Многоканальный волоконный лазер, согласованный по частоте с телекоммуникационной сеткой частот

Д. А. Попов^{1,2,*a*}, А. Б. Васильев¹, В. Г. Воронин¹, О. Е. Наний^{1,2,*b*}, В. Н. Трещиков²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Научно-технический центр «Т8».

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, д. 44, стр. 1. E-mail: ^a popov.demid@gmail.com, ^b naniy@t8.ru

Статья поступила 03.04.2015, подписана в печать 28.06.2015.

Предложен многоканальный кольцевой лазер на основе волокна, легированного эрбием, в котором пространственное разделение 40 спектральных каналов создается парой дисперсионных элементов: мультиплексор и демультиплексор. Реализована и экспериментально исследована двух- и трехканальная генерация с возможностью переключения каналов и управления мощностями. Долговременная стабильность двух- и трехканальной генерации в масштабе времени, определяемом часами, не хуже 10%. Генерационные характеристики удовлетворительно описываются простой феноменологической моделью, в которой взаимодействие каналов, обусловленное насыщением активной среды, определяется коэффициентами кросс-насыщения, зависящими от частотного расстояния между каналами. Наблюдается хорошее согласие экспериментально измеренной спектральной зависимости коэффициента кросс-насыщения с данными измерения формы спектральных дыр в спектрах усиления эрбиевых усилителей. В трехканальном режиме генерации обнаружен и объяснен эффект подавления центрального канала при увеличении мощности накачки.

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

УДК: 621.372.8. PACS: 42.81.Uv.

Введение

Интерес к лазерам, генерирующим на нескольких длинах волн, объясняется широкими возможностями их применения в различных областях науки и техники. Многочастотные лазеры обладают преимуществами перед одночастотными в интерферометрии, дальнометрии, голографии, мониторинге окружающей среды, дифференциальных методах измерений. На их основе могут быть созданы высокочувствительные и прецизионные оптические приборы и системы [1-6]. В последнее время начаты исследования возможности использования многоканальных лазеров в радиофотонике [7]. Еще одной областью применения многоканальных лазеров является волоконно-оптическая связь (ВОЛС), где они могут использоваться для тестирования многоканальных систем связи со спектральным мультиплексированием (DWDM) [8-15].

Исторически первыми были созданы и исследованы многоканальные газовые лазеры ввиду того, что их активная среда имеет неоднородное уширение и получить стабильную многоканальную генерацию достаточно просто [2, 5]. Следующим этапом стала замена газовой активной среды на твердотельную, что позволило существенно увеличить долговечность, надежность, экономичность и технологичность многоканальных лазеров [16–19].

Для ослабления сильного конкурентного взаи-

модействия между каналами генерации, обусловленного однородным уширением линии усиления твердотельных лазеров, был предложен и исследован ряд методов. Наиболее универсальный способ выравнивания мощностей каналов генерации состоит в автоматической подстройке потерь индивидуальных каналов. Этим методом были получены высокостабильные двунаправленные режимы генерации в кольцевых твердотельных лазерах [3, 20]. Для ослабления конкуренции мод было также предложено использовать пространственное и поляризационное разделение каналов в активной среде [18, 19, 21–25], а также нелинейно-оптические методы стабилизации многоканальной генерации [26–28].

Для тестирования современных высокоскоростных волоконно-оптических систем связи со спектральным мультиплексированием (DWDM-систем связи) требуется многоканальный источник излучения с перестройкой длин волн каналов в диапазоне длин волн 1530–1560 нм [8–14]. Наиболее перспективным источником такого типа является эрбиевый волоконный лазер (EDFL), многоканальные режимы генерации которого исследовались ранее в ряде работ [1, 29–32].

В работе [1] было показано, что при тщательной подстройке потерь в каналах генерации может быть получена стабильная двухканальная генерация с заданными длинами волн каналов генерации. Однако конструкция лазера не обеспечивала перестройку длины волны во всем С-диапазоне и не позволяла получать многоканальную генерацию с числом каналов больше двух.

В настоящей работе в качестве узкополосного фильтра использован телекоммуникационный спектральный мультиплексор/демультиплексор, применяемый в волоконно-оптических линиях связи для создания стандартной сетки спектральных частот [11-15] с шагом 100 ГГц. Конструкция разработанного нами лазера позволяет исследовать возможность создания многоканальной генерации с числом каналов от 2 до 40. Детально исследованы выходные характеристики двухканальной и трехканальной генерации разработанного лазера, показана возможность перестройки каждого из каналов во всем С-диапазоне спектра (1530–1560 нм). В режиме трехканальной генерации обнаружен и объяснен эффект подавления центрального канала при увеличении мощности накачки.

Описание экспериментальной установки

Схема предложенного многоканального лазера приведена на рис. 1. В качестве усиливающей среды использовался стандартный эрбиевый волоконный усилитель, применяемый в сетях оптической связи. Активный элемент — легированное эрбием волокно 1 — накачивается излучением полупроводникового лазера 2 с длиной волны 980 нм. Ток накачки регулируется в диапазоне от 60 до 300 мА. Однонаправленная генерация обеспечивалась встроенными в усилитель оптическими изоляторами 3 на входе и выходе, которые предотвращают проникновение в усилитель отраженных сигналов. Из усилителя излучение подается в 40-канальный мультиплексор/демультиплексор ОМ-40-AV-РМ 4, делящий излучение на 40 каналов Расстояние между спектральными каналами мультиплексора равно 100 ГГц. Выходы рабочих каналов соединены с входами перестраиваемых аттенюаторов 5, выходы которых соединены с входами соответствующих каналов второго мультиплексора 6. После объединения каналов мультиплексором 6 излучение направляется на вход усилителя. Управление затуханием осуществлялось индивидуально для каждого канала при помощи программно управляемых 5. Динамический диапазон переаттенюаторов стройки затухания аттенюаторов VOA — от 0.1 до 30 дБ. Пара мультиплексор — демультиплексор обеспечивает пространственное разделение, а затем объединение до 40 спектральных каналов. Часть излучения выводится из резонатора при помощи 10% ответвителя 7, после чего оно еще раз делится с помощью 1%-го ответвителя 8 и подается на анализатор спектра 9 Anritsu MS9710B (1%) и мультиплексор 10 ОМ-40-АV-РМ (99%), с помощью которого происходило грубое измерение мощностей на каждом канале при первоначальной подстройке. Оптический анализатор спектра Anritsu MS9710B позволяет регистрировать излучение в диапазоне от 600 до 1750 нм с мощностями от -90 до +10 дБм. Погрешность измерения $\Delta\lambda$ по длинам волн ± 50 пм.

Двухканальная генерация исследовалась как при использовании общей схемы многоканального лазера (рис. 1), так и при использовании упрощенной схемы, в которой демультиплексор ОМ-40-AV-РМ6 был заменен на 50%-й ответвитель. Результаты, представленные в следующем разделе, получены при использовании двух схем: общей и упрощенной.

Исследование двухканальной генерации

В результате проведенных исследований продемонстрирована стабильная генерация любых пар каналов в заданном диапазоне — от ближайших C38 (1546.92 нм) — C40 (1545.32 нм) (0.80 нм) до наиболее удаленных C21 (1560.61 нм) — C40 (1545.32 нм) (15.29 нм) при токе накачки больше 250 мА. При токе 300 мА мощности двух каналов (C21 и C40) после выравнивания аттенюатором VOA равны — 15.78 и — 15.09 дБм соответственно. Уменьшение тока накачки до величины менее 200 мА приводит к значительным изменениям отношения выходных мощностей каналов.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — волокно, легированное эрбием, 2 — диодная накачка, 3 — оптический изолятор, 4, 6, 9 — мультиплексоры, 5 — перестраиваемый аттенюатор, 7, 8 — оптический ответвитель, 10 — оптический анализатор спектра

При изменении тока накачки наблюдались немонотонные зависимости мощностей каналов от тока накачки, которые можно объяснить вариациями поляризационно-зависимых потерь каналов при изменении накачки. Экспериментальные измерения показали, что чувствительность к изменению потерь в одном канале существенно больше, чем к изменению потерь в двух каналах одновременно. Чувствительность к изменению потерь в одном канале увеличивается при уменьшении расстояние между каналами и, наоборот, уменьшается при увеличении расстояния между каналами. В эксперименте потери канала регулировались изменением коэффициента пропускания VOA. Зависимости мощностей каналов от коэффициента пропускания VOA управляемого канала, приведены на рис. 2. Получены характерные для двухканальной генерации Х-образные характеристики.

Была исследована временная стабильность двухканальной генерации для различных пар каналов при токе накачки 300 мА. Временная нестабильность двух каналов с большим спектральным расстоянием (C21 и C40) не превышает 0.6%, в то время как временная нестабильность мощностей более близких каналов (C36 и C40) достаточно высока и достигает 3%. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при накачке 300 мА устойчивая двухканальная генерация может быть получена на любой паре из 40 спектральных каналов стандартной сетки телекоммуникационных частот в диапазоне от 196.1 ТГц (1528.77 нм) до 192.20 ТГц (1559.79 нм). Соответствие номеров спектральных каналов частоте (длине волны) в сетке стандарта международного союза электросвязи приведено в [36].

Исследование трехканальной генерации

Трехканальная генерация была получена на любой тройке из 40 каналов. Как и в случае двухканальной генерации, стабильность трехканальной генерации увеличивается при увеличении расстояния между каналами. Экспериментально продемонстрировано переключение каналов генерации лазера в процессе его работы. Минимальное расстояние между рабочими каналами составляло 100 ГГц (генерируют соседние каналы).

На рис. 3, а приведен спектр трехканальной генерации с рабочими каналами 39 (1559.79 нм), 40 (1560.61 нм) и 41 (1561.42 нм). При увеличении тока накачки в этом режиме наблюдается уменьшение мощности центрального канала при увеличении мощностей двух других каналов (рис. 3, б).



Рис. 2. Зависимости мощностей каналов от потерь на управляемом канале. Черным обозначен канал, на котором управляют потерями. $T_{\rm voa}$ — коэффициент пропускания аттенюатора. На врезке показаны номера каналов



Рис. 3. Спектр трехканальной генерации при расстоянии между каналами 100 МГц (а) и зависимости выходных мощностей каналов от тока накачки (б)

Теоретически объяснить этот результат удается в предположении, что коэффициенты кросс-насыщения уменьшаются с увеличением расстояния между ними. Проведенные нами измерения коэффициентов кросс-насыщения подтверждают данное предположение (см. следующий раздел).

При расстоянии между генерирующими каналами более 400 ГГц трехканальная генерация сохраняется в широком диапазоне мощностей накачки, при этом с увеличением мощности накачки монотонно увеличиваются мощности всех трех генерируемых каналов.

Анализ экспериментальных результатов

Для описания лазера с несколькими каналами генерации воспользуемся феноменологическими уравнениями балансного приближения, учитывающими взаимодействие каналов генерации через насыщение инверсной населенности [33]. Важнейшими параметрами, определяющими особенности многоканальной генерации лазера, являются коэффициенты кросс-насыщения. Система уравнений для нормированных мощностей и коэффициентов усиления каналов имеет следующий вид:

$$\frac{dI_i}{d\tau} = [(n_i - 1 + \delta_i)I_i]G,$$

$$\frac{dn_i}{d\tau} = \alpha_i - n_i \left(1 + I_i + \sum_{i \neq j} \zeta_{ij}I_j\right),$$
(1)

где α_i — превышения накачек над порогом в соответствующих каналах генерации в предположении, что генерация в соседних каналах отсутствует; $G = T_1/\tau_{\text{phot}}$ — отношение времени релаксации инверсной населенности к временам затухания поля в резонаторе; I_i — нормированные мощности излучения соответствующих каналов; ζ_{ij} — коэффициенты кросс-насыщения; n_i — нормированные коэффициенты усиления соответствующих каналов; δ_i — нормированные дополнительные потери соответствующих каналов; $\tau = t/T_1$ — нормированное время.

Двухканальная генерация устойчива только если оба коэффициента кросс-насыщения меньше единицы. В этом случае с увеличением мощности накачки выходные мощности обоих каналов возрастают. Стационарные решения системы (1) для случая двух каналов, в которых потери изменяются только в первом канале ($\delta_1 \equiv \delta$, $\delta_2 = 0$), а коэффициенты кросс-насыщения одинаковы ($\zeta_{12} = \zeta_{21} \equiv \zeta$), имеют следующий вид [33]:

$$I_1 = \frac{\left(\frac{\alpha}{1+\delta} - 1\right) + \zeta(\alpha - 1)}{1 - \zeta^2},$$

$$I_2 = \frac{(\alpha - 1) + \zeta\left(\frac{\alpha}{1+\delta} - 1\right)}{1 - \zeta^2}.$$
(2)

Как следует из выражений (2), зависимости мощностей каналов от потерь в одном из них имеют X-образную форму в области двухканальной генерации. Чувствительность к потерям минимальна при $\zeta = 0$, увеличивается с ростом ζ и максимальна при $\zeta = 1$. В последнем случае X-образная зависимость превращается в ступенчатую, а область существования двухканальной генерации уменьшается до нуля: при изменении потерь происходит переключение канала генерации.

По экспериментально измеренным зависимостям мощностей двух каналов от потерь в одном из них можно определить коэффициент кросс-насыщения ζ . Для этого подбирается такое значение ζ , при котором теоретические зависимости $I_{1,2}(\delta)$ лучше всего совпадают с экспериментальными. Для примера на рис. 4, *а* приведены экспериментальные и теоретические зависимости мощностей двух каналов от дополнительных потерь в первом канале. Теоретические зависимости построены в результате численного решения уравнений (1) с подгонкой значения коэффициента кросс-насыщения. Как видно из рисунка, наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей при



Рис. 4. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные кривые) зависимости мощностей двух каналов от пропускания аттенюатора одного из каналов: совпадение экспериментальных зависимостей с теоретическими обеспечивается подбором значения коэффициента кросс-насыщения ζ (а). Зависимость коэффициента кросс-насыщения ζ от расстояния между каналами (б)

коэффициенте кросс-насыщения $\zeta = 0.78$. Экспериментальные зависимости получены для каналов 21 и 40, расстояние между каналами 1.9 ТГц.

По данной методике были определены значения коэффициентов кросс-насыщения для различных пар каналов. Оказалось, что коэффициенты кросс-насыщения ζ в первом приближении зависят только от разности частот (длин волн) генерирующих каналов (см. рис. 4, б): коэффициент кросс-насыщения увеличивается при сближении каналов и уменьшается при увеличении частотного интервала между ними. Зависимость ζ от разности частот каналов можно аппроксимировать колоколообразной кривой (на рис. 4, б приведена половина такой кривой, построенная для зависимости ζ от модуля частотного интервала между каналами). Ширина получаемой кривой совпадает с независимыми измерениями ширины спектральных дыр усиления в усилителях [34]. Механизм ослабления конкуренции в эрбиевом лазере (т.е. механизм, обеспечивающий выполнение неравенства $\zeta < 1$) тот же, который отвечает за формирование провала в спектре усиления эрбиевых усилителей. Обсуждение этого вопроса содержится в работе [34] и в цитируемой там литературе. На наш взгляд, полной ясности в механизме формирования спектрального провала усиления в эрбиевых усилителях до сих пор нет, и требуются дальнейшие исследования. Без привлечения механизма выжигания спектрального провала усиления не удается объяснить относительного провала усиления не удается объяснить относительно высокую стабильность двухканальной генерации, особенно при разности частот между генерируемыми каналами более 300 ГГц, что отмечалось ранее в работе [35].

Как следует из анализа системы уравнений (1) и подтверждается экспериментально, двухканальная генерация при равных потерях и коэффициентах усиления каналов устойчива при любой мощности накачки, превышающей пороговое значение, если нормированные коэффициенты кросс-насыщения меньше единицы ($\zeta < 1$).

Трехканальная генерация, как следует из анализа системы уравнений (1), также устойчива при равных потерях и коэффициентах усиления каналов, если коэффициенты кросс-насыщения ζ_{ij} для любой пары каналов меньше единицы ($\zeta_{ij} < 1$) и, кроме того, равны между собой: $\zeta_{12} = \zeta_{23} = \zeta_{13}$. Но, как следует из рис. 4, δ , коэффициенты кросс-насыщения крайних каналов ζ_{13} меньше, чем коэффициенты ζ_{12} , ζ_{23} кросс-насыщения центрального канала крайними: $\zeta_{13} < \zeta_{12}$, ζ_{23} . В этом случае при выполнении условия

$$\zeta_{12} = \zeta_{23} > \frac{1 + \zeta_{13}}{2} \tag{3}$$

трехмодовая генерация не реализуется, так как центральный канал подавлен (считаем, что $\zeta_{12} = \zeta_{23}$ и $\zeta_{ij} = \zeta_{ji}$ для любой пары индексов). Получить трехканальную генерацию при таких условиях можно, если увеличить потери для каналов с номерами 1 и 3. В этом случае, как показывает численное решение системы уравнений (1), при увеличении мощности накачки сначала возникает генерация в канале 2, мощность которого увеличивается при увеличении мощности накачки до тех пор, пока не будет преодолен порог генерации для каналов 1 и 3. При дальнейшем увеличении накачки мощности 1-го и 3-го каналов возрастают, а мощность 2-го канала уменьшается до нуля.

Численное решение системы уравнений (1) показало, что при расстоянии между каналами больше 300 ГГц, когда коэффициенты кросс-насыщения приблизительно одинаковы (см. рис. 4, δ), трехканальная генерация устойчива и мощности всех трех каналов монотонно увеличиваются с увеличением мощности накачки. Если расстояние между каналами составляет 100 ГГц, то при увеличении мощности накачки центральный канал подавляется (см. рис. 3).

Заключение

Таким образом, в волоконном эрбиевом лазере получена одновременная генерация на двух и трех длинах волн. В качестве узкополосных фильтров, определяющих длины волн генерации, использован мультиплексор, применяемый в волоконно-оптических линиях связи для создания стандартной сетки DWDM. Это позволяет относительно просто переключать длины волн генерируемых каналов. Долговременная стабильность в масштабе времени, определяемом часами, не хуже 10%.

В двухволновом режиме генерации расстояние между каналами можно регулировать в диапазоне от 100 ГГц до 4 ТГц с шагом 100 ГГц. Генерационные характеристики описываются простой моделью, в которой взаимодействие каналов обусловливается насыщением активной среды с одним свободным параметром — относительным коэффициентом кросс-насыщения. Наблюдается хорошее согласование экспериментальных данных с результатами теоретического анализа. Кросс-насыщение максимально для соседних каналов и уменьшается с увеличением расстояния между рабочими каналами. Двухчастотная генерация всегда стабилизируется при увеличении мощности накачки. В трехчастотном режиме при увеличении мощности накачки наблюдается уменьшение интенсивности центрального по частоте канала при расстоянии между каналами 100 ГГц.

Список литературы

- Zhang C., Zhao J.F., Miao C.Y. // Las. Phys. 2012. 22, N 10. P. 1573.
- 2. Басов Н.Г., Губин М.А., Никитин В.В., Проценко Е.Д. // Квант. электроника. 1984. **11**, № 6. С. 1084. (Basov N.G., Gubin M.A., Nikitin V.V., Protsenko E.D. // Sov. J. Quantum Electron. 1984. **14**, N 6. P. 731.)
- Наний О.Е. Высокостабильные многоканальные твердотельные лазеры: Дисс. ... доктора физ.-мат. наук. М., 1999.
- Nanii O.E., Pavlova E.G., Susyan A.A., Hoan B.T. // Las. Phys. 2008. 18, N 11. P. 1238.
- 5. Aronowitz F.// Laser Applications. 1971. N. 1.
- 6. Jiao M.-X. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2007. 48. P. 1482.
- 7. Yao J.P. // J. Lightwave Technol. 2009. 27, N 3. P. 314.
- Weinert C.M. et al. // J. Lightwave Technol. 1999. 17. P. 2276.
- Hayee M.I., Willner A.E. // IEEE Photonics Technology Letters. 1999. 11. P. 991.
- Arikawa M. et al. // OFC/NFOEC. 2012. Paper NTh1I.4.
- 11. Gurkin N.V. et al. // Laser Phys. Lett. 2014. 11. 095103.
- 12. Юшко О.В., Наний О.Е., Редюк А.А. и др. // Квант. электроника. 2015. **45**, № 1. С. 75. (Yushko O.V. et al. // Quantum Electron. 2015. **45**, N 1. P. 75.)
- Redyuk A.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N. et al. // Laser Phys. Lett. 2015. 12. 025101.
- Gainov V., Gurkin N.V., Lukinih S.N. et al. // Laser Phys. Lett. 2013. 10, N 7. 075107.

- 15. Гуркин Н.В., Капин Ю.А., Наний О.Е. и др. // Квант. электроника. 2013. **43**, № 6. С. 550. (*Gurkin N.V.* et al. // Quantum Electron. 2013. **43**, N 6. P. 550.)
- Gudelev V.G., Mashko V.V., Nikeenko N.K. et al. // Applied Phys. 2003. B76. P. 249.
- 17. Gouet J.L., Morvan L., Alouini M. et al. // Opt. Lett. 2007. **32**, N 9. P. 1090.
- Воронин В.Г., Долгалева К.П., Наний О.Е. // Квант. электроника. 2000. **30**, № 9. С. 778. (Voronin V.G. et al. // Quantum Electron. 2000. **30**, N 9. P. 778.)
- Воронин В.Г., Наний О.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 4. С. 64. (Voronin V.G., Nanii O.E. // Moscow University Phys. Bull. 1999. 54, N 4. P. 86.)
- Доценко А.В., Корниенко Л.С., Кравцов Н.В. и др. // Квант. электроника. 1986. 13, № 1. С. 95. (Dotsenko A.V. et al. // Sov. J. Quantum Electron. 1986, 16, № 1, Р. 58.)
- Наний О.Е. // Квант. электроника. 1992. 19. С. 762. (Nanii O.E. // Sov. J. Quantum Electron. 1992. 22, N 8. P. 703.)
- Воронин В.Г., Наний О.Е., Сусьян А.А., Хлыстов В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 3. С. 18. (Voronin V.G., Nanii O.E., Susyan А.А., Khlystov V.I. // Moscow University Phys. Bull. 2010. 65, N 3. Р. 174.)
- Воронин В.Г., Наний О.Е., Сусьян А.А., Хлыстов В.И. // Квант. электроника. 2010. 40, № 2. С. 111. (Voronin V.G., Nanii O.E., Susyan А.А., Khlystov V.I. // Quantum Electron. 2010. 40. N 2. P. 111.)
- 24. Воронин В.Г., Ся Я.В., Наний О.Е., Хлыстов В.И. // Квант. электроника. 2007. **37**, № 4. С. 339. (Voronin V.G., Nanii O.E., Susyan A.A., Khlystov V.I. // Quantum Electron. 2007. **37**, N 4. P. 339.)
- 25. Воронин В.Г., Наний О.Е., Туркин А.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 2. С. 46. (Voronin V.G., Nanii O.E., Turkin A.N. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2002. 57, N 2. P. 60.)
- 26. Корниенко Л.С., Кирьянов А.В., Кравцов Н.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1986. 27, № 1. С. 81. (Kir'yanov A.V., Kornienko L.S., Kravtsov N.V. et al. // Moscow University Phys. Bull. 1986. 41, N 1. Р. 93.)
- 27. Зеленин Д.В., Карле Р.А., Петровский В.Н., Проценко Е.Д. // Квант. электроника. 2002. **32**, N 1. С. 5. (Zelenin D.V., Karle R.A., Petrovskii V.N., Protsenko E.D. // Quantum Electron. 2002. **32**, N 1. P. 5.)
- Наний О.Е., Шелаев А.Н. // Квант. электроника. 1989. 16. С. 1122. (Nanii O.E., Shelaev A.N. // Sov. J. Quantum Electron. 1989. 19, N 6. P. 726.)
- Yao J., Yao J., Deng Z., Liu J. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2005. 17, N 4. P. 756.
- Feng X., Tam H.-Y., Lu C. et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2009. 21, N 18. P. 1314.
- Park N., Dawson J., Vahala K.J. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1992. 4, N 6. P. 540.
- 32. Bellemare A., Karasek M., Rochette M. et al. // J. Lightwave Technol. 2000. **18**, N 6. P. 825.
- 33. Наний О.Е. // Квант. электроника. 1996. 23, № 1.
 С. 17. (Nanii O.E. // Quantum Electron. 1996. 26, N 1.
 Р. 15.)
- Bolshtyansky M. // J. Lightwave Technol. 2003. 21. P. 1032.
- 35. Hu Z.L., Xu P., Jiang N. // Laser Physics. 2012. 2, N 10. P. 1590.
- ITU-T G.694.1. Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid.

Multichannel fiber lasers Anchored on the ITU grid

D.A. Popov^{1,2,a}, **A.B.** Vasiliev¹, **V.G.** Voronin¹, **O.E.** Nanii^{1,2,b}, **V.N.** Treshchikov²

¹Department of Optics, Spectroscopy, and Physics of Nanosystems, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow

State University, Moscow 119991, Russia. ² T8 R&D Center, Krasnobogatyrskaya str. 44, bld. 1, Moscow 107076, Russia. E-mail: ^a popov.demid@gmail.com, ^b naniy@t8.ru.

We propose a multichannel erbium-doped-fiber ring laser in which the spatial separation of 40 spectral channels is produced by a pair of dispersive elements: a multiplexer and demutliplexer. Both 2- and 3-channel generation modes with the possibility of channel switching and power control were used and studied experimentally. The long-term stability of these generation modes on a several-hour time scale is at least 10%. The generation characteristics are described satisfactorily by a simple phenomenological model. In the framework of this model the interaction between the generation channels, which stems from saturation in the active media, is determined by the cross-saturation coefficients, which depend on the frequency spacing between the channels. Good agreement was found between the experimentally measured spectral dependence of the cross saturation and the spectral shape of the holes in the gain spectrum of the erbium amplifiers. In the three-channel generation mode, suppression of the central channel occurs with an increase in the pumping power. An explanation of this effect is given.

Keywords: multi-frequency laser, multichannel laser, ring laser, erbium-doped-fiber laser, wavelength multiplexing, multichannel telecommunication system, telecommunication frequency grid.

PACS: 42.81.Uv. Received 3 April 2015.

English version: Moscow University Physics Bulletin 5(2015).

Сведения об авторах

1. Попов Демид Андреевич — студент; e-mail: popov.demid@gmail.com.

- Васильев Александр Борисович канд. физ.-мат. наук, доцент.
 Воронин Владимир Григорьевич канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-90, e-mail: voroninv@list.ru.
- 4. Наний Олег Евгеньевич доктор физ.-мат. наук, профессор.

5. Трещиков Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ген. директор ООО «Т8».