



УДК 535.5:621.029.7

© 2009

**В. И. Григорук, Ю. А. Слинченко, Л. С. Волковинская,
И. А. Гожик, Ю. Т. Онисько, член-корреспондент НАН Украины
В. М. Огенко**

Ближнее поле сужающихся волоконных световодов и проявление его воздействия на вещество

Розглянуто взаємодію оптичного ближнього поля оптичних волокон, що звужуються до субхвильових розмірів з речовиною. Показана можливість осадження продуктів деструкції речовин на поверхні волокна. Наведено зображення одержаних структур і проаналізовано зв'язок між їх формою, розмірами і структурою поля.

В последнее время интенсивно развивается новая область фотоники, связанная с ближним оптическим полем и его применением в оптической микроскопии нанодиапазона, записи информации повышенной плотности и др. В связи с этим представляет интерес изучение ближнего поля сужающихся до субволновых размеров оптических волокон (ОВ). Поле, которое распространяется в сужающихся ОВ, имеет нелинейный характер. Это связано с малостью эффективного радиуса направляемой моды [1] и с существенным затухающим полем вблизи внешней поверхности волокна. Так, для кремниевых волокон (оболочка — воздух) при изменении диаметра волокна от 0,46 мкм (одномодовый режим на 0,63 мкм) до 0,14 мкм эффективный диаметр моды изменяется от 0,73 мкм до 23,52 мкм, соответственно. Вследствие этого направляемая световая мощность в более тонком волокне уменьшается и большая ее часть распространяется в затухающем поле снаружи волокна.

Большой интерес представляют недавние исследования — воздействия ближнего поля на вещество [2–4], которые демонстрируют возможность осаждения его продуктов деструкции вследствие неадиабатической фотохимической реакции. В работах [2, 3], используя воздействия ближнего поля, создаваемого наноострием (наноиглой) оптического волокна, на вещество, добивались осаждения на подложках либо массивов, либо отдельных “точек” вещества. В работах [5, 6] исследовалось воздействие затухающего поля, существующего вблизи поверхности волоконных игл, на разные вещества. Но, вопреки ожиданию, получались несимметричные, нерегулярные и хаотически расположенные структуры. Исходя из этого, в данной работе мы исследовали воздействие на вещество ближнего поля, существующего на субволновых расстояниях от поверхности сужающихся до поперечных размеров меньше длины волны волоконных световодов (ВС). Были изготовлены специальные воло-

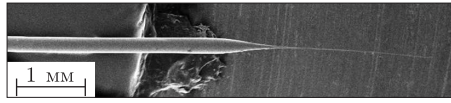


Рис. 1. Внешний вид волоконной иглы

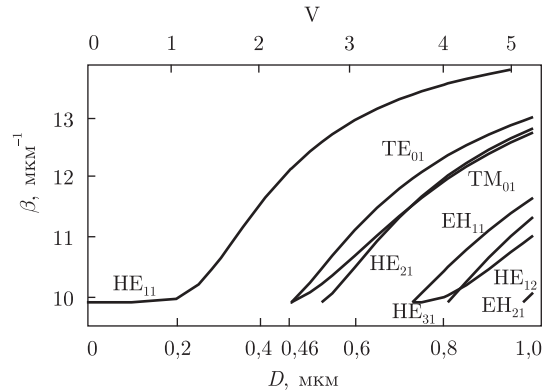


Рис. 2. Значения постоянной распространения мод β кварцевого волокна (оболочка — воздух) для длины волны света 0,63 мкм; при диаметре волокна < 0,46 мкм — одномодовый режим

конные иглы, представленные на рис. 1, рабочие участки которых составляли от 20 мкм до 2 мм.

Они изготавливались из кварц-кварцевых и кварц-полимерных ступенчатых (показатель преломления ВС типа “ступенька”) ВС диаметром 50 и 200 мкм методом нагрева и растяжения.

Как известно [7, 8], ближнее поле — нерадиационное, затухающее на расстояниях порядка длины волны, которое возникает вблизи нанобъектов, в случае НПВО и др. Для анализа структуры поля вблизи поверхности сужающихся волокон были использованы точные решения уравнений Максвелла для ступенчатых ВС [1, 9] и произведены численные вычисления для построения поперечного распределения поля внутри и вблизи поверхности волокна. В характерных работах по коническим, сужающимся до субволновых размеров ВС [10–12] рассматриваются либо строго одномодовый режим, либо слабонаправляющие (разница показателей преломления сердцевина — оболочка ВС не превышает одного процента) ВС. В реальных условиях изготовления сужающихся субволновых волокон достаточно трудно строго обеспечить поперечные размеры, соответствующие одномодовому режиму распространения излучения в ВС [12]. Также вызывает сомнения возможность применения теории слабонаправляющих ВС к волокнам, у которых функцию сердцевинки выполняет кварцевая нить (показатель преломления — 1,45), а оболочки — воздух (показатель преломления — 1). Поэтому в нашей работе мы учитывали реальную толщину (ее изменение по длине волокна) субволнового волокна и, соответственно, поля мод, распространяющихся в нем.

Количество и типы мод, распространяющихся в ВС при его конкретном поперечном сечении (диаметре), можно определить из рис. 2, на котором приведены результаты численного расчета постоянной распространения β моды для кварцевого волокна с воздушной оболочкой в зависимости от диаметра, для длины волны 0,63 мкм.

Распределение интенсивности в поперечном сечении ВС определяется аксиальной составляющей вектора Умова–Пойтинга S_z [9]. Его распределение внутри и вне ВС для основной моды представлено на рис. 3.

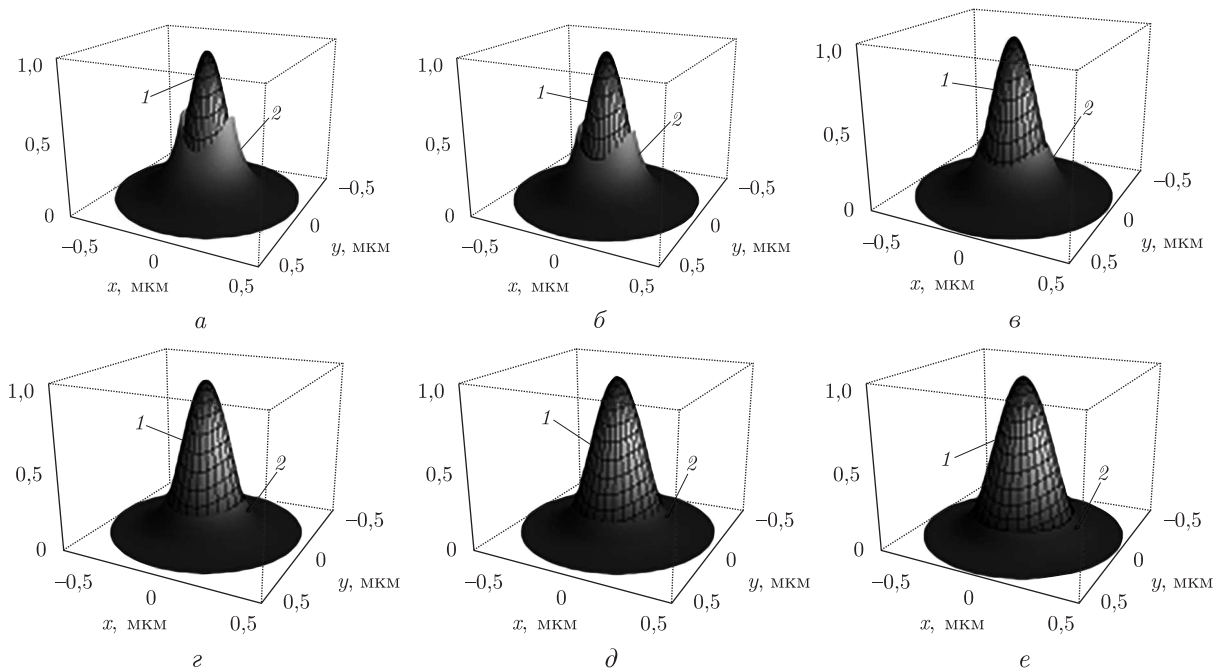


Рис. 3. Пространственное распределение вектора Умова–Пойтинга S_z для основной моды HE_{11} , длины волны — 0,63 мкм. Область 1 — поле в сердцевине, 2 — в оболочке (в воздухе). Диаметр волокна: а — 0,28, б — 0,3, в — 0,35, з — 0,4, д — 0,457, е — 0,5 мкм

Нами был проведен ряд экспериментов по воздействию ближнего поля сужающихся до субволновых размеров волокон на вещество. В качестве исходного вещества был выбран CCl_4 , так как в процессе его разрушения образуются легко разделяющиеся твердая и газообразная компоненты. Важно также, что у образующихся углеродных структур показатель преломления больше, чем у кварца, что должно способствовать дальнейшему проникновению ближнего поля в синтезируемую на поверхности волокна структуру и, таким образом, достраивать саму себя.

Кварцевые иглы помещались в пары CCl_4 . В них вводилось излучение He-Ne лазера мощностью 1 мВт. Время “экспозиции” составляло от единиц до десятков минут. После этого волоконные иглы анализировались с использованием растрового сканирующего микроскопа. Характерные повторяющиеся результаты приведены ниже. Под воздействием ближнего поля происходило осаждение углерода на поверхность наноигол. Первые объяснения подобного эффекта встречаются в работах [2, 3] в рамках модели “экситон — фонон — поляритон”.

На рис. 4, а (в областях 1 и 2) и 4, б видны веретеноподобные утолщения. Спектральный анализ показал высокое содержание (63%) углерода, что свидетельствует об образовании углеродных структур. Было установлено также, что вся волоконная игла покрыта углеродной пленкой, толщина которой уменьшалась с ростом диаметра волокна (судя по концентрации углерода). Наличие пленки можно объяснить действием ближнего поля существующего вблизи поверхности волокна за счет НПВО. Наличие веретеноподобной структуры 2 можно объяснить воздействием затухающего поля мод TE_{01} , TM_{01} , HE_{11} (рис. 2, 3). Структура 1 образуется под воздействием затухающего поля моды HE_{11} (см. рис. 2, 3). Сильно затухающее ближнее поле “осаждает” углерод из паров CCl_4 , при этом образуется трехслой-

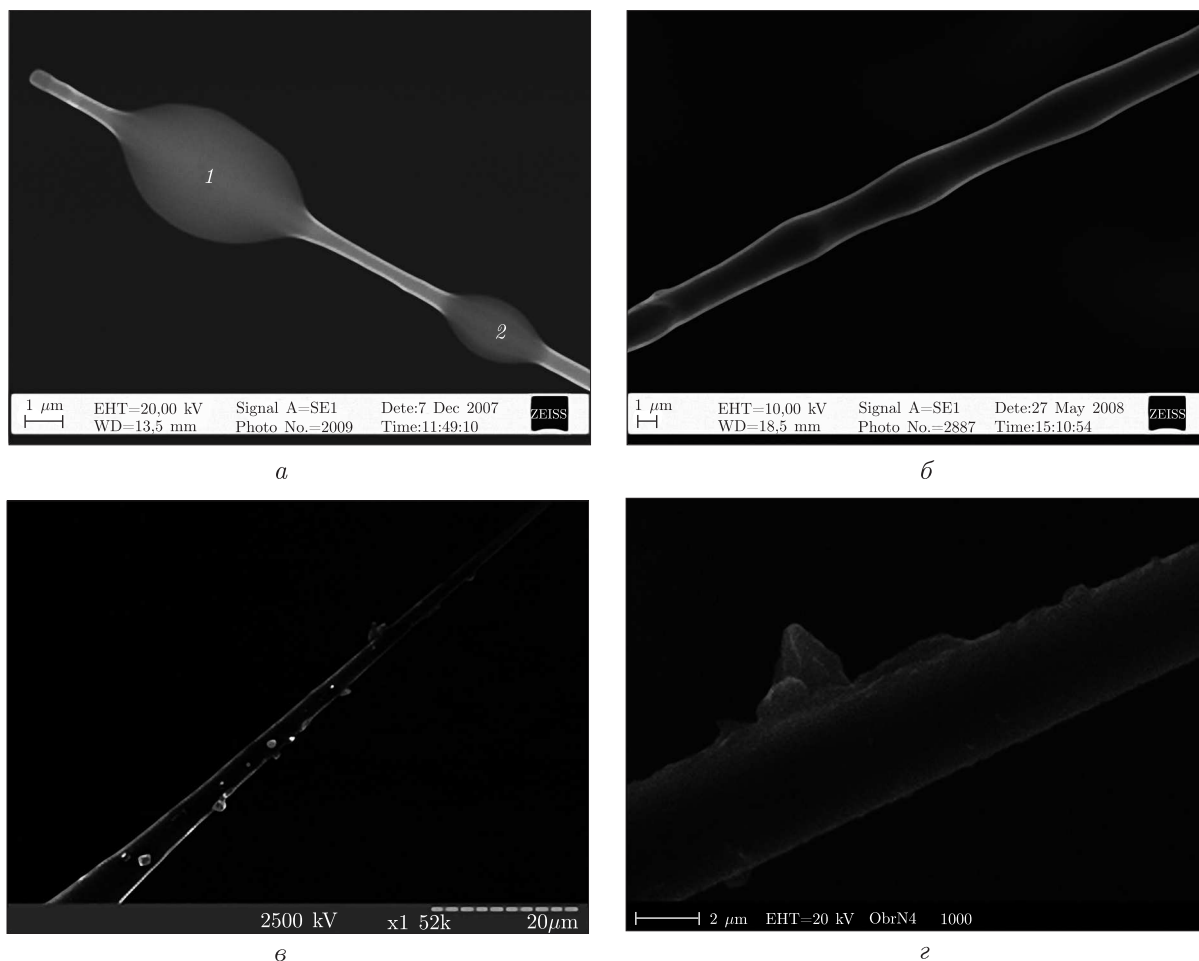


Рис. 4. Образовавшиеся углеродные структуры

ная волноводная структура — кварц — углерод — воздух. С учетом значений показателей преломления слоев видно, что свет частично из кварцевой сердцевины попадает в углеродный слой, т. е. ближнее поле вызывает первоначально образование углеродной структуры, а затем поддерживает этот процесс.

В процессе исследований наблюдалась регулярная повторяемость образования осесимметричных углеродных структур при диаметрах волокон в диапазоне от нескольких микрон и меньше. Их размеры и взаимное расположение определялись временем “экспозиции”, диаметром и формой (степенью сужения) волокон (см. рис. 4, а, б). На рис. 4, в, г приведены нерегулярные, неповторяющиеся структуры. Их появление можно объяснить также воздействием на вещество ближнего поля, возникающего на приповерхностных нанодфектах и нанонеоднородностях волокон.

Структура поля в процессе “осаждения” вещества на сужающихся до субволновых размеров волокнах различных диаметров сказывается на форме и размерах синтезируемых отложений.

Таким образом, метод ближнего поля открывает новые перспективы в создании наноструктур на поверхности (границе раздела) из различных веществ в условиях нерезонансного (неадиабатического) возбуждения. Кроме того, влияние оптического ближнего поля

на вещество следует учитывать при исследовании различных материалов методом ближне-полевой оптической микроскопии, а также при изучении фотокаталитических процессов на нанобъектах.

1. Унгер Г. Г. Теория планарных и волоконных оптических волноводов / Пер. с англ. под ред. В. В. Шевченко. – Москва: Мир, 1980. – 656 с.
2. Yonemitsu H., Kawazoe T., Kobayashi K., Ohtsu M. Nonadiabatic photochemical reaction and application to photolithography // J. Luminescence. – 2007. – **122–123**. – P. 230–233.
3. Kawazoe T., Kobayashi K., Ohtsu M. Near-field optical chemical vapor deposition using $Zn(acac)_2$ with a non-adiabatic photochemical process // Appl. Phys. B. – 2006. – **84**, No 1–2. – P. 247–251(5).
4. Naruse M., Yatsui T., Hori H. et al. Generating small-scale structures from large-scale ones via optical near-field interactions // Opt. Express. – 2007. – **15**. – P. 11790–11797.
5. Волковинська Л., Голдун О., Григорук В. та ін. Синтез вуглецевих наноструктур з використанням властивостей ближнього оптичного поля // Вісн. Київ. нац. ун-ту. – Сер. фіз.-мат. науки. – 2006. – **4**. – С. 285.
6. Volkovynska L. S., Grygoruk V. I., Naboka O. V. et al. Near-field optical chemical vapor deposition using CCl_4 , $CHCl_3$, C_2H_5OH , $OH(CH_2)_2OH$, CH_3COCH_3 , C_6H_6 // Proc. of the Seventh intern. young scientists' conf. on applied physics. – Kyiv, 2007. – 74 p.
7. Жданов Г. С., Либенсон М. Н., Марциновский Г. А. Оптика внутри дифракционного предела // Успехи физ. наук. – 1998. – **168**, № 7. – С. 801–804.
8. Жданов Г. С., Либенсон М. Н., Марциновский Г. А. Ближнеполевая оптика. – Санкт-Петербург: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 98 с.
9. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / Пер. с англ. – Москва: Радиосвязь, 1987. – 656 с.
10. Foster M. A., Turner A. C., Lipson M., Gaeta A. L. Nonlinear optics in photonic nanowires // Opt. Express. – 2008. – **16**. – P. 1300–1320.
11. Tong L., Lou J., Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides // Ibid. – 2004. – **12**. – P. 1025–1035.
12. Bures J., Ghosh R. Power density of the evanescent field in the vicinity of a tapered fiber // J. Opt. Soc. Am. A. – 1999. – **16**. – P. 1992–1996.

Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка

Поступило в редакцію 17.07.2008

**V. I. Grigoruk, Yu. A. Slinchenko, L. S. Volkovinskaya, I. A. Gozhik,
Yu. T. Onis'ko**, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **V. M. Ogenko**

Near-field of tapered fibers and its action on substance

The interaction of an optical near-field of fibers tapering to subwavelength-diameters with substance is discussed. The possibility of the substance destruction and the deposition of resultant products on the fiber surface is shown. As a result, the images of obtained structures are presented, and the relations between the shape and sizes of structures and the field distribution are analyzed.