РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



препринт А.В. СТАРЦЕВ, Ю.Ю. СТОЙЛОВ

ДОПОЛНЕНИЕ К СВОЙСТВАМ ТРЕКОВ В МЫЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ И О ПРИРОДЕ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

## Дополнение к свойствам треков в мыльных пленках и о природе их образования

Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю.

Проведено исследование лазерных треков в мыльной пленке под действием излучения импульсного полупроводникового лазера (680 нм). Оценена пороговая интенсивность и энергия накачки для образования треков. При длительности импульса 0.1 мкс пороговая мощность накачки составляет 0.2 мВт (энергия 2 10<sup>-11</sup> Дж). Ранее наблюдавшаяся в треках пунктирная структура объяснена на основе имеющегося в пленках двойного лучепреломления. Намечен подход к более детальному теоретическому описанию механизма образования треков в пленках.

Эта работа в некотором смысле юбилейная. Незаметно прошло уже пять лет со времени нашей первой публикации о странном поведении лазерного света в мыльных пленках /1-7/. Исследованием свойств образующихся в пленках лазерных треков теперь занимаются у нас и за рубежом, но полного понимания механизма формирования этих узких каналов пока нет, и не найден способ быстрого управления ими.

Последняя наша обзорная работа по свойствам треков опубликована в журнале УФН /6/ в декабрьском номере за 2004 год, и мы не будем напоминать ее результаты. Желающие могут посмотреть и даже повторить описанные там опыты дома с обычной мыльной пленкой и с простой лазерной указкой. Как и в предыдущих наших исследованиях, в данной работе речь пойдет об изучении свойств треков, о поведении треков в разных условиях.

Сфокусированный лазерный луч, введенный сбоку через ребро внутрь мыльной пленки, разбивается в ней на узкие микронные каналы, пространственные солитоны, треки, которые без расходимости идут по пленки иногда на десятки

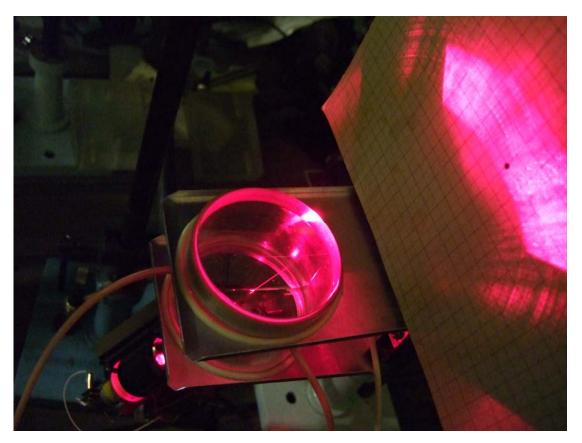


Рис.1. Вид сверху на камеру с вертикальной пленкой. Непрерывное излучение лазера-указки (680 нм) фокусируется в нижнее ребро вертикально расположенной мыльной пленки, находящейся в кювете с оптическими окнами диаметром 60 мм и длиной 30 мм. Излучение из кюветы попадает на экран (размер клетки 5 мм). (См. Видеофильм 1. Dscf1036.avi, Dscf1037.avi).

сантиметров. Типичный вид установки по наблюдению треков показан на Рис.1. В кювете с небольшим количеством мыльного раствора между оптическими окнами располагается вертикальная пленка, и снизу она через слой раствора и ребро пленки освещается сфокусированным лазерным излучением. Характерный вид треков, рождаемых от непрерывного лазера-указки, показан на Рис.1 и в Видеофильме 1. В Сети в приложении к первому нашему препринту о треках тоже есть похожий ранее снятый фильм о поведении треков /2/.

Метания и переключения направлений треков вызваны незаметными на глаз неоднородностями на пленке и в ребре, к которым треки очень чувствительны. Если свежая пленка имеет обычно толщину 5-10 мкм, то со временем ее толщина уменьшается в тысячу раз до 5-10 нм (практически до толщины двух молекул мыла), т.е. раствор из свежей пленки постоянно стекает в край пленки, в ребро. В зависимости от состава мыльного раствора пленка живет от нескольких минут до нескольких месяцев. Вид треков зависит от толщины пленки, и мы об этом уже рассказывали.

Вопросы, на которые мы пытались ответить в этом исследовании, формулируются так:

- 1. Какую дополнительную информацию о треке можно получить, изучая выходящее из него излучение?
- 2. Можно ли заметить какое-либо изменение свойств среды пленки при по-явлении в ней треков?
  - 3. Как меняется вид треков при импульсных накачках?
- 4. Можно ли регистрировать треки в пленке, когда они при слабых накачках глазом уже не видны?
- 5. Какова причина ранее отмеченного появления странных пунктирных треков в пленке?
  - 6. Будут ли треки, если осветить пленку солнцем?
  - 7. Велика ли устойчивость пленок к нагреву?

8. Есть ли подход к более детальному теоретическому описанию механизма образования треков в пленах?

Как видно по задачам, до точного количественного представления картины треков мы еще не дошли, и пока наши результаты имею простой качественно-описательный характер с попыткой ответить на самые начальные вопросы типа «Да? Нет?».

І. Рассмотрим такой **простой опыт**. Ось показанной выше кюветы устанавливаем горизонтально. В ней между окнами делаем свежую горизонтальную мыльную пленку и освещаем эту пленку лазерным светом снизу, посылаем сфокусированный луч непрерывного полупроводникового лазера-указки (680 нм, 1-2 мВт), минуя ребро, на поверхность пленки под скользящим углом около 5 градусов. Поляризация лазерного луча тоже горизонтальна, отражение хорошее, и на экране за кюветой имеем снизу сильный отраженный от пленки луч (в нем около 95% лазерной мощности) и слабый проходящий (в нем 5%), как и должно быть при отражении от тонкой плоскопараллельной пластинки, Рис.2 (1).

Но в пленке действуют свои законы, и ней в области фокусировки лазерного пятна наблюдается рождение узких треков, которые дальше идут по пленке на 1-2 см, а затем, не доходя до конца пленки, до выходного ребра, исчезают, т.е. на пленке мы видим зарождение и распад треков. Такие опыты мы делали и раньше, но теперь мы обратили внимание на излучение, выходящее из такого трека. При наличии в пленке трека на экране появляются дополнительная пара узких пятнышек с характерной для треков вытянутостью по вертикали, Рис.2 (2). Закрывание части лазерного луча до его фокусировки (экраном) просто уменьшает интенсивность трековых пятен. Вид этих пятнышек представляет интерес, поскольку они от света, выходящего из концов распадающихся треков, которые не доходят до ребра, и поэтому форма их излучения не искажена из-за наличия раструбных поверхностей ребра пленки. Два одинаковых пятна показывают, что излучение из трека выходит в обе стороны от пленки, выше и ниже ее.

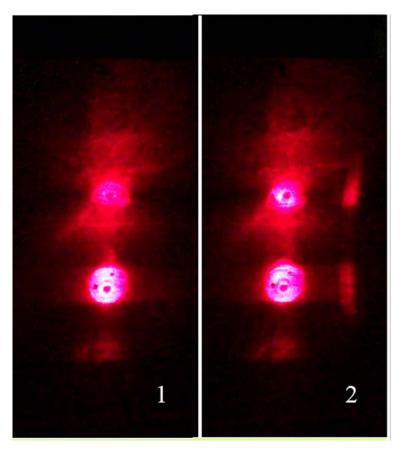


Рис.2. Ось кюветы установлена горизонтально. Между окнами находится горизонтальная мыльная пленка. Под скользящим углом около 5 градусов пленка освещается снизу сфокусированным лазерным излучением с горизонтальной поляризацией. На экране (1) нижнее яркое пятно — это от луча, отраженного от пленки (95%), верхний — от проходящего (5%). При возникновении в пленке трека (2), не доходящего до выходного ребра пленки, на экране появляются еще два бегающих пятна от излучения из конца трека. При этом интенсивность проходящего через пленку луча (2) обычно увеличивается до 50%. (См. Видеофильм 2 Dscf1176.avi. Dscf1186.avi).

Тут, как мы понимаем, по форме пятен можно судить о том, под какими углами идет излучении внутри самого трека. Видно, что в вертикальной плоскости излучение из трека идет практически под теми же углами, что и возбуждающий лазерный луч, а в горизонтальной плоскости эти углы гораздо меньше лазерных. Появления светового волновода или трека, связано с небольшим увеличением показателя преломления раствора, и поэтому в горизонтальной плоскости полное внутреннее отражение от плоских боковых поверхностей трека могут испытывать лучи, идущие только под очень малыми углами.

В принципе, детальное наблюдение в этом опыте за динамикой распределения интенсивности основных ярких пятен проходящего и отраженного лучей на экране в момент зарождения трека от пленки открывает возможность по балансу энергии узнать, какая часть и какая область лазерных лучей принимает участие в рождении треков на пленке.

Детально такого анализа мы пока не проводили, но в этих опытах попутно была отмечена такая особенность – когда в свежей пленке появляется трек, то при этом обычно увеличивается интенсивность света, проходящего через пленку (вместо 5% до 50%). Это показывает, что трек формируется при благоприятных резонаторных свойствах пленки, т.е. когда пленка с двумя отражающими поверхностями, как резонатор Фабри-Перро, начинает интенсивно пропускать падающее на нее излучение. Как известно, при высоком отражении зеркал резонатор Фабри-Перро при пропускании имеет внутреннее поле в добротность раз превышающее интенсивность падающего на него излучения, что, видимо, способствует образованию трека. Зеркальное отражение светового потока от поверхностей пленочного резонатора по мере формирования трека нарастает до полного внутреннего отражения, и попавшая в образованный трек энергия далее идет по нему как по каналу с идеально отражающими стенками. Из-за высокой внутренней интенсивности света лазерные треки в пленке из прозрачного раствора выглядят значительно ярче, чем след от сфокусированного лазерного луча в объеме того же раствора. Динамику увеличения яркость проходящего лазерного сигнала при появлении треков можно отметить в кадрах из короткого видеофильма. (Видеофильм 2)

II. Еще одна **особенность**. Если в этом опыте лазерное излучение не сфокусировано на пленке в малое пятно (обычно ширина фокального лазерного пятна около 30 мкм), а имеет в области пленки поперечный размер около 1 мм, то в такой широкой освещенной полоске на свежей пленке тоже в некоторых точках спонтанно рождаются и пропадают узкие (микронные) менее яркие треки, идущие по пленке 1-2 см. (Рис.3). При этом интенсивность падающего излучения на пленке меньше 0.1 Вт/см², и, значит, порог образования треков тоже меньше 0.1 Вт/см².

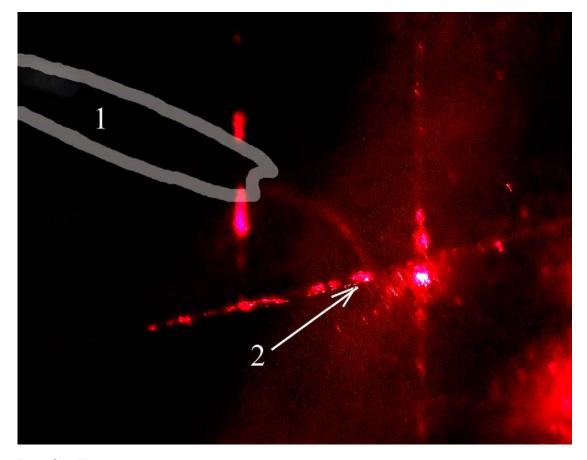


Рис.3. Горизонтальная мыльная пленка в кювете освещается снизу под скользящим углом около 5 градусов несфокусированным лазерным излучением. Поперечный размер области засветки (1) около 1 мм. В области засветки иногда рождаются узкие треки. Стрелка (2) указывает на выходное пятно такого трека в ребре пленки.

Когда в пленке появляется трек, в среде возникает волновод, т.е. исходная среда пленки при почти однородном освещении изменяет свои оптические свойства и становится неоднородной. Под воздействием даже слабого света эта среда приобретает некую фазовую неустойчивость, она стремится измениться, расслоиться и в широкой области поля образовать узкие каналы, по которым в виде пространственных солитонов пойдет свет. К обсуждению этой фазовой неустойчивости среды мы еще вернемся, а пока продолжим рассмотрение результатов такого расслоения. Изменения среды небольшие и на фоне больших световых сигналов их трудно зафиксировать.

Но качественно изменения свойств среды можно отметить в следующем опыте, в котором треки образуются при фокусировке излучения уже в ребро пленки, а область пленки с образовавшимся треком просвечивается сбоку скользящим излучением того же лазера, не вошедшим в трек и преломленным гранями ребра. Схема опыта показана на Рис.4. Просвечивающее боковое излучение образует интерференционные полосы, и наблюдение за этими полосами от просвечивающего излучения и за следами от треков ведется на экране за кюветой. Интерференционные полосы от падающих на пленку с боков световых сигналов расположены полукругом и в центре экрана они вертикальны, а выходящие через ребро на противоположном конце пленки бегающие треки дают на экране узкие горизонтальные полоски, особенно четко видимые по краям от области просветки. Можно заметить, что изменения формы и положения этих полос просветки меняется во времени вполне синхронно с появлением мигающих лазерных треков. Это свидетельствует о наличии изменений оптических свойств среды в просвечиваемых областях, в те моменты, когда в них зарождаются треки (Рис. 5) (Видеофильм 3). Отметим также продольное разбиение полосок от треков на экране, наличие в них регулярной интерференционной структуру - Рис.1. Причина этого разбиения вызвана особым распределением светового поля, излучаемого каждым треком.

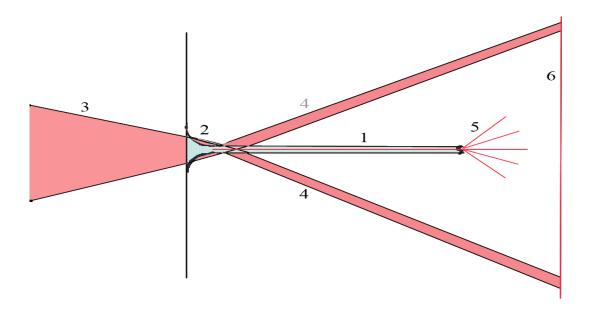


Рис.4. Вид сверху на вертикальную пленку (1). 2 - ребро пленки на окне кюветы. 3 - фокусируемый лазерный луч, частично заходящий в пленку и рождающий в ней трек, 4 — части луча, не вошедшие в пленку, но освещающие ее сбоку на том участке, где рождается трек, 5 — излучение из конца трека, 6 — экран.

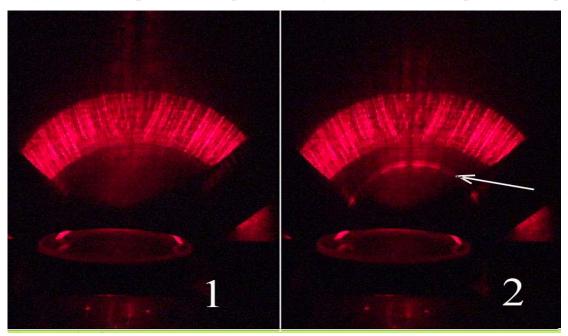


Рис.5. 1- вид экрана около кюветы, когда на нем есть интерференционные полосы от проходящего через вертикальную пленку с боков излучения, но в пленке нет трека. 2 - в пленке есть трек (его выходное пятно отмечено стрелкой), а интерференционная картина от проходящего излучения при этом чуть изменилась. (См. Видеофильм 3, Dscf1127.avi).

III. Об экспериментах **с импульсной накачкой**. Мы провели серию опытов с импульсными полупроводниковыми лазерами и исследовали вид треков со световыми импульсами разной длительности и интенсивности. В этих опытах обычный лазер-указка (за 70 руб) был запитан от генератора импульсного напряжения Г5-54 через делитель, так что на лазерный диод подавалось напряжение в несколько вольт с длительностью импульсов от 0.1 мкс до 800 мкс. Была проведена абсолютная калибровку световых сигналов, т.е. замерена выходная мощности лазера при разных длительностях и напряжениях питания (Рис.6). Максимальная мощность использованных лазеров обычно составляла 1-3 мВт. С помощью ССД было определено распределение интенсивности в его фокальном пятне. С повышением напряжения питания в фокальном пятне лазера наряду с основным появлялся второй максимум (Рис. 7), но обычно мы старались работать в режиме, когда в пятне фокусировки был один максимум с размерами по полувысоте около 35х15 мкм. Наложение временных форм импульсов накачки и излучения из треков могло бы дать информацию о динамике формирования световых каналов, но эта работа требуется более чувствительной аппаратура, чем та, которой у нас есть.

Здесь была изменена методика регистрации треков. Если раньше при непрерывной накачке мы затемнялись и фиксировали факт появление треков на пленке просто глазом, то при малых интенсивностях и коротких импульсах для такой регистрации уже не хватает света, и наличие трека в пленке мы определяли по другому - по виду излучения ярких точек из выходного ребра пленки. Вместо слабых треков легче регистрировать наличие ярких излучающих точек треков на выходном ребре пленки. Чтобы не путать их с освещенными мелкими пузырьками или пылинками, мы следили за диаграммами направленности этих излучателей, которые у пылинок и треков разные. Излучение треков имеет характерную для них вытянутую диаграмму направленности в перпендикулярном к пленке направлении.

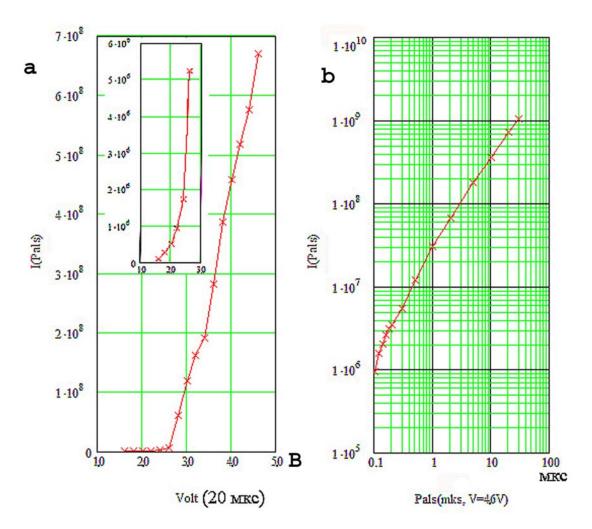


Рис. 6. Типичная зависимость выходной мощности используемого в экспериментах лазера-указки (в относительных единицах) от напряжения (а - при длительности импульса 20 мкс), и зависимость его интенсивности от длительности импульса (б) при фиксированном напряжении питания 4.6 В. При постоянном питании в 4.4 В выходная мощность лазера составляла 1 мВт.

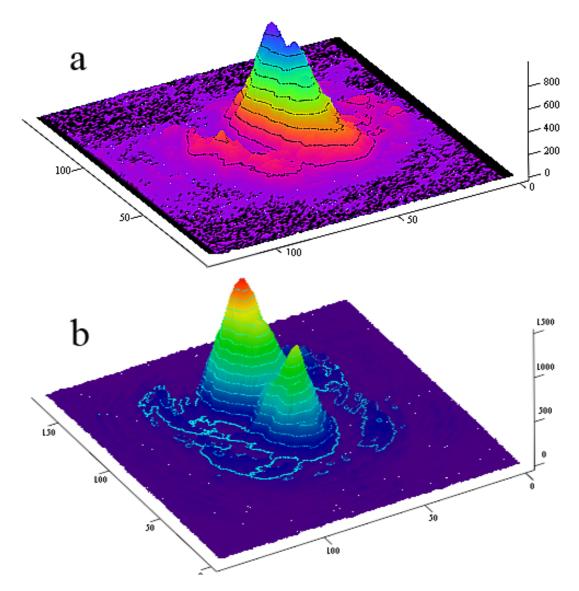


Рис.7. а - распределение интенсивности в фокальном пятне лазера при длительности импульса 20 мкс и напряжении 2.6 В. б - распределение интенсивности в фокальном пятне лазера при длительности импульса 20 мкс и напряжении 4.6 В. Координаты на плоскости указаны в микронах.

В трек заходит малая доля накачки. Как показывают измерения, свет из пятна трека диаметром около 5 мкм раз в 100 слабее накачки, и интенсивность светового потока из трека в наших опытах, замеренная с помощью ССД, обычно не превышала 6-20 мВт/см<sup>2</sup>. Поскольку такой поток поддерживает трек, то в некотором приближении его можно принять за минимальную пороговую интенсивность внутреннего светового потока, достаточную для существования трека.

Изменение положения пятен треков на выходном ребре пленки со временем, снятое через 0.1 с, показано на (Рис.8), где приведена серия последовательных кадров, полученных с лазерными импульсами длительностью 0.3 мкс (мощность в импульсе 0.2 мВт), идущих с частотой 10 Гц, а также с частотой 30 Гц (Рис. 9). Здесь в расположении выходных точек треков отмечается заметная пространственная периодичность, причина появления которой пока не ясна. Мы пытались понять, не вызвана ли эта периодичность какой-либо обратной связью между треками и лазерным излучателем. Для этого мы привели в движение фокальную точку лазера, которая во время экспозиции колебательно меняла свое положение вдоль ребра пленки. Вид выходных точек треков в этом случае показано на Рис.10. Поскольку структурность в расположении точек при этом не следит за перемещением лазера и практически на него не реагирует, то был сделан вывод, что она, видимо, связана с какими-то резонансными свойствами самой кюветы, поскольку при смене кювет эта периодичность менялась. А какого-либо существенного обратного сигнала от трека точно назад в лазер мы не обнаружили.

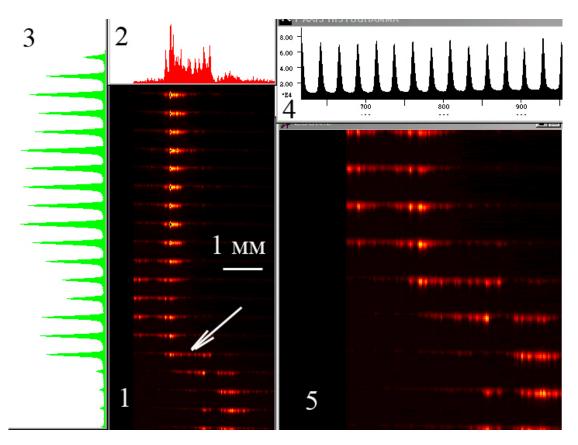


Рис.8. Покадровая динамика изменения расположения пятен треков на выходном ребре пленке (1). Кадры сняты через 0.1 с с лазерными импульсами длительностью 0.3 мкс (3 В). Время идет сверху вниз. 2 – распределение интенсивности излучения треков вдоль центральной координаты ребра пленки в момент, указанный стрелкой. 3 – изменение интенсивности во времени в точке ребра, указанного стрелкой. 4 – гистограмма излучения всех треков в каждый момент времени. 5 – увеличенное изображение участка покадровой развертки.

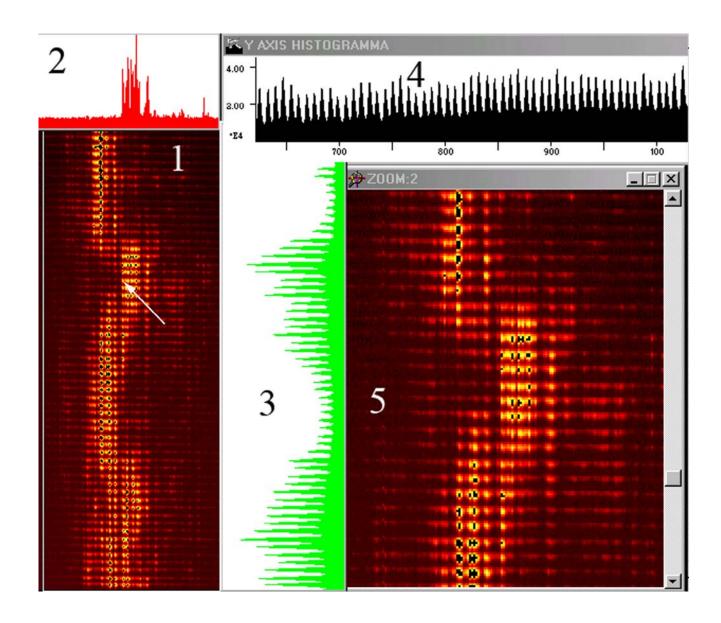


Рис. 9. Покадровая динамика изменения расположения пятен треков на выходном ребре пленке (1). Кадры сняты через 0.03 с с лазерными импульсами длительностью 0.3 мкс (3 В). Время идет сверху вниз. 2 – распределение интенсивности излучения треков по ребру пленки в момент, указанный стрелкой. 3 – изменение интенсивности во времени точки ребра, указанного стрелкой. 4 – гистограмма излучения всех треков в каждый момент времени. 5 – увеличенное изображение участка покадровой развертки. Видна пространственная периодичность в расположении пятен треков.

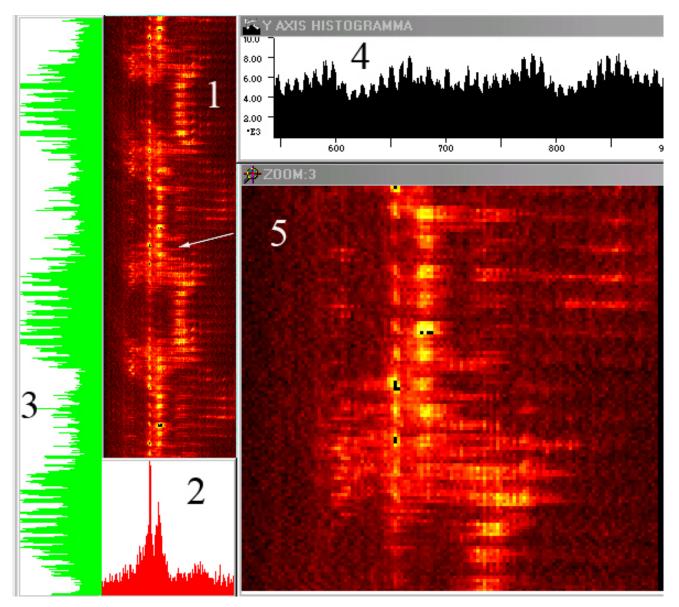


Рис.10. Покадровая динамика изменения расположения пятен треков на выходном ребре пленке (1). Кадры сняты через 0.03 с с лазерными импульсами длительностью 3 мкс (3 В) при качании положения лазерного пятна во время экспозиции. Время идет сверху вниз. 2 — распределение интенсивности излучения треков по ребру пленки в момент, указанный стрелкой. 3 — изменение интенсивности во времени точки ребра, указанного стрелкой. 4 — гистограмма излучения всех треков в каждый момент времени. 5 — увеличенное изображение участка покадровой развертки. Структурная периодичность в расположении выходных пятен треков сохраняется и за перемещением лазера не следит.

Серия кадров выходных точек треков, снятых через 100 кратный микроскоп показана на Рис.11. Боковое смешение выходной периодичной структуры связано с потоками на свежей пленке. Поперечные размеры круглых точек здесь не превышают 5 мкм.

Уменьшая интенсивность возбуждающего лазерного излучения, можно на выходе из ребра получить только одну слабо светящуюся точку (Рис.12). При увеличении интенсивности накачки количество выходных точек увеличивается. При длительности импульса 0.1 мкс пороговая интенсивность лазера для появления трека в одном импульсе не превышала 0.2 мВт ( $2x10^{-11}$  Дж). Обычно в трек попадает несколько процентов накачки, но даже при полном поглощении такой энергии в треке с объемом раствора  $10^{-6}$  см<sup>3</sup> его нагрев за импульс не превысит  $5x10^{-6}$  градуса.

IV. Раньше мы наблюдали треки в пленке с серией коротких фемтосекундных лазерных импульсов длительностью 70 фс (с частотой 85 МГц) на длине волны 475 нм со средней мощностью 1 мВт /6/. Энергия в одном импульсе мала (10<sup>-11</sup> Дж), но при образовании треков серия коротких импульсов могла действовать коллективно, если след от организации структура трека одним импульсом сохраняется на 12 нс до прихода другого импульсами, и результирующее воздействие импульсов постепенно накапливается. Для проверки того, нет ли сохранения структуры треков в пленке на времена 0.1-0.03 с, мы провели опыты с серией импульсов полупроводникового лазера, в которую вставляли отдельные импульсы повышенной интенсивности, как показано на Рис.13 и Рис.14. Отсутствие заметных изменений в виде треков от слабых импульсов, идущих сразу за сильными, показывает, что такого долгого сохранения структуры треков в пленках нет.

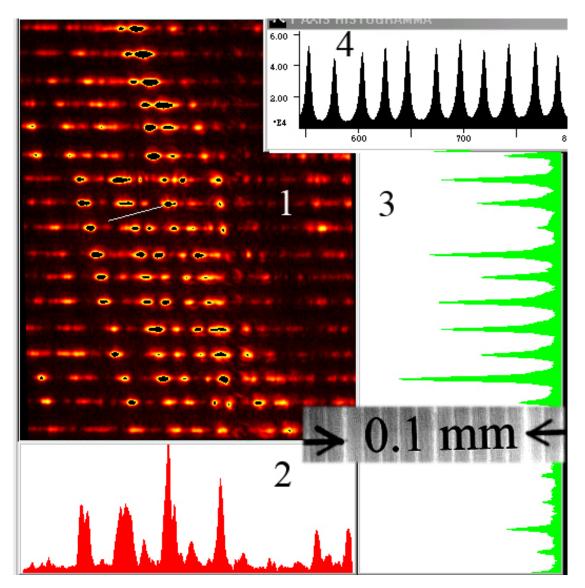


Рис.11. Покадровая динамика изменения расположения пятен треков на выходном ребре пленке (1), снятая через микроскоп через 0.1 с с лазерными импульсами длительностью 10 мкс (3.6 В). Время идет сверху вниз. 2 — распределение интенсивности излучения треков по ребру пленки в момент, указанный стрелкой. 3 — изменение интенсивности во времени точки ребра, указанного стрелкой. 4 — гистограмма излучения всех треков в каждый момент времени. 5 — увеличенное изображение участка покадровой развертки. Поперечный размер малых пятен около 5 мкм.

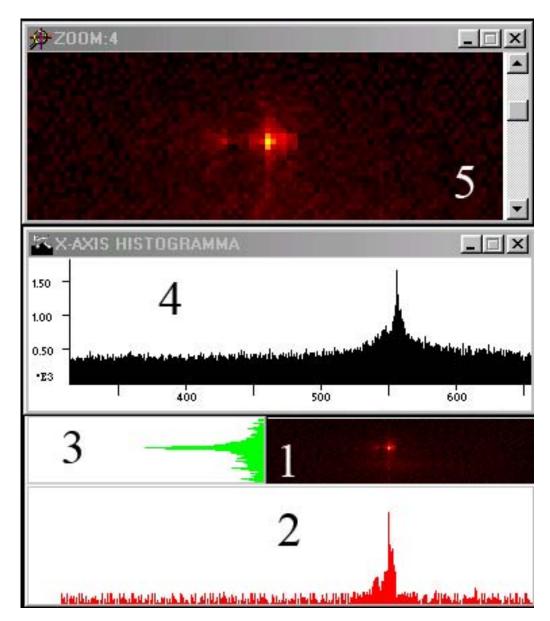


Рис.12. Пятно треков на выходном ребре пленке (1), снятое с лазерным импульсом длительностью 0.1 мкс (3 В). 2 — распределение интенсивности излучения трека по ребру пленки 3 — изменение интенсивности поперек ребра пленки. 4 — гистограмма полного излучения трека. 5 — увеличенное изображение выходного пятна трека.

V. О причине одного из ранее отмеченных /6/ странных свойств треков. Мы рассказывали, что в ряде опытов нас весьма озадачивал необычный вид треков – в них явно проявлялась пунктирная структура вдоль трека, когда по всей длине в треке области его яркого свечения длиной в несколько миллиметров чередуются с совсем темными областями примерно такой же длины. Это свойство было отмечено до того, как нами были обнаружены наличие двойного лучепреломления в мыльной пленке, т.е. свойство лучей с разной поляризацией преломляются в пленке с разными показателями преломления. Дальнейший анализ литературы подсказал нам, как двойное преломление среды может вызывать наблюдаемую пунктирную структуру треков. Имеется описание наглядного оптического эксперимента со стрежнем плексигласа /8/, который из-за технологии изготовления обычно обладает слабовыраженным двояко преломляющим свойством. Лазерный луч света, имеющий поляризацию под 45 градусов к его осям, запускается вдоль стержня (Рис.15). Из-за периодического изменения ориентации поляризации в стержне при наблюдении рассеянного света сбоку след от луча выглядит пунктирным, как и в наших опытах. Рассеянный свет лазера на участках трека, где вектор поляризации направлен к наблюдателю, для него не видены. Таким образом, наблюдаемые пунктиры в треке являются простым следствием наличия обнаруженного нами двойного лучепреломления в пленках.

Поскольку разница показателей преломления для лучей с разной поляризацией в пленке заметно больше, чем в стержне, то длина треков в пленке получается в десятки раз короче, чем в стержне, а одновременное наблюдение разной длины пунктиров в соседних треках в одной пленке связано с отличиями в показателях двойного луче преломления для разных световых мод, образующих разные треки. Регистрация пунктиров в треках как раз и являются хорошей демонстрацией присутствия в пленках двойного лучепреломления и подтверждением наличия в них разных мод.

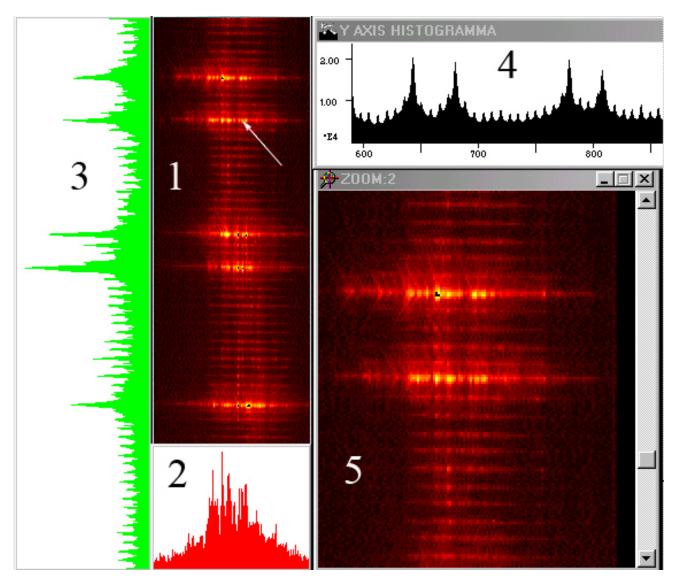


Рис.13. Покадровая динамика изменения расположения пятен треков на выходном ребре пленке (1), снятая через 0.03 с с лазерными импульсами длительностью 3 мкс (2.8 В). В некоторые моменты длительность излучения лазера увеличивается до 10 мкс. Время идет сверху вниз. 2 – распределение интенсивности излучения треков по ребру пленки в момент, указанный стрелкой. 3 – изменение интенсивности во времени точки ребра, указанного стрелкой. 4 – гистограмма излучения всех треков в каждый момент времени. 5 – увеличенное изображение участка покадровой развертки. Увеличение энергии воздействия не оказывает заметного влияния на вид и положение пятен треков в последующих импульсах.

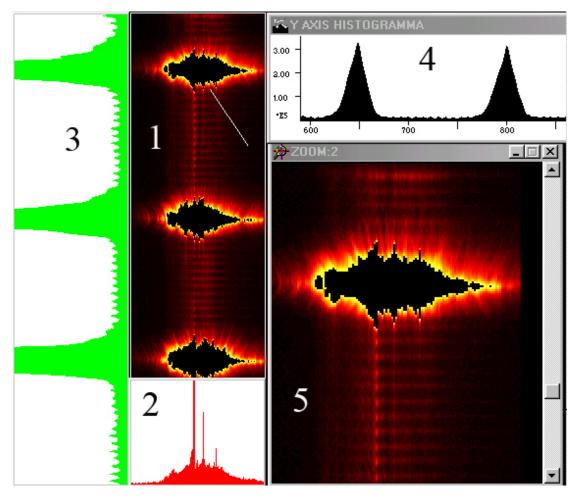


Рис.14. Покадровая динамика изменения расположения пятен треков на выходном ребре пленке (1), снятая через 0.03 с с лазерными импульсами длительностью 3 мкс (2.8 В). В некоторые моменты длительность излучения лазера увеличивается до 10 мкс и при напряжении до 3.6 В. Время идет сверху вниз. 2 — распределение интенсивности излучения треков по ребру пленки в момент, указанный стрелкой. 3 — изменение интенсивности во времени точки ребра, указанного стрелкой. 4 — гистограмма излучения всех треков в каждый момент времени. 5 — увеличенное изображение участка покадровой развертки. Существенно увеличение энергии воздействия в отдельных импульсах не оказывает заметного влияния на вид и положение пятен треков в последующих импульсах.

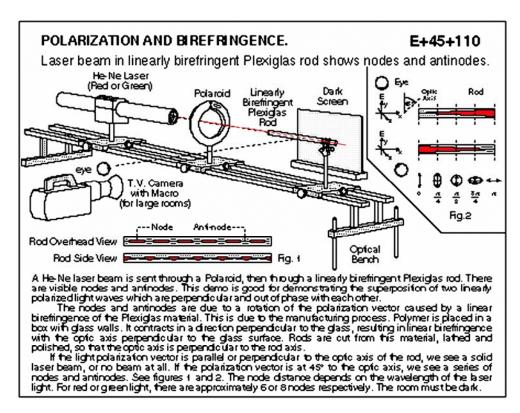


Рис.15. Вид экспериментальной установки, описанный в /8/, для наблюдения прерывистости (пунктирной структуры) лазерного луча в двоякопреломляющем стержне из плексигласа.

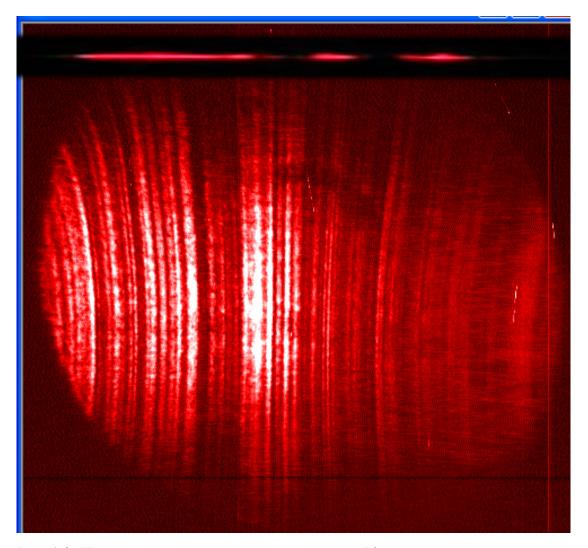


Рис.16. Полосы на экране на расстоянии 50 см от выходных пятен треков, полученные при одном импульсе лазерного излучения длительностью 800 мкс (4 В). На экране полосы прямые, здесь их изгиб связан с системой регистрации.

VI. К вопросу о том, как связаны выходные точки треков на ребре пленки с картинкой трековых полос на экране. При лазерном возбуждении треки имеют на выходе из пленки в ребре вид ярких точек диаметром в несколько микрон (Рис. 11), которые на экране за пленкой дают световую картину в виде полос (Рис. 16.). Эти полосы на экране, вытянутые в перпендикулярном к пленке направлении, напоминают интерференционные полосы. Картина интерференционных полос от точечных источников должна меняться в зависимости от расстояния до источников.

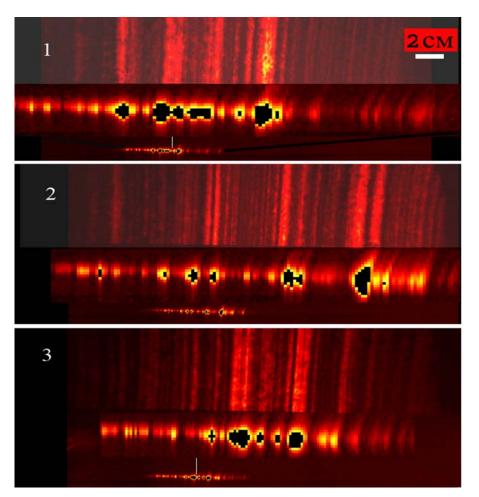


Рис.17. Сравнение полосы на экране на расстоянии 50 см от выходных пятен треков с увеличенным изображением самих пятен показывает, что они практически совпадают. Три опыта (1-3), каждый снят с одним импульсом лазерного излучения длительностью 800 мкс (4 В).

Поскольку в каждом импульсе распределение точек разное, то мы провели опыты, в которых фиксировали положение полос на разных расстояниях и одновременно регистрировали положение выходных точек треков в ребре в одном импульсе. Но, как мы убедились, вид полос от расстояния не зависит. Оказалось, что количество наблюдаемый полос на экране практически полностью совпадает с количеством ярких пятен на выходном ребре (Рис.17) и, следовательно, не связано с интерференцией. Каждая вытянутая яркая полоса соответствует своей яркой точке на ребре.

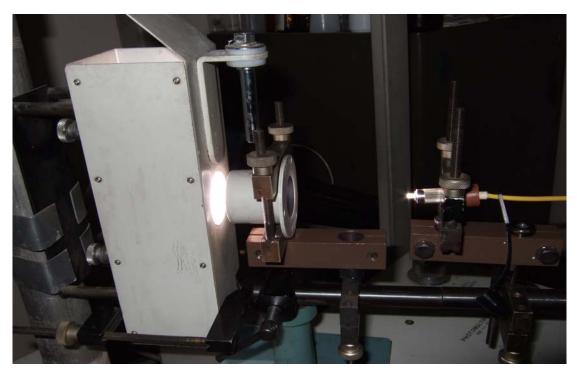


Рис.18. Непрерывное излучение дуговой лампы ДКСШ-200 фокусировалось линзой на входной торец волновода с центральной жилой диаметром 10 мкм.

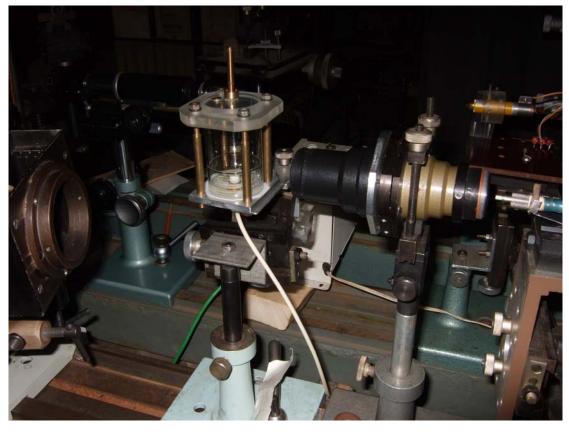


Рис.19. Выходной торец этого волновода проектировался объективом на ребро круглой горизонтальной пленки в прозрачной кювете.

VII. Об опытах с другим источником света. Когда полупроводниковый лазер портится и перестает излучать лазерный поток, он становится люминесцентным источником. Так вот, ранее мы уже сообщали /7/ о наблюдении треков в пленке с таким широкополосным (~20 нм) люминесцентным излучении полупроводникового диода малой мощности. После этих опытов у нас возник вопрос, можно ли получить треки в пленке при использовании света других, например, более широкополосных некогерентных источников типа солнца? Для этого мы с помощью волновода диаметром 10 мкм отвели свет от дуговой лампы ДКСШ-200 с температурой свечения около 2000° К и сфокусировали выходной торец волновода на ребро пленки Рис.18. Наблюдение велось за светом из выходного ребра на другом конце пленки Рис.19. Иногда там возникают трековые бегающие цветные пятнышки с характерной вытянутой диаграммой Рис.20 и Рис. 21.

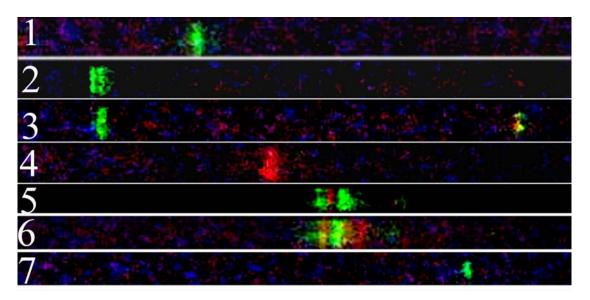
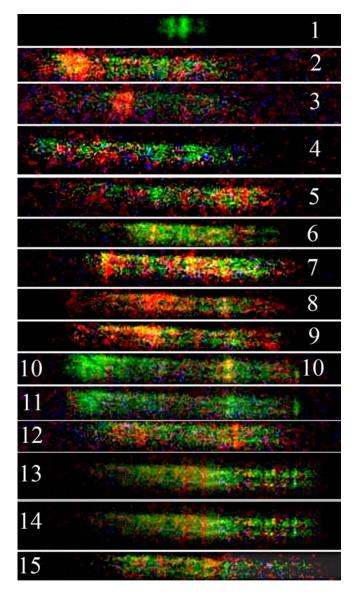


Рис.20. При наблюдении через микроскоп (с небольшой отстройкой от фокуса для регистрации диаграммы излучения) видно, что иногда (примерно один раз за 4-10 с) в ребре на выходе пленки появляются перемещающиеся более яркие вытянутые по вертикали цветные полоски, характерные для треков в мыльной пленке. Иногда, как видно на кадрах 5 и 6, эти цветные полоски расположены рядом.



Отсюда мы делаем вывод — да, треки в пленке могут возникать и с некогерентными источниками. Цветовая окраска выходных полосок показывают, что белое излучение источника не идет по одному каналу, а разбивается на отдельные треки разного цвета. Используя излучение солнца, такие вытянутые выходные пятнышки треков при желании мог бы наблюдать уже Ньютон в своих опытах с мыльными пленками, в которых он отметил появление тонких черных областей, впоследствии названных «черными ньютоновскими пленками».

Рис.21. Кадры, снятые c лампой ДКСШ-200 в другой серии опытов. При наблюдении через микроскоп (с отстройкой от фокуса) видно, что иногда (один раз примерно за 4-10 с) в ребре на выходе пленки появляются перемещающиеся более яркие вытянутые по вертикали цветные характерные лоски, для треков в мыльной пленке. Как видно на 8-12, кадрах такая цветная полоска иногда за десятые доли секунды меняет свой цвет.

VIII. О нагреве пленок. Когда раньше мы отмечали регистрируемую глазом пороговую интенсивность появления треков при непрерывной накачке на уровне 10 мкВт (при интенсивности в точке фокусировки около 4 Вт/см² /6/), тогда была высказана гипотеза о том, что механизм образования треков мог бы быть связан с испарением воды из тонкой пленки. К случайному чуть более теплому месту на пленке, нагретому излучением, с боков подходит мыльный раствор, вода испаряется, а мыльные молекулы с более высоким показателем преломления остаются. Их концентрация в зоне испарения постепенно увеличивается, что и приводит к образованию волновода и трека. Однако измеренная в данной работе значительно более низкая пороговая мощность потока и малая энергия в коротких импульсах, вызывающих образование треков, и подтвержденная в опытах с кратковременной и некогерентной накачкой, далеко не достаточных для какоголибо заметного разогрева пленки даже при полном поглощении падающего светового потока, показывает, что при пороге тепловой нагрев практически не работает, и это не позволяет принять такой механизм образования треков.

Но мы все-таки попытались себя проверить и изменить условия испарения так, чтобы посмотреть, не будет ли отличий в поведении треков, если при комнатной температуре около мыльной пленки не будет воздуха, охлаждающего пленку и мешающего испарению воды. Воздух из герметичного сосуда с мыльным раствором был удален, и в созданную в таких условиях пленку запускался лазерный луч. Нет, в пленках, в окружении которых практически не было воздух, а были только насыщенные пары воды, каких либо существенных отличий в поведении треков мы не заметили. Таким образом, механизм образования треков через испарение не подтвердился.

Но при высоких интенсивностях накачки влияния испарения с пленки может проявиться, и это имеет отношение к лазерам на мыльных пленках. Как мы уже отмечали /6/, при наличии лазерного красителя и мощного оптического возбуждения пленка дает лазерную генерацию, для которой известны КПД генерации около 50%.

Так вот, интересно то, что пленка весьма эффективно себя охлаждает испарением и охлаждает с рекордной для конденсированных лазерных сред скоростью отвода тепла -- с поверхности пленки испарение уносит поток тепловой энергии около 10 кВт/см<sup>2</sup>.

Динамический обменный поток молекул воды Z с единицы поверхности в секунду, которые постоянно улетают и садятся на пленку, в равновесных условиях определяется выражением /9/  $Z = p/(2\pi mkT)^{0..5}$ , где p- давление паров, m- масса молекул, T- температура. При комнатной температуре, когда p=3 kPa, поток  $Z=3.3 \times 10^{-21}$  см  $^{-2}$  с, и каждая молекула воды на поверхности пленки в среднем живет несколько микросекунд. С увеличением температуры давление насыщенных паров растет и охлаждающий поток увеличивается.

Большая скорость испарения и способность пленки выдерживать нагрев на десятки градусов определяет и удивлявшую нас стойкость пленок к большим потокам, когда мы применяли для возбуждения лазеры со средней мощностью в несколько ватт и наблюдали формирования в них треков при использовании высоких мощностей возбуждающих лазеров /6/. При механической поперечной замене пленки в накачиваемой области трека со скоростью 1 м/с и при допустимом нагреве среды на 10 градусов в одном треке шириной 30 мкм и длиной 10 см при отводе тепла со скоростью 10 кВт/см² можно рассчитывать на получение с одного канала трека непрерывного лазерного излучения в сотни ватт при объемной плотностью излучения 10 МВт/см³. Это возможность представляет интерес для некоторых приложений. Отметим, что для отвода тепла с интенсивностью 10 кВт/см² с помощью, скажем, излучения черного тела потребовалась бы температура поверхности более 6000 градусов.

Таким образом, в жидкой лазерной пленке есть возможность за счет испарения воды иметь высокую скорость охлаждения, практически недостижимую для других лазерных сред. Представляет интерес также использовать для этих лазеров новые цветные мыльные молекул с внедрением в них лазерных красителей, так называемое «цветное мыло», о создании которых сообщается в /10/.

Наблюдая за тем, как трек сам выбирает и меняет свое направление, мы заметили, что когда трек пересекает небольшой участок пленки со специально созданной нами и направленной к нему неоднородностью (пятнышко меньшей толщины), он изменяет, а потом восстанавливает свое направление. Этот опыт показывает, что есть возможность управлять треком с помощью быстрого изменения толщины пленки. Это можно сделать тепловым способом, с помощью небольшого импульсного локального подогрева пленки на пути трека, например, ИК лазерным излучением, поглощаемым в растворе /11/, и таким образом менять направление распространения лазерного канала в пленках. Наблюдаемая узость, постоянные ветвления и мгновенные изменения направлений световых каналов продолжают привлекать внимание и позволяют рассматривать пленку с бегающими треками как наглядную модель самоуправляемого оптического компьютера, воздействующего светом на среду и одновременно определяющего время и место ветвления или очередного переключения направлений своих волноводных треков.

IX. С теоретической точки зрения задача описания образования и поведения трека не проста - это взаимосвязанная оптическая газо-гидро-динамическая задача с объемной многофазной, трансформируемой средой с одновременно изменяющимся по форме и собираемым в трек излучением. Это сложная задача само-согласования лежит пока вдалеке от столбовой дороги теоретических интересов.

На наш взгляд, для понимания и теоретического описания треков представляет интерес недавно опубликованная работа /12/, в которой сообщается об изучении раствора с добавленными в него поляризуемыми крупными частицами размером около 50 мкм, когда такой раствор помещают в зазор шириной 0.6-3.5 мм между прозрачными электродами и подают на электроды переменное электрического поля (0.1-3 кГц) напряжением 1-6 кВ. Частицы в растворе поляризуются, за счет их диполь-дипольного взаимодействия они притягиваются друг к другу и за несколько секунд собираются в нити между электродами. Об индуци-

рованном образовании таких нитей сообщалось уже и раньше, и именно этот механизм изменения структуры раствора при диэлектрофорезе, при образования нитей, мы рассматривали в наших работах как механизм формирования треков /6, 13/. Но здесь авторы отмечают еще одну важную особенность, а именно то, что эти нити по не ясным пока причинам начинают притягиваться друг к другу, двигаться в поперечном к полю направлении и за минуты собираются в ячеистую структуру, освобождая часть раствора от своего присутствия.

Здесь в электрическом поля в герцовом диапазоне частот наглядно проявляется эффект, который можно было бы назвать эффектом поперечного диэлектрофореза, т.е. эффект перемещения частиц в электрическом поле, но не в области максимума или минимума поля, как обычно, а поперек однородного поля, притягиваясь друг к другу.\* При таком вызываемом полем мезо-масштабном фазовом переходе размер области стягивания, концентрации дипольных нитей в растворе пропорционален расстоянию между электродами, а от частоты поля и размеров частиц не зависят. При расстоянии между электродами в несколько миллиметров размеры области стягивания тоже миллиметры. Отмечается, что образовавшиеся области стабильны и некоторое время не распадаются даже после выключения напряжения.

С физической точки зрения здесь, как мы понимаем, в замедленном режиме демонстрируется то, что происходит в мыльных пленках при образование треков, т.е. эффект прямого, но увеличенно-масштабного повторения того, что мы наблюдаем в пленках с треками.

<sup>\*</sup> Отметим, что это притяжение не является очевидным. Если у вас на плоскости есть два одинаковых и перпендикулярных к ней диполя или два одинаковых магнита, и вы попытаетесь их сдвинуть, то убедитесь, что они активно отталкиваются друг от друга. Демонстрируемое в данном опыте притяжение требует дополнительного выяснения природы этого явления и оценки силы притяжения. Здесь для описания сбора частиц должна быть использована общая теория Ван-дер-Ваальсовых сил /14/ в среде, обычно учитывающая наличие в ней только термодинамически равновестных флуктуационных составляющих электромагнитного поля /15/, но с добавлением введенных в среду дополнительных электромагнитных полей /16/.

Понятно, что в областях стягивания поляризуемых частиц показатель преломления среды более высокий, чем в чистом растворе, что и требуется для трека. Как мы раньше отмечали /6/, у нас в растворе в световом электрическом поле тоже поляризуемые частицы, тоже есть их диполь-дипольное взаимодействие, которое в области действия поля (даже не сфокусированного) при расстоянии между поверхностями пленки в несколько микрон вызывает в ней, как мы видим, образование треков (зон стягивания) шириной в несколько микрон. Отличие в том, что у нас на двух ограничивающих поверхностях пленки уже есть заранее сориентированные и готовые к взаимодействию с полем и между собой поляризуемые молекулы, выстроенные в двумерные кристаллы. Электрическое поле между поверхностями создается вводимым в пленку излучением в оптическом диапазоне, и стягивание происходит не за минуты, а гораздо быстрее.

Таким образом, можно сделать вывод, что демонстрируемый эффект поперечного диэлектрофореза поляризуемых частиц в электрическом поле является, по-видимому, общим для физики взаимодействия таких частиц с полем (при размерах поляризуемых частиц от десятков микрон до нанометров) и перекрывает весь диапазон переменных электрических полей от звуковых до световых частот. Отмеченная общность физических результатов поможет, как мы понимает, уточнить механизм индуцированного взаимодействия поляризуемых частиц и создать полную теорию образования областей стягивания и треков в пленках. Эффект собирания частиц в сгустки может найти применение также для их сортировки и выделения мелких частиц /13/.

Итак, кратко о результатах данной работы.

- 1. Оцениваемый порог интенсивности непрерывного излучения для образования треков снижен до  $0.01 \mathrm{Bt/cm}^2$ .
- 2. По изменению интенсивности просвечивающих боковых световых потоков при формировании треков в пленках сделан вывод, подтверждающий изменения оптических свойств среды и важность резонаторных свойств пленки для образования треков.

- 3. Найдены экспериментальные условия, исключающие влияние на излучение треков искажений в ребрах пленки и позволяющие наблюдать за зарождением и исчезновением треков. Это излучение позволяет судить о направленности световых потоков в треках.
- 4. Проведены опыты по получению треков с импульсными полупроводниковыми лазерами разной длительности и интенсивности с регистрацией на ССД камере в том числе с покадровой разверткой.
- 5. Объяснена природа ранее непонятной пунктирной структуры треков на основании двойного луче преломления света в пленках
- 6. Обнаружено наличие треков в пленках при накачке широкополосными некогерентными источниками типа солнца.
- 7. Обращено внимание на рекордно высокую скорость охлаждения лазерных пленок с треками за счет испарения (~10 кВт/см²), что интересно для некоторых приложений.
- 8. Отмечена физическая общность результатов воздействия переменных электрических полей на поляризуемые частицы в растворах от герцовых до световых частот, открывающая путь к созданию полной теории образования областей стягивания и треков в пленках.

Выражаем благодарность сотрудникам КРФ за обсуждения результатов и за помощь с экспериментальным оборудованием.

Таким образом, открытое нами несколько лет назад «чудо» с треками оказывается достаточно общим физическим явлением и частично оно уже объяснено. Конечно, грустно осознавать, что это открытие «будет использовано не на благо поколений ... и до тех людей, которые достойны сожаления и помощи, оно не дойдет» /16/.

## Литература.

- 1. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю., *«Способ получения поверхностных поляри-тонов»*, патент РФ №2239856 от 5 декабря 2002 года.
- 2. 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).
- 3. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Квантовая электроника*, <u>33</u>, 380 (2003);
- 4. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Квантовая электроника* <u>34</u>, 569 (2004).
- 5. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН №22* (М. ФИАН, 2003) (см. <a href="http://ellphi.lebedev.ru/4/Stoilov1.pdf">http://ellphi.lebedev.ru/4/Stoilov1.pdf</a>).
- 6. Стойлов Ю.Ю. *УФН*, <u>174</u>, 1359 (2004).
- 7. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН №12* (М. ФИАН, 2005) (см. <a href="http://ellphi.lebedev.ru/11/pdf12.pdf">http://ellphi.lebedev.ru/11/pdf12.pdf</a>).
- 8. Laser beam in linearly birefringent Plexiglas. (http://www.mip.berkeley.edu/physics/E+45+110.html).
- 9. K. Ko cevar «Physics of surfaces and interfaces» March 2005 (http://www2.ijs.si/~kkocevar/skripta.pdf).
- 10. Haney M. *Popular Science*. November (2005) <a href="http://www.popsci.com/">http://www.popsci.com/</a> popsci/science/0a03b5108e097010vgnvcm1000004eecbccdrcrd.html).
- 11. Benattar J.-J., Shen Q., Bratskaya S., Petkova V., Krafft M. P., Pucci B. *Lang-muir*, *20*, 1047 (2004).
- 12. Kumar A., Khusid B., Qiu Zh., Acrivos A. *PHYS. REV. LETS* 258301-1 (2005). (See Suppementry\_Video.mpg)
- 13. Стойлов Ю.Ю., «Способ разделения частиц методом диэлектрофореза», патент РФ №2253109 от 17 февраля 2004 года.
- 14. Дзялошинский И.Е., Лифшиц Е.М., Питаевский Л. Д. **УФН**, <u>73</u>, 381, (1961)
- 15. Кругляков П.М., Ексерова Д.Р. Пена и пенные пленки. Л.: Хим. 1990. 432 с.
- 16. Kupershtokh A.L., Medvedev A.D., PHYS. REV. E 74, 021505 (2006).

17. Кайтуков В.М. «Лекции по философии в Физическом институте РАН» (М. ФИАН, 2005) (<a href="http://ellphi.lebedev.ru/12/lekcii.pdf">http://ellphi.lebedev.ru/12/lekcii.pdf</a>).