

Запись длиннопериодной решетки в волоконном световоде с помощью излучения второй гармоники фемтосекундного лазера на Ti:сапфире

К.А.Загорюлько*, П.Г.Крюков*, Ю.В.Ларионов*, А.А.Рыбалтовский*, Е.М.Дианов*, Н.С.Воробьев**, А.В.Смирнов**, М.Я.Щелев**, А.М.Прохоров**

Впервые длиннопериодные решетки в волоконном световоде записаны с помощью излучения второй гармоники фемтосекундного лазера на Ti:сапфире без использования усилителя. Исследована фоточувствительность различных волокон при экспонировании их фемтосекундными импульсами. Выполненные оценки фоточувствительности и термические свойства длиннопериодных решеток свидетельствуют о том, что механизм изменения показателя преломления под действием второй гармоники (400 нм) отличается от случаев использования как УФ излучения эксимерных лазеров, так и усиленных фемтосекундных импульсов с длиной волны 0.8 мкм.

Ключевые слова: внутриволоконные решетки показателя преломления, фемтосекундные импульсы, фоточувствительность.

1. Введение

Одной из важнейших задач волоконной оптики является создание в одномодовых волоконных световодах (ВС) структур, обладающих спектрально-селективными свойствами. Такими структурами являются периодические изменения (решетки) показателя преломления (ПП) стекла вдоль световода. Для создания областей с измененным ПП обычно используется облучение ВС УФ излучением, которое совпадает с полосами поглощения стекла сердцевины ВС. Источниками УФ излучения, как правило, служат вторая гармоника непрерывного аргонного лазера, а также импульсные эксимерные лазеры. Несмотря на широкое использование упомянутого явления на практике, многие аспекты его природы до конца не ясны.

Успехи в разработке лазеров на Ti:сапфире, работающих в режиме самосинхронизации мод за счет керровской линзы, привели к попыткам использовать и эти лазеры для получения фотоиндуцированных изменений в различных стеклах и световодах на их основе. Хотя длина волны ($\lambda = 0.8$ мкм) далека от полосы поглощения в УФ диапазоне длин волн, фемтосекундная длительность импульсов позволяет получать высокие интенсивности, при которых существенными становятся многофотонные эффекты, в частности многофотонное поглощение. В работах [1, 2] были продемонстрированы изменения ПП при облучении стекла излучением усиленных фемтосекундных импульсов на длине волны 0.8 мкм, причем эти изменения существенно отличаются от полученных при использовании УФ излучения.

Из-за высокой интенсивности, присущей излучению в виде фемтосекундных импульсов, взаимодействие излу-

чения с прозрачными материалами имеет и другие особенности. Кроме многофотонного поглощения может происходить многофотонная ионизация, нагрев электронов в сильном поле электромагнитной волны, образование их лавины с последующим пробоем. В результате в толще стекла возможен микровзрыв с образованием сферических полостей с диаметром, меньшим длины волны света [1]. Естественно, что образование таких микроростов приводит к уплотнению стекла, сопровождающемуся изменением ПП. Наряду с изменением ПП на таких дефектах происходит и рассеяние света, что приводит к нежелательным («серым») потерям в световодах.

В поле электромагнитной волны электрон набирает необходимую для пробоя энергию, которая пропорциональна λ^2 (λ – длина волны). В то же время чем меньше длина волны, тем меньше фотонов требуется для многофотонного поглощения. Таким образом, уменьшая длину волны ультракоротких импульсов, можно получить нужное поглощение при меньшей интенсивности и существенно снизить вероятность оптического пробоя. В работе [3] авторы сообщают о наведении ПП излучением второй гармоники фемтосекундного Ti-сапфирового лазера без использования усилителя. ПП был наведен в объемном образце боросиликатного стекла с высокой фоточувствительностью. Мы использовали в наших исследованиях излучение второй гармоники фемтосекундных импульсов лазера на Ti-сапфире для наведения ПП в ВС различного состава.

Периодические изменения ПП в сердцевине одномодового ВС позволяют создавать решетки двух типов: брэгговские, период которых обычно составляет доли микрометра, и длиннопериодные, с периодом 100–500 мкм. Требования, предъявляемые к источникам излучения, используемым для записи этих типов решеток, существенно различаются. При записи брэгговских решеток обычно применяется интерференция двух световых пучков для создания периодического изменения интенсивности излучения вдоль волокна. При этом требуются высокая когерентность источников излучения и механическая стабильность оптической системы записи. В слу-

*Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

**Институт общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

чае длиннопериодной решетки можно использовать амплитудную маску или пошаговое экспонирование ВС сфокусированным излучением с модуляцией интенсивности светового пучка. При этом когерентность не так важна, а требования к механической стабильности записывающей системы снижаются. Длиннопериодные решетки можно создавать не только экспонированием УФ излучением, но и воздействием излучения CO₂- [4] и СО-лазеров [5], с помощью микроизгибов волокна при нагреве электрической дугой [6] и под действием пучков ускоренных ионов с энергией в несколько мегаэлектронвольт [7].

Большая ширина спектра фемтосекундных лазеров и, следовательно, низкая когерентность их излучения затрудняют запись брегговских решеток. Поэтому такие лазеры пытаются использовать для записи длиннопериодных решеток. В работе [8] сообщается о записи длиннопериодной решетки с помощью фемтосекундных импульсов Тi:сапфирового лазера, усиленных в регенеративном усилителе. Созданная решетка обладает высокой температурной стабильностью, сохраняя свои оптические свойства до температуры 500 °С. Однако при записи решетки в ВС были наведены значительные (до 10 дБ) «серые» потери, объясняемые рассеянием на возникающих при облучении неоднородностях.

Подобные решетки с высокой термостабильностью можно создавать при экспонировании и другими типами лазеров. Создание всех этих решеток связывают с сильным нагревом ВС при экспонировании. При меньшем нагреве ВС в результате экспонирования образование решеток объясняют обычно происходящими в них фотохимическими реакциями. Такие решетки обладают, как правило, меньшей термостабильностью.

В настоящей работе впервые, по нашему мнению, сообщается о записи длиннопериодной решетки с помощью излучения второй гармоники фемтосекундного Тi:сапфирового лазера без использования усилителя в насыщенном водородом германосиликатном ВС.

2. Эксперимент

Перед записью решеток была исследована фоточувствительность различных ВС к излучению фемтосекундных импульсов на длине волны 400 нм. Использовалась методика измерения наведенного ПП с помощью внутриволоконного интерферометра Маха – Цендера, состоящего из двух длиннопериодных решеток [9]. Интерферометры создавались в исследуемых ВС при экспонировании их эксимерным лазером LP EMG103MSC, работающим на газовой смеси KrF (248 нм), через амплитудную маску с периодом 300 мкм. Наведенный ПП Δn_{ind} в этой методике определяется по сдвигу интерференционных максимумов согласно соотношению $\Delta n_{\text{ind}} = \lambda \Delta \lambda \times (L \Delta \eta)^{-1}$, где λ – длина волны, на которой проводятся измерения; $\Delta \lambda$ – смещение положения интерференционной картины при экспонировании ВС; η – интеграл перекрытия фундаментальной моды с сердцевиной ВС; L – период интерференционной картины; L – длина облученного участка ВС.

Использовались ВС трех типов:

1) германосиликатный ВС (молярное содержание GeO₂ 4,5 %, разность ПП сердцевины и оболочки $\Delta n = 0.0065$, длина волны отсечки $\lambda_c = 0.96$ мкм, производство НЦВО-ИХВВ РАН) в исходном виде и после насыщения водородом (аналог ВС Flexcore фирмы Corning);

2) стандартный телекоммуникационный германосиликатный ВС типа SMF28 (молярное содержание GeO₂ 3 %, $\Delta n = 0.005$, $\lambda_c = 1.25$ мкм) после насыщения водородом;

3) фосфорогерманосиликатный ВС SMF905 (молярное содержание GeO₂ 10 % и P₂O₅ 4 %, $\Delta n = 0.02$, $\lambda_c = 1.02$ мкм, производство НЦВО-ИХВВ РАН).

Насыщение ВС водородом производилось под давлением 130 атм при температуре 100 °С в течение 18 ч.

Решетки записывались в наиболее фоточувствительном ВС (насыщенный водородом ВС 1-го типа) путем последовательного создания отдельных штрихов на экспериментальной установке, представленной на рис.1. Излучение импульсов Тi:сапфирового лазера Tsunami (Spectra-Physics) с длиной волны 800 нм, средней мощностью 600 мВт при частоте следования 82 МГц и длительностью 60 фс преобразовывалось во вторую гармонику, для чего пучок лазера фокусировался в нелинейный кристалл ВВО толщиной 2 мм. За ним помещался фильтр СЗС21 для поглощения оставшегося излучения первой гармоники, т. к. при облучении ВС отраженное от него излучение попадало обратно в лазер и срывало режим синхронизации мод. Излучение с длиной волны 400 нм фокусировалось микрообъективом 10[×] с числовой апертурой 0.30 на облучаемый ВС.

Эффективность преобразования во вторую гармонику в экспериментах достигала 50 %, однако, с учетом всех потерь, на ВС падало излучение средней мощности 180–210 мВт на $\lambda = 400$ нм. Диаметр пучка на сердцевине ВС контролировался с помощью оптического микроскопа по размерам пятна красной люминесценции сердцевины ВС и составлял около 15 мкм. ВС перемещался перпендикулярно пучку на максимальный ход однокоординатного транслятора со скоростью 6.3 мкм/с, а излучение перекрывалось с помощью механической заслонки. Длина штриха решетки составляла 155 мкм (половину периода), а размер переходной зоны между облученной и необлученной областями был порядка диаметра пучка.

Одним из важных экспериментов, позволяющим прояснить механизм наведения Δn_{ind} в ВС, является исследование термостабильности записанных решеток. Решетки, созданные с помощью фемтосекундных импульсов длиннопериодных решеток, были подвергнуты изохронному

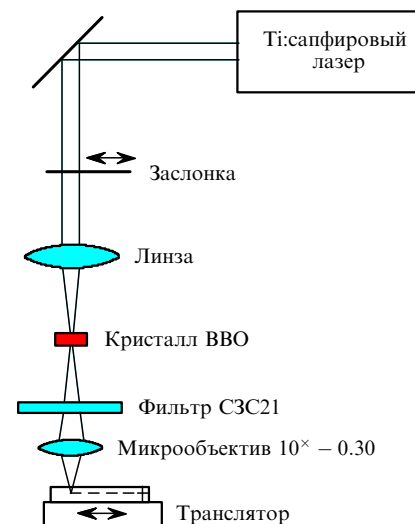


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

отжигу до температуры 400 °С. Отжиг производился при увеличении температуры нагревателя, ее стабилизации на заданном значении в течение 30 мин, фиксации глубины пика потерь и переходе к следующему заданному значению температуры.

3. Результаты и обсуждение

Оценки ПП, наведенного излучением второй гармоники фемтосекундного лазера при дозе экспонирования около 0.2 МДж/см², дали следующие значения Δn_{ind} : для насыщенного водородом ВС 2-го типа и ненасыщенных водородом ВС 1-го и 3-го типов $\Delta n_{\text{ind}} \approx 0.5 \cdot 10^{-4}$; для насыщенного водородом ВС 1-го типа $\Delta n_{\text{ind}} \approx 1.8 \cdot 10^{-4}$.

ВС 3-го типа был выбран для наших экспериментов как один из самых фоточувствительных при экспонировании излучением эксимерного ArF-лазера ($\lambda = 193$ нм). В этом случае при дозе экспонирования 2 кДж/см² наведенный ПП в этом ВС в отсутствие водорода составил $3 \cdot 10^{-3}$. А в насыщенном водородом ВС 1-го типа наведенный ПП при такой же дозе был равен $2 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, фоточувствительность этих двух волокон различна при облучении фемтосекундными импульсами на $\lambda = 400$ нм и наносекундными импульсами на 193 нм. Это свидетельствует о том, что механизмы наведения ПП при использовании этих лазеров различны.

Существенную роль в наведении ПП в экспериментах играет насыщение волокна водородом. По-видимому, лишь образование дефектов в результате встраивания водорода в сетку стекла при экспонировании лазером способно обеспечить наведенный ПП, достаточный для создания длиннопериодной решетки.

Наибольшей фоточувствительностью обладает ВС 1-го типа, предварительно насыщенный водородом. В нем при дозе облучения ~ 19 МДж/см² Δn_{ind} достигало $\sim 4.2 \cdot 10^{-3}$, причем насыщения роста ПП еще не наблюдалось. Длиннопериодные решетки были записаны только в этом ВС, насыщенном водородом, при дозе ~ 0.5 МДж/см². Во всех остальных ВС решетки не удавалось записать при дозах экспонирования до ~ 1 МДж/см².

На рис.2 показан спектр пропускания одной из записанных длиннопериодных решеток. Период решетки равен 310 мкм, ее длина – 23 мм (75 штрихов). Спектр регистрировался с помощью спектроанализатора Ando AQ6317B с разрешением 1 нм. На этом спектре уровень «серых» потерь составляет до 0.5 дБ, что значительно меньше, чем при записи решетки усиленными фемтосекундными импульсами на $\lambda = 800$ нм [8], и практически

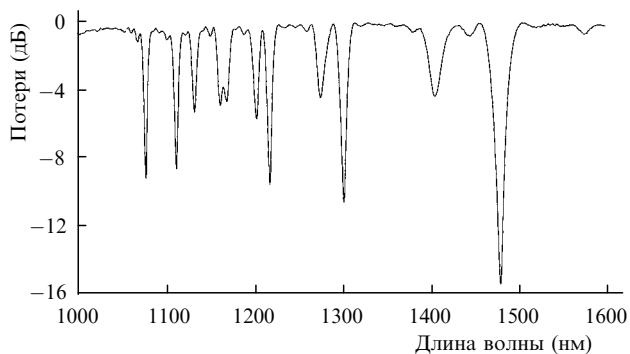


Рис.2. Спектр пропускания длиннопериодной решетки.

совпадает с уровнем «серых» потерь при записи решеток УФ излучением.

На спектре видны семь пиков потерь, соответствующих возбуждению оболочечных мод $HE_{12} - HE_{18}$, причем четыре правых резонанса имеют двойную структуру. Другой характерной особенностью спектров созданных решеток являются большие потери первых пиков (на рис.2 это пики с $\lambda_T \approx 1075, 1110$ и 1130 нм). В спектре одной из созданных решеток первый пик (соответствующий моде HE_{12}) был даже больше последнего видимого на спектре правого пика (HE_{18}). Обычно пики потерь в длиннопериодных решетках возрастают с увеличением длины волны и, соответственно, индекса m оболочечных мод HE_{1m} , соответствующих этим пикам. Проблема аномальной структуры спектров пропускания длиннопериодных решеток, получаемых в наших экспериментах, является предметом дальнейших исследований. Одной из причин могут быть эффекты, связанные с асимметричностью волокна и наведенного ПП [10].

Исследование термостабильности записанных нами длиннопериодных решеток показало, что они начинают разрушаться уже при температуре 100 °С. Это свидетельствует о том, что наведение ПП в наших экспериментах не связано с локальным проплавлением или прогревом стекла, как в случае использования усиленных фемтосекундных импульсов на длине волны 0.8 мкм [8].

Таким образом, суммируя результаты экспериментов по оценке фоточувствительности различных ВС под действием фемтосекундных импульсов с длиной волны 400 нм и результаты отжига длиннопериодной решетки, записанной с их помощью, можно сделать вывод, что механизм наведения ПП в этих условиях имеет фотохимическую природу. Реализуемая в наших экспериментах интенсивность излучения $\sim 10^{10}$ Вт/см² не вызывает значительного локального прогрева и проплавления (а тем более пробоя) стекла. Отметим, что наведение ПП является следствием, по крайней мере, двухфотонного процесса поглощения света, поскольку в области 400 нм ВС практически прозрачны. Для объяснения механизмов наведения ПП в наших экспериментах требуются дополнительные исследования.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые, насколько нам известно, для записи длиннопериодных решеток в одномодовом ВС использовалось излучение второй гармоники лазера на Ti:сапфире с самосинхронизацией мод за счет керровской линзы. Решетка с глубиной пиков потерь до 16 дБ и «серыми» потерями, не превышающими 0.5 дБ, была записана без усиления фемтосекундных импульсов. Это упрощает лазерную установку и существенно снижает ее стоимость. Результаты оценки фоточувствительности ВС и термические свойства решеток свидетельствуют о том, что механизм наведения ПП отличается от случая использования как УФ излучения эксимерных лазеров, так и усиленных фемтосекундных импульсов с длиной волны 0.8 мкм.

Авторы благодарят С.А.Васильева и В.М.Машинского (НЦВО при ИОФРАНе) за весьма полезные обсуждения, А.В.Шаркова (ФИАН) за предоставление кристалла ВВО, а также О.И.Медведкова и И.Г.Королева (НЦВО при ИОФРАНе) за предоставление образцов ВС и насыщение их водородом.

1. Gleser E.N., Mazur E. *Appl.Phys.Letts*, **71**, 882 (1997).
2. Miura K., Qui J., Inouye H., Mitsuyu T., Hirao K. *Appl.Phys.Letts*, **71**, 3329 (1997).
3. Streltsov A.M., Borrelli N.F. *Optics Letts*, **26**, 42 (2001).
4. Davis D.D., Gaylord T.K., Glytys E.N., Kosinski S.G., Mettler S.C., Vengsarkar A.M. *Electron.Letts*, **34**, 302 (1998).
5. Karpov V.I., Grekov M.V., Dianov E.V., Golant K.M., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Khnapko R.R. *Techn.Digest OFC'98* (1998, p.279).
6. In Kag Hwang, Seok Hyun Yun, Byoung Yoon Kim. *Optics Letts*, **24**, 1263 (1999).
7. Von Bibra M.L., Roberts A., Canning J. *Optics Letts*, **26**, 765 (2001).
8. Kondo Y., Nouchi K., Mitsuyu T., Watanabe M., Kasansky P.G., Hirao K. *Optics Letts*, **24**, 646 (1999).
9. Dianov E.M., Vasiliev S.A., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Protopopov V.N. *Proc.ECOC'96* (Oslo, 1996, vol.1, p.1).
10. Veron C.A. *Techn.Digest BGPP'01* (Stresa, 2001, BThC17).