

Синхронизация мод в висмутовом волоконном лазере с помощью SESAM

А.А.Крылов, В.В.Двойрин, В.М.Машинский, П.Г.Крюков, О.Г.Охотников, М.Гуина

С помощью насыщающегося поглотителя типа SESAM, оптимизированного для работы в спектральном диапазоне 1100–1200 нм, реализован непрерывный режим пассивной синхронизации мод в лазере на основе легированного висмутом волоконного световода. Накачка осуществлялась непрерывным иттербиевым волоконным лазером на длине волны 1075 нм. Исследована работа лазера с выходными зеркалами резонатора либо на основе брэгговских волоконных решёток, либо с петлевыми волоконными зеркалами Саньяка. Получена стабильная генерация импульсов длительностью от 50 пс до 3.5 нс в зависимости от типа выходного зеркала. Частота следования составляла 11 МГц на длине волны около 1160 нм при максимальной ширине спектра 2.1 нм. Максимальная средняя мощность лазерного излучения составила 7.8 мВт при мощности накачки 1140 мВт.

Ключевые слова: висмутовый волоконный лазер, синхронизация мод, SESAM.

1. Введение

Волоконные лазеры обладают рядом существенных достоинств, таких как компактность, эффективность, надёжность и простота в эксплуатации. Ведутся интенсивные работы по улучшению выходных характеристик волоконных лазеров, в частности по расширению диапазона длин волн излучения и уменьшению длительности импульсов в случае импульсного режима генерации. Недавно появились работы, посвящённые новому типу активного волоконного световода – световоду с легированной атомами висмута сердцевиной [1]. Спектр люминесценции соединений висмута в световоде простирается от 1.1 до 1.3 мкм, что даёт основание надеяться на возможность генерации ультракоротких импульсов длительностью вплоть до субпикосекунд при осуществлении режима синхронизации мод.

К настоящему времени реализован режим непрерывной генерации висмутового волоконного лазера [2–5] при накачке излучением иттербиевого волоконного лазера. Выходная мощность достигала 460 и 550 мВт при максимальной эффективности 29 % [2] и 24 % [3] на длинах волн 1146 и 1200 нм соответственно. Была получена максимальная мощность 15 Вт [5] на $\lambda = 1160$ нм.

В работе [6] нами впервые была продемонстрирована непрерывная генерация висмутового лазера в режиме пассивной синхронизации мод, который инициировался и поддерживался с помощью элемента типа полупроводникового зеркала с насыщающимся поглощением (SESAM) [7, 8]. При этом были получены лазерные импульсы дли-

тельностью около 50 пс при максимальной средней мощности 2 мВт. В настоящей работе проведено более подробное исследование режима пассивной синхронизации мод в лазере на основе маломодового волоконного световода, легированного висмутом, с использованием в качестве выходного зеркала резонатора либо волоконной брэгговской решётки (ВБР), либо широкополосного петлевого волоконного зеркала Саньяка.

2. Волоконный световод, легированный висмутом

Использовался волоконный световод на основе кварцевого стекла с сердцевиной, легированной висмутом. Заготовка для вытяжки световода была изготовлена MCVD-методом. Атомная концентрация висмута не превышала 0.02 % (минимально возможное измеряемое значение). Использование столь малой концентрации обусловлено тем, что при её увеличении эффективность лазерной генерации существенно уменьшается [1–2]. Такая концентрация висмута обеспечивает довольно малые коэффициенты поглощения излучения накачки (0.9 дБ/м на $\lambda = 1075$ нм) и усиления излучения, распространяющегося по световоду (коэффициент усиления при полном насыщении ~ 0.5 дБ/м на $\lambda = 1160$ нм). Поэтому для обеспечения эффективного поглощения излучения накачки и достижения средних мощностей непрерывного излучения на уровне как нескольких ватт [2–4], так и десятков ватт [5] приходится использовать активные висмутовые световоды длиной около 100 м. При такой длине световода осуществить режим синхронизации мод практически невозможно из-за большой дисперсии групповых скоростей (ДГС). Поэтому в настоящей работе использовался активный висмутовый световод длиной 4.8 м. Спектры оптических потерь и люминесценции данного световода, а также состав сердцевины приведены на рис.1. Основные измеренные характеристики активного висмутового световода приведены ниже.

А.А.Крылов, В.В.Двойрин, В.М.Машинский, П.Г.Крюков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова 38; e-mail: kryukov@fo.gpi.ru

О.Г.Охотников, М.Гуина. Optoelectronics Research Center, Tampere University of Technology, Korkeakoulunkatu 3, Tampere, 33720 Finland; RafeKron Ltd., Ikmiestienkatu 17D 18, Tampere, 33710 Finland

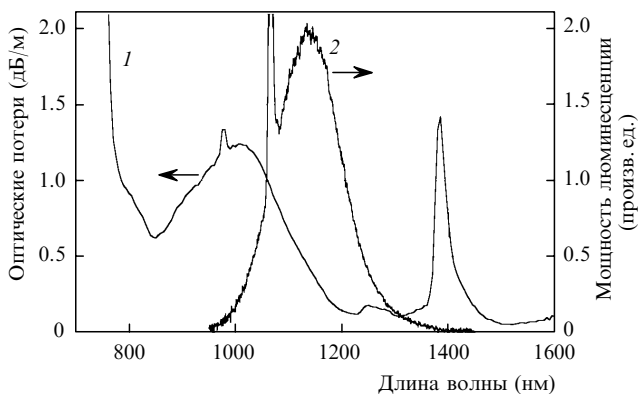


Рис.1. Спектры оптических потерь (1) и люминесценции (2) волоконного световода, легированного атомами висмута (состав сердцевинки световода $97.70\text{SiO}_2 - 2.25\text{Al}_2\text{O}_3 - (< 0.02)\text{Bi}_2\text{O}_3$); полосы на 800 и 1000 нм обусловлены соединениями висмута, полосы на 945, 1245 и 1385 нм – OH-группами.

Концентрация атомов висмута (%)	< 0.02
Диаметр поля основной моды (по уровню интенсивности e^{-2}) на $\lambda = 1160$ нм (мкм)	10.9 ± 0.1
Длина световода (м)	4.8
Время жизни верхнего лазерного уровня (мс)	~ 1
Потери излучения накачки на $\lambda = 1075$ нм (дБ)	4.3
Дисперсия второго порядка β_2 на $\lambda = 1160$ нм ($\text{пс}^2 \cdot \text{м}^{-1}$)	1.1×10^{-2}

3. Схема экспериментальной установки

Экспериментальные схемы висмутового волоконного лазера приведены на рис.2. Все пассивные волоконные элементы резонатора висмутового лазера были изготовлены на основе одномодового световода типа Flexcore с диаметром основной моды 7.3 ± 0.1 мкм и с дисперсией второго порядка $\beta_2 \approx 1.5 \times 10^{-2} \text{ пс}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ на $\lambda = 1160$ нм. Потери на стыковку висмутового и пассивного световодов удалось свести до 0.4 дБ выбором параметров дугового разряда сварочного аппарата CORNING A60.

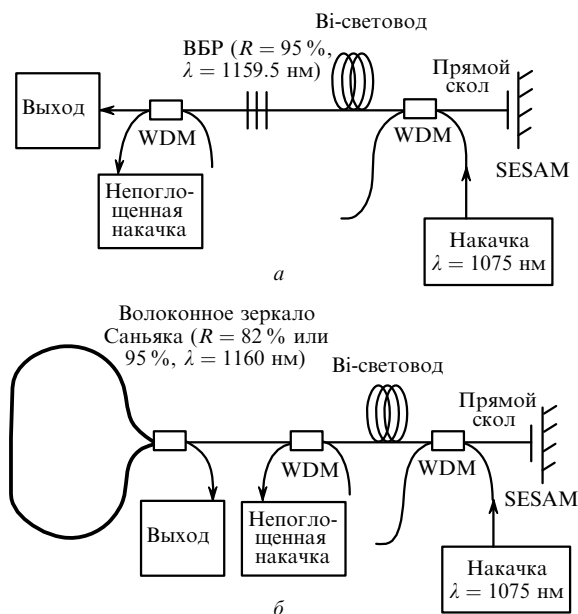


Рис.2. Экспериментальные схемы импульсного висмутового лазера с ВБР (а) и волоконным зеркалом Саньяка (б); WDM – волоконный мультиплексор.

В схеме на рис.2,а в качестве выходного зеркала применялись ВБР с высокими коэффициентами отражения и с различными ширинами спектра отражения. Необходимость использования высокоотражающего выходного зеркала резонатора обусловлена малым коэффициентом усиления лазерного излучения в висмутовом световоде.

В схеме на рис.2,б выходным зеркалом резонатора служили волоконные петлевые широкополосные зеркала Саньяка с коэффициентами отражения 82 % и 95 % на $\lambda = 1160$ нм. Применение таких зеркал позволяет исключить спектральную фильтрацию излучения, характерную для ВБР, что, в свою очередь, способствует получению более широкого спектра лазерного излучения.

В обеих схемах вторым зеркалом лазерного резонатора служил элемент SESAM, к которому вплотную подводился сколотый под прямым углом торец волоконного световода. SESAM на основе GaInNAs-структуры был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs и оптимизирован для работы в спектральном диапазоне 1100–1200 нм [7, 8]. SESAM функционировал в режиме, близком к резонансному, с высоким контрастом насыщающихся потерь излучения в нем, так как только в этом случае возможен самозапуск синхронизации мод в лазере с большой положительной ДГС резонатора [7, 8].

Накачка осуществлялась излучением непрерывного иттербиевого волоконного лазера ($\lambda = 1075$ нм) с максимальной выходной мощностью 1140 мВт через волоконный мультиплексор (WDM) с эффективным объединением излучений длин волн 1075 и 1160 нм. В лазере накачки использовался активированный ионами иттербия световод длиной 7 м с двумя ВБР в качестве зеркал резонатора с коэффициентами отражения излучения на $\lambda = 1075$ нм ~ 100 % и 5 %. Ширина спектра генерации лазера накачки составляла ~ 0.05 нм. Накачка иттербиевого световода осуществлялась лазерным диодом с многомодовым волоконным выходом на $\lambda = 975$ нм. Все пассивные волоконные компоненты иттербиевого лазера накачки также были изготовлены на основе одномодового световода типа Flexcore с диаметром основной моды 7.0 ± 0.1 мкм на длине волны 1075 нм.

Выходное коллимированное излучение импульсного висмутового лазера (диаметр гауссова пучка составлял ~ 500 мкм) пропускалось через спектральный фильтр, отсекающий остаточное излучение накачки, и направлялось в измерительную часть экспериментальной установки. Для измерения временных характеристик лазерных импульсов использовались аналоговый осциллограф TEKTRONIX 7104 с полосой 5 ГГц и германиевый фотоприемник с временем отклика 700 пс, а также автокоррелятор INRAD5-14LDA, работающий в режиме неколлинеарного синхронизма в кристалле ниобата лития. Спектральные измерения проводились спектроанализатором ANDO AQ6317B с максимальным разрешением 0.01 нм. Средняя мощность излучения измерялась с помощью прибора Coherent FieldMaxII с полупроводниковым сенсором.

4. Экспериментальные результаты

4.1. Лазер с ВБР

Первоначально [6] в качестве выходного зеркала резонатора использовалась ВБР с коэффициентом отраже-

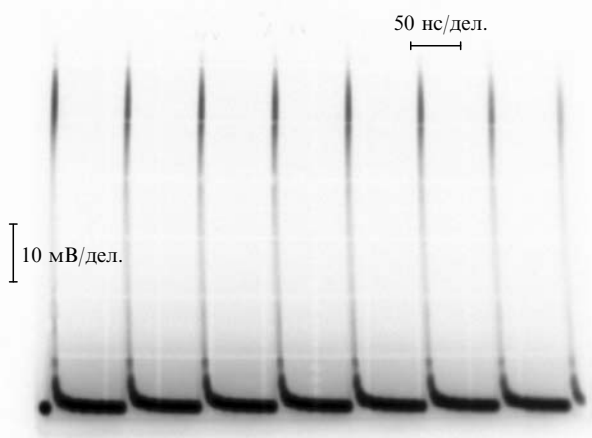


Рис.3. Цуг импульсов, генерируемых висмутовым лазером с ВБР (схема лазера на рис.2,*a*).

ния 75 % на $\lambda = 1161.6$ нм и шириной спектра отражения ~ 0.02 нм. Впервые была получена непрерывная генерация в режиме пассивной синхронизации мод с длительностью импульсов около 50 пс на $\lambda = 1161.6$ нм. Удалось реализовать стабильный режим непрерывной синхронизации мод и исключить режим модуляции добротности резонатора во всем диапазоне мощностей иттербиевого лазера накачки вплоть до максимальной.

Поскольку минимальная длительность импульса определяется шириной спектра, была предпринята попытка использовать ВБР с более широким спектром отражения. Для этого применялась решётка с коэффициентом отражения 95 % на $\lambda = 1159.5$ нм и с шириной спектра отражения 0.5 нм. На рис.3 показан цуг стабильных импульсов, генерируемых лазером с ВБР в режиме синхронизации мод. Ширина спектра излучения лазера составила 0.2 нм, т. е. на порядок больше, чем в [6]. Однако, несмотря на большую ширину спектра, лазерные импульсы оказались довольно длинными (~ 3.5 нс, рис.4) и к тому же имели некоторую внутреннюю структуру в виде амплитудной модуляции, что подтверждается измерением автокорреляционной функции интенсивности импульсов (рис.5), где центральный пик (его ширина составляет около 10 пс) как раз и соответствует наличию этой внутренней нестабильной структуры. Такое увеличение длительности импульса и появление внутренней структуры в нём, по-видимому, связано с тем, что в случае распространения

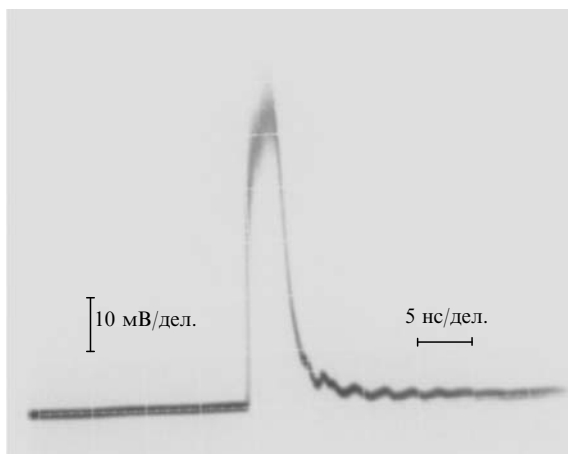


Рис.4. Оциллограмма единичного импульса, генерируемого висмутовым лазером с ВБР (схема лазера на рис.2,*a*).

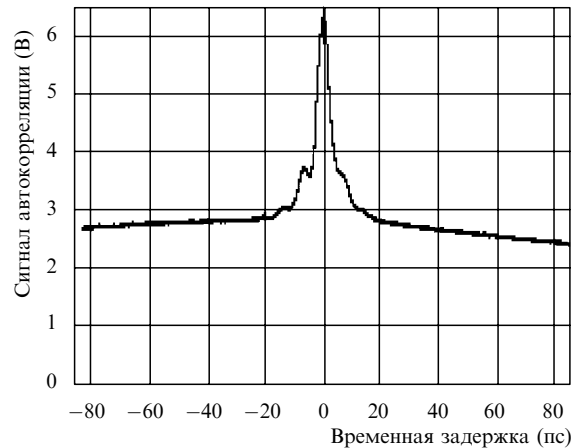


Рис.5. Автокорреляционная функция интенсивности излучения висмутового лазера с ВБР (схема лазера на рис.2,*a*).

лазерных импульсов с более широким спектром ДГС в длинном волоконном резонаторе и в ВБР играет более важную роль при формировании импульсов. Можно предположить, что нелинейные эффекты (фазовая самомодуляция и четырехволновое смешение) также могут стать более существенными. При этом, по-видимому, ДГС волоконной решетки в случае широкого спектра также имеет особенно важное значение при формировании импульса в резонаторе. Таким образом, увеличение ширины спектра, полученное при использовании ВБР с более широким спектром отражения, привело не к сокращению длительности, но, наоборот, к существенному её увеличению.

Необходимо отметить, что временные характеристики лазерного излучения не изменяются с ростом его средней мощности. Форма спектра излучения лазера (рис.6) также не меняется с ростом его средней мощности. При этом, однако, она не повторяет в точности спектральный профиль ВБР. Очевидно, что лазерные импульсы не являются спектрально-ограниченными и имеют внутреннюю структуру, возможно, в виде амплитудно-фазовой модуляции.

Максимальная дифференциальная эффективность лазера составила 0.8% (линия 1 на рис.7). Несмотря на сравнительно малую эффективность, лазер имеет довольно низкий порог возникновения генерации. Линии 1 и 2 на рис.7 различаются тем, что в случае, соответствующем линии 2, WDM на рис.2,*a*, который выводит непоглощен-

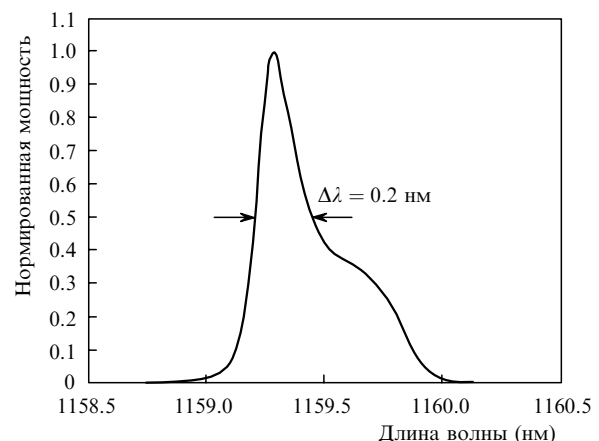


Рис.6. Спектр излучения висмутового лазера с ВБР (схема лазера на рис.2,*a*).

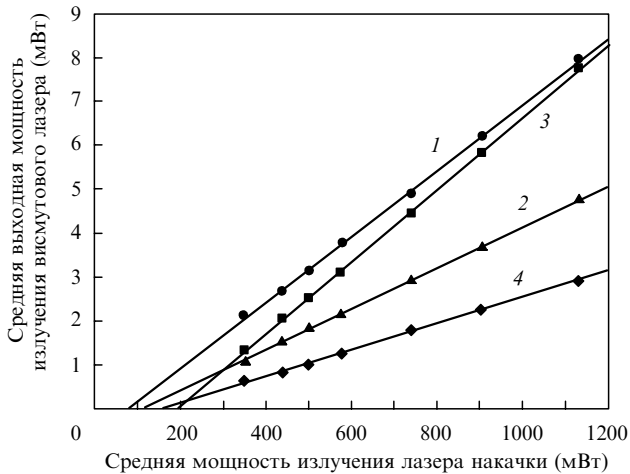


Рис. 7. Дифференциальная эффективность импульсных волоконных висмутовых лазеров: с ВБР (рис.2,а), эффективность 0.75 % (1), с ВБР (WDM помещен внутрь резонатора), эффективность 0.46 % (2), с зеркалом Саньяка (рис.2,б), $R = 82\%$, эффективность 0.82 % (3), с зеркалом Саньяка (рис.2,б), $R = 95\%$, эффективность 0.30 % (4).

ное излучение накачки из резонатора, помещался внутри него, что приводило к увеличению внутрирезонаторных потерь.

4.2. Лазер с волоконным зеркалом Саньяка

Для получения еще более широкого спектра лазерного излучения и исключения дополнительной, нежелательной ДГС волоконной решётки нами исследовался лазер (рис.2,б), в котором в качестве выходного зеркала использовались широкополосные петлевые волоконные зеркала Саньяка. Они исключали характерную для ВБР спектральную фильтрацию излучения, имели ДГС, присущую пассивному волоконному световоду, на основе которого изготовлен лазерный резонатор, и поэтому незначительно увеличивали величину внутрирезонаторной ДГС.

В схеме на рис.2,б при использовании выходного зеркала Саньяка с $R = 82\%$ удалось реализовать стабильный режим непрерывной синхронизации мод и исключить режим модуляции добротности резонатора во всем диапазоне мощностей иттербиевого лазера накачки вплоть до максимальной (рис.8). В отличие от результатов схемы с ВБР получились гладкие импульсы с длительностью, меньшей времени отклика фотоприёмника, т.е. короче

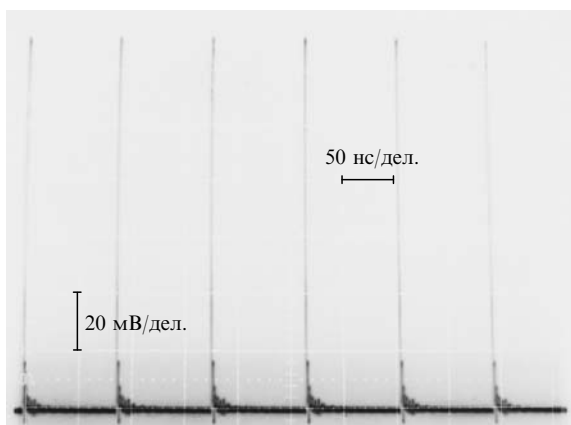


Рис. 8. Цуг импульсов, генерируемых висмутовым лазером с волоконным зеркалом Саньяка ($R = 82\%$).

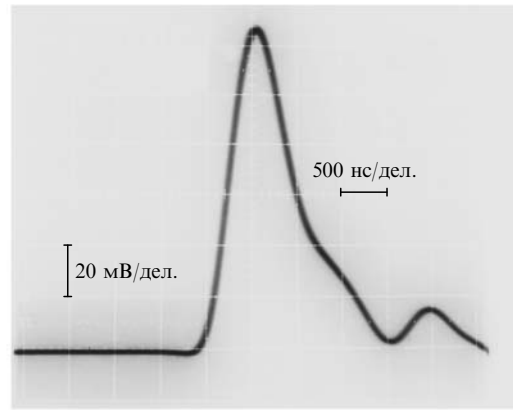


Рис. 9. Оциллограмма единичного импульса, генерируемого висмутовым лазером с волоконным зеркалом Саньяка ($R = 82\%$).

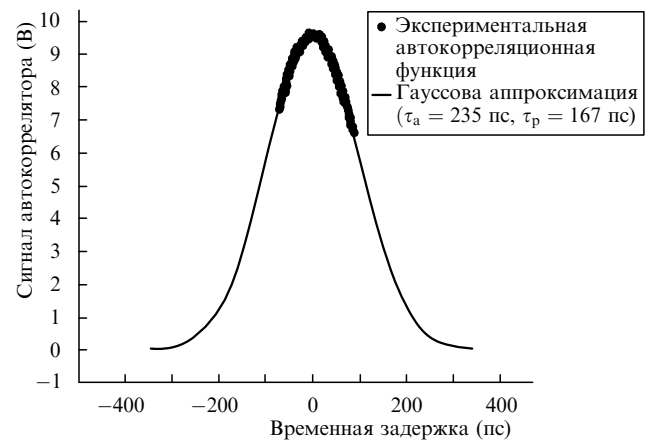


Рис. 10. Автокорреляционная функция интенсивности излучения висмутового лазера с волоконным зеркалом Саньяка (схема лазера на рис.2,б).

700 пс (рис.9). Профиль автокорреляционной функции интенсивности импульсов (рис.10) имел ширину $\tau_a \approx 240$ пс (на полувысоте), аппроксимация профиля функцией Гаусса позволила найти длительность лазерных импульсов ($\tau_p \approx 170$ пс), причем она не зависела от выходной мощности лазерного излучения. Зарегистрированная ширина спектра излучения превышала 1 нм.

Таким образом, лазерные импульсы оказались существенно короче тех, что получались с использованием широкополосной ВБР. Это подтверждает предположение о существенном влиянии ДГС решётки на формирование импульсов. Однако они оказались несколько длиннее импульсов, полученных в лазере с узкополосной ВБР, что можно объяснить более существенным влиянием положительной ДГС в длинном волоконном резонаторе лазера в случае распространения более широкополосного излучения.

Максимум спектра излучения лазера (рис.11) находился в районе $\lambda = 1160$ нм, при этом его положение, ширина (рис.12) и форма зависели от выходной мощности лазера. Смещение спектра в длинноволновую область связано с изменением режима работы элемента SESAM при увеличении энергии лазерных импульсов [7, 8], а именно с его переходом в нерезонансный режим насыщения. При этом на формирование спектра излучения существенное влияние оказывают несколько эффектов: существенная положительная ДГС в волоконном резонаторе, фазовая самомодуляция, а также нелинейные эф-

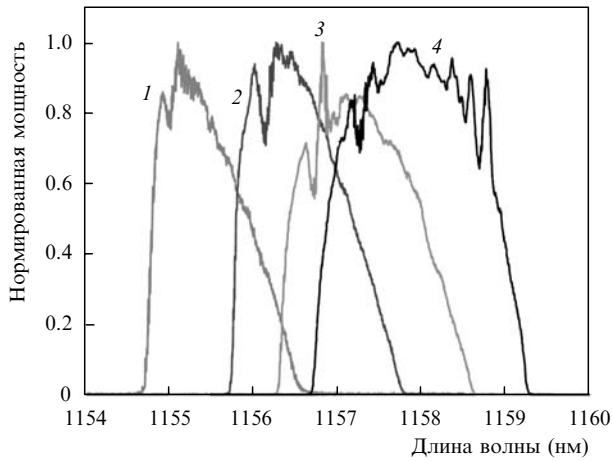


Рис.11. Эволюция положения и формы спектра излучения висмутового лазера с волоконным зеркалом Саньяка ($R = 82\%$) в зависимости от его выходной средней мощности: $P_{\text{out}} = 1.36$ мВт, $\Delta\lambda = 1.16$ нм (1), $P_{\text{out}} = 2.48$ мВт, $\Delta\lambda = 1.38$ нм (2), $P_{\text{out}} = 4.48$ мВт, $\Delta\lambda = 1.59$ нм (3), $P_{\text{out}} = 7.77$ мВт, $\Delta\lambda = 2.07$ нм (4).

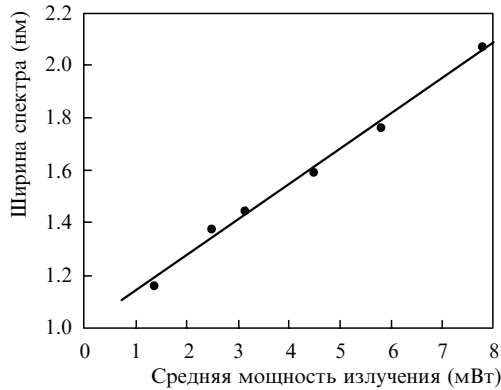


Рис.12. Эволюция ширины спектра излучения висмутового лазера с волоконным зеркалом Саньяка ($R = 82\%$) в зависимости от его выходной средней мощности.

факты в самом SESAM при отражении от него лазерного импульса [7, 8]. Максимальная ширина спектра генерации составила около 2.1 нм при максимальной средней выходной мощности 7.8 мВт. Дифференциальная эффективность лазера была равна 0.9 % (линия 3 на рис.7).

В случае 95 %-ного коэффициента отражения зеркала Саньяка временные и спектральные характеристики лазерного излучения существенно зависели от его выходной мощности. При средних мощностях излучения, меньших 0.83 мВт, наблюдалась генерация в совместном режиме модуляции добротности и синхронизации мод, однако импульсы были нестабильны во времени (рис.13,а). Когда средние мощности излучения превышали 0.83 мВт, импульсы синхронизации мод стабилизировались, однако в выходном сигнале появлялись «биения» с периодом около 4 мс (рис.13,б). Переход в стабильный режим синхронизации мод сопровождался резким изменением формы лазерного спектра (рис.14) – одна спектральная полоса расщеплялась на две полосы практически одинаковой ширины, отстоящие друг от друга примерно на 4.5 нм.

Дальнейшее увеличение средней мощности излучения приводило к уширению этих спектральных полос и смещению их как единого целого в длинноволновую область. Поскольку каждой спектральной полосе соответствует своё значение периода повторения импульсов, то

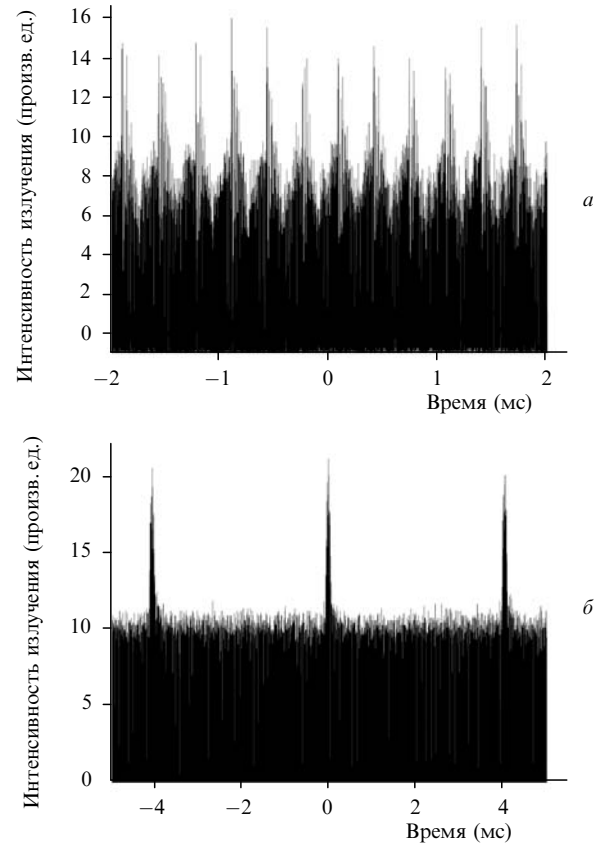


Рис.13. Осциллограммы излучения висмутового лазера с волоконным зеркалом Саньяка ($R = 95\%$): совместный режим нестабильных импульсов синхронизации мод и модуляции добротности (а), а также режим стабильных импульсов синхронизации мод и «биения» с периодом 4 мс, которые возникают при наложении двух соответствующих разным спектральным полосам импульсов.

наложение двух систем импульсов, соответствующих этим полосам, приводит к появлению в выходном сигнале лазера «биений» на разностной частоте повторения импульсов. При наложении двух импульсов от разных спектральных полос имеет место их некогерентное сложение с увеличением интенсивности излучения в 2 раза, что отражено на рис.13,б. Поскольку близлежащие импульсы при этом также частично перекрываются, то их

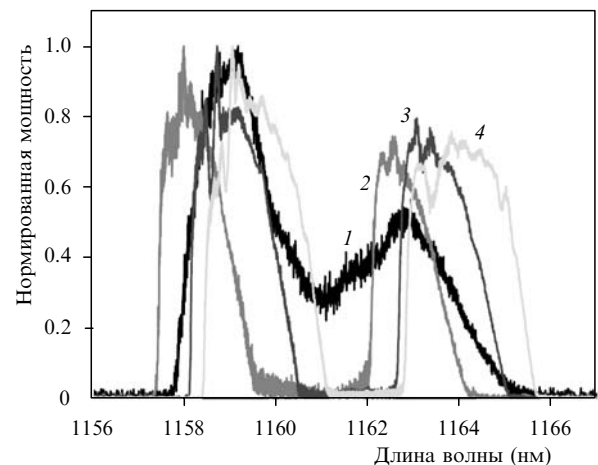


Рис.14. Эволюция положения и формы спектра излучения висмутового лазера с волоконным зеркалом Саньяка ($R = 95\%$) в зависимости от его выходной средней мощности: $P_{\text{out}} = 0.63$ (1), 1.01 (2), 1.74 (3) и 2.93 мВт (4).

некогерентное сложение дает увеличение интенсивности излучения, но уже на меньшую величину.

Такое расщепление лазерного спектра на две полосы может быть обусловлено как более сильным насыщением SESAM, связанным с увеличением энергии импульсов внутри более добротного резонатора [7,8], так и с влиянием большой положительной ДГС. Дифференциальная эффективность лазера составила 0.3 % при максимальной средней мощности 4 мВт (линия 4 на рис.7).

Резонатор с широким спектральным минимумом потерь, который обеспечивался широкополосным волоконным зеркалом Саньяка, способствовал генерации в режиме синхронизации мод с довольно широким спектром. Однако существенная величина ДГС препятствовала получению коротких лазерных импульсов в резонаторе с соответствующим этим импульсам широким спектром.

С целью компенсации ДГС внутри резонатора была предпринята попытка использования микроструктурированного световода. Такой световод с дисперсией $D \approx 70 \text{ пс}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ и длиной 3 м вводился с помощью отрезков световода Flexcore в резонатор. Однако из-за значительного несоответствия диаметров модовых пятен световодов (2.6 мкм для микроструктурированного световода на $\lambda = 1160 \text{ нм}$) потери на их стыковке, составившие около 10 дБ, приводили к срыву генерации.

5. Заключение

Исследован волоконный висмутый лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод, который инициировался и поддерживался с помощью насыщающегося поглотителя SESAM. Реализован режим непрерывной пассивной синхронизации мод лазера, в результате чего получены стабильные импульсы с длительностью от 50 пс до 3.5 нс. При этом с целью увеличения ширины спектра излучения в качестве выходных зеркал резонатора использовались ВБР или широкополосные волоконные петлевые зеркала Саньяка.

В случае ВБР увеличение ширины спектра отражения не привело к сокращению длительности импульса, несмотря на уширение спектра излучения лазера. Напротив, длительность даже увеличилась, что объясняется, по нашему мнению, более существенным влиянием ДГС волоконной решётки при отражении от нее излучения с бо-

лее широким спектром. Длительность импульсов при этом варьировалась от 50 пс в лазере с узкополосной ВБР до 3.5 нс – с широкополосной.

При использовании зеркала Саньяка также не удалось сократить длительность импульсов, несмотря на значительное увеличение ширины спектра выходного излучения, что обусловлено более существенным влиянием положительной ДГС в длинном волоконном резонаторе лазера в случае распространения излучения с широким спектром. Так, в лазере с 82 %-ным зеркалом Саньяка длительность лазерных импульсов составила 170 пс на длине волны излучения около 1160 нм при максимальной средней мощности 7.8 мВт.

Результаты показывают, что для получения более коротких импульсов необходима регулировка внутрирезонаторной ДГС. Однако использование применяемых для этой цели известных приёмов (призмные и решёточные компенсаторы, микроструктурированные световоды с отрицательной ДГС) затруднительно из-за малого коэффициента усиления висмутового активного световода.

Авторы выражают благодарность О.И.Медведкову за изготовление ВБР, Б.Л.Давыдову за изготовление использованных в работе волоконных зеркал Саньяка, а также А.Е.Левченко, предоставившего микроструктурированный световод для компенсации ДГС. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-02-16788-а, 07-02-13598-офи_ц), а также Совета по грантам Президента РФ (грант № НШ-2813.2006.2).

1. Dvoyrin V., Mashinsky V., Bulatov L., Bufetov I., Shubin A., Melkumov M., Kustov E., Dianov E., Umnikov A., Khopin V., Yashkov M., Guryanov A. *Opt. Lett.*, **31**, 2966 (2006).
2. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
3. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Favre A., Bouwmans G., Douay M. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 031103 (2007).
4. Rulkov A.B., Ferin A.A., Popov S.V., Taylor J.R., Razdobreev I., Bigot L., Bouwmans G. *Opt. Express*, **15**, 5473 (2007).
5. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
6. Krylov A.A., Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Kryukov P.G., Mashinsky V.M., Okhotnikov O.G., Guina M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1807 (2007).
7. Okhotnikov O., Pessa M. *J. Phys. Condens. Matter*, **16**, S3108 (2004).
8. Okhotnikov O., Grudinina A., Pessa M. *New J. Phys.*, **6**, 177 (2004).