

ОБЗОРЫ не АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Мыльная пленка - как объект оптических исследований (Лазерный луч в мыльной пленке – продолжение)

А.В. Старцев, Ю.Ю. Стойлов

Представлен обзор и краткая история исследования нового физического явления – необычных нерасходящихся лазерных треков в тонких жидких пленках, обсуждаются их свойства и механизм образования

Ключевые слова: нелинейные явления, лазерные треки, мыльные пленки, световое давление

Содержание

1. Введение

2. Краткая история и основные методы исследований

- 2.1. О двойном лучепреломлении
- 2.2. О монохроматичности излучения и составе пленки
- 2.3. Порог для треков
- 2.4. Резонансные свойства и треки
- 2.5. О выходном излучении из треков и о треках с солнцем
- 2.6. О нагреве пленок
- 2.7. Охлаждение пленок испарением
- 2.8. Вязкие растворы, моды
- 2.9. Наложение электрического поля
- 2.10. Одиночный трек
- 2.11. Тупик идей

3. Световое давление

- 3.1. Оценки и динамика формирования
- 3.2. Оценка порога образования трека
- 3.3. О динамике полос треков на экране
- 3.4. Перестройка ребра пленки треком
- 3.5. Сложность теоретического описания
- 3.6. Подробности эксперимента с бензиновой пленкой на воде
- 3.7. Без внутренних отражений в пленке нет треков
- 3.8. Увеличение прочности пленки
- 3.9. Треки с мощным белым светом
- 3.10. О возможности воздействия на путь трека
- 3.11. Световое давление используют для перестройки
- 3.12. Пленка на паутине

4. Заключение

Список литературы

1. Введение. Необычное и во многом загадочное поведение лазерного луча (10 мВт) с образованием узких нерасходящихся треков (30 мкм) в мыльной пленке (толщиной 1-10 мкм), кратко описанное нами в предыдущем обзоре [1], вызвало широкий интерес среди молодых и зрелых специалистов, исследующих нелинейность этого процесса, свойства треков в разных условиях и с разных точек зрения.

Разбиение лазерного луча на тонкие треки легко наблюдается невооруженным глазом во всех мыльных пленках любого состава при всех применявшихся непрерывных и импульсных (нано-, фемто-секундных) лазерах с длиной волны 0.4 - 1.1 мкм и с мощностями 10 мкВт - 10 кВт (с крайне нехарактерной для нелинейных процессов слабой зависимостью вида треков от мощности [1]) (Рис. 1).



Рис. 1. Наблюдение лазерных треков в мыльной пленке под разными углами.

Свежая мыльная пленка обычно имеет толщину 5-10 мкм, но со временем ее толщина уменьшается почти в тысячу раз до 5-10 нм (практически до толщины двух молекул мыла). Раствор из свежей пленки постоянно стекает в край пленки, в ребро, и от скорости стекания зависит время жизни пленки. В объеме раствора такие треки не образуются. Но почему они образуются в пленке? И при этом нет каких-либо нелинейностей, связанных с преобразованием частоты, поскольку с точностью до 0.001 нм длина волны лазерного света, выходящего из треков, совпадает с длиной волны возбуждающего излучения (632.8 нм).

Предлагалось много возможных причин формирования треков, которые из-за явного несогласования с экспериментальными результатами постепенно отклонялись. В частности обсуждался механизм формирования треков за счет дифракции на неоднородностях пленки [2], но он совсем не объяснял, почему расхожимость дифрагирующих лучей оказывается

существенно меньше угла фокусировки вводимого в пленку лазерного излучения, и тоже был отвергнут. После перебора и отсутствия подходящих причин среди известных стало понятно, что при полной неясности потребуются кропотливые и разнонаправленные исследования свойств этих необычных треков, поиск по крупницам зацепок, которые могли бы помочь нащупать хотя бы намек на причину их образования.

2. Краткая история и основные методы исследований

К препринтам в ссылках прилагаются короткие кинофильмы, ценность которых в наглядности необычной динамики лазерных треков, непередаваемой словесным описанием и рисунками.

2.1. О двойном лучепреломлении. В ходе исследований было обнаружено наличие двойного лучепреломления лазерных треков в обычных мыльных пленках толщиной около 1 мкм [3]. Показатель преломления для треков с перпендикулярной к пленке поляризацией по оценкам равен $n_p=1.25\pm 0.03$, а для треков с горизонтальной к пленке поляризацией $n_g=1.045\pm 0.03$. Это свойство позволило объяснить одну из загадок треков – весьма странную штриховую структуру, наблюдавшуюся в некоторых треках [1]. Помощь в этом оказали найденные в литературных источниках ранее полученные экспериментальные результаты и аналогии, которые позволили нам объяснить наблюдаемую в треках штриховую структуру на основе изменения направления поляризации в пленках с двойным лучепреломлением [3]. Рассеянный свет лазера на участках трека, где вектор поляризации направлен к наблюдателю, оказываются для него невидимыми, темными (Рис. 2).

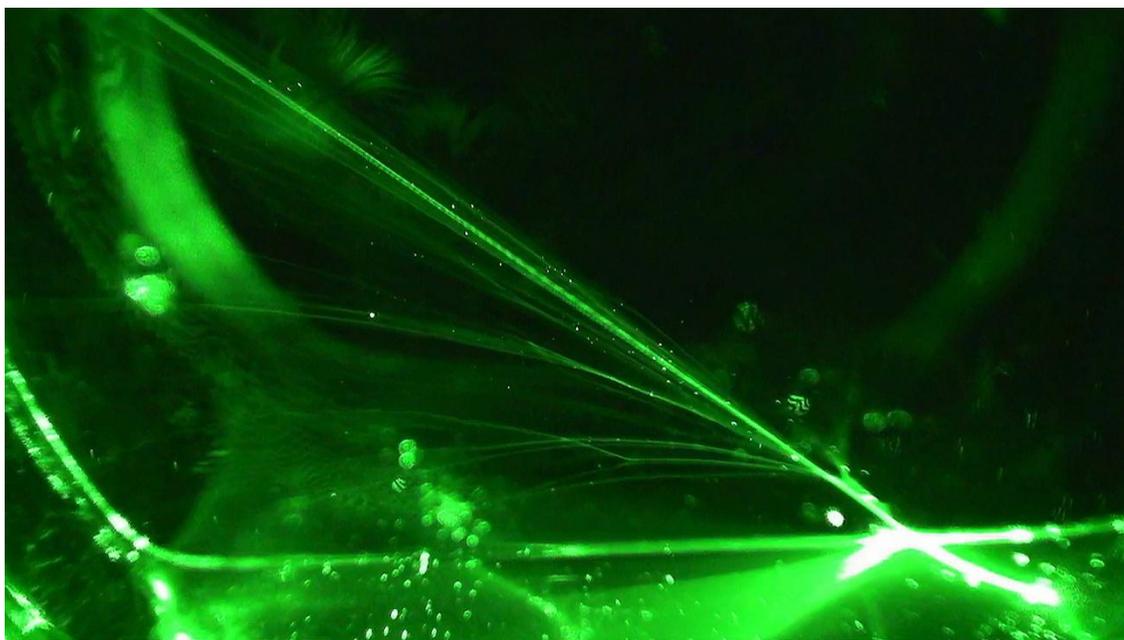


Рис. 2. Штриховая структура на лазерном треке (его длиной ~ 5 см) в вертикальной пленке (объяснение в статье), толщина которой с высотой уменьшается, что приводит к сокращению длины штрихов почти в 10 раз.

На Рис.2 видно, что на вертикальной пленке в области более тонкого участка длина штрихов уменьшается почти в 10 раз [9]. Таким образом, наблюдаемые темные участки на треке являются следствием наличия обнаруженного нами двойного лучепреломления и

изменения направления поляризации в пленках, но к причине образования узких треков оно нас не приближает.

2.2. О монохроматичности излучения и составе пленки. Может быть, для образования треков важна монохроматичность лазера? Нет, оказалось, что для образования треков монохроматичность излучения не нужна, поскольку, как было продемонстрировано [3], узкие треки в пленках образуются и при возбуждении непрерывными люминесцентными ($\Delta\lambda \sim 20$ нм) источниками света. Важен состав самой пленки? Нет, и состав пленки неважен, поскольку треки наблюдаются не только в мыльных, но и в других пленках, таких как в пленке из даммарного лака [1], в свободных тонких пленках диаметром ~ 8 мм из жидких кристаллов ЖК-807 [9], в пленках из раствора так называемого не ионного мыла «Тритон-405» в глицерине и других пленках. В них поведение треков не отличается от поведения в обычных мыльных пленках, что свидетельствует о возможности формирования треков в пленках разного состава и без воды. Позже были получены треки в бензиновых пленках на воде без мыла (об этом ниже). Если треки определяются не составом среды и не видом света, то чем? Ведь в треках-то больше ничего нет. Что исследовать? Что менять?

В любом случае для опытов надо иметь прочные (долгоживущие) мыльные пленки. Пробы показали, что для увеличения времени жизни пленок можно добавлять в водные мыльные растворы диметилсульфоксид (ДМСО), $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$ в объемных долях 1-50%, который заметно снижает поверхностное натяжение мыльных растворов. В закрытом объеме пленка из такого раствора сохраняется сутками [3].

2.3. Порог для треков. Была оценена пороговая интенсивность и энергия накачки для образования треков под действием излучения импульсного полупроводникового лазера (680 нм) [4]. Она оказалась слишком низкой для привлечения в качестве причины каких-либо известных нелинейных процессов. При длительности импульса 0.1 мкс пороговая мощность накачки составляла 0.2 мВт (энергия $2 \cdot 10^{-11}$ Дж), и поэтому для объяснения треков требовался поиск новых механизмов нелинейности.

2.4. Резонансные свойства и треки. Как уже отмечалось [1], треки в пленке получаются не только при вводе излучения через край (ребро) пленки, но и сверху на поверхность пленки. Когда на свежую пленку сфокусированное лазерное излучение падает под скользящим углом к поверхности ($\sim 5^\circ$) в свежей пленке иногда появляется трек, и если трек появился, то при этом заметно увеличивается интенсивность света, проходящего (!) через пленку (вместо 5% до 50%) [4].

И еще вот такое наблюдение. Если пятно фокусировки лазера при сохранении угла падения плавно опускается по вертикальной пленке сверху вниз, пересекая на ней интерференционные полосы, то треки возникают только в некоторых местах пленки, точнее, в некоторых местах каждой из пересекаемых интерференционных полос пленки. И, что интересно, возникают в этих местах тогда, когда пятно пересекающего пленку света лазера (его наибольший размер на пленке меньше миллиметра и яркость значительно

меньше, чем у ниже рождающихся треков) еще не доходит до этих выделенных зон пленки почти на сантиметр [12] (Рис.3).

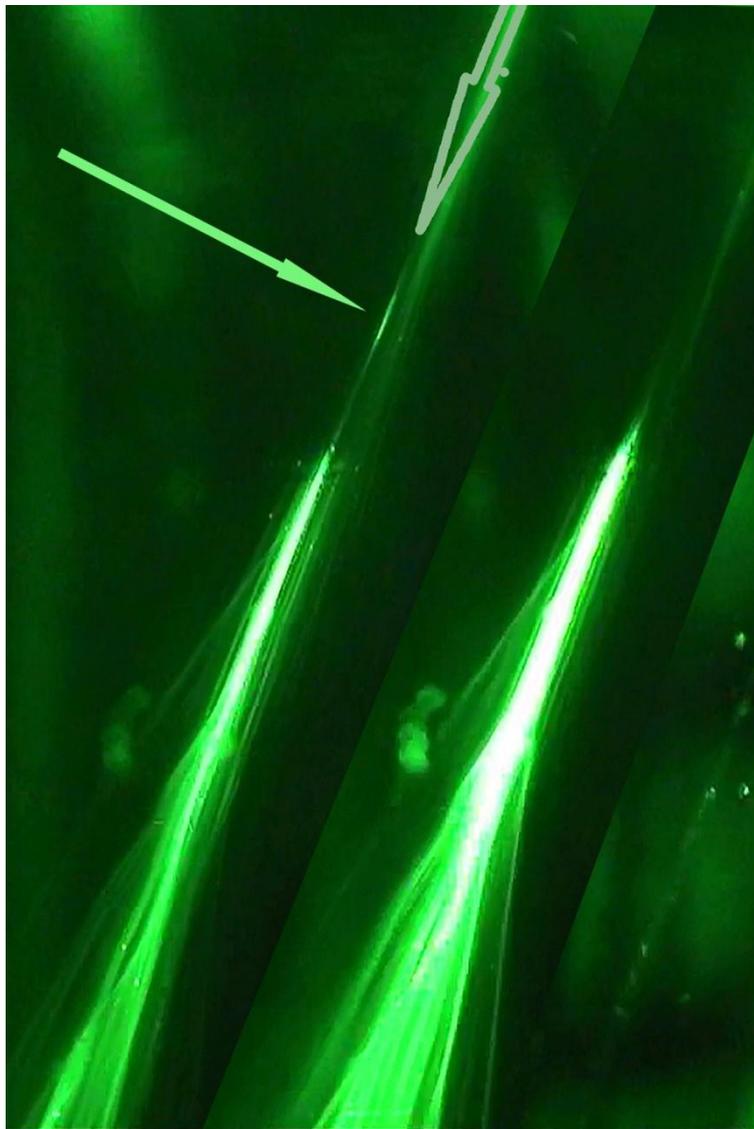


Рис. 3. Сфокусированный лазерный луч падает сверху на поверхность вертикальной мыльной пленки под скользким углом ($\sim 5^\circ$) (место фокусировки ~ 1 мм отмечено сплошной стрелкой) и пересекает ее. Часть излучения остается в пленке и идет по ней вниз (след едва заметен) до места, где из-за резонансных свойств пленки в ней рождается пучок ярких треков. При опускании пятна фокусировки чуть ниже (правая часть рисунка) треки начинают рождаться прямо от места фокусировки.

И снова при появлении треков резко (почти на порядок) увеличивается интенсивность проходящего через пленку света и уменьшается интенсивность отраженного.

Это показывает, что трек формируется при благоприятных резонаторных свойствах пленки, т.е. когда пленка с двумя отражающими поверхностями, как резонатор Фабри-Перро, начинает интенсивно накапливать и пропускать падающее на нее излучение. Как известно, при высоком отражении зеркал резонатор Фабри-Перро имеет внутреннее поле в добротность раз превышающее интенсивность падающего на него излучения, что способствует образованию трека. (Так, из-за высокой добротности в резонаторе LIGO, используемом для регистрации гравитационных волн, поле внутри резонатора в сто раз более мощное, чем у освещающего его лазера [6]).

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, чуть рассеиваясь, как по каналу с идеально

отражающими стенками. В пленке из прозрачного раствора из-за высокой внутренней интенсивности света лазерные треки всегда выглядят значительно ярче, чем след от сфокусированного лазерного луча в объеме того же раствора.

2.5. О выходном излучении из треков и о треках с солнцем. Выходное излучение из треков на экране имеет вид узких, вытянутых перпендикулярно пленке полос. Поскольку количество наблюдаемых полос на экране практически полностью совпадает с количеством ярких пятен на выходном ребре, был сделан вывод, что эти полосы не связаны с интерференцией. Каждая вытянутая яркая полоса соответствует своей яркой точке на выходном ребре пленки [4], и ее угловые размеры характеризуют направления лучей света в треке.

Используя свет дуговой лампы (как аналог солнца), мы обнаружили, что характерные для треков пятна выходного излучения в пленке возникают и с таким некогерентным источником. Цвет выходных полосок показывает, что белое излучение лампы не идет по одному каналу, а разбивается на отдельные треки разного цвета. Стало понятно, что, используя излучение солнца, такие вытянутые выходные пятнышки, характерные для 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 ньютонскими пленками» [4].

2.6. 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 [4]), тогда была высказана гипотеза о том, что механизм образования треков мог бы быть связан с испарением воды из тонкой пленки. К случайному чуть более теплomu 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 с короткими импульсами значительно более низкая пороговая мощность потока и малая энергия, вызывающих образование треков, и подтвержденная в опытах с кратковременной и некогерентной накачкой, оказываются явно недостаточными для какого-либо заметного разогрева пленки даже при полном поглощении падающего светового потока. Это показывает, что при пороге образования каналов тепловой нагрев практически не работает, и это не позволяет принять такой механизм образования треков.

Но мы все-таки попытались изменить условия испарения так, чтобы проверить, 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 воздуха, 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.

2.7. Охлаждение пленок испарением. При высоких интенсивностях накачки влияния испарения с пленки может проявиться, и это имеет отношение к лазерам на мыльных пленках [4]. Как мы уже отмечали [1], при наличии лазерного красителя и мощного оптического возбуждения в пленке можно получить лазерную генерацию, для которой известны КПД генерации около 50%. Так вот, интересно то, что тонкая пленка весьма эффективно себя охлаждает испарением и охлаждает с рекордной для конденсированных лазерных сред скоростью отвода тепла – с поверхности пленки испарение может уносить поток тепловой энергии около 10 кВт/см^2 .

Динамический обменный поток молекул воды Z с единицы поверхности в секунду, которые постоянно улетают и садятся на пленку, в равновесных условиях определяется выражением [7]

$$Z = p/(2\pi mkT)^{0.5} \quad (1),$$

где p – давление паров, m – масса молекул, T – температура. При комнатной температуре, когда $p = 3 \text{ кПа}$, поток $Z = 3.3 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}\text{с}$, 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 удивляющую 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 [1]. 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/см^2 можно рассчитывать на получение с одного канала трека непрерывного лазерного излучения в сотни ватт при объемной плотности излучения 10 МВт/см^3 . Это возможность может представить интерес для некоторых приложений. Отметим, что для отвода тепла с интенсивностью 10 кВт/см^2 с помощью, скажем, излучения черного тела потребовалась бы температура поверхности более 6000 градусов [4].

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 таких лазеров новые цветные мыльные молекул с внедрением в них лазерных красителей, так называемое «цветное мыло», о создании которых сообщается в [8].

2.8. Вязкие растворы, моды. Для замедления характерного для обычных мыльных растворов быстрой неконтролируемой перестройки треков мы пошли по пути замедления их движения с помощью повышения вязкости растворов для пленок. Были созданы и исследованы специальные растворы на основе глицерина и вязкого меда с поверхностно

активными веществами и пленки из них. Особенности поведения треков в глицериновой пленке описано в [9]. (Для ознакомления с характерной динамикой исследуемых треков рекомендуем два небольших фрагмента отснятого нами документального фильма [10, 11].)

Свежая глицериновая пленка живет на воздухе несколько суток. Это позволяет провести ее охлаждение и наблюдать в ней обычные треки при минусовых температурах до -80°C , когда вязкость глицерина увеличивается в тысячу раз. Треки при этом ведут себя в ней обычным образом, но в замерзшей, остеклованной глицериновой пленке треков нет.

Наклонные треки в свежей, освещаемой снизу лазером вертикальной пленке разбиваются на группы, каждая из которых идет до определенной толщины пленки и выходит из нее. Мы связываем эти группы с типами колебаний, с модами, имеющими в пленке разные показатели преломления [12, 17].

2.9. Наложение электрического поля. В поиске причин были проведены опыты по воздействию перпендикулярного к пленке электрического поля на треки в ней. Оказалось, что лазерные треки в мыльных пленках совершенно не реагируют на наличие даже киловольтного вертикального к пленке импульсного внешнего электрического поля от близкорасположенных около пленки электродов вплоть до пробоя, когда пленка рвется.

Можно ввести в пленку две проволочки и, раздвигая их, менять толщину пленки на пути трека между ними, на что трек слабо реагирует. Для проверки воздействия на пленку горизонтального с ней электрического поля можно подать на проволочки высокое напряжение 30 кВ или разряд от искрового течеискателя Теслы (Рис.4).

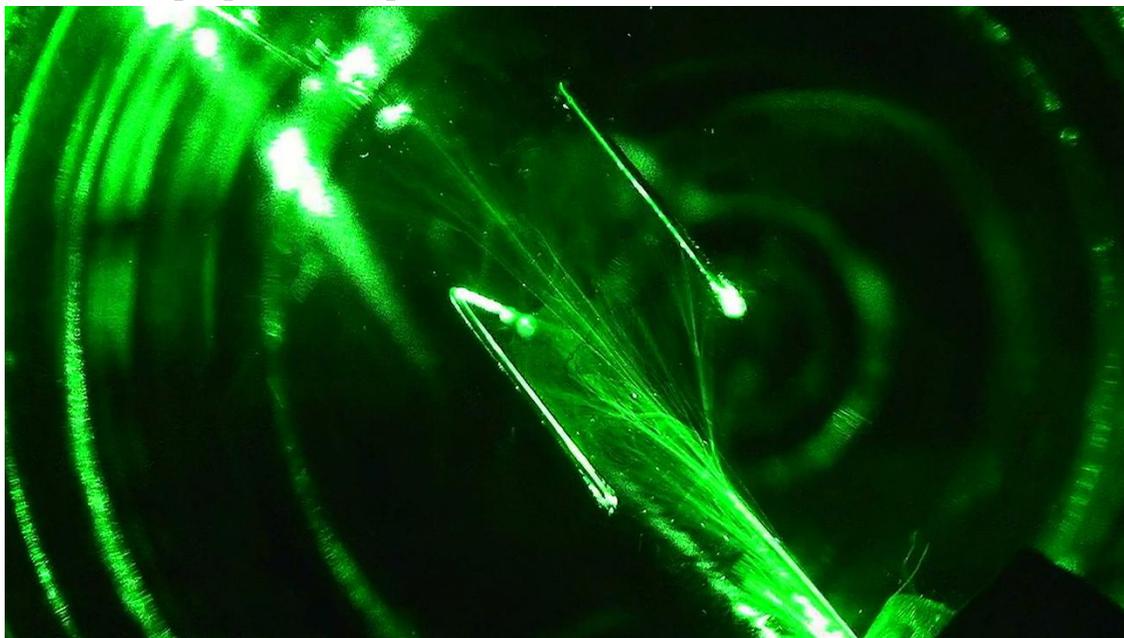


Рис. 4. В пленку в качестве электродов введены две проволочки (длиной ~ 1 см), между которыми пропускаются лазерные треки. При подаче между проволочками высокого постоянного или переменного напряжения (от течеискателя Тесла) вплоть до пробоя картина треков не меняется.

До пробоя по воздуху треки на такие напряжения не реагируют, пока пленка не порвется. Траектория трека малочувствительна к таким нашим воздействиям и совершенно не меняется при приложении к пленке ни горизонтальных, ни вертикальных киловольтных электрических полей вплоть до пробоя пленки [12].

2.10. Одиночный трек. Меняя в плоскости пленки угол ввода излучения лазера в вертикальную вязкую медовую пленку, иногда можно получить в ней один стационарный трек шириной в несколько десятков микрон, идущий без расширения по пленке разной толщины на расстояние 7 см (Рис.5).

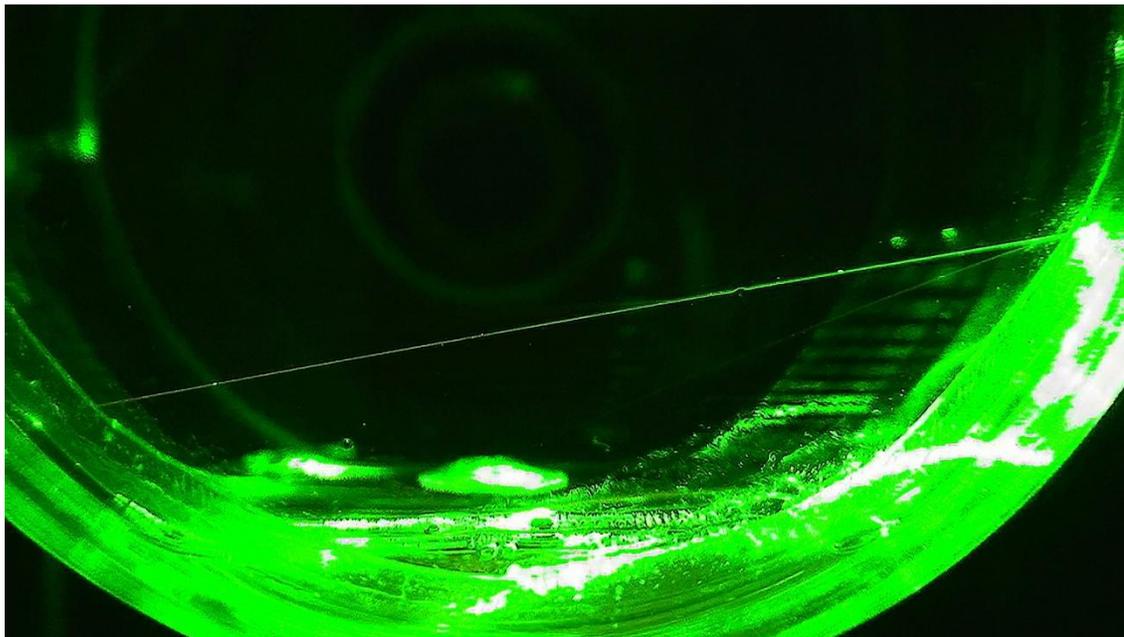


Рис. 5. Стабильный одиночный трек длиной 7 см и шириной около 30 мкм в вертикальной мыльно-медовой пленке (диаметром 10 см), пересекающий 7 интерференционных полос.

При этом он пересекает на пленке около 7 интерференционных полос и сохраняет такую форму часами [12].

Не понятно в этих опытах следующее - если слабый свет трансформирует, меняет среду и создает в ней трек, то почему на трек не воздействует сильное электрическое поле от Теслы? Как это понимать? Что физически действует на пленку? Не электрическое поле, не тепло. А что? Треки есть при любом сорте ПАВ или мыла, любых проходящих в пленках длинах волн излучения, при любой их поляризации и ширине спектра. Сумма представленных выше фактов интересна, но механизма образования нерасходящихся треков не открывает. Где искать причину? Полная неизвестность. Руки опускаются. Тупик.

2.11. Тупик идей. Общепринято, что необходимым условием появления волноводных каналов в конденсированных средах является увеличение показателя преломления среды. В треке, по предположениям, это могло бы быть в результате сортировки молекул в пленке электрофорезом, из-за особенностей поверхностных волн или поляритонов, из-за влияния уплотнения ограничивающих слоев или ориентировки молекул. Но эти и другие рассмотренные нами и предлагавшиеся другими механизмы формирования не дают удовлетворительного объяснения всех свойств треков и их удивительной крайне слабой зависимости от интенсивности, нехарактерной для известных нелинейных процессов.

Монументальные теоретические труды по свойствам слоистых сред и плоских волноводов [13-15] и консультации со знающими оптику теоретиками здесь не помогают. В этих работах нет упоминаний о возможности формирования узких световых каналов при таких мощностях.

Но может быть, у света есть возможность в рамках физических законов образовывать узкий канал в пленке и без обязательного для сплошных сред увеличения показателя преломления? Абсурд? Ведь, если нет увеличения показателя преломления, то что же в этом случае будет удерживать свет в канале? Новая физика, слипание фотонов?

А что, если свет меняет не среду, а плоскую форму пленки под действием светового давления? Может ли свет продавливать трек в пленке?

3. Световое давление.

3.1. Оценки и динамика формирования. Да, оценки показывают [16,17], что продавливать может. Радиус возникающего цилиндрического искривления R определяется

противодействием

поверхностного натяжения σ пленки световому давлению p по формуле

$$R = \sigma / p. \quad (2)$$

При обычной для наших пленок величине $\sigma \sim 40$ дин/см при мощности лазера 10 мВт при отражении под углом около 45° от двух сторон пленки в ней друг против друга возникают два выпуклых зеркала цилиндрического резонатора (с полным внутренним отражением) и радиусом $R=5$ см, разнесенные на толщину пленки L (Рис.6).

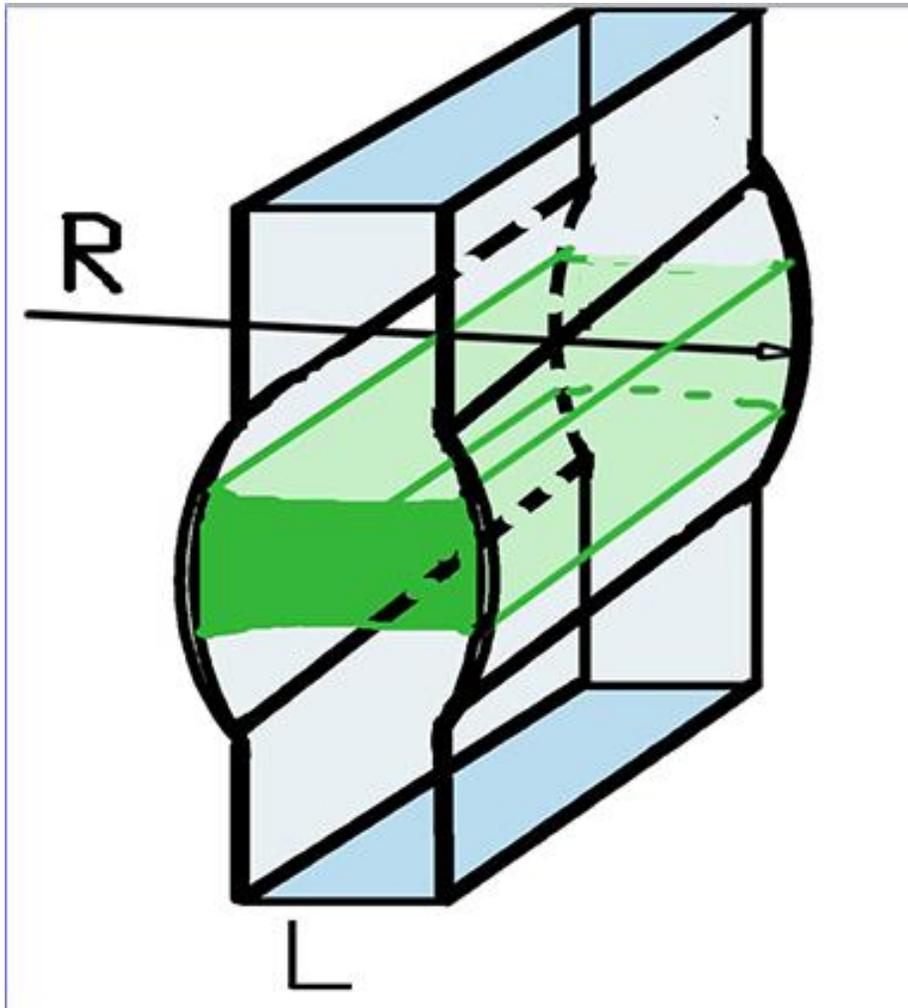


Рис. 6. Схема образования цилиндрических выпуклостей на плоской мыльной пленке за счет светового давления в треке.

Для хорды 0.1 мм при таком радиусе возвышение над ровной поверхностью пленки составляет 2.5 нм. Отметим, что 2.5 нм - это малая величина, характерная для наноструктур, для нанотехнологии, но она заметно больше амплитуд хаотических тепловых капиллярных волн на поверхности жидкости, высота которых обычно не превышает несколько ангстрем [19].

При наблюдении вдоль трека по пленки трек представляет из себя лазерный резонатор с идеально отражающими вогнутыми зеркалами с рассчитанным выше радиусом и разнесенными на толщину пленки. По известным формулам для таких лазерных

резонаторов [например, 14] свет фокусируется вогнутыми зеркалами в перетяжку, в каустику шириной w_0 :

$$w_0^4 \beta^2 = \{L(4f - L)\} \quad (3),$$

где $\beta = (\pi/\lambda)$, λ - длина волны (532 нм), L – расстояние между зеркалами, f –фокальное расстояние зеркал ($f=R/2$). При $R=5$ см и $L=10$ мкм величина $w_0 \sim 18.4$ мкм. По этой же формуле при $R=1$ см и $L=1$ мкм $w_0 \sim 7$ мкм. При $R=1$ мм и $L=1$ мкм $w_0 \sim 4$ мкм.

Из-за полного внутреннего отражения образующийся цилиндрический зеркальный резонатор имеет высокую добротность, и интенсивность поля в нем может в добротность раз, т.е. в десятки и сотни раз, превышать интенсивность входного лазерного излучения. Для геометрии трека такую добротность резонатора трудно оценить, но ожидаемый рост светового давления должен заметно увеличить возвышение пленки в области трека и уменьшить радиус выпуклости.

Небольшое расстояние между зеркалами, разнесенными на толщину пленки L , обеспечивает микронные размеры перетяжки и такие же поперечные размеры световой зоны на зеркалах, и, что важно (!), четвертая степень в уравнении (3) делает перетяжку мало зависящей от интенсивности лазера и радиуса образующихся зеркал (такая слабая зависимость свойств трека от интенсивности была крайне непонятной). Рассчитываемые размеры перетяжек согласуются с поперечными размерами наблюдаемых треков в пленках.

Для формирования выпуклости и стягивании в нее раствора, для установления поперечного размера трека требуется некоторое время. Идет процесс согласования – чем уже перетяжка, тем выше интенсивность света на поверхностях, тем больше его давление, тем меньше радиус зеркал, тем лучше их фокусировка и меньше перетяжка и так далее до установления равновесной формы трека, при которой давление света компенсируется натяжением пленки. Такую динамику формирования трека можно наблюдать на Рис.7.

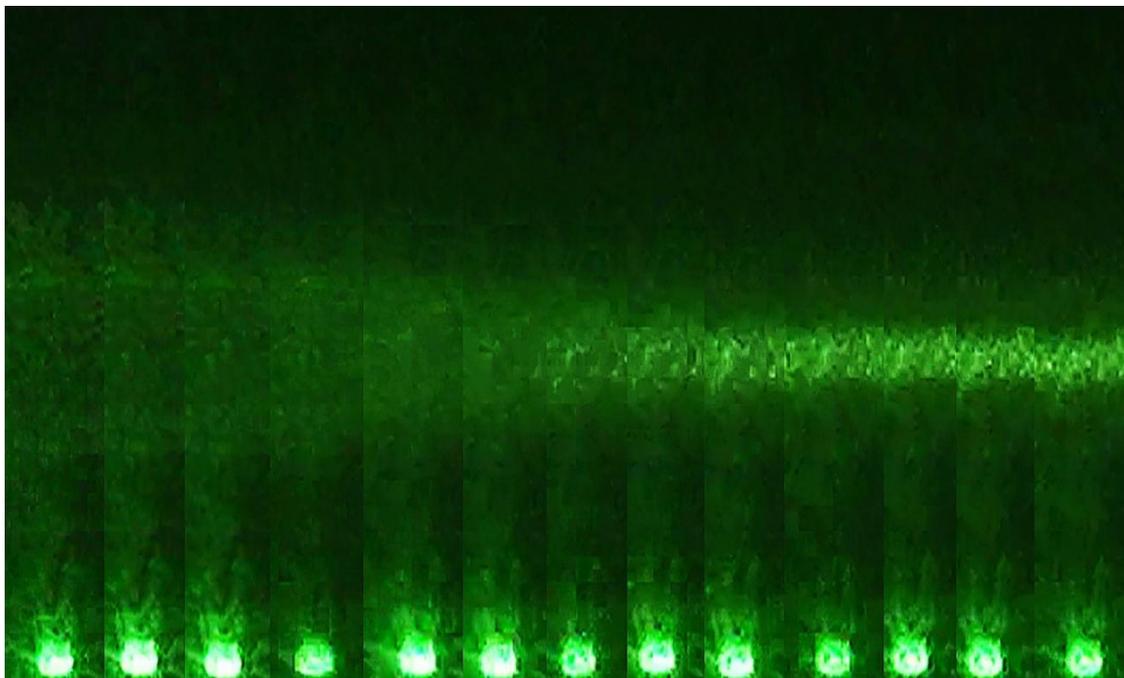
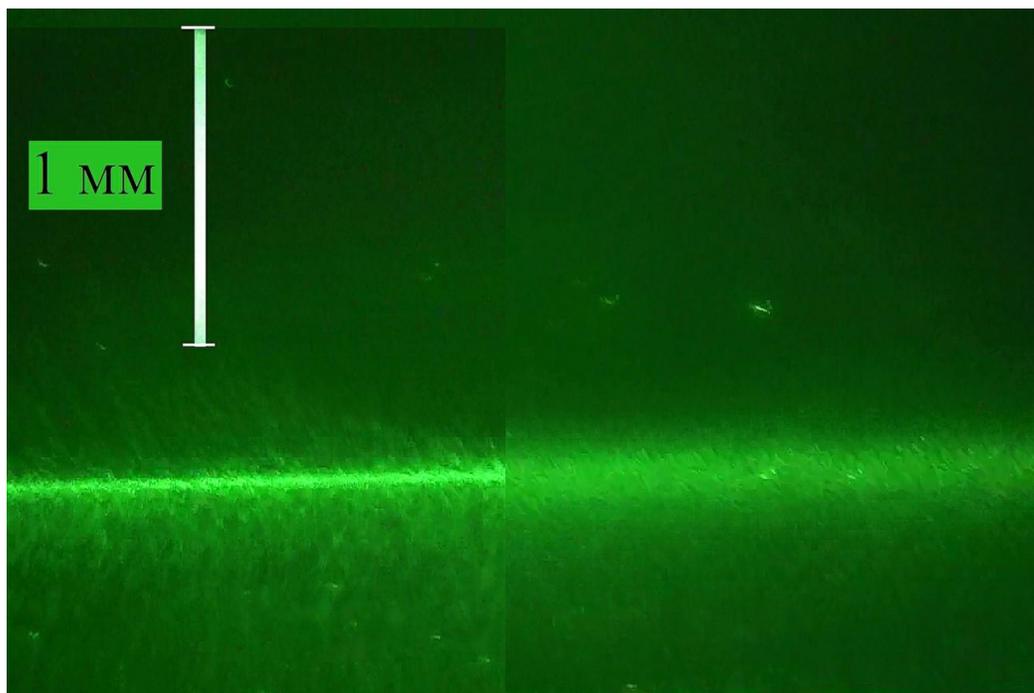


Рис. 7. Динамика формирования лазерного трека в вязкой пленке (между точками снизу 0.1 с).



На Рис.8 показано, как стационарная ширина трека уменьшается с ростом интенсивности. Правая половина рисунка показывает вид трека при мощности излучения 2 мВт, левая – при 20 мВт. Вертикальная полоска – 1 мм.

Рис. 8. Изменение стационарной ширины трека при изменении мощности излучения лазера. Правая часть – при мощности 2 мВт, левая – при 20 мВт.

3.2. Оценка порога образования трека. Минимальная интенсивность света $I_{\text{мин}}$, необходимая для образования канала, определяется пороговой величиной выпячивания поверхности, которая по высоте должна превосходить амплитуды a_0 обычных капиллярных волн на поверхности, порождаемых тепловым движением молекул жидкости,

$$a_0 \sim (kT/\sigma)^{0.5}, \quad (4)$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура жидкости) [19]. При понижении температуры пороговая интенсивность $I_{\text{мин}}$ понижается, и в этом смысле эффект появления треков является беспороговым – пленка реагирует на любой свет [14].

Таким образом, рассмотренный механизм формирования «зеркального» волновода однородным потоком любого проходящего в пленке излучения (включая не только световое, но, как мы понимаем, и ультразвуковое излучение) без увеличения показателя преломления среды дает ключ к разгадке физики треков и позволяет объяснить основные особенности этого, как мы назвали его в нашей первой работе [5], «чуда».

Становится понятно, с чем связаны отмеченные в обзорах свойства треков, такие как отсутствие у них расходимости, слабая зависимость вида треков от интенсивности и поляризации излучения, от внешних воздействий, электрических полей, от состава жидкой пленки, диапазона и спектра светового излучения, причина яркости самих треков в самых прозрачных пленках, их явная связь с модами, способность идти прямо через участки пленки разной толщины, не замечать мелких пылинок в пленке, их склонность расщепляться на несколько узких треков на крупных неоднородностях, возможность их формирования с одиночными наносекундными и серией фемтосекундных импульсов, малое взаимодействие треков при пересечении и отсутствие подобных треков в сплошной среде.

Понятно, что механизм светового давления позволяет ожидать и формировать треки не только в плоских или изогнутых пленках из любых жидкостей с гибкой поверхностью на

воздухе, но и в их тонком слое, находящемся в окружении других жидкостей или на подложке с меньшим показателем преломления, или в слое жидкости на идеальной зеркальной поверхности.

Для управления треками можно использовать создание локальных оптических неоднородностей, например, воздействием на поверхность другим лазером или нагревом участка пленки на пути трека поглощаемым в жидкости излучение, например, CO_2 лазера.

Таким образом, треки в пленках могут быть использованы для простого, и наглядного знакомства школьников с результатом механической работы света и наноразмерных трансформаций поверхностей под действием светового давления и с разъяснением трудных опытов Лебедева П.Н. с вращением крыльчати. Физика оптических треков весьма богата, поскольку объединяет в себе характерное для космоса световое давление, отклоняющее хвосты комет, нанотехнологию при формировании зеркал, историю ФИАН с измерением светового давления, его лазерное настоящее и фотонику будущего.

Итак, механизм прояснился, но нас ожидало еще немало интересных находок.

3.3. О динамике полос треков на экране. Картина появления одних и исчезновения других полосок на экране связана с динамикой треков в пленке, движение которых ускоряется при увеличении интенсивности излучения накачки. Характерная схема опытов по наблюдению полос на экране показана на Рис.9,

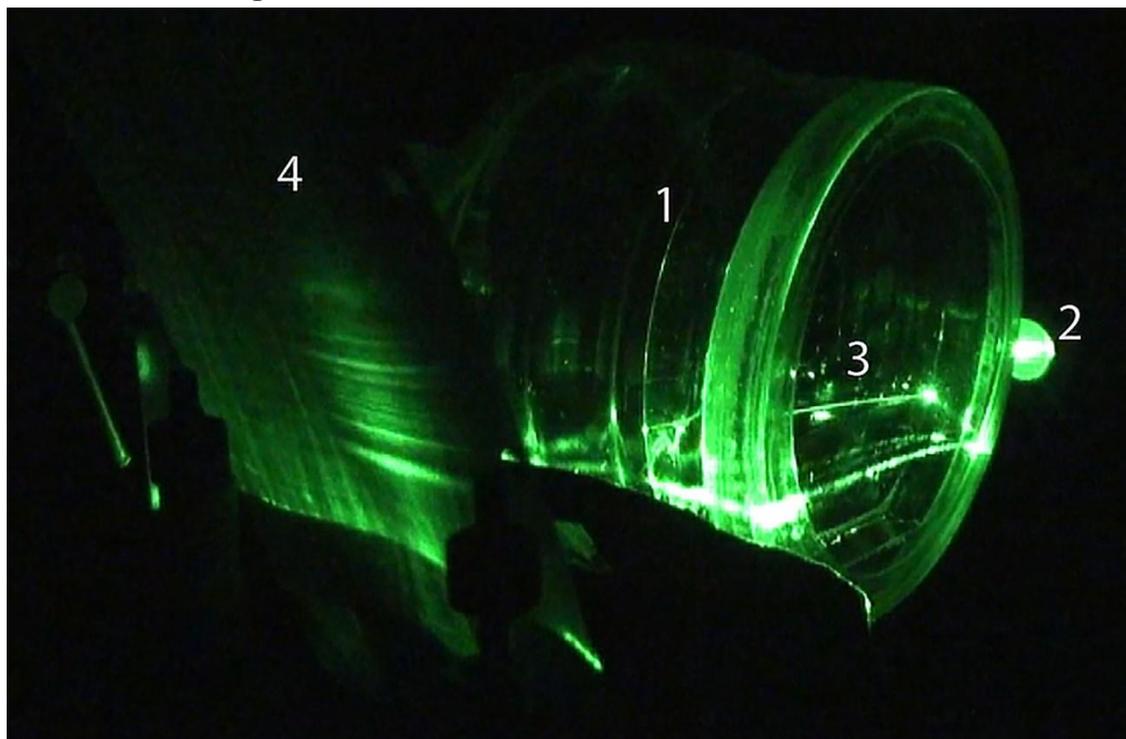


Рис. 9. Особенности взаимодействия одиночного трека с выходным ребром пленки. Одиночный трек на выходном ребре разбивается на десяток отдельных нестабильных мелких каналов, каждый из которых дает на экране свою полосу. Здесь 1- мыльная пленка диаметром 10 см в кювете на расстоянии 1 см от окна для наблюдения, 2- лазерная указка с фокусируемым излучением через прозрачную стенку кюветы, 3- одиночный трек, 4- матовый прозрачный экран на расстоянии 6 см от кюветы (выходные полоски видны с тыльной стороны экрана).

Динамика полосок дана в дополнении к [20].

где 1- кювета диаметром 10 см со стеклянным окном, в которой на расстоянии 1 см от окна находится параллельная окну вертикальная медовая пленка (1), в ребро которой через прозрачную боковую стенку кюветы фокусируется излучение лазера (2). В пленке рождается одиночный трек (3) шириной 20-30 мкм, который без расширения проходит по пленке, затем пересекает ребро, и его выходное излучение фиксируется на прозрачном матовом экране (4), расположенном на расстоянии 6 см от кюветы. На Рис.9 это излучение видно с тыльной стороны прозрачного экрана. Поляризация излучения в этих полосках обычно имеет направление по пленке.

Каждый трек дает на экране свою узкую полоску с характерной большой угловой расходимостью перпендикулярно пленки и малой по пленке. (См. приложенный кинофильм [20]). Расходимости зависят от толщины пленки и меняются со временем. Угловая диаграмма направленности излучения треков из ребра в поперечном к пленке направлении обычно составляет 1-2 радиана, а вдоль по пленке 0.003–0.03 радиана [19]. Перемещений полосок на экране не заметно, они постоянно вспыхивают, исчезают и появляются в новом месте.

3.4. Перестройка треком ребра пленки. О сложном взаимно-нелинейном (буквально игровом) взаимодействии трека с ребром пленки свидетельствуют результаты опытов [19, 20] по наблюдению расщепления одиночного трека при почти нормальном падении на выходное ребро устоявшейся пленки (Рис.9). Это расщепление показывает, что зона перехода из пленки в ребро не является стабильной гладкой ровной границей, а постоянно самим треком перестраивается (!), и в этой взаимной игре динамика границы проявляется в изменениях расщепления одиночного трека и, соответственно, в изменении положений и количества ярких вспыхивающих полосок на экране.

Раньше мы отмечали на экране пятнистую, мигающую структуру света, выходящего не из пленки, а из ребра, образующегося между трех пленок [9 Рис.2]. Проходящий по толстому ребру с полным внутренним отражением лазерный свет здесь, как мы понимаем, тоже динамично меняет форму ограничивающих ребер и поверхностей, и эти вариации проявляются как изменение структуры и яркости двумерной картины пятен выходного света на экране. Свет механически перестраивает не только поверхность пленки в области трека, но и границу с ребром пленки, что приводит к расщеплению и метанию трека у ребра.

Какое-то воздействие на ребро, возможно, является причиной зафиксированного, но неожиданного и пока непонятного отражения трека от утолщения (ребра) пленки, в котором показатель преломления для света заметно больше, чем в пленке. Такое отражение видно на Рис.10,11, где 1- лазерный трек, 2 – утолщение пленки у введенной в нее стеклянной трубки диаметром 5 мм [19].

Здесь треки отражаются от границы перехода от тонкого участка пленки к прозрачному толстому(!) ребру, как от зеркала при углах падения вплоть до 45 градусов! Отражаются так, как если бы в тонкой пленке они шли по стеклу, а толстое ребро было бы для них

воздухом. Но такой разницы показателей преломления на этой границе нет. В пленке показатель преломления заметно меньше, чем в ребре, и, следовательно, полного отражения не должно быть. А оно есть! При наблюдении с увеличением (Рис.11) видно, что отражение трека происходит не резко, а дугой, с некоторым загибом, растянутым в пространстве. Не связан ли этот загадочный загиб с динамикой формирования трека, когда из более толстой части пленки в него быстрее поступает раствор, что приводит к его отклонению в сторону меньшего поступления раствора [21]?

Оптомеханика взаимодействия лазерного трека с поверхностью и краями мыльной пленки дает возможность изучать ранее ускользавшие от наблюдателей мало исследованные свойства воздействия света на среду.

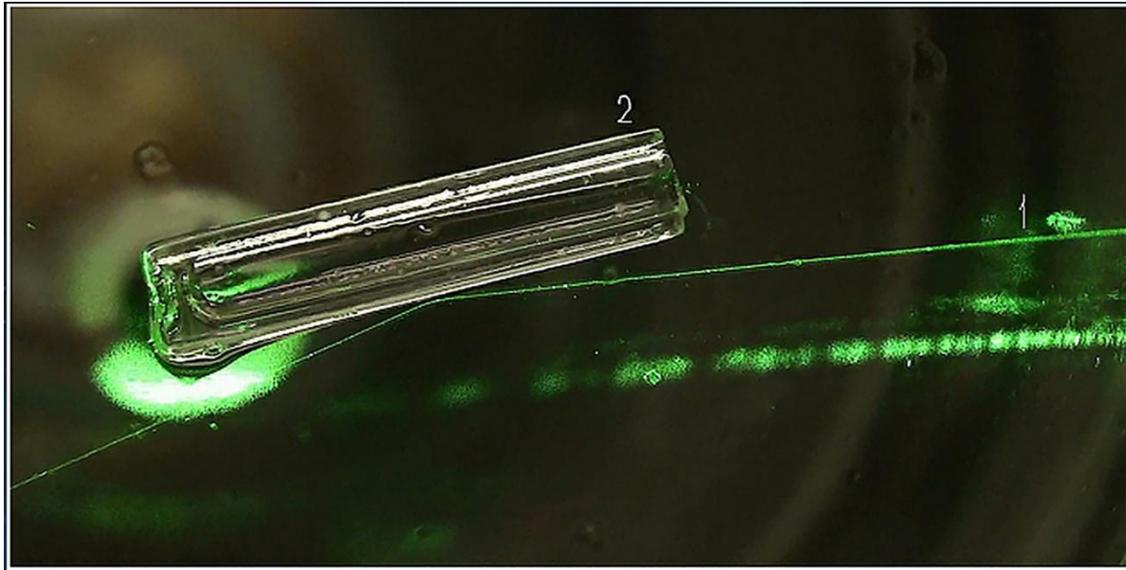


Рис.10. В вертикальную пленку введена стеклянная трубочка (1) диаметром 6 мм, от утолщения (ребра) около которой отражается лазерный трек (2).

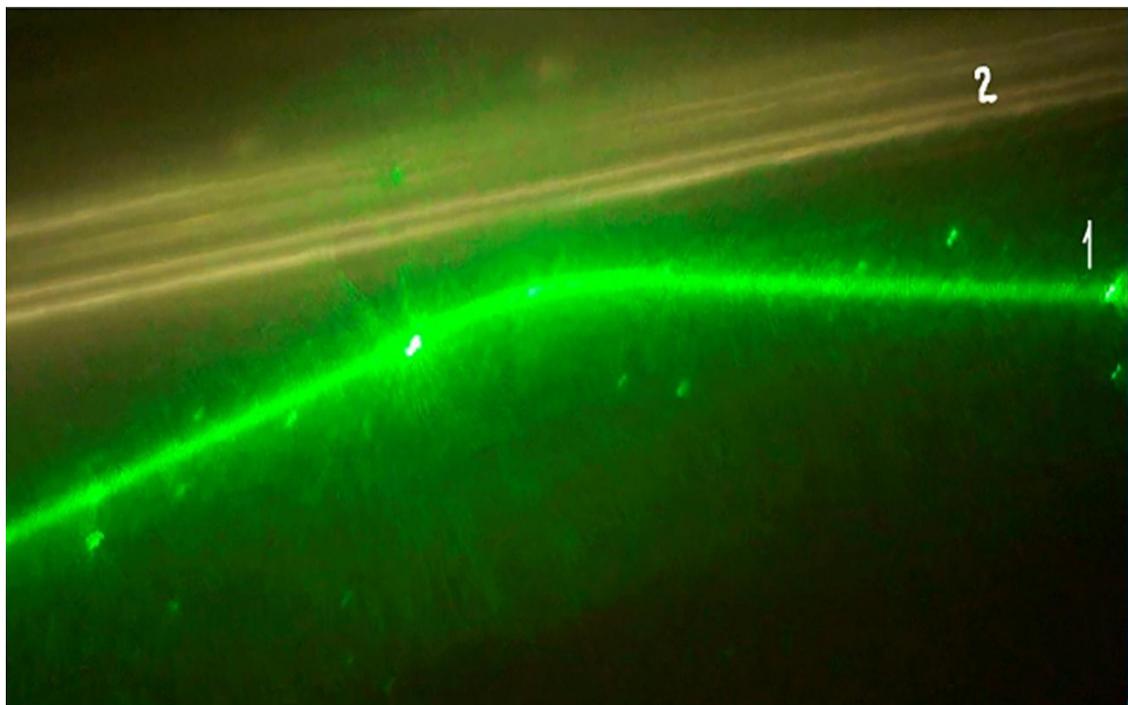


Рис. 11. Снятое с увеличением место отражения трека на Рис.10 от ребра пленки. Отражение имеет форму дуги.

3.5. Сложность теоретического описания. Детальной теории образования треков нет. Сложность 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.

По мере фокусировки излучения в процессе образования треков 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, регистрирующими гравитационные волны по деформации лазерных резонаторов [6].

3.6. Подробности эксперимента с бензиновой пленкой на воде. Мы обнаружили, что узкие нерасходящиеся лазерные треки, которые изучались ранее в свободных мыльных пленках, могут также образовываться и в тонких радужных пленках бензина, лежащих на воде [22]. Для исследований была выбрана пленка бензина (марки 92). Она образовывалась в чашке Петри диаметром 10 см, в которой на поверхность воды наносилась одна капля бензина объемом около 15 мм^3 . Под микроскопом видно, что ширина треков в этих опытах разная, но обычно составляет около 40 мкм. Похожие треки наблюдаются также в пленке керосина и смеси керосина и бензина на воде.

3.7. Без внутренних отражений в пленке нет треков. Был проведен эксперимент [23], позволивший прояснить, какой из выдвинутых механизмов образования треков (увеличение показателя преломления среды и самофокусировка света, электрострикция, дифракция лазерного света на неоднородностях, и механизм светового давления) реально ответственен за их формирование. Треки наблюдаются в разных жидких пленках и при любом свете, но выбрать механизм их образования путем простой вариации этих параметров не удастся, поскольку в каждом механизме присутствует свет и среда и не ясен только механизм их взаимодействия.

Надо выбрать условия, при которых исключался бы механизм формирования треков за счет светового давления. То есть, надо запустить лазерный свет в пленку так, чтобы свет шел по пленке, но не давил на ее поверхности. Тогда условия для работы других механизмов не будут нарушены, и наличие треков в этом случае можно будет объяснить только их воздействием, а не световым давлением.

Понятно, что исключить давление света в пленках толщиной 0.25-10 мкм, в которых обычно наблюдаются треки, нельзя из-за разрешенности существования в них многих мод излучения, идущих в них с отражением от боковых поверхностей. Но светового давления на поверхности пленки практически не будет, когда вдоль пленки дозволено идти только одной основной моде без отражений от поверхностей. Такие условия реализуются в пленках тоньше четверти длины волны идущего по ним света, т.е. для видимого диапазона в пленках тоньше 0.1 мкм или 100 нм.

Такие тонкие пленки существуют и называются черными, поскольку в отраженном свете они не имеют интерференционной радужной окраски, практически не отражают свет и выглядят черными. Сложность состоит в том, что черные участки на мыльных пленках обычно непрочные, в них входит мало света, и появляются они незадолго до разрыва пленки, что затрудняет работу с ними.

Но на основе проведенных опытов мы смогли сделать вывод – в черной пленке треков нет. Введенный в черную пленку свет идет в ней, расширяясь, в угле фокусировки без образования узких каналов [23]. Следовательно, для треков нужна именно многомодовость идущего по пленке света с отражением от поверхностей. Таким образом, результаты этих опытов можно считать важным и дополнительным подтверждением ранее сделанного нами вывода о том, что треки в пленке образуются именно световым давлением.

3.8. Увеличение прочности пленки. Для продления времени жизни жидкой пленки, мы изменили ее состав и добавили к водно-желатиновому раствору еще специально подобранное мыло, глицерин и еще для уменьшения высыхания поместили пленку в герметичный объем [24]. Нагретый до $(35-45)^{\circ}\text{C}$ такой раствор ведет себя как обычная мыльная жидкость, легко образует пленки, но при остывании сам раствор и пленка из него за десятки минут «схватываются», застывают, как студень, и пленка оказывается в желеобразном полужидком, полутвердом состоянии. В отличие от жидкой пленки, толщина которой со временем уменьшается, потоков на ней нет. Застывшая в закрытом объеме желатиновая пленка сохраняет свойства и постоянную толщину в течение года, но при протыкании она схлопывается. Пленки из желатина упруга, как студень или холодец, но треки все-таки образуются и малоподвижны, и в них, как мы понимаем, в области трека для вспучивания поверхности и набухания собирается жидкость из соседних областей пленки.

При наличии в такой пленке одного трека на выходном ребре имеется одна яркая точка, сохраняющая минутами свое положение и постоянную интенсивность (Рис.12). Наличие длинного тонкого канала позволило получить ответ еще на один вопрос – подходит ли такой световой канал для передачи информации? Можно ли по нему передавать сигнал, например, с помощью азбуки Морзе?

В простом опыте с перекрытием входного лазерного луча выяснилось, что наблюдавшийся до этого стабильный трек в пленке за секунду перекрытия луча лазера рассыпается (Рис.12), и для восстановления одного канала трека затем требуется несколько минут (!) непрерывного лазерного воздействия на пленку. Это показывает, что стабильный,

на взгляд, одиночный трек является результатом сложного динамического взаимодействия введенного излучения со структурой пленки, реагирующей на резкие перепады интенсивности (и информации) в формирующем луче. Эти особенности следует учитывать при оценке возможностей передачи информации по сформированному треку.

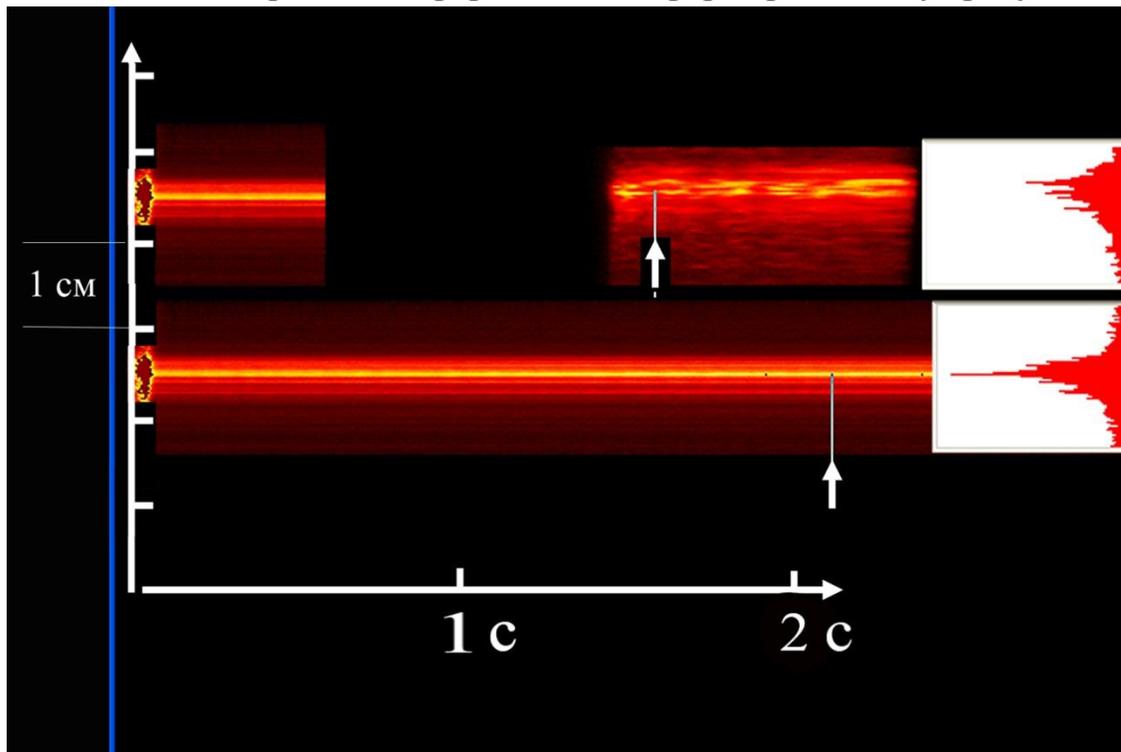


Рис.12. Стабильный одиночный трек в мыльно-желатиновой пленке рассыпается при прерывании лазера на одну секунду и снова собирается в один трек только через несколько минут. Поперечное распределение интенсивности в местах, отмеченных стрелками, дано на рисунке справа.

3.9. Треки с мощным белым светом. Для контроля было проведено исследование лазерных треков в вязкой желатиновой пленке под действием белого континуума от фемтосекундного лазера. В тонкой водно-желатиновой пленке треки наблюдаются пока она жидкая и исчезают, когда пленка высыхает и затвердевает [24].

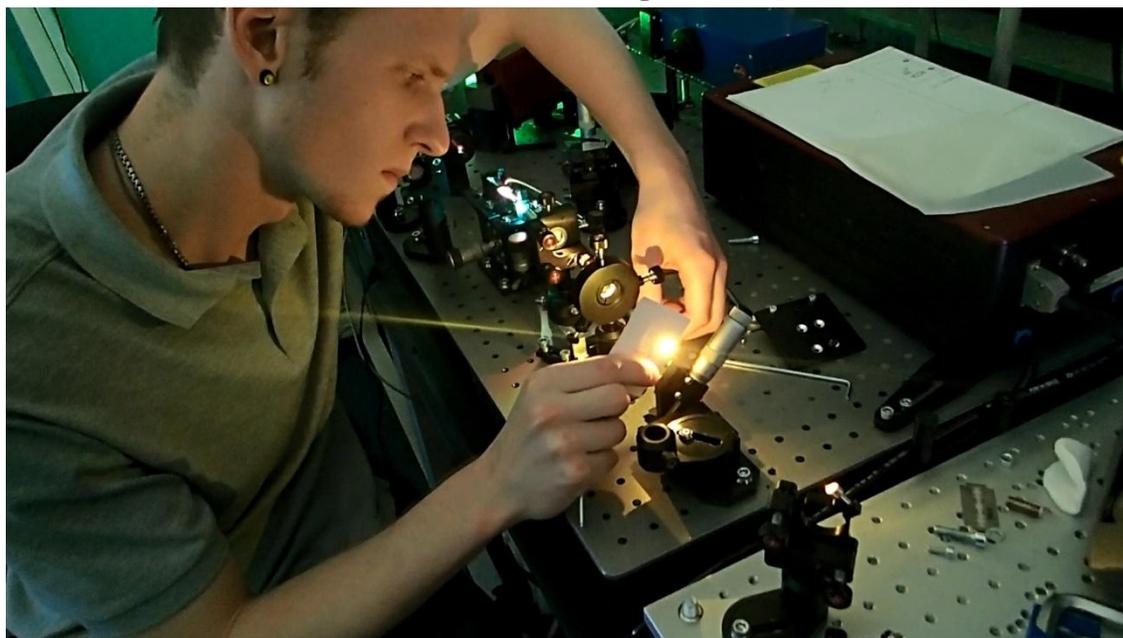


Рис.13. Настройка белого континуума лазера "TiF-50 mini".

Опыты с такой пленкой и мощным белым светом проводились в Троицке на территории ФИАН в научно-исследовательской компании "Авеста-Проект", занимающейся производством инновационного оборудования для сверхбыстрой спектроскопии [24]. С лазером "TiF-50 mini" (50 fs, 80 МГц, 800 нм, 400 мВт) после волоконного преобразователя мощность белого континуума в диапазоне 450-800 нм составляла около 100 мВт (Рис.13).

Результаты воздействия такого сфокусированного сферической линзой ($F=7$ см) белого излучения в ребро желатиновой пленки диаметром 10 см показаны на Рис.14. Трек не менял со временем своей формы даже тогда, когда небольшая перестройка фокусировки возбуждающего излучения приводила к видимому изменению его окраски.

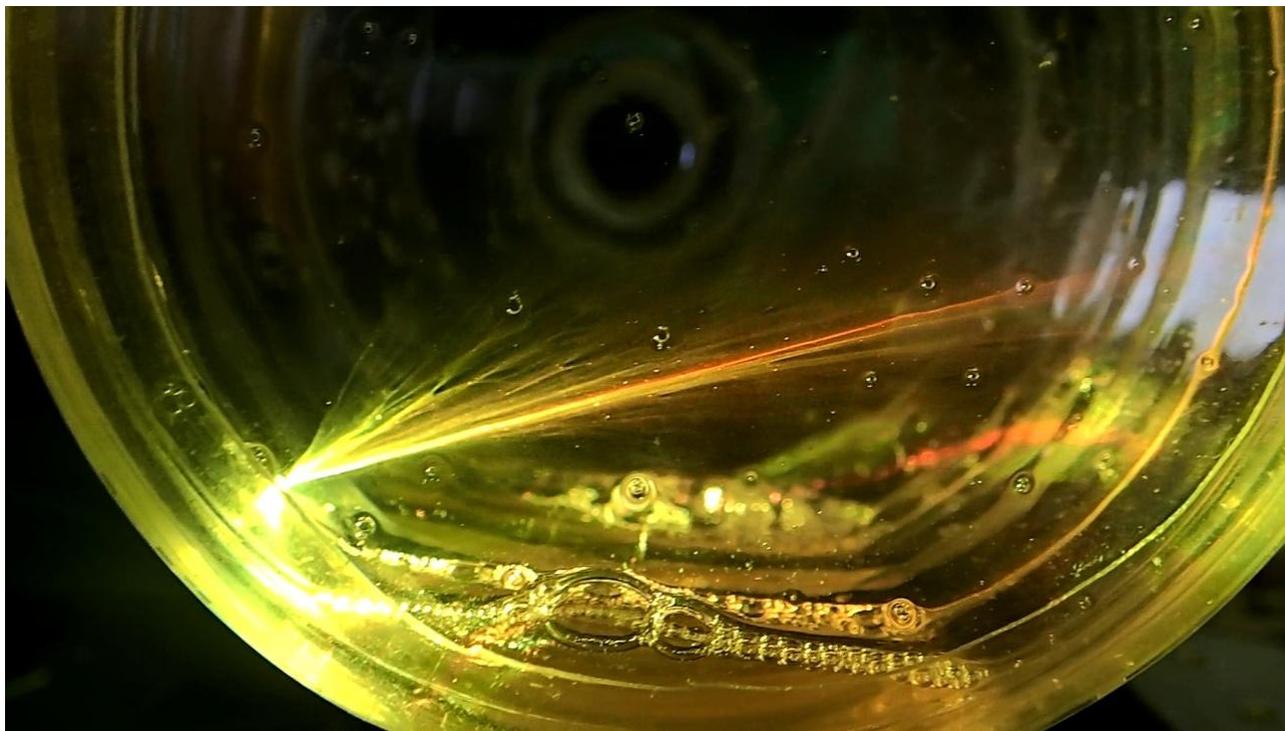


Рис.14. Сноп треков с белым светом в мыльно-желатиновой пленке диаметром 10 см.

Основной результат данной серии опытов состоит в обнаружении удобной для исследования треков и необычно устойчивой желеобразной желатиновой пленки и наличия в ней треков при воздействии обычного лазерного излучения и интенсивного белого света. Попутно отметим, что при подсыхании на воздухе гибкая мыльно-желатиновая пленка [25] становится настолько прочной, что, прогибаясь, выдерживает многограммовую нагрузку и позволяет путем отлива изготавливать на ней из застывающей эпоксидной смолы неплохие асферические линзы [26].

3.10. О возможности воздействия на путь трека. Уже отмечалось, что мы не можем управлять треками, поскольку треки во всех исследованных нами средах не реагируют ни на какие наши внешние действия – ни звук, ни смена длины волны света, ни большие электрические поля, ни боковое световое облучение пленки таким же лазером не влияют на характер поведения треков. Да, на трек, конечно, влияет нанесенная на пленку капля, но это грубое механическое воздействие нельзя считать контролируемым управлением трека.

Поскольку трек реагирует на заметное изменение толщины пленки на пути трека, то, в принципе, можно создавать утолщение с помощью заметного точечного разогрева пленки с

помощью другого мощного лазера, но это воздействие требует больших затрат энергии и для управления не перспективно.

Представляет интерес использовать для управления другую менее энергоемкую возможность [27]. Последнее время внимание исследователей привлекают светочувствительные поверхностно активные вещества, ПАВ [28]. Под воздействием света разных длин волн они обратимо меняют структуру своих молекул и, соответственно, на десятки процентов меняют связанное с ними поверхностное натяжение. Эти вещества используются в разных опытах, когда надо локально без больших энергетических затрат изменить поверхностное натяжение раствора, не меняя концентрацию ПАВ в нем.

Если в пленке со светочувствительным ПАВ и установившимся треком подействовать переключающим внешним излучением локально вблизи, но с одной стороны трека, то это должно несимметрично изменить радиус сформированного утолщения, что может привести к изменению направления трека. При наличии светочувствительных ПАВ проверка возможности такого управления, степени воздействия на треки не потребует больших энергетических затрат и может оказаться перспективной. Одновременно это дополнительно подтвердило бы механизм образования трека - того, что трек действительно связан с натяжением и образующимся утолщением в пленке.

3.11. Световое давление используют для перестройки. Интересна статья о полезном использовании светового давления [29]. Работающее в треках световое давление нашло в ней применение в полупроводниковом лазере с перестраиваемой длиной волны излучения. Лазерное световое давление в специально созданном полупроводниковом устройстве используется для вибрации легкого зеркала резонатора, что вызывает быструю самоперестройку излучения лазера. Авторы этой статьи преобразуют световое давление в механическое перемещение и вибрацию зеркала и поэтому назвали свою работу «Лазерная оптомеханика». Так что, мы можем отнести и наши треки в пленках к общему классу таких разрабатываемых световых, оптомеханических устройств.

3.12. Пленка на паутине. Интересные особенности лазерных треков открываются, по нашему представлению, в пленке на рамке из тонкой нити – паутине. На ней открытая на воздухе со всех сторон пленка представляет перспективный объект для демонстрации ранее описанных свойств треков и для ряда новых оптических исследований, например, для регистрации шелеста прибора световых волн [30].

Настоящую паутину (5 мкм и шелковинку) мы тоже попробовали, но особой разницы в результатах не было, и из-за малой ее доступности мы в опытах перешли на нить из самого тонкого синтетического волокна диаметром 20 мкм. Волокно натянули между четырех опор так, что нить образовывала рамку 3 x 5 см.

Проверка показала, что не всякий мыльный раствор позволяет делать пленку на такой рамке, но, используя ранее разработанный нами раствор для прочных пленок [31] и варьируя его состав, мы смогли на рамке из тонких нитей получать для оптических опытов достаточно устойчивую пленку с временем жизни на воздухе несколько часов.

(Такая пленка с желатином при подсыхании становится тоньше и застывает в виде радужной картины. Типичная динамика перестройки треков в стабильных жидких пленках до застывания показана в [20,21], а самих потоков в нагретой пленке при испарении в [32]).

Наряду с мигающими на экране полосками от выходного излучения треков в свежей пленке наше внимание привлекла необычно быстрая хаотичная динамика распределения интенсивности света ярких точек треков на легкой выходной нити под микроскопом (Рис.15, кинофильм с динамикой точек приложен к [30]). При стабильном непрерывном входном излучении пространственная и временная хаотичность в распределении выходных световых пиков на (Рис.15) напоминает сверху струи и потоки Ниагарского водопада, что навело нас вот на какую мысль.

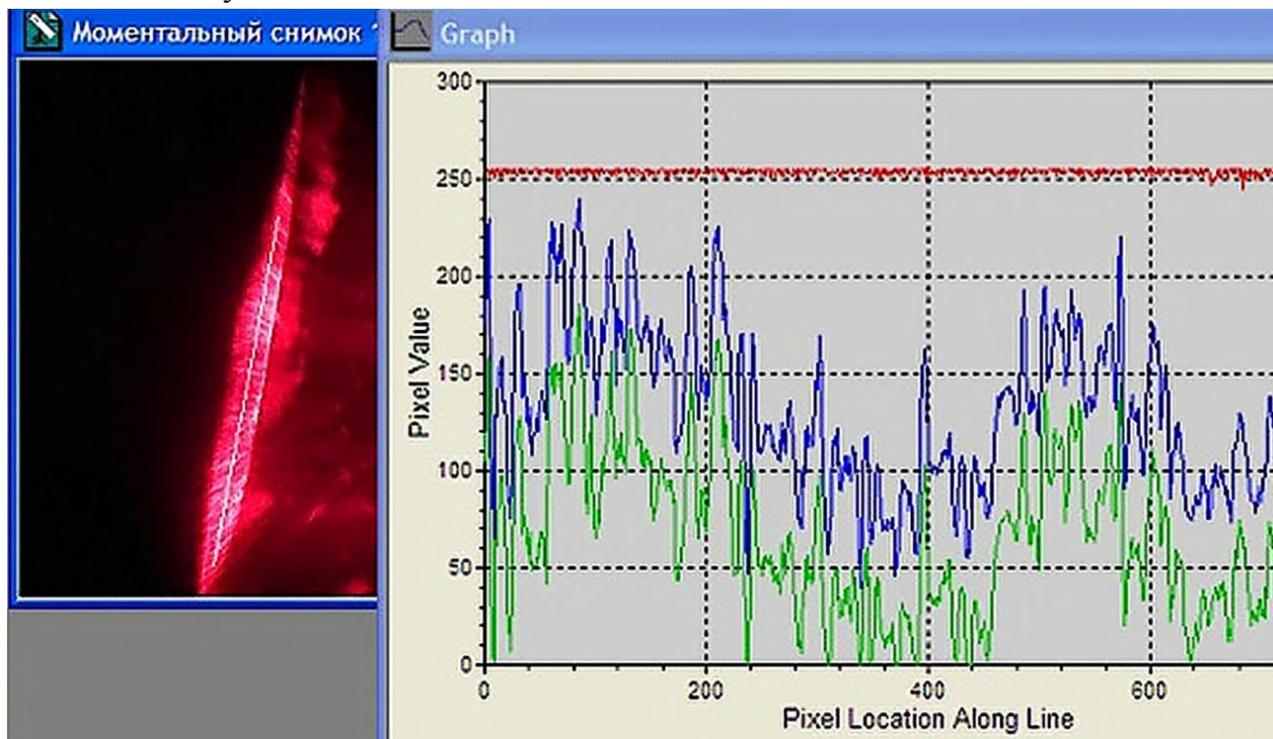


Рис.15. Вариации излучения треков вдоль светлой линии на выходной тонкой нити пленки.
Размер светлой линии ~ 1.5 мм. Динамика излучения – в приложении к [30].

Из наличия перестроек и перепадов интенсивностей потоков можно сделать вывод, что ограничивающая пленку тонкая выходная нить при пересечении ее треками испытывает заметное воздействие локального светового давления, которое существует в самих треках и формирует их. Небольшие и постоянно меняющиеся локальные удары волн, приливов света по натянутой тонкой струне могут, как прибой, деформировать эту нить (так же, как световое давление деформирует и выгибает поверхности пленки в области трека), рождают в ней звуковые волны. В синтетических или шелково-паутинных волокнах звук может затухать, но для некоторых опытов тонкую нить можно сделать металлической. Например, натянутая струной тонкая титановая нить на краю пленки может быть интересна в таком опыте по взаимодействию ее с выходным излучением треков. Передаваемый по нити шелест прибоев светового давления, по-видимому, может быть зарегистрирован чувствительным микрофоном, закрепленным на краю струны.

4. Заключение. В земных условиях пока мало опытов, которые бы наглядно познакомили всех желающих с действием светового давления. Идея демонстрации светового давления с помощью звука от треков могла бы, как мы понимаем, понравиться П.Н. Лебедеву. В его тонких опытах световое давление проявлялось в механическом воздействии на легкую крыльчатку, в наших более грубых опытах световое давление проявляется в формировании узких треков в мыльных пленках, а в предлагаемой схеме световое давление может проявить себя с необычной стороны - в звуковых волнах, в шелесте прибора рожденных треками потоков световых волн. В настоящее время попытка реализовать эту идею могла бы быть предпринята исследователями, имеющими, несмотря на текущие сложности в науке [33], доступ к чувствительной аппаратуре для регистрации звуковых сигналов.

В итоге мы снова обращаем внимание преподавателей и составителей школьных программ на уникальную возможность знакомства с новым физическим явлением, с историей его изучения, с демонстрацией необычного для земных условий действия светового давления в треках, знакомства с явлением двойного лучепреломления, и с возможным продолжением работ с треками, со звуковой регистрацией шелеста прибора световых волн и образованием ультразвуковых треков. Надеемся, что представленные результаты послужат основанием для дальнейших оптических исследований мыльных пленок.

Указанные в ссылках препринты и прилагаемые к ним (и рекомендуемые для просмотра) кинофильмы доступны по годам и номерам на сайте <http://preprints.lebedev.ru>.

Авторы благодарят друзей и помощников, принимавших добровольное участие в проведении экспериментов без наличия у нас каких-либо грантов.

Список литературы

1. Стойлов Ю Ю *УФН*. **174**, 1359 (2004) [Stoilov Yu Yu *Phys. Usp.* **47** 1261 (2004)]
2. Вайчас А.А. «Дискретная дифракция лазерного излучения в биоорганических жидких пленках» Дисс. кан-та. физ. мат. наук (Владивосток: Дальневост. гос. ун-т путей сообщ. 2008)
3. Старцев А В, Стойлов Ю Ю Препринт № 12 (Москва: ФИАН, 2005)
4. Старцев А В, Стойлов Ю Ю Препринт № 6 (Москва: ФИАН, 2007)
5. Старцев А В, Стойлов Ю Ю *Квант. Электр-ка*. 34 569 (2004)
6. Пустовойт В И *УФН*. **186** 1133 (2016) [Pustovoit V I *Phys. Usp.* **59** 1034 (2016)]
7. К. Ко̑cevar *Physics of surfaces and interfaces* 25th March (2005) [<https://www.ijs.si/~kkocevar/skripta.pdf>]
8. Haney M. *Popular Science*. November (2005)
9. Старцев А В, Стойлов Ю Ю Препринт № 5 (Москва: ФИАН, 2008)
10. http://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/2008_5_1.wmv
11. http://preprints.lebedev.ru/p-content/uploads/2011/12/2008_5_2.wmv
12. Стойлов Ю Ю Препринт № 8, Рис.2 (Москва: ФИАН, 2009)
13. Ярив А, Юх П. Оптические волны в кристаллах: Пер. с англ. — М.: Мир, (1987)
14. Унгер Х-Г Планарные и волоконные оптические волноводы. : Пер. с англ. — М.: Мир, (1980)
15. Pernice W H P et al. *OPTICS EXPRESS* **17**, 1806 (2009)
16. Стойлов Ю Ю Патент RU №2403596 С1 от 9 апреля 2009 года
17. Стойлов Ю Ю *Фотоника*, **1**, 2 (2011)

18. Григорьев А И и др. *Журнал технической физики* **74**, 140 (2004)
19. Стойлов Ю Ю Препринт № 30, (Москва: ФИАН, 2011)
20. http://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2011/12/poloski_na_ekrane.mpg
21. Стойлов Ю Ю Препринт № 11, (Москва: ФИАН, 2015)
22. Старцев А В, Стойлов Ю Ю *Квант. Электр-ка.* **42** 750 (2012)
23. Старцев А В, Стойлов Ю Ю Препринт № 7 (Москва: ФИАН, 2013)
24. Старцев А В, Стойлов Ю Ю Препринт № 2 (Москва: ФИАН, 2014)
25. Стойлов Ю Ю Препринт № 12 (Москва: ФИАН, 2014)
26. Стойлов Ю Ю *Фотоника* **5** 47 (2014)
27. Стойлов Ю Ю Препринт № 11 (Москва: ФИАН, 2015)
28. Chevallier E et al. *Soft Matter* **9**, 7054 (2013)
29. Yang W et al. *Nature*, Scientific Reports, 5, Article number: 13700 (2015)
30. Старцев А В, Стойлов Ю Ю Препринт № 10 (Москва: ФИАН, 2016)
31. Стойлов Ю Ю Патент RU №2569845 от ноября 2015 года
32. <http://preprints.lebedev.ru/files/271015/solaris15.mp4>
33. В.М. Кайтуков. Эволюция диктата – М.: Наука, 1994. 413 с
[http://philosophyevolution.com/main_ru.htm]

Старцев А.В. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
 119991, ГСП-1, Москва, В-333, Ленинский пр. 53
 Тел. (495)132-6682, Факс. (095)938-2251
 E-mail: stoilov@sci.lebedev.ru
 119270, г.Москва, 3-я Фрунзенская 1, 149
 Тел. 8-499-242-08-91.

Стойлов Ю.Ю. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
 119991, ГСП-1, Москва, В-333, Ленинский пр. 53
 Тел. (495)132-6682, Факс. (095)938-2251
 E-mail: stoilov@sci.lebedev.ru
 108840 г.Троицк г.Москва, Солнечная 2, 119
 Тел. 8-495-851-47-38.

Soap film - as an object of optical research
 (Laser beam in a soap film - continued)

AV Startsev, Yu Yu Stoilov

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
 Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
 E-mail: stoilov@sci.lebedev.ru

A review and a brief history of the investigation of a new physical phenomenon – unusual non-divergent laser tracks in thin liquid film – are presented. Their properties and the mechanism of formation are discussed,

Keywords: nonlinear phenomena, laser tracks, soap films, pressure of light