

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

5

А.В. СТАРЦЕВ, Ю.Ю. СТОЙЛОВ

СИМФОНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ТРЕКОВ

МОСКВА 2008

Симфония световых треков

Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю.

Аннотация. Рассматривается поведение лазерных треков в вязкой мыльной пленке под действием непрерывного излучения лазера (532 нм, 10 мВт). Обсуждаются особенности двойного лучепреломления в пленках разной толщины и направленность излучения, выходящего из треков.

Симфония – это гармоничное и согласованное звучание многих инструментов. Завораживающее поведение световых треков в мыльных пленках оставляет у наблюдающих впечатление мощного симфонического концерта, исполняемого природой по загадочной партитуре.

О параметрах треков, их физических свойствах уже было много сказано /1-8/, и первое крайнее удивление от увиденного уже прошла. Загадок еще много и они остаются не открытыми, но в данном сообщении речь больше пойдет о температуре, об изяществе и красоте треков. А красота, как говорят классики, это все то, что напоминает нам о жизни, напоминает то, что мы считаем жизнью, то, что увеличивает наши возможности в окружающем мире.

Сначала несколько технических деталей. Разглядеть гармонию поведения и формирования треков невооруженным глазом в водных мыльных пленках весьма трудно, поскольку зарождение и переключение треков происходят в них крайне быстро и требуют аппаратуры высокого временного разрешения. С регистрацией у нас небогато, и хотелось бы как-то затормозить процесс рождения и перемещения треков. Для исследований мы воспользовались некоторыми новшествами в науке и технике.

Во-первых, в качестве источника света была применена зеленая лазерная указка китайского производства с выходной мощностью до 50 мВт. Внутренняя структура указки с батарейками показана на Рис.1 (/9/). В ней маленький неодимовый лазер накачивается световым диодом мощностью около полватта, получаемое излучение удваивается, и на выходе получается непрерывный зеленый свет 532 нм с мощностью в десятки милливатт с малой расходимостью. Удобно и компактно. Фокальное пятно лазера с линзой $F=5$ см составляет около 10 мкм. Мы обычно работали на уровне 5-10 мВт.

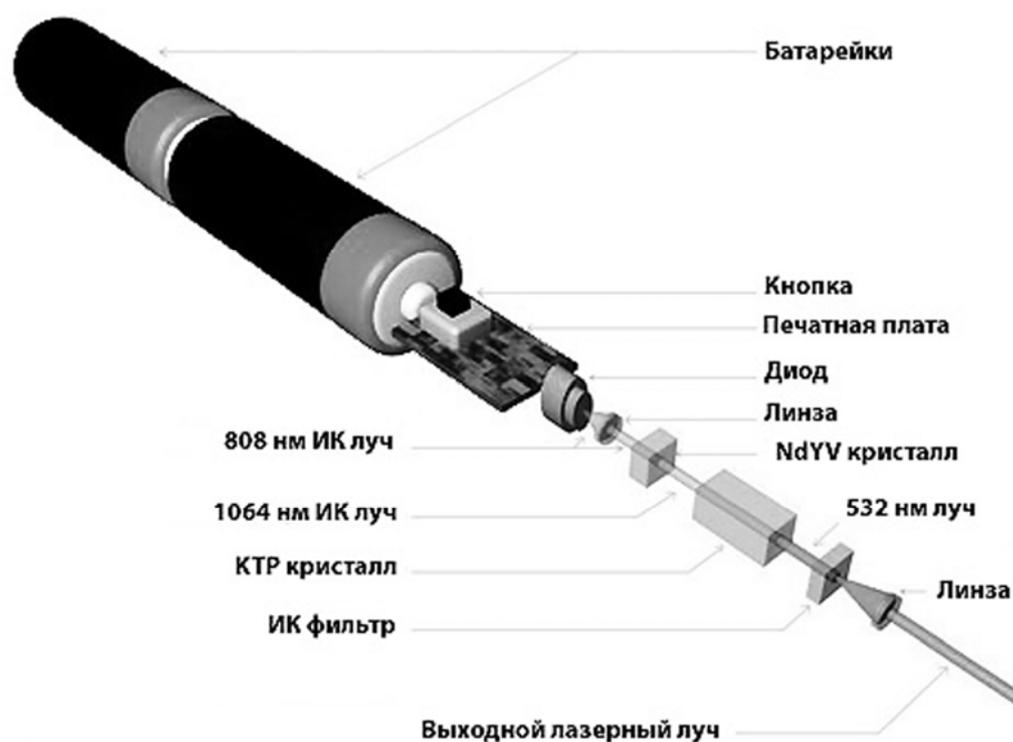


Рис.1. Схема зеленой лазерной указки.

Зеленый диапазон, в котором глаз на порядок более чувствителен, чем в далеком красном, и повышенная мощность лазера позволили присмотреться к деталям и особенностям поведения треков. Правда, стоит зеленая указка в 100 раз дороже, чем красная (5000 руб).

Во-вторых, часть наших исследований проводилось с пленкой из весьма вязкого жидкого мыла для мытья рук доступного в продаже (фирмы «Flower Shop» состава: Aqua, Sodium Laureth Sulfate, Sodium Chloride, Cocamidopropyl Betaine, Cocamide DEA, Glycerin). Показатель преломления у этого мыла около 1.4, а по вязкости оно напоминает густой мед, и при переливании его струя может быть толще 1 см.

Но прежде чем демонстрировать опыты с вязкой пленкой напомним, как ведут себя треки в водной мыльной пленке с обычным мылом, когда в нее через ребро фокусируется лазерное излучение [1-8]. Узкие прямые треки мечутся по пленке, постоянно меняя свое направление. В поперечнике размер каждого из них может составлять несколько микрон, а длина иногда достигает десятков сантиметров. Треки в пленке при пересечении не влияют друг на друга. Со временем водный раствор из внутренней части пленки уходит, толщина пленки уменьшается примерно в тысячу раз до 5-50 нм, и треки ведут себя более спокойно.

На треках иногда можно заметить пунктирную структуру, связанную с наличием в пленках двойного лучепреломления, приводящего к периодическим изменением направления поляризации в треке. Это согласуется с общим рассмот-

рением многослойных оптических структур, которые, как показывают теоретические расчеты, обладают двойным лучепреломлением /10/.

Причины, которые заставляют прямые треки в некоторых местах резко менять свое направление, не очень понятны, но можно предположить, что они связаны с неоднородностями на пленке и также с капиллярными волнами на поверхности раствора. Как известно, поверхность жидкости покрыта капиллярными волнами небольшой амплитуды. Их можно заметить, если сфокусировать на поверхность раствора лазерное излучение и посмотреть на отраженный сигнал. На экране появляется мигающая структура. Особенно она заметна при пропускании излучения через ребро между трех мыльных пленок, поскольку идущее в нем излучение многократно отражается от колеблющихся поверхностей (Рис.2).

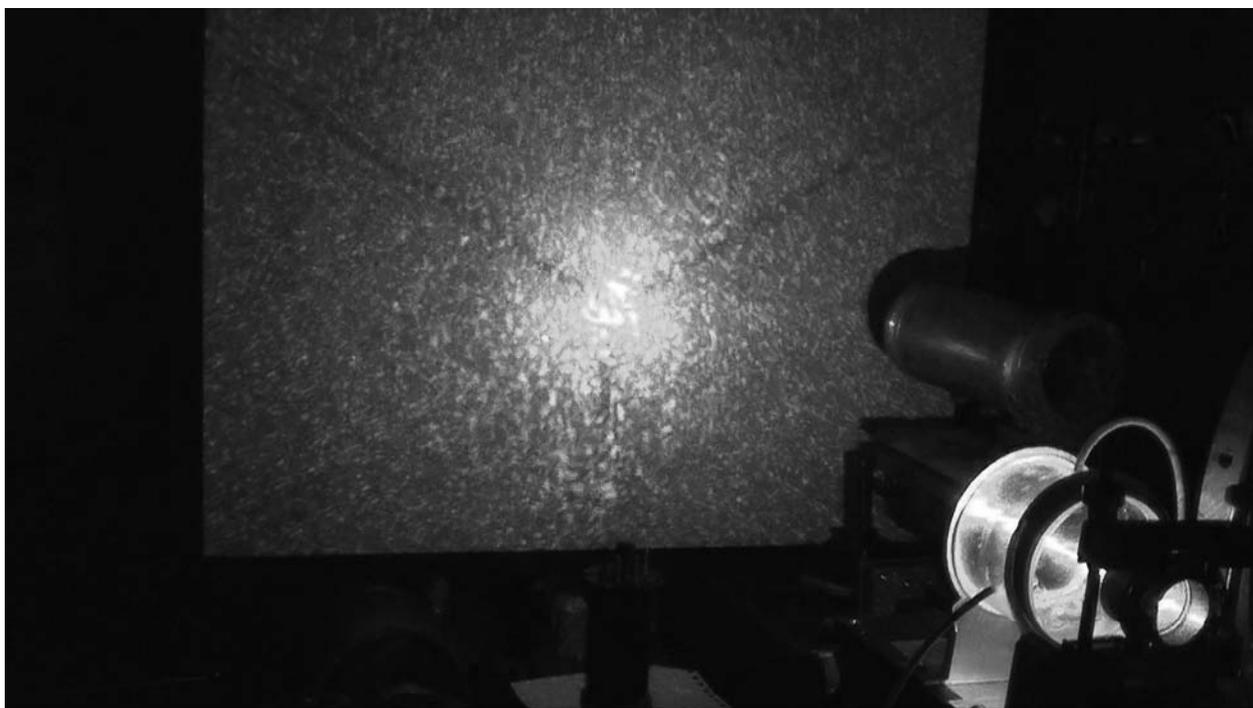


Рис.2. Мигающие световые пятна на экране от лазерного излучения, прошедшего через ребро между трех мыльных пленок.

Раньше мы предполагали, что такое мигание света из ребра свидетельствует о наличии в нем треков, но теперь понимаем, что мигание может возникать в ребре и без треков.

Таких капиллярных волн на пленке не видно. Волны есть, но в тонких пленках поверхности колеблются синфазно. Это практически не меняет толщину пленки, и на треках мало сказывается. Но там, где раствора много, где пленка касается толстого ребра и куда заводится излучение, капиллярные волны поверхностей могут оказывать существенное влияние на направление движения трека. Следует

отметить, что треки меняют свое направление, ветвятся и в том случае, когда излучение вводится не через ребро, а фокусируется под небольшим углом в центре пленки (Рис.3). После того как пленка отстоялась, стала тонкой, трек успокаивается и может идти узким каналом прямо до конца пленки (Рис.4).

Но, вот интересный вопрос, как поведет себя такой трек, если на его пути вдруг встретится небольшая неоднородность? Он обогнет ее? Отразится?

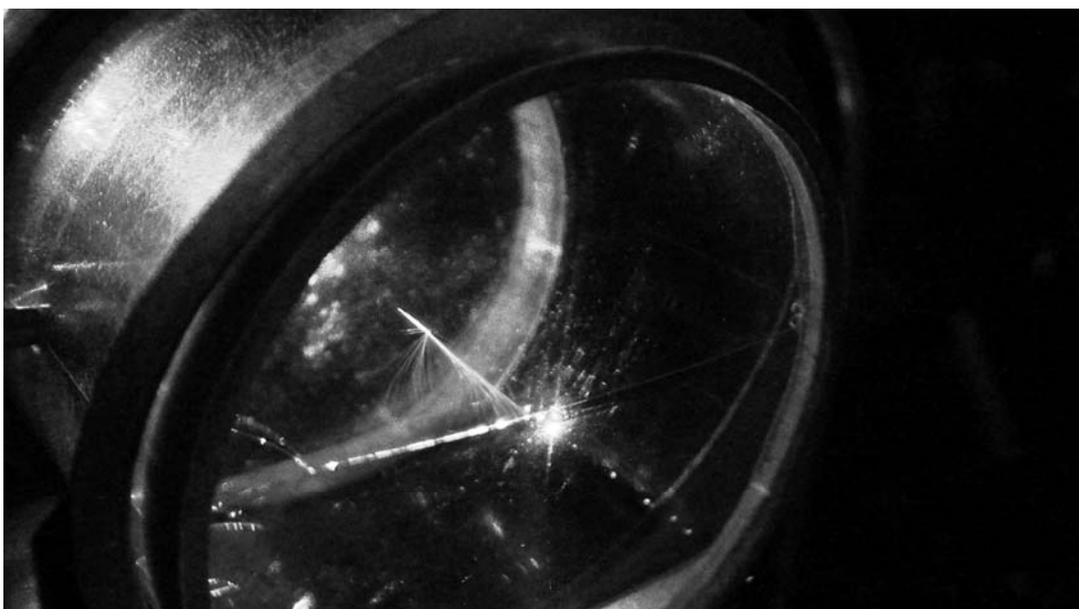


Рис.3. Треки на пленке при фокусировке лазерного излучения под небольшим углом на середину пленки.



Рис.4. Прямой трек в тонкой пленке.

Посмотрим, что происходит с треком при таком столкновении с препятствием в спокойной мыльной пленке. (Рис.5,6). Видно, что трек широкий и, пока пересекает его мелкая неоднородность, он ведет себя необычным образом – он рассыпается веером, иногда это новые узкие треки, иногда широкие сектора. Почему веером, почему у веера много лепестков, много треков? Хорошо бы притормозить процесс их рождения во времени, чтобы присмотреться к динамике их образования.

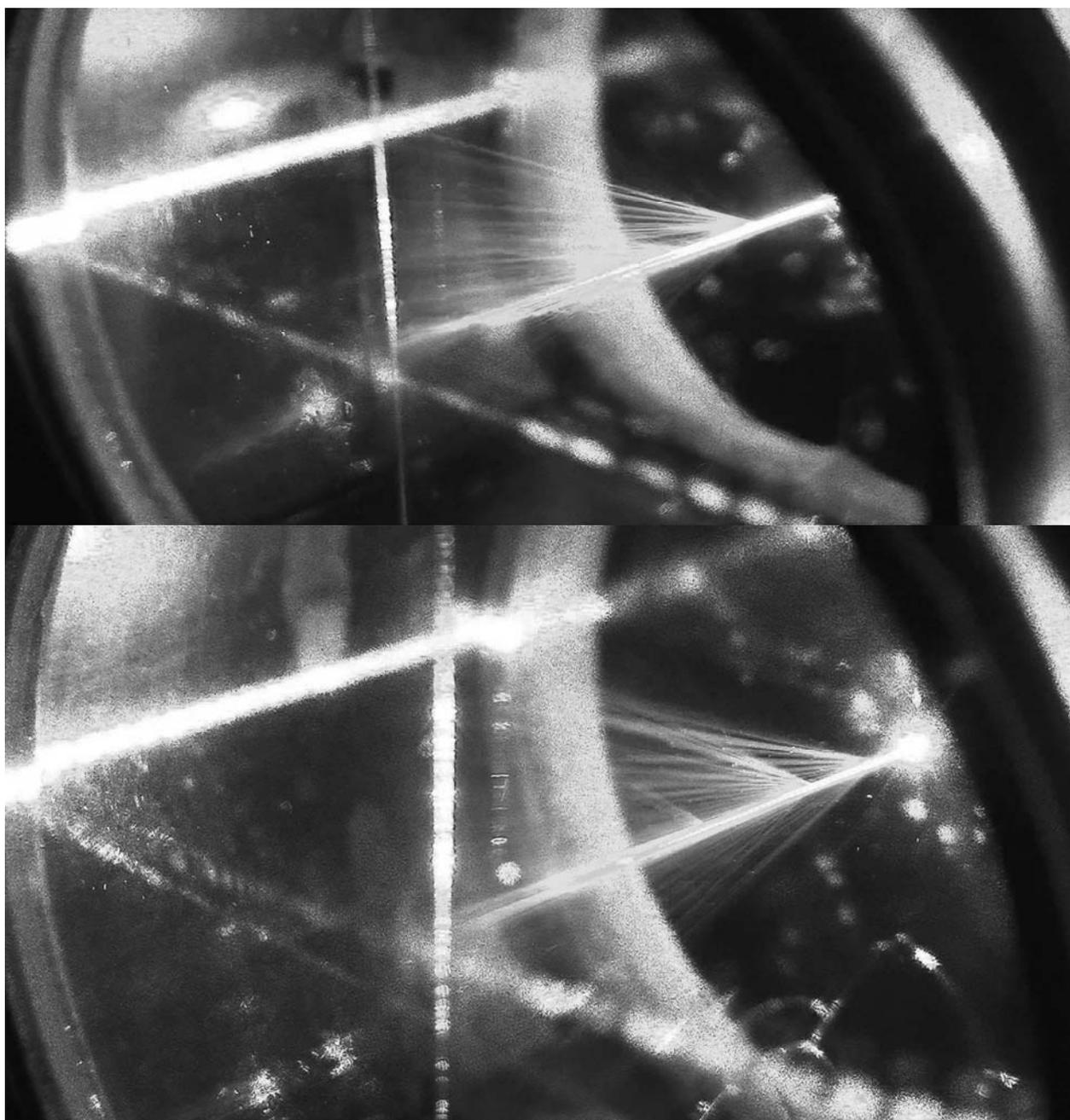


Рис.5,6. Веер рассеянного излучения при пересечении трека неоднородностью.

Можно ли для этой цели использовать вязкое мыло? Опасения тут вот какие. Вязкое мыло – это толстая пленка. При совсем большой толщине она перестанет быть пленкой, а станет раствором, и треки в ней просто не появятся, так как их в объеме раствора нет. Второе, большая вязкость – это большие оптические неоднородности, которые могут быть для треков непреодолимыми. И третье, не будет ли вязкость такой большой, что трекам для их образования, для переделки среды и построения своего канала просто не хватит времени? Будут ли вообще в такой пленке треки? Для разрешения сомнений требуется опыт.

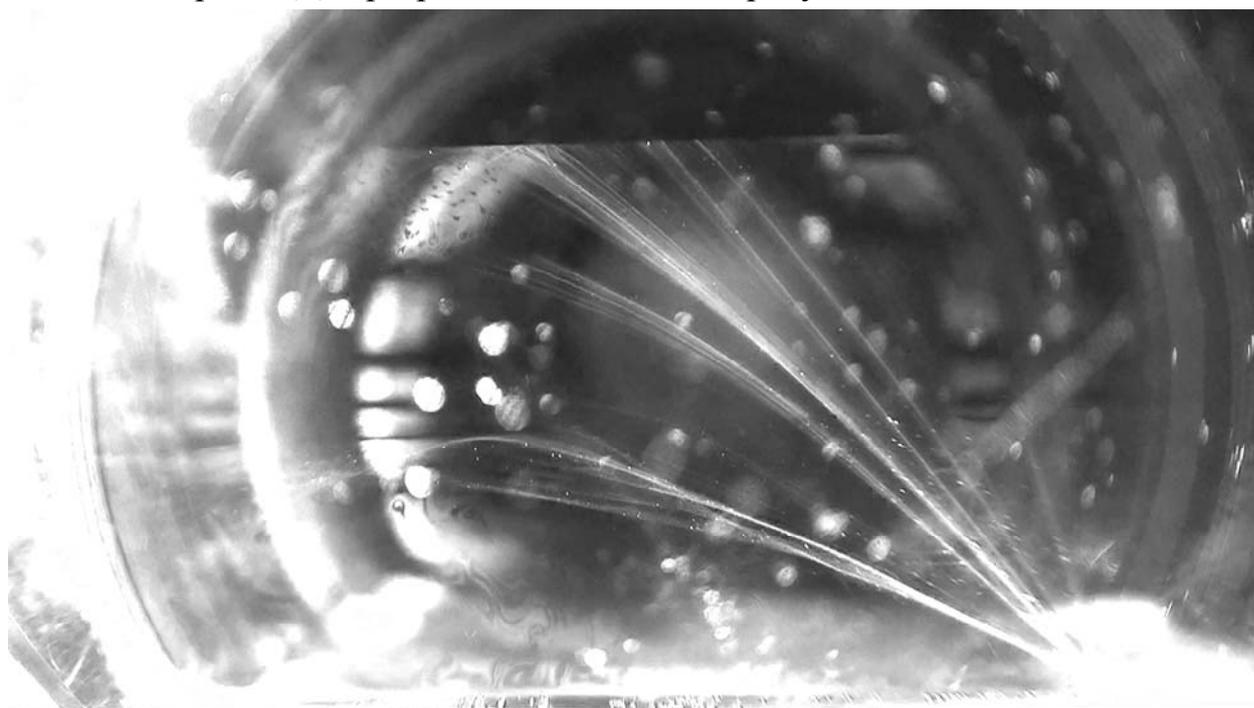


Рис.7. Вид на пленку с треками через окно кюветы

Схема обычная. Рис.7. Вязкое мыло заливается в кювету диаметром 6 см с оптическими окнами (ось кюветы горизонтальна), в ней создается поперечная вертикальная пленка, которая находится над поверхностью мыла. Она не касается окна, а параллельна ему и находится рядом с окном кюветы. Излучение заводится в нее снизу через жидкость. Из-за высокой вязкости раствора толщина ее по высоте на диаметре кюветы может отличаться почти в сто раз (от 0.1 мкм сверху, где постепенно образуется тонкая «черная» пленка, до 10 мкм снизу у ребра). Такое изменение толщины пленки с высотой можно определить по количеству заметных на ней интерференционных полос, и это приводит, как мы увидим, к интересным вариациям исполнения световой симфонии.

Итак, создается толстая пленка из вязкого мыла, имеющая у основания толщину 5-10 мкм. Большая толщина приводит к тому, что снизу у такой пленки практически тот же показатель преломления, что и у раствора, поэтому нет предельного угла полного внутреннего отражения при вводе излучения из раствора в ребро (для тонких пленок такой угол есть). Введенный в пленку сфокусированный луч лазера не выглядит треком. Он скорее напоминает короткое обломанное дерево с несколькими толстыми ветвями, и в такой толстой пленке трекам формироваться трудно. Они начинают образовываться из веток вверху, где пленка тоньше. Рис.8.

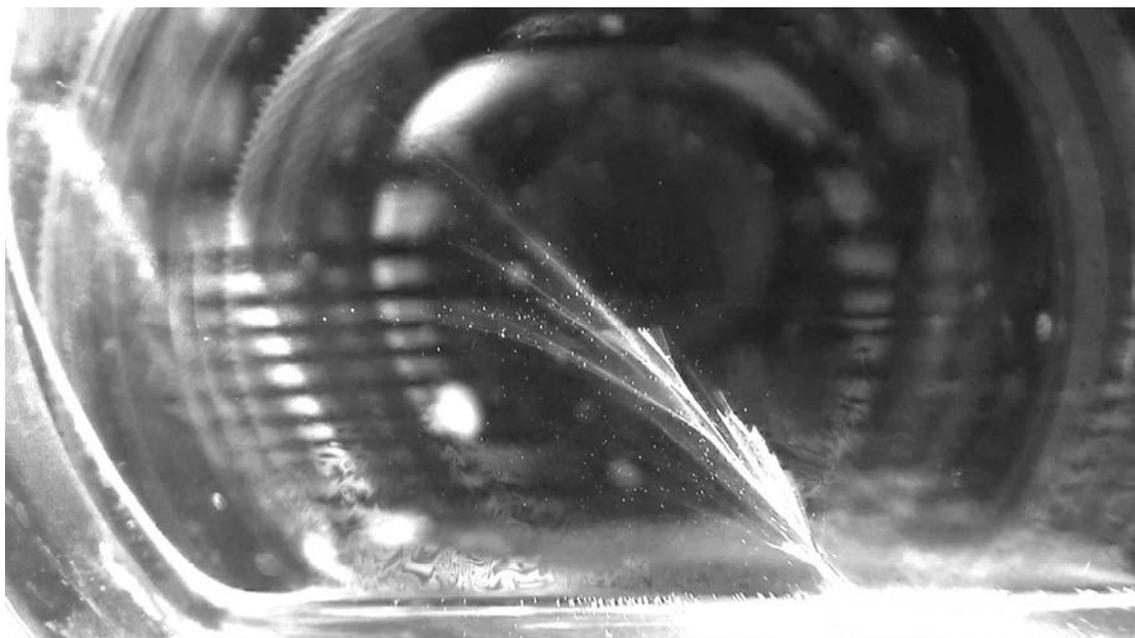


Рис.8а. Треки в вязкой толстой пленке.

Темные полосы (слева) – это интерференционные полосы на пленке.



Рис.8б. Треки в вязкой толстой пленке.

Увеличение интенсивности лазера ускоряет образование и перемещение треков. Ветвления треков могут происходить на пылинках, но сами треки могут рождаться из светлых областей (секторов) на некотором расстоянии от центров их образования. Рис.9. Узкие каналы треков могут идти прямо через все неоднородности и мелкие пылинки пленки до своей предельной толщины, характерной для каждой моды, образующей трек /6/. Если на пути треков попадает крупное препятствие, то они от него отражаются или выходят из пленки.





Рис.9. Рождение треков в более тонкой части пленки.

Трек заметно дольше живет на пленке, чем подвижные световые сектора. Сформированный трек может менять яркость своего свечения, но не меняет свое положение на пленке при выключении лазера и его повторном включении через доли секунды. Быстрое изменение яркости рядом расположенных треков создает впечатление перемещения самого трека, но это «движение» аналогично зрительному ощущению движения от статических кадров кино.

В пленку входит малая часть излучения лазера, несколько процентов, остальное от ребра отражается или рассеивается в стороны. Можно заметить, что не вошедшее в пленку, отраженное вниз от ее ребра излучение имеет в растворе секторную структуру, вид которой зависит от точности настройки лазера на вершину ребра. Рис.10. Это показывает, что в пленку входят только определенные направления, соответствующие дозволённым модам пленки /10/. В пленке моды организуют свои треки, которые ведут себя независимо. Основная мода имеет вид мало подвижного прямого трека, а моды более высокого порядка дают изгибающиеся треки и треки, которые не могут подниматься в пленке выше пороговой для этих мод толщины.

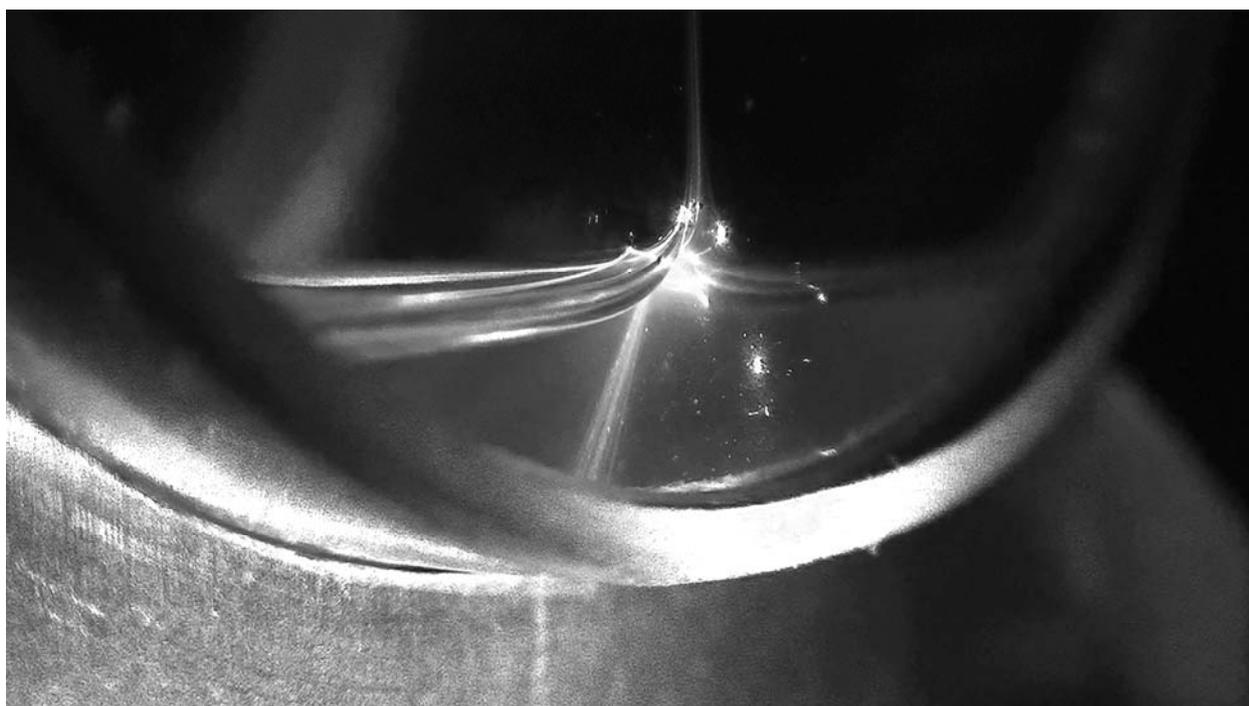


Рис.10. Секторный вид излучения лазера, отраженного от ребра пленки.

В зеленой указке на выходе есть излучение и неодимового лазера 1.06 мкм (по мощности оно примерно в два раза слабее зеленого). Оно практически не влияет на наблюдаемые треки, поскольку фокусируется немного дальше от фокуса для зеленого света, но можно специально на него настроиться и, используя фильтры при регистрации, посмотреть, как воздействуют на пленку вместе ИК и зеленое излучение. Идут ли они по трекам вместе или каждое излучение строит свои каналы? На сколько можно было разглядеть (Рис.11), ИК излучение не формирует свои треки, а идет вместе с зеленым излучением по самым ярким основным трекам, что свидетельствует о волноводном характере треков.



Рис.11. Трек в пленке от ИК излучения (снятый через фильтр в темной области) является продолжением и совпадает с треком от зеленого излучения.

Высокая мощность лазера нагревает пленку, что видно по перемещению на ней пылинок, особенно у точки фокуса. Интересно, что пылинки не уносятся нагретым раствором сразу вверх по пленке, а некоторое время идут вдоль по наклонному треку вверх, как если бы трек представлял для них чем-то выделенный потоковый канал. Такое движение и то, что нагрев не разрушает трек, свидетельствует о действительной выделенности трека на пленке. У точки фокуса сильный нагрев создает такие неоднородности на пленке, которые вызывают изменения направлений старых треков и рождение новых. Треки можно получать при фокусировке излучения в пленку цилиндрической линзой, когда они сразу рождаются снопом, а можно получать и без фокусировки от прямого лазерного луча, который направляется на ребро или освещает пленку под небольшим углом.

Есть несколько загадок с излучением, выходящим из треков. Треки могут пересечь всю пленку, дойти до ребра и покинуть пленку. В этом случае их излучение из ребра на экране дает вытянутые узкие полоски. Угловая диаграмма направленности этого излучения из ребра в поперечном к пленке направлении обычно составляет 1-2 радиана, а вдоль по пленке 0.003–0.03 радиана. Рис. 12. Ребро разбрасывает выходящее излучение трека в поперечном направлении, хотя на входе в пленку излучение вводится в такое же ребро под гораздо меньшим углом.

Количество крупных самых ярких полосок обычно совпадает с количеством треков на пленке, и экраном у кюветы можно выделить отдельную полоску (Рис.12). Перемещение точки фокусировки по ребру приводит к изменению картины ветвления треков, но не меняет характера их поведения. Со временем на пленке сверху образуется область тонкой пленки, которая уже не имеет цвета и почти не отражает свет (черная пленка). Показатель преломления пленок зависит от их толщины, поэтому треки при переходе из толстой пленки в более тонкую (черную) меняют свое направление и частично от этой границы отражаются. При падении на выходное ребро пленки треки тоже частично отражаются.

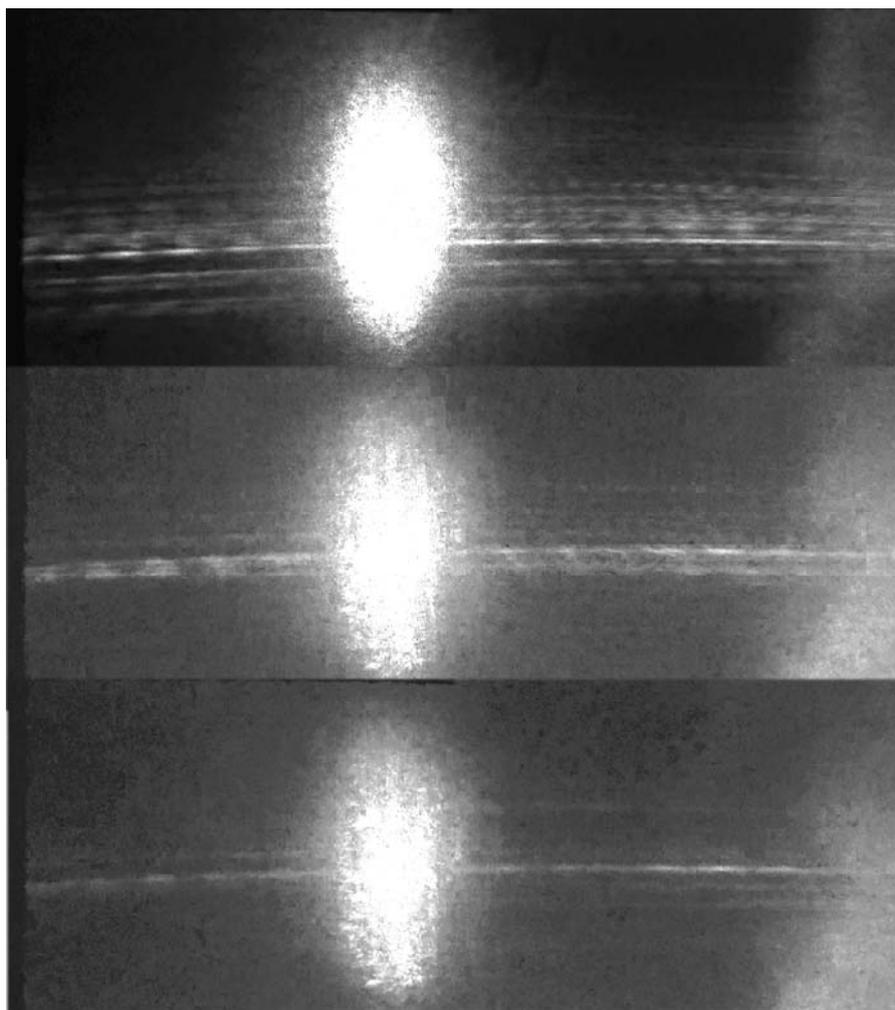


Рис.12. Полоски на экране (на расстоянии 1 м от кюветы) от выходного излучения треков в спокойной черной пленке. Центральное лазерное пятно высотой около 10 см. Экранировкой у кюветы можно выделить отдельные полоски.

Интересно, что иногда треки в толстой пленке не доходят до конца пленки, и их излучение выходит из пленки, не доходя до ребра. На пленке эти треки выглядят как длинные стебли осоки или как заостренные усы. Судя по размерам их пятен на экране, они имеют весьма направленное излучение, расходимость кото-

рого по обоим направлениям не превышает 0.005. Для получения такой направленности поперечные размеры дифракционного излучателя должны быть около 200 длин волн, т.е. не менее 100 мкм, что в нашем случае явно не выполняется. Толщина пленки, откуда выходят эти треки, не превышает 0.5 мкм, что в сотни раз меньше требуемого размера. Для объяснения высокой направленности излучения мы возвращаемся к ранее высказанной идее /УФН/, что трек в пленке представляет собой линейную направленную антенну последовательного питания, угловые размеры излучения $\Delta\theta$ которой определяются длиной антенны L:

$$\Delta\theta \sim (\lambda/L)^{1/2}$$

При длине антенны несколько сантиметров ее направленность может не превышать наблюдаемую величину 0.005, что представлять интерес для некоторых приложений.

О яркости треков. В области около черной пленки, где уменьшается толщина и куда попадают треки из более толстой пленки, их яркость свечения заметно увеличивается, что указывает на то, что яркость определяется не раствором, а наружными мыльными слоями пленки. В прозрачном растворе луч лазера почти не заметен, а в пленке он дает яркие треки. В поведении треков на пленке отмечается некоторая упругость, их стремление выпрямиться после изгибания. В более тонких пленках и при увеличении мощности лазера скорость метаний и ветвлений треков обычно заметно увеличивается, чему может способствовать изменение оптических свойств из-за разогрева среды. Но почему-то это происходит не у точки фокуса, где разогрев самый большой, а на некотором расстоянии от нее.

Чем больше разница показателей преломления для двух поляризаций, тем короче пунктиры трека. Известно, что показатель преломления пленки уменьшается с ее толщиной, но что при этом происходит с двойным лучепреломлением в пленках разной толщины? Мы уже наблюдали разные длины пунктиров на треках из разных мод в одной пленке. Но раньше нам не удавалось проследить, как меняется длина пунктиров для одной моды в пленках разной толщины. Опыты с вязким мылом позволили ответить на этот вопрос. На рис.13 видно, что при уменьшении толщины пленки, длина пунктиров уменьшается почти в 10 раз. На этом же рисунке (Рис.13б) рядом с основным виден трек с меньшей длиной пунктиров.

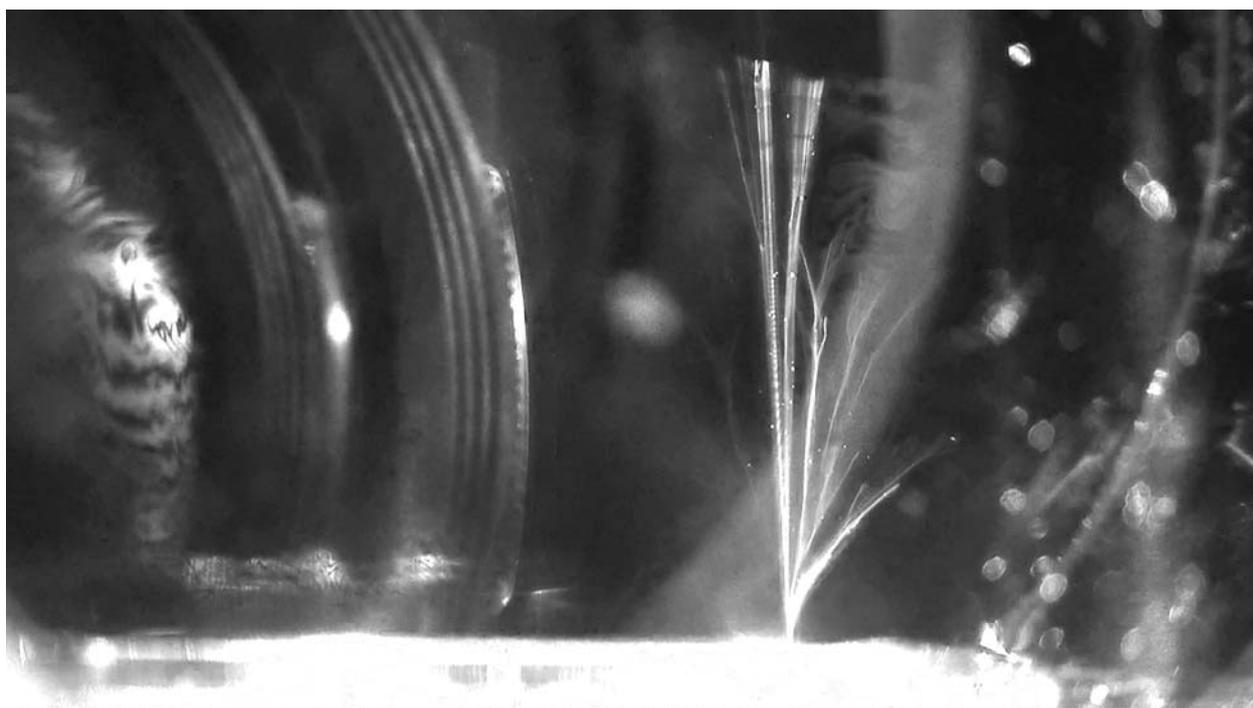


Рис.13. Длина пунктиров треков в толстой части пленки увеличивается.

Пунктиры – это результат того, что по треку идут два вида излучения с разными поляризациями и с разными показателями преломления. Это означает, что канал трека отличается от окружающей среды заметным, более высоким показателем преломления, и его волноводные свойства не разрушаются потоками, пылинками и разогревом трека.

В тонкой пленке треки формируются легче и они гораздо подвижнее и тоньше, чем в толстой. Предельная толщина пленки, в которой излучение идет, как по раствору, и при которой треки уже не наблюдаются, составляет примерно 7-10 мкм. В более толстой пленке луч лазера идет без образования треков, пока не выйдет на участок пленки с меньшей толщиной, где могут образовываться треки. Рис 14.

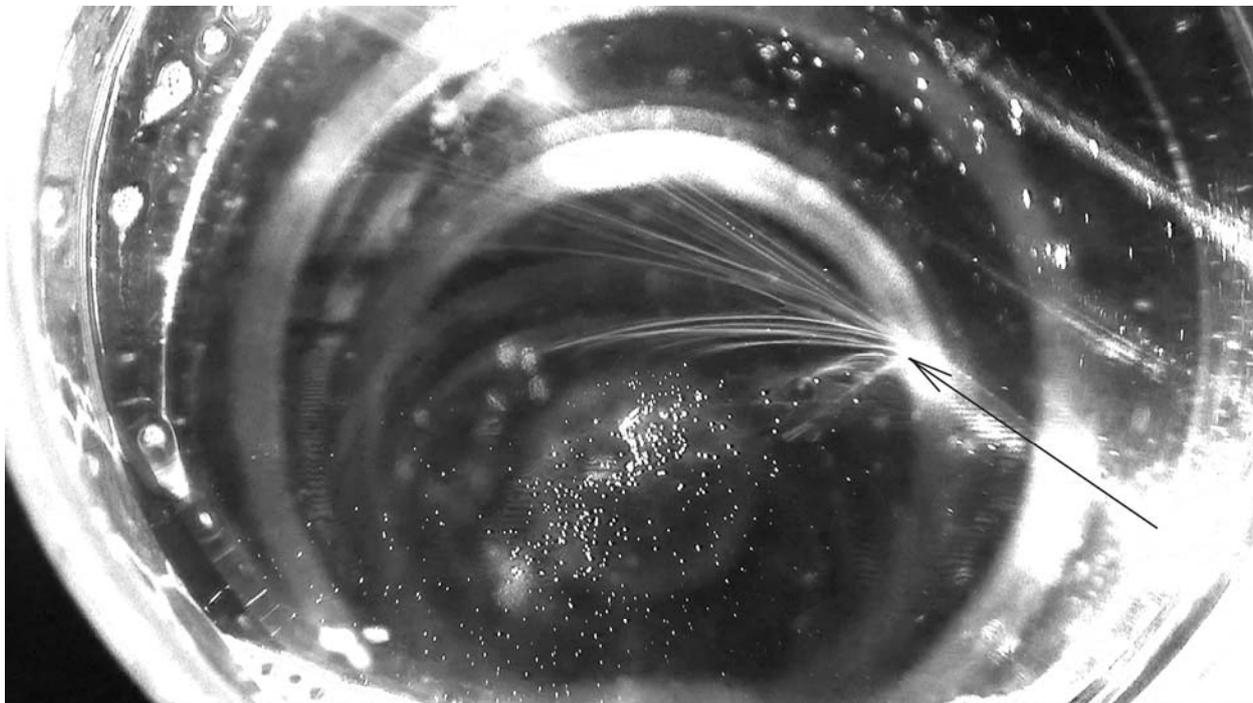


Рис.14. На пленке два участка. Верхний участок имеет толщину около двух интерференционных полос. Нижний – толстый (около 40 полос). Сфокусированное линзой $F=3$ см лазерное излучение вводится в ребро пленки (светлое пятно справа). Оно почти не заметно в толстой пленке (путь излучения показан стрелкой), но при выходе в тонкую рождает в ней треки.

Получен ответ еще на один интересовавший нас вопрос, - является ли вода необходимым элементом пленки для получения в ней треков? Была исследована мыльная пленка без воды из раствора так называемого не ионного мыла «Тритон-405» в глицерине. В ней поведение треков не отличается от поведения в выше рассмотренной вязкой пленке, что свидетельствует о возможности формирования треков в пленке и без воды.

Общая картина роста треков в пленках весьма напоминает поведение стримеров молнии, отыскивающих перед разрядом путь для основного канала. Возможно, те треки в пленке, которые мы видим, являются лишь завершающей стадией, когда по предварительно и незаметно проложенному слабым светом каналу, как по стримеру, направляется расширяющий его основной поток излучения. Действи-

тельно, на пленках иногда можно заметить (Рис. 15) слабо светящиеся, но длинные и узкие треки, которые, не достигнув высокой яркости, исчезают. Процесс формирования треков крайне слабыми световыми сигналами пока не поддается описанию и продолжает обсуждаться.

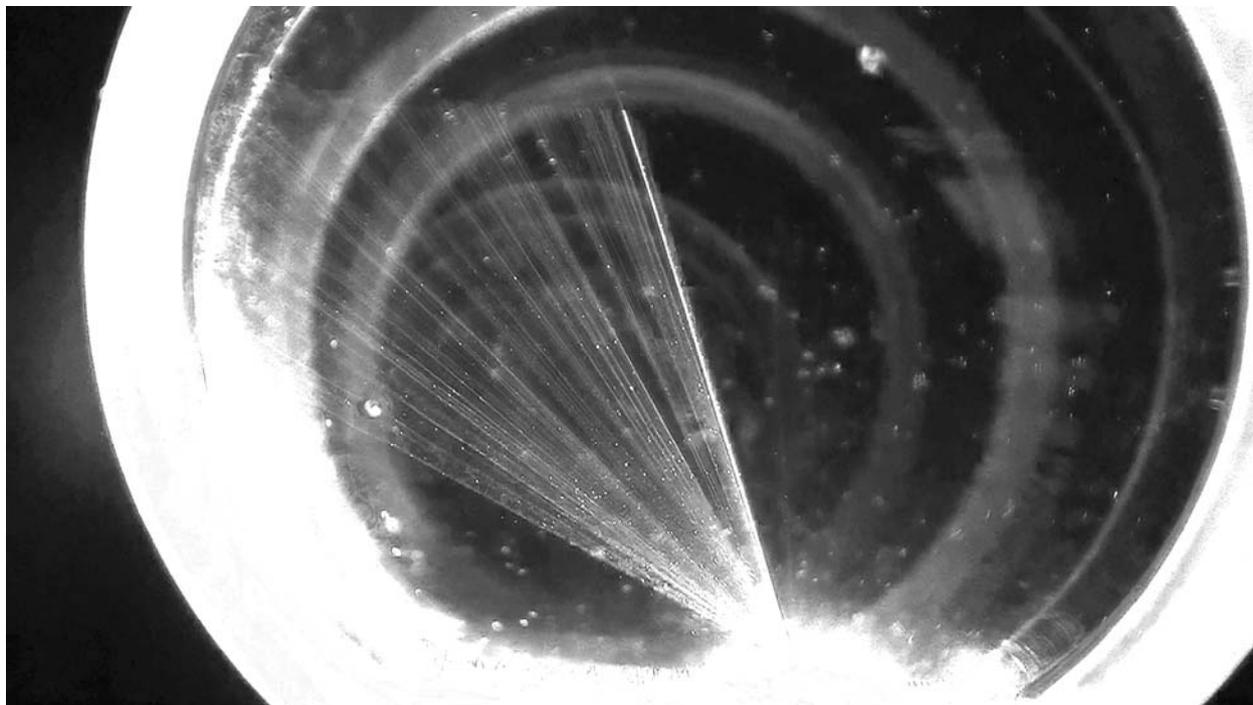
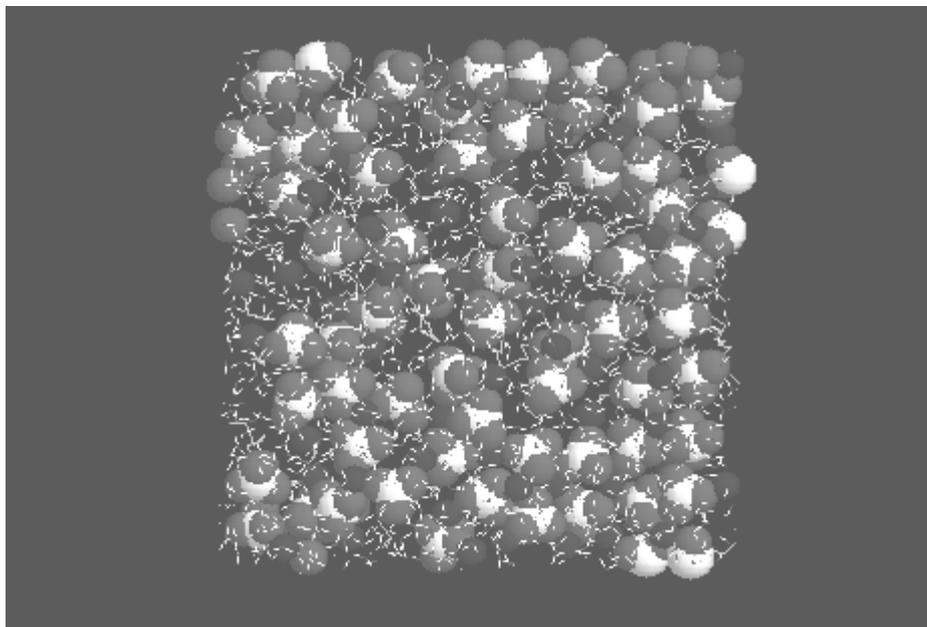


Рис.15. Веер из слабых тонких треков, многие из которых так и не станут яркими треками.

Наряду с возможным механизмом образования трека за счет перестройки внутренней среды пленки под действием вызываемого светом диэлектрофореза /6-8/, была высказана идея перестройки самих монослоев молекул мыла пленки в области трека. Но может ли слабый свет вообще как-то менять показатель преломления молекул мыла, зажатых в монослое на поверхности пленки и не поглощающих свет? Идея заключается в том, что свет упорядочивает ориентацию плоскости гидрофильных концов молекул мыла, которые находятся внутри раствора, поворачивает их так, что увеличивает степень их взаимодействия со светом и друг с другом. На разворот окончаний не требуется много энергии и времени. Одна молекула мыла на пленке обычно занимает площадь около 30 \AA^2 , и при толщине пленки 1 мкм их количество составляет около одного процента. Изменение степени взаимодействия их со светом может повлиять и на свойства пленки.

Прямого подтверждений такому механизму нет, но как показывают расчеты теоретиков структуры мыльной пленки с учетом взаимодействия всех состав-

ляющих пленку молекул /11/, проводимые методом численного динамического моделирования, равновесная ориентация гидрофильных окончаний молекул мыла в пленке действительно хаотичная (рис 16). И, в принципе, ориентация их светом могла бы способствовать изменению оптических свойств среды.



*Рис.16. Динамическое моделирование структуры пленки.
Вид сверху на положение молекул мыла на пленке /11/.*

Выстраивание окончаний мыльных молекул на поверхностях пленке под действием лазерного поля можно представить следующим образом. В гидрофильном конце молекулы, находящемся в жидкости, есть наведенный диполь, ориентированный сначала случайным образом не по полю, и гоняемые по нему светом электроны стараются подчиниться полю и идти, как оно их заставляет, но, наталкиваясь на сопротивление неориентированной молекулы, чуть толкают ее, когда им приходится двигаться все-таки так, как она им позволяет. Если сопротивление выстроенных в слое хвостов молекул повороту в жидкости не велико, то бегающие по ним и каждый раз в своем движении подталкивающие их к повороту электроны постепенно заставляют молекулы развернуться по полю так, чтобы их электронам было наиболее свободно двигаться полем. Малость массы электронов и слабость их воздействия на поворот молекулы компенсируется многократностью их действия (с частотой света 10^{15}), т.е. миллиард раз за микросекунду. Это и есть механизм общей ориентации хвостов молекул мыла на поверхностях пленки слабым световым полем, приводящим к изменению показателя преломления среды и появлению трека. В объеме раствора молекулы мыла свободны, хаотичны и заметной ориентации их окончаний светом не происходит.

Если при такой перестройке хвосты молекул начинают еще чувствовать соседей и поддерживать индуцированные дипольные моменты друг друга, то эффект воздействия света усиливается, и у выстроенных молекул появляется возможность после ослабления света некоторое время коллективно противостоять тепловому шуму среды и сохранять путь трека.

Поворот окончаний молекул и ограниченное число их на пленке могут пояснить причину насыщения и странной независимости эффекта образования треков от интенсивности световых потоков при изменении их интенсивности на много порядков, наличие в пленке двойного лучепреломления и отсутствие какого-либо заметного влияния поляризации на поведение треков.

По существу, речь идет о том, что свободная мыльная пленка представляет принципиально новую среду для записи, хранения и обработки оптической информации. Вариация и сохранение некоторое время оптических свойств элементов пленки, ячеек, попадающей в трек, можно рассматривать как демонстрацию оптической памяти, управляемой потоком света. Количество таких ячеек на пленке более миллиарда. А постоянные ветвления и переключения направлений многих идущих по этим ячейкам треков демонстрируют параллельные вычисления, т.е. реализацию каждым треком своей вычислительной программы, осуществляемой на пленке многопроцессорным и многоканальным самоуправляемым оптическим компьютером. Легкость формирования узких каналов в пленке при комнатной температуре свидетельствует о возможности записи в жидкой среде треком и передачи по нему информации, не разрушаемой шумами тепловых движений окружающих молекул.

Эти результаты по существованию треков, возможно, представляют интерес для биологов. Они последнее десять лет конструируют модель /12-14/, соединяющую сознание, нейробиологию и квантовую механику, и бурно обсуждают такой вопрос, – можно ли в микротрубках нейронов в жидкой среде живой клетки при комнатной температуре и наличии шумов хранить без разрушения квантовую информацию, которая управляет процессом деления каждой клетки, поведением нейронов и даже сознанием организма? Вот демонстрируемое формирование светом выделенного канала трека в жидкой среде показывает, что да, тепловые шумы не разрушают записанную треком информацию, и некоторое время информация в нем хранится. А тема эта важная, поскольку осознание сознания, себя, своей роли и движущих сил общества /15,16/ являются основными составляющими нашей жизни.

Для заинтересованных любителей искусства предлагаем (в электронном варианте препринта) два небольших фрагмента отснятого нами документального фильма завораживающей симфонии живых световых треков /17/.

Благодарим коллег за помощь с аппаратурой и химикатами, за прозрачное вязкое мыло и за обсуждение полученных результатов.

Литература.

1. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю., «Способ получения поверхностных поляритонов», 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*, 33, 380 (2003);
4. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Квантовая электроника* 34, 569 (2004).
5. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН №22* (М. ФИАН, 2003) (см. <http://ellphi.lebedev.ru/4/Stoilov1.pdf>).
6. Стойлов Ю.Ю. *УФН*, 174, 1359 (2004).
7. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН №12* (М. ФИАН, 2005) (см. <http://ellphi.lebedev.ru/11/pdf12.pdf>).
8. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Препринт ФИАН №6* (М. ФИАН, 2007) (см. <http://ellphi.lebedev.ru/18/pdf6.pdf> С приложенными кинофильмами).
9. Описание зеленой лазерной указки (<http://lasercomponents.ru/>).
10. Ярив А., Юх П. *Оптические волны в кристаллах*: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987.
11. Bresme F., Faraudo J. *Computer Simulation Studies of Newton Black Films. Langmuir*, 20, 5127 (2004).
12. Hameroff S. *Neurobiology and Quantum Mechanics: The Case for a Connection*. (См. <http://www.quantumconsciousness.org/publications.html>).
13. Hameroff S.R. *Consciousness, neurobiology and quantum mechanics: The case for a connection. Cognitive Science*, 31, 1035 (2007).
14. Hagan S., Hameroff S. R, Tuszyn J. A. “Quantum computation in brain microtubules: Decoherence and biological feasibility”, **PHYSICAL REVIEW E**, VOLUME 65, 061901 (2002).
15. Кайтуков В.М. “Эволюция диктата” (М.:”Урамос”, 1991, с.468) (см. <http://www.philosophyevolution.com/index.htm>)
16. Кайтуков В.М. «Лекции по философии в Физическом институте РАН» (М. ФИАН, 2005) (<http://ellphi.lebedev.ru/12/lekcii.pdf>).
17. Два фрагмента фильма «Симфония оптических треков».