

# СОЗДАНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Е.Д. Образцова, А.И. Чернов, В.И. Конов

Отдел светоиндуцированных поверхностных явлений ЦЕНИ ИОФ РАН

Работа посвящена разработке идеи создания насыщающихся поглотителей на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУН) для волоконных лазеров и реализации этой идеи для формирования ультракоротких (субпикосекундных) импульсов в различных волоконных лазерах для применения в оптических коммуникациях, лазерной хирургии, зондировании атмосферы и т.д.

Полученные результаты опубликованы в 13 статьях и доложены в многочисленных приглашенных и устных докладах на российских и международных конференциях (Laser Optics (St.-Petersburg (2010), Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (Finland,2010), OSA / CLEO/QELS (USA, 2010), European Material Research Society (Strasbourg, 2009), Material Research Society (Boston, 2009), Euroconference on Electronic Properties of Novel Materials (Austria, 2008) и т.д.) .

В течение 2007-2010 гг.

- были подробно исследованы размерно-зависимые оптические свойства ОУН (методами комбинационного рассеяния света, оптического поглощения, фотолюминесценции и нелинейного поглощения)[1,6, 10,11,13];
- выяснены механизмы быстрого и значительного нелинейного отклика ОУН [3];
- разработаны методики выделения и диагностики чисто полупроводниковых фракций ОУН с узким распределением по диаметрам [6,11](вплоть до наличия лишь одной геометрии нанотрубок [13]);
- разработаны методики формирования сред, содержащих ОУН (полимерных матриц и дырчатых волокон), совместимых с волоконными лазерами [1,12];
- был реализован режим самосинхронизации мод в Er [2-4], Tm [5] и Yb [10] волоконных лазерах с насыщающимися поглотителями на основе одностенных углеродных нанотрубок. Минимальная достигнутая длительность выходных импульсов составила 177 фс. Рабочий спектральный диапазон составил 1.0-2.0  $\mu\text{m}$ ;
- было достигнуто уменьшение на 24% временного дрожания импульсов при оптимизации потерь в резонаторе Er волоконного лазера с ОУН насыщающимся поглотителем [7-9].

Характеристики насыщающихся поглотителей нового типа сравнимы и даже превосходят характеристики наиболее популярных в настоящее время нелинейно-оптических элементов типа SESAM (многослойных интерференционных зеркал), работающих только в режиме “на отражение”. Полученные научные результаты являются солидной основой для технологических применений таких элементов, а также для дальнейшего развития этого научного направления: расширения рабочего спектрального диапазона (до 3 мкм), получения оптического усиления и даже генерации в средах с распределенными углеродными нанотрубками.



**Рис.1.** Различные типы насыщающихся поглотителей на основе одностенных углеродных нанотрубок для волоконных лазеров : 1- исходная сажа, содержащая ОУН; 2- водная суспензия оптического качества, содержащая индивидуальные углеродные нанотрубки; 3- полимерная пленка из карбоксиметилцеллюлозы с распределенными в ней ОУН; 4- пленки с ОУН на кварце (полученные по такой же технологии, как на фото 3) с одинаковой толщиной и различной оптической плотностью; 5- лазерное зеркало, покрытое полимерной пленкой с распределенными ОУН; 6- дырчатое волокно с внутренними поверхностями дырок, покрытыми пленкой из ОУН.

## Список публикаций

1. **A.I. Chernov, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach** “Optical properties of polymer films with embedded single-wall nanotubes”, *Physica Status Solidi (b)*, **244 (11) (2007) 4231-4235**.
2. А.В. Таусенев, Е.Д. Образцова, А.С. Лобач, А.И. Чернов, В.И. Конов, А.В. Конященко, П.Г. Крюков, Е.М. Дианов “Самосинхронизация мод в эрбиевых волоконных лазерах с насыщающимися поглотителями в виде полимерных плёнок, содержащих одностенные углеродные нанотрубки, синтезированные методом дугового разряда”, *Квантовая электроника* **37(3) (2007)205-208**.
3. А.В. Таусенев, Е.Д. Образцова, А.С. Лобач, В.И. Конов, П.Г. Крюков, Е.М. Дианов “Эрбиевый волоконный лазер ультракоротких импульсов с использованием насыщающегося поглотителя на основе дуговых одностенных углеродных нанотрубок”, *Квантовая электроника* **37 (9) (2007) 847-852**.
4. **V. Tausenev, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach, A.I. Chernov, V.I. Konov, P.G. Kryukov, A.V. Konyashchenko, E.M. Dianov** “177-fs erbium-doped fiber laser mode-locked with a cellulose polymer film containing single-wall carbon nanotubes”, *Appl. Phys. Lett.* **92 (N18) (2008) 171113**.
5. **Max A. Solodyankin, Elena D. Obraztsova, Anatoly S. Lobach, Alexander I. Chernov, Anton V. Tausenev, Vitaly I. Konov, Evgueni M. Dianov** “1.93 mm mode-locked thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber”, *Optics Letters* **33 (2008) 1336-1338**.
6. A.I. Chernov and E.D. Obraztsova “Metallic single-wall carbon nanotubes separated by density gradient ultracentrifugation”, *Phys. Status Solidi B* **246 (N11-12) (2009) 2477–2481**.
7. **K.Wu, J. H. Wong, P. Shum, D. R. C. S. Lim, V. K. H. Wong, K. E. K. Lee, J. Chen and E. D. Obraztsova** “Timing-jitter reduction of passively mode-locked fiber laser with a carbon nanotube saturable absorber by optimization of cavity loss”, *Optics Letters* **35 (7) (2010) 1085-1087**.
8. C. Ouyang, P. Shum, H. Wang, J.H. Wong, K. Wu, S. Fu, R. Li, E. J. R. Kelleher, A. I. Chernov and E. D. Obraztsova “Observation of timing jitter reduction induced by spectral filtering in a fiber laser mode-locked with a carbon nanotube-based saturable absorber”, *Optics Letters* **35 (2010) 2320-2322**.
9. K. Wu, J. H. Wong, P. Shum, S. Fu, C. Ouyang, H. Wang, E. J. R. Kelleher, A. I. Chernov, E. D. Obraztsova and J. Chen “Nonlinear coupling of relative intensity noise from pump to a fiber ring laser mode-locked with carbon nanotubes”, *Optics Express* **18 (2010)16663–16670**.
10. J. C. Travers, J. Morgenweg, E. D. Obraztsova, A. S. Lobach, A. I. Chernov, E. J. R. Kelleher, S. V. Popov and J. R. Taylor “Characterization of Saturable Absorption of E<sub>11</sub> and E<sub>22</sub> Transitions of Carbon Nanotubes”, *Proceedings of OSA / CLEO/QELS 2010, paper OSA / CLEO/QELS 2010, paper JWA90.pdf*.
11. Alexander I. Chernov, Elena D. Obraztsova “Photoluminescence of single-wall carbon nanotube films”, *Physica Status Solidi B* **247 (2010), DOI 10.1002/pssb.201000192**.

12. **E.D. Obraztsova, A.V. Tausenev, A.I. Chernov** “**Saturable absorbers for solid state lasers in form of holey fibers filled with single-wall carbon nanotubes**”, *Physica Status Solidi B* 247 (2010), DOI 10.1002/pssb.201000365.
13. Maoshuai He, Alexander I. Chernov, Pavel V. Fedotov, Elena D. Obraztsova, Jani Sainio, Emma Rikkinen, Hua Jiang, Zhen Zhu, Ying Tian, Esko I. Kauppinen, Marita Niemela, and A. Outi I. Krause “Predominant (6,5) Single-Walled Carbon Nanotube Growth on a Copper-Promoted Iron Catalyst”, *J. AM. CHEM. SOC.* XXXX (2010), DOI:10.1021/ja106609y.