

Висмутовый волоконный пикосекундный лазер с длиной волны 1.3 мкм и синхронизацией мод на нелинейном кольцевом зеркале

А.М.Хегай, Ф.В.Афанасьев, К.Е.Рюмки, С.В.Фирстов, В.Ф.Хопин, Д.В.Мясников, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов

Исследовано влияние концентрации висмутовых активных центров (ВАЦ) в фосфоросиликатных световодах на их оптические параметры, включая коэффициент усиления и уровень непросветляемых потерь. На основе результатов данных исследований выбран диапазон концентраций ВАЦ, оптимальный для создания лазеров ультракоротких импульсов (УКИ). С использованием оптимизированного световода создан полностью волоконный лазер УКИ с длиной волны вблизи 1.3 мкм, работающий в режиме синхронизации мод на нелинейном кольцевом зеркале и генерирующий импульсы длительностью 11.3 пс с энергией 1.65 нДж и частотой следования 3.6 МГц. Висмутовый волоконный усилитель позволил повысить энергию в импульсе до 8.3 нДж. После сжатия в компрессоре на дифракционных решетках длительность импульсов уменьшилась до 530 фс.

Ключевые слова: висмутовый волоконный лазер, лазер УКИ, лазерная генерация, синхронизация мод, нелинейное кольцевое зеркало, непросветляемые потери.

1. Введение

Появление волоконных лазеров с синхронизацией мод многократно повысило доступность использования оптических ультракоротких импульсов (УКИ) в самых различных областях – от научных экспериментов до промышленности и медицины. Это произошло благодаря ряду уникальных свойств таких лазеров, начиная от компактности (в настоящее время габариты волоконных лазеров УКИ со средней выходной мощностью 1–10 мВт не превышают размера обычного смартфона) и эффективности, достигающей десятков процентов, и заканчивая безотказностью работы и весьма низкой чувствительностью к внешним воздействиям (по меркам лазеров других типов с синхронизацией мод). Кроме того, такие лазеры имеют достаточно простую конструкцию и, как следствие, относительно низкую стоимость.

На данный момент наибольшее распространение получили лазеры УКИ на световодах, легированных ионами Yb или Er. Это обусловлено удобными диапазонами их длин волн генерации (около 1.05 и 1.55 мкм соответственно), а также высокой эффективностью и доступностью лазерных диодов накачки. Для ряда специальных применений используются и лазеры на световодах, легированных Tm и Ho, которые работают в диапазоне 1.75–2.1 мкм. Импульсные волоконные лазеры в спектральных областях, не совпадающих с указанными, могут быть реализованы либо с помощью нелинейных преобразований излучения лазеров на основе редкоземель-

ных ионов, либо с использованием висмутовых волоконных лазеров, в настоящее время перекрывающих почти весь не охваченный редкоземельными лазерами диапазон длин волн 1.15–1.75 мкм [1–4].

Весьма важной областью спектра для ряда применений в медицине считается область вокруг 1.3 мкм. Это обусловлено тем, что на нее приходится минимум оптических потерь ряда жизненно важных веществ, таких как вода, оксигемоглобин и меланин, составляющих основу большинства биологических тканей и объектов животного происхождения, что позволяет использовать излучение на 1.3 мкм для медицинской диагностики [5, 6].

Ранее сообщалось о создании волоконных лазеров УКИ на висмутовых световодах различного типа с длинами волн вблизи 1.15 [1], 1.34 [2], 1.43 [3] и 1.72 мкм [4]. В качестве насыщающегося поглотителя в таких лазерах использовались либо углеродные нанотрубки, либо полупроводниковые структуры типа SESAM. Для работы вблизи интересующей нас области 1.3 мкм подходят висмутовые световоды на основе фосфоросиликатного стекла. В работе [2] был впервые продемонстрирован лазер УКИ на таком световоде с энергией в импульсе 0.3 нДж и длительностью импульса после сжатия 580 фс. Использование в качестве насыщающихся поглотителей полупроводниковых структур и нанотрубок позволяло обеспечивать самозапуск режима синхронизации мод, однако энергетические характеристики излучения на выходе лазера были невысокими даже после применения висмутового волоконного усилителя [7]: энергия в импульсе составляла 0.62 нДж при его длительности до сжатия 5.7 пс.

В настоящей работе сообщается о результатах исследования лазеров УКИ на фосфоросиликатных висмутовых световодах. В качестве механизма получения синхронизации мод, в отличие от предыдущих исследований лазеров на висмутовых световодах, использовалась керровская нелинейность в кольцевом волоконном зеркале. Достигнутая нами энергия в импульсе – 1.65 нДж на выходе лазера и 8.7 нДж на выходе усилителя – существенно превышает результаты, которые были получены

А.М.Хегай, К.Е.Рюмки, С.В.Фирстов, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: melkoumov@fo.gpi.ru
Ф.В.Афанасьев, В.Ф.Хопин. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49
Д.В.Мясников. НТО «ИРЭ-Полюс», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1

Поступила в редакцию 25 октября 2016 г., после доработки – 8 ноября 2016 г.

в предыдущих работах, выполненных на подобных световодах. Длительность импульса после сжатия внешним решеточным компрессором составила около 500 фс.

Эти результаты были получены нами при исследовании влияния содержания активного висмута на усиление и уровень непросветляемых потерь, что позволило определить оптимальный диапазон концентраций ВАЦ и других легирующих добавок.

2. Исследование влияния концентрации ВАЦ на усиление и уровень непросветляемых потерь

Эффективность работы любой активной среды во многом зависит от отношения уровня активных потерь (величина поглощения активных центров в режиме слабого сигнала) к уровню непросветляемых потерь. Непросветляемыми называются потери, остающиеся в активной среде даже при интенсивности накачки, много большей уровня просветления (насыщения). Такие остаточные потери могут быть обусловлены двумя основными факторами: затуханием излучения, не связанным с поглощением активными центрами, и поглощением, имеющим к ним непосредственное отношение. К таким потерям можно отнести, например, потери на поглощение из возбужденного состояния в активных центрах или связанных с ними структурах и потери из-за кластеризации, когда активный ион после поглощения кванта накачки быстро обменивается энергией с соседним активным центром, также находящимся в возбужденном состоянии, и возвращается в основное состояние. При этом энергия кванта накачки переходит в тепло и должного уровня просветления среды не наступает.

Наличие поглощения из возбужденного состояния в некоторых случаях может приводить к тому, что потери в присутствии излучения накачки могут даже превышать исходный уровень, тогда как затухание, не связанное с активными центрами, никогда не превышает начального уровня. В лучших активных волоконных световодах, легированных редкоземельными ионами, отношение уровня активных и непросветляемых потерь (величина просветления) может достигать 10^6 (для световодов, активированных ионами иттербия) или 10^4 (для эрбиевых световодов). В световодах с висмутом максимальное (~80) просветление было достигнуто в германосиликатных световодах [8], что на несколько порядков меньше, чем в световодах, легированных редкоземельными ионами. Систематических исследований влияния концентрации ВАЦ на непросветляемые потери в фосфоросиликатных световодах с висмутом ранее не проводилось.

Нами исследовалось несколько образцов фосфоросиликатных световодов с висмутом, изготовленных по MCVD технологии. Длина волны отсечки первой высшей моды находилась в области 1.1 мкм. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки Δn варьировалась от 4.5×10^{-3} до 10×10^{-3} и полностью определялась концентрацией фосфора в сердцевине световода. Диапазон поглощения ВАЦ на длине волны 1.24 мкм составлял 0.05–2.4 дБ/м. Спектры поглощения и усиления в фосфоросиликатном световоде, легированном висмутом, представлены на рис.1.

Измерение зависимости потерь в активном световоде от мощности излучения накачки проводилось прямым

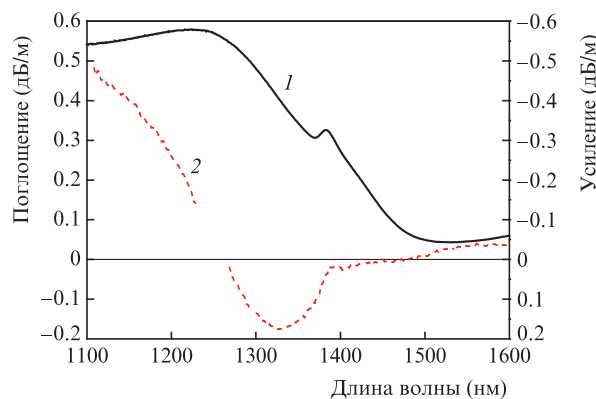


Рис.1. Спектры поглощения (1) и усиления (2) в висмутовом фосфоросиликатном световоде.

методом – посредством определения мощности излучения, вводимой в световод, и мощности, получаемой на выходе из него. Для обеспечения приемлемой точности измерений длина исследуемого отрезка волокна выбиралась такой, чтобы суммарные потери в световоде в случае слабого сигнала находились в диапазоне 10–20 дБ. Абсолютную концентрацию ВАЦ определить не представлялось возможным из-за невысокой чувствительности имеющегося оборудования для микроанализа и малой общей концентрации висмута, а также вследствие того, что не весь вводимый висмут являлся активным, поэтому за относительную концентрацию принималось значение коэффициента поглощения в световоде на длине волны 1.24 мкм. Исходя из уровня затухания на $\lambda = 1.24$ мкм, каждому оптическому волокну было присвоено обозначение. Например, BiP-1.0 означает, что этот фосфоросиликатный световод с висмутом имеет коэффициент поглощения $\alpha = 1.0$ дБ/м на длине волны 1.24 мкм.

Результаты измерений зависимости уровня потерь от мощности излучения на $\lambda = 1.24$ мкм для нескольких образцов световодов с различной концентрацией ВАЦ представлены на рис.2. Видно, что с ростом мощности накачки поглощение в световоде постепенно снижается, а затем выходит на уровень насыщения, который и соответствует непросветляемым потерям. Также видно, что наибольшее отношение уровня исходных потерь к уровню остаточных потерь (т.е. величина просветления) имеют световоды с начальным поглощением в диапазоне 0.18–0.6 дБ/м. У световодов с затуханием, не попадающим в указанный

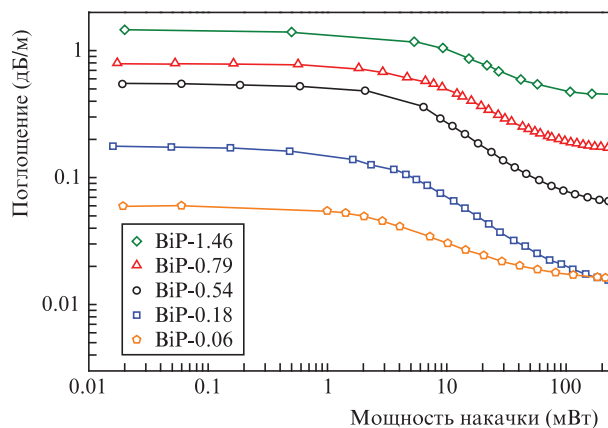


Рис.2. Зависимости поглощения на $\lambda = 1.24$ мкм от мощности сигнала в световодах с различной концентрацией ВАЦ.

диапазон, величина просветления меньше. В случае световодов с коэффициентом поглощения менее 0.18 дБ/м снижение величины просветления обусловлено уровнем серых потерь, не связанных с висмутом, а в волокнах с затуханием более 0.6 дБ/м ухудшение просветления обусловлено дополнительными потерями, возникающими из-за наличия висмута в световоде, например вследствие образования кластеров висмута.

На рис.3 представлены экспериментально измеренные зависимости коэффициента усиления G в фосфоросиликатных световодах с различной концентрацией ВАЦ от коэффициента поглощения α на $\lambda = 1.24$ мкм. Видно, что максимальное усиление на уровне $G = 0.2$ дБ/м достигается в диапазоне коэффициента поглощения ВАЦ 0.55–1.2 дБ/м. Дальнейший рост концентрации активного висмута приводит к снижению усиления вплоть до отрицательных значений (т.е. до поглощения). Кроме того, штриховой линией представлена линейная аппроксимация отношения G/α , которое в рассматриваемом диапазоне концентраций ВАЦ изменяется от 0.42 до -0.1 . Очевидно, что чем больше G/α , тем большей эффективности генерации можно ожидать от лазера на основе этого световода.

Исходя из полученных данных можно заключить, что при использовании световодов такого типа в усилителях необходимо учитывать, что волокно с меньшей концентрацией ВАЦ и, следовательно, с меньшим коэффициентом усиления может обеспечивать большую эффективность в плане преобразования энергии накачки в сигнал из-за лучшего просветления световода. При этом для обеспечения необходимого уровня полного усиления требуется активное волокно большей длины. Для полного просветления потерь в световодах с большим погонным усилением требуется большая мощность накачки, т.к. у данных световодов непросветляемые потери выше, но при этом длины лазера и усилителя можно уменьшить.

Представленные данные позволяют сделать вывод о том, что оптимальной для импульсных лазеров и усилителей, уменьшение длины которых может быть важным фактором, является концентрация ВАЦ, соответствующая коэффициенту поглощения 0.5–0.6 дБ/м на $\lambda = 1.24$ мкм. Исходя из этого в нашей дальнейшей работе по созданию импульсного лазера использовался световод ВР-0.54. Для применений, где длина активного световода не так существенна, более высокой эффективности использова-

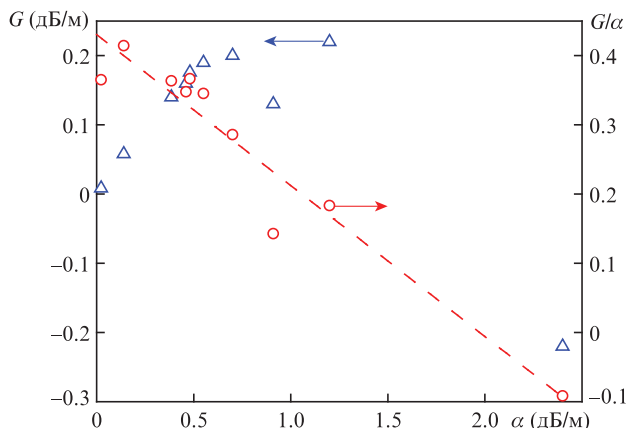


Рис.3. Экспериментальные зависимости коэффициента усиления G и отношения коэффициентов усиления и поглощения G/α в висмутовых световодах от коэффициента поглощения α на $\lambda = 1.24$ мкм (штриховая линия – линейная аппроксимация отношения G/α).

ния излучения накачки можно достичь на световодах с поглощением 0.2–0.3 дБ/м на $\lambda = 1.24$ мкм.

3. Висмутовый лазер на длине волны 1.3 мкм

Висмутовый волоконный лазер УКИ был собран по схеме типа восьмерки, представленной на рис.4 [9–11]. Правая часть схемы состояла из волоконного кольцевого зеркала (интерферометр Саньяка) и включала в себя отрезок пассивного высокогерманатного световода с концентрацией GeO_2 около 30 мол.% (на рис.4 – HiGe-световод) и контроллера поляризации (КП). Левая часть лазера состояла из активного висмутового световода, накачиваемого излучением лазерного диода (ЛД) мощностью до 350 мВт на $\lambda = 1.24$ мкм через волоконный спектрально-селективный ответвитель (ССО), изолятора (ИЗО) на $\lambda = 1.3$ мкм для обеспечения однонаправленного режима генерации, из контроллера поляризации и волоконного делителя 30/70. Делитель выводил из резонатора около 30% мощности генерации. Кольцевое зеркало и усиливающая часть соединялись волоконным разветвителем (делитель 40/60). Активной средой служил фосфоросиликатный висмутовый световод ВР-0.54 со ступенчатым профилем показателя преломления ($\Delta n = 5 \times 10^{-3}$). Длина активного световода составляла около 30 м, что обеспечивало усиление ~ 5 дБ на $\lambda = 1.31$ мкм.

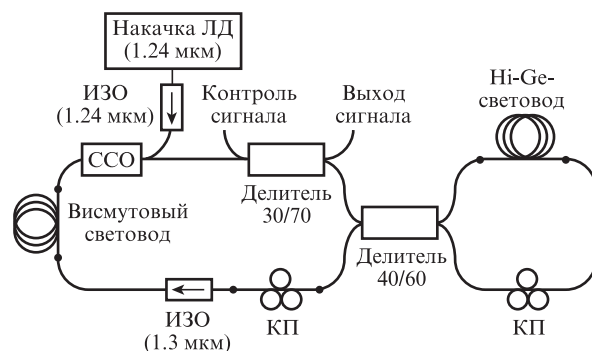


Рис.4. Схема типа восьмерки висмутового волоконного лазера УКИ.

Для оценки полной дисперсии в резонаторе были проведены измерения дисперсионных характеристик в активном висмутовом и HiGe-световодах. Дисперсия световода SMF-28e, с помощью которого были реализованы все остальные волоконные компоненты схемы, также хорошо известна. Суммарная дисперсия в схеме на длине волны 1.31 мкм составляла ~ 0.27 пс² и определялась, главным образом, наличием HiGe-световода длиной около 6 м и дисперсией ~ 48 пс²/км, поскольку остальные световоды схемы, включая SMF-28e и активный висмутовый световод, имели почти нулевую дисперсию вблизи $\lambda = 1.31$ мкм.

На выходе схемы измерялись следующие параметры излучения: выходная мощность (калориметр Ophir Nova 2 или измеритель мощности Grandway FHP2), спектр (оптический спектроанализатор Agilent 86140), поляризация (поляриметр Thorlabs PAX 5710) и временные характеристики (осциллограф LeCroy WavePro7100 с полосой 1 ГГц и автокоррелятор INRAD 5-14B).

4. Результаты экспериментов

Лазерная генерация в многоимпульсном режиме устанавливалась при мощности излучения накачки около

230 мВт. Для этого с помощью КП подстраивалось состояние поляризации в резонаторе и посредством внешнего воздействия инициировался запуск режима синхронизации мод из непрерывной генерации. В этом случае ширина автокорреляционной функции (АКФ) импульсов на выходе лазера превышала 100 пс. После получения многоимпульсной генерации мощность накачки снижалась до 180 мВт и лазер переходил в одноимпульсный режим с длительностью импульсов в пределах 10–30 пс (в зависимости от настройки КП). Типичный спектр в случае генерации лазером одиночных импульсов представлен на рис.5. Резкие края спектра свидетельствуют о том, что лазер работает в режиме генерации диссипативных солитонов [12]. Иногда на фоне широкой линии спектра импульсной генерации регистрировался узкий максимум, свидетельствующий о наличии непрерывной генерации.

Средняя выходная мощность излучения в режиме генерации одиночных импульсов находилась на уровне 6 мВт, что при частоте их следования 3.6 МГц соответствует энергии в импульсе ~ 1.65 нДж. Ширина линии генерации на выходе составляла около 17 нм (FWHM), а длительность импульса, измеренная по АКФ (см. вставку на рис.6,а) равнялась 11.3 пс (в предположении, что импульс имеет форму sech^2). Произведение длительности импульса на ширину спектра было равно ~ 33.5 , что указывает на большую частотную модуляцию импульса. Это позволило сжать импульс до длительности ~ 530 фс (см. АКФ на рис.6,а), используя компрессор на отражающих дифракционных решетках с плотностью 600 штрих./мм. Из рис.6,а видно, что как на выходе лазера, так и после компрессора импульс имеет форму sech^2 и почти не имеет pedestal.

Для проверки возможности дальнейшего увеличения энергии в импульсе нами был создан висмутовый волоконный усилитель с накачкой от двух лазерных диодов (1.24 мкм) с мощностью излучения по 300 мВт каждый. В качестве активной среды использовался отрезок световода BiP-0.54 длиной 200 м. Накачка осуществлялась с двух сторон через спектрально-селективные ответвители. Излучение лазера вводилось в усилитель через волоконно-оптический изолятор на $\lambda = 1.3$ мкм. Средняя мощность на выходе усилителя достигла 30 мВт, а энергия в импульсе выросла до 8.3 нДж.

Длительность импульсов после усилителя не изменялась, а АКФ была идентична представленной на вставке рис.6,а. Усиленные импульсы также сжимались с помощью решетчатого компрессора. АКФ усиленных и сжатых им-

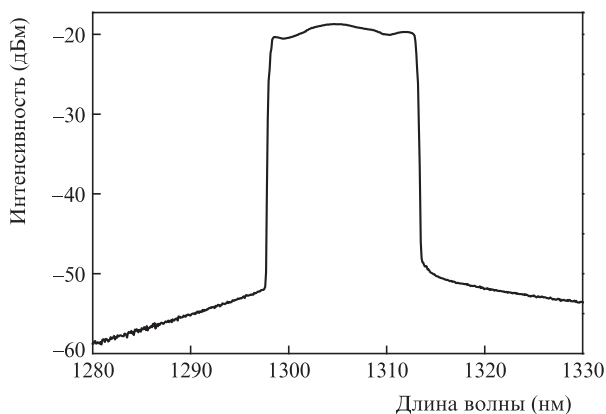


Рис.5. Спектр лазерной генерации.

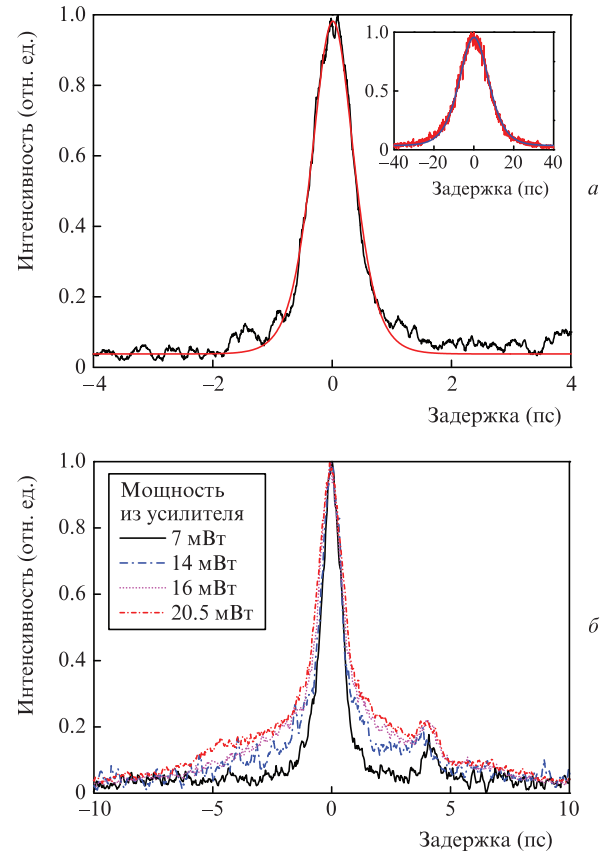


Рис.6. АКФ сжатых компрессором импульсов после лазера (а) и после усилителя при различных выходных мощностях (б). На вставке: АКФ несжатых импульсов после лазера.

пульсов представлены на рис.6,б для различных мощностей излучения на выходе усилителя. Видно, что с ростом выходной мощности излучения длительность импульса немного увеличилась, а кроме того, заметно подрос pedestal, что говорит о росте нелинейной составляющей частотной модуляции импульса.

5. Заключение

В результате проделанной работы изготовлен ряд фосфоросиликатных световодов с различной концентрацией висмутовых активных центров. Исследовано влияние концентрации активного висмута (поглощения на длине волны 1.24 мкм) на усиливающие свойства световода и его просветление. Установлено, что в диапазоне коэффициентов поглощения 0.55–1.2 дБ/м на $\lambda = 1.24$ мкм коэффициент усиления в световодах изменяется слабо и находится вблизи 0.2 дБ/м на длине волны 1.31 мкм, а просветление световодов по мере роста коэффициента затухания существенно снижается. Исходя из этих данных был выбран оптимальный световод для использования в лазерах УКИ.

С использованием выбранного световода был создан полностью волоконный лазер УКИ на длину волны вблизи 1.3 мкм с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного кольцевого зеркала. Лазер генерировал диссипативные солитоны длительностью 11.3 пс с энергией в импульсе 1.65 нДж и частотой следования ~ 3.6 МГц. Средняя мощность излучения на выходе при этом составляла 6 мВт. Импульсы были усилены в висмутовом усилителе с двунаправленной накачкой (ее суммарная мощ-

ность 600 мВт) до средней мощности 30 мВт, что соответствовало энергии в импульсе 8.3 нДж. Сжатие импульсов с помощью решеточного компрессора позволило уменьшить их длительность до 530 фс.

Подобные характеристики импульсов субпикосекундной длительности на длине волны 1.3 мкм впервые достигнуты в волоконных системах на основе висмутовых световодов и сравнимы с параметрами, полученными ранее в лазерах на флюоридном волокне, легированном празеодимом (длительность ~ 650 фс, энергия ~ 5.7 нДж [13]) и в коммерческих твердотельных лазерах на хром-форстерите (длительность ~ 140 фс, энергия ~ 20 нДж [14]).

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам НЦВО РАН М.Е.Лихачеву и А.А.Крылову за полезные обсуждения и предоставление оборудования для проведения измерений, а также А.К.Сенаторову за измерения дисперсии в световодах. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (соглашение №16-19-10688).

1. Dianov E.M., Krylov A.A., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Kryukov P.G., Okhotnikov O.G., Guina M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1807 (2007).
2. Gumenyuk R., Puustinen J., Shubin A.V., Bufetov I.A., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. *Opt. Lett.*, **38**, 4005 (2013).
3. Gumenyuk R., Melkumov M.A., Khopin V.F., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. *Sci. Rep.*, **4**, 7044 (2014).
4. Noronen T., Firstov S.V., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. *Sci. Rep.*, **6**, 24876 (2016).
5. McWilliam A., *Femtosecond Cr⁴⁺: Forsterite Laser for Applications in Telecommunications and Biophotonics* (Diss. University of St. Andrews, 2007).
6. Sun C., Chen C., Chu S., Tsai T., Chen Y., Lin B. *Opt. Lett.*, **28**, 2488 (2003).
7. Heikkinen J., Gumenyuk R., Rantamäki A., Leinonen T., Melkumov M., Dianov E., Okhotnikov O. *Opt. Express*, **22**, 11446 (2014).
8. Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2408 (2011).
9. Duling I.N. *Opt. Lett.*, **16**, 539 (1991).
10. Avdokhin A.V., Popov S.V., Taylor J.R. *Opt. Express*, **11**, 265 (2003).
11. Nicholson J.W., Andrejco M. *Opt. Express*, **14**, 8160 (2006).
12. Renninger W.H., Chong A., Wise F.W. *Phys. Rev. A*, **77**, 023814 (2008).
13. Guy M.J., Noske D.U., Boskovic A., Taylor J.R., et al. *Opt. Lett.*, **19**, 828 (1994).
14. <http://www.avesta.ru/pageseng/Cr:Forsterite-Femtosecond-LASERS/14-.htm>.