

# Полностью волоконный иттербиевый лазер, перестраиваемый в спектральном диапазоне 45 нм

С.Р.Абдуллина, С.А.Бабин, А.А.Власов, С.И.Каблуков, А.С.Курков, И.С.Шелемба

*Создан перестраиваемый иттербиевый волоконный лазер. В качестве селективирующего элемента резонатора применялась перестраиваемая волоконная брэгговская решетка. Диапазон перестройки составил 45 нм (1063–1108 нм), причем выходная мощность лазера (~6 Вт) и ширина спектра излучения (~0.15 нм) практически не менялись в процессе перестройки. Предложен метод синхронной перестройки высокоотражающей и выходной решеток и реализована схема полностью волоконного перестраиваемого иттербиевого лазера.*

**Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, перестраиваемый иттербиевый волоконный лазер.

## 1. Введение

Лазеры на основе волоконных световодов, легированных ионами редкоземельных элементов, являются уникальными источниками непрерывного ИК излучения и характеризуются высокой эффективностью генерации и возможностью перестройки длины волны излучения в широком спектральном диапазоне. Большинство перестраиваемых волоконных лазеров содержат объемные элементы резонатора, селективирующие длину волны излучения, которые, к сожалению, ограничивают эффективность лазера. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) позволяет сформировать резонансный отражатель непосредственно внутри волоконного световода; она записывается в сердцевине световода с помощью УФ излучения и характеризуется узким спектром отражения на брэгговской длине волны  $\lambda_{Br} = 2nA$ , где  $n$  – эффективный показатель преломления волоконного световода, а  $A$  – период индуцированной модуляции показателя преломления (см. напр., [1, 2]).

Перестройка резонансной длины волны ВБР возможна при воздействии механических напряжений на волоконный световод, приводящих к изменению периода решетки  $A$ . Аксиальные нагрузки, приложенные к волоконному световоду, приводят к изменению резонансной длины ВБР на

$$\Delta\lambda = \lambda_0(1 - P_c)\varepsilon, \quad (1)$$

где  $P_c = 0.22$  – фотоупругий коэффициент;  $\varepsilon$  – относительное удлинение волоконного световода;  $\lambda_0$  – резонансная длина волны при записи ВБР. При этом диапазон перестройки при растяжении волоконного световода ограничен его малой прочностью (типичное пороговое значение  $\varepsilon$  в данном случае составляет ~0.01). Диапазон перестройки при сжатии световода значительно шире и также потенциально ограничен его прочностью, но в этом

случае пороговое значение  $\varepsilon$  больше ( $\varepsilon \approx -0.23$ ). Для создания аксиальных нагрузок используются два способа: сжатие волоконного световода в обойме [3] и изгиб пластины с приклеенным к ней волоконным световодом [4]. Первый способ требует относительно сложной конструкции. При использовании второго способа достигнуты рекордные значения диапазона перестройки: 110 нм в области 1.55 мкм ( $\varepsilon \approx -0.09$ ) [4]. Однако при использовании такой ВБР в качестве элемента резонатора волоконных лазеров диапазон перестройки не превышал 35 нм для эрбиевого лазера, генерирующего на длине волны  $\lambda \approx 1.55$  мкм [5], и 15 нм для неодимового лазера, генерирующего на  $\lambda \approx 0.9$  мкм [6].

Лазер на основе легированного иттербием волоконного световода с двойной оболочкой и диодной накачкой на длине волны 976 нм отличается высокой эффективностью генерации на переходе  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$  иона  $\text{Yb}^{3+}$  с максимумом в диапазоне 1.08–1.11 мкм [7]. Осуществление плавной перестройки длины волны выходного излучения иттербиевого полностью волоконного лазера позволит значительно расширить область его применений, но до настоящего времени серьезных попыток в этом направлении не предпринималось.

В настоящей работе представлены результаты применения перестраиваемой ВБР в качестве элемента резонатора, селективирующего длину волны излучения перестраиваемого иттербиевого волоконного лазера (ИВЛ). Осуществлена перестройка длины волны излучения иттербиевого лазера в диапазоне 1063–1108 нм. Предложен и реализован способ синхронной спектральной перестройки высокоотражающей и выходной решеток и создан перестраиваемый полностью волоконный иттербиевый лазер.

## 2. Эксперимент

Перестраиваемая ВБР записывалась на отрезке волоконного световода Flexcore-1060, предварительно выдержанном в атмосфере водорода под давлением ~100 атм. Запись проводилась голографическим методом с использованием второй гармоники (244 нм) излучения аргонового лазера с повышенной мощностью излучения [8, 9]. Типичный спектр отражения ВБР показан на рис.1. Участок волоконного световода с записанной ВБР приклеивался к пластине из оргстекла толщиной  $d \approx 5$  мм. Изгиб

С.Р.Абдуллина, С.А.Бабин, А.А.Власов, С.И.Каблуков, И.С.Шелемба. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; e-mail: babin@iae.nsk.su  
А.С.Курков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова 38; e-mail: kurkov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 27 февраля 2007 г., после доработки – 26 апреля 2007 г.

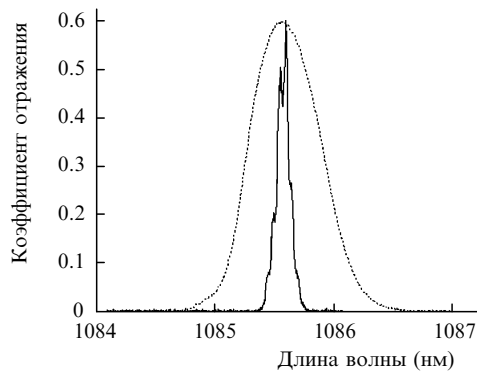


Рис.1. Типичный спектр отражения ВБР (максимальный коэффициент отражения ВБР в свободном состоянии  $R_0 \approx 60\%$  на длине волны  $\lambda_0 \approx 1093$  нм) (пунктирная кривая), а также соответствующий выходной спектр ИВЛ (сплошная кривая). Коэффициент сжатия  $\varepsilon \approx -0.01$ .

пластины приводит к изменению длины волоконного световода, причем  $\varepsilon = -0.5d/r$  (где  $r$  – радиус кривизны пластины), вследствие чего изменяется резонансная длина волны ВБР [4].

Схема перестраиваемого ИВЛ показана на рис.2. Излучение накачки многомодового лазерного диода 3 с волоконным выходом фокусируется посредством линз 4 и 5 через дихроичное зеркало 6 в волоконный световод 2 с двойной оболочкой и сердцевинной, легированной иттербием. Использовалось волокно длиной 20 м с квадратной световедущей оболочкой сечением  $110 \times 110$  мкм и диаметром распределения поля основной моды  $\sim 7$  мкм. Поглощение накачки составило  $\sim 1$  дБ/м на длине волны 976 нм. Резонатор лазера сформирован торцом волоконного световода (широкополосный отражатель с коэффициентом отражения около 4%) и перестраиваемой ВБР 1. Дихроичное зеркало прозрачно для излучения накачки (976 нм) и имеет высокий коэффициент отражения в диапазоне генерации ИВЛ. В данной схеме накачка волоконного лазера осуществлялась через торец волоконного световода. По сравнению с вариантом накачки через перестраиваемую ВБР, эта схема позволяет избежать поглощения мощности накачки в оболочке стандартного волоконного световода Flexcore-1060 и на участке волоконного световода, приклеенного к пластине. Параметры излучения иттербиевого лазера, отведенного дихроичным зеркалом, контролировались измерителем мощности и оптическим спектроанализатором.

В экспериментах использовалось несколько образцов ВБР с коэффициентом отражения 60%–90% на длине волны  $\lambda_0 = \lambda_{Br}$  ( $\varepsilon = 0$ )  $\approx 1093$  нм. Мощность выходного излучения ИВЛ с разными образцами ВБР изменялась незначительно.

Для увеличения мощности накачки, вводимой в активный световод, и реализации оптимального коэффициента пропускания выходного зеркала была реализована следующая схема полностью волоконного перестраиваемого

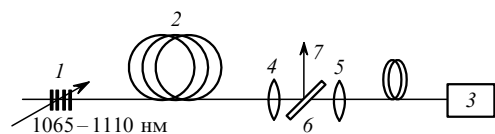


Рис.2. Схема перестраиваемого ИВЛ: 1 – перестраиваемая ВБР; 2 – волоконный световод, легированный иттербием; 3 – лазерный диод накачки с волоконным выходом; 4, 5 – линзы; 6 – дихроичное зеркало; 7 – выходное излучение иттербиевого лазера.

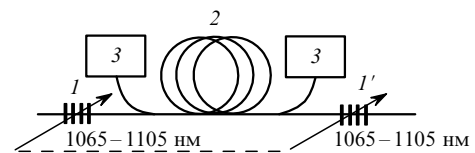


Рис.3. Схема полностью волоконного перестраиваемого иттербиевого лазера: 1 и 1' – синхронно перестраиваемые ВБР (высокоотражающая и выходная соответственно); 2 – легированный иттербием волоконный световод, изготовленный по технологии GTWave; 3 – лазерные диоды накачки.

мого иттербиевого лазера (рис.3). Накачка иттербиевого волоконного световода, изготовленного по технологии GTWave (сборка из волоконного световода с сердцевинной, легированной иттербием, и дополнительного волоконного световода без сердцевинной, заключенных в общую полимерную оболочку), осуществлялась двумя лазерными диодами с двух концов дополнительного волоконного световода [10]. Длина активного световода была равна 25 м, диаметр распределения поля основной моды составлял  $\sim 7$  мкм. К иттербиевому волоконному световоду были приварены высокоотражающая и выходная решетки, формирующие резонатор лазера. Резонансная длина волны ВБР  $\lambda_0 = 1105$  нм. Коэффициент отражения высокоотражающей ВБР составлял  $\sim 90\%$ , а выходной – примерно 15%. Решетки были приклеены на единую пластину, что обеспечивало при ее изгибе синхронную перестройку резонансных длин волн обеих ВБР.

### 3. Результаты

На рис.4 показано изменение выходной мощности ИВЛ при перестройке длины волны генерации с использованием схемы лазера, показанной на рис.2. Перестраиваемая ВБР была записана на длину волны  $\lambda_0 \approx 1093$  нм и имела начальный коэффициент отражения  $R_0 \approx 60\%$ . Область длин волн  $\lambda < \lambda_0$  относится к сжатию, а область  $\lambda > \lambda_0$  – к растяжению световода. Типичный выходной спектр ИВЛ с данной решеткой, полученный при небольшом сжатии ( $\varepsilon \approx -0.01$ ), показан на рис.1 сплошной кривой. В данной схеме осуществлена перестройка длины волны излучения лазера от 1063 до 1108 нм, т. е. в диапазоне 45 нм, причем в диапазоне 40 нм – без значительного изменения выходной мощности. При растяжении, близком к разрыву волоконного световода ( $\varepsilon > 0.01$ ), наблюдается значительное (более 10%) уменьшение мощности, в то время как при сжатии ( $\varepsilon \leq -0.05$ ) происходит небольшое ее возрастание. При этом было установлено, что

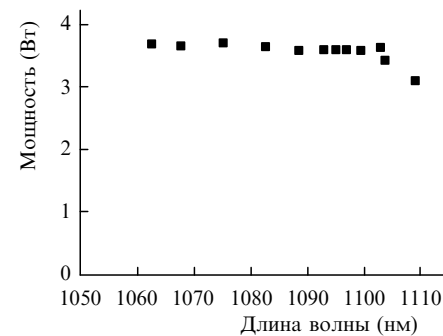


Рис.4. Изменение выходной мощности ИВЛ в зависимости от длины волны генерации, перестраиваемой с помощью ВБР (в свободном состоянии ВБР  $R_0 \approx 60\%$  на  $\lambda_0 \approx 1093$  нм), при мощности накачки  $\sim 7$  Вт.

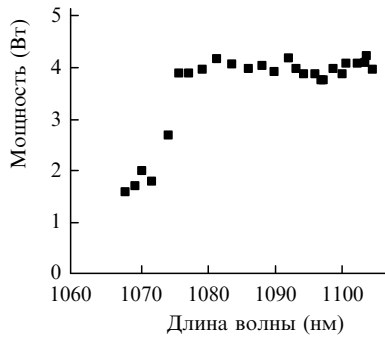


Рис. 5. Изменение выходной мощности полностью волоконного иттербиевого лазера в зависимости от длины волны генерации при синхронной перестройке высокоотражающей и выходной ВБР (в свободном состоянии ВБР соответствующие коэффициенты отражения  $R_0 \approx 90\%$  и  $R_{out} \approx 15\%$  на  $\lambda_0 \approx 1105$  нм).

ширина спектра отражения ВБР ( $\sim 0.7$  нм на уровне  $-3$  дБ) и выходного спектра излучения лазера ( $\sim 0.15$  нм) существенно не изменяются при сжатии, но коэффициент отражения возрастает от начального значения  $\sim 60\%$  до  $\sim 75\%$  при сильном сжатии ( $\varepsilon \approx -0.05$ ). Использование решеток с разными начальными коэффициентами отражения ( $R_0 = 60\% - 90\%$ ) также приводило к незначительным изменениям мощности, т. к. потери в резонаторе определялись главным образом коэффициентом пропускания торца волоконного световода. Максимальная мощность ИВЛ составила  $\sim 6$  Вт при мощности накачки  $\sim 10$  Вт.

Использование в качестве выходного зеркала (вместо торца волоконного световода) ВБР с коэффициентом отражения  $15\%$  в схеме лазера, показанной на рис. 3, позволяет оптимизировать выходную мощность при заданной мощности накачки. На рис. 5 показано изменение выходной мощности ИВЛ в процессе перестройки длины волны генерации. При синхронной перестройке высокоотражающей и выходной решеток за счет сжатия световода выходная мощность практически не изменялась при уменьшении длины волны на  $30$  нм, однако при дальнейшем увеличении сжатия (когда  $\Delta\lambda$  достигает  $\sim 40$  нм) наблюдается падение мощности более чем в два раза. Измерение спектров решеток показало, что этот эффект определяется рассогласованием резонансных длин волн на  $\sim 0.3$  нм при полной ширине спектра высокоотражающей решетки  $\sim 0.6$  нм по уровню  $-3$  дБ. Достигнутая мощность излучения при использовании выходной решетки несколько выше, чем в случае использования торца волоконного световода.

В процессе перестройки наблюдался дрейф длины волны генерации в первый момент после ее изменения. При отстройке на  $15$  нм от резонансной длины волны  $\lambda_0$  стабилизация длины волны генерации наступает примерно через  $5$  мин, после чего долговременные флуктуации за время  $\sim 1000$  ч становятся меньше  $0.1$  нм.

#### 4. Обсуждение результатов

Таким образом, в результате применения перестраиваемой ВБР для управления длиной волны генерации ИВЛ были получены максимальная выходная мощность  $\sim 6$  Вт и диапазон перестройки  $45$  нм при мощности накачки  $\sim 10$  Вт. При перестройке выходная мощность лазера и ширина его спектра излучения ( $\sim 0.15$  нм) изменяются незначительно, в то время как коэффициент отражения ВБР возрастает в  $1.2 - 1.3$  раза с изменением

сжатия решетки от  $\varepsilon = 0$  (свободное состояние) до  $\varepsilon \approx -0.05$  (сильное сжатие). Установлено, что поляризация выходного излучения является случайной и практически не меняется при перестройке.

Незначительные изменения мощности при значительных изменениях коэффициента отражения высокоотражающей решетки связаны с тем, что потери в резонаторе определялись главным образом большим коэффициентом пропускания торца волоконного световода, используемого в качестве выходного зеркала. Кроме того, при значительном изменении длины волны генерации на мощность может влиять спектральная зависимость ненасыщенного коэффициента усиления [7]. Однако этого не наблюдалось, поскольку при однородном характере насыщения и большим превышении усилением потерь данный эффект несущественен.

При синхронной перестройке высокоотражающей и выходной решеток в схеме полностью волоконного иттербиевого лазера и изменении длины волны более чем на  $30$  нм наблюдается значительное уменьшение мощности, поскольку становится существенной относительная расстройка резонансных частот ВБР при сжатии, которая может быть устранена дополнительной подстройкой высокоотражающей и выходной решеток друг к другу. Данный вариант лазера имеет большие перспективы для применения в полностью волоконных схемах.

#### 5. Заключение

Таким образом, реализован метод перестройки ВБР. Перестраиваемая ВБР применялась в качестве селектора частоты излучения ИВЛ. Диапазон перестройки лазера составил около  $45$  нм в области  $1.1$  мкм, а выходная мощность излучения была равна  $\sim 6$  Вт. Разработана также конструкция с синхронной перестройкой двух ВБР (высокоотражающей и выходной), которая позволила реализовать полностью волоконный перестраиваемый иттербиевый лазер.

Авторы благодарят В.А.Акулова, Д.М.Афанасьева, М.А.Рыбакова и Д.В.Чуркина за помощь в эксперименте.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда CRDF (грант № RUP1-1509-NO-05), программ Президиума и Отделения физических наук РАН и Интеграционной программы СО РАН.

1. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings* (San Diego: Acad. Press, 1999).
2. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005).
3. Mohammad N., Szyszkowski W., Zhang W.J., Haddad E.I., Zou J., Jamroz W., Kruzelecky R. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 2001 (2004).
4. Mokhtar M.R., Goh C.S., Butler S.A., Set S.Y., Kikuchi K., Richardson D.J., Ibsen M. *Electron. Lett.*, **39**, 509 (2003).
5. Yoonchan J., Alegria C., Sahu J.K., Fu L., Ibsen M., Codemard C., Mokhtar M.R., Nilsson J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 756 (2004).
6. Fu L.B., Ibsen M., Richardson D.J., Nilsson J., Payne D.N., Grudinin A.V. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 306 (2005).
7. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 881 (2004).
8. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И. *Квантовая электроника*, **35**, 857 (2005).
9. Абдуллина С.Р., Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И. *Квантовая электроника*, **36**, 966 (2006).
10. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 328 (2005).