Излучение лазерных треков в тонких пленках и потребность теоретического описания.

Стойлов Ю.Ю.

Рассмотрены особенности выходного излучения лазерных треков в тонких пленках, создаваемых зеленым светом лазерной указки (532 нм, 10 мВт). Для понимания наблюдаемых особенностей необходимо теоретическое описание экспериментов с разработкой волновой модели формирования и поведения треков.

В продолжение наших работ /1-12/ проводилось изучение треков, получаемых в медовой пленке диаметром 10 см со временем жизни несколько суток и толщиной (сверху донизу) от 0.5 до 5 мкм. Треки в пленке получались под действием зеленого света лазера-указки (532 нм, 10 мВт). Лазерный свет фокусировался линзой с F = 5 см в боковое ребро пленки, а выходное излучение трека наблюдалось на экране.

Контролировать излучение внутри лазерного трека в тонкой пленке затруднительно, поскольку нельзя ввести в жидкую пленку измерительные датчики, не нарушая ее структуры. Но о некоторых свойствах света в треке можно судить по выходному излучению с учетом того, что при прохождении через расширяющееся граничное ребро пленки угловая диаграмма излучения искажается.

Картина движения и смены бегающих полосок на экране связана с изменениями положения треков в пленке, динамика которых ускоряется при увеличении интенсивности излучения накачки. Схема опытов показана на Рис.1а, где 1- кювета диаметром 10 см со стеклянны дном, в которой на расстоянии 1 см от дна находится параллельная дну вертикальная медовая пленка, в ребро которой через боковую стенку кюветы фокусируется излучение лазера. В пленке рождается трек (2) шириной 20-30 мкм, который без расширения проходит по пленке, и его излучение затем фиксируется на прозрачном матовом экране (3), расположенном на расстоянии 6 см от кюветы. На Рис.1 это излучение видно с тыльной стороны прозрачного экрана. Поляризация излучения в этих полосках обычно имеет направление по пленке.

Вид полосок показан на Рис.1б. Каждый трек дает на экране свою узкую полоску с характерной большой угловой расходимостью перпендикулярно пленки и малой по пленке. (См. приложенный кинофильм). Расходимости зависят от толщины пленки и меняются со временем.

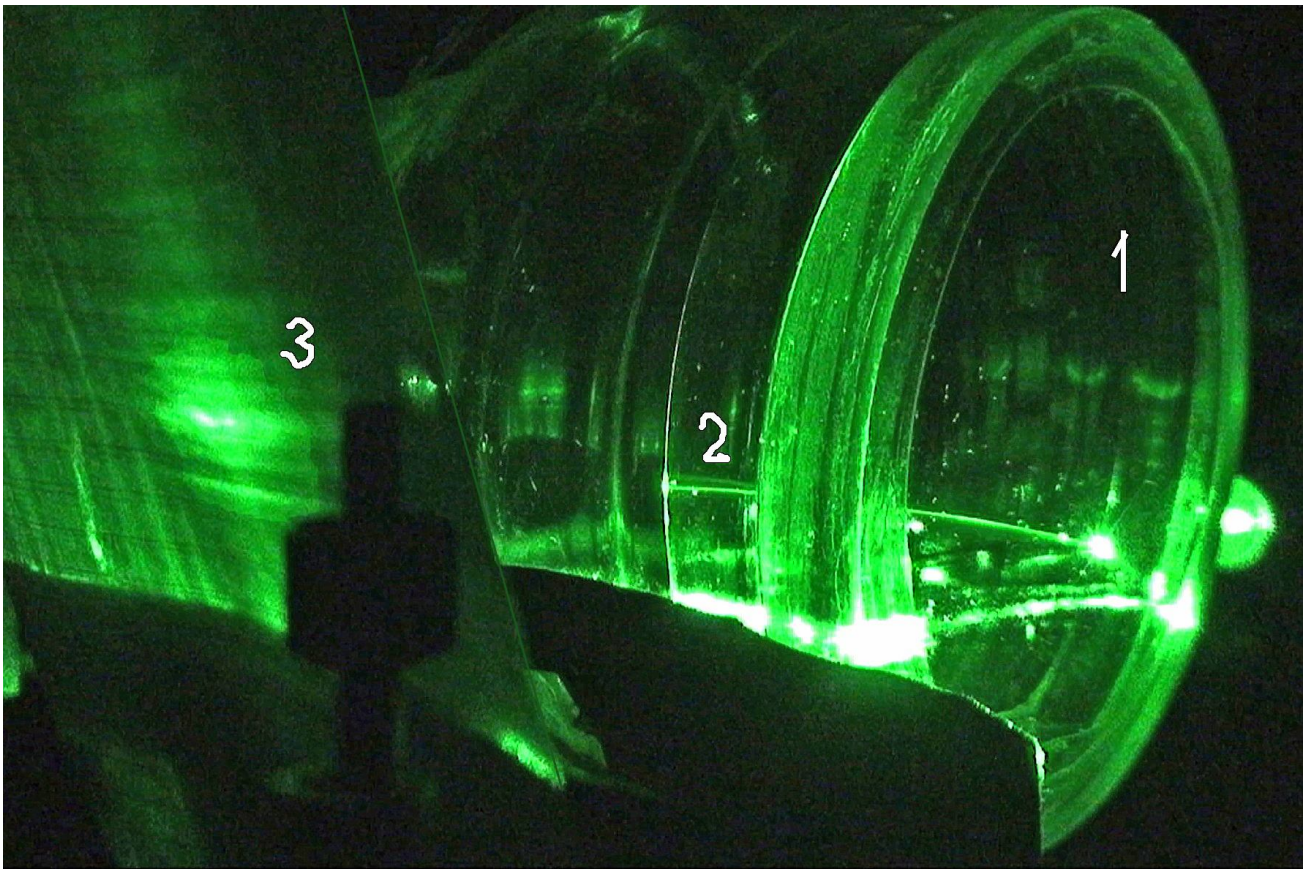

Рис.1а. Схема опытов с лазерными треками в пленке (пояснения в тексте).

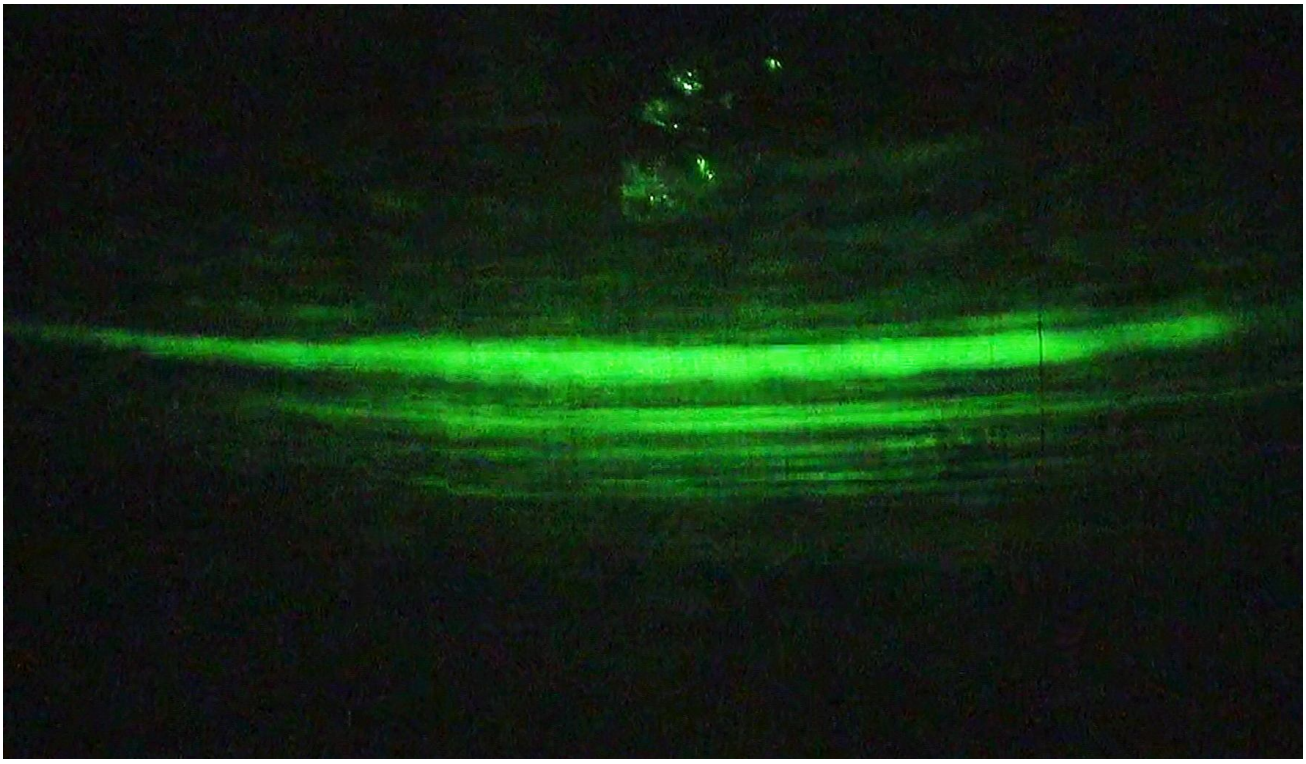

Рис.1б. Характерный вид полосок излучения треков на экране.

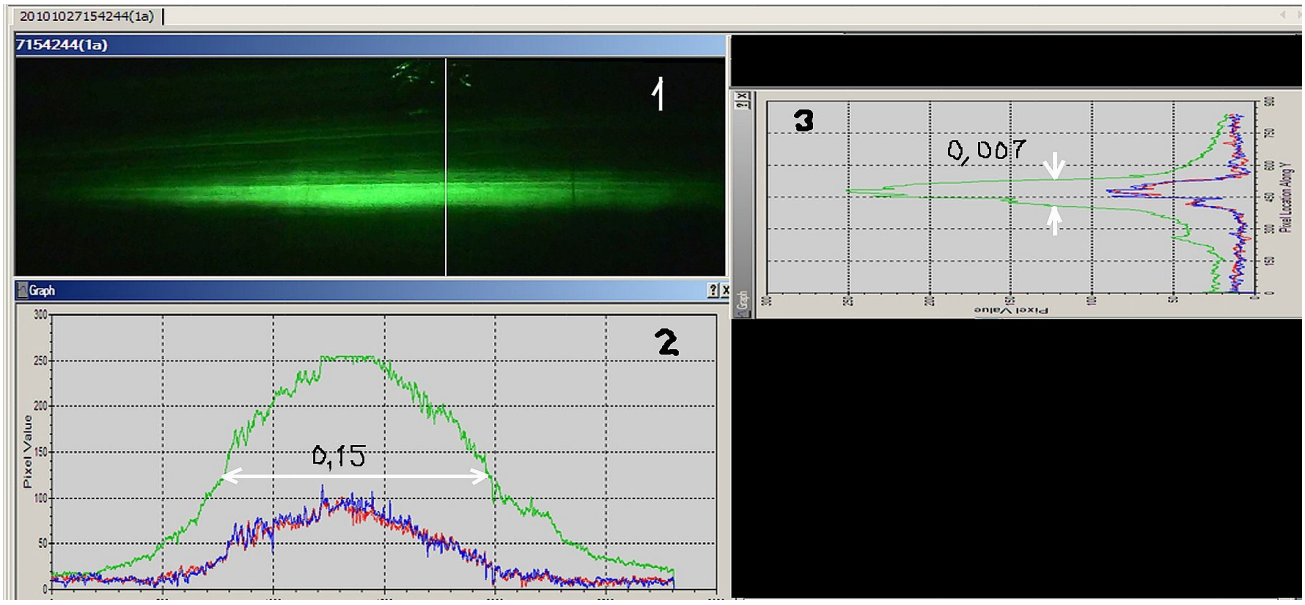

Рис.2. Распределением интенсивности в трековой полоске.

Типичное распределением интенсивности в полоске показано на Рис.2 , где 1 - след одного трека на экране, 2 – распределение интенсивности по треку в угле около 0.15 рад, 3 – распределение поперек трека в угле около 0.007 рад. Такое распределение показывает, что в самом треке излучение идет под большими углами к пленке и под малыми по пленке.

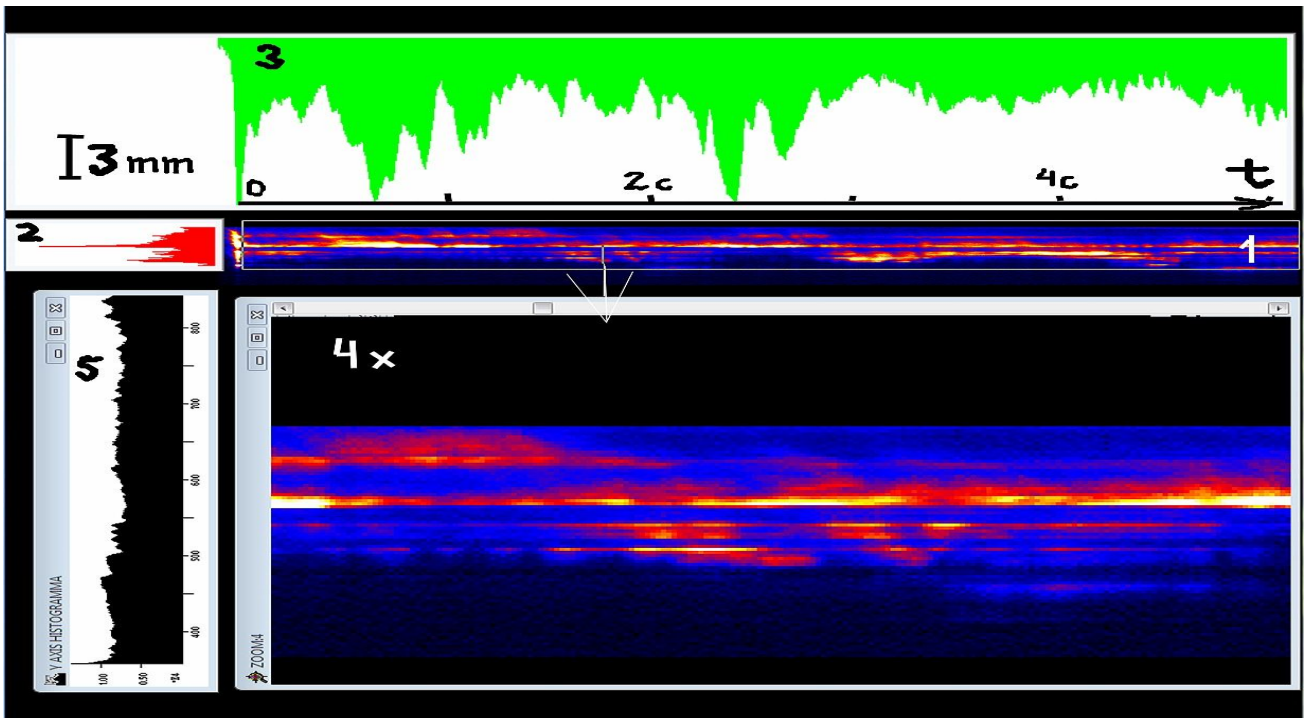

Рис.3. Щелевая развертка во времени перемещения изучающих точек трека на ребре пленки.

Если проследить за перемещением выходной изучающей точки трека на ребре пленки (Рис.3), то можно отметить, что при непрерывном излучении и повышенной мощности лазера, когда наблюдается перемещение окончания трека на выходном ребре пленки, оно не происходит плавно, и имеет вид гребенки из неподвижных точек, с характерным переключением интенсивности из одной «разрешенной» излучающей точки в другую с заметным интервалом между ними. На Рис.3 представлена щелевая развертка участка ребра пленки (1) шириной 3 мм в течение 5 сек с меняющими на нем свою интенсивность излучающими точками трека, 2 – распределение интенсивности по ребру в отмеченный стрелкой момент времени, 3 – зависимость интенсивности излучения от времени в центральной точке участка, 4 – увеличенный в 4 раза участок развертки вблизи стрелки, 5 – суммарная зависимость от времени общей интенсивности со всех точек участка. Видно, суммарная интенсивность (5) мало меняется со временем, в тоже время интенсивность в одной точке (3) имеет большие перепады. На вставке (4) заметен типичный гребенчатый вид переключений интенсивности трека, и причина такого неплавного переключения по точкам не ясна.

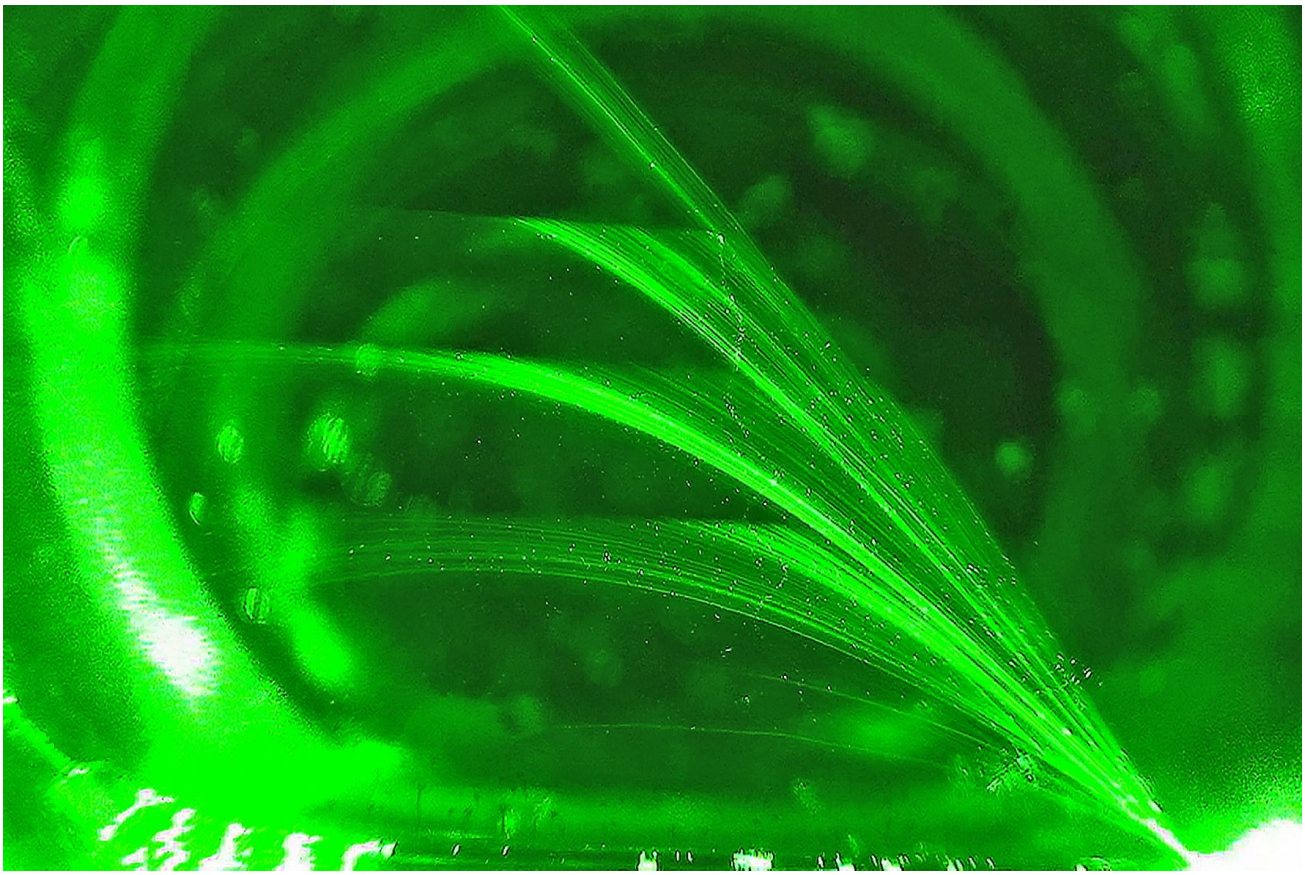

Рис.4. Типичный вид треков, не доходящих до ребра пленки.

Некоторые треки не доходят до ребра пленки (Рис.4). Эти треки идут веером и из-за особенностей идущего по ним излучения оканчиваются в средине пленки.

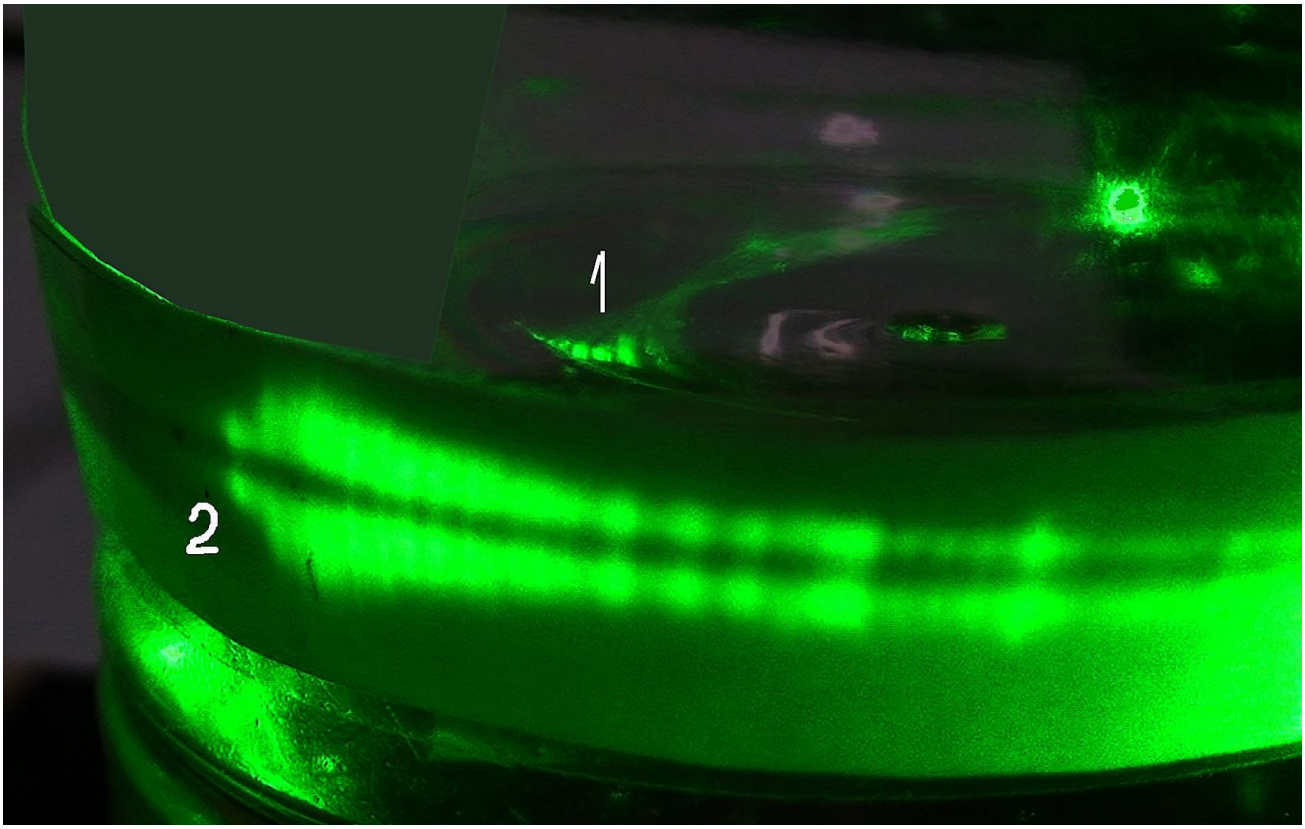

Рис.5. Вид выходного излучения из таких треков.

Вид их выходного излучения показан на Рис. 5, где 1 – треки, не доходящие до ребра пленки, 2 – их излучение на экране на расстоянии 4 см. Видно, что излучение выходит с двух сторон от затемненного ребра пленки. По высоте полосок (максимальная высота – 0.5 см) можно отметить, что угловая расходимость излучения этих треков, возбуждаемых, как мы понимаем, разыми модами, заметно отличается. Причем высота полоски не связана с интенсивностью трека, поскольку некоторые треки с малой величиной полоски тоже имеют большую интенсивность. Здесь тоже хотелось бы понять причину окончание треков в средине пленки и величину угловой расходимости их выходного излучения.

Для понимания наблюдаемых особенностей необходимо теоретическое описание экспериментов, и накопленные данные по лазерным трекам в тонких пленках /1-12/ позволяют приступить к разработке теоретической модели

описания их свойств, но здесь требуется помощь теоретиков, с которыми нам пока не удается установить контакт.

Гипотеза формирования треков за счет увеличения в них показателя преломления, как мы убедились, не проходит, поскольку таких треков нет в объемных жидких средах, в твердых пленках, нет каких-либо особенностей или отличий их образования в пленках из разных жидких материалов и разной толщины, при разных температурах, с разными длинами волн во всем оптическом диапазона и с разной шириной спектра накачки, в непрерывном режиме и с импульсами нано- и фемто-секундной длительности, весьма слаба зависимость вида треков от величины интенсивности излучения накачки, крайне мал порогах их появления, и нет влияния на них больших электрических полей, что нетипично для известных механизмов увеличения показателя преломления сред оптическим излучением.

В тоже время предложенная нами и неизвестная ранее модель формирования треков за счет светового давления позволяет качественно объяснить экспериментальные результаты, а при детальной проработке получить и количественное толкование их особенностей. Но сложность теоретического описания треков связана с необходимостью учета самоформирования светового потока через вызываемое им изменение фокусирующих свойств зеркальных поверхностей пленки, которые формируют трек и определяют пространственное распределение света в нем. Такое непрерывное самовоздействие света на свою пространственную структуру требует разработки программ для динамичной трехмерной волновой задачи с постоянно изменяющимися граничными условиями, которая в силу сложности объединения свето- и гидро-динамики пока не вызывает энтузиазма у специалистов-теоретиков. В процессе образования треков по мере фокусировке излучения в их формировании могут принимать участие и градиентные силы диэлектрофореза, затягивающие диэлектрические среды в область повышенного излучения, как происходит в лазерных пинцетах.

Сложность процесса формирования треков с мягкими меняющимися зеркалами, видимо, аналогична трудностям математического описания музыкальных свойств скрипки, резонансные отклики которой меняются в зависимости от интенсивности и тона предыдущего звука в ней.

Похожая задача с изменяемыми отражающими поверхностями решается физиками, рассматривающими возможность регистрации гравитационных волн по деформации лазерных резонаторов, в проблеме компенсации атмосферных

искажений зеркалами телескопов, но без прямого влияния самого света на форму зеркал резонатора /13-17/. В работах, изучающих воздействие мощного лазерного света на форму жидкие поверхности /18, 19/, такое прямое воздействие света проявляется, но резонаторные свойства деформируемых поверхностей в них не рассматриваются.

Физика формирования оптических треков в пленках включает деформацию и резонаторные свойства поверхностей и весьма богата, поскольку открывает новые интересные возможности нестабильных лазерных резонаторов с мягкими зеркалами, особенности передачи по трекам информации и энергии, объединяет в себе необычное, характерное для космоса световое давление, нанофотонику при формировании поверхностей зеркал, и имеет отношения к истории измерения светового давления в ФИАН, к его лазерному настоящему и фотонике будущего.

Можно еще раз обратить внимание на необычные свойства треков, на ряд вопросов, которые могли бы найти объяснения в рамках теоретического описания их свойств и формирования с помощью света. Численное моделирование позволило бы дать ответы на следующие вопросы:

1. Время образования треков при введении светового потоке в пленки разного состава? Задержка в формировании канала связана с гидродинамикой сбора жидкости в области трека /10/ и требует уточнения степени влияния вязкости, температуры, толщины пленки и интенсивности света на его образование.

2. Величина пороговой интенсивности накачки и резонансного увеличения интенсивности светового поля в пленке? Как показывают эксперименты /10/, из-за резонансного накопления излучения в них треки выглядят обычно существенно ярче луча накачки в растворе, и они наблюдаются при очень малых интенсивностях возбуждения.

3. Время затухания, рассасывания канала при выключении накачки? Особенности формирования треков с одним нано-секундным импульсом и с цугом фемтосекундных импульсов /5/.

4. Почему моды светового излучения обычно не идут вместе по одному треку, а формируют свои каналы и расходятся веером (Рис.4 /10/)? Чем отличаются треки разных мод? Чем определяется окончание треков в средине пленки и вид их выходного излучение? При каких условиях в пленке все-таки удается получать один канал /10/?

5. Какова степень взаимовлияние треков при их пересечении? Постоянное движение световых каналов в устоявшейся пленке (например, в фильме

«Симфония оптических треков» /9/), видимо, как-то связано с их взаимодействием?

6. Есть ли между соседними треками притяжение и отталкивание оптических каналов, отмеченное в волноводах /20/ при расстояниях между ними до 0.1 мкм и связанное с взаимодействием их затухающих приграничных полей?

7. Влияние ширины полосы спектра накачки? Треки наблюдались в пленке и при широкополосной люминесцентной накачке /6/. Каковы отличия в их образовании?

8. Формируются ли треки при немонохроматической накачке? Отмечено разбиение белого света в пленке на цветные полоски /8/. Мог ли Ньютон, используя излучение солнца, наблюдать треки в мыльных пленках?

9. Каковы особенности формирования треков при импульсной и импульсно-периодической накачке с меняющейся во времени амплитудой? Эта тема уже частично затрагивалась в вопросе 3, но особенности динамики при передаче информации требуют более детального прояснения.

10. Устойчивость каналов к нагреву среды, наличию на поверхностях капиллярных волн, окружающего света и механических колебаний пленки /10/? Почему скорость изменения трека заметно увеличивается при увеличении мощности накачки?

11. Как наблюдаемые изменения треков сделать регулируемыми и управляемыми? Возможные способы контроля, локального разветвления и поворотов треков? Чем определяется «гребенчатая» структура выходных излучающих точек трека?

12. Оценка возможного объема передаваемой по треку информации и энергии? Как передаваемая по треку информация искажается из-за вызываемой ею деформации поверхности трека? Поскольку дополнительная модуляция накачки воздействует на динамику формирования канала и его форму, следует оценить степень и предельные возможности влияния передаваемой информации на такие изменения формы трека. Можно ли такие изменения использовать для контролируемого шифрования информации?

13. Создание треков в жидкой пленке на идеальном зеркале с управлением? Как показано, локальная толщина пленки на подложке за счет диэлектрофореза может регулироваться электрическим полем на электродах в подложке /21/, поэтому представляет интерес оценить возможность использования этот эффект для управления треками.

14. При каких условиях возбуждение треков и вывод излучения из них будет наиболее эффективным? Разработка схем оптимального ввода и вывода излучения из треков?

15. Особенности треков со стоячей световой волной? Если трек формируется стоячей световой волной, как это проявится на свойствах трека?

16. Использование треков для изучения свойств жидких пленок, для получения гармоник и лазерной генерации в них? Какую информацию о свойствах пленок можно извлечь из особенностей поведения в них треков?

17. Если сделать жидкую пленку с находящейся внутри нее прозрачной микронной силиконовой пленкой, используемой для гибких компьютеров /22/, или с несколькими прочными графеновыми пленками /23/ в ней, можно ли с помощью электрических сигналов по этим пленкам сделать треки управляемыми? Каковы свойства треков в пленке при наличии в ней одной графеновой пленки? Пока стоимость 1 мм^2 пленки графена превышает 1 млн. долларов. Это затрудняет эксперименты, но это не является препятствием для теоретического рассмотрения возможного.

18. Представляет интерес объяснить поведения трека при отражении от утолщения у ребра пленки. Такое отражение видно на Рис.6-8, где 1- лазерный трек, 2 – утолщение пленки у введенной в нее стеклянной трубки диаметром 5 мм

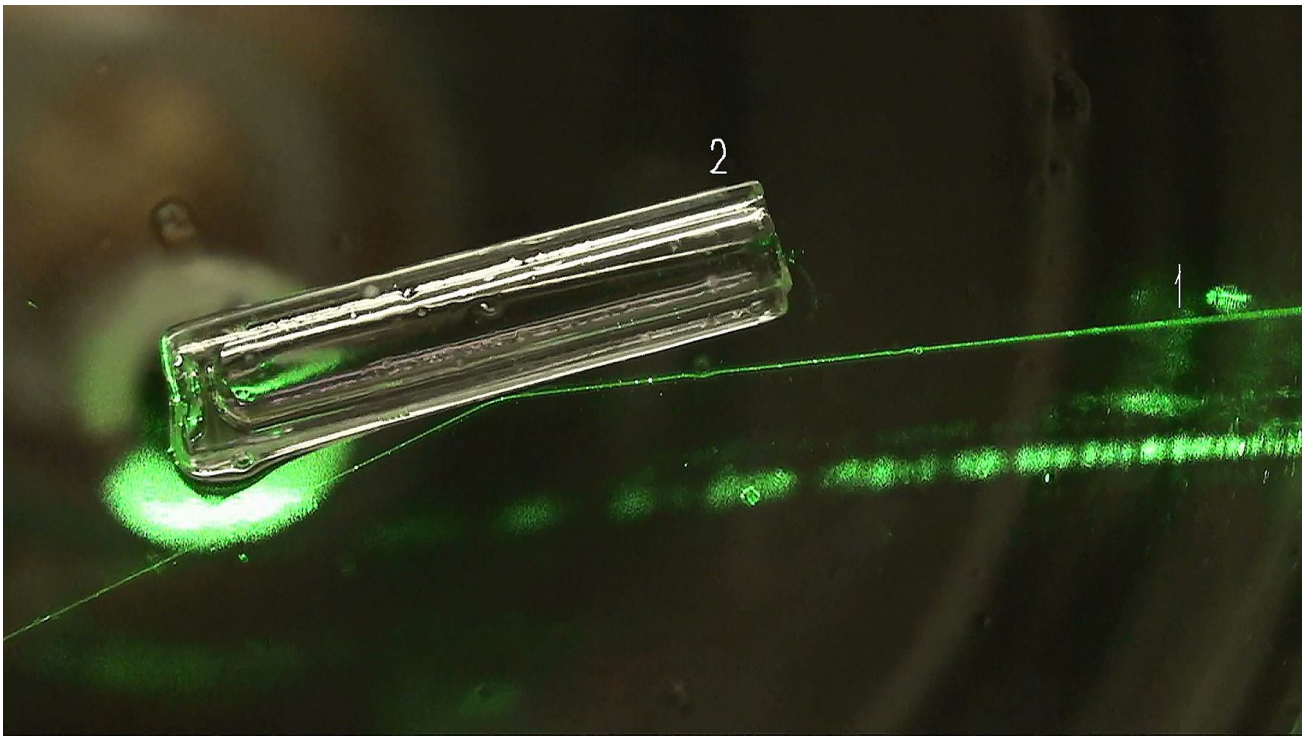

Рис.6. Отражение трека от утолщения пленки.

Падающий под малым углом на ребро трек не входит в расширяющуюся часть пленки, а отражается, что не укладывается в рамки обычной геометрической оптики. При этом отражении луч как-то удивительно и значительно смещается вдоль ребра. Смещение света при полном отражении рассматривается в /24, 25/, но здесь оно почему-то возникает на границе тонкой пленки с ее расширением и имеет весьма заметную величину (доли мм).

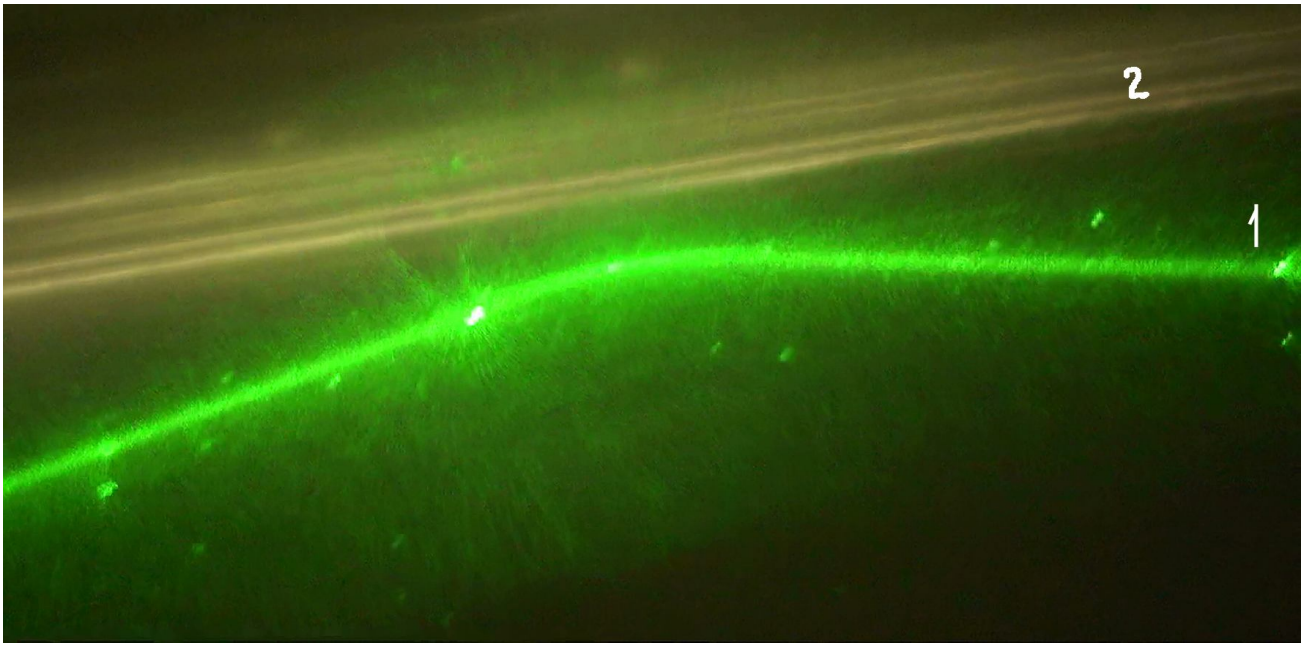

Рис.7. Отражение трека от утолщения пленки (с увеличением).

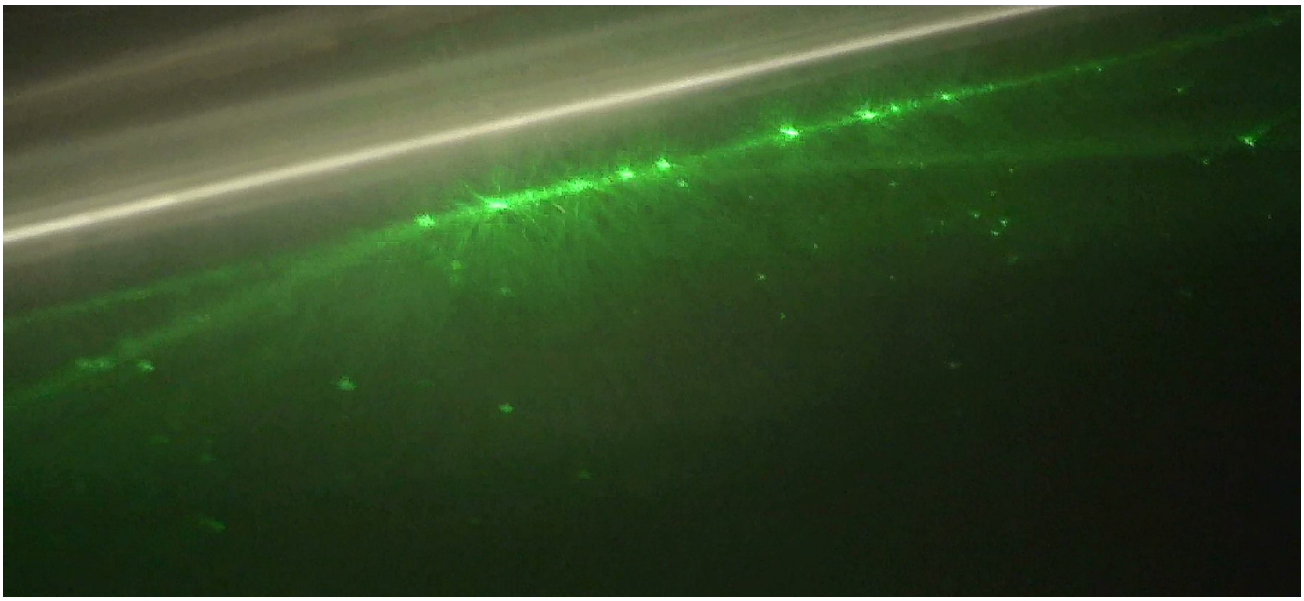

Рис.8. Отражение трека от утолщения пленки (с увеличением).

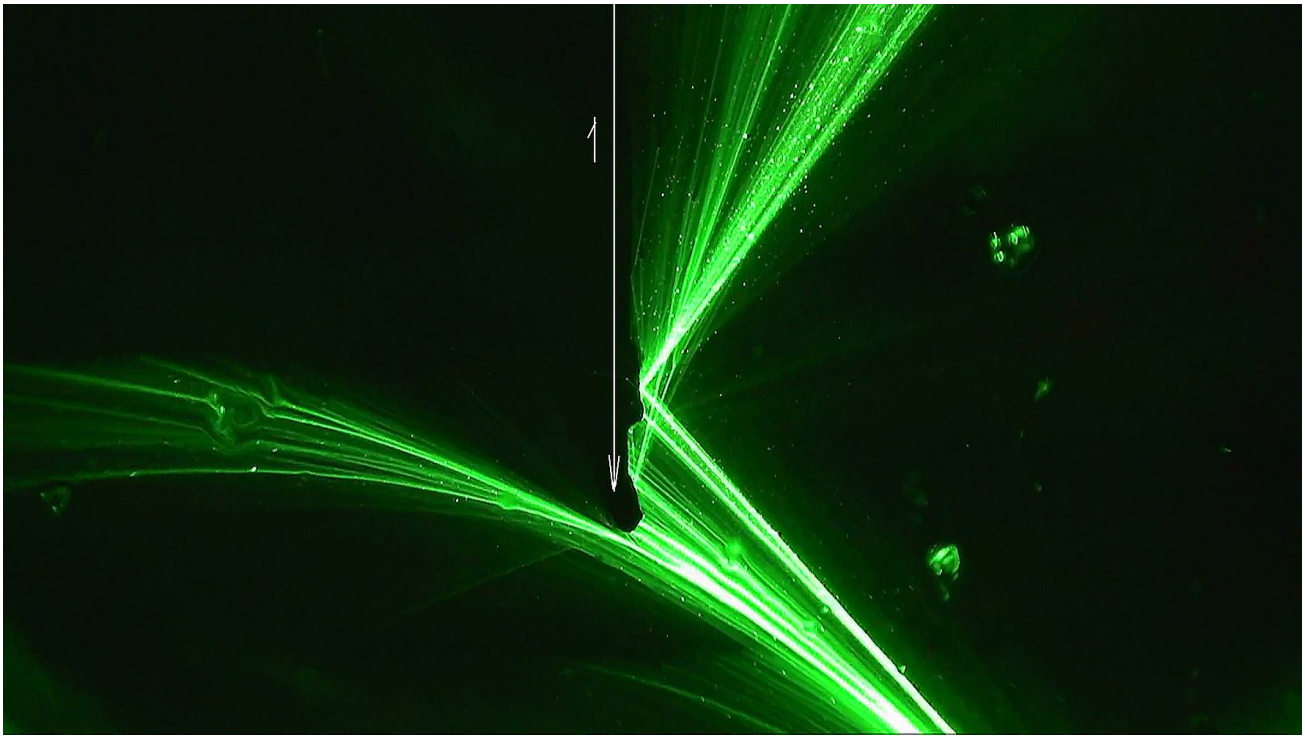

Рис.9. Отражение трека от утолщения около спускающейся по пленке капли. (См. приложенный кинофильм).

Такое же отражение треков наблюдается от спускающейся по пленке прозрачной капли (1) на Рис.9.

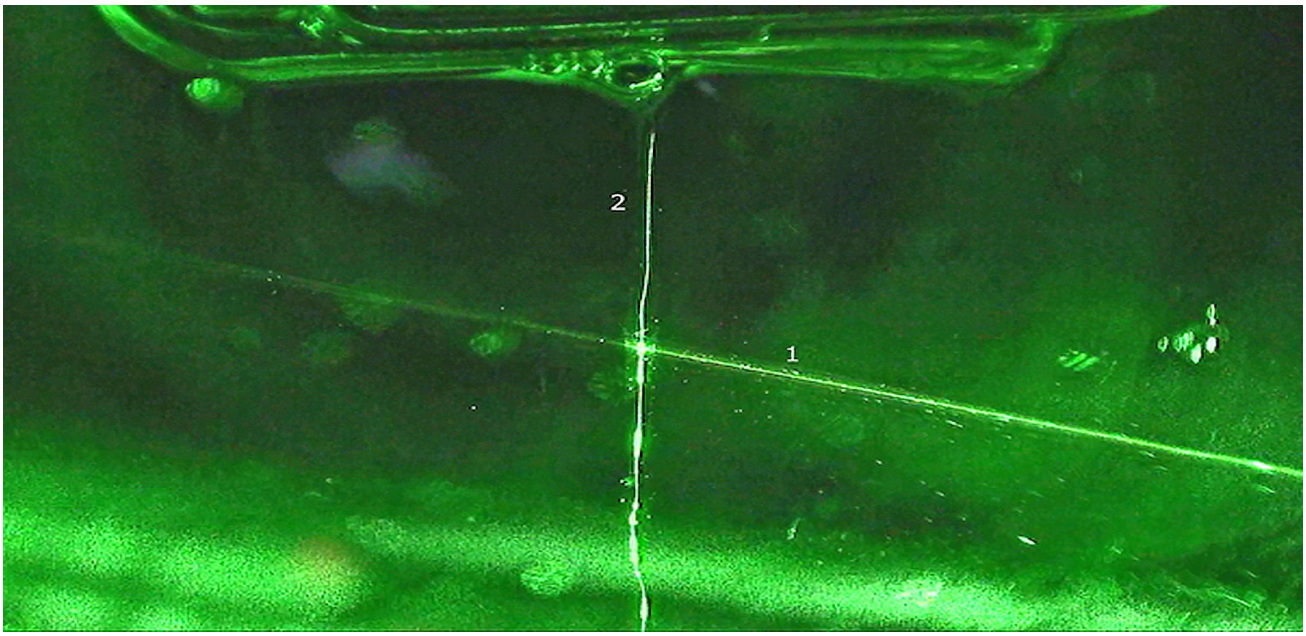

Рис.10. Часть излучения трека проходит за 100 мкм проволочку в пленке.

В то же время, если в пленку микронной толщины введена непрозрачная проволочка диаметром 100 мкм, то часть излучения трека такое большое препятствие преодолевает (Рис.10).

Можно надеяться, что отмеченные особенности треков и возможности их применения получат объяснение в ожидаемой теоретической модели оптических треков, если к ней проявится интерес, а ее разработке не помешают накладки от возможных задержек, описанных в /26/.

Выражаем благодарность сотрудникам ОКРФ за обсуждение полученных результатов и Витухновскому А.Г. и Сычеву В.В. за предоставление механического чопера.

Литература.

1. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Препринт ФИАН №2 (М. ФИАН, 2003) (см. http://ellphi.lebedev.ru/2/Stoilov.pdf с приложенным кинофильмом о поведении треков).
2. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Квантовая электроника, 33, 380 (2003);
3. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Квантовая электроника 34, 569 (2004).
4. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Препринт ФИАН №22 (М. ФИАН, 2003) (см. http://ellphi.lebedev.ru/4/Stoilov1.pdf).
5. Стойлов Ю.Ю. УФН, 174, 1359 (2004).
6. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Препринт ФИАН №12 (М. ФИАН, 2005) (см. http://ellphi.lebedev.ru/11/pdf12.pdf).
7. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю., Савинов Ю.В.. Лазерные треки в тонких пленках. Отчет. Лаборатория Фотоники Молекул (ОКРФ). Москва. 2006. (см. http://sites.lebedev.ru/data/1-2006.pdf)
8. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Препринт ФИАН №6 (М. ФИАН, 2007) (см. http://ellphi.lebedev.ru/18/pdf6.pdf С приложенными кинофильмами).
9. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. Препринт ФИАН №5 (М. ФИАН, 2008) (см. http://ellphi.lebedev.ru/21/pdf5.pdf С приложенными кинофильмами).
10. Стойлов Ю. Ю. Препринт ФИАН №8. (М.: ФИАН, 2009) (см. http://ellphi.lebedev.ru/26/pdf8_1.pdf., http://ellphi.lebedev.ru/26/pdf8_2.pdf)
11. Стойлов Ю. Ю. Патент RU №2403596 C1 от 9 апреля 2009 года.
12. Стойлов Ю.Ю. Фотоника, 1, 2 (2011).

13. Gigan S., Bohm H. R., Paternostro M., Blaser F., Langer G., Hertzberg J. B., Schwab K. C., Bauerle D., Aspelmeyer M., Zeilinger A.. Nature Vol 444|2, p. 67, November 2006,
14. Casner A., Delville J-P, Brevik I, http://arxiv.org/abs/physics/0212019v3
15. Bose S., Jacobs K., Knight P. L. PHYSICAL REVIEW A 56, Numb. 5, p.1475 (1997).
16. Sheard B.S., Gray M.B., Mow-Lowry C.M., McClelland D.E.. PHYSICAL REVIEW A 69, 051801(R) (2004).
17. Corbitt T., Ottaway D., Innerhofer E., Pelc J, Mavalvala N. LIGO-P050045-00-R. (2005).
18. Brasselet E., Wunenburger R., Delville J. P., Phys. Rev. Lett. 101, 014501 (2008).
19. Delville J-P, Vincent M.R., Schro R.D., Chra¨ıbi H., Issenmann B, Wunenburger R, Lasseux D, Zhang W.W., Brasselet E. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 11 (2009) 034015.
20. Pernice W. H. P., Mo Li, King Yan Fong, Tang Hong X., OPTICS EXPRESS 2009 /Vol.17, No.18/, p.16032.
21. C. V. Brown, G. G. Wells, M. I. Newton, G.McHale. NATURE PHOTONICS | VOL 3 | JULY 2009 | 403.
22. Dae-Hyeong Kim, Nanshu Lu, Rui Ma, Yun-Soung Kim, Rak-Hwan Kim, Shuodao Wang, Jian Wu, Sang Min Won, Hu Tao, Ahmad Islam, Ki Jun Yu, Tae-il Kim, Raeed Chowdhury, Ming Ying, Lizhi Xu, Ming Li, Hyun-Joong Chung, Hohyun Keum, Martin McCormick, Ping Liu, Yong-Wei Zhang, Fiorenzo G. Omenetto, Yonggang Huang, Todd Coleman, John A. Rogers. Science 12 August 2011: vol. 333 no. 6044 pp. 838-843 **Epidermal Electronics.**
23. M. Hiramatsu, M. Hori "Carbon Nanowalls. Synthesis and Emerging Applications", Springer Wien New-York, 2010 (166 pp).
24. Коробко-Стефанов А.А. УФН, 42, вып.3 (1950) с.432.
25. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М: Наука, 1973.
26. Кайтуков В.М. "Эволюция диктата" (М.:"Урамос", 1991, 468), (см. http://www.philosophyevolution.com/index.htm).