

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

# Характеристики генерации и стабильность выходной мощности многоканального волоконного лазера

А.И.Кузьменков, С.Н.Лукиных, О.Е.Наний, А.И.Одинцов, А.П.Смирнов, А.И.Федосеев, В.Н.Трещиков

*Теоретически и экспериментально исследовано влияние плотности расположения и числа спектральных каналов на стабильность выходной мощности многочастотного непрерывного лазера. В расчетах использована модель, в которой взаимодействие каналов, обусловленное насыщением активной среды, определяется коэффициентами кросс-насыщения, зависящими от частотного расстояния между каналами. Основные закономерности генерации проанализированы на примере лазера с числом каналов три, пять и девять. Показано, что при заданном превышении мощностью накачки порогового значения выравнивание мощностей каналов достигается введением дополнительных потерь в каналы с максимальной мощностью. При этом увеличение мощности накачки при достаточно плотном расположении каналов приводит к подавлению генерации в четных каналах. С ростом числа каналов лазерная система сохраняет устойчивость, однако время перехода к стационарному режиму резко возрастает. Эксперименты проведены с использованием эрбиевого волоконного лазера, конструкция которого обеспечивала независимое управление мощностями до 40 спектральных каналов, согласованных по частоте с телекоммуникационной сеткой частот. Результаты экспериментов качественно согласуются с расчетными. В частности, долговременная относительная нестабильность менее 3 дБ наблюдалась лишь при числе каналов менее семи и частотном расстоянии между ними более 400 ГГц. Нестабильность возросла с увеличением числа каналов и их плотности.*

**Ключевые слова:** многоканальный лазер, эрбиевый волоконный лазер, спектральное мультиплексирование, многоканальные системы связи, телекоммуникационная сетка частот.

## 1. Введение

Многоканальные лазеры имеют ряд преимуществ по сравнению с одночастотными при их использовании в интерферометрии, дальнометрии, голографии, радиофотонике и мониторинге окружающей среды благодаря возможности применения дифференциальных методов измерений. На основе многоканальных лазеров могут быть созданы высокочувствительные и прецизионные оптические приборы и системы [1–7]. Исследования характеристик генерации таких лазеров в основном ограничивались случаем двух и четырех каналов [8–13].

Важнейшей областью применения многоканальных лазеров с большим числом каналов является волоконно-оптическая связь, где они используются в качестве многоканальных передатчиков в системах связи нового поколения. Так, в современных многоканальных системах связи со спектральным мультиплексированием применяется до

80 каналов, работающих в спектральной полосе эрбиевых усилителей при стандартном частотном расстоянии между этими каналами 50 ГГц. Интегральная пропускная способность систем связи достигает 8 Тбит/с [14–22].

Для разработки и тестирования мультитерабитных систем связи требуется многоканальный (число каналов 40–96) источник излучения с возможностью перестройки длин волн каналов в диапазоне 1530–1560 нм. Лазер такого типа был предложен в работе [23], однако экспериментально удалось реализовать только двух- и трехканальные режимы генерации.

Впервые многоканальная генерация с числом каналов более 10 была получена в работе [24] при охлаждении активного эрбиевого волокна до температуры жидкого азота. Такая конструкция, разумеется, малоприменяема для практического применения в системах связи. В течение последних десяти лет был предложен и реализован целый ряд многоканальных волоконных лазеров [25–31], в которых для выравнивания мощностей каналов используются различные сочетания модуляторов, нелинейно-оптических и активных элементов, расположенных в резонаторах сложной конструкции с управляемой анизотропией.

В частности, для стабилизации многоканальной генерации в работах [25, 26] в состав эрбиевого лазера вводились дополнительные волокна, в которых были созданы условия для ВКР- или ВРМБ-усиления, а в работе [27] использовался внутрирезонаторный полупроводниковый усилитель. В [28–31] для этой цели применялись различные внутрирезонаторные нелинейно-оптические эффекты. В [28, 29] использовалось внутрирезонаторное вращение плоскости поляризации, а в [30, 31] – нелинейное кольцевое волоконное зеркало, причем в [31] активный эле-

**А.И.Кузьменков, А.И.Одинцов, А.И.Федосеев.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы  
**С.Н.Лукиных, В.Н.Трещиков.** Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр.1  
**О.Е.Наний.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; Научно-технический центр Т8, Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр.1; e-mail: naniy@t8.ru  
**А.П.Смирнов.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 23 марта 2016 г., после доработки – 4 августа 2016 г.

мент входил в состав нелинейного зеркала. По утверждению авторов работ [28–31], принцип стабилизации многоканальной генерации основан на выборе рабочей точки нелинейных элементов, в которой они стабилизируют выходную мощность на некотором фиксированном уровне.

Однако ни в одной из цитируемых работ не исследован характер конкурентного взаимодействия спектральных каналов в активном элементе, а принципы стабилизации многоканальной генерации в нелинейных устройствах описаны лишь качественно и недостаточно ясно, что не позволяет использовать их для дальнейшей оптимизации режимов генерации лазера. С точки зрения практического применения существенным недостатком большинства исследованных многоканальных лазеров является необходимость настройки их параметров на заданный режим генерации, в частности необходимость ручной подстройки поляризаторов при изменении коэффициента усиления активного волокна. Однако главный недостаток описанных в указанных работах нелинейных методов стабилизации многоканальной генерации – возможность переключения из режима стабилизации многоканальной генерации в режим пассивной синхронизации мод (см., напр., [31]).

В настоящей работе исследуется влияние плотности расположения и числа спектральных каналов на характеристики генерации и стабильность выходной мощности непрерывного многоканального эрбиевого лазера. Экспериментальное оборудование позволяет проводить исследования генерации с числом каналов до 40, наиболее важные особенности стационарных режимов генерации с управляемыми потерями иллюстрируются на примерах лазеров с числом каналов три, пять и девять. Результаты расчетов показывают, что используемая численная модель качественно адекватно описывает экспериментальные данные для числа каналов до десяти, хорошее количественное совпадение результатов получено для трех каналов и удовлетворительное – для числа каналов до пяти.

## 2. Расчетная модель

В расчетной модели используются балансные уравнения, взаимодействие отдельных каналов генерации происходит через кросс-насыщение инверсии. В этом приближении уравнения для мощности  $p_i$  и коэффициента усиления  $g_i$  каждого канала ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) в нормированных величинах имеют вид [32]

$$\frac{dp_i}{d\tau} = [(g_i - 1 - \delta_i)p_i]\mu, \quad (1)$$

$$\frac{dg_i}{d\tau} = q - g_i \left( 1 + p_i + \sum_{i \neq j}^N \zeta_{ij} p_j \right), \quad (2)$$

где  $\tau = t/T_1$ ;  $t$  – время;  $T_1$  – время релаксации инверсной населенности;  $\mu = T_1/T_{ph}$ ;  $T_{ph}$  – время затухания поля в резонаторе;  $q$  – общее для всех каналов превышение мощностью накачки порогового значения;  $\delta_i$  – дополнительные потери в соответствующих каналах;  $\zeta_{ij}$  – коэффициенты кросс-насыщения.

В расчетах использовались значения коэффициентов кросс-насыщения, близкие к измеренным экспериментально в работе [23] по зависимостям мощностей каналов в двух-

канальном режиме от потерь в одном из каналов. В частности, использовался симметричный набор коэффициентов  $\zeta_{ij} = \zeta_{ji}$ . Снижение значений  $\zeta_{ij}$  по мере увеличения частотного расстояния  $\Delta\nu$  между каналами (от  $\zeta_{ii} = 1$  при  $\Delta\nu = 0$  до  $\zeta_0 = 0.78$  при  $\Delta\nu > 900$  ГГц) моделировалось либо функцией Гаусса  $\zeta_{ij} = \zeta_0 + (1 - \zeta_0)\exp\{-[(j-i)/H]^2\}$ , либо функцией Лоренца  $\zeta_{ij} = \zeta_0 + (1 - \zeta_0)\{[(j-i)/H]^2 + 1\}^{-1}$ , где  $H = \Delta\nu_H/\Delta\nu$ , а  $\Delta\nu_H$  – полуширина спектрального провала в контуре усиления эрбиевого лазера (согласно данным [23, 33],  $\Delta\nu_H = 450$  ГГц). Расчеты выполнялись для значений  $H$  от 0.225 (разность частот  $\Delta\nu$  соседних каналов 2000 ГГц) до 4.5 ( $\Delta\nu = 100$  ГГц). Как показали проведенные численные расчеты, характер конкуренции каналов генерации в многоканальном режиме генерации слабо зависит от модельной формы провала (т. е. от того, используется функция Гаусса или Лоренца), но очень существенно зависит от отношения полуширины провала к разности частот конкурирующих каналов (параметра  $H$ ) и от коэффициента кросс-насыщения при асимптотически бесконечной разности частот конкурирующих каналов (параметра  $\zeta_0$ ).

Для моделирования практически важного режима с равными мощностями всех каналов ( $p_i \equiv p$ ) предварительно рассчитывались дополнительные потери  $\delta_i$ , вносимые в каналы при заданной величине превышения  $q$ . Из стационарного решения уравнения (2) следует, что

$$\delta_i = \frac{q}{1 + pS_i} - 1, \quad (3)$$

где  $S_i = \sum_{j=1}^N \zeta_{ij}$ , причем значение этой суммы максимально для центрального канала и минимально для крайних каналов. Полагая, что для центрального канала  $S_c = \sum_{j=1}^N \zeta_{cj}$  и  $\delta_c = 0$ , можно с использованием (3) получить формулы для расчета стационарной мощности и потерь в каждом канале соответственно:

$$p = (q - 1)/S_c, \quad (4)$$

$$\delta_i = \frac{(q - 1)(S_c - S_i)}{S_c + (q - 1)S_i}. \quad (5)$$

Согласно (5) величина вносимых потерь возрастает от нуля в центральном канале до максимального значения в крайних каналах.

## 3. Эксперимент

Экспериментально исследован эрбиевый волоконный лазер блочной конструкции, собранный из выпускаемых серийно для волоконно-оптических систем связи усилителя EDFA (усилитель EA-16V/23 «Онега») и спектрально-селективного переключателя (WSS-модуля). Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Активным элементом 1 является легированное эрбием волокно длиной 10 м, накачиваемое излучением полупроводникового лазера 2 с длиной волны  $\lambda = 980$  нм. Ток накачки регулируется в диапазоне 60–300 мА, что позволяет изменять ненасыщенный коэффициент усиления в пределах 16–30 дБ. Однонаправленная генерация обеспечивается встроенными оптическими изоляторами 3 на входе и выходе, которые предотвращают усиление отраженного паразитного излучения. Спектрально-селективный объединитель 4 обес-

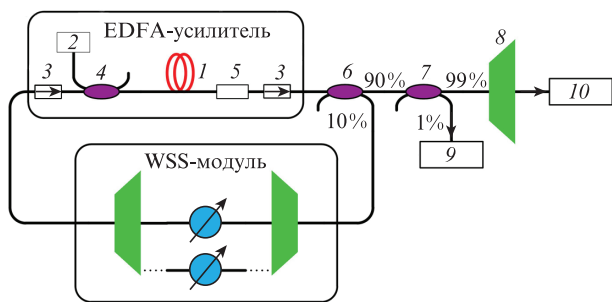


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – активный элемент; 2 – лазер накачки; 3 – оптические изоляторы; 4 – спектрально-селективный объединитель; 5 – спектральный селектор, сглаживающий неравенство коэффициентов усиления каналов; 6 – ответвитель 10%–90%; 7 – ответвитель 1%–99%; 8 – демультиплексор; 9 – спектроанализатор; 10 – измеритель мощности.

печивает ввод излучения накачки в активное волокно. Спектральный селектор 5 сглаживает спектральную неоднородность коэффициента усиления эрбиевого волокна. Около 10% выходного излучения через ответвитель 6 подается на спектрально-селективный переключатель (WSS-модуль), включенный в петлю обратной связи лазера. Спектр пропускания этого модуля соответствует телекоммуникационной сетке частот, а каждый канал содержит отдельный программно-управляемый аттенуатор с динамическим диапазоном перестройки затухания 30 дБ и шагом 0.1 дБ. Второй ответвитель 7 направляет 1% излучения на анализатор спектра 9 (Anritsu MS9710B), который в рабочем диапазоне длин волн 600–1750 нм имеет погрешность измерения  $\Delta\lambda \approx \pm 0.05$  нм при регистрации мощностей от –90 до +10 дБм.

Основная часть излучения через демультиплексор 8 (OM-40-AV-PM), позволяющий разделять излучение по каналам, подается на измеритель мощности 10. Управление оборудованием осуществляется с помощью системы управления «Днепр» через стандартный web-интерфейс. Минимальные суммарные потери в WSS-модуле, ответвителе и патчкордах составляют около 16 дБ.

В экспериментах частоты генерации каналов определяются спектром пропускания спектрально-селективного переключателя WSS и, следовательно, соответствуют телекоммуникационной сетке частот. Для реализации одинаковой мощности генерации заданного числа каналов была принята следующая процедура выравнивания мощностей при фиксированном токе накачки. С помощью аттенуаторов переключателя 6 потери во всех каналах устанавливались минимальными. С шагом, равным 0.1 дБ, дополнительные потери канала с максимальной мощностью увеличивались до тех пор, пока мощность этого канала не становилась меньше, чем другого, ближайшего по мощности канала. Затем те же действия повторялись с другим максимальным по мощности каналом. Такая процедура позволяла выравнивать мощности до семи каналов при частотном расстоянии между ними 600 ГГц (параметр  $H = 0.75$ ) и больше. При этом долговременная относительная нестабильность мощности не превышала 3 дБ. При уменьшении частотного расстояния нестабильность значительно возрастала. В девятиканальном лазере даже при максимальном частотном расстоянии между каналами, равном 500 ГГц ( $H = 0.9$ ), получить стабильную генерацию с примерно одинаковыми мощностями каналов не удалось – минимальный разброс мощностей составлял ~8 дБ.

## 4. Результаты и их обсуждение

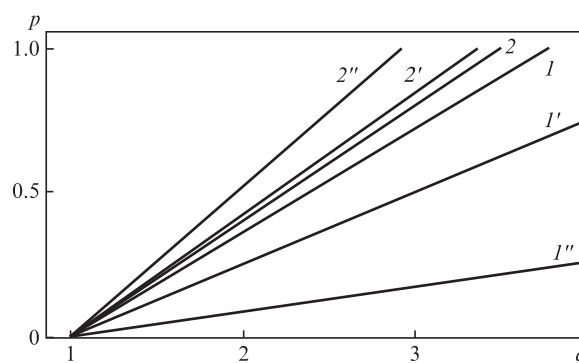
### 4.1. Трехканальный лазер

На рис.2 представлены расчетные зависимости мощностей каналов от параметра  $q$  для различных плотностей частотных каналов. Потери во всех каналах одинаковые, механизм кросс-насыщения влияет так, что мощность второго (центрального) канала всегда меньше мощностей боковых каналов. С увеличением мощности накачки мощностей каналов нарастают линейно, но с разными коэффициентами. По этой причине чувствительность каждого канала к изменению мощностей накачки можно характеризовать производной  $\eta_i = dp_i/dq$ . Плотность расположения каналов, которая в модели определяется параметром  $H$ , существенно влияет на чувствительности разных каналов. При редком расположении каналов (линии 1 и 2 на рис.2) чувствительности  $\eta_i$  всех каналов практически одинаковы. Более плотное расположение каналов (линии 1' и 2') ведет к усилению чувствительностей боковых каналов  $\eta_{1,3}$  и к одновременному снижению чувствительности центрального канала  $\eta_2$ . При плотности расположения каналов, обеспечивающей выполнение условия  $2\zeta_{12} \geq 1 + \zeta_{13}$ , генерация во втором канале не возникает ни при каких значениях  $q$ . Условие  $2\zeta_{12} \geq 1 + \zeta_{13}$  отвечает плотности расположения каналов, соответствующей  $H > 4.5$ . Таким образом, при достаточно плотном расположении частотных каналов в лазере с одинаковыми потерями в каналах трехканальная генерация не реализуется.

Экспериментально трехканальная генерация с одинаковыми потерями в каналах и примерно равными их мощностями при токе накачки  $I_p = 200$  мА реализована в диапазоне частот  $400 \text{ ГГц} < \Delta\nu < 2000 \text{ ГГц}$ , т. е. при относительно невысокой плотности каналов. При увеличении плотности каналов до частотного расстояния между ними  $\Delta\nu = 100 \text{ ГГц}$  (соответствует  $H = 4.5$ ) генерация во втором канале прекращается.

Изменения мощностей каналов с ростом мощности накачки в условиях, когда в боковые каналы введены дополнительные потери  $\delta_1 = \delta_3 = 2.94 \times 10^{-2}$ , иллюстрирует рис.3. Из рис.3,а видно, что мощности трех каналов для  $H = 0.9$  ( $\Delta\nu = 500 \text{ ГГц}$ ) выравниваются при  $q = 3$ . Величина  $\eta_2$  уменьшается скачком при возникновении генерации в первом и третьем каналах. Если частотные каналы расположены не слишком плотно,  $\eta_2$  остается положительным.

Увеличение плотности каналов приводит к тому, что при  $H = 1.45$  происходит потеря чувствительности второго канала к вариации мощности накачки ( $\eta_2 = 0$ ) (рис.3,б).

Рис.2. Мощности  $p$  второго ( $1, 1', 1''$ ) и двух боковых ( $2, 2', 2''$ ) каналов в зависимости от параметра  $q$  при одинаковых потерях в каналах для  $H = 0.8$  ( $1, 2$ ),  $1$  ( $1', 2'$ ) и  $3$  ( $1'', 2''$ ).

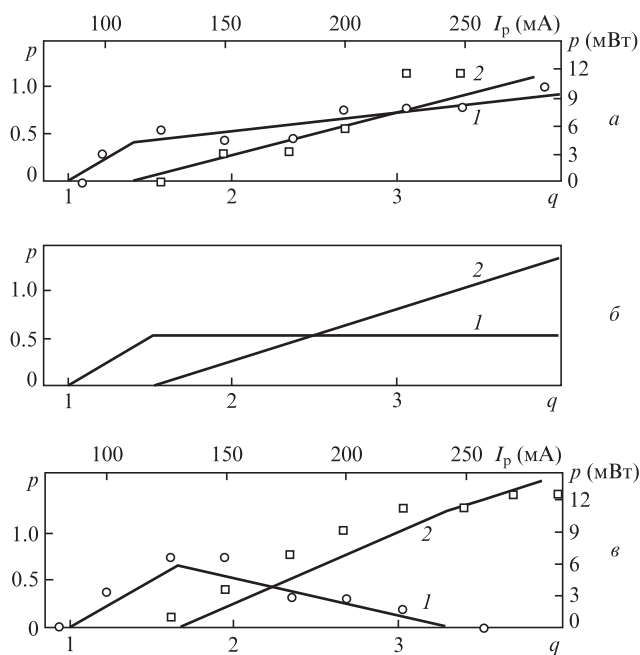


Рис.3. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости мощностей  $p$  второго (1,  $\circ$ ) и двух боковых (2,  $\square$ ) каналов от параметра  $q$  и тока накачки  $I_p$  при наличии дополнительных потерь в боковых каналах для  $H = 0.9$  (а), 1.45 (б) и 2 (в).

Дальнейшее повышение плотности каналов усиливает их конкуренцию до такой степени, что увеличение мощности накачки приводит к подавлению генерации в центральном канале ( $\eta_2 < 0$ ). С увеличением мощности накачки ( $q = 3.4$ ) мощность генерации второго (центрального) канала снижается до нуля (рис.3,в).

В эксперименте были реализованы режимы генерации с частотным расстоянием между каналами 500 ГГц (что соответствует условиям расчета для рис.3,а) и 200 ГГц (что близко соответствует условиям расчета для рис.3,в) и шириной спектра генерации каналов менее 0.05 нм (разрешающая способность используемого спектроанализатора). Выравнивание мощностей генерации происходит при токе накачки  $I_p = 225$  мА (рис.3,а), подавление генерации в центральном канале – при  $I_p = 260$  мА (рис.3,в). Режим, отвечающий условиям расчета для рис.3,б, экспериментально реализовать не удалось из-за отсутствия возможности плавного изменения плотности расположения каналов (в эксперименте она изменяется дискретно с шагом 100 ГГц).

Таким образом, для достаточно плотного расположения каналов при небольшой мощности накачки генерация имеет место во втором канале, при большой мощности – в двух боковых каналах, а при промежуточной мощности генерация является трехканальной.

#### 4.2. Пятиканальный лазер

Расчеты показывают, что для одинаковых потерь во всех каналах поведение мощностей каналов с изменением мощности накачки имеет такие же основные закономерности, как и для трехканального лазера. В эксперименте с одинаковыми потерями в каналах стабильная пятиканальная генерация реализуется при не слишком плотном расположении каналов ( $\Delta\nu > 500$  ГГц). При  $\Delta\nu < 400$  ГГц пятиканальная генерация нестабильна, наблюдается большой разброс мощностей каналов и сильные временные

флуктуации мощности. При  $\Delta\nu = 100$  ГГц четные каналы подавляются. В этом случае реализуется трехканальный режим генерации с  $\Delta\nu = 200$  ГГц.

Расчетные зависимости мощностей каналов от параметра  $q$  показаны на рис.4 для дополнительных потерь в каналах  $\delta_{1,5} = 1.34 \times 10^{-2}$ ,  $\delta_{2,4} = 6.32 \times 10^{-4}$ . Вне зависимости от плотности каналов генерация возникает при  $q = 1$  в центральном (третьем) канале, который не имеет дополнительных потерь. С ростом мощности накачки генерация появляется в двух других каналах в зависимости от потерь и  $\Delta\nu$  (на рис.4 – в четных каналах). При этом величина  $\eta_3$  изменяется скачком, оставаясь либо положительной (вставки на рис.4,а), либо отрицательной (вставки на рис.4,б и в). В последнем случае генерация в центральном канале подавляется достаточно быстро из-за относительно малых дополнительных потерь в четных каналах. Так, на рис.4,б мощность  $p_3 = 0$  уже при  $q = 1.03$ . При дальнейшем росте мощности накачки наибольшие изменения претерпевают четные каналы, которые испытывают влияние двух соседних каналов.

При низкой плотности каналов (рис.4,а) их взаимное влияние ослаблено, поэтому мощности каналов во всем диапазоне изменения мощности накачки остаются достаточно близкими. В то же время видно, что при достижении порога в первом канале при  $q = 1.2$  величина  $\eta_2$  скачком снижается. Равенство мощностей каналов для данных дополнительных потерь достигается при  $q = 3$ .

При повышенной плотности каналов (рис.4,б) после подавления генерации в центральном канале в области  $1.04 < q < 1.27$  реализуется двухканальная генерация в четных каналах. С ростом мощности накачки после достижения порога в первом и пятом каналах при  $q = 1.27$  генерация становится четырехканальной, при этом  $\eta_{2,4}$  снижается. Дальнейшее увеличение мощности накачки приводит к повторному достижению порога в центральном канале при  $q = 1.8$ , после чего генерация становится пяти-

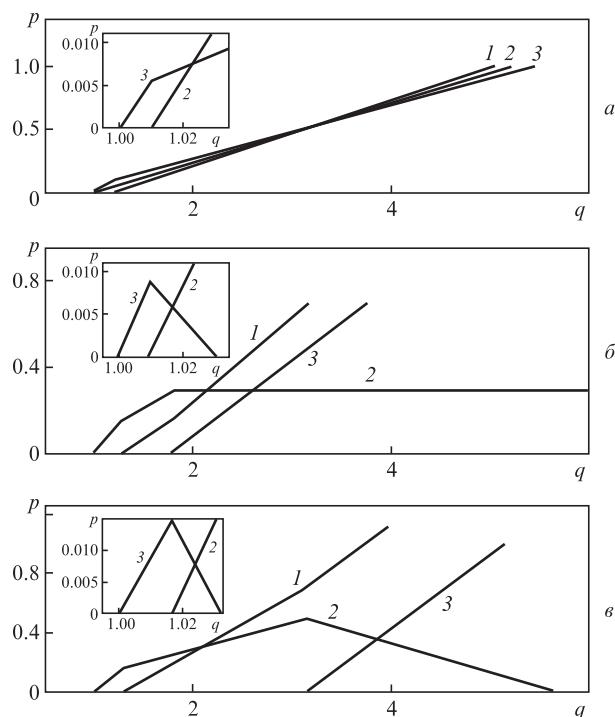


Рис.4. Зависимости мощностей первого и пятого каналов (1), второго и четвертого каналов (2) и третьего канала (3) от параметра  $q$  для пятиканального лазера при  $H = 1$  (а), 1.66 (б) и 2.1 (в).



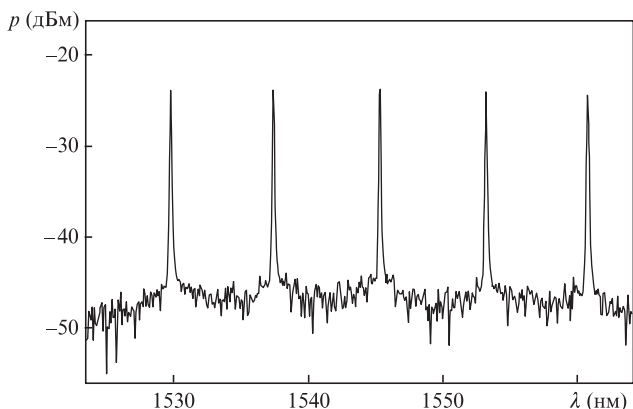


Рис.5. Спектр пятиканальной генерации с малой плотностью каналов.

канальной. Особенностью лазера с выбранным для данного случая значением  $H$  является потеря чувствительности четных каналов к изменению мощности накачки ( $\eta_{2,4} = 0$ ).

При повышенной плотности каналов появляется другая особенность: рост мощности накачки приводит к подавлению генерации в четных каналах. На рис.4,б в центральном канале порог генерации достигается при  $q = 3.25$ , а при  $q = 5.65$  генерация во втором и четвертом каналах полностью прекращается. Таким образом, для достаточно плотного расположения каналов при малой мощности накачки возможна двухканальная генерация, с увеличением мощности накачки генерация становится четырех- и пятиканальной. При большой мощности накачки генерация остается трехканальной.

На рис.5 показан спектр пятиканальной генерации с малой плотностью каналов ( $\Delta\nu = 1$  ТГц,  $H = 0.45$ ), реализованной экспериментально при токе накачки  $I_p = 170$  мА. Частота центрального канала составляет 194 ТГц. Выбором дополнительных потерь в каналах (исключая центральный) удается выравнять мощности в пяти каналах с точностью  $\sim 1$  дБ.

Сравнение теории с экспериментом в случае пятиканального лазера показало качественное совпадение результатов: при плотном расположении каналов ( $H = 2.1$ ) с увеличением мощности накачки наблюдается подавление генерации в четных каналах и переход к трехканальной генерации. Также наблюдается совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей суммарной вы-

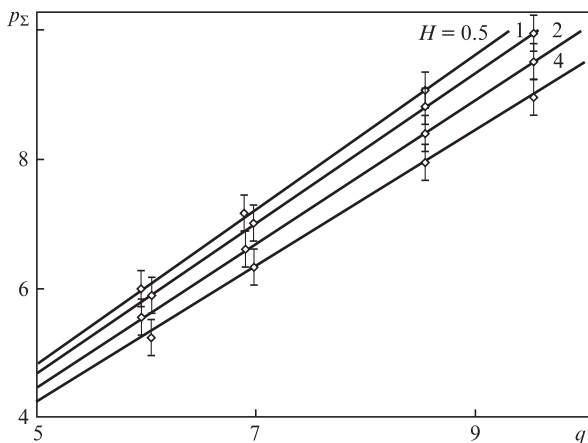


Рис.6. Зависимости суммарной выходной мощности от параметра  $q$  для пятиканального лазера при различных  $H$ . Линии – расчет, точки – эксперимент.

ходной мощности от параметра  $q$  при различных плотностях расположения каналов (рис.6).

### 4.3. Девятиканальный лазер

С увеличением числа каналов и при достаточно большой их плотности ( $H > 1.5$ ) реализовать равенство стационарных мощностей каналов становится затруднительным. Расчеты показывают, что вариации потерь, вводимых в отдельные каналы, вызывают колебания мощностей всех каналов, которые затухают с чрезвычайно малым инкрементом. На рис.7 представлен этап переходного процесса на стадии  $\tau \geq 1 \times 10^5$  (временные зависимости мощностей первых пяти каналов). Полное время переходного процесса  $\tau \approx 3 \times 10^5$  (реальное время около 3 с). Мощности остальных четырех каналов, симметричных относительно пятого, близки к представленным на рис.7, однако полного совпадения не наблюдается. Кривая, описывающая изменение мощности каждого канала, имеет отдаленное сходство с синусоидой, колебания в соседних каналах, как и следовало ожидать, происходят в противофазах.

В эксперименте всегда присутствуют шумы, вызывающие низкочастотные колебания мощности. По этой причине генерация с примерно равными мощностями девяти каналов реализуется при еще меньшей плотности каналов. На рис.8 показан экспериментально измеренный спектр генерации для  $\Delta\nu = 500$  ГГц ( $H = 0.9$ ) при токе накачки  $I_p = 250$  мА. Шаг изменения дополнительных потерь в каждом канале, создаваемых аттенуатором, равен 0.1 дБ. Стабилизировать мощности каналов в эксперименте не удается – сохраняются пульсации до 7 дБ (среднеквадратичное отклонение не превышает 3.2 дБм).

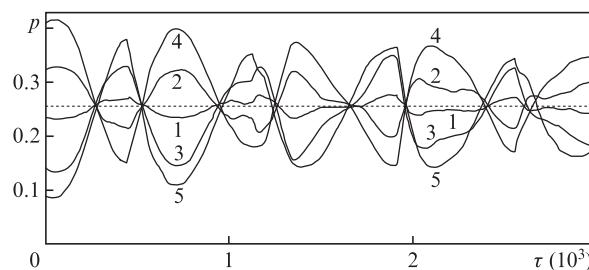


Рис.7. Динамика мощностей первых пяти каналов девятиканального лазера ( $q = 3$ ,  $H = 1.8$ ). Номера каналов указаны цифрами. Пунктирная линия – расчетная стационарная мощность, одинаковая для всех каналов.

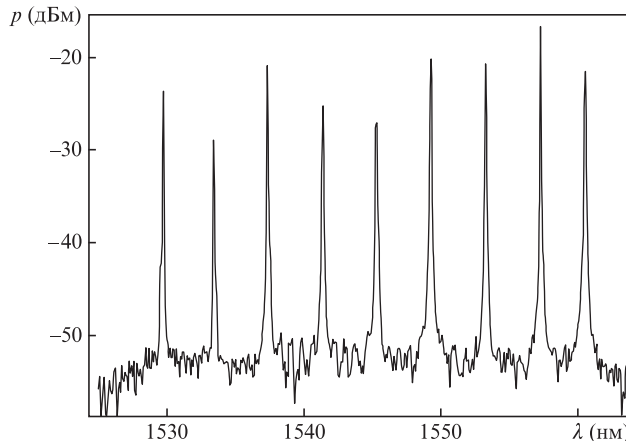


Рис.8. Нестабильность мощностей девяти каналов (эксперимент).

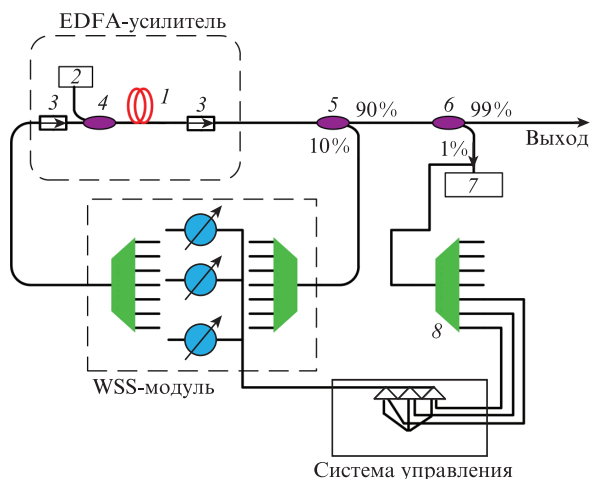


Рис.9. Схема многоканального лазера с активной аппаратной стабилизацией мощностей каналов:

1 – активный элемент; 2 – лазер накачки; 3 – оптические изоляторы; 4 – спектрально-селективный объединитель; 5 – ответвитель 10%–90%; 6 – ответвитель 1%–99%; 7 – спектроанализатор; 8 – демultipлексор.

Нестабильность генерации, возникающая при большой плотности каналов или при достаточно большом их числе, ограничивает область практического применения девятиканальных лазеров. Это ограничение может быть снято путем активной аппаратной стабилизации мощностей каналов, которая позволит не только кардинально уменьшить продолжительность переходных процессов, но и устранить низкочастотные паразитные флуктуации.

Схема многоканального лазера с активной аппаратной стабилизацией мощностей каналов приведена на рис.9. Принцип работы заключается в следующем: часть выходного излучения после 1%-ного ответвителя демultiplexируется и подается в систему управления, на входе которой фотодетекторы формируют сигналы, пропорциональные мощностям соответствующих каналов. Эти сигналы сравниваются с соответствующими управляющими напряжениями, которые формируются системой управления в соответствии с требуемой мощностью канала, определяемой пользователем. Система управления вырабатывает сигнал ошибки, пропорциональный разности измеренной в канале и установленной самой системой мощностей. Сигнал ошибки подается на управляемый аттенюатор, вносящий дополнительные потери, пропорциональные сигналу ошибки. Тем самым замыкается цепь отрицательной обратной связи, обеспечивающей стабилизацию заданных выходных мощностей каналов.

## 5. Заключение

Показано, что результаты расчетов характеристик генерации многоканальных эрбиевых лазеров, выполненных

на основе модели, в которой используются спектрально зависимые коэффициенты кросс-насыщения каналов, согласуются с экспериментальными результатами.

Экспериментально установлено, что в многоканальном эрбиевом лазере конкуренция каналов заметно возрастает в том случае, когда частотное расстояние между ними меньше полуширины спектрального провала в контуре усиления (примерно 450 ГГц). Усиление конкуренции каналов не позволяет получить высокостабильную генерацию с большим числом каналов.

Теоретически и экспериментально показано, что в лазерах с числом каналов, равным девяти и более, возмущения, которые возникают при вариациях потерь, имеют столь малые инкременты затухания, что колебания мощности продолжают в реальном времени в течение нескольких секунд. Поэтому в эксперименте даже слабые низкочастотные шумы способны «подпитывать» такие колебания. Использование активной стабилизации мощностей каналов позволит создать лазеры с необходимым для тестирования телекоммуникационных линий связи числом каналов.

- Zhang C., Zhao J.F., Miao C.Y. *Laser Phys.*, **22**, 1573 (2012).
- Басов Н.Г. и др. *Квантовая электроника*, **11**, 1084 (1984).
- Кравцов Н.В., Наний О.Е., Шабатько Н.В. *Квантовая электроника*, **19**, 851 (1992).
- Nanii O.E. et al. *Laser Phys.*, **18**, 1238 (2008).
- Jiao M.-X. et al. *J. Phys. Conf. Ser.*, **48**, 1482 (2007).
- Yao J.P. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 314 (2009).
- Наний О.Е. *Квантовая электроника*, **19**, 762 (1992).
- Hu Z.L., Xu P., Jiang N. *Laser Phys.*, **22**, 1590 (2012).
- Кирьянов А.В. и др. *Вестник Моск. ун-та*, №1, 81 (1986).
- Наний О.Е., Шелаев А.Н. *Квантовая электроника*, **16**, 1122 (1989).
- Schwartz S., Gutty F., Feugnet G., Loil É., Pocholle J. *Opt. Lett.*, **34**, 3884 (2009).
- McKay A., Dawes J.M., Park J.D. *Opt. Express*, **15**, 16342 (2007).
- Зеленин Д.В. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 5 (2002).
- Gurkin N.V. et al. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 095103 (2014).
- Юшко О.В. и др. *Квантовая электроника*, **45**, 75 (2015).
- Redyuk A.A. et al. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 025101 (2015).
- Gainov V.V. et al. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 075107 (2013).
- Гуркин Н.В. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 546 (2013).
- Konyshev V.A. et al. *Opt. Commun.*, **349**, 19 (2015).
- Konyshev V.A. et al. *Opt. Commun.*, **355**, 279 (2015).
- Redyuk A.A. et al. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 025101 (2015).
- Гайнов В.В. и др. *ЖТФ*, **85**, 83 (2015).
- Попов Д.А. и др. *Вестник Моск. ун-та*, №5, 61 (2015).
- Park N., Wysocki P.F. *Photonics Technol. Lett.*, **8**, 1459 (1996).
- Chen D., Qin S., He S. *Opt. Express*, **15**, 930 (2007).
- Zhan L. et al. *Opt. Express*, **14**, 10233 (2006).
- Chen Z., Ma S., Dutta N.K. *Opt. Express*, **17**, 1234 (2009).
- Zhang Z.X. et al. *Opt. Lett.*, **33**, 324 (2008).
- Feng X.H., Tam H.Y., Wai P.K.A. *Opt. Express*, **14**, 8205 (2006).
- Feng X.H. et al. *Opt. Commun.*, **268**, 278 (2006).
- Liu X. et al. *Opt. Express*, **20**, 7088 (2012).
- Наний О.Е. *Квантовая электроника*, **23**, 17 (1996).
- Bolshtyansky M. *J. Lightwave Technol.*, **21**, 1032 (2003).