

Многоволновой бриллюэновский волоконный лазер на основе полупроводникового оптического усилителя и волокна с компенсацией дисперсии в линейном резонаторе со сверхшироким диапазоном перестройки*

М.З.Зулкифли, Х.Ахмад, Н.А.Хассан, М.Х.Жемангин, С.В.Харун

Представлен многоволновой бриллюэновский волоконный лазер (МБВЛ) со сверхшироким (1420–1620 нм) диапазоном перестройки. В качестве линейной активной среды в МБВЛ используется сверхширокополосный полупроводниковый оптический усилитель, а в качестве нелинейной среды – волокно с компенсацией дисперсии. Предложенный МБВЛ обладает широким диапазоном перестройки, который охватывает S-, C- и L-области, с шагом перестройки 0.08 нм, что позволяет использовать лазер в системах со спектральным уплотнением каналов (DWDM). Выходная мощность наблюдавшихся бриллюэновских пиков составила от –5.94 до –0.41 дБм для S-области, от –4.34 до 0.02 дБм для C-области и от –2.19 до 0.39 дБм для L-области. Расстояние между соседними длинами волн для всех трех областей равно примерно 0.08 нм (10.7 ГГц в частотной области).

Ключевые слова: бриллюэновский волоконный лазер, сверхширокополосный оптический усилитель, линейный резонатор, лазерная гребенка, стоксовы пики.

1. Введение

Одной из важнейших целей интенсивного поиска в области оптических коммуникаций остается увеличение пропускной способности протяженных коммуникационных линий в системах со спектральным уплотнением каналов (DWDM). Хотя технология спектрального уплотнения и обеспечивает экономию средств за счет инфраструктуры передачи данных, для полного использования ее потенциала требуется множество источников сигнала на разных длинах волн, что увеличивает стоимость (и нивелирует любую экономию для таких систем).

Многоволновые источники представляют собой недорогую реальную альтернативу многочисленным одиночным источникам с разными длинами волн в системах со спектральным уплотнением, позволяя полностью задействовать все их возможности. Для создания многоволновых источников существует множество линейных и нелинейных методов воздействия на различные активные среды, например с помощью обычных эрбиевых волоконных усилителей, полупроводниковых оптических усилителей или посредством нелинейных явлений, таких как вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна (ВРМБ) [1–6]. Рабочие диапазоны систем со спектральным уплотнением определяются рабочими областями оптических усилителей, которые используются в этих системах. В частности, обычные усилители на эрбиевых волокнах эффективны в C- или L-диапазоне и могут быть продвинуты в S-диапазон при использовании эрбиевых волокон с де-

прессированной оболочкой [7, 8]. Полупроводниковые оптические усилители с небольшим коэффициентом усиления также обеспечивают усиление во всех трех диапазонах. Усиление в S-диапазоне можно реализовать, используя волокна, легированные фтором (например, тулиевые волоконные усилители), или прибегая к таким нелинейным методам, как комбинационное усиление [9, 10]. Их можно использовать для создания многоволновых источников в сочетании с такими устройствами, как кольцевое зеркало Саньяка или перестраиваемый полосовой фильтр в случае волоконного лазера, либо применяя эффект Манделштама–Бриллюэна. В случае кольцевого зеркала Саньяка обычно применяется волокно с сохранением поляризации определенной длины для получения многоволновой гребенки [2, 5, 6], в то время как явление ВРМБ можно использовать, вводя сигнал высокоинтенсивного источника в волокно с высокой нелинейностью и получая, таким образом, пики Бриллюэна, которые потом усиливаются линейной активной средой, например волоконным усилителем [3, 4, 11]. Метод ВРМБ получил наибольшее распространение при разработке многоволновых источников, но у него есть некоторые ограничения по ширине диапазона перестройки многоволнового выхода из-за равномерного уширения сигналов в волоконном усилителе. Во многих работах показано, что диапазон перестройки многоволновых волоконных лазеров, разработанных на основе ВРМБ, ограничен определенной шириной полосы пропускания [12–14].

Для преодоления этого ограничения мы предлагаем многоволновой бриллюэновский волоконный лазер (МБВЛ) со сверхшироким диапазоном перестройки. В предложенном устройстве полупроводниковый оптический усилитель используется как линейная активная среда для усиления спектра бриллюэновских частот, полученного в нелинейной активной среде, поскольку хорошо известно, что характеристики неравномерного уширения полупроводникового усилителя можно использовать для преодоления спектрального ограничения волоконных оптических усилителей [1].

* Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

M.Z.Zulkifli, H.Ahmad, N.A.Hassan, M.H.Jemangin. Photonics Research Center (Department of Physics), University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; e-mail: mohdzamani@um.edu.my
S.W.Harun. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur Malaysia

2. Экспериментальная установка

Предложенная установка МБВЛ со сверхшироким диапазоном перестройки показана на рис.1. Лазер состоит из волокна с компенсированной дисперсией длиной 7.7 км, которое используется как нелинейная активная среда. Дисперсия волокна составляет -584 пс/нм, а потери на ввод – около 6.66×10^{-3} дБ/м. В качестве линейной активной среды служит полупроводниковый оптический усилитель со сверхширокой полосой усиления. Перестраиваемый лазерный источник используется для накачки ВРМБ. Излучение поступает в систему через один из двух 50%-ных портов входного оптического делителя 50:50. После выхода через порт сигнал попадает в волокно с компенсированной дисперсией, где взаимодействует с нелинейной активной средой, и на выходе образует многоволновую гребенку в результате ВРМБ. Затем гребенка проходит в линейный лазерный резонатор, образованный оптическими циркуляторами ОЦ1 и ОЦ2, оба конца которых подсоединены к системе, как показано на рис.1. Циркуляторы выполнены как зеркала, соединяющие порты 1 и 3, тогда как порт 2 подсоединен к входу и выходу системы. Многоволновой сигнал усиливается полупроводниковым усилителем, расположенным внутри линейного резонатора. Полупроводниковый усилитель (Alphion) имеет рабочий диапазон усиливаемых длин волн 1460–1620 нм, что покрывает S-, C- и L-области. Делитель 90:10 расположен между портами 1 и 3 циркулятора ОЦ2 для вывода 10% мощности сигнала с целью анализа в оптическом спектральном анализаторе с разрешением 0.02 нм.

Процесс ВРМБ происходит следующим образом: сигнал накачки от перестраиваемого лазерного источника попадает в линейный резонатор через 50%-ный порт оптического разветвителя, затем проходит обычный порт разветвителя и вводится в волокно с компенсированной дисперсией, где взаимодействует с нелинейной активной средой для генерации первого бриллиантового пика. Электрострикция, возникающая внутри нелинейной активной среды, вызывает генерацию фононных волн, которые вносят вклад в сигнал обратного рассеяния. Этот сигнал является следствием взаимодействия волны накачки с фононными волнами. Первый стоксов пик сигнала обратного рассеяния распространяется в направлении ОЦ1 и отражается назад в резонатор, где снова попадает в волокно и где процесс взаимодействия повторяется для генерации второго стоксова пика. Энергия каждого последующего пика чуть меньше энергии предыдущего. Этот осциллирующий процесс продолжается до тех пор, пока мощность генерируемой волны остается выше пороговой,

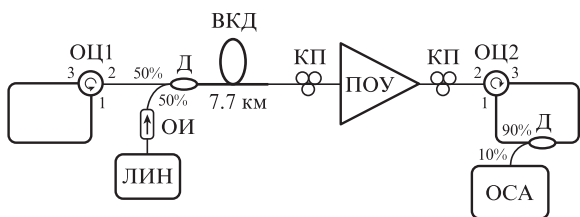


Рис.1. Экспериментальная установка МБВЛ со сверхшироким диапазоном перестройки:

ЛИН – лазерный источник накачки; ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель; ВКД – волокно с компенсированной дисперсией; КП – контроллер поляризации; ОЦ – оптический циркулятор; Д – делитель; ОСА – оптический спектроанализатор; ОИ – оптический изолятор.

необходимой для поддержания процесса ВРМБ. Благодаря линейной конфигурации резонатора полученная многоволновая гребенка совершает множество проходов через полупроводниковый усилитель и усиливается до порога генерации, после чего система становится многоволновым лазером.

3. Результаты и обсуждение

На рис.2 показан спектр усиленного спонтанного излучения сверхширокополосного полупроводникового оптического усилителя при различных токах инжекции. Как видно, спектр покрывает диапазон от 1400 до 1650 нм и вполне пригоден для оценки усиления предложенного многоволнового бриллиантового волоконного лазера.

С ростом тока инжекции максимум мощности спонтанного излучения на выходе усилителя сдвигается в коротковолновую область. Этот эффект обусловлен тем, что энергия, поглощаемая возбужденными электронами нижнего энергетического уровня при переходе на верхний, равна энергии испускаемого фотона; с увеличением энергии фотона длина волны излучения уменьшается. Спектры многоволновой гребенки, полученные при длинах волн бриллиантовой накачки 1510, 1550 и 1580 нм и мощности 10.6 дБм, показаны на рис.3.

Выбранный ток инжекции усилителя 390 мА обеспечивал максимальную ширину линейного усиления (см. рис.2). При длине волны накачки 1510 нм генерируются 10 бриллиантовых пиков. Пиковые мощности лазерных длин волн в S-области находятся в диапазоне от -5.94 до -0.41 дБм; промежутки между соседними пиками составляют 0.078 нм, ширина линии на полувысоте (на уровне 3 дБ) – примерно 0.017 нм. В C-области наблюдаются восемь бриллиантовых пиков с пиковыми мощностями в диапазоне от -4.34 до 0.02 дБм, отстоящие друг от друга по длине волны примерно на 0.080 нм и с шириной линии на полувысоте ~ 0.016 нм. В L-области получены три бриллиантовых пика с пиковой мощностью от -2.19 до 0.39 дБм, расстоянием между соседними пиками 0.081 нм и шириной линии на полувысоте примерно 0.014 нм. Малое количество пиков в последнем случае обусловлено низкой выходной мощностью полупроводникового усилителя (и, следовательно, меньшим усилением) в этой области (рис.2). То, что в коротковолновой области количество полученных бриллиантовых пиков максимально и снижается при смещении в длинноволновую область, свя-

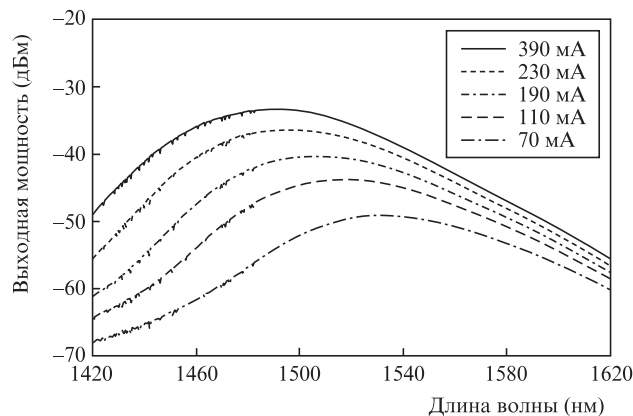


Рис.2. Спектры выходной мощности усиленного спонтанного излучения полупроводникового оптического усилителя при различных токах инжекции.

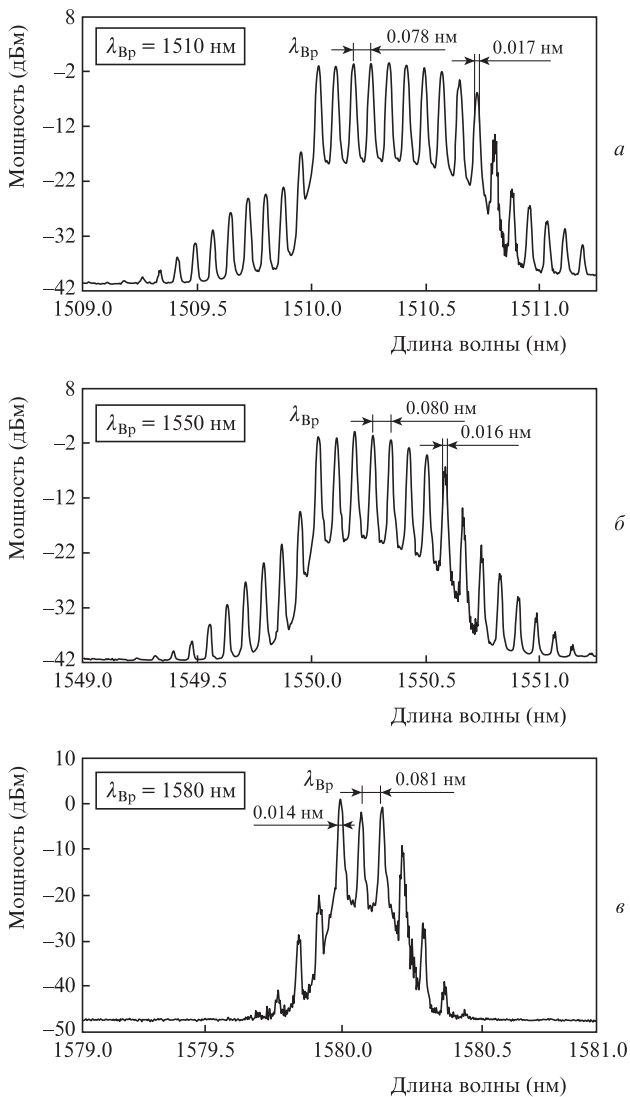


Рис.3. Лазерные гребенки при длине волны бриллюэновской накачки 1510 (а), 1550 (б) и 1580 нм (в) и мощности 10.6 дБм.

зано со спектральным распределением коэффициента усиления сверхширокополосного усилителя, где больший коэффициент усиления в коротковолновой области позволяет получать более высокие пиковые мощности (т. е. чем выше усиление, тем выше выходная мощность, необходимая для преодоления порогового уровня, что позволяет получить большее количество бриллюэновских пиков).

Анализ выходного сигнала предложенной системы показывает, что многоволновые гребенки с длинами волн, меньшими длины волны импульса накачки, вызваны четырехволновым смешением. Это в основном обусловлено высокими нелинейными характеристиками полупроводникового усилителя. Расстояние между соседними длинами волн, полученное в результате расчета, составляет примерно 0.08 нм (10.7 ГГц в частотной области). Следует отметить, что при использовании эрбиевых волоконных усилителей генерируется меньшее количество антистоксовых пиков, чем в случае полупроводникового усилителя. На рис.4 показано количество стоксовых лазерных линий в многоволновой гребенке для различных длин волн бриллюэновской накачки. Видно, что распределение мощности генерируемых пиков по длине волны гребенки хорошо согласуется со спектром люминесценции на выходе усилителя.

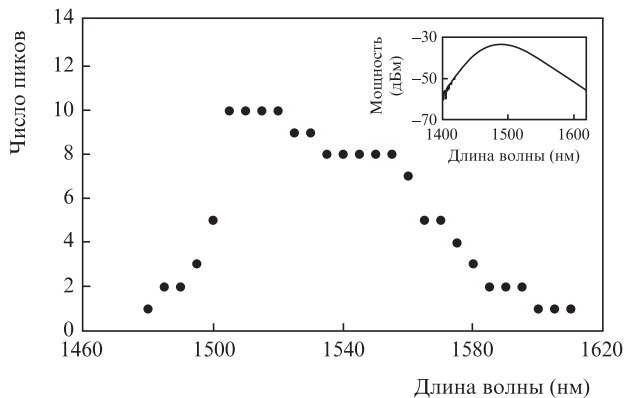


Рис.4. Количество стоксовых пиков в многоволновой гребенке, наблюдавшихся в диапазоне 1480–1610 нм при мощности бриллюэновской накачки 10.6 дБм. На вставке показан спектр люминесценции сверхширокополосного полупроводникового усилителя при токе инжекции 390 мА.

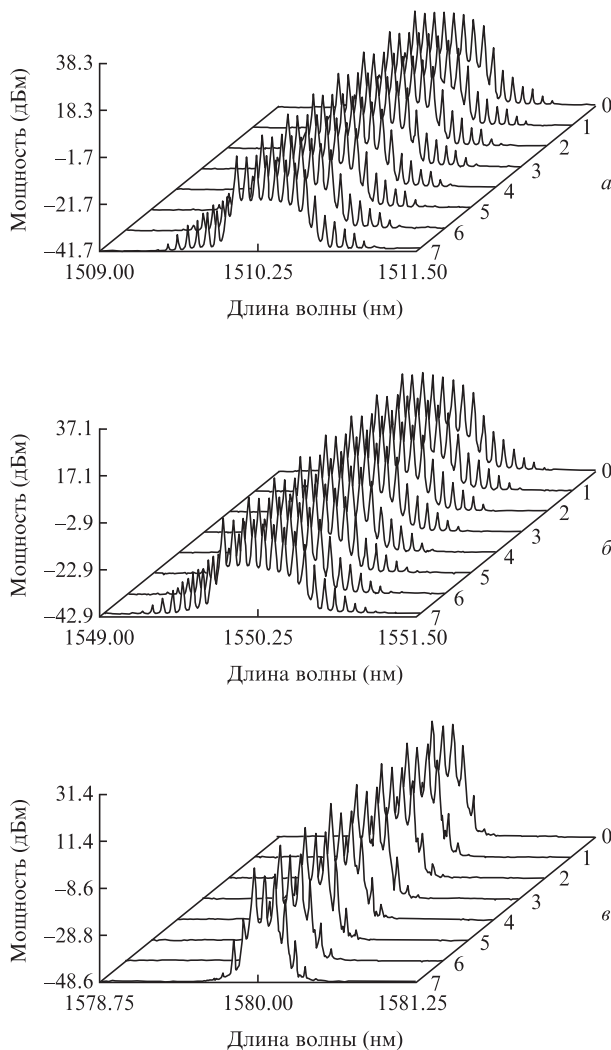


Рис.5. Спектры выходного излучения МБВЛ, зарегистрированные с десятиминутными интервалами при времени тестирования 70 мин для S- (а), C- (б) и L-диапазона (в).

Спектральный диапазон используемого в эксперименте сверхширокополосного усилителя простирается от 1480 до 1610 нм, и усилитель в этом диапазоне обеспечивает необходимое усиление для процесса каскадного ВРМБ. Наи-

большее количество линий (10) генерируется в диапазоне длин волн 1500–1520 нм.

Для определения стабильности и надежности работы система МБВЛ тестировалась с 10-минутными интервалами на протяжении 70 мин при комнатной температуре. Отметим, что система работала более 10 ч, пока длился эксперимент. Выходное излучение системы для различных областей спектра показано на рис.5. Видно, что излучение МБВЛ стабильно, флуктуаций или вариаций выходной мощности практически не наблюдается. Все это подтверждает стабильность и работоспособность предложенной системы.

4. Выводы

Предложен новый многоволновой бриллиантовый волоконный лазер с широким диапазоном перестройки от 1420 до 1620 нм, что покрывает S-, C- и L-области оптической связи. В S-области получена лазерная гребенка с десятью бриллиантовыми пиками с расстоянием между соседними пиками 0.078 нм и шириной линии на полувысоте (на уровне 3 дБ) 0.017 нм; выходная мощность от пика к пику изменялась от –5.94 до –0.41 дБм. В C-диапазоне генерировались восемь стоксовых линий с расстоянием между ними 0.080 нм и шириной линии на полувысоте 0.016 нм; выходная мощность пиков изменялась от –4.34 до 0.02 дБм. В L-диапазоне наблюдались всего три линии, что обусловлено малостью выходной мощности люминесценции полупроводникового усилителя из-за распределения коэффициента усиления. Расстояние между этими

линиями составило примерно 0.081 нм при ширине линии на полувысоте 0.014 нм и выходной мощности пиков от –2.19 до 0.39 дБм. Тестирование в течение 70 мин, а затем работа свыше 10 ч продемонстрировали стабильность и надежность системы; флуктуации мощности не превысили 2 дБ.

1. Connelly M.J. *Semiconductor Optical Amplifiers* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004).
2. Zulkifli M.Z., Hassan N.A., Awang N.A., Ghani Z.A., Harun S.W., Ahmad H. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 1 (2010).
3. Huang Y., Zhan L., Ji J.H., Luo S.Y., Xia Y.X. *Opt. Commun.*, **281**, 452 (2008).
4. Ahmad H., Zulkifli M.Z., Latif A.A., Thambiratnam K., Harun S.W. *Laser Phys.*, **19** (12), 2188 (2009).
5. Dong X.P., Li S., Chiang K.S., Ng M.N., Chu B.C.B. *Electron. Lett.*, **36** (19), 1609 (2000).
6. Ahmad H., Shahabuddin N.S., Rahman A.A., Thambiratnam K., Harun S.W. *J. Modern Opt.*, **55** (14), 2179 (2008).
7. Harun S.W., Saat N.K., Ahmad H. *IEICE Electron. Express*, **2** (6), 182 (2008).
8. Caspary R., Unrau U.B., Kowalsky W. *Proc. 5th Intern. Conf. on Transparent Optical Networks* (Warsaw, 2003, vol. 1, pp. 236–242).
9. Aozasa S., Masuda H., Shimizu M. *J. Lightwave Technol.*, **24** (10), 3842 (2006).
10. Tanabe S., Tamaoka T. *J. Non-Cryst. Sol.*, **326–327**, 283 (2003).
11. Shahi S., Harun S.W., Shahbuddin N.S., Shirazi M.R., Ahmad H. *Opt. Laser Technol.*, **41**, 198 (2009).
12. Zhou D., Pruchal P.R., Glesk I. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10** (6), 781 (1998).
13. Huang Y., Zhan L., Ji J.H., Luo S.Y., Xia Y.X. *Opt. Commun.*, **281**, 452 (2008).
14. Al-Mansoori M.H., Abd-Rahman M.K., Mahamd Adikan F.R., Mahdi M.A. *Opt. Express*, **13** (9), 3471 (2005).