

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Оптическое управление выходной мощностью иттербиевого волоконного лазераВ. Г. Воронин, О. Е. Наний^а, А. А. Сусьян^б, В. И. Хлыстов*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра оптики и спектроскопии. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^а nanii10@rambler.ru, ^б alexander.susyan@gmail.com*

Статья поступила 15.01.2010, подписана в печать 01.02.2010

Предложен новый способ оптического управления выходной мощностью линейно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера с двойной оболочкой. Способ основан на возможности модуляции в активном элементе коэффициента усиления излучения рабочего канала излучением конкурирующего управляющего канала. Преимущество предложенного метода состоит в том, что модуляция рабочего канала осуществляется без внесения в него каких-либо управляющих элементов. Теоретически исследованы статические модуляционные характеристики. Получено экспериментальное подтверждение теоретических результатов.

Ключевые слова: двухканальный лазер, волоконный иттербиевый лазер, поляризация, модуляция, конкуренция, управление мощностью.

УДК: 621.373.826. PACS: 42.55.Wd.

Введение

Волоконные лазеры средней и высокой мощности представляют большой практический интерес, в частности для промышленного применения [1–3], в медицине [4], для накачки волоконных усилителей [5–7], для исследования нелинейно-оптических явлений в оптических волокнах и в качестве источников излучения для распределенных датчиков [8–12]. Этим объясняется неослабевающий интерес к исследованию их выходных характеристик [13–18]. Для различных приложений требуются источники излучения с управляемой по заданному закону выходной мощностью — оптические сигнал-генераторы. Среди большого количества волоконных лазеров наибольшим КПД и наибольшей выходной мощностью обладают иттербиевые лазеры, которые в силу этого наиболее перспективны для промышленного применения [19, 20].

Таким образом, существует реальная потребность в разработке новых эффективных способов модуляции излучения иттербиевых волоконных лазеров средней и высокой мощности в килогерцевом диапазоне частот модуляции. В настоящей работе предложена и экспериментально подтверждена возможность управления выходной мощностью линейно поляризованного излучения рабочего канала иттербиевого волоконного лазера с двойной оболочкой путем модуляции потерь в конкурирующем управляющем канале, излучение которого поляризовано перпендикулярно первому каналу.

Идея использования конкуренции каналов для модуляции была предложена довольно давно в работах [21–23], в которых рассматривалась конкуренция двух частично пространственно разделенных каналов с одним общим активным элементом. Экспериментально возможность существенно увеличить эффективность модуляции и, что более существенно, устранить переходные релаксационные процессы, характер-

ные для твердотельных лазеров, была показана в работах [24, 25] для различных типов двухканальных лазеров.

В настоящей работе предложена и теоретически исследована схема реализации волоконного лазера с ортогональными поляризациями, в котором модулируется излучение рабочего канала при модуляции потерь в управляющем канале.

1. Теоретическое исследование. Идеальный лазер

Идею предложенного метода поясняет рис. 1, а, на котором показана оптическая схема лазера с двумя ортогональными линейно поляризованными каналами генерации. Анизотропный активный элемент 2 и двулучепреломляющая призма 3 ориентированы так, что их собственные плоскости поляризации коллинеарны. На рис. 1, б приведена оптическая схема анизотропного лазера, реализованного в волоконном исполнении.

Для описания лазера с двумя поляризованными каналами генерации воспользуемся простейшей системой балансных уравнений модели двухканального четырехуровневого лазера. Эта система может быть получена аналогично уравнениям (5.1) в [26], если ввести член, отвечающий за кросс-насыщение мод, или из [27], если использовать ненормированные переменные EN_i — часть энергии активной среды, накопленная в объеме i -го канала и EF_i^{in} — внутрирезонаторная энергия фотонов i -го канала:

$$\frac{d(EN)_i}{dt} = K_i W_p - (EN)_i \left(\frac{1}{T_1} + \kappa_i (EF)_i^{\text{in}} + \kappa_j \xi_{ij} (EF)_j^{\text{in}} \right), \quad (1)$$

$$\frac{d(EF_i^{\text{in}})}{dt} = (EN)_i (\kappa_i (EF)_i^{\text{in}}) - \frac{(EF_i^{\text{in}})}{t_{Fi}}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2$ — номер канала, $j = 3 - i$; K_i — КПД накачки каждого канала; W_p — мощность накачки; T_1 — время

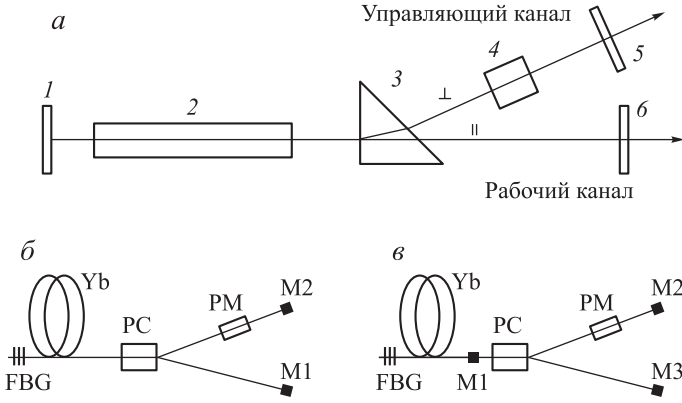


Рис. 1. а — Принципиальная схема лазера. Глухое зеркало 1 и полупрозрачные зеркала 5 и 6 формируют два резонатора Фабри-Перо: для управляющего и рабочего каналов соответственно. Двулучепреломляющая призма 3 ориентирована так, чтобы излучение рабочего канала проходило без преломления, а ортогонально поляризованное излучение управляющего канала отклонялось от оптической оси и проходило через модулятор 4. б — Реализация в волоконном исполнении: FBG — волоконная брэгговская решетка, Yb — иттербиевый лазер, PC — контроллер поляризации, PM — модулятор мощности, M1 — зеркало 1, M2 — зеркало 2. в — Схема экспериментального макета. В отличие от предыдущего случая резонатор управляющего канала образован брэгговской решеткой и зеркалами M1 и M2

релаксации населенности верхнего лазерного уровня; κ_i — коэффициенты, характеризующие эффективность взаимодействия фотонов соответствующих каналов генерации с активной средой; ξ_{ij} — нормированные коэффициенты кросс-насыщения при $i \neq j$ (КН), коэффициенты самонасыщения равны единице; t_{Fi} — время жизни фотонов i -го канала. В общем случае времена жизни фотонов в двух каналах различны.

Получим явные выражения этих времен. Для этого введем обозначения: R_{FBG} — коэффициент отражения первого зеркала общего для основного и управляющего резонаторов, R_1 и R_2 — коэффициенты отражения зеркала M1 (основной резонатор) и зеркала M2 (управляющий резонатор), L — длина резонаторов (считаем ее одинаковой для двух каналов). С учетом введенных обозначений время жизни фотонов в основном канале

$$t_{F_1} = -\frac{2Ln}{c \ln[R_1 R_{\text{FBG}}(1 - \delta_1)^2]},$$

а в управляющем

$$t_{F_2} = -\frac{2Ln}{c \ln[R_2 R_{\text{FBG}}(1 - \delta_2)^2(1 - \delta_{\text{mod}})^2]},$$

где δ_1 и δ_2 — неуправляемые (паразитные) потери в основном и управляющем канале, а δ_{mod} — управляемые потери в модуляторе.

Стационарные решения системы уравнений (1), (2) можно получить в явном виде, если приравнять нулю левые части уравнений и решить систему относительно энергии фотонов для обоих каналов. Прделав это, получим выражения для случая двухканальной генерации

$$EF_1^{\text{in}} = \frac{K_1 W_p t_{F_1} \kappa_1 - \frac{1}{T_1} - \xi_{12} \left(K_2 W_p t_{F_2} \kappa_2 - \frac{1}{T_1} \right)}{\kappa_1 (1 - \xi_{12} \xi_{21})}, \quad (3)$$

$$EF_2^{\text{in}} = \frac{K_2 W_p t_{F_2} \kappa_2 - \frac{1}{T_1} - \xi_{21} \left(K_1 W_p t_{F_1} \kappa_1 - \frac{1}{T_1} \right)}{\kappa_2 (1 - \xi_{12} \xi_{21})}. \quad (4)$$

В случае одноканальной генерации, когда подавлен либо рабочий, либо управляющий канал, стационарные решения системы (1), (2) имеют вид

$$EF_1^{\text{in}} = K_1 W_p t_{F_1} - \frac{1}{\kappa_1 T_1}, \quad EF_2^{\text{in}} = 0, \quad (5)$$

$$EF_1^{\text{in}} = 0, \quad EF_2^{\text{in}} = K_2 W_p t_{F_2} - \frac{1}{\kappa_2 T_1}. \quad (6)$$

Из полученных решений для энергии фотонов в каналах генерации нужно получить выражения выходной мощности. В первом приближении внутрирезонаторная энергия фотонов связана с внутрирезонаторной мощностью соотношением $EF_i^{\text{in}} = P_i^{\text{in}} T_i^{\text{tr}}$, где T_i^{tr} — время двойного прохода резонатора, выходная мощность $P_i^{\text{out}} = P_i^{\text{in}}(1 - R_i)$. Тогда для рабочего канала

$$P_1^{\text{out}} = P_1^{\text{in}}(1 - R_1) = \frac{EF_1^{\text{in}}}{T_1^{\text{tr}}}(1 - R_1) = EF_1^{\text{in}} \frac{c(1 - R_1)}{2nL},$$

а для управляющего

$$P_2^{\text{out}} = P_2^{\text{in}}(1 - R_2) = \frac{EF_2^{\text{in}}}{T_2^{\text{tr}}}(1 - R_2) = EF_2^{\text{in}} \frac{c(1 - R_2)}{2nL}.$$

Коэффициент пропускания зеркала M1 выбирается исходя из условия получения максимальной выходной мощности рабочего канала при выключенном управляющем канале. Для нахождения оптимального зеркала из решения (5) можно получить алгебраическое уравнение, корень которого — значение коэффициента отражения оптимального зеркала:

$$\frac{R_1 - 1}{\gamma_1^2 R_1} - \frac{1}{\gamma_1} + B_1 = 0,$$

где $\gamma_1 \equiv \ln[R_1 R_{\text{FBG}}(1 - \delta_1)^2]$, а $B_1 \equiv \frac{c}{2nL T_1 \kappa_1 K_1 W_p}$. Аналитическое решение этого уравнения — задача весьма сложная. Поэтому поиск корней уравнения проводится численно для каждого конкретного случая.

Минимальный допустимый коэффициент отражения зеркала M2 найдем из требования полного подавления излучения рабочего канала при открытом управляющем канале, т. е. при равенстве нулю потерь на модуляторе ($\delta_{\text{mod}} = 0$). При искомом значении R_2^{min} энергия фотонов EF_1^{in} в случае двухканальной генерации достигает нуля. Тогда если в решение (3) при данных условиях подставить t_{F_1} и t_{F_2} и провести несложные алгебраические действия, можно получить значение R_2^{min} :

$$R_2^{\text{min}} = \frac{1}{R_{\text{FBG}}(1 - \delta_2)^2} \times \exp \left[-\frac{2nL}{c} \frac{\xi_{12} K_2 W_p \kappa_2}{K_1 W_p \kappa_1 t_{F_1} - \frac{1}{T_1}(1 - \xi_{12})} \right]. \quad (7)$$

Когда зеркала M1 и M2 выбраны оптимальным образом, достигаются максимальные эффективность и глубина модуляции выходной мощности рабочего канала. На рис. 2 приведены зависимости выходных мощностей каналов от пропускания модулятора при

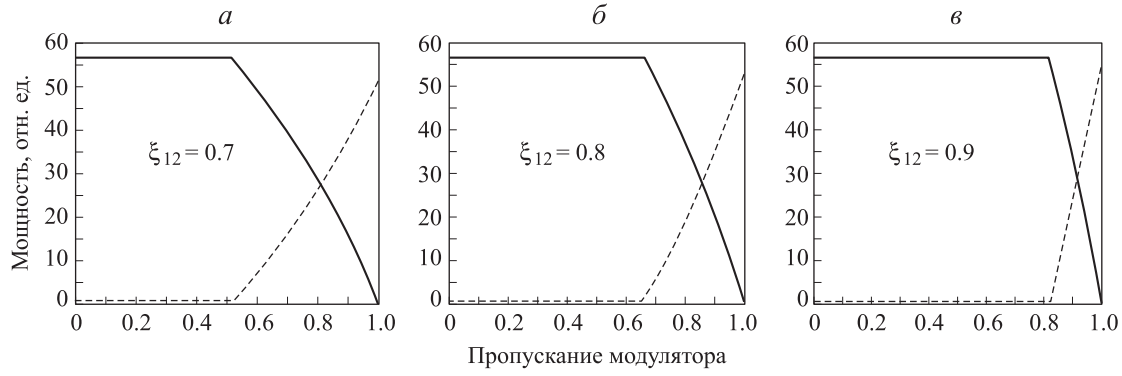


Рис. 2. Зависимости мощностей основного (сплошные линии) и управляющего (пунктир) каналов генерации от коэффициента пропускания модулятора для трех значений коэффициентов КН при оптимальном выходном зеркале (а — $\xi_{12} = 0.7$, б — $\xi_{12} = 0.8$, в — $\xi_{12} = 0.9$)

оптимальных значениях отражения зеркал М1 и М2. Видно, что с увеличением коэффициентов кросс-насыщения для 100%-ной модуляции выходной мощности рабочего канала требуется меньший диапазон изменения коэффициента пропускания модулятора. Так для коэффициента кросс-насыщения 0.9 требуется изменение коэффициента пропускания модулятора примерно на 20% для получения 100%-ной глубины модуляции рабочего канала.

2. Анализ реального лазера

Для экспериментальной проверки предложенного метода нами был собран экспериментальный макет, схема которого приведена на рис. 1, в. В экспериментально реализованном лазере необходимо учитывать отражение от торца иттербиевого волокна. Для учета этого отражения в модель лазера введено дополнительное зеркало (зеркало М1 на рис. 1, в). От этого зеркала частично отражается излучение рабочего и управляющего канала. Внутренние потери в управляющем канале несколько выше, чем в рабочем канале, что обеспечивает полное подавление генерации в управляющем канале в отсутствие дополнительного внешнего резонатора, который формируют зеркала М2 и М3 (рис. 1, в), при превышении накачки над порогом менее $\alpha = 1.1$. Для реализации возможности управлять выходной мощностью рабочего канала в управляющем канале установлен модулятор с управляемым коэффициентом пропускания или система фильтров с изменяемым пропусканием.

Для описания работы такого лазера можно использовать систему балансных уравнений (1), (2), изменив в них соответствующим образом выражения для времен жизни фотонов. В таком сложном резонаторе интенсивность излучения рабочего канала после полного обхода (в пренебрежении временем обхода внешней части резонатора) равна

$$I_1(T_1^{\text{pass}}) = I_0 R_{\text{FBG}} R_1 (1 - \delta_{11})^2 + I_0 R_{\text{FBG}} R_3 (1 - R_1)^2 (1 - \delta_{11})^2 (1 - \delta_3)^2,$$

а управляющего канала

$$I_2(T_2^{\text{pass}}) = I_0 R_{\text{FBG}} R_1 (1 - \delta_{11})^2 + I_0 R_{\text{FBG}} R_2 (1 - R_1)^2 (1 - \delta_{11})^2 (1 - \delta_2)^2 (1 - \delta_{\text{mod}})^2,$$

где δ_{11} и δ_{12} — паразитные потери на участке от брэгговского зеркала до зеркала М1 в рабочем и управляющем каналах соответственно, δ_2 — паразитные потери во внешней части резонатора (от М1 до М2), δ_3 — во внешней части резонатора (от М1 до М3), а δ_{mod} — управляемые потери в модуляторе. Тогда время жизни фотонов в рабочем канале равно

$$t_{F1} = - \frac{2nL}{c \ln \{ R_{\text{FBG}} (1 - \delta_{11})^2 [R_1 + R_3 (1 - R_1)^2 (1 - \delta_3)^2] \}},$$

а в управляющем канале

$$t_{F2} = - \frac{2nL}{c \ln \{ R_{\text{FBG}} (1 - \delta_{12})^2 [R_1 + R_2 (1 - R_1)^2 (1 - \delta_2)^2 (1 - \delta_{\text{mod}})^2] \}}.$$

Для составного резонатора изменится также связь выходной мощности и внутрирезонаторной энергии фотонов. Учитывая структуру резонатора, для рабочего канала можно получить

$$P_1^{\text{out}} = E F_1^{\text{in}} \frac{c}{2nL} (1 - R_1) (1 - \delta_3) (1 - R_3),$$

а для управляющего

$$P_2^{\text{out}} = E F_2^{\text{in}} \frac{c}{2nL} (1 - R_1) (1 - \delta_2) (1 - \delta_{\text{mod}}) (1 - R_2).$$

Кроме того, в составном резонаторе изменятся выражения для оптимальных зеркал. Как и в разделе 1, мы численно находили значение отражения оптимального зеркала М2. Для управляющего канала минимальное значение отражения зеркала М2 определяется выражением

$$R_2^{\text{min}} = \frac{\exp \left[- \frac{2nL}{c} \frac{\xi_{12} K_2 W_p \kappa_2}{K_1 W_p \kappa_1 t_{F1} - \frac{1}{T_1} (1 - \xi_{12})} \right] - R_1 R_{\text{FBG}} (1 - \delta_{12})^2}{R_{\text{FBG}} (1 - \delta_{12})^2 (1 - R_1)^2 (1 - \delta_2)^2}. \quad (8)$$

На рис. 3 приведены графики зависимостей выходных мощностей каналов от пропускания модулятора для установки, использованной в эксперименте. Изображены зависимости для трех значений потерь во внешней части резонатора в случае, когда зеркала М2 и М3 выбраны оптимальным образом. Из графиков видно, что увеличение потерь δ_2 и δ_3 приводит к более пологим зависимостям, т.е. к снижению эффективности модуляции. В отличие от случая, избоб-

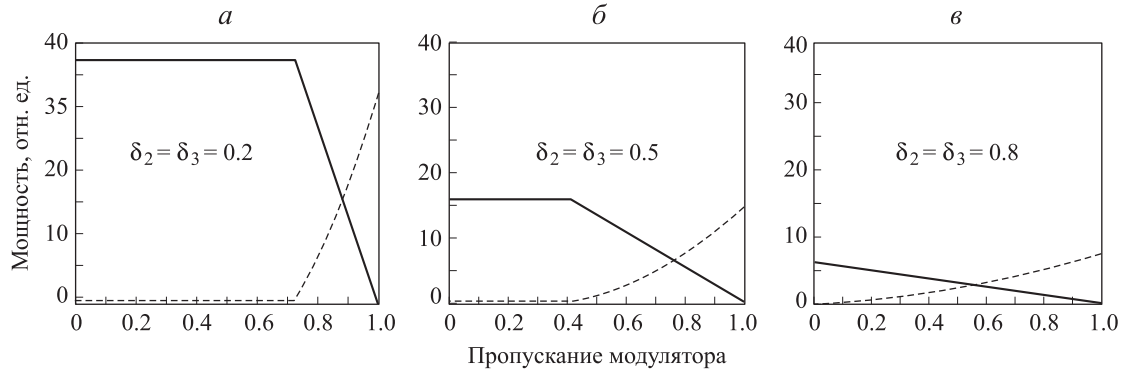


Рис. 3. Зависимости мощностей основного (сплошные линии) и управляющего (пунктир) каналов генерации от коэффициента пропускания модулятора для трех значений потерь во внешней части резонатора при оптимальных зеркалах: $\delta_2 = \delta_3 = 0.2$ (а), $\delta_2 = \delta_3 = 0.5$ (б), $\delta_2 = \delta_3 = 0.8$ (в)

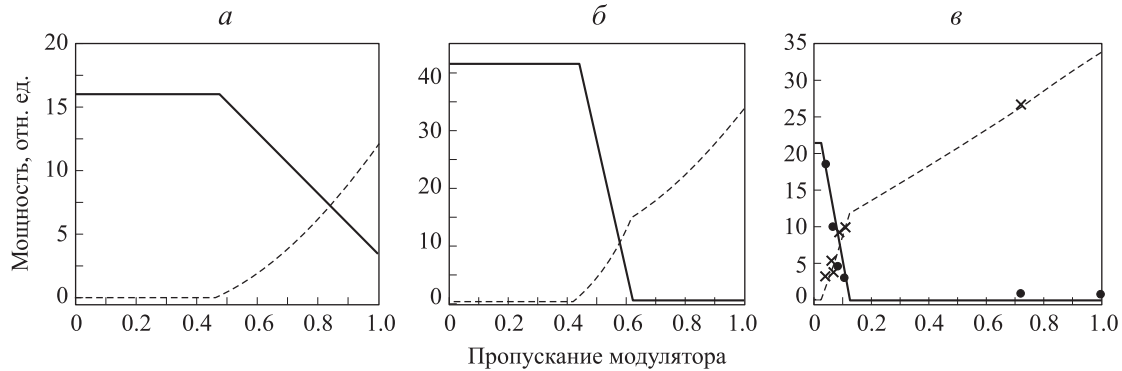


Рис. 4. Зависимости мощностей основного (сплошные линии) и управляющего (пунктир) каналов генерации от коэффициента пропускания модулятора при неоптимальных зеркалах: R_2 меньше оптимального значения (а); R_2 больше оптимального значения (б); R_2 больше оптимального, $R_3 \approx 0$ (в)

раженного на рис. 2, увеличение потерь снижает не только эффективность модуляции, но и максимальную мощность рабочего канала. Такие потери могут возникать из-за недостаточно качественной юстировки зеркал М2 и М3.

В случае, изображенном на рис. 4, зеркало М2 было выбрано не оптимальным образом. Так, на рис. 4, а приведен график исследуемых зависимостей, когда R_2 недостаточно велико. Это приводит к тому, что глубина модуляции рабочего канала не достигает 100%. На рис. 4, б, наоборот, R_2 превышает оптимальное значение. Из графика видно, что эффективность модуляции рабочего канала достаточно высокая — необходимо всего 20% потерь, чтобы полностью подавить генерацию рабочего канала. Но также необходимо создать около 40% дополнительных потерь, чтобы достичь точки обращения в нуль мощности рабочего канала при двухканальной генерации.

На рис. 4, в нанесены экспериментально измеренные значения мощностей. Видно, что теоретические и экспериментальные значения достаточно хорошо совпадают, а также, что выходные зеркала были выбраны не совсем оптимальным образом: $R_3 \approx 0$, а R_2 в данном эксперименте оказалось слишком большим (генерация основного канала подавляется при пропускании модулятора, равном 0.12, а не 1). То есть для управления мощностью рабочего канала необходимо было создавать большие потери в модуляторе. Однако важно отметить, что, согласно выражениям (7) и (8), оптимальное

значение отражения зеркала М2 зависит от мощности накачки.

Заключение

В работе предложен новый способ управления выходной мощностью линейно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера, заключающийся в модуляции коэффициента усиления рабочего канала при модуляции потерь в управляющем канале. Главным достоинством предлагаемого метода является то, что в рабочий канал лазера не вносятся никаких дополнительных элементов, а модулятор помещен в управляющий канал. Таким образом, достигается максимальный кпд лазера при использовании оптимального зеркала. Глубина модуляции может быть равна 100% при сильной конкуренции каналов и малых паразитных потерях управляющего канала.

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты подтвердили возможность управления мощностью рабочего канала иттербиевого волоконного лазера путем модуляции потерь в управляющем канале. При этом наблюдается качественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Однако для полного количественного совпадения эксперимента с теорией необходимо учитывать взаимодействие каналов в поглощающей области активного волокна [28], а также тот факт, что в каждом канале генерируется много продольных мод [29]. Условия, при которых модель двухканального лазера применима для коли-

чественного описания динамики волоконных лазеров с двумя поляризациями, требуют дополнительного анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-4408.2008.2).

Список литературы

1. Gapontsev V., Krupke W. // Laser Focus World. 2002. **38**. P. 83.
2. Mahrle A., Lütke M., Beyer E. // Proc. IMechE. C. 2010. **224** (in press).
3. Sparkes M., Gross M., Celotto S. et al. // J. Laser Appl. 2008. **20**. P. 59.
4. Гапонцев В.П., Минаев В.П., Савин В.И., Самарцев И.Э. // Квант. электрон. 2002. **32**, № 11. С. 1003.
5. Bour D.P., Dinkel N.A., Gilbert D.B. et al. // Photon. Technol. Letters IEEE. 1990. N 2. P. 153.
6. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium fiber amplifiers: fundamentals and technology. San Diego, 1999.
7. Девятых Г.Г., Дианов Е.М. // Научная жизнь. 1990. С. 143.
8. Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С. и др. // Квант. электрон. 2006. **36**. С. 963.
9. Juarez J.C., Maier E.W., Kyoo Nam Choi, Taylor H.F. // J. Lightwave Technol. 2005. N 23. P. 2081.
10. Треицков В.Н., Наний О.Е., Нестеров Е.Т. // Тезисы ВКВО. Фотон-Экспресс, 2009. № 87. С. 92.
11. Shibin Jiang, Brak Ph. // Laser Focus World. 2004. N 40. P. 91.
12. Haderl O., Ibsen M., Zervas M.N. // Applied Optics. 2001. N 40. P. 3169.
13. Дианов Е.М., Буфетов И.А. // Lightwave Russian Edition. 2004. № 4. С. 44.
14. Воронин В.Г., Наний О.Е., Туркин А.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та, Физ. Астрон. 2002. № 2. С. 46.
15. Воронин В.Г., Наний О.Е., Ся Яньвэнь // Квант. электрон. 2007. **37**, № 4. С. 339.
16. Воронин В.Г., Наний О.Е., Ся Яньвэнь и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2005. № 5. С. 35.
17. Bielawski S., Derozier D., Glorieux P. // Phys. Rev. A. 1992. N 46. P. 2811.
18. Zeglache H., Boulnois A. // Phys. Rev. A. 1995. **52**. P. 4229.
19. Курков А.С., Дианов Е.М. // Квант. электрон. 2004. **34**, № 10. С. 881.
20. Gray S., Walton D.T., Xin Chen et al. // IEEE J. Selected Topics in QE. 2009. N 15. P. 37.
21. Каминский А.А. Лазерные кристаллы. М., 1975.
22. Каминский А.А. // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1974. № 10. С. 2230.
23. Зенченко С.А., Лешкевич С.В., Портнягин А.И. и др. // Квант. электрон. 1990. **17**. С. 841.
24. Корниенко Л.С., Наний О.Е., Шелаев А.Н. // Квант. электрон. 1988. **15**. С. 1833.
25. Надточеев В.Е., Наний О.Е. // Квант. электрон. 1989. **16**. С. 680.
26. Звельто О. Принципы лазеров. М., 1990.
27. Наний О.Е. // Квант. электрон. 1996. **23**, № 1. С. 17.
28. Ся Яньвэнь. Поляризационная динамика генерации итербиевого волоконного лазера: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. НИИЯФ МГУ, 2007.
29. Наний О.Е., Сусьян А.А. // Тезисы ВКВО. Фотон-Экспресс, 2009. № 87. С. 70.

Optical control of ytterbium fiber laser output power

V. G. Voronin, O. E. Nanii^a, A. A. Susyan^b, **V. I. Khlystov**

Department of Optics and Spectroscopy, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^ananii10@rambler.ru, ^balexander.susyan@gmail.com.

A new method of ytterbium double-clad fiber laser output power optical control is being proposed. The way of control is based on possibility of the main channel gain coefficient modulation inside active element by radiation of competitive control channel. The advance of the proposed method consists in the fact that the main channel is modulated without putting any controlling elements inside it. Theoretical static characteristics of channel modulation are being analyzed. Theoretical results have been approved through experiment.

Keywords: two-channel laser, ytterbium fiber laser, polarization, modulation, competition, power control.

PACS: 42.55.Wd.

Received 15 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2010).

Сведения об авторах

1. Воронин Владимир Григорьевич — канд. техн. наук, науч. сотр.; тел.: (495) 939-31-94.
2. Наний Олег Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-31-94, e-mail: nanii10@rambler.ru.
3. Сусьян Александр Александрович — аспирант; тел.: (903) 731-67-43, e-mail: alexander.susyan@gmail.com.
4. **Хлыстов Владимир Иванович** — физик.