

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Физический
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева



Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

А.В.СТАРЦЕВ, Ю.Ю.СТОЙЛОВ

12

**О ДВОЙНОМ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИИ
В МЫЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ**

МОСКВА 2005

О двойном лучепреломлении в мыльных пленках

Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю.

Обнаружено двойное лучепреломление лазерных треков в обычных мыльных пленках толщиной около 1 мкм. Показатель преломления для треков с перпендикулярной к пленке поляризацией по оценкам равен $n_p=1.25\pm0.03$, а для треков с горизонтальной к пленке поляризацией $n_g=1.045\pm0.03$. Узкие треки в пленках образуются и при возбуждении непрерывными люминесцентными ($\Delta\lambda\sim 20$ нм) источниками света. Аналогичные лазерные треки наблюдаются в свободных тонких пленках диаметром 8 мм из жидких кристаллов ЖК-807. Отмечены особенности поведения неподвижных лазерных треков с разной поляризацией в стабильных долгоживущих (сутки) мыльных пленках с добавкой ДМСО.

Ранее отмечалось [1-6], что лазерный луч в свободной мыльной пленке имеет вид нерасходящихся узких ветвящихся каналов, т.е. пространственных солитонов микронной ширины, идущих по пленке десятки сантиметров. Световые каналы (треки) образуются из-за увеличения показателя преломления, вызванного локальным индуцированным изменением поляризационных свойств среды светом, что отражает поляритонный характер возникающих пространственных солитонов.

Разбиение лазерного луча на тонкие треки легко наблюдается невооруженным глазом во всех исследованных нами мыльных пленках толщиной от 10 мкм до 10 нм при всех применявшихся непрерывных и импульсных (нано-, фемтосекундных) лазерах с длиной волны 0.4 - 1.1 мкм и с мощностями 10 мВт - 10 кВт. В объеме раствора такие треки не образуются. С точностью до 0.001 нм длина волны лазерного света, выходящего из треков, совпадает с длиной волны возбуждающего излучения (632.8 нм). Механизм изменения показателя преломления под

действием необычно слабого светового потока связан, по нашим оценкам, с диэлектрофорезом молекул в тонкой пленке, с их приповерхностной перестройкой в неоднородностях светового электромагнитного поля, введенного в пленку.

Мыльные пленки обычно со временем становятся все тоньше из-за дренажа раствора, что вызывает постоянные метания и разветвления идущих по ним треков. Подбирая оптимальные условия возбуждения, удается с полупроводниковым лазером-указкой (650 нм, 1 мВт) получать на вогнутой пленке на несколько минут один лазерный трек длиной более 30 см /6/. Но зафиксировать трек в жидкой мыльной пленке на большее время нам не удавалось.

Лазерные треки наблюдаются и в жесткой мыльной пленке с полимеризатором, застывающим на воздухе, но из-за мутности этой среды длина неподвижных треков в такой пленке не превышает нескольких миллиметров, что затрудняет их исследование. В жидких пленках многосантиметровые треки видны лучше, но они находятся в постоянном непредсказуемом движении, как бегающие стримеры молний, что позволяет рассматривать пленку с треками как модель самоуправляемого светового компьютера. Но такие смещения или метания затрудняют выделение и изучение треков. Кроме того, доля возбуждающего лазерного потока, который входит в пленку, обычно составляет около 10%, а остальное излучение рассеивается, создавая мешающий фон.

Исследование волноводных свойств свободных пленок толщиной менее длины волны представляет научный и практический интерес, особенно для лазерных треков, поскольку они еще мало изучены и не всегда предсказуемы. Мы продолжили исследование таких треков и выбрали условия, при которых свет из треков и мешающий световой фон не накладывались, а были пространственно разнесены. На ровных или

слабо изогнутых пленках это сделать трудно, поэтому мы стали исследовать пленки с большим изгибом в виде полусфер на гладкой поверхности раствора, имеющих форму дождевых пузырей на лужах. Лазерное излучение через прозрачное дно кюветы и тонкий слой раствора фокусируется снизу на ребро пузыря, проходит по пленке треками и выходит почти в противоположном направлении, что заметно ослабляет мешающую фоновую засветку.

Попутно решалась еще одна задача. Такие пузырьки на лужах живут мгновения, обычные мыльные пузырьки живут минуты, а для оптических экспериментов с пленками удобнее иметь более долгоживущие пузырьки. Для этого мы перебрали доступные поверхностно активные вещества, разные типы мыла, шампуни, жидкости для мытья посуды, для полоскания рта и многие другие. Например, несколько удлиняют жизнь пузырей добавка к раствору чернил для струйных принтеров, но состав чернил нам неизвестен.

Иногда для увеличения времени жизни пленок мы добавляли (как в пленочных испаяторах /7/) 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 пузырь из такого раствора сохраняется сутками. Через сутки на некоторое время (2-5 часов) дренаж в жидкой пленке практически совсем прекращается, что удобно для изучения оптических свойств таких стационарных прозрачных пленок и прохождения в них лазерных поляритонов.

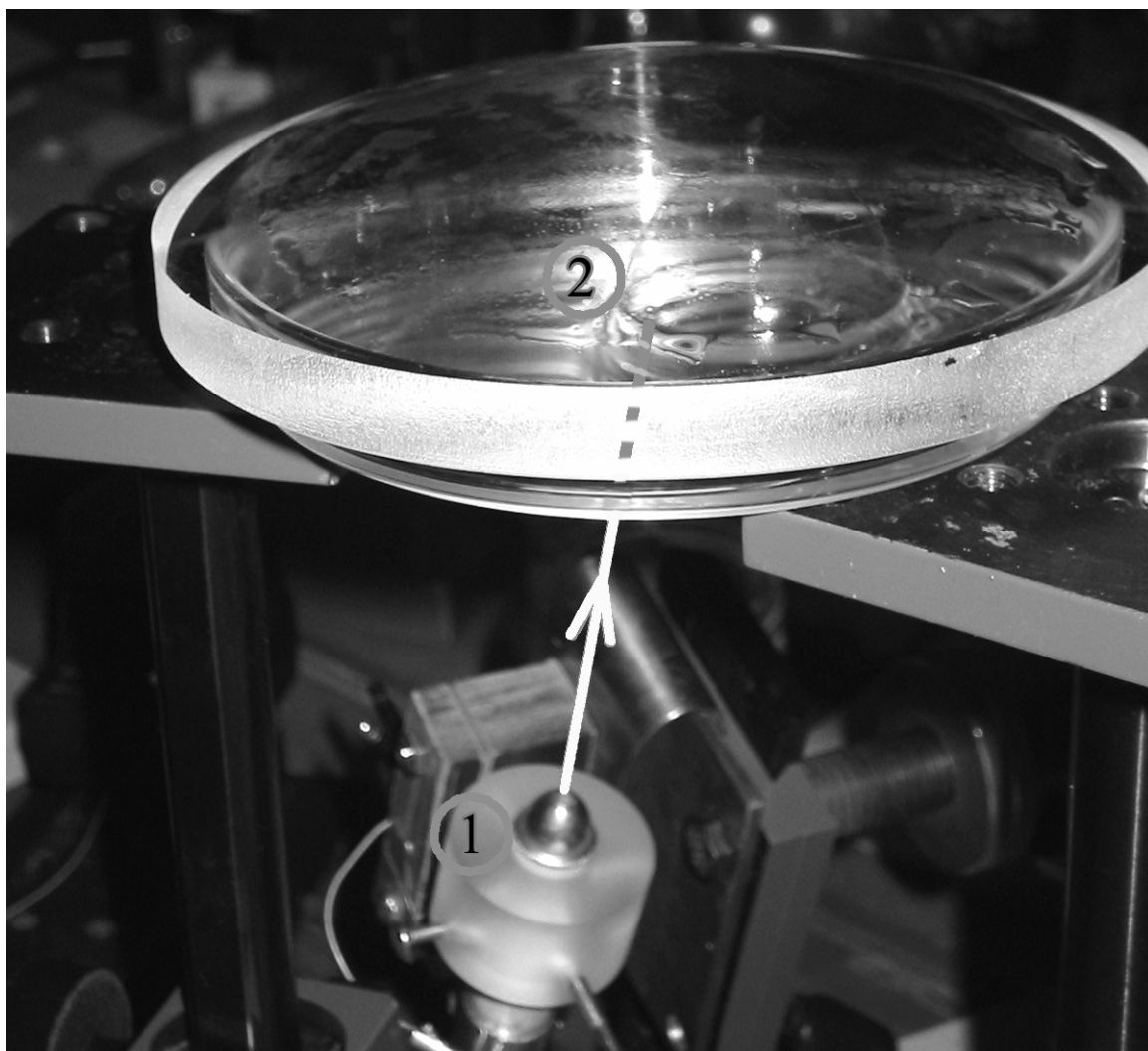


Рис.1. Вид установки для исследования лазерных треков в мыльном пузыре диаметром 2-4 см. 1- полупроводниковый лазер-указка, 2 – мыльный пузырь на поверхности раствора в закрытом объеме.

Вид установки для исследования треков в мыльном пузыре диаметром 2-4 см показан на Рис.1. Оптимальность угловой настройки и фокусировки излучения полупроводникового лазера-указки (650 нм, 1 мВт) контролировалась по яркости треков в пленке и пятен от выходящего из треков потока на экране. Лазерное излучение линейно поляризовано, и оси поляризации ориентировалась примерно под 45 градусов к ребру пленки в точке фокусировки. Такое направление оси позволяло с помощью дополнительного пленочного поляризатора, не нарушая настройки,

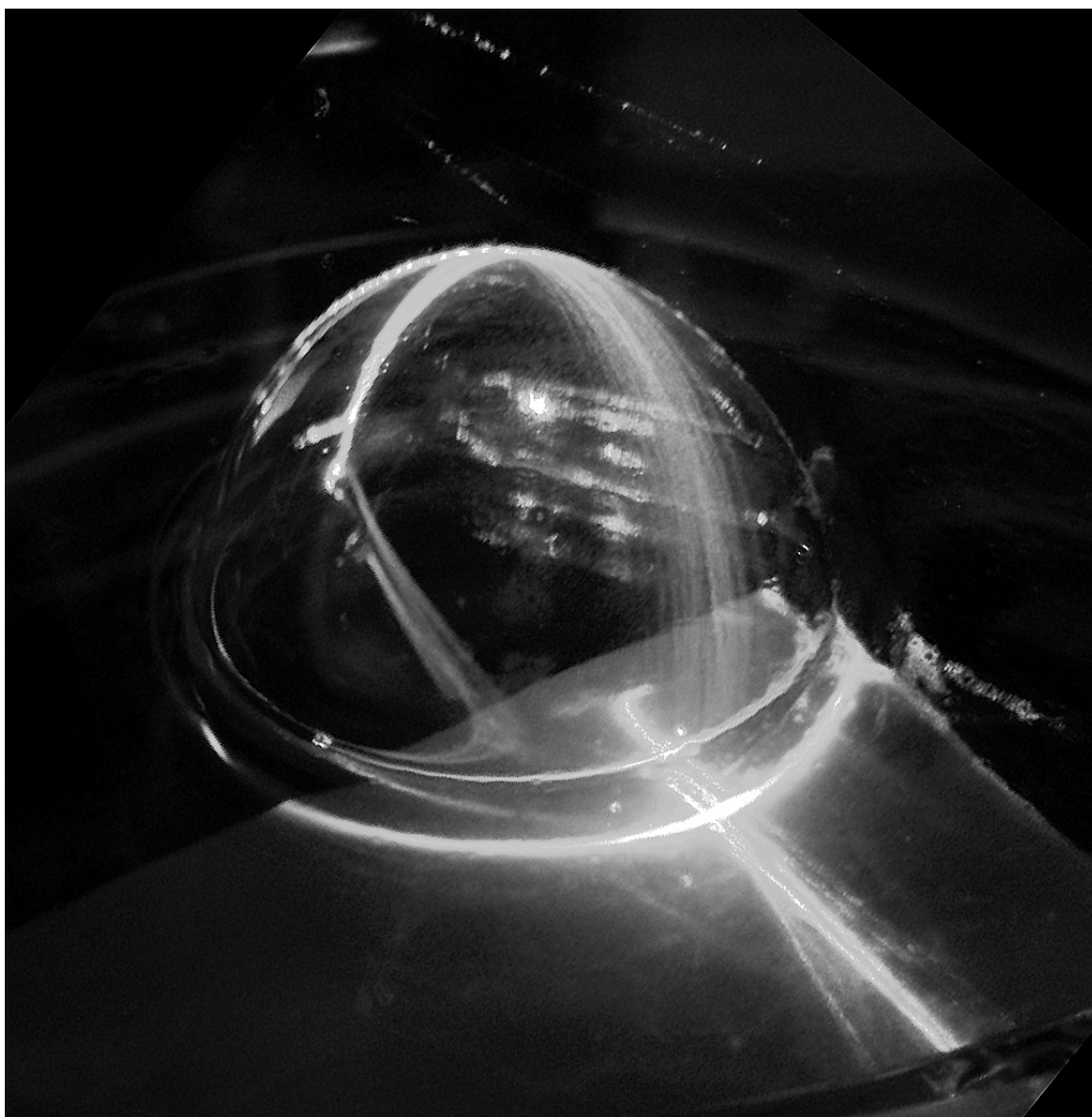


Рис.2. Лазерные треки в свежем пузыре. [видео – 2.03М]

выделять в лазерном излучении вертикальную или горизонтальную с пленкой компоненту поляризации и изучать ее распространение в пленке.

В свежем пузыре с толщиной пленки 5-10 мкм излучение лазера с обеими поляризациями, как мы уже отмечали [3, 6], дает примерно одинаковые треки (Рис.2) с такой же выходной, как на входе, поляризацией. Но с уменьшением толщины пленки примерно до 1 мкм в треках, возбуждаемых разной поляризацией, неожиданно начинают проявляться отличия в виде двойного лучепреломления – треки с разной

поляризацией дают на экране два бегающих, размытых, но заметно разнесенных пятна, как показано на Рис.3а.

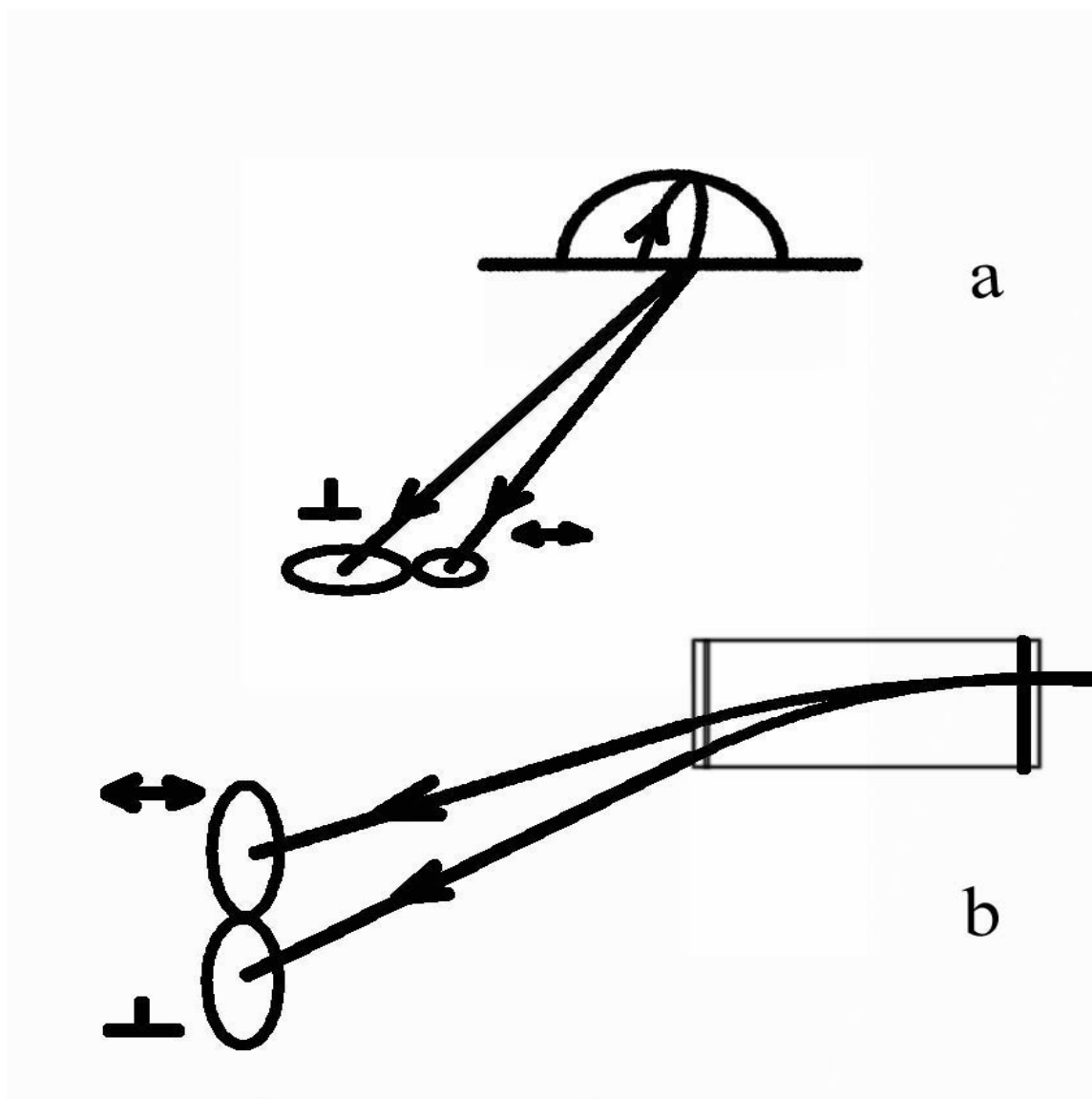


Рис.3а,б. Треки с разной поляризацией дают на экране два размытых, но заметно разнесенных пятна.

Треки прыгают, и это затрудняет определение углов, под которыми они падают на выходное ребро пленки. Задавая для оценок этим углам средние, определяемые на глаз, значения, мы получаем, что в пленке толщиной около 1 мкм показатель преломления для треков с перпендикулярной к

пленке поляризацией равен $n_p=1.25\pm 0.03$, а для треков с горизонтальной к пленке поляризацией $n_g=1.045\pm 0.03$.

Для проверки, не связан ли эффект двойного лучепреломления со сферичностью пленки, мы повторили эти опыты с плоской более длинной вертикальной пленкой (длиной 9 см). Схема опыта показана на Рис.3б. В свежеприготовленной толстой пленке 5-10 мкм лазерные треки идут по прямой от входа до выхода и дают на экране прыгающее размытое пятно. При уменьшении толщины пленки до 1 мкм (на ней в отраженном свете видно несколько горизонтальных интерференционных полос) треки идут в пленке по дуге, как струи воды из шланга, разные поляризации идут в ней явно разными пучками треков и дают на экране два разнесенных по высоте пятна. Проведенные замеры выходных углов (углы падения треков на выходное ребро пленки здесь тоже оцениваются на глаз) дают сходные значения для показателей преломления: $n_p=1.23\pm 0.03$, $n_g=1.09\pm 0.03$. Со временем при дальнейшем уменьшении толщины плоской и сферической пленок пятна на экране сливаются (но имеют разную ширину). При толщине пленок (50-80 нм), когда они выглядят черными в отраженном свете /3, 6/, показатели преломления для лазерных треков приближаются к единице. Следует подчеркнуть, что выходное излучение из треков в черной пленке при любой поляризации возбуждающего света содержит только одну компоненту, поляризованную в плоскости пленки. В этом случае излучение лазера с вертикальной поляризацией преобразуется в выходном излучении в поляризацию в плоскости пленки.

Нас интересовала, важна ли когерентность лазерного излучения для получения треков в пленках? Излучение полупроводниковых лазеров-указок может быть узкополосным (Рис.4-а1), широкополосным (Рис.4-б1) и люминесцентным (Рис.4-с1).

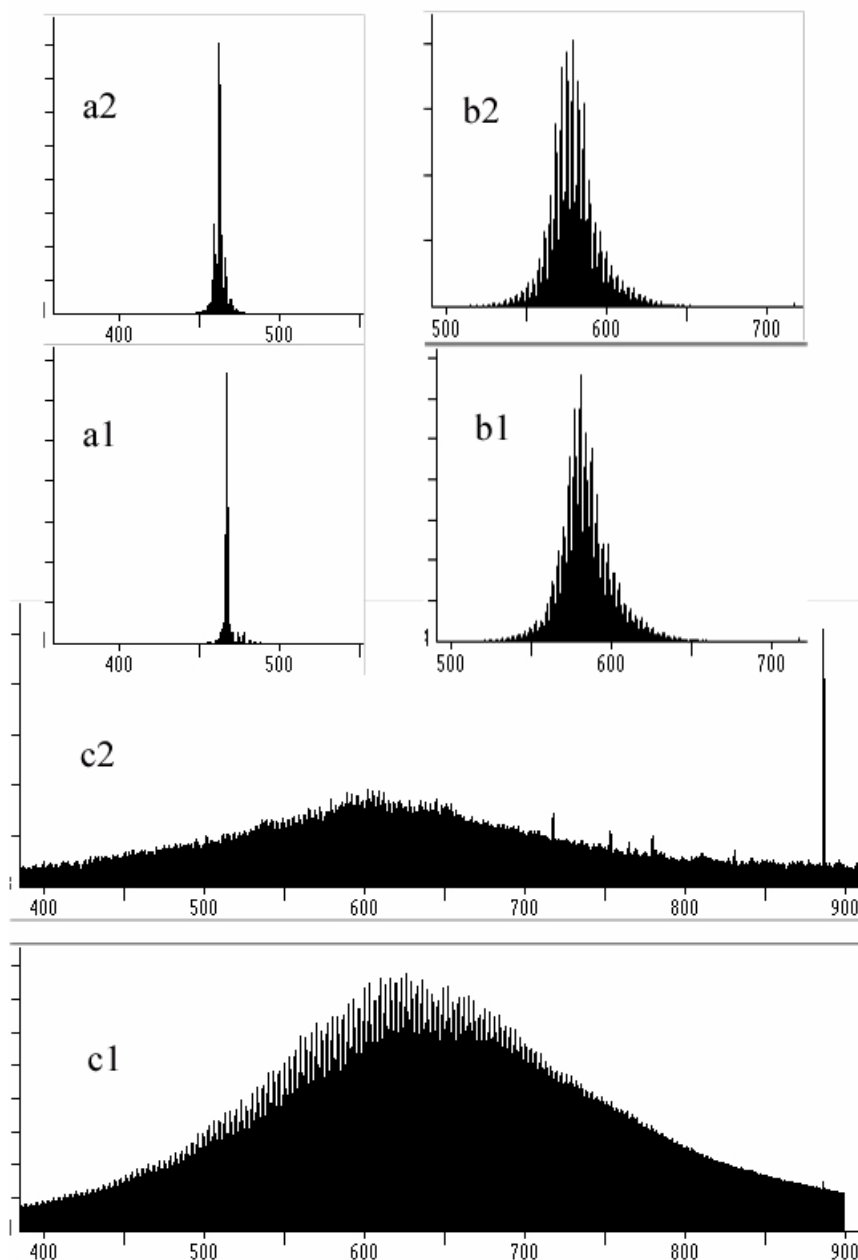


Рис.4. Выходное излучение из треков (2) по ширине спектра полностью повторяет спектр возбуждающего источника (1).

Длины волн указаны в относительных делениях (по линейной калибровке 400д соответствует 659,25 нм, 900д - 634,44 нм). Яркость люминесцентного потока значительно ниже, чем у лазерного, но оказалось, что треки в пленке хорошо видны и тогда, когда возбуждаются люминесценцией испорченного полупроводникового лазера. Спектры входного и выходного излучения фиксировались в разные моменты

времени, но, как видно, выходное излучение из треков (Рис.4-abc2) по ширине спектра и в этом случае практически повторяет спектр возбуждающего источника, т.е. для получения треков не требуется монохроматичность источника накачки. Этот же вывод мы делали и ранее на основе экспериментов, в которых наблюдали лазерные треки, возбуждаемые короткими фемтосекундными (широкополосными) лазерными импульсами /3, 6/.

Доля светового потока, передаваемого по трекам в пузыре, уменьшается примерно с 20% при толстой плёнке до 2-3% при черной. В черной сферической плёнке излучение по направлению трека начинает также выходить из каждой его точки по касательной к поверхности плёнки, образуя на экране рядом с выходным пятном дополнительные яркие полосы, равные по числу количеству треков в пучке (Рис 5). Со временем и дальнейшим уменьшением толщины черной плёнки яркость этих полосок относительно выходного пятна увеличивается. Радиус кривизны в 1-2 см для черной плёнки, видимо, превышает “допустимую норму изгиба волновода”, и излучение из волновода начинает выходить по касательной.

Пытаясь понять уникальность мыльных плёнок, мы проводили эксперименты по получению лазерных треков и в других средах. Как уже отмечалось /4, 6/, в плёнках из разведенного в воде яичного белка или из меда лазерные треки не образуются, но при аналогичных условиях возбуждения (650 нм, 1 мВт) они хорошо видны в свободной тонкой плёнке из жидких кристаллов ЖК-807 диаметром 8 мм (Рис.6).



Рис.5. В черной сферической пленке излучение выходит из каждой точке трека по касательной к поверхности, образуя на экране около выходного пятна дополнительные яркие полосы.

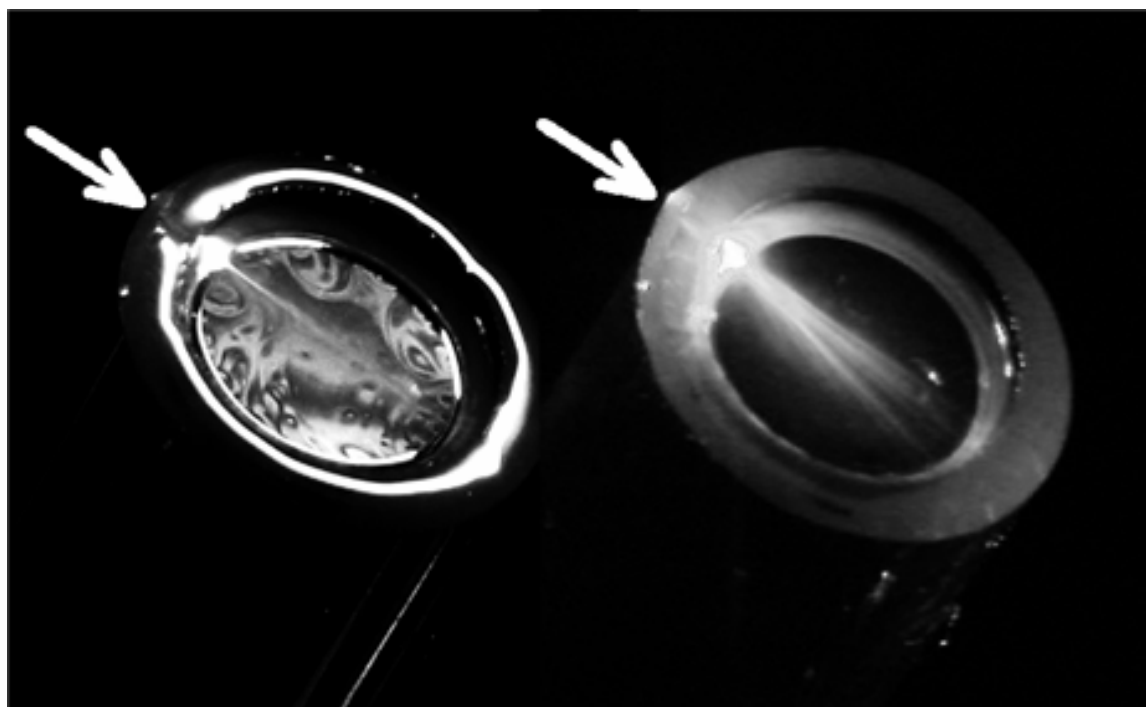


Рис.6. Узкие лазерные треки в свободной пленке из жидких кристаллов ЖК-807 диаметром 8 мм .

Эти пленки трудно, но можно делать и большего диаметра (1.5 см), но жидкость мутная, и узкие треки более 8 мм по пленке не проходят. Пока эта свежеприготовленная пленка меняет свою толщину, треки ветвятся и меняют свои направления, как и в мыльных пленках, но с меньшей скоростью. Аналогия с мыльными пленками интересна, но у жидкости ЖК-807 совсем другой состав, и с мыльным раствором она не смешивается. Еще одно отличие состоит в том, что свойства жидкокристаллических пленок можно менять электрическим полем, но в наших опытах лазерные треки в мыльных пленках не реагируют на наличие даже киловольтного импульсного внешнего электрического поля от близкорасположенных около пленки электродов вплоть до пробоя, когда пленка рвется.

Ранее было высказано предположение, что имеющаяся перестройка молекул в лазерных треках могла бы сказаться, например, на температуре замерзания раствора в треках. Для проверки мы охлаждали пленку с

постоянно бегущими в ней лазерными треками до замерзания, но не заметили, чтобы область с треками замерзала как-то отлично от областей пленки без треков. При замерзании пленка становится мутной и треки исчезают.

Интересен опыт, когда в такой стационарной пленке возбуждающий луч из полупроводникового лазера диаметром около 2 мм (до фокусировки) образует трек, который проходит без метаний по пленке и дает на экране на расстоянии 22 см от выходного ребра пузыря неподвижное пятно (Рис.7а).

Если в широкую часть луча (до фокусировки) вводить иголку толщиной 0.5 мм, которая делит этот луч пополам, то в стабильном пятне на экране тоже появляется тень от иголки, при условии, что иголка перпендикулярна ребру пленки (Рис.7b). Если же иголка параллельна ребру пленки, то все пятно уменьшает свою яркость. Появление тени иголки на экране (и видимых на Рис.7b двух дополнительных полосок от излучения, выходящего по касательной из двух треков в пленке) указывает на то, что при делении лазерного луча тенью фокальное пятно тоже разделяется, и в пленке образуются два независимых трека, которые, не сливаясь, идут рядом по пленке и дают на экране два близко расположенных пятна. Мы меняли фокусировку, пытались слить эти два трека в один, но нам это не удалось. Отметим, что при бегающих треках в нестабильной пленке мы такой тени от иголки на экране заметить не могли.

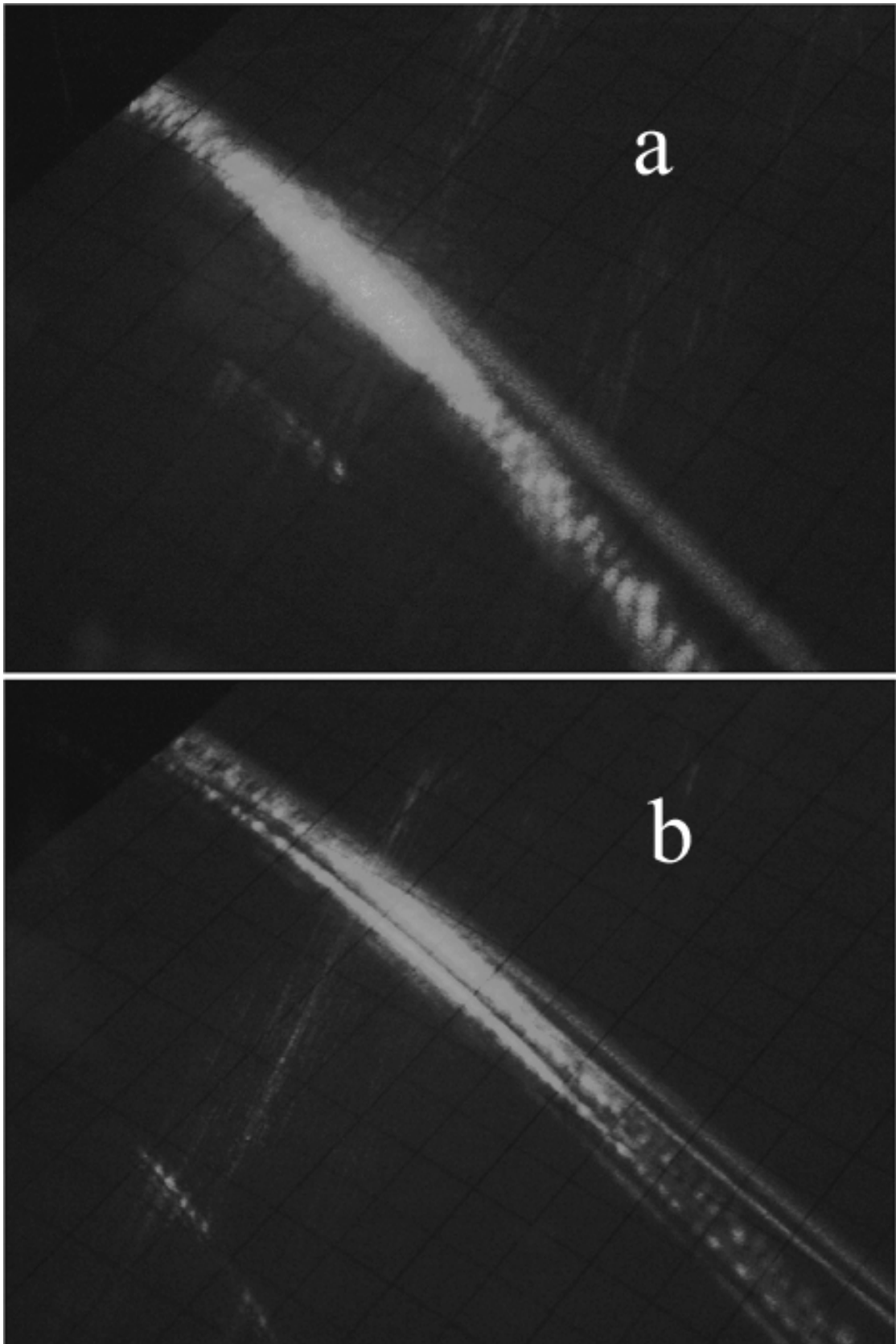


Рис.7. Тень от иголки на выходном пятне (а) на экране, когда иголка в лазерном луче перпендикулярна к ребру пленки (b). [видео – 1.13М]

Структура самой стабильной мыльной пленки (со стабильными треками) тоже представляет интерес, поскольку она, видимо, существенно отличается от структуры обычной мыльной пленки. У нас не было возможности проверить ее состав непосредственно, но внешние отличия этой пленки следующие. Стабильная пленка постепенно возникает в закрытом объеме из обычной мыльной пленки, сделанной из раствора с высоким содержанием ДМСО (5-30%). Через 5-10 часов при малом количестве ДМСО образуется стабильная черная пленка, при высоком - толстая пленка. Толстая пленка отличается от исходной свежей пленки пузыря исчезновением начальных цветов и появлением весьма яркого стеклянного блеска. У ДМСО показатель преломления 1.478, что заметно выше, чем у мыльного раствора ($n=1.33$), и увеличение блеска, видимо, связано с повышением концентрации ДМСО в пленке. Пузырь со стабильной толстой пленкой может находиться в закрытом объеме более трех суток, постепенно уменьшаясь в диаметре, и в условиях термического равновесия треки в таких пленках не бегают. Но малейший перепад температур или движение окружающего кювету воздуха (даже от дыхания наблюдателя) приводят треки в движение

Об изменении состава пленки свидетельствует и то, что при открывании объема пузырь сразу лопается, что не характерно для свежих пузырей из такого раствора. Мыльные пузыри при контакте слипаются, а наличие ДМСО в пленке приводит к тому, что при тесном контакте двух таких пленок, как показано на Рис.8, они не слипаются более 5 минут. Возбуждая лазерные треки во внешнем пузыре, мы убедились, что они, не меняя своего вида, проходят область контакта двух пузырей, но в пленку внутреннего пузыря они не переходят.

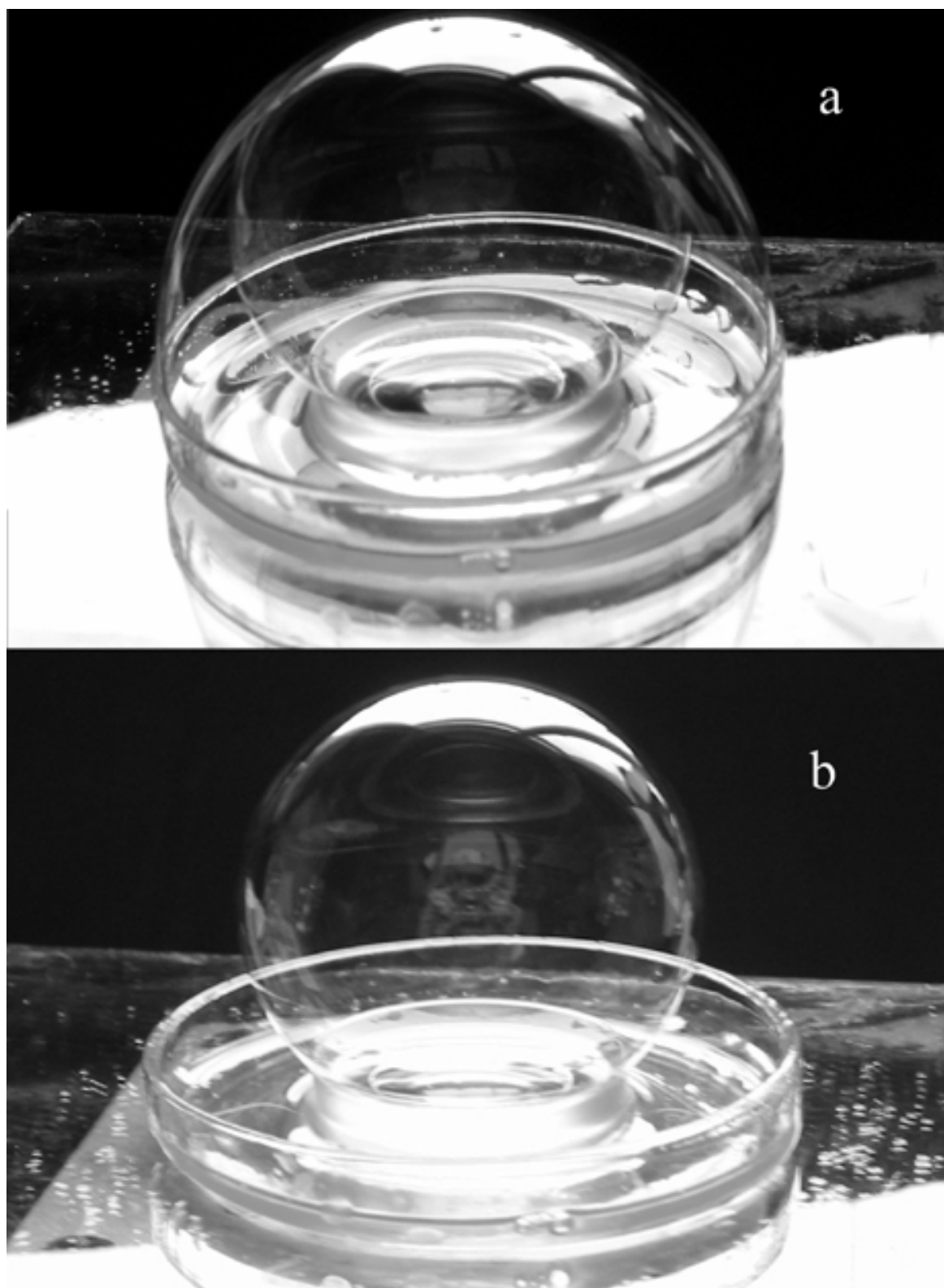


Рис.8. Два контактирующих своими поверхностями пузыря (а). Диаметр внешнего пузыря 10 см. Наличие ДМСО в пленке приводит к тому, что при тесном контакте двух таких пленок они минут 5 не

слипаются. Внутренний пузырь принимает сферическую форму (b) после того, как лопнула пленка внешнего пузыря.

Обсуждение

Наличие двойного лучепреломления в обычных мыльных пленках крайне неожиданно и не менее загадочно, чем наличие в них тонких световых каналов. В объеме мыльных растворов нет треков и нет двойного лучепреломления. Отличие мыльных пленок от объемного раствора состоит в присутствии двух поверхностных слоев плотноупакованных и ориентированных молекул мыла, оптические параметры которых могут отличаться от растворных. Но влияние этих предельно тонких одномолекулярных слоев на свойства пленки нельзя оценивать по разработанным формулам для многослойных сред /8/, поскольку, согласно им, из-за малой толщины воздействие этих тонких слоев на свойства пленки пренебрежимо мало. Двойного лучепреломления в таких пленках тоже не ожидается, поскольку, согласно оценкам /8/, в симметричных волноводах ТЕ и ТМ моды имеют одинаковые пороговые параметры и не характеризуются разными эффективными показателями преломления. Возможно, изогнутая пленка уже не является чисто симметричным волноводом, но эффект двойного лучепреломления наблюдается и в плоской чисто симметричной пленке. Хорошо видно, что от точки фокуса треки с разной поляризацией идут по ней разными пучками, пересекаются, но обычно не взаимодействуют друг с другом, хотя раньше мы отмечали случаи преобразования в пленке одной поляризации в другую /3/.

Какие особенности мыльных пленок вызывают появление в них двойного лучепреломления и тем самым выделяют их из обширного класса слоистых сред, подробно рассмотренных в /8/? Этот вопрос мы адресуем теоретикам, но ниже отметим наши предположения.

Тем, кто будет исследовать лазерные треки в мыльных пузырях, необходимо обратить внимание на следующее. Для получения треков в пленке необходимо, чтобы лазерный луч лежал в плоскости пленки, точнее в плоскости касания к пузырю в точке фокусировки. Но пузырь на поверхности раствора не точная полусфера, и поэтому требуется заметное отклонение лазерного луча от вертикали к поверхности раствора, чтобы он зашел в пленку. И хотя, на взгляд, все пузыри вроде бы похожи, но они не подобны и меняют свою форму со временем. Наиболее яркие треки наблюдаются в свежем пузыре, но затем отклонение от вертикали меняется по мере утоньшения пленки, и для оптимального возбуждения и получения треков требуется постоянная подстройка фокусируемого лазерного луча. В черных пленках трек почти незаметен и настройка производится по яркости выходного пятна.

Образование лазерных треков под действием немонахроматического света показывает, что по треку одновременно может идти свет с разными длинами волн. Трек, проложенный, например, более мощным потоком, используется как канал коллективного пользования более слабым потоком на другой длине волны. Но, если так, то почему мы не видим такого же взаимодействия треков друг с другом при их пересечении /1-6/? Почему при пересечении они не сливаются в один общий поток?

Наличие тени от иголки в выходном пятне стационарных треков делает правомерным такой вопрос - на каком минимальном расстоянии друг от друга могут по пленке идти параллельные треки и не сливаться? Исследование непростых закономерностей взаимодействия треков в пленке требует дополнительного анализа и проведения более тонких экспериментов.

Наблюдение похожих по виду лазерных треков в свободных жидкокристаллических пленках интересно, поскольку есть много

теоретическому работ по описанию механизма самофокусировки лазерного света в таких тонких слоях в треках длиной несколько миллиметров /9-11/, но многослойная структура пленок из жидких кристаллов с ориентированными молекулами весьма отлична как по химическому составу, так и по своим физическим свойствам от более простых двухслойных мыльных пленок, что не позволяет рассматривать их в рамках одной теоретической модели.

В этой связи представляют интерес результаты недавно проведенного методом молекулярной динамики теоретического расчета /12, 13/ структуры электрических полей в тонкой мыльной пленке, которые существенно отличаются от оценок этих полей ранее разработанными классическими теориями. Численное моделирование взаимодействия и перемещения молекул показывает, что в тонком слое у поверхности пленки электрическое поле достигает величин 5×10^9 В/м. Это приводит к предельной упорядоченности и поляризации молекул воды в поверхностном слое пленки, а на расстоянии уже 1 нм к центру пленки поле спадает до нуля. В пленке нет обычной диэлектрической проницаемости, поскольку отсутствует локальная зависимость поляризуемости воды от электрического поля.

Авторы не проводили расчетов влияния введенного в пленку лазерного поля на структуру этих областей предельной поляризации, но нам представляется вероятным, что лазерный свет в мыльной пленке может своим полем за счет дополнительного диэлектрофореза расширять эти области предельной поляризации молекул у поверхностей пленки, тем самым увеличивать область ориентированных молекул и изменять оптические свойства среды. Это может приводить к увеличению показателя преломления области, где есть свет, тем самым образовывать в пленке треки, по которым излучение и идет. Поскольку области

предельной поляризации в пленке уже есть и без света, то на изменение их размеров не надо много энергии, и их легко образовывать светом любой длины волны и интенсивности. Поток с разной поляризацией воздействует на область предельной ориентации по-разному, поэтому в толстой пленке и есть двойное лучепреломление. Меняя толщину области, введенное излучение образует и управляет движением своих треков. Полученные результаты могут быть полезны для волноводной техники, для теории тонких пленок и для оптических компьютеров. Представляет интерес провести более детальную численную проверку этих наших предположений и на их основе попытаться наблюдаемое неконтролируемое движение треков сделать более управляемым.

Итак, на наш взгляд, новыми и наиболее интересными для пленок и будущих оптических компьютеров результатами являются следующие:

1. Двойное лучепреломление в обычных мыльных пленках.
2. Возможность получения в них узких треков при возбуждении непрерывными немонахроматическими источниками света.
3. Аналогичные лазерные треки в свободных пленках из жидких кристаллов ЖК-807.
4. Возможность создания стабильных долгоживущие (сутки) мыльных пленок с добавкой ДМСО.
5. Получение в них неподвижных треков и отмеченные особенности их поведения с разной поляризацией.



Представленные опыты и результаты могут быть интересны школьникам и студентам как простые лабораторные работы для расширения физического кругозора и знакомства с нано-миром в нашей затухающей системе образования /14/, и за рубежом как объекты для целостного их “переоткрывания” слугами диктаторской эволюции /15/, поскольку “Международная наука чем дальше, тем больше становится мафией. Цитируют себя и своих знакомых, гранты дают своим знакомым, закрывают глаза на присвоение “своими” чужих идей. Процвечают двойные и тройные стандарты, а профессиональная этика, похоже, скончалась.” /16/.

Благодарим коллег за обсуждения, лазеры, фотодиоды, ремонт старого компьютера, чистые химические компоненты и за образцы жидких кристаллов ЖК-807.

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 усов).
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. Стойлов Ю.Ю. «Способ получения пленочных испалаторов», заявка на патент №2005111004 от 15 апреля 2005 года.
8. Ярив А., Юх П. *Оптические волны в кристаллах*. (М: «Мир», 1987).
9. Karpierz M. A., *Phys. Rev. E*, 66, 036603 (2002).
10. Karpierz M.A., Nguyen Q.V., *Opto-electronics Review*, 10 (1), 59 (2002).
11. Striniж A. I., Timotijevиж D. V., Arsenovиж D., Petroviж M. S., Belиж M. R., *Optics Express*, 13, 493 (2005).
12. Faraudo J., Bresme F. *Phys. Rev. Letts*, 92, 236102 (2004).
13. Faraudo J., Bresme F. *Phys. Rev. Letts*, 94, 077802 (2005).
14. Шарыгин И.Ф. Новый мир, 10, 110 (2004) (http://magazines.russ.ru/novyi_mi/2004/10/shar10-pr.html).
15. Кайтуков В.М. «Эволюция диктата» (М.: «Урамос», 1991, 468) (см. <http://www.philosophyevolution.com/index.htm>).
16. Медведев С.В. «КРЫСИНЫЕ МОЗГИ НАМ НЕ ПОМОЩНИКИ» Независимая газета # 74 (3470) 13 апреля 2005 г. (http://www.ng.ru/science/2005-04-13/11_medvedev.html).