

# Суперлюминесцентный источник S–C–L-излучения на трех длинах волн с использованием сверхширокополосных ПОУ и ВБР\*

Х.Ахмад, М.З.Зулкифли, Н.А.Хассан, Ф.Д.Мухаммад, С.В.Харун

*Предложен и продемонстрирован суперлюминесцентный источник излучения на трех длинах волн с выходом в областях S-, C- и L-полос, использующий сверхширокополосный полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) в качестве среды с линейным усилением в диапазоне 1440–1620 нм. Три волоконных брэгговских решетки (ВБР) с центральными длинами волн 1500, 1540 и 1580 нм применяются для генерации излучения на длинах волн в S-, C- и L-полосах соответственно, а регулируемый оптический аттенюатор служит для прецизионной балансировки оптических мощностей на указанных длинах волн. Сверхширокополосный ПОУ генерирует усиленное спонтанное излучение (УСИ) с пиковой мощностью –33 дБм при наибольшем токе накачки, причем центральная длина волны спектра УСИ сдвигается вниз из-за пространственного распределения концентрации носителей. При высоких токах накачки излучение на длине волны S-полосы доминирует с выходной мощностью –6 дБм, тогда как мощность в C- и L-полосах составляет только –11 и –10 дБм соответственно. На всех длинах волн при предельно высоком токе накачки 390 мА среднее отношение сигнал/шум превышает 60 дБ, причем система демонстрирует высокий уровень стабильности (флуктуации мощности менее 3 дБ в течение 70 мин). Предлагаемая система может найти множество приложений там, где нужен широкополосный и стабильный лазерный источник, например в задачах связи и зондирования.*

**Ключевые слова:** сверхширокополосный полупроводниковый оптический усилитель, суперлюминесцентный источник в S-, C-, L-областях.

## 1. Введение

Работающие на многих длинах волн волоконные лазеры (МВВЛ) вызывают в последнее время значительный интерес как компактные и экономически эффективные источники излучения для различных приложений в оптической связи [1–3], в оптических датчиках [4, 5] и приборах [6] и даже в микроволновых фотонных системах [7]. Обычно в качестве усиливающих сред для МВВЛ используются легированные эрбием волокна (ЭВ) из-за их большого коэффициента усиления, высокой мощности насыщения и относительно низкого коэффициента шума, что позволяет генерировать сигналы высокого качества.

В настоящее время большинство МВВЛ на основе ЭВ оптимизируются для работы в области C-полосы от 1530 до 1565 нм [8]. Однако недавнее расширение полосы связи в область L-полосы от 1565 до 1625 нм потребовало разработки экономически эффективных источников излучения в этом диапазоне. Для того чтобы МВВЛ мог работать в области L-полосы, к нему следует добавить дополнительный отрезок ЭВ. Недостатком этого подхода является более низкий коэффициент усиления и более высокий коэффициент шума, что снижает общее качество излучения на длине волны генерации [9, 10]. Более того, одновременную генерацию сигналов в C- и L-полосах в МВВЛ

невозможно получить традиционными средствами, поэтому требуется применение эффекта четырехволнового смешения [11] либо использование специальных волокон, таких как волокна, легированные висмутом [12], или высоконелинейные волокна [13], а также сложных схем, например ЭВ с ВКР [14]. Кроме того, исследователи теперь обращают внимание на S-диапазон (1480–1530 нм) для расширения полосы линий связи, поэтому МВВЛ на этот диапазон вызывают значительный интерес. Однако, как и в случае с МВВЛ L-диапазона, лазер на S-полосу нельзя реализовать обычными средствами – необходимо использовать специальные волокна, такие как двухоболочечное ЭВ с низким показателем преломления внутренней оболочки [15], или ВРМБ [16] для получения нужных длин волн генерации. Поэтому очень трудно разработать сверхширокополосный МВВЛ, способный к одновременной генерации излучения на длинах волн в S-, C- и L-диапазонах с использованием единственной усиливающей среды.

Помимо МВВЛ существует также потребность в многоволновых суперлюминесцентных источниках (МВСИ), которые могут найти полезные применения при создании датчиков, выступать в качестве источника пробных сигналов для S-, C- и L-полос, а также быть дополнением существующих волоконных лазеров в качестве недорогих сверхширокополосных источников сигнала. Полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) является весьма подходящим кандидатом для создания сверхширокополосного МВСИ, особенно из-за свойств неоднородного уширения его линии. В отличие от ЭВ, линия которого однородно уширена, ПОУ допускает одновременное усиление излучения на нескольких длинах волн без вредного влияния воздействий конкуренции мод и неустойчивых выходных сигналов, охватывающих диапазон от 1440 до

\* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

1620 нм, который покрывает S-, C- и L-полосы. Все это позволяет разработать компактный и недорогой МВСИ на основе ПОУ без применения сложных схем или специальных методов.

В настоящей работе предложен и продемонстрирован МВСИ с использованием сверхширокополосного ПОУ в качестве линейного усилителя и волоконных брэгговских решеток (ВБР) с центральными длинами волн 1500, 1540 и 1580 нм в качестве спектральных фильтров для одновременной генерации излучения суперлюминесценции в S-, C- и L-полосах. Предлагаемая система исследуется на предмет ее эффективности с точки зрения мощности и отношения сигнал/шум, а также на предмет ее стабильности в течение длительных отрезков времени. Предлагаемый МВСИ на трех длинах волн может иметь много потенциальных применений в связи и оптических датчиках.

## 2. Экспериментальная установка

Схема предлагаемого МВСИ излучения в S-, C- и L-полосах показана на рис.1. Излучатель состоит из двух основных компонентов: кольцевого резонатора, который обеспечивает усиление для выхода суперлюминесценции, а также устройства фильтрации для получения S-, C- и L-длин волн.

Усиливающей средой такого МВСИ является сверхширокополосный ПОУ с полосой усиления шире, чем 220 нм, в диапазоне 1400–1620 нм. Активным слоем ПОУ является InGaAsP, который обеспечивает полосу усиления 160 нм и поляризационно зависимый коэффициент усиления 1.5 дБ. Исходно ПОУ генерирует широкий спектр усиленного спонтанного излучения (УСИ), который затем проходит через контроллер поляризации (КП) в порт 1 оптического циркулятора (ОЦ). После этого УСИ попадает в порт 2 ОЦ, а затем на общий порт S/C + L мультиплексора длин волн (МП). Здесь спектр УСИ расщепляется на две составляющие, одна покрывает диапазон S-полосы, а вторая – диапазоны C- и L-полос. Излучение в S-полосе направляется на ВБР (1500 нм), которая отражает единственный сигнал на длине волны 1500 нм. Коэффициент отражения ВБР составляет 99%, а ширина спектра – около 1.5 нм (рис.2). Аналогичные сигналы люминесценции имеют место для длин волн 1540 и 1580 нм.

Тем же способом вторая спектральная составляющая (суперпозиция C- и L-полос) направляется через управляемый оптический аттенуатор (УОА) на две ВБР, которые отражают излучение на  $\lambda = 1540$  и 1580 нм. УОА исполь-

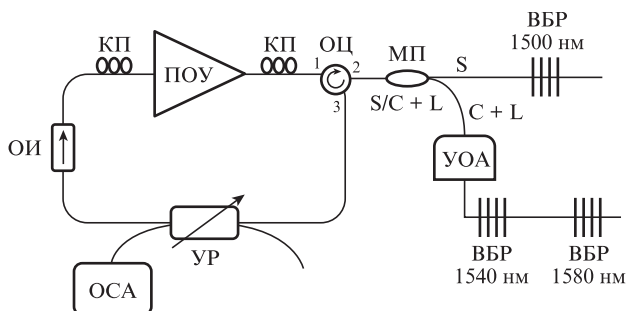


Рис.1. Экспериментальная установка для суперлюминесцентного источника S-C-L-излучения на трех длинах волн:

КП – контроллер поляризации; ОЦ – оптический циркулятор; МП – мультиплексор длин волн; ОИ – оптический изолятор; УОА – управляемый оптический аттенуатор; УР – управляемый разветвитель; ОСА – оптический спектроанализатор.

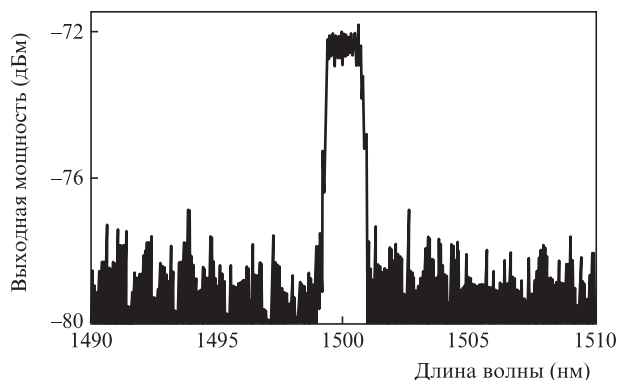


Рис.2. Отраженный сигнал ВБР на 1500 нм; ширина линии около 1.5 нм, коэффициент отражения около 99%.

зуется для контроля мощности на этих двух длинах волн, поэтому она такая же, как и у сигнала на 1500 нм, хотя пиковая мощность УСИ ПОУ выше в области S-полосы. Отраженные сигналы на 1500, 1540 и 1580 нм попадают на порт S/C + L МП и объединяются для формирования сигнала со строенным спектром суперлюминесцентных длин волн. Этот сигнал направляется на порт 2 ОЦ и выходит через порт 3. Излучение на указанных трех длинах волн будет затем циркулировать в кольцевом резонаторе благодаря управляемому разветвителю 2x2 и оптическому изолятору, который вместе со вторым КП определяет одностороннюю генерацию в направлении по часовой стрелке. Управляемый разветвитель обеспечивает изменение коэффициентов связи, благодаря чему часть сигнала извлекается из резонатора и исследуется с помощью анализатора оптического спектра с разрешением 0.02 нм.

## 3. Результаты и их обсуждение

Спектры мощности УСИ сверхширокополосного ПОУ при различных токах накачки показаны на рис.3. Видно, что при токе накачки 70 мА спектр имеет колоколообразную форму, плавно нарастающую от -65 дБм на 1440 нм до максимального значения -49 дБм на 1540 нм, а затем медленно убывает до -60 дБм на 1620 нм. При токе 150 мА мощность изменяется от -54 дБм на 1440 нм до -40 дБм на 1507 нм, а затем падает до -57 дБм на 1620 нм. При 270 мА имеем мощность -45 дБм на 1440 нм, -35 дБм на 1492 нм и -55 дБм на 1620 нм, а при максимальном токе накачки 390 мА мощность составляет -41 дБм на 1440 нм, -33 дБм на 1486 нм и -55 дБм на 1620 нм.

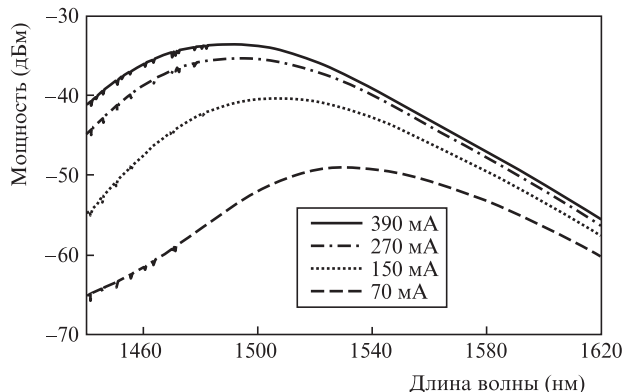


Рис.3. Спектры мощности УСИ сверхширокополосного ПОУ при различных токах инжекции.

Из спектров рис.3 можно сделать два важных заключения, которые, в свою очередь, определяют поведение источника суперлюминесценции. Во-первых, при более низком токе накачки небольшое его увеличение приводит к большому скачку мощности УСИ. Однако по мере роста тока накачки результирующее увеличение мощности становится все меньше из-за ограниченного числа носителей, которое ПОУ может генерировать в любой момент времени. Таким образом, при более низком уровне накачки увеличение тока приводит к существенной генерации носителей, а при более высоких токах (приближающихся к максимальному току накачки) любое увеличение тока порождает мало дополнительных носителей. В результате ПОУ работает в условиях насыщения и обеспечивает лишь незначительный рост мощности УСИ [3]. Второй важный результат – это смещение пиковой длины волны  $\lambda_{max}$  спектров в коротковолновую сторону с возрастанием тока накачки. Например, при 70 мА  $\lambda_{max} \approx 1530$  нм с более высокой мощностью в правом крыле (от 1530 до 1620 нм), чем в левом (от 1440 до 1530 нм). С увеличением тока  $\lambda_{max}$  движется к 1500 нм, а затем к 1480 нм, причем мощность в правом крыле заметно ниже мощности в левом. Все это обусловлено изменением распределения плотностей носителей: при более низких входных мощностях плотность носителей симметрично распределена в пространстве с максимумом в центре ПОУ и падает в сторону входной и выходной граней, что и приводит к пику УСИ в центре области усиления. Это та же самая характерная особенность, которая наблюдается в случае излучения абсолютно черного тела [17].

На рис.4 показаны мощности пиков суперлюминесценции в S–C–L-источнике при различных токах накачки. Генерация трех четко выраженных пиков имеет место при работе ПОУ на высоком токе (например, при 270 мА) и использовании УОА для подстройки выходной мощности на длинах волн С- и L-полос, с тем чтобы она была на том же уровне, что и мощность в S-полосе. Так, при самом низком токе накачки 70 мА получают три длины волны суперлюминесценции на 1500, 1540 и 1580 нм с пиковыми мощностями –58, –56 и –53 дБм соответственно.

С увеличением тока накачки до 170 мА мощность в S-полосе (1500 нм) незначительно увеличивается (до –42 дБм), в то время как мощности в С- и L-полосах (1540 и 1580 нм) быстро растут до –16 и –12 дБм соответственно. Рост тока до 270 мА приводит к мощностям –12, –11 и –10 дБм для длин волн 1500, 1540 и 1580 нм. При максимальном токе 390 мА мощность в S-полосе возрастает до –6 дБм, в то время как мощности в С- и L-полосах

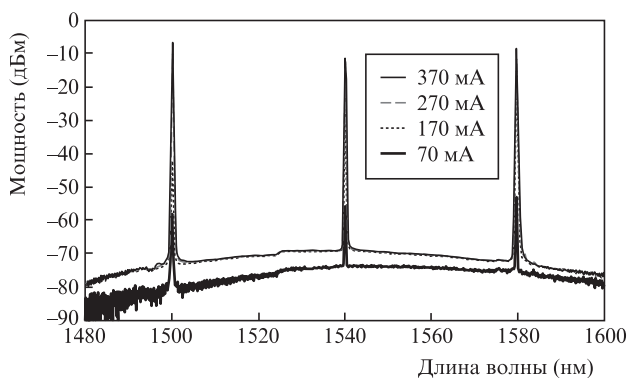


Рис.4. Одновременная генерация на строенной длине волны в S-, С- и L-полосах при различных токах накачки ПОУ.

остаются почти неизменными. Эти результаты получены без какой-либо подстройки УОА. Увеличение выходной мощности в области более коротких длин волн связано с особенностью спектра УСИ (рис.3), широкий пик которого сдвигается в коротковолновую сторону с ростом тока накачки.

Среднее отношение сигнал/шум (ОСШ) на трех генерируемых длинах волн при самом низком токе 70 мА составляет примерно 20 дБ и по мере увеличения тока накачки до 170, 270 и, наконец, до 370 мА также увеличивается до 48, 60 и 62 дБ соответственно. Это коррелирует с увеличением выходной мощности на длинах волн суперлюминесценции при различных токах накачки. Можно отметить, что изменение ОСШ нелинейно – оно растет быстро при низких токах и незначительно в диапазоне более высоких токов.

На рис.5 показана зависимость измеренной мощности в различных диапазонах длин волн от тока накачки ПОУ. Видно, что пороговый ток генерации в С- и L-полосах (70 мА) гораздо ниже, чем для S-полосы (170 мА).

Кроме того, на пороге дифференциальная эффективность сигнала составляет в L-полосе  $8.0 \times 10^{-4}$  мВт/мА, тогда как в С-полосе лишь  $2.4 \times 10^{-4}$  мВт/мА. Однако при токе около 170 мА наклон сигнала в L-полосе снижается до  $2.5 \times 10^{-4}$  мВт/мА. В то же время, сигнал в S-полосе имеет более высокий порог (170 мА), чем сигналы в С- и L-полосах, и крутизну около  $7.5 \times 10^{-4}$  мВт/мА в области токов 170 и 270 мА. Тем не менее, дифференциальная эффективность сигнала в S-полосе значительно возрастает (до  $1.5 \times 10^{-3}$  мВт/мА) при токах, превышающих 270 мА. При низких токах накачки самую высокую мощность имеет сигнал в L-полосе, а затем сигналы в С- и S-полосах. Однако при токе ~235 мА мощность сигнала в S-полосе сравнивается с мощностью сигнала в С-полосе, а при токе 280 мА сигнал в S-полосе сравнивается с сигналом в L-полосе. При максимальном токе сигнал в S-полосе почти вдвое превышает сигнал в L-полосе и в три раза – сигнал в С-полосе.

Рис.6 демонстрирует стабильность работы в течение 70 мин предлагаемого суперлюминесцентного источника на трех длинах волн со спектром генерации, полученным во временном интервале 10 мин.

Видно, что предлагаемая система очень стабильна – флуктуации мощности менее 3 дБ в течение периода теста.

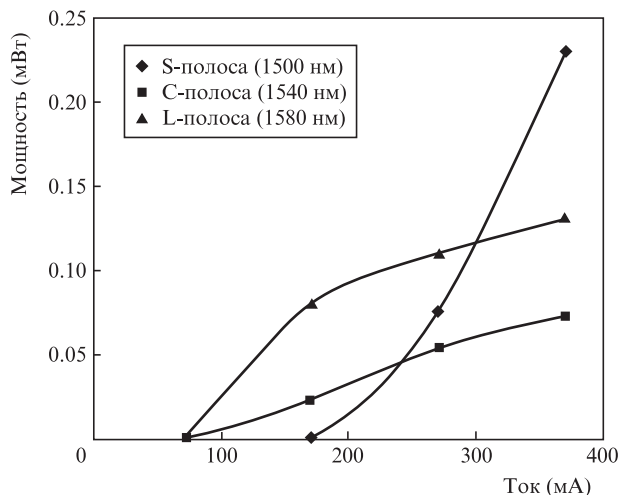


Рис.5. Зависимость выходной мощности ПОУ от тока накачки для различных длин волн.

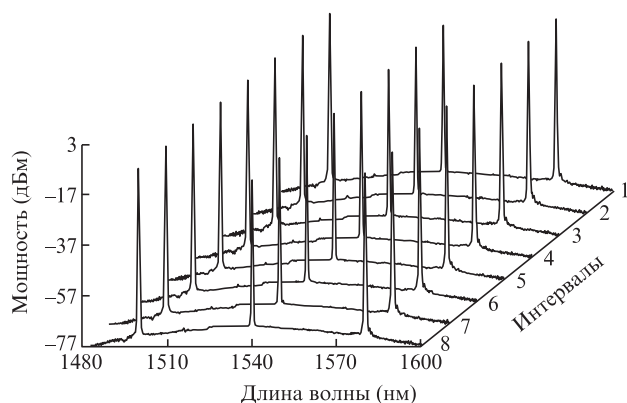


Рис.6. Стабильность мощности излучения суперлюминесцентного источника на трех длинах волн во временном интервале 10 мин.  $P_{REF} = -17$  дБм.

Таким образом, предлагаемый суперлюминесцентный источник может быть использован для таких приложений, как связь и зондирование.

#### 4. Заключение

Предложен и продемонстрирован основанный на широкополосном ПОУ суперлюминесцентный источник на трех длинах волн в диапазонах S-, C- и L-полос. В нем используются ПОУ с диапазоном усиления от 1440 до 1620 нм в качестве усиливающей среды, а также три ВБР на 1500, 1540 и 1580 нм для генерации излучения на длинах волн суперлюминесценции. Пиковая мощность УСИ, генерируемого сверхширокополосным ПОУ, составляет  $-49$  дБм на 1540 нм при самом малом токе накачки и  $-33$  дБм на 1486 нм на самом высоком токе накачки, при этом длина волны максимальной мощности сдвигается в коротковолновую сторону. Последнее обусловлено распределением плотности носителей в ПОУ, что близко к случаю излучения абсолютно черного тела. Мощность на генерируемых длинах волн также увеличивается с ростом тока

накачки. Сначала она растет быстрее на длинах волн 1540 и 1580 нм. При больших токах накачки самая высокая выходная мощность ( $-6$  дБм) у излучения на 1500 нм ( $-11$  и  $-10$  дБм на длинах волн 1540 и 1580 нм). При максимальном токе накачки (390 мА) средний ОСШ на всех длинах волн превышает 60 дБ. Система демонстрирует высокую степень стабильности мощности (флуктуации менее 3 дБ) в течение 70 мин. Таким образом, предложенная система на основе широкополосного и стабильного МВСИ может найти применение в таких задачах, как связь и зондирование.

Мы благодарны Университету Малайи за финансирование этого проекта (гранты № UMRG RP019-2012A и RG143-12AET).

1. Lee S.L., Jang I.F., Wang C.Y., Pien C.T., Shih T.T. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 197 (2000).
2. Zhang A., Liu H., Demokan M.S., Tam H.Y. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **17**, 2535 (2005).
3. Ahmad H., Thambiratnam K., Sulaiman A.H., Tamchek N., Harun S.W. *Laser Phys. Lett.*, **5**, 726 (2008).
4. Achaerandio E., Jarabo S., Abad S., Amo M.L. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11**, 1644 (1999).
5. Chaudhari A.L., Shaligram A.D. *Sensors and Actuators A: Phys.*, **100**, 160 (2002).
6. Ye W., Liu W., Chen T., Yang D.Z., Shen Y.H. *Laser Phys.*, **20**, 1636 (2010).
7. Fu J., Chen D., Sun B., Gao S. *Laser Phys.*, **20**, 1907 (2010).
8. Harun S.W., Rahman F.A., Dimiyati K., Ahmad H. *Laser Phys. Lett.*, **3**, 495 (2006).
9. Islam M.N., Hwang S., Song K.W., Song K.U., Park S.H., Nilsson J., Cho K. *Electron. Lett.*, **37**, 1539 (2001).
10. Zhou Y.W. *Laser Phys.*, **22**, 753 (2012).
11. Liu X., Zhao W., Liu H., Zou K., Zhang T., Lu K., Sun C., Wang Y., Ouyang X., Chen G., Hou X. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **8**, 601 (2006).
12. Shahabuddin N.S., Harun S.W., Zulkifli M.Z., Thambiratnam K., Ahmad H. *J. Modern Opt.*, **55**, 1345 (2008).
13. Im J.E., Kim B.K., Chung Y. *Laser Phys.*, **21**, 540 (2011).
14. Chen D., Qin S. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **49**, 2339 (2007).
15. Zulkifli M.Z., Jemangin M.H., Harun S.W., Ahmad H. *Laser Phys.*, **21**, 1633 (2011).
16. Ahmad H., Saat N.K., Harun S.W. *Laser Phys. Lett.*, **2**, 369 (2005).
17. Connelly M.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37**, 439 (2001).