

УДК 681.7.068/.069

**И.В. Жлуктова¹, С.А. Филатова¹, Ю.Н. Пырков^{1,2},
В.А. Камынин^{1,3}, В.Б. Цветков^{1,4}**

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт «МФТИ», Москва, Россия

³ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБНЫХ ПОТЕРЬ НА ГЕНЕРАЦИЮ СУПЕРКОНТИНУУМА В ГОЛЬМИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Продемонстрировано влияние изгибных потерь на эффективность усиления импульсного сигнала в гольмиевом волоконном усилителе. Максимальный коэффициент усиления сигнала без изгиба активного волокна усилителя составил 31 дБ и снизился до 26 дБ при изгибе, диаметром 10 мм. Также была показана зависимость формы спектра суперконтинуума от диаметра изгиба высококнелинейного германатного волокна. Была получена генерация суперконтинуума, со спектральной шириной 600 нм. Доля мощности в спектральной области 2200–2600 нм была не более 27 % для варианта без изгиба и не более 20 % с изгибом диаметром 10 мм.

Ключевые слова: изгибные потери в волокне, гольмиевый волоконный усилитель, генерация суперконтинуума.

**I.V. Zhluktova¹, S.A. Filatova¹, Yu.N. Pyrkov^{1,2},
V.A. Kamynin^{1,3}, V.B. Tsvetkov^{1,4}**

¹ Institute of General Physics. A.M. Prokhorov of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Moscow Institute of Physics and Technology "MIPT", Moscow, Russian Federation

³ Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

⁴ National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FLEXURAL LOSSES ON THE GENERATION OF A SUPERCONTINUUM IN HOLMIUM FIBER AMPLIFIERS

We demonstrate the influence of macro-bending losses on the amplification efficiency of a pulsed signal in a holmium-doped fiber amplifier. The maximum gain of the signal in the straight active fiber of the amplifier was 31 dB and decreased to 26 dB in Ho-doped fiber with bending diameter of

10 mm. Also, the shape of the supercontinuum spectrum was shown depending on the bending diameter of the highly nonlinear germanium fiber. The supercontinuum generation was obtained. The spectral width was of 600 nm.

Keywords: bending loss in fiber, holmium-doped fiber amplifier, supercontinuum generation.

Введение

Суперконтинуум (СК) в спектральном диапазоне до 3 мкм в настоящий момент активно используется в следующих областях: научные исследования [1], медицина, когерентная томография [2], оптическая коммуникация [3] и др.

В качестве источников накачки суперконтинуума, как правило, выступают комплексы, состоящие из импульсных лазеров с системой оптических усилителей, позволяющие получить достаточную пиковую мощность для генерации СК. Одной из распространенных оптических схем является использование задающего генератора в импульсном режиме с последующим усилением излучения, которое вводится в высоконелинейную среду, где и происходит преобразование оптического спектра. На данный момент для генерации СК все чаще используются высоконелинейные волокна, такие как ZBLAN [4], ФКВ, флюоридные [5]. Одним из вариантов таких волокон являются германатные волокна (GeO_2), которые, например, были представлены в работах [6, 7]. Также в своей работе коллектив авторов [8] получил излучение суперконтинуума в диапазоне 1–2,6 мкм с накачкой от эрбиевого волоконного лазера. Данный тип волокон позволяет получить генерацию до 3 мкм за счет высокой нелинейности Керра, вынужденного комбинационного рассеяния и низких (по сравнению со стандартными одномодовыми волокнами) потерь в длинноволновой области.

При этом для данного типа световодов сохраняются преимущества волокон на кварцевой основе, в том числе возможность использования стандартных сварных соединений, что делает источники СК более технологичными. Для разработки мобильных источников СК существенным является вопрос потерь при укладке оптических волокон. Поэтому есть необходимость изучить влияние потерь на изгибах как в элементах схем, так и в активных волокнах на результирующее излучение.

В данной работе проведено исследование влияния изгибных потерь на проходящее излучение в отдельных образцах активных волокон, легированных ионами гольмия и высоконелинейных германатных

световодах. В ходе работы исследовались изгибные потери в гольмиевом волоконном усилителе. Был получен максимальный коэффициент усиления 31 дБ без изгиба активного волокна и при изгибе 10 мм – 26 дБ. Также при генерации СК высоконелинейное волокно изгибалось с теми же диаметрами, что и в ранних экспериментах. Получены выходные спектры суперконтинуума со спектральной шириной 600 нм.

1. Эксперимент по изгибным потерям в Ho- и Ge-волокнах

Схема экспериментальной установки по измерению изгибных потерь в волокнах представлена на рис. 1. В ходе исследования для регистрации излучения использовалась система синхронного детектирования, которая была сфазирована с тестовым оптическим сигналом от галогеновой лампы. Выходные спектры были получены при помощи монохроматора МДР-12. В эксперименте использовались образцы волокон, легированных ионами Ho и Ge. Источником излучения выступала галогеновая лампа, оптический сигнал которой при помощи конденсора вводился в исследуемое волокно. Модулятор был расположен после конденсора. Модулировался только тестовый оптический сигнал, и в ходе эксперимента не регистрировалась спонтанная люминесценция. Коротковолновое излучение от галогеновой лампы отсекалось при помощи отрезающего фильтра на 1,5 мкм. В качестве приемника использовался охлаждающийся азотом InAs детектор производства Judson IR Inc с площадкой 1 мм.

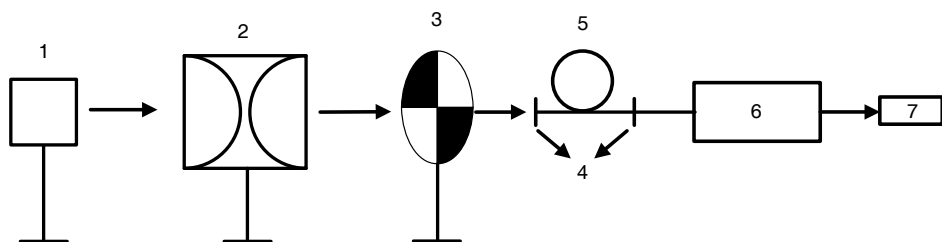
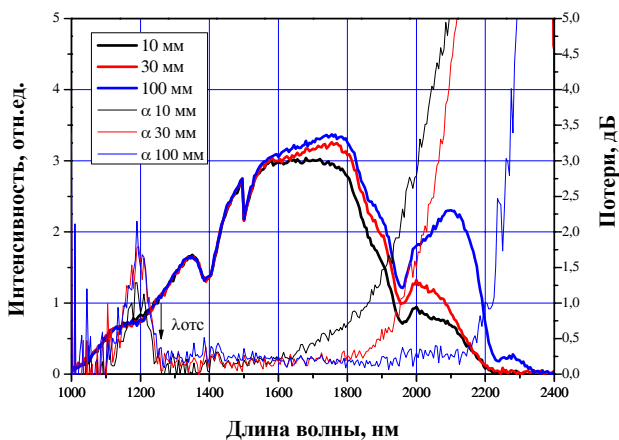


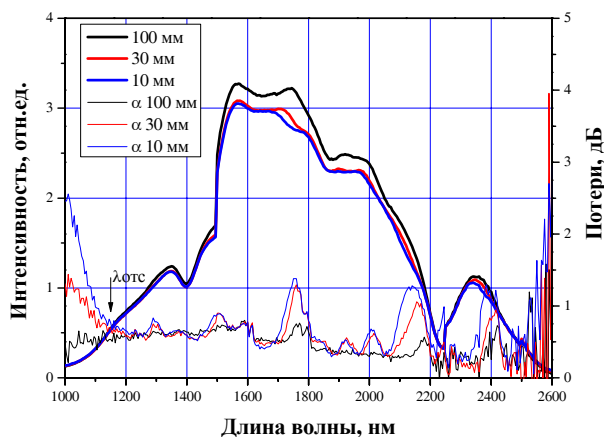
Рис. 1. Оптическая схема системы синхронного детектирования: 1 – источник излучения; 2 – конденсор; 3 – оптомеханический модулятор; 4 – держатели для волокон; 5 – образцы волокна; 6 – монохроматор МДР-12; 7 – приемник InAs

Образцы волокон наматывались на катушки разных диаметров (100, 30 и 10 мм), и были получены спектры пропускания при различных радиусах изгиба (рис. 2). Для гольмиевого волокна (длина которого составляла 10 см) видно, что длина волны отсечки находится в об-

ласти 1260 нм, для германатного волокна (длиной 90 см) длина волны отсечки – 1171 нм. В спектральной области от 2 мкм с увеличением изгиба гольмиевого волокна в отличие от германатного волокна уменьшается пропускная способность образца, что свидетельствует о влиянии изгибных потерь в длинноволновой области спектра.



а



б

Рис. 2. Оптические спектры пропускания и спектральная зависимость изгибных потерь волокон, легированных Ho (а) и Ge (б) (при разных радиусах изгиба)

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что для волокна, легированного ионами гольмия, условия по изгибам предъявляются более жесткие – диаметр кривизны менее 100 мм вносит много потерь при работе на длине волны 2,1 мкм и более.

2. Эксперименты по изгибным потерям в гольмиевом волоконном усилителе

В качестве задающего источника был использован гольмиевый волоконный лазер, работающий в режиме синхронизации мод и излучающий на длине волны 2083 нм. Накачка задающего источника осуществлялась иттербиевым волоконным лазером на длине волны 1125 нм. Сам иттербиевый лазер состоял из диода накачки длиной волны 975 нм, Yb GTWave-волокна длиной 30 м и двух решеток Брэгга (1125 нм). Решетки использовались как зеркала, поэтому одна из них имела высокий коэффициент отражения, а другая 30 %. Для накачки усилителя использовался второй идентичный иттербиевый лазер с максимальной выходной мощностью 8 Вт. Для предотвращения распространения обратного сигнала был использован изолятор (ISO) с потерями в пределах 0,6 дБ, помещенный перед мультиплексором (WDM) 1125/2100 нм, который объединял сигнал от задающего генератора и излучение иттербиевого лазера накачки.

Излучение от задающего генератора, мощность которого была 350 мкВт (рис. 3, а), вводилось в гольмиевый волоконный усилитель (рис. 3, б). В качестве активной усиливающей среды использовалось гольмиевое волокно длиной 2 м. Диаметр сердцевины активного волокна составлял 11,5 мкм с концентрацией активной примеси $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и поглощением 11 дБ/м на длине волны 1125 нм.

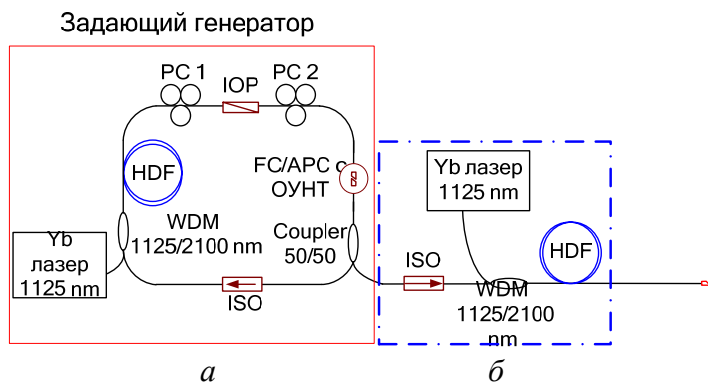


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки: HDF – волокно, легированное Ho, SMF – одномодовое волокно SMF 28, WDM – мультиплексор, PC – контроллер поляризации, ISO – оптический изолятор, SWCNT – одностенные углеродные нанотрубки

В ходе эксперимента активное волокно усилителя наматывалось на изготовленные в лабораторных условиях катушки разных диаметров. Максимально усиленная мощность без изгибов – 386 мВт, с коэффициентом усиления 31 дБ. Полученные выходные параметры представлены в таблице.

Полученные выходные параметры эксперимента

Диаметр катушки, мм	Максимально усиленная мощность, мВт	Максимальный коэффициент усиления, дБ
100	325	30
30	210	28
10	136	26

На рис. 4 представлены полученные оптические спектры. При усилении сигнала от задающего генератора происходит деформация оптического спектра с увеличением мощности накачки усилителя за счет ФСМ и возрастания интенсивности мощности в волокне. При увеличении изгибных потерь видно, что уменьшается изрезанность выходного усиленного спектра.

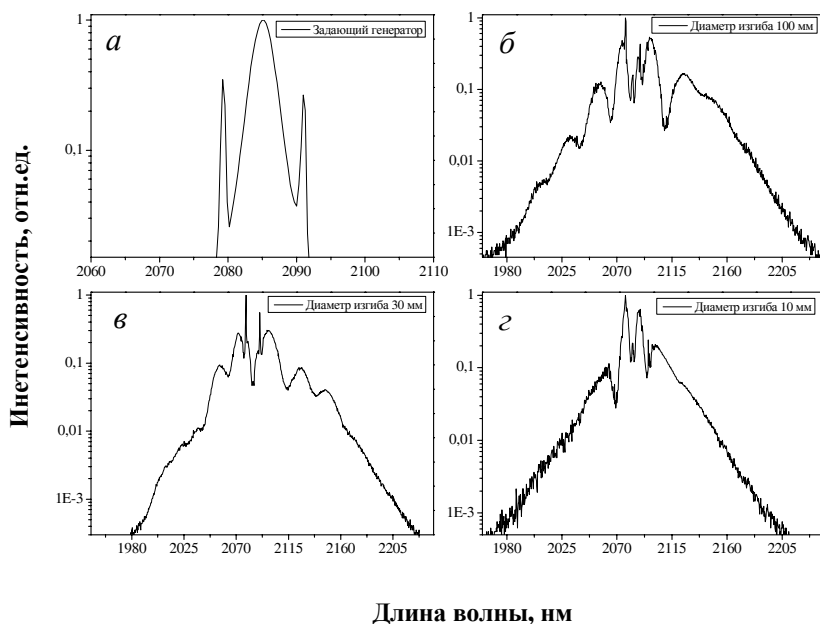


Рис. 4. Оптические спектры задающего генератора (*a*) и спектры усиленного излучения (*б, в, з*) при разных изгибах активного волокна гольмиевого волоконного усилителя

3. Эксперименты по изгибным потерям при генерации суперконтинуума

Оптическая система была дополнена GeO₂-волокном (длина ~90 см) (рис. 5, см. II) после исследованного гольмиевого волоконного усилителя. Задающий генератор остался без изменений. Длительность импульса составляла 1,5 пс с энергией 0,3 нДж, частота следования 13,3 МГц, пиковая мощность 200 Вт.

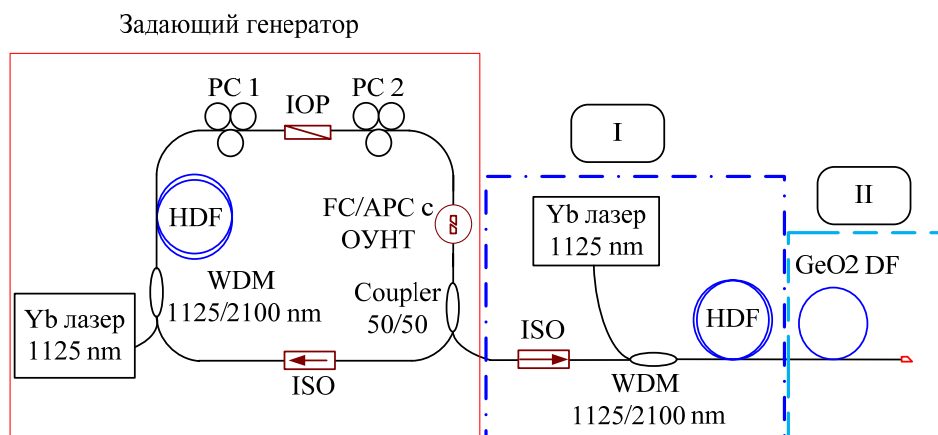


Рис. 5. Оптическая схема экспериментальной установки:
GeO₂DF – высоконелинейное германатное волокно

В качестве нелинейной среды для генерации суперконтинуума использовался образец германатного волокна на кварцевой основе: одномодовое волокно с диаметром сердцевины 5–6 мкм и с молярной концентрацией германия 64 %. Данное волокно было выбрано из-за малых потерь в длинноволновой области (что было исследовано в подразделе 2), а также оно обладает большим коэффициентом рамановского усиления и нелинейности. Для германатных волокон значение дисперсии на длине волны накачки ближе к нулю, что свидетельствует о возможном уширении в коротковолновую область.

Была получена генерация суперконтинуума со спектральной шириной 600 нм. В данном случае изгибалось германатное волокно с такими же диаметрами, как и в прошлых экспериментах. Средняя выходная мощность составляла на максимальном токе накачки ~ 108 мВт (без изгибов) и падала до 76 мВт (при минимальном изгибе 10 мм), доля мощности в спектральной области 2200–2600 нм была не более 27 %.

За счет одного из нелинейных эффектов, а именно вынужденного комбинационного рассеяния, коэффициент которого в германатном волокне имеет большое значение, была получена эффективная генерация в области длин волн более 2 мкм.

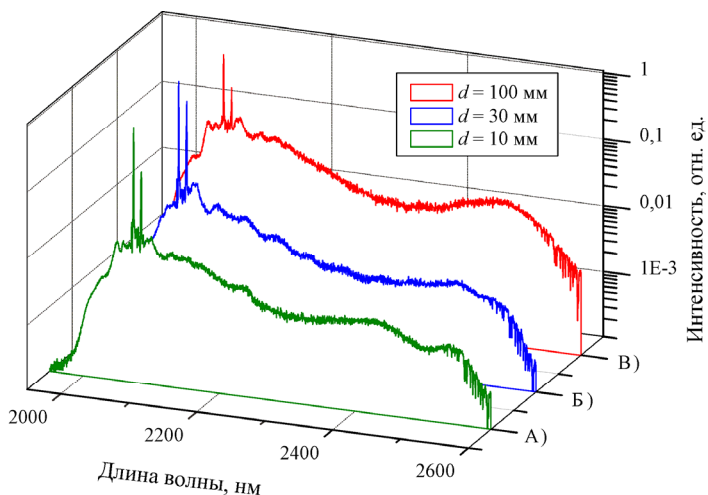


Рис. 6. Оптические спектры суперконтинуума при изгибах Ge-волокна

На рис. 6 представлены оптические спектры суперконтинуума. Видно, что при уменьшении диаметра изгиба GeO_2 -волокна изменение спектра идет в области от 2,4 и до 2,6 мкм и становится более плоским в отличие от графика (E), где присутствуют два горба в области 2,1 и 2,5 мкм. Также замечено изменение длины спектров на краю длинноволновой области, а именно ее уменьшение.

Заключение

В представленной работе проведено исследование по изгибным потерям образцов волокон, легированных ионами Ho и Ge. Замечено, что в спектральной области от 2 мкм с увеличением изгиба гольмиевого волокна уменьшается пропускная способность образца, что свидетельствует о влиянии изгибных потерь в длинноволновой области спектра. В отличие от предыдущего образца пропускная способность GeO_2 волокна почти не изменяется, так как благодаря большой разности показателей преломления сердцевины и оболочки ($\Delta n \sim 0,1$) обладают малым диаметром поля моды и в дополнение усиливаются их не-

линейные свойства. Собрана оптическая система для исследования потерь в гольмиевом волоконном усилителе и получена генерация СК. Как видно из представленных результатов, основные потери появляются при изгибах гольмиевого волокна.

Работа выполнена при поддержке Президиума Российской академии наук в рамках программы фундаментальных исследований № I.7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов».

Список литературы

1. Dorsinville R., Ho P.P. Applications of supercontinuum: present and future // Springer. – 2006. – P. 377–398.
2. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air–silica microstructure optical fiber / Hartl [et al.] // Opt. Lett. – 2001. – Vol. 26, № 9. – 608 p.
3. Over-1000-channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source / T. Ohara [et al.] // J. Light. Technol. – 2006. – Vol. 24, № 6. – P. 2311–2316.
4. Xia C., Kumar M., Kulkarni O.P. Mid-infrared supercontinuum generation to 4.5 μ m–4.5 μ m in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping // Opt. Lett. – 2006. – № 31. – P. 2553.
5. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // УФН. – 2006. – № 176. – С. 623–649.
6. Эффективный источник фемтосекундных импульсов и его использование для генерации широкополосного суперконтинуума / А.В. Таусенев, П.Г. Крюков [и др.] // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 7. – С. 581–585.
7. Kamynin V.A., Kurkov A.S., Mashinsky V.M. Supercontinuum generation up to 2.7 μ m in the germanate glass-core and silica-glass-cladding fiber // Laser Phys. Lett. – 2012. – № 9. – P. 219–222.
8. Generating tunable optical pulses over the ultrabroad range of 1.6–2.5 μ m in GeO₂-doped silica fibers with an Er: fiber laser source Abstract / E.A. Anashkina, A.V. Andrianov, M.Y. Koptev [et al.]. – 2012. – Vol. 20, no. 24. – P. 2015–2017.

References

1. Dorsinville R., Ho P.P. Applications of supercontinuum: present and future. Springer, 2006, pp. 377-398.
2. Hartl et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber. *Opt. Lett.*, 2001, vol. 26, no. 9, p. 608.
3. Ohara T. et al. Over-1000-channel ultradense WDM transmission with supercontinuum multicarrier source. *J. Light. Technol.*, 2006, vol. 24, no.6, pp. 2311-2316.
4. Xia C., Kumar M., Kulkarni O.P. Mid-infrared supercontinuum generation to 4.5 μm in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping. *Opt. Lett.*, 2006, no. 31, pp. 2553.
5. Zheltikov A.M. Da budet belyy svet: generatsiya superkontinuuma sverkhkorotkimi lazernymi impulsami [Let the white light go on: supercontinuum generation by ultrashort laser pulses]. *UFN*, 2006, no. 176, pp. 623-649.
6. Tausenev A.V., Kryukov P.G. et al. Effektivnyy istochnik femtosekundnykh impulsov i ego ispolzovanie dlya generatsii shirokopolosnogo superkontinuuma [Effective source of femtosecond pulses and its use to generate broadband supercontinuum]. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 7, pp. 581-585.
7. Kamynin V.A., Kurkov A.S., Mashinsky V.M. Supercontinuum generation up to 2.7 μm in the germanate glass-core and silica-glass-cladding fiber. *Laser Phys. Lett.*, 2012, no. 9, pp. 219-222.
8. Anashkina E.A., Andrianov A.V., Koptev M.Y. et al. Generating tunable optical pulses over the ultrabroad range of 1.6-2.5 μm in GeO₂-doped silica fibers with an Er: fiber laser source. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 24, pp. 2015-2017.

Получено 17.09.2018