

Двухволновой перестраиваемый волоконный лазер с пиковой мощностью 15 дБм

А.А.Латиф, Н.А.Аванг, М.З.Зулкифли, С.В.Харун, З.А.Хани, Х.Ахмад

Предложен и продемонстрирован мощный двухволновой перестраиваемый волоконный лазер, работающий в области С-полосы на длинах волн 1536.7–1548.6 нм. В лазере используется матричная волноводная решетка (1×16 каналов), и он способен генерировать восемь разных двухволновых пар с восемью возможными отстройками длин волн в паре: от 0.8 (самый узкий интервал) до 12.0 нм (самый широкий). Измеренные средняя выходная лазерная мощность и коэффициент подавления боковой моды составили 15 дБм и 52.55 дБ соответственно. Разработанный двухволновой лазер стабилен, в нем отсутствуют флуктуации выбранных длин волн и имеются лишь минимальные вариации выходной мощности. Такой лазер имеет хороший потенциал для применения в метрологии, связи, спектроскопии, а также в приложениях в терагерцевом диапазоне.

Ключевые слова: легированное эрбием волокно, матричная волноводная решетка, двухволновой волоконный лазер.

1. Введение

Генерация многоволнового излучения волоконными лазерными источниками представляет огромный интерес для целого ряда важных приложений, включая измерения поглощения газов в следовых концентрациях, измерения рН, генерацию скоростных информационных последовательностей солитонных импульсов, спектроскопию высокого разрешения, а также создание источников излучения для передачи сигналов в плотных WDM системах связи. Помимо этих приложений, многоволновые лазеры используются при генерации СВЧ излучения для широкополосной радиосвязи, а также в сенсорных сетях ввиду узкой ширины линии получаемого СВЧ излучения.

Хотя существует много различных вариантов реализации многоволновых волоконных источников излучения, особый интерес у исследователей вызывает двухволновой волоконный лазер (ДВВЛ). Он широко применяется в приложениях, требующих двух или более близко расположенных спектральных компонент, которые генерируются в легированном эрбием волоконном усилителе (ЭрВУС), используемом в качестве усиливающей среды для волоконных лазеров. Однако такое применение влечет за собой ограничения, вытекающие из однородного уширения линии, которое приводит к низким выходным мощностям, а также к конкуренции мод. Было предпринято несколько попыток преодолеть эти проблемы за счет охлаждения ЭрВУС жидким азотом [1, 2], использования эллип-

тической сердцевины в легированном эрбием волокне [3], применения сохраняющих поляризацию волоконных брэгговских решеток (ВБР) для выделения и фильтрации определенной длины волны [4], использования элементов, обеспечивающих сдвиг частоты в резонаторе [5], применения распределенного волоконного брэгговского лазерного источника [6], использования эффекта четырехволнового смешения (ЧВС) в качестве стабилизатора [7], применения лазеров с плоским резонатором для оптической инъекции в ДВВЛ [8] и даже использования двойного кольцевого волоконного лазера [9]. Хотя все эти методы оказались достаточно успешными в борьбе с конкуренцией мод, сложность и высокая стоимость делают их практическое использование фактически невозможным. С другой стороны, применение полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) обеспечивает успешное решение этой проблемы, т. к. они имеют неоднородно-уширенную усиливающую среду, а следовательно, их использование в ДВВЛ не должно приводить к существенной конкуренции мод через кросс-насыщение усиления и сильное однородное уширение линии (как в случае ЭрВУС). Однако ПОУ сами не свободны от определенных недостатков, включая маломощный выход и существенные поляризационно-зависимые потери.

В последнее время вызывает интерес создание мощных двухволновых волоконных лазеров (МДВВЛ), которые могут быть применены для преобразования длины волны излучения с использованием ЧВС [10]. Другие их приложения – это генерация СВЧ сигналов [11] и генерация терагерцевых волн [12]. Существующие легированные эрбием волокна с высокими коэффициентами поглощения на длинах волн 980 и 1550 нм открывают интересные возможности для реализации МДВВЛ. Это связано с доступностью мощных диодных лазеров накачки на длине волны 980 нм, а также ответвителей с малыми потерями. Известны работы, авторы которых использовали иттербий для генерации мощного двухволнового выходного излучения в окрестности длины волны 1060 нм [13, 14], а также применяли одновременное легирование Yb/Er для генерации в области 1550 нм [15–17].

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

A.A.Latif, N.A.Awang, M.Z.Zulkifli, H.Ahmad. Photonics Research Centre (Department of Physics), University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; e-mail: mohdzamani82@yahoo.com
S.W.Harun. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia
Z.A.Ghani. Faculty of Applied Sciences, MARA University of Technology, 40450 Selangor, Malaysia

Поступила в редакцию 21 января 2011 г., после доработки – 13 апреля 2011 г.

В настоящей статье рассмотрен непрерывный мощный двухволновой перестраиваемый волоконный лазер на основе кольцевого резонатора, связанного с добавочным усилителем, который позволяет генерировать выходную мощность около 15 дБм. Двухволновой выход достигается за счет использования матричной волноводной решетки (МВР) совместно с оптическими переключателями (ОП), работающими как селектирующие элементы, с тем, чтобы обеспечить создание переключаемого волоконного лазера, способного генерировать спектральные компоненты, отстроенные по длине волны на перестраиваемый в диапазоне от 0.8 до 12.0 нм интервал, что является первым сообщением такого рода.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка предлагаемого лазера показана на рис.1. Такая система содержит эрбиевое волокно Metrogain (Fibercore Ltd.) длиной 5 м с коэффициентами поглощения 11.9 и 16.4 дБ/м на длинах волн 979 и 1531 нм соответственно, которое играет роль усиливающей среды в кольцевом резонаторе. Волокно накачивается лазером, работающим на длине волны 979 нм с выходной мощностью 120 мВт, через мультиплексор СМ1 980/1550 нм. Излучение накачки переводит ионы эрбия в более высокие состояния, что сопровождается появлением выходного усиленного спонтанного излучения (УСИ) на обоих концах волокна. Оптический изолятор направляет генерируемое излучение по часовой стрелке, поэтому следует рассмотреть УСИ, выходящее с правой стороны волокна и двигающееся к МВР. Последняя действует как элемент, функционирующий в области 1550 нм и «нарезающий» входное излучение по длинам волн. Таким образом, МВР расщепляет УСИ на 16 выходов (1×16 каналов) на разных длинах волн, от 1536.7 до 1548.6 нм, при межканальном интервале около 0.8 нм (100 ГГц). Каналы 1 (1536.7 нм)–8 (1542.3 нм) сгруппированы вместе и подключены к оптическому переключателю ОП1. Аналогично, каналы 9 (1543.1 нм)–16 (1548.6 нм) сгруппированы и подключены ко второму оптическому переключателю ОП2. Каждый из этих переключателей функционирует как селектор выбора излучения на определенной длине волны и объединяет эти излучения на перестраиваемом 2×2-разветвителе (ПР) для получения двухволновой генерации. Оптические переключатели, используемые в этом эксперименте, оптимально работают в области 1550 нм и имеют время переключения с каждого соседнего канала 500 мс. Один из выходных портов ПР снова подключает-

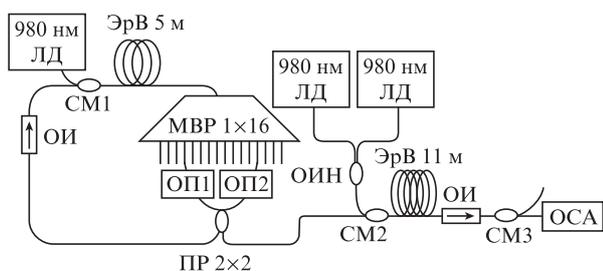


Рис.1. Экспериментальная лазерная установка: МВР – матричная волноводная решетка; ЭрВ – легированное эрбием волокно; ОСА – оптический спектроанализатор; СМ – спектральный мультиплексор; ЛД – лазерный диод; ОИН – объединитель излучения накачки; ОИ – оптический изолятор; ОП – оптический переключатель; ПР 2×2 – перестраиваемый разветвитель 2×2.

ся к входному порту 1550 нм разветвителя СМ1 через оптический изолятор. Другой порт ПР подключается ко второму эрбиевому волокну длиной 11 м через разветвитель СМ2 980/1550 нм. Эрбиевое волокно в этой секции того же типа, что и первое, и действует как дополнительный усилитель в области 1550 нм. Так как для оптимального усиления 11-метровое волокно нуждается в мощной накачке, используется объединитель накачки для подключения двух лазерных диодов, обеспечивая общую мощность излучения перед соединением с разветвителем СМ2 980/1550 нм около 430 мВт. Далее это волокно соединяется с изолятором, а затем с разветвителем СМ3, подключенным к оптическому спектроанализатору (ОСА). Расположенный перед ОСА разветвитель СМ3 используется как фильтр, чтобы обеспечить прохождение выходного сигнала на 1550 нм к ОСА. Таким образом, кольцевой резонатор работает как источник двухволнового излучения, которое затем усиливается в экспериментальном МДВВЛ.

Уникальность этой конструкции состоит в том, что выходы ДВВЛ могут быть выбраны из любых каналов МВР при первом же сигнале, поступающем из одного из каналов (от 1 до 8) ОП1, и втором сигнале, поступающем из одного из каналов (от 9 до 16) ОП2, и легко переключаются с каждого соседнего канала за время 500 мс. Каналы могут быть установлены парами: 1 и 9, 2 и 9, 3 и 9 и т.д. Для простоты предлагаемый эксперимент начинается с выбора двух длин волн с максимальной отстройкой и заканчивается случаем минимальной отстройки. Это делается путем выбора каналов: 1 и 16, 2 и 15, 3 и 14, 4 и 13, 5 и 12, 6 и 11, 7 и 10 и, наконец, 8 и 9.

Так как усиливающими средами, используемыми в предложенной установке, являются световоды, легированные ионами эрбия с присущим им однородным уширением, реализация двухволнового выхода влечет за собой проявления конкуренции мод. Используемый в экспериментальной установке перестраиваемый разветвитель обеспечивает механизм контроля потерь в резонаторе, что позволяет управлять сигналом на входе второго усилителя и получить точные пиковые значения выходного излучения МДВВЛ.

3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 показан спектр УСИ на выходе второго волокна (11 м) как от отдельно установленного усилителя. Как видно из рисунка, максимальная выходная мощность достигается при 1560 нм. Это связано с природой эрбие-

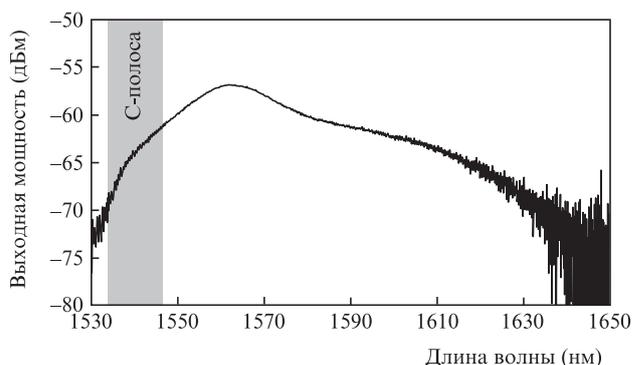


Рис.2. Спектр усиленного спонтанного излучения дополнительно усилителя.

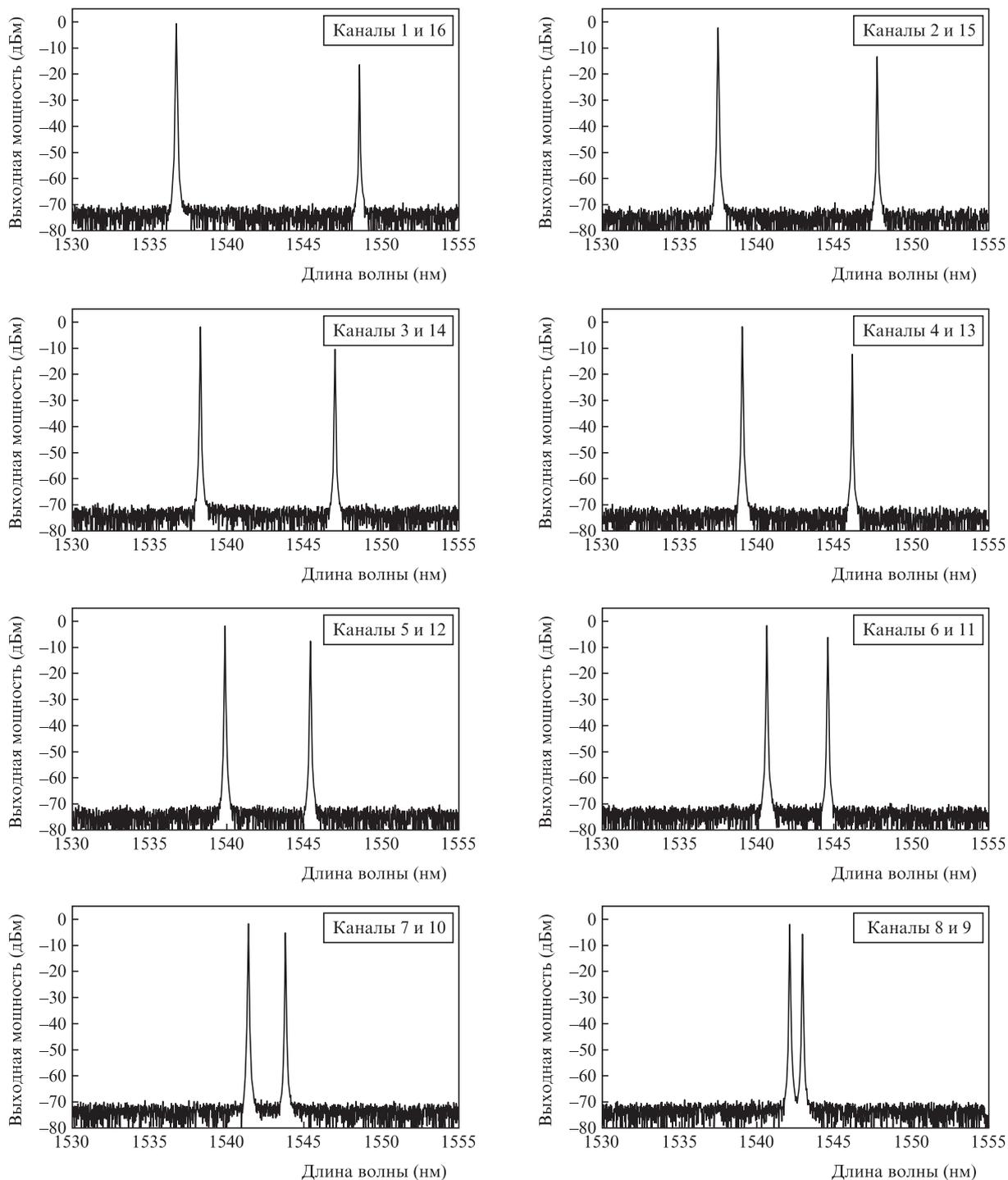


Рис.3. Сигналы ДВВЛ на выходе из кольцевого резонатора до входа в дополнительный усилитель.

вого волокна, профиль усиления которого смещается в длинноволновую сторону по мере увеличения длины волокна [18]. Хотя усиление максимально в области 1560 нм, из-за ограниченности рабочей спектральной области используемой МВР (от 1530 до 1545 нм) эксперименты проводились именно в этой области длин волн. Однако генерация лазера может быть получена и в С-полосе, и в L-полосе. Неравномерность распределения усиления в области 1530 нм, заметная на рис.2, как будет показано ниже, является причиной деградации коэффициента подавления боковых мод при смещении в сторону больших длин волн, что следует из результатов эксперимента.

Сигналы на выходе кольцевого резонатора ДВВЛ показаны на рис.3. Предлагаемая схема лазера сталкивается, однако, с двумя препятствиями при создании сбалансированных двухволновых волоконных лазеров. Во-первых, это конкуренция мод. Она может быть значительно ослаблена посредством подстройки резонаторных потерь в кольцевом резонаторе с помощью перестраиваемого разветвителя, который позволяет точно контролировать соотношение мощностей внутри резонатора на двух длинах волн. Сбалансированный двухволновой выходной сигнал кольцевого резонатора усиливается вспомогательным усилителем для получения генерации мощного двухволново-

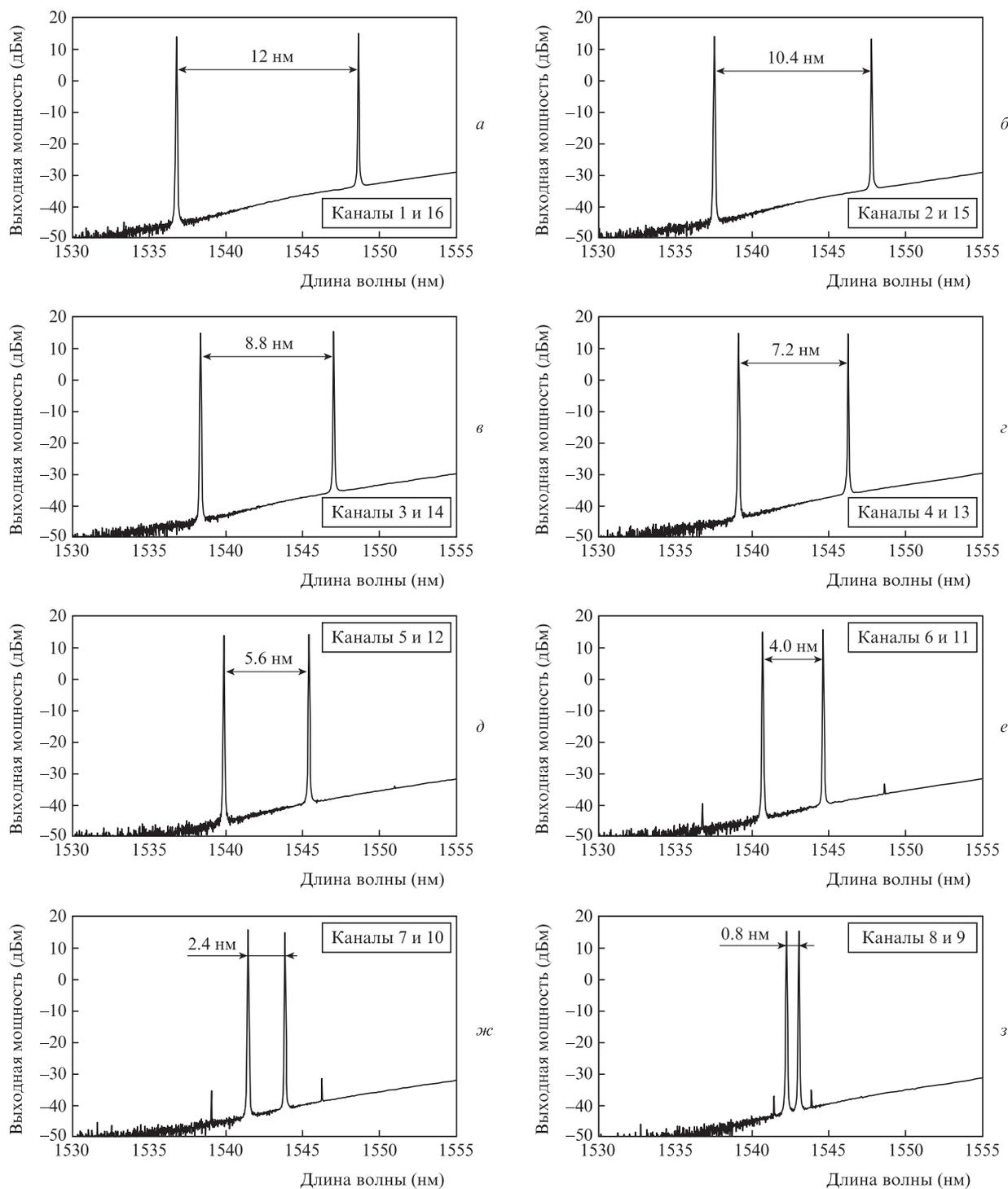


Рис.4. Диапазоны перестройки МДВВЛ.

го волоконного лазера. Вторая проблема связана с профилем усиления вспомогательного усилителя, который не является плоским, а следовательно, выходные сигналы после усиления также могут быть несбалансированными. Эта проблема преодолевается путем балансировки двухволнового выхода после кольцевого резонатора. Потери в разветвителе могут быть подстроены так, что излучение на длине волны с большим коэффициентом усиления во вспомогательном усилителе будет сильнее ослабляться за счет введения больших потерь в резонаторе до входа во второй усилитель. Дисбаланс выходных сигналов ДВВЛ с кольцевым резонатором (рис.3) компенсируется за счет

зависимости от длины волны коэффициента усиления вспомогательного усилителя, что и обеспечивает реализацию сбалансированного МДВВЛ (рис.4).

На рисунке показаны диапазоны перестройки МДВВЛ, причем рис.4,а демонстрирует самую большую отстройку (12 нм, каналы 1 и 16), когда генерация идет на длинах волн 1536.7 и 1548.6 нм соответственно. Самая маленькая отстройка (около 0.8 нм, каналы 8 и 9) соответствует генерации на длинах волн 1542.2 и 1543.0 нм (рис.4,з). Диапазон перестройки, который составляет всего 12 нм, может быть увеличен за счет использования МВР с большим числом каналов. С другой стороны, минимальная отстрой-

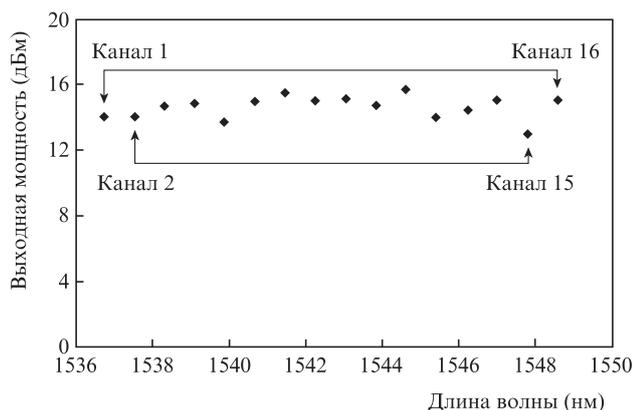


Рис.5. Оптимизированные выходные мощности парных каналов: 1 и 16, 2 и 15, 3 и 14 и т.д. с девиацией ± 1.315 дБм.

ка может быть доведена до 0.2 нм при использовании МВР с межканальной разностью частот 25 ГГц.

Высокая мощность реализованного волоконного лазера приводит к возникновению ЧВС в дополнительном усилителе. Проявления ЧВС заметны начиная с каналов 6 и 11 (рис.4,е) и до каналов 8 и 9 (рис.4,з) и заключаются в появлении сигналов у каждой двухволновой пары на расстоянии, равном интервалу между компонентами пары. Эффект ЧВС проявляется тем сильнее, чем уже спектральный интервал лазера, что уменьшает коэффициент подавления боковых мод (КПБМ). Чтобы решить эту проблему, в системе необходимо использовать поляризационные контроллеры, которые позволяют оптимизировать выходные мощности на двух длинах волн и в то же время уменьшить пиковую мощность сигналов ЧВС, что увеличит КПБМ.

На рис.5 представлены оптимизированные выходные мощности всех каналов – от каналов 1 (1536.74 нм) и 16 (1548.6 нм) до каналов 8 (1542.3 нм) и 9 (1543.1 нм). Среднее значение выходной мощности составляет около 15 дБм; наибольшую выходную мощность имеет канал 11 (1544.62 нм), а наименьшую (13.11 дБм) – канал 15 (1547.8 нм). Видно, что длины волн распределены равномерно с разделением 0.8 нм для соседних каналов. Спектральная зависимость выходной мощности МДВВЛ является «плоской» с вариацией от пика к пику ± 1.315 дБм. Важное достоинство предложенной установки – это быстрое переключение отстройки двухволнового выхода за счет быстрого отклика оптических переключателей ОП1 и ОП2. Однако для обеспечения стабильного и «плоского» выхода оптический перестраиваемый ответитель должен быть тщательно настроенным и управляемым. Относительно низкая выходная мощность каналов 5 и 15 (рис.5) может быть связана с более высокими потерями в соединениях в портах МВР или оптических коммутаторов. Эту проблему можно решить путем надлежащей «очистки» гибких кабелей МВР, а также кабелей, соединяющих входные порты с оптическими переключателями.

Коэффициент подавления боковых мод для МДВВЛ (рис.6) колеблется около среднего значения 52.55 дБ с максимальной вариацией 12.4 дБ, что показывает стабильность предлагаемой установки, которая выше, чем у волоконного лазера с коэффициентом подавления 40 дБ [19]. Это важный параметр, т.к. большой уровень шума приводит к неустойчивой работе волоконного лазера. Самое высокое значение коэффициента подавления (58.77 дБ) оказывается для канала 1, а наименьшее (46.38 дБ) – для

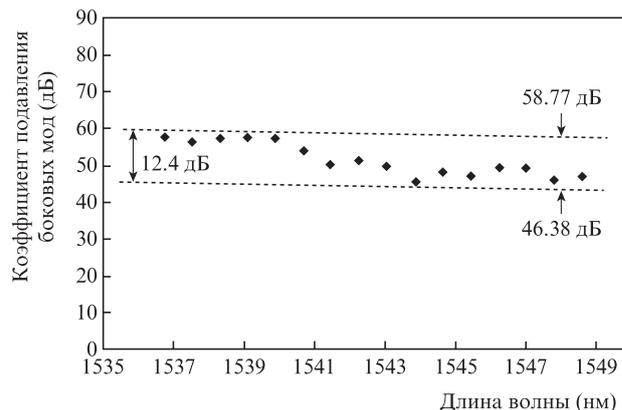
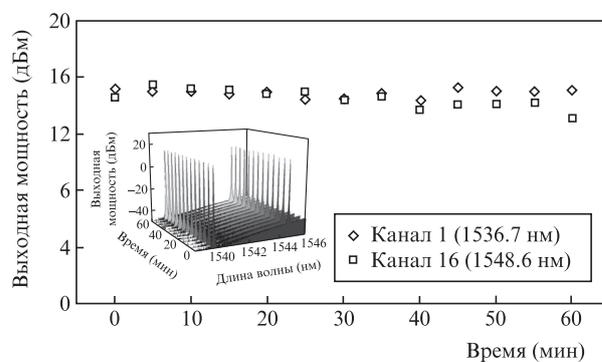


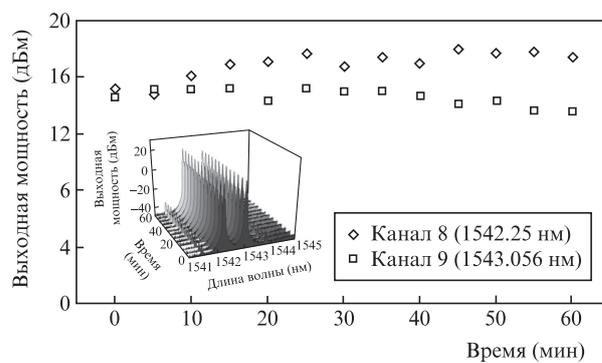
Рис.6. Спектральная зависимость коэффициента подавления боковых мод МДВВЛ.

канала 10. Максимальная девиация составляет 12.4 дБ, что достаточно много, и обусловлена различием в мощности УСИ среды, имеющей более высокий коэффициент усиления на более коротких длинах волн.

Рис.7 демонстрирует стабильность МДВВЛ в течение более чем часа работы. Из графиков следует, что МДВВЛ стабилен при небольших изменениях выходной мощности, причем стабильность излучения каналов 1 и 16 выше, чем каналов 8 и 9. Это связано с более высокой стабильностью лазера при больших отстройках длин волн, когда эффект конкуренции мод меньше, чем в случае меньших отстроек. Для решения этой проблемы необходим надлежащий контроль параметров перестраиваемого разветвителя, что обеспечивает требуемые потери в резонаторе.



а



б

Рис.7. Временная стабильность излучения МДВВЛ: каналы 1 и 16 (а) и 8 и 9 (б).

4. Заключение

Создан МДВВЛ, работающий в области С-полосы (1536.7–1548.6 нм) с использованием схемы с основным и дополнительным усилителями на основе стандартного 5- и 11-метрового эрбиевого волокна соответственно. Благодаря использованию МВР на 1×16 каналов, реализованная система оказалась способной генерировать излучение на 16 длинах волн, что обеспечило восемь различных диапазонов перестройки МДВВЛ (наименьший – 0.8 нм и наибольший – 12 нм). При средней выходной мощности 15 дБм и коэффициенте подавления боковых мод 52.55 дБ предложенная система является стабильным и перестраиваемым мощным двухволновым волоконным лазером с неизменными характеристиками в течение более чем одного часа работы.

1. Yamashita S., Hotate K. *IEEE Electron. Technol. Lett.*, **32**, 1298 (1996).
2. Park N., Wysoncki P.F. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8** (11), 1459 (1996).
3. Das G., Lit J.W.Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14** (5), 606 (2002).
4. Feng S., Xu O., Lu S., Ning T., Jian S. *Opt. Commun.*, **282**, 825 (2009).
5. Bellemare A., Karasek M., Rochette M., Rochelle S.L., Tetu M. *J. Lightwave Technol.*, **18**, 825 (2000).
6. Sun J., Dai Y., Feng X., Zhang Y., Xie S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (24), 2587 (2006).
7. Fok M.P., Shu C. *Opt. Express*, **15** (10), 5925 (2007).
8. Yeh C.H., Chow C.W., Shih F.Y., Wang C.H., Wu Y.F., Chi S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21** (3), 125 (2009).
9. Yeh C.H. *Opt. Express*, **15** (21), 13844 (2007).
10. Hsu D.Z., Lee S.L., Gong P.M., Lin Y.M., Lee S.S.W., Yuang M.C. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16** (8), 1903 (2004).
11. Yao Y., Chen X., Dai Y., Xie S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (1), 187 (2006).
12. Park I., Fisher I., Elsaber W. *Conference on Laser and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe, 2003)*.
13. Mackechnie C.J., Barnes W.L., Hanna D.C., Townsend J.E. *Electron. Lett.*, **29** (1), 52 (1993).
14. Kangkang C., Alam S.-U., Lin D., Malinowski A., Richardson D.J. *Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2009)*.
15. Hofer M., Fermann M.E., Goldberg L. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10** (9), 1247 (1998).
16. Kim J.S., Codemard C., Nilsson J., Sahu J.K. *Electron. Lett.*, **42** (9), 515 (2006).
17. Townsend J.E., Barnes W.L., Jedrzejewski K.P., Grubb S.G. *Electron. Lett.*, **27** (21), 1958 (1991).
18. Harun S.W., Tamchek N., Proopalan P., Ahmad H. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, L-173 (2003).
19. Moeyersoon B., Morthier G., Zhao M., *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 241 (2004).