, z)$  граничное условие при  $z=0$  име-

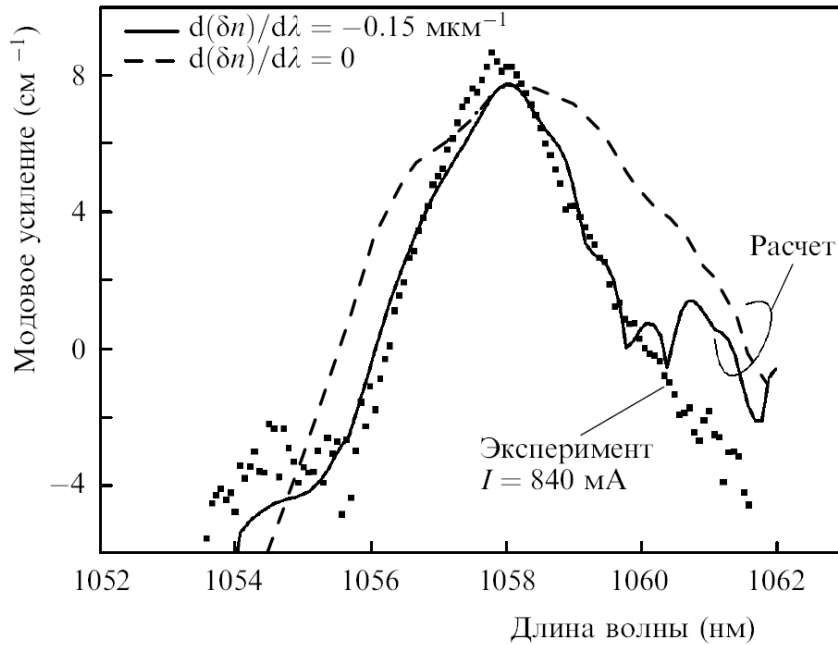
ет вид  $u_1^+(y,0)=0$ . Путём численного интегрирования уравнений (2) с использованием метода, аналогичного методу распространения пучка, рассчитывается распространение излучения в резонаторе до другого зеркала (при  $z=L$ ). Из граничных условий  $u_0^-(y,L)=r_2 u_0^+(y,L)$ ,  $u_1^-(y,L)=0$  на этом зеркале определяются распределения амплитуд пары связанных волн, распространяющихся в отрицательном направлении оси  $z$ . Для этой пары волн аналогичным образом рассчитывается распространение до первого зеркала. Граничные условия на первом зеркале ( $u_0^+(y,0)=r_1 u_0^-(y,0)$ ,  $u_1^+(y,0)=0$ ) дают распределение амплитуды основной волны  $u_0^+(y,0)=u_0^{+(1)}(y)$  после одного прохода по резонатору. Величины  $r_1$  и  $r_2$  представляют собой амплитудные коэффициенты отражения зеркал.

Описанная процедура расчёта для распространения излучения туда и обратно по резонатору, аналогично методу Фокса-Ли, итеративно повторяется до тех пор, пока форма поля не перестанет изменяться после очередного прохода туда и обратно по резонатору. Коэффициент  $A$  при этом определяется как отношение амплитуды поля после прохода к амплитуде поля до прохода. Модовое усиление вычислялось по формуле

$$g = \frac{1}{L} \left( \ln|A| + \ln \frac{1}{|r_1 r_2|} \right)$$

Выполняя описанную выше процедуру для различных значений длины волны излучения, вычислялся спектр модового усиления. Хорошее соответствие расчётной кривой с экспериментом достигнуто в предположении об определённой дисперсии амплитуды фазовой решётки (Рис. 3). Расчётная ширина спектра модового усиления, в лоренцевском приближении, составляет при этом около 3 нм.

Кроме модового усиления, в третьей главе анализируется изменение межмодового расстояния для резонатора  $\alpha$ -DFB лазера по сравнению с резонатором Фабри-Перо. Значение межмодового расстояния, рассчитанное с учётом увели-



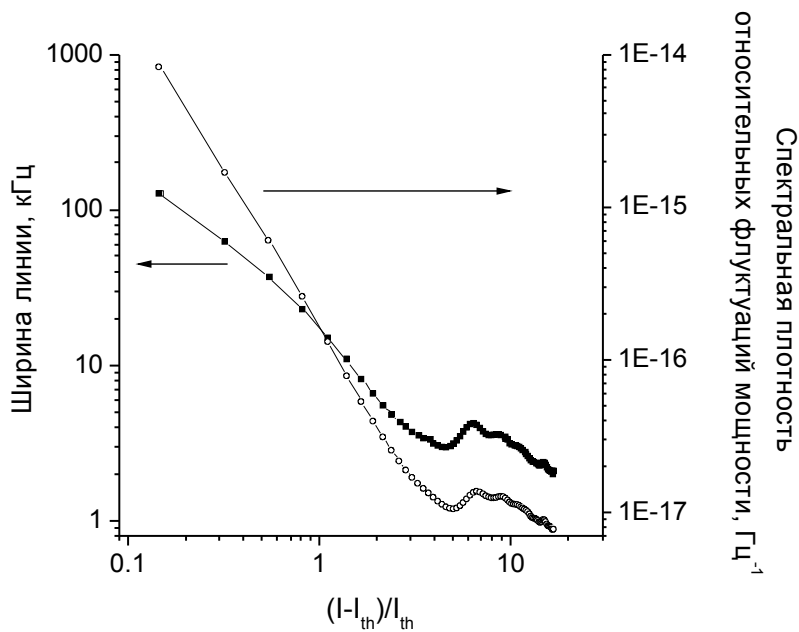
**Рис. 3** Расчётные и экспериментальные спектры модового усиления резонатора  $\alpha$ -DFB лазера.

чения оптической длины распространения излучения в резонаторе  $\alpha$ -DFB лазера в  $\cos^2\alpha$  раз по сравнению с лазером с резонатором Фабри-Перо, находится в хорошем соответствии с экспериментом.

В **четвёртой главе** рассмотрена задача о флуктуациях излучения полупроводникового лазера в одночастотном режиме генерации, обусловленных спонтанным излучением, в случае когда двумерные распределения поля моды и концентрации носителей в плоскости р-п перехода имеют произвольно сложный (нефакторизуемый) вид. Получены выражения, связывающие естественную ширину линии и спектральную плотность низкочастотных флуктуаций мощности с распределениями поля и носителей в резонаторе. Выражение для естественной ширины линии может быть представлено в виде :

$$\Delta\omega_L = \frac{\gamma P_{sp}}{2W} (1 + \alpha^2)$$

где  $P_{sp}$  – мощность спонтанного излучения,  $W$  – энергия поля лазерной моды,  $\gamma$  – фактор спонтанного излучения,  $\alpha$  – фактор амплитудно-фазовой связи. Величины  $\gamma$  и  $\alpha$ , однако, в отличие от традиционной модифицированной фор-



**Рис. 4** Расчётные зависимости естественной ширины линии и спектральной плотности низкочастотных флуктуаций мощности  $\alpha$ -DFB лазера от относительного превышения током накачки порогового значения

мулы Шавлова-Таунса, выражаются через распределения поля и носителей и могут изменяться с изменением уровня накачки. Результаты расчёта ширины линии и уровня флуктуаций мощности, выполненного в рамках численной модели  $\alpha$ -DFB лазера, приведены на Рис. 4. Немонотонная зависимость этих величин от уровня накачки связана с изменением конфигурации поля в резонаторе. Минимальное значение естественной ширины линии составляет менее 10 кГц.

## Основные результаты

1. Показано, что для типичных конструкций резонатора полупроводникового лазера с торцевым выводом излучения выполняется приближённое условие ортогональности для мод. Это условие позволяет рассматривать динамику лазера в терминах изменяющихся со временем амплитуд мод, корректно учитывая при этом «открытость» резонатора, т.е. наличие оптических потерь, сосредоточенных на зеркалах резонатора.

2. В гребневом полупроводниковом лазере с резонатором Фабри-Перо, образованном собственными гранями, и однородной активной средой может иметь место эффект автостабилизации одночастотного режима генерации. Он заключается в том, что непрерывная перестройка частоты генерации может распространяться на интервал расстройек лазерной частоты относительно спектрального максимума материального усиления, превышающий межмодовое расстояние.

3. Для типичных параметров гребневого полупроводникового лазера со встроенным латеральным волноводом существует ограничение на максимальную выходную мощность, которую можно достичь в одночастотном режиме генерации. Это ограничение обусловлено изменением эффективного усиления для продольных мод, спектрально близких к лазерной моде, вследствие нелинейности активной среды. Для лазера, резонатор которого не содержит продольных неоднородностей, максимально достижимая выходная мощность находится на уровне нескольких милливатт, наличие неоднородностей приводит к увеличению достижимой мощности.

4. С использованием численной модели полупроводникового  $\alpha$ -DFB лазера показано, что резонатор  $\alpha$ -DFB лазера обладает высокой спектральной селективностью, ограничивающей ширину спектрального контура модового усиления до величины порядка нескольких нанометров, что благоприятствует установлению одночастотного режима генерации.

5. Теоретически рассмотрена задача об описании флуктуаций излучения полупроводникового  $\alpha$ -DFB лазера, обусловленных спонтанным излучением. В полуклассическом приближении получено выражение для естественной ширины линии и спектральной плотности низкочастотных флуктуаций мощности такого лазера. Показано, что естественная ширина линии  $\alpha$ -DFB лазера может достигать уровня в несколько килогерц, что существенно меньше, чем для других существующих конструкций полупроводниковых лазеров без внешнего резонатора.

## Публикации по теме диссертации

1. Батрак Д.В., Богатов А.П., Каменец Ф.Ф., «Устойчивость и автостабилизация одночастотного режима генерации полупроводникового лазера», *Квантовая электроника*, **33**, №11, 941 (2003).
2. Batrak D.V., Bogatov A.P., Drakin A.E., Strattonnikov A.A., Kamenets F.F., “Phase and amplitude fluctuations in  $\alpha$ -DFB lasers due to spontaneous emission”, *J. Opt. A.: Pure Appl. Opt.*, **6**, 557 (2004).
3. Батрак Д.В., Богатов А.П., «Приближённое условие ортогональности для мод открытого резонатора», *Квантовая электроника*, **35**, №4, 356 (2005).
4. Богатов А.П., Дракин А.Е., Батрак Д.В., «Высокояркостные полупроводниковые лазеры с наклонной фазовой решёткой в резонаторе», *Тезисы 5-го Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе»* (Минск, 2005).
5. Bogatov A.P., Drakin A.E., Batrak D.V., Güther R., Paschke K., Wenzel H., «Spectral and noise characteristics of high brightness  $\alpha$ -DFB lasers», *Technical digest of Russian-German Laser Symposium RGLS-2005 (Nizhny Novgorod, 2005)*.
6. Богатов А.П., Дракин А.Е., Батрак Д.В., Гютер Р., Пашке К., Венцель Х., «Спектральные свойства резонатора полупроводникового  $\alpha$ -DFB лазера», *Квантовая электроника*, **36**, №8, 745 (2006).
7. Батрак Д.В., Богатов А.П., «Мощность полупроводникового лазера гребневого типа в одночастотном режиме генерации», *Квантовая электроника*, **37**, №8 (2007).