

О природе лазерных поляритонных треков в мыльных пленках

А.В.Старцев, Ю.Ю.Стойлов

Представлены результаты исследований узких лазерных треков в мыльных пленках с расходимостью меньше дифракционной и предложен механизм образования узких каналов (пространственных поляритонных солитонов) на основе лазерного диэлектрофореза в пленках.

Ключевые слова: лазер, мыльная пленка, поляритон, солитон, диэлектрофорез.

В обычных плоских или изогнутых мыльных пленках толщиной от 10 нм до 10 мкм из любого мыльного раствора [1–4] лазерные лучи видимого и ИК диапазонов ведут себя странным образом: они образуют тонкие (вплоть до субмикронных) ярко светящиеся каналы, идущие по пленке иногда на десятки сантиметров без характерной дифракционной расходимости и видимого уменьшения интенсивности. Эти световые треки (усы) постоянно, десятки раз в секунду, меняют направление, резко изламываются, ветвятся, как стримеры молний, легко пересекаются, и их внешний вид (узость) практически не зависит ни от длины волны лазера, ни от интенсивности его излучения, которая изменялась на девять порядков: в непрерывном режиме – от 10 мВт до 2 Вт, в одиночном импульсе длительностью 10 нс – до 10 кВт. Узость, постоянные ветвления и изменения направлений световых каналов позволяют рассматривать пленку с бегущими усами как реально работающую модель мощного самоуправляемого оптического компьютера, контролирующего состояние пленки и постоянно определяющего время и место очередного ветвления или переключения направлений треков [3].

При оптимальной настройке в пленку входит около 10 % излучения накачки. Время формирования треков, как мы ранее установили [3], составляет менее 10 нс. В зеленом свете ($\lambda = 532$ нм) с длительностью импульсов 10 нс и энергией 0.2 мДж усы на пленке хорошо видны. С точностью до 0.001 нм (опыты проводились с интерферометром Фабри–Перо с базой 3 см) длина волны излучения, выходящего из треков, совпадает с длиной волны возбуждающего лазера. Такие же усы образуются в пленках при их облучении короткими лазерными импульсами (длительность 70 фс, частота 85 МГц) на длинах волн 475 и 950 нм со средней мощностью 1–150 мВт, что свидетельствует о высокой пропускной информационной способности самообразующихся лазерных каналов с такими фемтосекундными световыми «пулями».

А.В.Старцев, Ю.Ю.Стойлов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: stoilov@sci.lebedev.ru, тел.: (8 095) 135 46 49

Поступила в редакцию 9 декабря 2003 г., после доработки – 17 марта 2004 г.

Суммируя полученные результаты, мы попытаемся выяснить механизм образования усов и понять причины странных особенностей их поведения. Напомним эти особенности [1–4]:

1. Усы наблюдаются в жидких и сухих (см. [4, 5]) свободных мыльных пленках толщиной менее 10 мкм (эксперименты проводились с излучением с длиной волны 440–950 нм при мощностях от 10 мВт до 10 кВт).

2. Усы узкие (5–30 мкм), их расходимость меньше дифракционной, они имеют острые концы, мечутся по жидкой пленке, имеют ответвления, разбиваются на новые треки и могут иметь длины пробега в десятки сантиметров.

3. Усы выходят из точки фокусировки излучения накачки по 1–7 штук (иногда более 20) и существуют как отдельные объекты.

4. Показатель преломления для усов в пленке (1–1.28) меньше показателя преломления раствора в объеме и для разных усов на одной пленке может быть разным.

5. Усы пересекаются без видимого взаимодействия.

6. При выходе из пленки в воздух или раствор усы демонстрируют нормальную расходимость.

7. В пленке усы меняют направление у крупных пылинок; мелкие пылинки, пересекающие их потоки, влияния на усы не оказывают, визуальную их ширину практически не зависит от мощности лазера, длины волны, вида мыла, температуры, толщины пленки.

8. Длина волны излучения, выходящего из усов, с точностью до 0.001 нм совпадает с длиной волны излучения возбуждающего лазера.

9. Усы как отдельные лучики легко (без видимой задержки) перемещаются по пленке вместе с лазерным лучом и меняют свое направление при изменении его направления; время их образования не превышает 10 нс.

Для объяснения поведения усов предлагалось множество гипотез. Самофокусировка выглядит не убедительной, поскольку характерное сужение усов наблюдается при весьма малых мощностях излучения и не зависит от его интенсивности, которую мы меняли на 9 порядков. Объяснение при помощи фотонных кристаллов, получающихся из окружающих ус динамических акустических образований (оболочек гиперзвука), не подходит из-за быстрого затухания гиперзвука на таких частотах.

Существенная перестройка молекул или самой пленки в области локализации усов должна была бы приводить к взаимодействию усов при их пересечении, взаимовлиянию треков друг на друга, однако этого не происходит. Тепловое воздействие даже при добавке поглотителей не проявляется и не меняет вида усов. Гипотеза о существовании новых законов углового и пространственного квантования света в тонких пленках также отвергается, поскольку поведение усов часто не зависит от толщины пленки, они идут по пленке, имеющей множество участков разного цвета, не меняя направления [4]. Для привлечения гипотезы солитонов обычно требуются большие интенсивности и нелинейности, которые нами не замечены. В пленке отсутствуют длинные неоднородные волноводные нити, по которым мог бы идти свет. Можно перечислять и другие предлагавшиеся гипотезы, но во всех рассматриваемых механизмах непонятными выглядят световые потоки малой интенсивности и линейные свойства среды при нелинейном преобразовании света в тонкие усы с острыми концами.

Поведение света в тонких пленках теоретически рассмотрено, например, в [6]; там же проведен анализ всех возможных в пленках типов колебаний, однако склонность света к образованию в них узких стримеров в работе [6] не отмечена. В то же время разные показатели преломления набора усов, выходящих из одной зоны фокусировки, хорошо объясняются разной модовой структурой лазерного излучения в этих усгах [4].

Оптические искажения в пленке, изменяющие направление светового потока, изменяют и направление трека, поэтому вполне реальным является применение пленок с треками в качестве чувствительных датчиков, а использование электрооптических сред и обычных оптических устройств с внешним управлением (или преобразованием мод) открывает возможность быстрого изменения направления узких усов и создания адресно управляемых невзаимодействующих волноводов. Предстоит разработать теорию поведения световых усов-антенн [4] в тонких пленках, определить наиболее эффективные среды, условия их возбуждения и вывода излучения из таких устройств и приборов. Тонкие пленки могут быть также усиливающими лазерными средами [2, 3], и в связи с этим представляет интерес оценка параметров излучения длинного линейного уса-лазера шириной, например, только в одну молекулу и лазерного замкнутого кольца из такой линии. Антенно-трековое формирование узких пучков [4] представляет интерес и для колебательных явлений другой физической природы.

Объяснение поведения усов с помощью известных свойств света в тонких пленках [6] и СВЧ антенн [7–9] дает ряд ответов на поставленные в работе [2] вопросы, определяет направления дальнейших практических и теоретических исследований различных управляемых оптических антенно-волноводных устройств [7, 9] с селективным возбуждением мод и их использования в разных приборах вплоть до оптических компьютеров.

Сформированный узкий канал может работать как световая антенна последовательного питания [7–9], но как он возникает в однородной среде? Электромагнитное излучение, идущее по каналу, имеет по крайней мере четыре причины для расширения:

- Световой канал шириной 5–30 мкм [4] должен иметь дифракционную расходимость.
- В мутной среде мыльного раствора должно осуще-

ствляться рассеяние света.

- На неровностях поверхности пленки, покрытой капиллярными волнами и (наряду с рассеянием в растворе) делающих треки яркими, заметными при наблюдении сбоку, должно происходить рассеяние энергии.

- Свет от точки фокуса в однородной пленке должен расходиться, поскольку возбуждающий лазерный луч имеет апертурный конус угла фокусировки около 0.02.

Каждой из этих причин достаточно для расширения лазерного трека длиной 30 см по крайней мере до долей сантиметра, но при наличии одновременно всех четырех факторов у трека, возникшего от сфокусированного под скользящим углом на поверхность пленки непрерывного полупроводникового лазера-указки (длина волны ~ 650 нм, мощность 5 мВт) и идущего по вогнутой, провисающей ниже горизонтальной плоскости жидкой пленке по сложной многовитковой траектории с общей длиной более 30 см (см. рис.1), такой расходимости нет. В однородной двумерной среде пленки просто не может существовать узкая волноводная мода трека, которая не проявляется явной диэлектрической структурой.

Такое поведение нерасходящихся лазерных треков определенно связано с заметными *нелинейными* свойствами пленочной среды, которые особенно четко проявляются еще в двух особенностях.

1. Образование усов при освещении пленки под скользящим углом к поверхности (согласно классическому представлению излучение, вошедшее в пленку под скользящим углом, должно после нескольких отражений быстро из нее выйти без образования длинных, испытывающих практически полное внутреннее отражение треков).

2. Вхождение луча и движение его в толстой нижней части в форме круга провисающей пленки, ограниченной кольцом из черной пленки, по хордам с полным внутренним отражением (среда впускает, но не выпускает свет) [4].

Наличие тонких световодных каналов однозначно указывает на локальное увеличение в треках пленки показателя преломления среды n_1 под действием лазерного излучения с малой интенсивностью. Величину этого прироста n_1 можно оценить по значению скользящего угла, под которым луч входит в пленку (около 5°). Затем за счет увеличения показателя преломления с n_1 до n_2 луч захватывается пленкой и дальше идет на десятки санти-

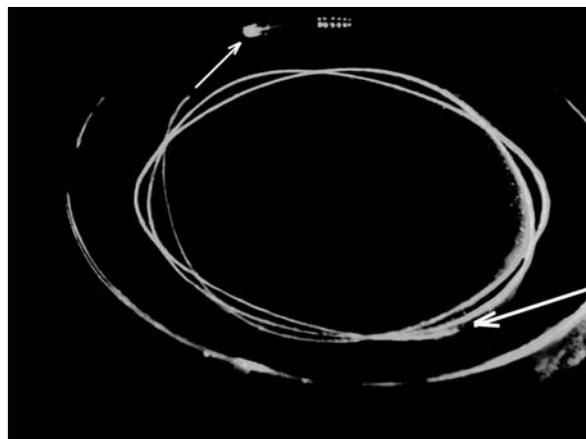


Рис.1. Трехвитковый трек длиной 35 см на вогнутой жидкой пленке диаметром 65 мм. Точка фокусировки непрерывного лазерного луча (5 мВт) на поверхность пленки и выход света из пленки показаны стрелками.

метров, испытывая полное внутреннее отражение. Оценки показывают, что $(n_2 - n_1)/n_1 \leq 1\%$.

При ширине трека 30 мкм и разности показателей преломления 1% (см. [6], формула (11.2.14)) получаем, что в таком самообразующемся волноводном канале (даже в тонкой пленке толщиной 150 нм) может распространяться около 7 мод. Из-за малого отношения $(n_2 - n_1)/n_1$ и разных питающих мод каналы легко пересекаются и не влияют друг на друга. Их взаимодействия можно ожидать только при углах пересечения менее 1° .

Динамика прорастания (увеличения длины) канала в виде волноводной световой антенны от точки фокуса в пленке при включении лазерного луча связана с быстрым преобразованием (стимулированным увеличением) показателя преломления среды у крайней точки его роста (вершина), до которой по уже сформировавшемуся отрезку канала доходит преобразующий среду лазерный свет. При выключении света канал исчезает. Свет преобразует среду, среда собирает свет. Известно много вариантов такого взаимовлияния [10, 11]. По нашим оценкам, особенность механизма преобразования среды пленки слабым светом состоит в том, что это преобразование связано не с интенсивностью лазерного поля, которая при слабых используемых потоках весьма мала (30–1000 В/см), а с резкими градиентами поля в пленке и с диэлектрофорезом молекул в растворе.

Диэлектрофорез (движение частиц в электрическом поле) возникает тогда, когда в постоянном или переменном электрическом поле имеется неоднородность, градиент. Само это явление известно уже более 2500 лет [12] и наглядно проявляется в притяжении кусочков бумаги к наэлектризованной палочке. Неоднородность электрического поля создает силу, действующую на любые поляризуемые объекты – заряженные и незаряженные. С учетом воздействия неоднородного поля на разные концы частицы и на среду, в которой она находится, частицы с более высокой поляризуемостью, чем у среды, втягиваются в область сильного поля (положительный диэлектрофорез), а при меньшей – выталкиваются в область более слабого поля (отрицательный диэлектрофорез). Сила воздействия определяется градиентом квадратично усредненного по времени поля и от его направления не зависит.

Градиенты, требуемые для ориентации и перемещения молекул и частиц раствора вследствие диэлектрофореза [12–15], в нашем случае создает лазерное излучение, введенное в пленку вблизи «частокола», который состоит из острых концов плотно упакованных молекул мыла двух мономолекулярных поверхностных слоев пленки [16]. Поворот, уплотнение, образование цепочек [15], сбор молекул в треках (и увеличение за счет этого показателя преломления) могут быть использованы не только для решения задач волноводной техники, но и для селективного воздействия с целью разделения разных сортов нанометровых частиц и молекул в жидких пленках для нужд нанотехнологий [16]. Отмеченное из-

менение показателя преломления позволит сделать вывод о природе лазерных каналов. Поверхностные световые волны, идущие по плоским или изогнутым пленкам узкими нерасходящимися треками на десятки сантиметров, связаны с перестройкой, которая обусловлена стимулированным изменением поляризационных свойств среды, поэтому по своей природе они представляют собой особую совокупность электромагнитной и поляризационной энергии, т. е. особый вид поверхностных поляритонных солитонов, описанных в [1] без детализирования механизма их образования.

Наблюдаемые лазерные треки несут богатую информацию о структуре и составе самих пленок и потому могут быть использованы для их изучения. Исследования треков, их лазерные свойства в давно и детально изучаемых трансформирующихся мыльных пленках разной толщины [17] представляют большой интерес для физики, химии и биологии.

Недостаточно быстрое развитие наших исследований объясняется в [2–4]. По указанным в этих работах причинам наши усилия пока не принесли должных результатов, но мы надеемся, что когда-нибудь эти наблюдения будут полезны. «Народная тропа» не зарастет, а наш задел будет только увеличиваться. Благодарим друзей за поддержку, за обсуждения, за образцы растворов для сухих пленок, а Л.Д.Михеева и В.В.Миславского – за возможность поработать с фемтосекундным лазером.

1. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Заявка на патент 20022132754 от 5 декабря 2002 г.
2. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН № 2* (М., 2003); <http://ellphi.lebedev.ru/2/Stoilov.pdf>
3. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Квантовая электроника*, **33**, 380 (2003).
4. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН № 22* (М., 2003); <http://ellphi.lebedev.ru/4/Stoilov1.pdf>
5. SOAP BUBBLES. <http://pubs.acs.org/cen/whatstuff/stuff/8117sci3.html>
6. Ярив А., Юх П. *Оптические волны в кристаллах* (М.: Мир, 1987).
7. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. *Антенны* (М.: Энергия, 1975).
8. Будагян И.Ф. <http://bsfp.media-security.ru/school6/29.htm>
9. Калашников А.М., Степук Я.В. *Колебательные системы* (М.: Военное издательство Мин. обороны СССР, 1972).
10. Chiao R.Y., Garmine. E., Townes C.H. *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 479 (1964).
11. Poladian L., Senthilvelan M., Besley J.A., de Sterke M.C. *Phys. Review E*, **69**, 016608 (2004).
12. Burke P.J. <http://nano.ece.uci.edu/papers/NanoDEPproof.pdf>
13. Zheng L., Li S., Burke P.J., Brody J. P. <http://nano.ece.uci.edu/papers/singlemolecule.pdf>
14. Pethig R., Markx G.H. United States Patent 5,814,200; <http://164.195.100.11/metahtml/srchnum.html>
15. Hermanson K. D., Lumsdon S. O., Williams J. P., Kaler E. W., Velev O. *Science*, **294**, 1082 (2001); http://crystal.che.ncsu.edu/pdfs/Science_microwires.pdf; <http://www.kalergroup.che.udel.edu/index.htm>
16. Стойлов Ю.Ю. Заявка на патент № 2004104449 от 17 февраля 2004 г.
17. Stubenrauch C., von Klitzing R. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, R1197-R1232 (2003).