

УДК 621.373.8

А.Г. Кузнецов¹, Д.С. Харенко^{1,2}, А.В. Достовалов¹¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ЧИРПОВАННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ

Техника генерации сильно-чирпованных диссипативных солитонов открывает большие возможности для получения мощных лазерных импульсов с короткой длительностью. В данной работе демонстрируются возможность усиления таких импульсов в тейперном волокне и экспериментальное применение данного источника для формирования поверхностных микроструктур на пленке титана. Также исследуется предельная производительность записи ЛИППС при увеличении частоты повторения импульсов.

Ключевые слова: синхронизация мод, диссипативный солитон, фемтосекундный лазер, тейпер, волокно, иттербиевый усилитель, ЛИППС, микроструктуры.

A.G. Kuznetsov¹, D.S. Kharenko^{1,2}, A.V. Dostovalov¹¹Institute for Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia²Novosibirsk State University SB RAS, Novosibirsk, Russia

AMPLIFICATION OF DISSIPATIVE SOLITONS WITH A TAPER FIBER AMPLIFIER

The regime of highly chirped dissipative solitons is a powerful technique for generating high energy short pulses. In this work a possibility of amplification of such pulses with taper active fiber and the experimental application of this source for the formation of surface microstructures on a titanium film

Keywords: mode locking, dissipative soliton, femtosecond laser, taper fiber, ytterbium amplifier, LIPSS, microstructures

Введение

Лазерное структурирование материалов для изменения или придания новых свойств их поверхности бурно развивается в последнее десятилетие [1]. Так, было показано изменение смачиваемости поверх-

ности [2], структурной окраски [3], увеличение биосовместимости титановых имплантов [4] и др. С практической точки зрения для дальнейшего развития данных технологий требуется разработать метод относительно дешевого структурирования поверхности на сравнительно больших площадях. Процесс образования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) может оказаться эффективным решением данной задачи, поскольку образование периодических структур (с периодом $\Lambda < \lambda$, где λ – длина волны лазерного излучения) происходит в области фокусировки лазерного излучения за счет механизма самоорганизации при существенно большем по сравнению с периодом структур диаметре пучка. Основная гипотеза, объясняющая формирование ЛИППС, основывается на интерференции падающего излучения и излучения, рассеянного от поверхности материала или возбужденного поверхностного плазмона, в результате чего на поверхности материала формируется периодическая модуляция интенсивности излучения, в максимумах которой при превышении определенного порогового значения происходит процесс абляции материала [5]. При этом периодическая структура имеет, как правило, выделенное направление – перпендикулярно направлению поляризации падающего излучения. В [6] было продемонстрировано формирование нового типа ЛИППС – термохимических, которые формируются не за счет абляции, а вследствие окисления металла. В данном случае происходит рост рельефа в высоту, и структуры не загрязняются продуктами абляции, что важно для многих практических применений. Другие особенности данного типа структур состоят в следующем: высокая степень упорядоченности, ориентация параллельно поляризации падающего излучения, зависимость периода структур не только от длины волны излучения, но и от толщины металлической пленки.

Одним из перспективных методов генерации стабильных ультракоротких импульсов для формирования ЛИППС является использование полностью волоконной схемы резонатора на основе короткого одномодового волокна, где происходит нелинейное вращение поляризации, и длинного волокна с сохранением поляризации, в котором формируется диссипативный солитон. Такой подход позволяет генерировать импульсы с большим параметром чирпа и высокой энергией. Энергия импульса в лазерах на основе стандартных волокон ограничена уровнем ~ 20 нДж, при превышении которого формируется шумовой

импульс в другой спектральной области за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [7].

Для увеличения энергии импульса часто применяют усилители, построенные на основе оптических световодов с большой площадью моды (или Large Mode Area – LMA [8] микроструктурированные фотонно-кристаллические волокна (Photonic Crystal Fibers – PCF) [9, 10], либо активные тейперные волокна с плавно меняющимся диаметром сердцевины вдоль их длины [5, 6]. В работе [11] было показано, что при усилении сигнала тейперным усилителем с центральной длиной волны ~ 1040 нм происходит искажение спектра, и дальнейшее сжатие солитона имеет низкую эффективность. С целью оптимизировать длину волны генерации задающего осциллятора авторы в [12] добавили в кольцевой резонатор дополнительно к фильтру Лио тонкопленочный спектральный фильтр, который стабилизировал длину волны генерации на 1055 нм. В этом случае при усилении тейперным усилителем был достигнут относительно высокий коэффициент усиления сигнала, однако из-за изрезанного характера входного спектра выходной сигнал также содержал шум, что увеличивало подложку в АКФ импульса.

В данной работе проводится исследование возможности создания термохимических ЛИППС с помощью волоконного лазерного источника, генерирующего чирпованные солитоны, сжимаемые внешним компрессором на дифракционных решетках. Были изучены особенности формирования высокоупорядоченных оксидных периодических структур на поверхности металлов и полупроводников при различных условиях облучения.

Экспериментальная установка

Схема генератора чирпованных диссипативных солитонов представлена на рис. 1. Лазер выполнен в кольцевой схеме, состоящей из двух функциональных частей: короткого участка из стандартного одномодового волокна, в котором происходит синхронизация мод за счет эффекта нелинейного вращения поляризации, и длинного участка (~ 10 м) волокна с сохранением состояния поляризации (PM – polarization maintaining), в котором формируется диссипативный солитон [7]. PM-участок также включает в себя активное волокно с двойной оболочкой, легированное Yb^{3+} (NufemPM-YB-5/130), объединитель накачки, с помощью которого во внешнюю оболочку активного волокна заводится излучение лазерного диода накачки мощностью около 3 Вт на длине волны 980 нм и поляри-

зующий оптический изолятор для реализации однонаправленного распространения волны сигнала. В качестве спектрального фильтра использовался волоконный фильтр Лию.

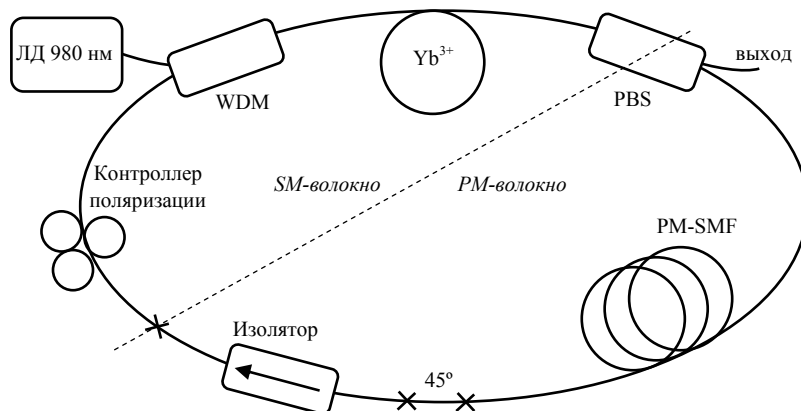


Рис. 1. Схема лазерного источника диссипативных солитонов

Генерируемые импульсы растягивались в отрезке PM-волокна длиной ~ 100 м и направлялись на вход тейпера. Легированное ионами Yb^{3+} тейперное волокно с сохранением поляризации, изготовленное в НЦВО РАН (г. Москва), представляет собой конусообразный световод с двойной оболочкой длиной 2,5 м с диаметром сердцевины 9 мкм на входе и 32 мкм на выходе. Поглощение накачки на длине волны 976 нм в оболочке тейпера составляло ~ 23 дБ/м. Для накачки используется многомодовый лазерный диод мощностью до 60 Вт, излучение которого коллимируется в световедущую оболочку тейпера с его выходного конца. Усиленный полезный сигнал с выхода тейпера направляется дихроичным зеркалом на двухпроходной компрессор с парой дифракционных решеток (1500 штрихов/мм) [13].

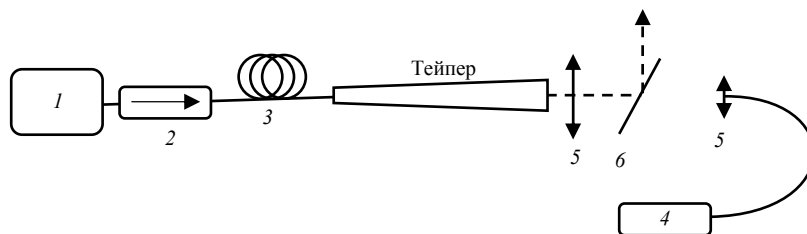


Рис. 2. Схема усиления: 1 – генератор чирпованных импульсов; 2 – изолятор; 3 – стретчер; 4 – многомодовый диод накачки 976 нм мощностью до 60 Вт; 5 – коллиматор; 6 – дихроичное зеркало

Результаты и обсуждение

Задающий генератор, представленный на рис. 1, давал последовательность chirпованных импульсов с оптическим спектром на длине волны 1055 нм длительностью 10 пс и с частотой повторения 14,3 МГц. Средняя мощность задающего лазера составила 20 мВт, что соответствует энергии импульса 1,4 нДж. После волоконного стретчера импульсы растягивались до 130 пс и заводились в усиливающее тейперное волокно. Максимальная выходная мощность полезного сигнала составила 30,2 Вт, что соответствует энергии импульса 2.11 мкДж. Для прореживания импульсов использовался акустооптический модулятор, устанавливающийся непосредственно перед тейперным усилителем. При частоте повторения импульсов 1 МГц максимальная энергия импульса в этом случае составила 16,5 мкДж.

Усиленные импульсы сжимались внешним компрессором на дифракционных решетках. Измеренная длительность сжатого импульса при 13 Вт выходной мощности и частоте повторения 14,3 МГц составила 297 фс (рис. 3) [12].

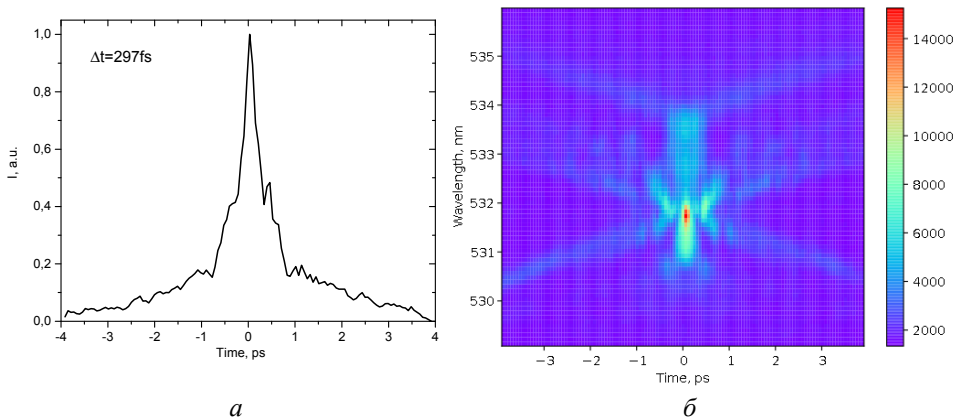


Рис. 3. АКФ (а) и FROG (б) трейсы сжатых после усилителя импульсов

С помощью разработанного волоконного источника ультракоротких импульсов были записаны высокоупорядоченные оксидные периодические структуры на поверхности титана. Излучение лазера фокусировалось с помощью линзы $f = 20$ мм на подложку с нанесенной на нее пленкой титана, направление поляризации излучения задавалось пластинкой $\lambda/2$. С помощью прецизионных микроподвижек осуществля-

лось перемещение образца относительно зондирующего луча с задаваемыми оператором скоростями.

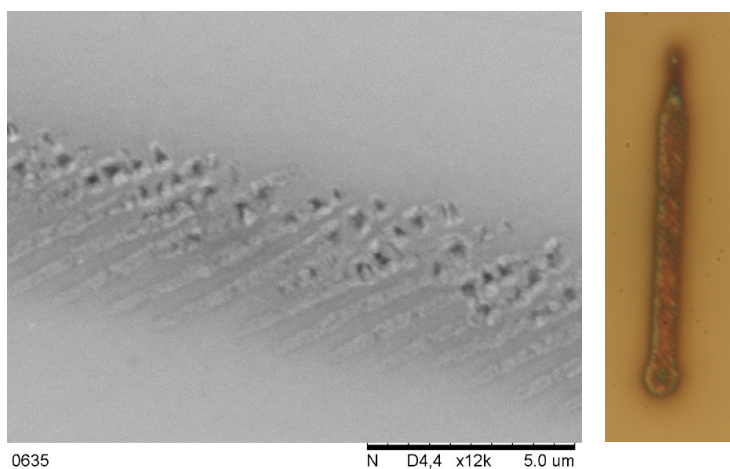


Рис. 4. Изображение СЭМ и с оптического микроскопа ЛИППС при мощности 140 mW (на образце), частоте следования импульсов 2 мГц. Скорость сканирования 1 мкм/с

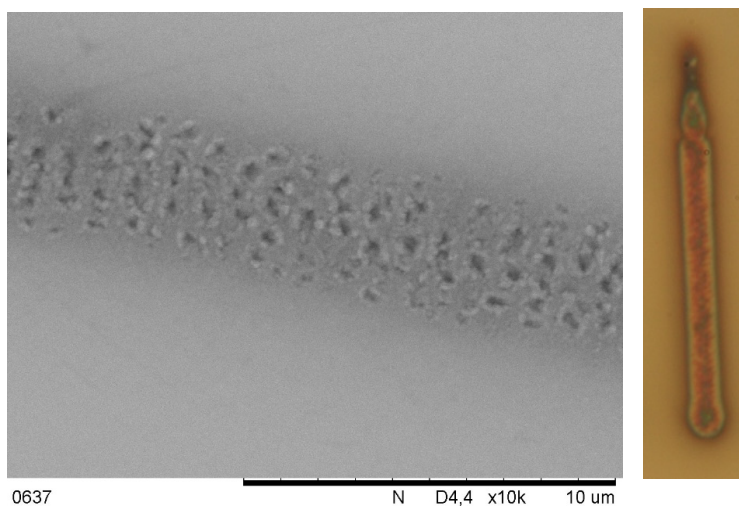


Рис. 5. Изображение СЭМ и с оптического микроскопа ЛИППС при мощности 140 mW (на образце), частоте следования импульсов 2 мГц. Скорость сканирования 1 мкм/с, угол поворота пластики $\lambda/2$ – 12 град

При использовании фемтосекундного волоконного лазера на пленке титана образуются микроструктуры с периодом 822 нм (рис. 4).

ЛИППС имеют неоднородную структуру при несовпадении направления сканирования и направления поляризации. Помимо основной структуры ЛИППС присутствует зона окисления вокруг трека, что, видимо, связано с длинной подложкой в фс импульсе. При повороте пластинки $\lambda/2$ на 12 град наблюдается формирование ЛИППС, при этом структура менее упорядоченная, что может свидетельствовать о выходе из режима записи или не строго линейной поляризации (рис. 5). При большей мощности и частоте следования импульсов происходит избыточное окисление поверхности, и ЛИППС не образуются (рис. 6). Таким образом, существует оптимальное соотношение частоты повторения импульсов и средней мощности, при которой образуются микроструктуры.

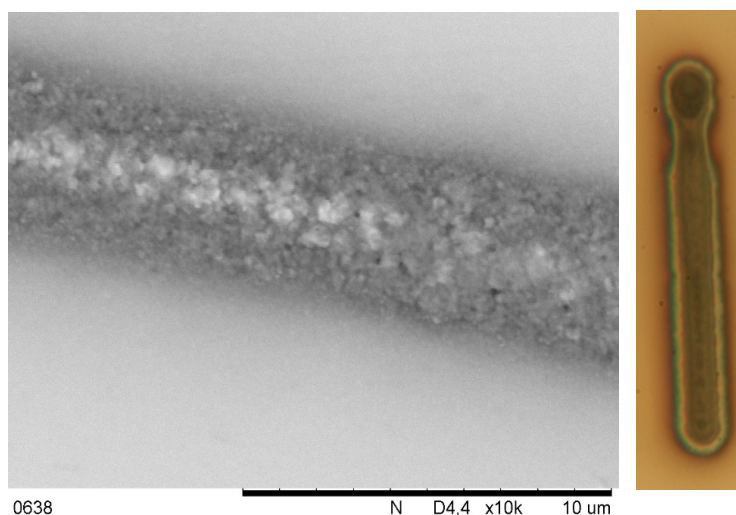


Рис. 6. Изображение СЭМ и с оптического микроскопа ЛИППС при мощности 260 mW (на образце), частоте следования импульсов 5 мГц. Скорость сканирования 1 км/с

Заключение

В работе продемонстрировано формирование ЛИППС с помощью разработанного источника сильно chirпированных диссипативных солитонов с усилителем на основе тейперного волокна. С помощью двухпроходного компрессора с парой дифракционных решеток импульсы были сжаты до ~ 300 фс. При частоте повторения импульсов 2 МГц и средней мощности 140 мВт на пленке титана были сформированы микроструктуры с периодом 822 нм. При увеличении час-

тоты повторения импульсов происходит избыточное окисление, и ЛИППС не формируются.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-32-00459.

Список литературы

1. Vorobyev A.Y., Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications // *Laser Photon. Rev.* – May, 2012. – Vol. 7, no. 3. – P. 385–407.
2. Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment / P. Bizi-Bandoki, S. Benayoun, S. Valette, B. Beaugiraud, E. Audouard // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – Vol. 257, no. 12. – P. 5213–5218.
3. Vorobyev A.Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92, no. 4. – P. 041914–3.
4. Selective Cell Control by Surface Structuring for Orthopedic Applications / E. Fadeeva, S. Schlie, J. Koch, and B.N. Chichkov // *J. Adhes. Sci. Technol.* – Jan. 2010. – Vol. 24, no. 13–14. – P. 2257–2270.
5. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory / J. Sipe, J. Young, J. Preston, H. Van Driel // *Phys. Rev. B.* – 1983. – Vol. 27, no. 2. – P. 1141–1154.
6. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses / B. Öktem [et al.] // *Nat. Photonics.* – 2013.
7. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator / D.S. Kharenko, E.V. Podivilov, A.A. Apolonski, S.A. Babin // *Opt. Lett.* – 2012. – Vol. 37, no. 19. – P. 4104–4106.
8. 1016-nm all fiber picosecond MOPA laser with 50W output / X. Qi, S.-P. Chen, H.-Y. Sun, B.-K. Yang, J. Hou // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24, no. 15. – P. 16874–16883.
9. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power / T. Eidam [et al.] // *Opt. Express.* – 2011. – Vol. 19, no. 1. – P. 255.
10. Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses / M.Y. Koptev [et al.] // *Quantum Electron.* – 2015. – Vol. 45, no. 5.
11. Amplification of dissipative solitons with a taper fiber amplifier / A. Kuznetsov, D. Kharenko, V. Gonta // *Appl. Photonics.* – Sep. 2017. – Vol. 4, no. 3. – P. 229–236.

12. Kuznetsov A.G., Kharenko D.S., Babin S.A. Amplification of dissipative solitons with a polarisation-maintaining tapered fibre amplifier // *Quantum Electron.* – Dec. 2018. – Vol. 48, no. 12. – P. 1105–1108.

13. Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser / D.S. Kharenko, A.E. Bednyakova, E.V. Podivilov, M.P. Fedoruk, A. Apolonski, S.A. Babin // *Opt. Express.* – 2015. – Vol. 23, no. 2. – P. 1857–1862.

References

1. Vorobyev A.Y., Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications. *Laser Photon. Rev.*, May 2012, vol. 7, no. 3, pp. 385-407.

2. Bizi-Bandoki P., Benayoun S., Valette S., Beaugiraud B., Audouard E. Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, no. 12, pp. 5213-5218.

3. Vorobyev A.Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, no. 4, pp. 041914-3.

4. Fadeeva E., Schlie S., Koch J., Chichkov B.N. Selective Cell Control by Surface Structuring for Orthopedic Applications. *J. Adhes. Sci. Technol.*, Jan. 2010, vol. 24, no. 13-14, pp. 2257-2270.

5. Sipe J., Young J., Preston J., Driel Van H. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory. *Phys. Rev. B.*, 1983, vol. 27, no. 2, pp. 1141-1154.

6. Öktem B. et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses. *Nat. Photonics*, 2013.

7. Kharenko D.S., Podivilov E.V., Apolonski A.A., Babin S.A. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator. *Opt. Lett.*, 2012, vol. 37, no. 19, pp. 4104-4106.

8. Qi X., Chen S.-P., Sun H.-Y., Yang B.-K., Hou J. 1016-nm all fiber picosecond MOPA laser with 50W output. *Opt. Express*, 2016, vol. 24, no. 15, pp. 16874-16883.

9. Eidam T. et al. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 1, p. 255.

10. Koptev M.Y. et al. Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses. *Quantum Electron*, 2015, vol. 45, no. 5.

11. Kuznetsov A., Kharenko D., Gonta V. Amplification of dissipative solitons with a taper fiber amplifier. *Appl. Photonics.*, Sep. 2017, vol. 4, no. 3, pp. 229-236.

12. Kuznetsov A.G., Kharenko D.S., Babin S.A. Amplification of dissipative solitons with a polarisation-maintaining tapered fibre amplifier. *Quantum Electron.*, Dec. 2018, vol. 48, no. 12, pp. 1105-1108.

13. Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Apolonski A., Babin S.A. Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 1857-62.

Получено 11 марта 2020