

Мощный тулиевый волоконный лазер с внутриврезонаторным управлением дисперсией

А.А.Крылов, М.А.Чернышева, Д.С.Черных, А.К.Сенаторов, И.М.Тупицын, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов

Представлена схема генерации и усиления импульсов пикосекундной и фемтосекундной длительности в спектральном диапазоне 1.93–1.97 мкм на основе кварцевых световодов, легированных ионами тулия. Управление дисперсией групповых скоростей (ДГС) в резонаторе задающего тулиевого лазера осуществлялось с помощью одномодового германо-силикатного световода с положительной ДГС, содержащего 75 мол.% оксида германия в сердцевине. Получены импульсы с минимальной длительностью 200 фс и энергией до 56 нДж.

Ключевые слова: тулиевый волоконный лазер, синхронизация мод, компенсация ДГС, волоконный усилитель, солитон.

1. Введение

В настоящее время наблюдается значительный рост интереса к волоконным лазерам ультракоротких импульсов (УКИ) фемтосекундного и пикосекундного диапазонов, генерирующих в различных спектральных областях. Особое внимание при этом уделяется активным волоконным световодам, легированным тулием, которые позволяют реализовать лазерную генерацию на длинах волн вблизи 2 мкм. Повышенный интерес к лазерам УКИ объясняется возможностью их применения в медицине, спектроскопии, лазерной локации и микрообработке прозрачных материалов, в частности полупроводников [1–4].

В области длин волн вблизи 2 мкм световоды на основе кварцевого стекла имеют, как правило, аномальную дисперсию групповых скоростей (ДГС), поэтому тулиевые волоконные лазеры без управления ДГС внутри резонатора работают в солитонном режиме генерации [5–7]. Регулировка ДГС внутри резонатора лазера позволяет управлять режимами его генерации, получая при этом импульсы с варьируемыми в достаточно широких пределах формой спектра, длительностью и энергией [8, 9]. Одним из таких режимов является генерация солитонов с дисперсионным управлением (УД-солитонов) [9]. В отличие от фундаментального солитона, энергия которого строго ограничена вследствие компенсации аномальной ДГС фазовой самомодуляцией в световоде [10], энергия УД-солитона может быть существенно увеличена. К тому же генерация УД-солитонов возникает даже при нулевой суммарной ДГС внутри резонатора, когда солитоны становятся нестабильными [10].

В работе [11] был впервые продемонстрирован полностью волоконный тулиевый лазер, в котором управление величиной и знаком ДГС внутри резонатора осу-

ществлялось включением в него отрезка световода длиной 2 м, имеющего нормальную (положительную) ДГС $\beta_2 = +900$ пс²/км. Это позволило получить импульсы излучения длительностью 235 фс с энергией 4.8 нДж. Однако в [11] ничего не сообщалось о возможном диапазоне варьирования энергии и длительности лазерных импульсов при изменении длины световода, регулирующего ДГС.

В настоящей работе представлен тулиевый волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод и внутриврезонаторным управлением ДГС с помощью одномодового германо-силикатного световода с низкими потерями и нормальной ДГС в спектральной области вблизи 2 мкм. Показана возможность эффективного управления длительностью лазерных импульсов и формой спектра излучения за счет варьирования величины и знака внутриврезонаторной ДГС. Также продемонстрировано усиление импульсов в световоде, легированном тулием и иттербием, с многомодовой диодной накачкой, которое сопровождалось сжатием импульсов.

2. Генератор импульсов на основе тулиевого световода

Схема задающего тулиевого волоконного лазера приведена на рис.1. Излучение эрбий-иттербиевого волоконного лазера накачки на длине волны 1560 нм поступало в резонатор тулиевого лазера через волоконный мультиплексор. Активной средой лазера служил отрезок изотропного световода (длиной 68 см) со ступенчатым профилем показателя преломления, легированный тулием и алюминием ($\Delta n = 0.012$, диаметр сердцевины $d \approx 10$ мкм, концен-

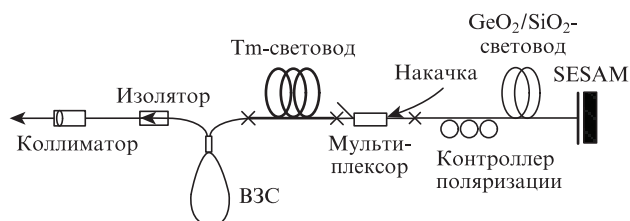


Рис.1. Тулиевый волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод и внутриврезонаторным управлением ДГС.

А.А.Крылов, М.А.Чернышева, Д.С.Черных, А.К.Сенаторов, И.М.Тупицын, П.Г.Крюков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул.Вавилова, 38; e-mail: kryukov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 14 декабря 2011 г., после доработки – 16 февраля 2012 г.

трации тулия и алюминия 0.8 вес.% и 3.6 вес.% соответственно, длина волны отсечки $\lambda_c \approx 2.2$ мкм). Ненасыщенное поглощение отрезка световода на длине волны накачки равнялось 60 дБ/м.

Измерение дисперсионного параметра световода $D = -(2\pi c/\lambda^2)\beta_2$, где c – скорость света в вакууме, показало его монотонную зависимость в спектральном диапазоне 1200–2100 нм ($\beta_2 = -81$ пс²/км при $\lambda = 1960$ нм).

Резонатор тулиевого лазера был образован волоконным зеркалом Саньяка (ВЗС) с коэффициентом отражения 58% ($\lambda = 1960$ нм) с одной стороны и полупроводниковым насыщающимся поглотителем SESAM [6, 12], обеспечивавшим стабильную генерацию в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод, с другой.

Регулирование аномальной ДГС, вносимой тулиевым активным световодом, а также пассивным световодом SMF-28 ($\beta_2 = -75$ пс²/км при $\lambda = 1960$ нм), из которого были изготовлены мультиплексор и ВЗС, осуществлялось введением в резонатор одномодового германо-силикатного ($\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$) световода с низкими (менее 20 дБ/км на $\lambda = 1960$ нм) потерями и нормальной ДГС ($\beta_2 = +280$ пс²/км на $\lambda = 1960$ нм) [13]. $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ -световод содержит 75 мол.% оксида германия в сердцевине диаметром менее 2 мкм ($\Delta n \approx 0.11$, диаметр основной моды $d_{\text{эф}} \approx 3.4$ мкм на длине волны 1960 нм [14]); измеренная длина волны отсечки второй моды в нем составила ~ 970 нм. Отполированный под прямым углом торец германо-силикатного световода прижимался непосредственно к поверхности насыщающегося поглотителя SESAM, что значительно облегчало его юстировку.

Состояние поляризации излучения в резонаторе варьировалось с помощью волоконного контроллера поляризации (КП), действие которого основано на возникновении двулучепреломления вследствие независимого локального сжатия германо-силикатного световода вдоль осей, составляющих угол 45°. Наличие КП приводило к возникновению дополнительных потерь в резонаторе из-за сильного сжатия $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ -световода, что в свою очередь могло оказать влияние на длительность и энергию генерируемых импульсов, а также форму спектра излучения. Благодаря точной настройке КП удалось реализовать стабильную генерацию лазера в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод при различных длинах $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ -световода и мощностях излучения накачки.

Выходное излучение лазера, прошедшее через интегрированный волоконный изолятор, коллимировалось в пучок диаметром ~ 1 мм объективом на основе кремниевых линз и поступало далее в измерительную часть установки.

3. Результаты и обсуждение

Стабильный одноимпульсный режим непрерывной пассивной синхронизации мод (рис.2) был реализован при длинах германо-силикатного световода $L_{\text{Ge}} \leq 1$ м.

На рис.3,а показаны автокорреляционные функции (АКФ) интенсивности лазерных импульсов при различных L_{Ge} и мощности излучения накачки $P_{\text{pump}} = 250$ мВт. Соответствующие спектры излучения приведены на рис.3,б. Суммарная ДГС внутри резонатора D_2 варьировалась при этом от +0.15 до -0.11 пс², проходя через ноль, а частота повторения импульсов возрастала с 36.8 до 60.2 МГц.

При длинах световода $L_{\text{Ge}} = 1$ и 0.42 м, которые соответствовали $D_2 = +0.15$ и -0.02 пс², наблюдалась генерация пикосекундных импульсов с узким гладким спектром

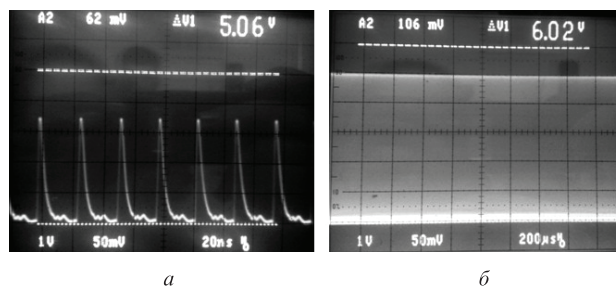


Рис.2. Осциллограммы цуга стабильных импульсов, генерируемых тулиевым волоконным лазером.

без особенностей (кривые 1 и 2 на рис.3). Аппроксимация измеренных АКФ интенсивности импульсов и соответствующих спектров излучения функцией Гаусса показала достаточно хорошее их соответствие (погрешность была менее 2%).

В обоих случаях длительность лазерных импульсов $\Delta\tau_p$ составила 4.8 пс, а соответствующие ширины спектров (на полувысоте максимальной интенсивности) равнялись 1.45 и 1.44 нм. Отсюда следует, что параметр спектральной ограниченности импульсов (произведение ширины спектра $\Delta\nu$ на длительность импульсов) $C = \Delta\nu \Delta\tau_p \approx 0.55$ (для спектрально-ограниченных гауссовых импульсов $C = 0.44$ [15]). Стоит отметить, что перестройка центральной длины

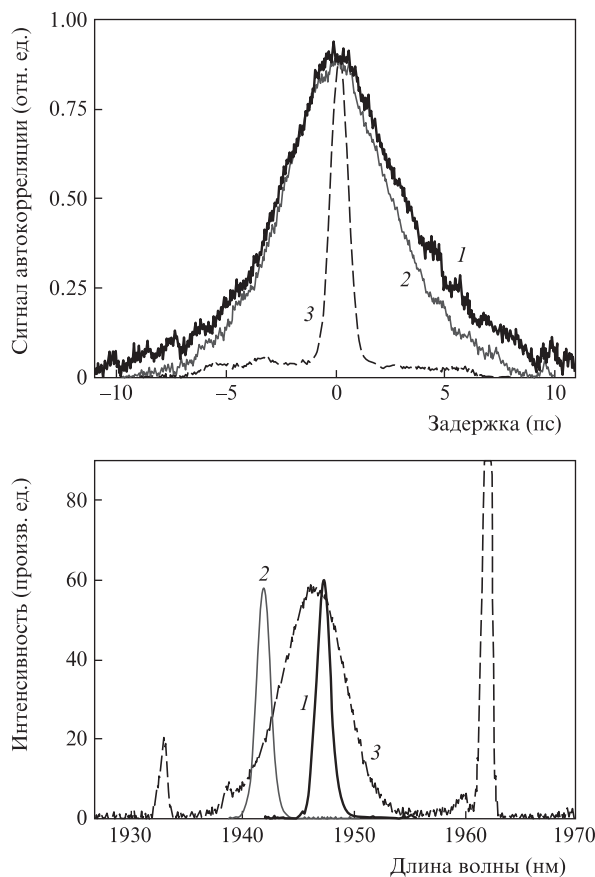


Рис.3. АКФ интенсивности импульсов (а) и соответствующие спектры излучения (б) тулиевого волоконного лазера при различных длинах германо-силикатного световода L_{Ge} внутри резонатора: 1 – $L_{\text{Ge}} = 1$ м, $D_2 \approx +0.15$ пс², $\Delta\tau_p \approx 4.8$ пс, ширина спектра на половине максимума $\Delta\lambda = 1.45$ нм, средняя выходная мощность $P_{\text{out}} = 10$ мВт; 2 – $L_{\text{Ge}} = 0.42$ м, $D_2 \approx -0.02$ пс², $\Delta\tau_p \approx 4.8$ пс, $\Delta\lambda = 1.44$ нм, $P_{\text{out}} = 11$ мВт; 3 – $L_{\text{Ge}} = 0.07$ м, $D_2 \approx -0.11$ пс², $\Delta\tau_p \approx 720$ фс, $\Delta\lambda = 6.3$ нм, $P_{\text{out}} = 11.4$ мВт.

волны излучения при изменении L_{Ge} обусловлена варьированием состояния поляризации излучения в резонаторе.

Уменьшение мощности излучения накачки существенно не влияло на длительность импульсов, в то время как ширина их спектра несколько сужалась, что делало импульсы практически спектрально-ограниченными.

Таким образом, в случае нормальной, а также близкой к нулю ДГС наблюдалась генерация длинных, практически спектрально-ограниченных гауссовых импульсов, длительность которых практически не зависела от энергии.

Переход в область существенно аномальной ДГС внутри резонатора ($D_2 \approx -0.11 \text{ пс}^2$), что имело место при сокращении длины германо-силикатного световода до 0.07 м, приводил к генерации лазера в солитонном режиме. Характерной особенностью последнего является возникновение в спектре излучения узких боковых максимумов Келли (кривая 3 на рис.3,б) [16], отстоящих от центральной длины волны примерно на 15 нм. Стоит отметить, что оценка суммарной ДГС внутри резонатора по местоположению боковых пиков Келли второго порядка [16] дает $D_2 = -0.14 \text{ пс}^2$, что довольно хорошо согласуется с указанным выше значением D_2 (-0.11 пс^2).

Аппроксимация измеренной АКФ интенсивности импульсов кривой, соответствующей солитону, дает ширину функции на половине максимального значения, равную 1.12 пс; это соответствует длительности солитона $\Delta\tau_p \approx 720 \text{ фс}$. При ширине спектра $\Delta\lambda = 6.3 \text{ нм}$ параметр спектральной ограниченности импульсов $C \approx 0.36$ (для фундаментального солитона $C = 0.315$). Это означает, что имеет место генерация импульсов, близких по своим характеристикам к фундаментальным солитонам.

Варьирование мощности излучения накачки приводило к изменению длительности генерируемых импульсов в соответствии с характерной для солитона зависимостью: $\Delta\tau_p \propto 1/E_p$ [8].

Важной особенностью АКФ (кривая 3 на рис.3,а) является наличие протяженного пьедестала шириной около 15 пс, в котором согласно оценке содержится примерно 25% энергии импульса. Появление пьедестала мы связываем с большим временем релаксации состояния с низким уровнем потерь полупроводникового поглотителя SESAM, которое значительно превышает длительность лазерного импульса, что приводит к формированию недостаточно резкого заднего фронта импульса и даже появлению импульсов-спутников меньшей интенсивности [12, 17].

В окрестности нуля ДГС, в зависимости от настройки КП, наблюдается генерация лазерных импульсов как пикосекундной, так и фемтосекундной длительности, что отображено на рис.3 и 4. Длина германо-силикатного световода при этом составляла 0.42 и 0.26 м, что соответствует суммарной ДГС внутри резонатора -0.02 и -0.06 пс^2 . В первом случае длительность импульсов с гауссовым профилем огибающей составила 4.8 и 5.9 пс при ширине спектра 1.44 и 1.39 нм соответственно. Во втором же случае спектр излучения расширился до 11.5 нм (кривая 2 на рис.4,б), а длительность импульсов с гауссовым профилем огибающей в свою очередь сократилась до 720 фс. При этом АКФ интенсивности импульсов (кривая 2 на рис.4,а) также имеет протяженный пьедестал, как и в случае генерации солитонов.

Однако спектр излучения в случае генерации фемтосекундных импульсов не содержит характерных для солитонов симметрично расположенных узких боковых пиков. К тому же при уменьшении средней мощности (и, соответственно, энергии лазерных импульсов) в два раза (до $P_{out} =$

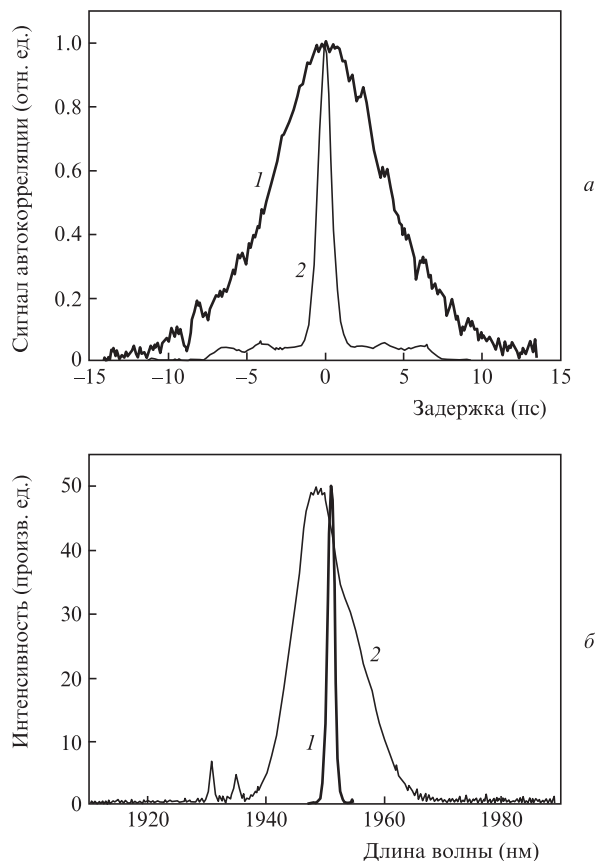


Рис.4. АКФ интенсивности импульсов (а) и соответствующие спектры излучения (б) тулиевого волоконного лазера при $L_{Ge} = 0.26 \text{ м}$ и варьировании настроек КП: 1 – $D_2 \approx -0.06 \text{ пс}^2$, $\Delta\tau_p \approx 5.9 \text{ пс}$, $\Delta\lambda = 1.39 \text{ нм}$, $C = 0.65$, $P_{out} = 11.1 \text{ мВт}$; 2 – $D_2 \approx -0.06 \text{ пс}^2$, $\Delta\tau_p \approx 720 \text{ фс}$, $\Delta\lambda = 11.5 \text{ нм}$, $C = 0.66$, $P_{out} = 12.3 \text{ мВт}$.

5.2 мВт) их длительность сократилась примерно до 710 фс, а спектр расширился до $\sim 14 \text{ нм}$, практически не изменив свою форму, что существенно отличает эти импульсы от фундаментальных солитонов. Таким образом, данный импульс можно рассматривать как пример УД-солитона.

Лазер с инерционным насыщающимся поглотителем стремится генерировать импульсы с длительностью, которая соответствует времени релаксации его просветленного состояния. Однако она может быть уменьшена за счет оптимизации соотношения усиления и потерь в резонаторе [17, 18]. В нашем случае контроллер поляризации, сдавливающий германо-силикатный световод, мог вносить дополнительные потери, которые в свою очередь могли обеспечить достижение оптимальных условий для сокращения длительности импульсов. Стоит отметить, что этот эффект наблюдался и при других длинах германо-силикатного световода, но только в области нормальной или близкой к нулю аномальной ДГС.

Таким образом, создан и исследован тулиевый полностью волоконный лазер с варьированием режимов генерации путем управления внутрирезонаторной ДГС. Длительность лазерных импульсов изменяется в диапазоне 0.71–6 пс при переходе из области аномальной в область нормальной суммарной ДГС внутри резонатора.

4. Усиление УКИ

Схема усилителя лазерных импульсов представлена на рис.5. Излучение тулиевого лазера через волоконно-

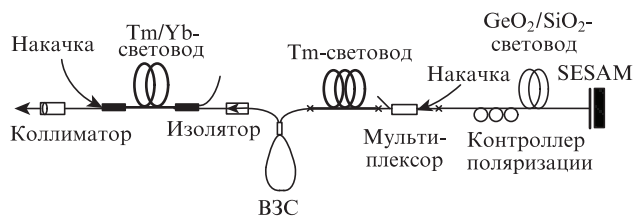


Рис.5. Однокаскадный волоконный усилитель УКИ тулиевого лазера.

оптический изолятор поступало в активный световод на основе кварцевого стекла с многоэлементной первой оболочкой (МПО) [19], сердцевина которого легирована тулием (0.8 вес.%), иттербием (4.8 вес.%) и алюминием (2.3 вес.%) (диаметр сердцевины $d = 10$ мкм, $\Delta n = 0.017$, длина волны отсечки $\lambda_{\text{cut}} = 2.7$ мкм; диаметр основной моды $d_{\text{eff}} \approx 9$ мкм при $\lambda = 1960$ нм).

ДГС в световоде является аномальной и согласно оценке составляет около -85 пс²/км (т.е. аналогична ДГС, вносимой тулиевым световодом задающего генератора), при этом коэффициент нелинейности световода $\gamma = 1.1$ Вт⁻¹·км⁻¹.

В настоящей работе использовался МПО-световод длиной 5 м, который возбуждался многомодовым излучением накачки на $\lambda = 970$ – 975 нм (максимальная мощность 17 Вт) в полосу поглощения иона иттербия ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$. Далее возбуждение практически без потерь передавалось иону тулия, который безызлучательно переходил на метастабильный подуровень мультиплета 3H_4 [20].

Для увеличения коэффициента поглощения излучения накачки и, следовательно, эффективности усилителя (дифференциальная эффективность усилителя составила 12%) необходимо, чтобы ее длина волны соответствовала пику поглощения иона Yb^{3+} в кварцевых световодах ($\lambda \approx 975$ нм). Это условие обеспечивалось подстройкой температуры диодного модуля накачки с помощью элемента Пельтье, способного осуществлять нагрев и охлаждение модуля (при нагреве лазерного диода длина волны его излучения возрастает).

Усиленное излучение через интегрированный со световодом SMF-28 (длиной около 0.5 м) коллиматор, который обеспечивал уровень обратного отражения -60 дБ, выводилось наружу и поступало в измерительную часть установки, описанную ранее.

АКФ интенсивности усиленных импульсов и соответствующие спектры излучения при различных длинах германо-силикатного световода внутри резонатора задающего генератора показаны на рис.6.

При длинах GeO_2/SiO_2 -световода $L_{Ge} = 0.5$ – 1 м наблюдалось сокращение длительности усиленных импульсов от единиц до долей пикосекунд. При дальнейшем уменьшении L_{Ge} и прохождении точки, соответствующей нулевой ДГС внутри резонатора, импульсы снова расширялись до пикосекундной длительности. Таким образом, в усилителе происходило не только увеличение энергии импульсов, но также их сжатие.

При длине $L_{Ge} = 1$ м ширина АКФ интенсивности импульсов $\Delta\tau_a$ составила 4.8 пс (кривая 1 на рис.6,а), что соответствует длительности импульса с гауссовым профилем огибающей 3.4 пс при ширине спектра излучения $\Delta\lambda = 2.2$ нм (кривая 1 на рис.6,б). Средняя мощность излучения на выходе усилителя достигла 1.1 Вт при мощности излучения накачки 9 Вт, что соответствует энергии усиленных импульсов 31 нДж и их пиковой мощности примерно 9 кВт.

Входной импульс ($\Delta\tau_p \approx 4.5$ пс, $\Delta\lambda \approx 1.5$ нм) с незначительной положительной частотной модуляцией приобретает, распространяясь в усилителе, дополнительный положительный чирп вследствие ФСМ, который полностью не компенсируется за счет аномальной ДГС активного Tm/Yb-световода и пассивного SMF-28 на выходе усилителя [21], в результате чего параметр спектральной ограниченности импульсов увеличивается ($C \approx 0.6$ вместо первоначально 0.5). Влияние ФСМ также приводит к некоторому уширению спектра излучения, что в свою очередь способствует сжатию импульсов за счет аномальной ДГС в усилителе. Действительно, распространяясь в области аномальной ДГС, усиленный импульс начинает вести себя как солитон высшего порядка, который на начальном этапе распространения сжимается с одновременным расширением спектра [21].

При сокращении длины GeO_2/SiO_2 -световода до 0.6 м наблюдались АКФ интенсивности импульсов и спектр излучения достаточно сложной формы (кривые 3 на рис.6,а и б). АКФ интенсивности импульсов состоит из центрального сжатого пика шириной 308 фс, несжатой части шириной около 2 пс и пьедестала протяженностью ~ 20 пс, который, по нашему мнению, связан как с качеством выходных импульсов задающего генератора, так и с характерными особенностями распространения солитонов высших порядков в световодах [21, 22].

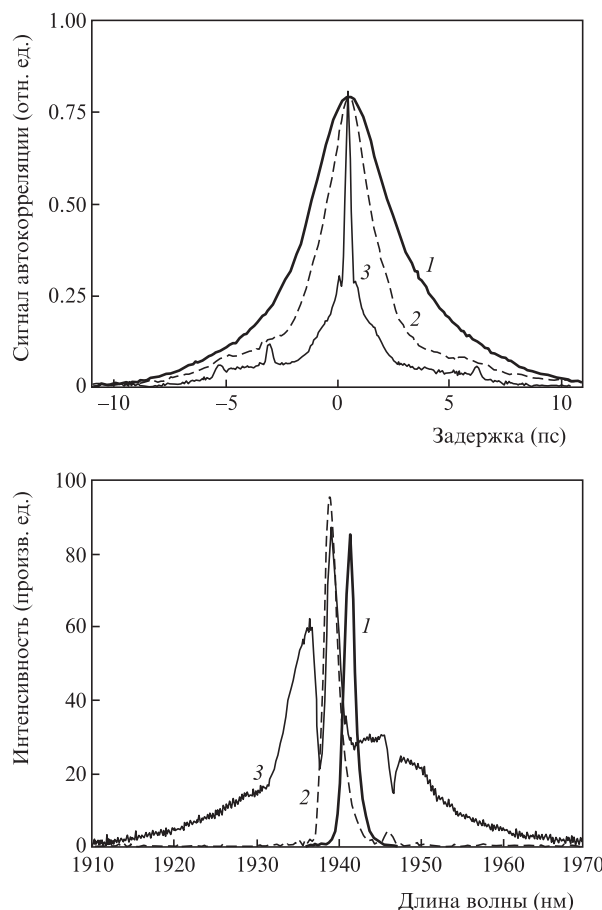


Рис.6. АКФ интенсивности усиленных импульсов (а) и соответствующие спектры излучения (б): 1 – $L_{Ge} = 1$ м, $D_2 \approx +0.15$ пс², $\Delta\tau_a \approx 4.8$ пс, $\Delta\tau_p \approx 3.4$ пс (гауссова аппроксимация), $\Delta\lambda = 2.2$ нм, $C \approx 0.6$, средняя выходная мощность $P_{\text{out}} = 1.1$ Вт; 2 – $L_{Ge} = 0.6$ м, $D_2 \approx +0.03$ пс², $\Delta\tau_a \approx 3$ пс, $\Delta\tau_p \approx 1.9$ пс, $\Delta\lambda = 2.2$ нм, $C = 0.35$ (аппроксимация солитонной функцией), $P_{\text{out}} = 90$ мВт; 3 – $L_{Ge} = 0.6$ м, $\Delta\tau_a \approx 308$ фс, $\Delta\tau_p \approx 200$ фс (аппроксимация солитонной функцией), $P_{\text{out}} = 0.62$ Вт.

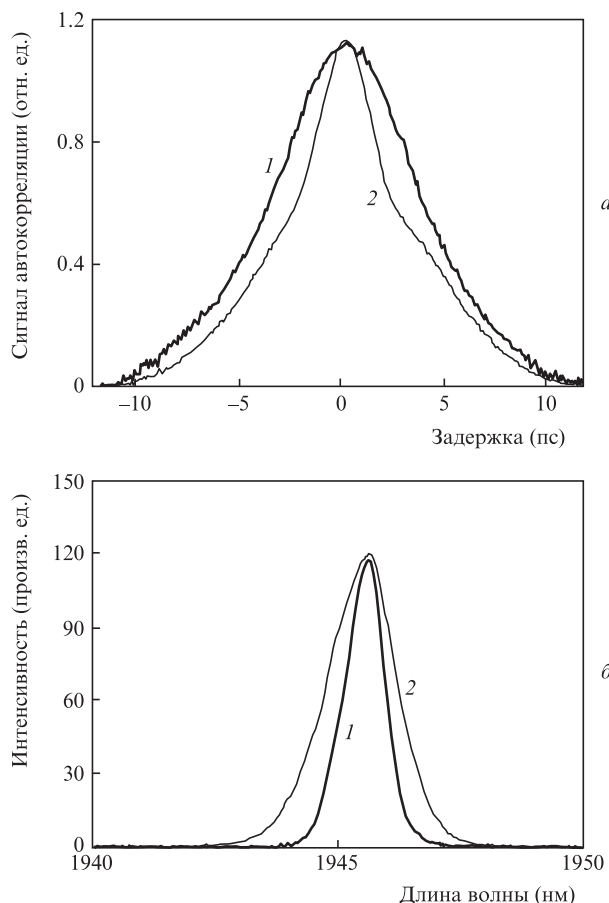


Рис.7. АКФ интенсивности усиленных импульсов (а) и соответствующие спектры излучения (б) при различных мощностях накачки и $L_{Ge} = 1$ м: 1 – $P_{pump} = 3.2$ Вт, $\Delta\tau_a \approx 9$ пс, $\Delta\tau_p \approx 6.4$ пс, $\Delta\lambda = 1$ нм, $C \approx 0.5$, $P_{out} = 0.2$ Вт; 2 – $P_{pump} = 17$ Вт, $\Delta\tau_a \approx 5.7$ пс, $\Delta\tau_p \approx 4$ пс, $\Delta\lambda = 1.7$ нм, $C \approx 0.54$, $P_{out} = 2$ Вт.

Аппроксимация центрального пика АКФ интенсивности импульсов кривой, отвечающей солитону, дает их длительность $\Delta\tau_p \approx 200$ фс, что соответствует сжатию исходного импульса примерно в 10 раз. При этом согласно оценке в нем содержится около 20% всей энергии импульса. Наибольшая часть энергии импульса находится в нежартой его части, которой соответствует некоторая модуляция вблизи максимума спектра излучения. Средняя мощность усиленного излучения в данном случае составляет 0.62 Вт, что отвечает энергии импульса ~ 15 нДж.

При увеличении мощности излучения накачки до 17 Вт и длине $L_{Ge} = 1$ м была достигнута максимальная средняя мощность усиленного излучения ~ 2 Вт при ширине АКФ интенсивности импульсов $\Delta\tau_a \approx 5.7$ пс (кривая 2 на рис.7,а). Это соответствует максимальной энергии импульсов 56 нДж. Хотя форма автокорреляционной функции интенсивности импульсов в данном случае несколько отличалась от гауссовой, спектр излучения (кривая 2 на рис.7,б), имеющий ширину на полувысоте $\Delta\lambda = 1.7$ нм, является гладким, не содержит особенностей и имеет практически гауссову форму.

5. Заключение

Продемонстрирована волоконная схема генерации и усиления импульсного излучения в спектральной области

вблизи 2 мкм на основе кварцевых световодов, легированных ионами тулия. Для управления ДГС внутри резонатора тулиевого лазера использовался одномодовый германо-силикатный световод с положительной ДГС и низкими потерями в спектральной области вблизи 2 мкм.

Получена генерация лазерных импульсов в режиме непрерывной пассивной синхронизации мод как пикосекундной, так и фемтосекундной длительности при переходе из области нормальной в область аномальной суммарной ДГС внутри резонатора.

Усиление лазерных импульсов осуществлялось в активном МПО-световоде при многомодовой диодной накачке. Сердцевина световода была легирована ионами тулия, иттербия и алюминия. Продемонстрировано усиление импульсов практически без искажения формы автокорреляционных функций интенсивности и спектров излучения (достигнутая максимальная энергия 56 нДж). Наряду с этим показана возможность сжатия исходных импульсов вплоть до длительностей короче 300 фс с одновременным их усилением.

Авторы благодарят О.Г.Охотникова за изготовление насыщающегося поглотителя SESAM, а также И.А.Буфетова, М.А.Мелькумова и В.М.Машинского, предоставивших волоконные световоды. Авторы выражают глубокую признательность Б.Л.Давыдову, предоставившему интегрированный со световодом коллиматор лазерного излучения, а также А.Ф.Косолапову и М.С.Астаповичу за измерения ДГС световодов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-01124-а).

- www.spie.org/x57663.xml.
- Kadwani P., Sims R. A., Baudelet M., Shah L., Richardson M.C., Chia J., Altal F. *Opt. Soc. Am./FILAS*, **FWB3** (2011).
- Gattass R.R., Mazur E. *Nat. Photon.*, **2**, 219 (2008).
- Scott N.J., Cilip C.M., Fried N.M. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 435 (2009).
- Renninger W.H., Chong A., Wise F.W. *Phys. Rev. A*, **77**, 023814 (2008).
- Nelson L.E., Ippen E.P., Haus H.A. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 19 (1995).
- Kivisto S., Hakulinen T., Guina M., Okhotnikov O.G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **19**, 934 (2007).
- Martínez O.E., Fork R.L. *Opt. Lett.*, **9**, 156 (1984).
- Turitsyn S.K., Shapiro E.G., Medvedev S.B., Fedoruk M.P., Mezentsev V.K. *Opt. Telecom.*, **4**, 145 (2003).
- Hasegawa A., Tappert F. *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 142 (1973).
- Wang Q., Chen T., Chen K. *Opt. Soc. Am./CLEO/QELS*, **CFK7** (2010).
- Guina M., Xiang N., Vainionpaa A., Okhotnikov O.G., Sajavaara T., Keinonen J. *Opt. Lett.*, **26**, 1809 (2001).
- Fleming J.W. *Appl. Opt.*, **23**, 4486 (1984).
- Dianov E.M., Mashinsky V.M. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 3500 (2005).
- Diels J.-C., Rudolph W. *Ultrashort laser pulse phenomena* (New York: Academic Press, 1996).
- Kelly S.M. *Electron. Lett.*, **28**, 806 (1992).
- Paschotta R., Keller U. *Appl. Phys. B*, **73**, 653 (2001).
- Kärtner F.X., Keller U. *Opt. Lett.*, **20**, 16 (1995).
- 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).
- Jackson S.D. *Opt. Lett.*, **28**, 2192 (2003).
- Stolen R.H., Mollenauer L.F., Tomlinson W.J. *Opt. Lett.*, **8**, 186 (1983).
- Mollenauer L.F., Stolen R.H., Gordon J.P., Tomlinson W.J. *Opt. Lett.*, **8**, 289 (1983).