

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Лазерный луч в мыльной пленке

Ю.Ю. Стойлов

Рассматривается необычное поведения лазерного луча, введенного в простую мыльную пленку и неожиданно разбивающегося на тонкие (микронные) ветвистые каналы, идущие по пленке без расходимости иногда на десятки сантиметров. Обсуждаются природа этого явления и возможности его применения.

PACS numbers: 42.25.Bs, 42.65.Tg, 68.60. – p

Содержание

1. Введение (1359).
 2. Лазерные треки в жидких мыльных пленках (1360).
 3. Лазерные треки под микроскопом в жидких и жестких мыльных пленках (1362).
 4. Объяснение некоторых свойств треков как лазерных стержневых антенн последовательного питания. Возможные применения треков (1364).
 5. О нелинейном механизме образования треков (1367).
 6. Заключение (1368).
- Список литературы (1369).

1. Введение

Мыльные пленки и пузыри привлекают внимание людей уже много веков [1, 2] и продолжают удивлять исследователей нескончаемым богатством новых открывающихся особенностей и чудес. Так, в работах [3–6] сообщается о странных свойствах лазерного света в обычных мыльных пленках, совсем не похожих на наблюдаемые при привычном рассеянии луча в объеме такого же мыльного раствора. В плоских или изогнутых свободных мыльных пленках из водного раствора любого обычного мыла практически любой концентрации или химически чистого поверхностно-активного вещества (ПАВ), способного образовывать пленки (с диаметром 5–15 см и толщиной от 10 нм до 10 мкм) в воздухе, введенный в пленку лазерный луч видимого (и инфракрасного) диапазона от точки фокуса *сразу разбивается на тонкие (микронные) ярко светящиеся каналы*, идущие далее без характерной дифракционной расходимости и видимого уменьшения интенсивности (рис. 1) иногда на десятки сантиметров. Эти световые треки (или

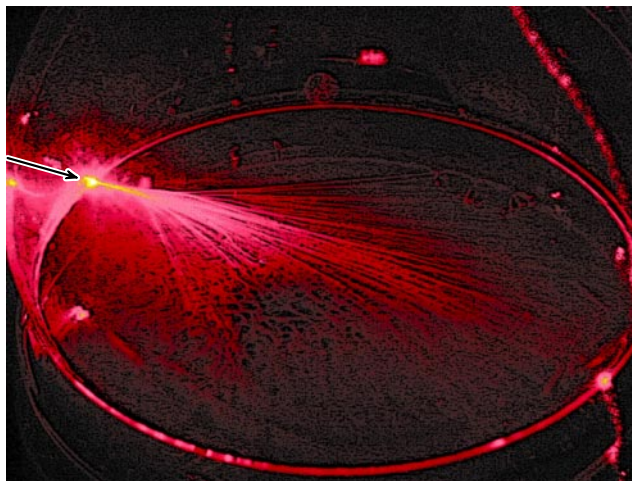


Рис. 1. Вид треков при фокусировке излучения непрерывного He–Ne-лазера (5 мВт, 632,8 нм) линзой с $F = 10$ см на ребро выпуклой мыльной пленки толщиной 5–10 мкм и диаметром 85 мм.

усы, как мы их иногда будем называть из-за заостренных концов) даже при самом прозрачном растворе хорошо видны невооруженным глазом. Они постоянно десятки раз в секунду изменяют свой путь, изламываются, ветвятся, как стримеры молний, легко пересекаются (см. кинофильм в приложении к [4]), и их внешний вид (узость треков) практически не зависит ни от температуры (0–30 °C), ни от длины волны лазера, ни от его поляризации или интенсивности, которая изменялась на девять порядков (от 10 мкВт до 2 Вт в непрерывном режиме и до 10 кВт в одиночном импульсе длительностью 10 нс). Такие же усы мы наблюдали в пленке из раствора ПАВ "Тритон X-405" в керосине.

Вызывает интерес физика этого крайне необычного, но простого для непрофессионального наблюдения и привлекательного явления. Кроме того, оно интересно и с практической точки зрения, поскольку узость, постоянные ветвления и изменения направлений световых каналов позволяют рассматривать пленку с бегающими усами как реально работающую модель мощного самоуправляемого оптического компьютера,

Ю.Ю. Стойлов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский просп. 53, Российская Федерация
Тел. (095) 135-86-49. Факс (095) 938-22-51
E-mail: stoilov@sci.lebedev.ru

Статья поступила 25 марта 2004 г.,
после доработки 12 июля 2004 г.

постоянно с высокой чувствительностью контролирующего динамику состояния пленки и определяющего время и место очередного переключения маршрутов своих узких треков [5].

Показатель преломления для треков, оцениваемый по изменению направления трека в пленке относительно направления возбуждающего лазерного луча, в пленках разной толщины составляет $1-1,28$ [4], приближаясь к единице в самых тонких пленках, и его существенное отличие от растворного ($1,33-1,45$) показывает, что излучение в узком треке имеет характер поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся как по пленке, так и по воздуху. Следует отметить, что разбегание слабого лазерного луча на такие узкие усы ранее ни в каких образцах не наблюдалось и вызвано особенностями структуры и нелинейными свойствами обычных мыльных пленок.

2. Лазерные треки в жидких мыльных пленках

Мыльные пленки имеют молекулярно-слоистую структуру [1, 2]. Внутренний слой (толщиной обычно менее 10 мкм) всегда однородный, а с обеих сторон поверхности имеются сплошные слои толщиной всего в одну молекулу из пространственно ориентированных перпендикулярно к пленке молекул мыла, плотно упакованных в двумерный кристаллический слой, типа слоя двумерного кристалла Ленгмюра – Блоджетт. По мере стекания раствора толщина пленки уменьшается от 10 мкм на три порядка. В отраженном свете на ней постепенно появляются интерференционные полосы, по виду и количеству которых можно определять толщину пленки [4]. Когда пленка становится тоньше примерно $0,1$ длины волны видимого света, в отраженном свете она выглядит сначала серебристой, бесцветно-серой, а затем черной, т.е. почти перестает отражать падающий на нее свет. Раствор из черной пленки продолжает стекать, толщина обычной черной пленки уменьшается еще на порядок, и, в конце концов, оба ее внешних слоя молекул почти сходятся и образуют так называемую истинную черную (ньютоновскую) пленку, состоящую только из этих двух кристаллических слоев покрывающих молекул общей толщиной около 5 нм , т.е. в 100 раз меньшей длины волны видимого света.

В серии опытов чуть вогнутая горизонтальная пленка создавалась в закрытой пластиковой бутылке ($0,5\text{ л}$, диаметр 65 мм) на уровне перетяжки (время жизни пленки до ее разрыва обычно составляло $10-20$ часов), а сфокусированный линзой с $F = 10\text{ см}$ лазерный луч направлялся через прозрачную стенку в ребро пленки или по воздуху на ее поверхность. Размер пятна фокусировки составлял около 30 мкм . В процессе экспериментов было замечено, что на вогнутых пленках дренажные потоки существенно меньше, оптическая однородность выше, а метание треков менее быстрое, чем на выпуклых пленках. Треки в пленке наблюдались под разными углами (рис. 2) и фотографировались через стенку. Для увеличения их яркости специально брался слегка мутноватый (рассеивающий) мыльный раствор.

Если фокусировать падающий под скольльзящим углом к поверхности (меньше 10°) луч в середину пленки (или на поверхность выдутого сферического мыльного пузыря радиусом $1-5\text{ см}$) толщиной $0,3-0,6\text{ мкм}$



Рис. 2. Наблюдение лазерных треков в мыльной пленке под разными углами.

(с несколькими интерференционными кольцами в отраженном свете), то иногда удается получить трек усов, идущий в пленке по кольцу или по другой замкнутой фигуре. Однако в этих же пленках усы могут быть и прямыми, т.е. распространяться прямолинейно по явно видимым в отраженном свете цветным неоднородностям пленки (рис. 3) [6]. В точке фокуса иногда рождается несколько усов, и при пересечении (рис. 4, 5) они не взаимодействуют, не видят друг друга.

По мере стекания раствора вогнутая пленка у стенки уменьшается по толщине и становится черной по краям (тоньше 50 нм), а в ее середине остается постепенно уменьшающийся в диаметре круг из более толстой пленки, отделенный от черной пленки четкой границей. В толстой части пленки типичный ход усов при фокусировке излучения по воздуху на эту границу между черной (толщиной меньше 50 нм) и более толстой (толщиной больше 100 нм) пленками показан на рис. 5–8. Следует отметить, что при фокусировке лазерного луча выше и ниже этой границы никаких усов в пленке не рождается. При падении луча по касательной к кругу из фокальной

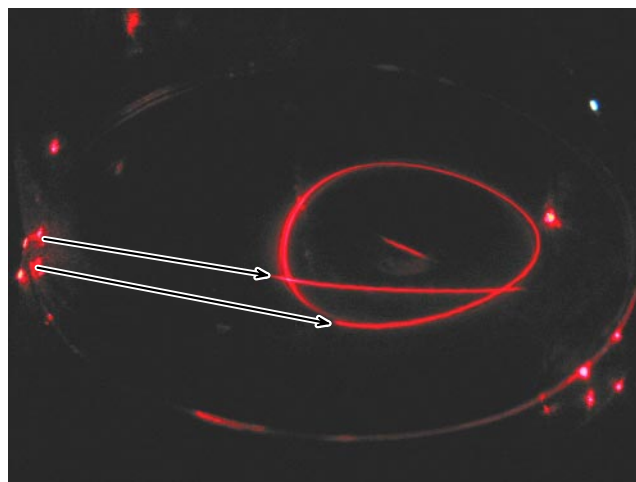


Рис. 3. Трек на вогнутой пленке в виде замкнутой фигуры, отличной от круга, и прямой трек. Ход двух одновременно фокусируемых лазерных лучей над пленкой показан стрелками.

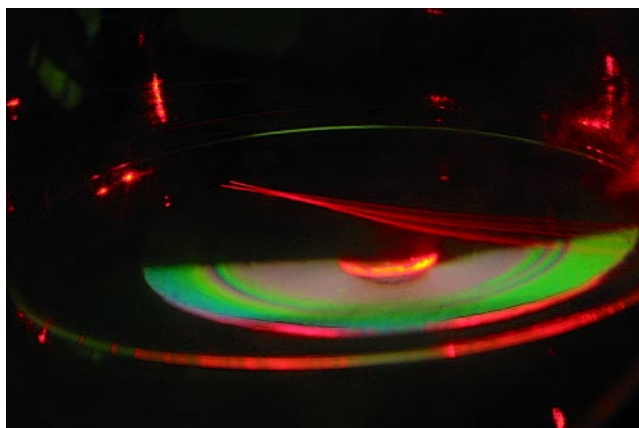


Рис. 4. Пучки прямых усов на пленке от двух лазеров. Пересекающиеся треки не влияют друг на друга.

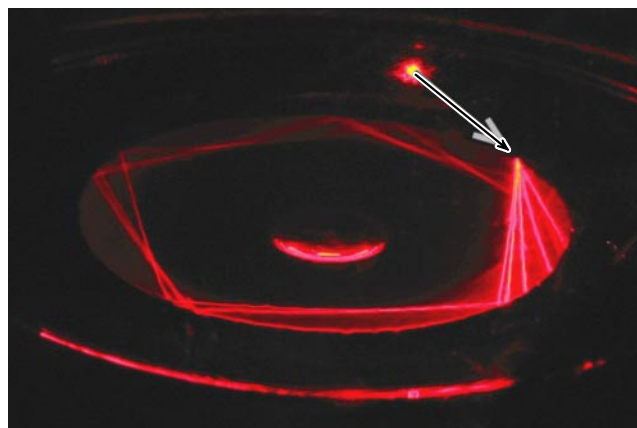


Рис. 6. Лазерные треки в круглой пленке, идущие по хордам с почти полным отражением от края пленки. Треки с малым отклонением от направления лазерного пучка (показанного стрелкой) от края пленки не отражаются.

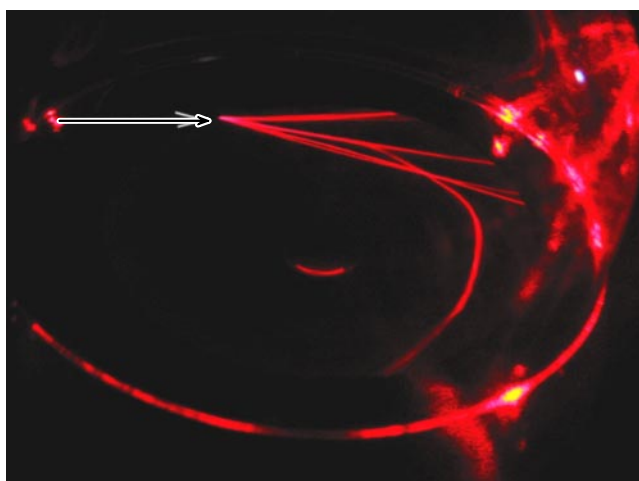


Рис. 5. Пучки усов на пленке от одного лазера. Пересекающиеся треки не влияют друг на друга.

зоны на границе обычно выходит по четко выделенным направлениям от 1 до 7 чуть шевелящихся треков (см. рис. 5, 6). Расстояние между разошедшимися треками в десятки и сотни раз превышает видимую ширину треков, что позволяет рассматривать каждый отдельный ус как независимый оптический объект. При этом в предчерной пленке (которая немного толще, чем черная, но еще серебристо-серая) наиболее сильно отклоняющийся от направления лазерного луча трек идет в круглой пленке по прямым хордам с почти полным отражением от краев круга при общей длине пути более 10 см без видимой расходимости (даже становясь тоньше, острее) по практически правильному пятиугольнику (см. рис. 7, 8). Для такого почти полного отражения от границы круга относительный показатель преломления (толстой и черной пленок) для трека должен быть близок к 1,05.

Удивляет не только вид, но и поведение усов, изменяющих направление без видимых причин. Если усы чувствуют неоднородности пленки, мечутся в пото-

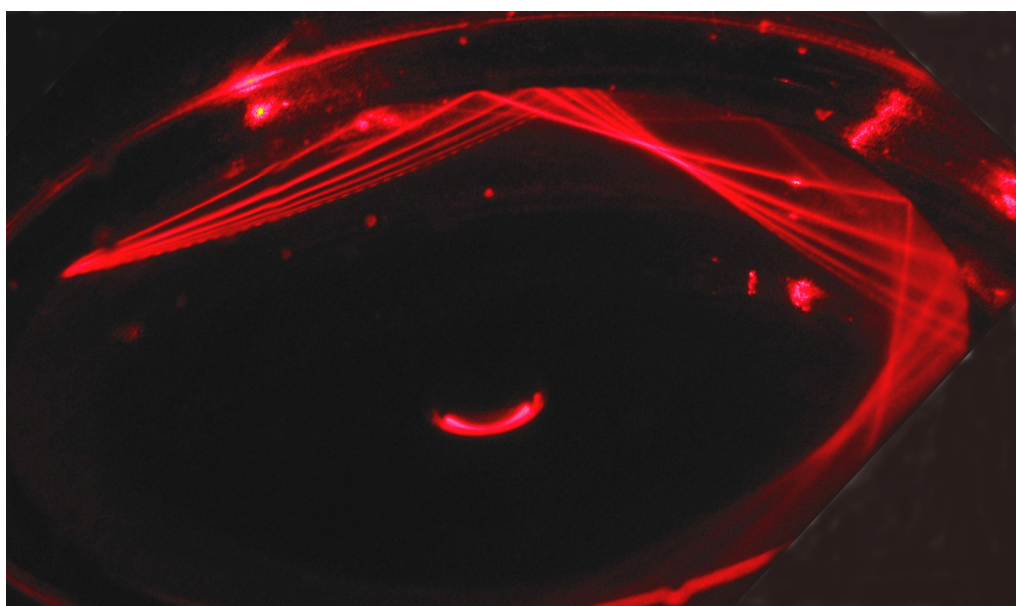


Рис. 7. Лазерные треки в круглой пленке, идущие по пятиугольнику с почти полным отражением от края пленки.

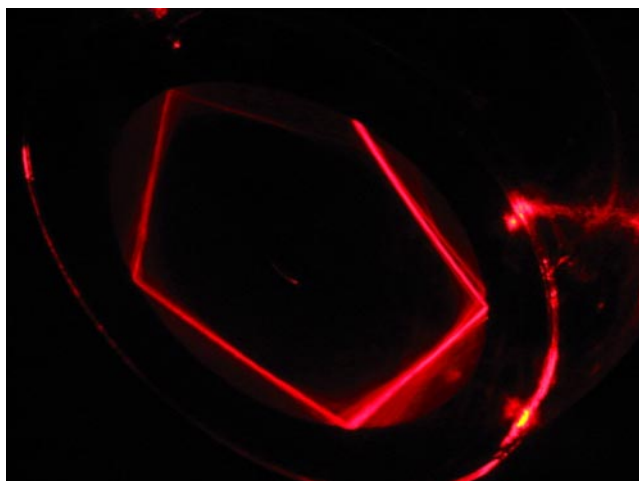


Рис. 8. Лазерный трек в круглой пленке, идущий без видимой расходимости по хордам с почти полным отражением от края пленки.

ках на ней, то как усы могут идти прямолинейно по явно наблюдаемым в отраженном свете цветным неоднородностям пленки (см. рис. 3) [6]? Почему в точке фокуса иногда их рождается несколько? Почему концы треков острые (рис. 9)? Почему при пересечении (см. рис. 4, 5) усы не взаимодействуют, не видят друг друга?

Обнаружилась еще одна крайне странная, ранее не отмечавшаяся в оптике особенность. А именно, обращает на себя внимание необычный вид трека, ближайшего к центру круга. Как видно на рис. 7, 10, по всей длине он состоит из четко чередующихся ярких и темных

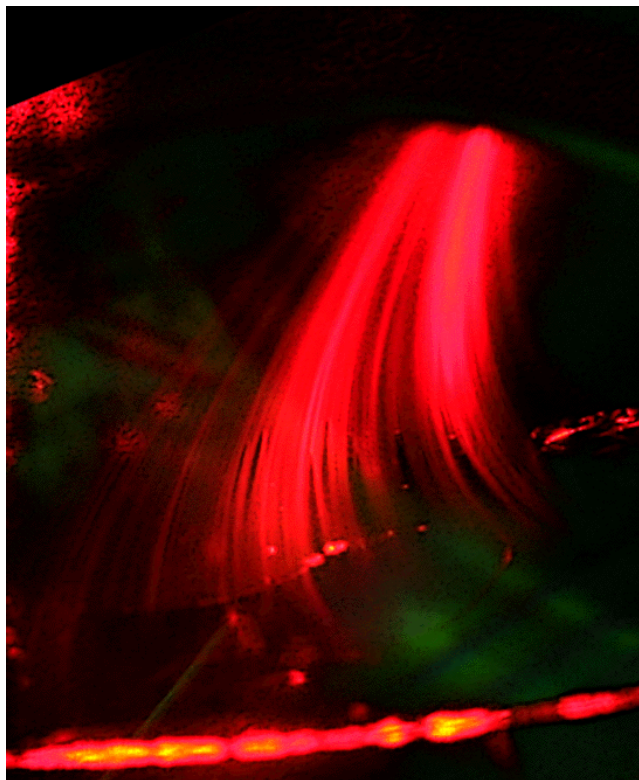


Рис. 9. Окончания усов на пленке длиной 10 см и толщиной около 100 нм [2].

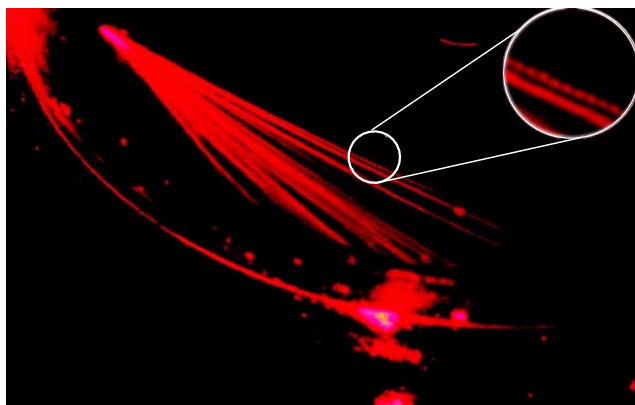


Рис. 10. Штриховой вид трека, наиболее сильно отклоняющегося от направления лазерного луча. По всей длине трек состоит из четко чередующихся ярких и темных штрихов с длиной в разных опытах от 0,5 до 2 мм.

штрихов с длиной в разных опытах 0,5–2 мм. Свет из трека выходит как-то прерывисто.

3. Лазерные треки под микроскопом в жидких и жестких мыльных пленках

Было интересно рассмотреть треки более детально, с увеличением. Хотелось понять, чем отличаются друг от друга усы, которые идут по своим выбранным направлениям из одной фокальной зоны и имеют разную амплитуду качаний, и чем определяется их число и углы отклонений.

Вид установки для наблюдения мыльной пленки с усами в микроскоп показан на рис. 11. Микроскоп имел примерно стократное увеличение. Типичный вид пучка усов, исходящих от границы с черной пленкой, показан на рис. 12–14а. В усах с общей шириной около 30 мкм есть тонкие прожилки шириной 5–10 мкм. Прожилка шириной 5 мкм из-за дифракции должна была бы обладать расходимостью (λ/D) в десяток градусов, т.е. свет в таком канале, пройдя расстояние в 1 мм, должен был бы разойтись на десятую долю своей длины, т.е. на 100 мкм, но, как видно из рисунков, такой расходимости у прожилок нет.

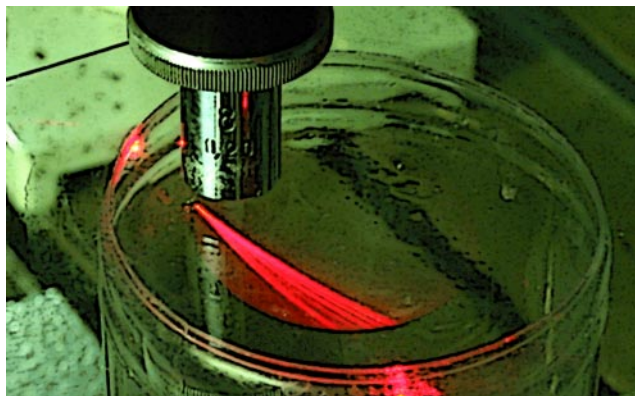


Рис. 11. Вид установки для наблюдения лазерных усов в мыльной пленке через микроскоп.

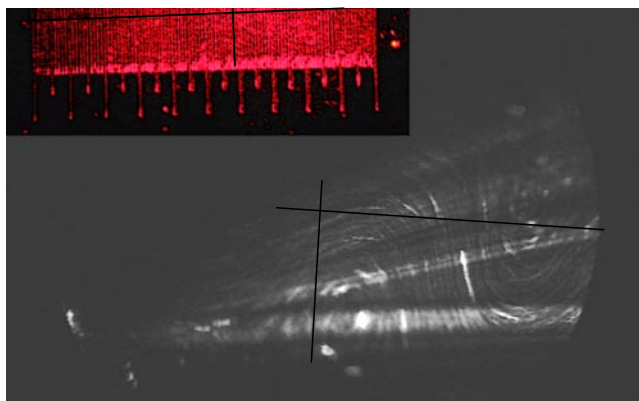


Рис. 12. Типичный вид пучка усов, исходящих от границы с черной пленкой. В усах общей шириной 30–50 мкм имеются тонкие прожилки шириной 5–10 мкм. Масштаб 1 мм с мелкими делениями в 10 мкм показан в верхней части рисунка.

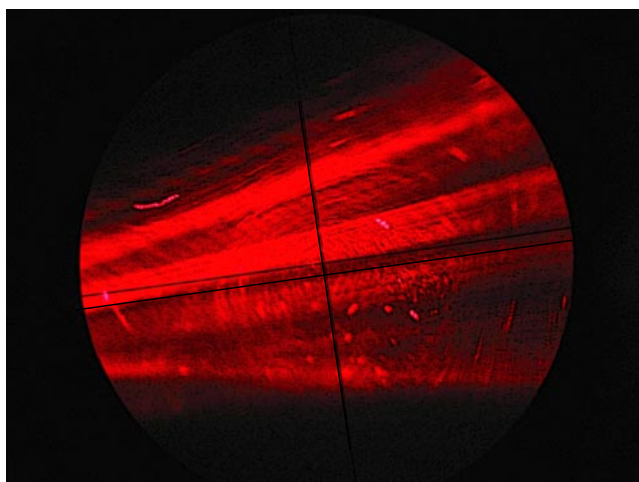


Рис. 13. Лазерные треки на вогнутой мыльной пленке с отклонениями на неоднородностях около крупных пылинок.

Под микроскопом, как мы и ожидали, в ряде соседних треков, вышедших из одной фокальной зоны, тоже стали видны штрихи (рис. 14а). Углы между соседними треками, как следует из рисунков, увеличиваются. Длины штрихов треков, идущих из одной фокальной зоны под разными углами, различаются в 1,5–5 раз. Чем мельче штрихи, тем меньше угол отклонения от направления лазерного луча (меньше показатель преломления для трека в пленке) и подвижнее ус. Наблюдается четкое угловое разбиение и пространственное квантование лазерных треков. Иногда видно [6], что в области фокусировки эти треки зарождаются в близких, но все-таки разных точках.

При оптимальной настройке в пленку входит около 10 % света накачки. Время формирования треков, как мы установили ранее [5], менее 10 нс. В зеленом свете (532 нм) с длительностью одиночных импульсов 10 нс усы на пленке хорошо видны. С точностью до 0,001 нм (опыты проводились с интерферометром Фабри–Перо с базой 3 см) длина волны света из усов совпадает с длиной волны возбуждающего лазера. Такие же усы в пленках образуются при использовании лазера, излучающего

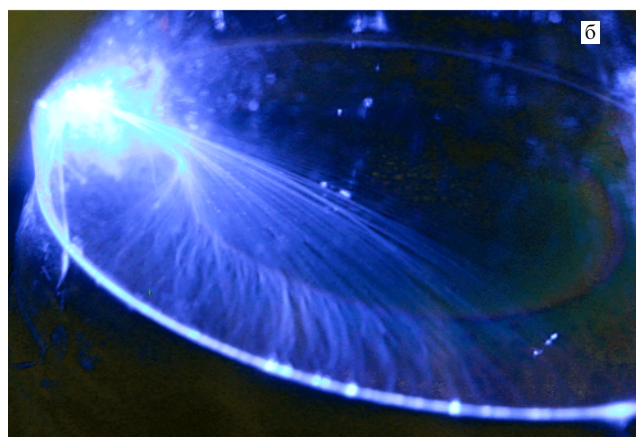
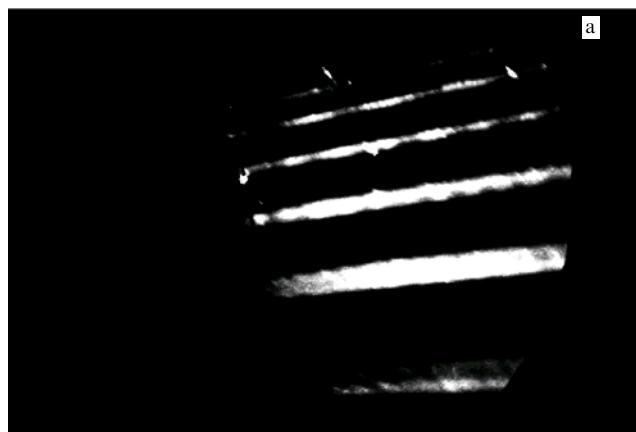


Рис. 14. Пучки треков на вогнутой мыльной пленке: (а) выходящих из зоны фокусировки одного лазера и отличающихся длиной штрихов, (б) полученных под действием лазера, излучающего короткие импульсы длительностью 70 фс (с частотой 85 МГц) на длине волны 475 нм со средней мощностью 1–10 мВт.

короткие импульсы длительностью 70 фс (с частотой 85 МГц) на длинах волн 475 и 950 нм со средней мощностью 1–150 мВт (рис. 14б).

По ходу экспериментов удалось осуществить наше желание [4]: провести опыты с прочной полимерной мыльной пленкой и рассмотреть неподвижные усы. Недавно в Тайване химик Джеки Лин (Jackie Lin) изобрел раствор для жестких мыльных пленок и пузырей, которые остаются прозрачными на воздухе, но за несколько секунд застывают настолько, что их можно брать в руки [7]. Формула изобретенного им раствора держится в большом секрете, не патентуется, но сами растворы продаются как игрушки для детей, и мы воспользовались ими для наших экспериментов.

Пока застывающая пленка остается жидкой, в ней бегают обычные усы, как и в других мыльных растворах. В застывшей пленке усы не двигаются и их удобно изучать, перемещать, изменяя направление лазерного луча. Подсохшая субмикронная цветная пленка весьма прочна и пластична (выдерживает растяжение более 1 г см^{-1}), на воздухе стоит месяцами, мало изменяясь, ее можно вытягивать, нагревать до температур более 100°C , резать и накладывать на стекло. Вид этой жесткой пленки в отраженном свете с застывшей на ней интерференционной картиной показан на рис. 15. Более темные участки соответствуют толщине около 100 нм.



Рис. 15. Вид жесткой, сухой и прозрачной мыльной пленки диаметром 65 мм в отраженном свете с застывшей на ней интерференционной картиной.

Изменяя направление лазерных усов в жестких пленках, мы убедились, что эти треки не являются постоянными световыми каналами или фиксированными образованиями из неоднородностей пленки, поскольку их направления на одном и том же участке пленки зависят от направления падающего лазерного луча (рис. 16, 17). Видимо, из-за неоднородностей мы не заметили четких штрихов на усах в сухих пленках. Как и ранее в случае жидких пленок [3–5], мы убедились, что при контакте сухой пленки со стеклянной подложкой или при погружении ее в масло или в жидкий фторуглерод усы пропадают. В толстых (нецветных, толщиной более 10 мкм) застывших пленках усы тоже не видны.

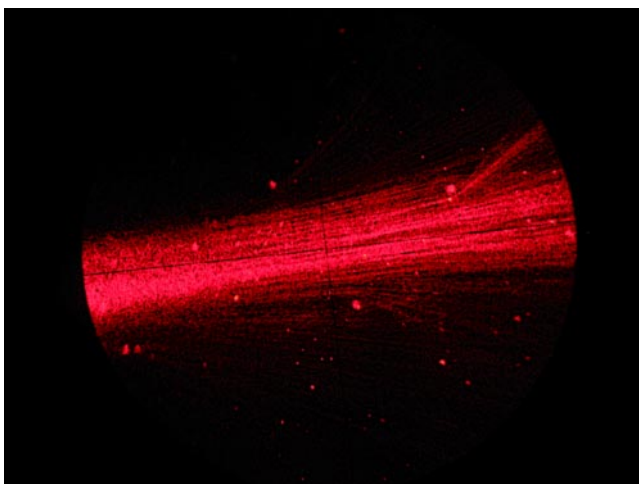


Рис. 16. Усы с прожилками в жесткой мыльной пленке с отклонениями около крупных пылинок под микроскопом.

4. Объяснение некоторых свойств треков как лазерных стержневых антенн последовательного питания. Возможные применения треков

Итак, подводя итоги полученных результатов, мы возвращаемся к нашему основному вопросу — какой механизм образования усов мог бы объяснить странные

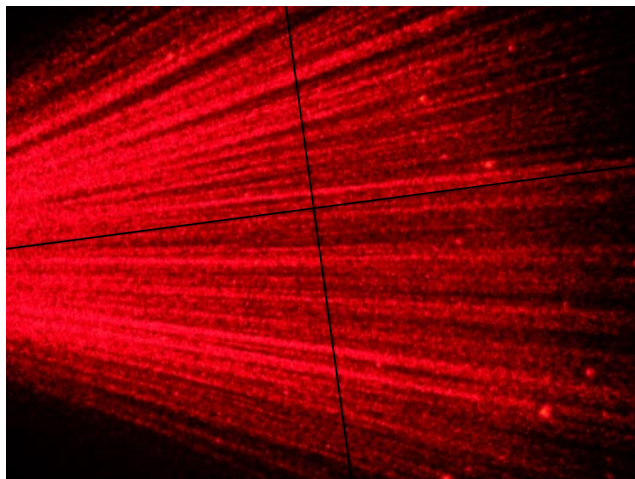


Рис. 17. Усы с прожилками в жесткой мыльной пленке под микроскопом.

особенности их поведения? Кратко напомним свойства треков [3–6].

1. Усы наблюдаются в *свободных* жестких и жидких мыльных пленках толщиной менее 10 мкм при использовании любых лазеров (440 нм–1 мкм) при фокусировке излучения мощностью от 10 мВт до 10 кВт. В объеме мыльных растворов и на их поверхности при таких же условиях лазерного возбуждения усы не возникают. Усы не появляются в тонких мыльных пленках на зеркале, ртути или диэлектриках (слоуда, полиэтилен), а также в самых тонких (3–5 мкм) твердотельных пленках слюды, полиэтилена и тефлона.

2. Усы узкие, с острыми концами, их расходимость меньше дифракционной, они мечутся по жидкой пленке, создают ответвления, разбиваются на новые треки и могут иметь длины пробега в десятки сантиметров.

3. Усы рождаются и выходят из одной точки по 1–7 штук (иногда более 20, как на рис. 1) и существуют как отдельные объекты.

4. Показатель преломления для усов в пленке (1–1,28) меньше растворного и для разных усов на одной пленке может быть различным.

5. Усы пересекаются без видимого взаимодействия (как на рис. 4, 5).

6. При выходе из пленки в воздух или раствор усы демонстрируют нормальную расходимость.

7. В пленке усы изменяют направление около крупных пылинок, не замечают влияния мелких пылинок, пересекающих их потоков; их узкий вид практически не зависит от мощности лазера, длины волны, вида и концентрации мыла, температуры, толщины пленок.

8. В пленках из мутных растворов с большим количеством рассеивающих центров, в объемных растворах которых лазерный луч рассеивается и виден на расстоянии около 1 см, треки очень ветвистые, с широкой, как у деревьев, кроной из очень тонких усов.

9. В пленках с поглотителями лазерного света (типа красителей), в объемных растворах которых лазерный луч поглощается на расстоянии около 1 см, лазерные треки имеют обычный вид, и по мере старения и уменьшения толщины пленок тонкие усы в них распространяются на расстояния в 5–10 раз большие, чем в объеме того же раствора.

10. Длина волны света из усов с точностью до 0,001 нм совпадает с длиной волны возбуждающего лазера.

11. Усы как отдельные лучики легко (без задержки) перемещаются по пленке вместе с лазерным лучом, изменяются при изменении его направления, и время их образования не превышает 10 нс.

При обсуждении возможных причин наблюдаемого поведения лазерных треков выдвигалось много механизмов и гипотез. Образование треков рассматривалось как результат обычной самофокусировки, возникновения фотонных кристаллов и шубы около уса под воздействием гиперзвука, переориентировки молекул, перестройки пленки по толщине и образования оптических пространственных солитонов, особенностей квантования света в тонких пленках, визуализации треков космических частиц, наличия неоднородных длинных нитей в пленке, звуковой ряби, теплового воздействия и др. Но эти механизмы не дают полной картины свойств и поведения усов.

Гипотеза самофокусировки в данном случае выглядит не убедительной, поскольку характерное сужение усов не зависит от интенсивности лазерного излучения, которую мы изменяли на 9 порядков, что не свойственно известным механизмам самофокусировки. Образование фотонных кристаллов из окружающих ус оболочек гиперзвука не может происходить из-за быстрого затухания гиперзвука на таких частотах. Существенная перестройка молекул или самой пленки в усах, как в лазерном пинцете, требует на порядки более высоких интенсивностей и должна была бы приводить к сложению усилий усов при их пересечении, взаимовлиянию треков, а его нет. Тепловое воздействие не подходит, поскольку при добавлении поглотителей в пленку вид усов не изменяется. Новые законы углового и пространственного квантования света в тонких пленках должны были бы зависеть от толщины пленки, а усы иногда не реагируют на ее толщину и распространяются прямолинейно по пленкам разного цвета [6]. Для образования солитонов обычно требуются большие интенсивности и нелинейности, которые не замечены. В пленке нет длинных неоднородных волноводных нитей, по которым мог бы идти свет. Можно перечислять и другие выдвигавшиеся идеи, но во всех предлагаемых механизмах непонятными выглядят линейные свойства среды при нелинейном преобразовании света в тонкие каналы с острыми концами.

Поведение света в тонких пленках с анализом всех возможных в них типов колебаний (волноводных мод) теоретически рассмотрено, например, в книге [8], но склонность света к образованию в пленках узких стримеров в ней не отмечается. В то же время наблюдаемые нами разные показатели преломления набора усов, выходящих из одной зоны фокусировки, хорошо объясняются разной модовой структурой лазерного излучения в этих усах, если предположить, что каждый ус — это отдельная мода в тонкой пленке.

Модовость излучения позволяет также объяснить некоторые характерные особенности уже образовавшихся усов. Если на время отложить вопрос о динамике формирования канала, то механизм работы уже сформировавшегося канала прост — это интерференция света с переизлучением. Каждый участок пленки с ограничивающими его монослоями ориентированных полярных молекул мыла при попадании на него света, направлен-

ного по касательной или под скользящим углом к пленке, становится вторичным источником, вибратором, который переизлучает во все стороны такую же поверхностную волну света. Это происходит согласно принципу Гюйгенса – Кирхгофа, но почему-то без обычной вытекающей из этого принципа расходимости канала. Расположенные на одной линии возбужденные участки уса действуют в совокупности, как хорошо известная в физике сверхвысоких частот (СВЧ) направленная линейная антенна бегущей волны (см., например, [9, с. 384]), работающая с поверхностными электромагнитными волнами. В таких антеннах возбуждение само распространяется по направляющему диэлектрическому стержню вдоль излучающей системы вибраторов от одного конца антенны к другому, поэтому их называют антеннами последовательного питания (рис. 18). Такую антенну осевого излучения можно представить как непрерывную систему поперечных излучателей. Отдельный ус — это выделенная по какой-то причине в однородной среде и питаемая лазером линейная система вибраторов, излучающих в фазе по направлению оси уса. Как и линейная направленная антенна с последовательным питанием, ус имеет (в зависимости от фазировки) расходимость (ширину главного лепестка $\Delta\theta$ в градусах по половинной мощности), равную [9]

$$\Delta\theta = (107 - 61^\circ) \left(\frac{\lambda}{L} \right)^{0,5}. \quad (1)$$

При характерной длине уса L в несколько сантиметров и длине волны $\lambda \sim 0,5$ мкм направленность увеличивается с длиной и составляет $10^{-2} - 10^{-3}$. Как и в этих антеннах, излучение в пленках связано со средой поверхностной волной. Понятно, что работа усов-антенн не зависит от сорта мыла, толщины пленки (менее 10 мкм, т.е. пока по ней бежит поверхностная волна), температуры, мощности накачки. Усы зарождаются (см. раздел 5) и самоорганизуются на неоднородностях прямо от точки фокуса разными типами колебаний, быстро растут и могут свободно пересекаться, поскольку питаются независимо своими линейными источниками. Для треков в нанометровых пленках, по нашим наблюдениям, показатель преломления уменьшается вплоть до единицы, что объясняется (по аналогии со случаем СВЧ-антенны, толщина стержня которой сравнима с длиной волны) тем, что большая часть мощности переносится по воздуху в ближайшей окрестности трека, а фазовая скорость, определяемая в этом случае в основном внешней средой, близка к скорости света. Наиболее эффективная толщина таких СВЧ-антенн обычно равна

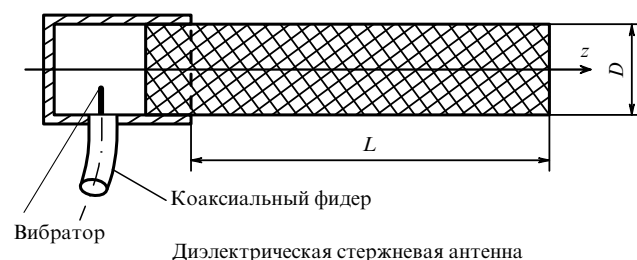


Рис. 18. Схема направленной СВЧ-антенны бегущей волны (с последовательным питанием) с осевым излучением [7].

0,5–0,3λ. Для света это составляет 0,3–0,15 мкм, что хорошо согласуется с обычными значениями толщины наших пленок. Возбуждаемые в фокальной области различные световые типы колебаний (моды, видимые нами сверху как треки с различной длиной штрихов) поразному связаны с пленкой, имеют неодинаковые показатели преломления, и поэтому при почти касательном падении на границу они идут отдельными усами под разными углами. Количество рождающихся в пленке усов ограничивается количеством мод, т.е. типов колебаний возбуждаемых в пленке поверхностных волн [8]. Пороговое значение отношения толщины пленки t к длине волны света λ для поперечных электрических (ТЕ) и магнитных (ТМ) мод с индексом m для симметричного плоского волновода дается соотношением [8]

$$\frac{t}{\lambda} = \frac{m}{2(n_2^2 - n_1^2)^{0.5}}, \quad (2)$$

где n_1 — показатель преломления окружающей пленку среды (воздух), а n_2 — самой пленки (1,3–1,5). Так, по этой оценке в пленке толщиной 2–2,5 мкм могут возбуждаться моды с индексом до $m = 7$. А основная мода с $m = 0$ может идти вдоль пленки при любой сколь угодно малой ее толщине. В работе [8] также отмечается, что связанная со средой основная мода всегда имеет более высокий показатель преломления: обычно ее эффективный показатель приближается к n_2 . У мод высшего порядка показатель преломления ближе к n_1 , что мы и наблюдаем при одновременном выходе из зоны фокуса нескольких усов. Моды ортогональны между собой [8], чем объясняется отсутствие взаимодействия треков. Причина возникновения нескольких треков в пленках толщиной менее 0,15 мкм будет рассмотрена в разделе 5.

На крупных оптических неоднородностях ус вместе с излучением погибает, а при заметном расширении разбивается на пылинки в пленке на ряд новых усов-антенн меньшей ширины. Особенно много ответвлений наблюдается на выпуклой пленке. Если входной лазерный луч в плоскости пленки фокусируется и направляется перпендикулярно к границе такой пленки (см., например, рис. 1), то в пленку от точки фокуса сначала идет один прямой трек, состоящий из множества распространяющихся по одному каналу поверхностных мод, которые на встречающихся неоднородностях и при изменении толщины (из-за существенно различных показателей преломления в пленке для разных типов колебаний) расходятся, давая ответвления от прямого трека. Толщина выпуклой пленки к ее центру уменьшается, что не позволяет всем зашедшим в толстый край пленки модам дойти до центра. После ответвлений в прямом треке иногда видна одна мода с четкими длинными штрихами. Чем толще пленка, тем больше мод в треке и тем на большее число ветвей он может разбиться.

В опытах с пленкой из раствора с поглощением, как отмечалось в [4], при уменьшении ее толщины длина пробега усов значительно увеличивается. Понятно, что в тонкой пленке идущее вдоль поверхности излучение меньше связано со средой (энергия распространяется по воздуху, как и в антенне [9, 10]), и поэтому в пленке свет по каналам проходит в десять раз дальше, чем в объеме исходного раствора.

Таким образом, мы наблюдаем в пленках (как распределенных резонаторах) линейные волновые и

интерференционные свойства света. Отличие от СВЧ-антенн заключается в том, что направленные диэлектрические СВЧ-антенны бегущей волны обычно применяются в диапазоне от 2 до 10 ГГц [7], а в мыльных пленках с поверхностными волнами ими осваиваются новые среды и новый рабочий диапазон световых частот. Для возбуждения здесь используется направленный и когерентный луч лазера. Направление излучения СВЧ-антенны задается стержнем, тогда как в пленке эти каналы формируются сами. При малой интенсивности излучения (632,8 нм, 5 мВт) нам удавалось получать усы в пленке даже без его фокусировки, когда луч лазера попадал прямо на ребро пленки. Длина СВЧ-антенн обычно не превышает 10λ, лазерная же накачка дает возможность получать в тонких пленках линейные усы-антенны, синфазно работающие в осевом направлении при длинах в десятки сантиметров. Усы могут иметь длину $(10^4 - 10^6)\lambda$ и работать как в излучающем, так и в приемном режиме. СВЧ-антенны работают в узкой полосе частот, измеряемой единицами процентов, для пленок же интервал рабочих частот определяется их окном прозрачности, перекрывая видимый и инфракрасный диапазоны.

Заметные оптические искажения в пленке, влияющие на направление светового потока, изменяют и направление трека, поэтому вполне реально их применение в качестве чувствительных датчиков, а использование электрооптических сред и обычных оптических устройств с внешним управлением (или преобразованием мод) открывает возможности для быстрого переключения направления узких усов и создания адресно-управляемых невзаимодействующих волноводов. Нам, например, удавалось изменять направление усов простым способом — с помощью локальной ударной волны от небольшого электрического разряда над пленкой.

Предстоит разработать теорию, объясняющую поведение световых усов-антенн в тонких пленках, определить наиболее эффективные среды, условия их возбуждения и вывода излучения из таких устройств и приборов. Тонкие пленки могут являться и усиливающими лазерными средами [4, 5]. Мы обнаружили, что при высокой концентрации молекул красителей в тех же пленках, в которых наблюдается образование усов, эти пленки можно использовать как активную лазерную среду и при интенсивном возбуждении (532 нм, 10 нс) получать в них перестраиваемую лазерную генерацию на молекулах красителей (как и в лазерах на растворах красителей). Но пленка при этом сразу рвалась, и усов в полученной лазерной генерации мы не рассмотрели [4]. Антенно-трековое формирование узких пучков может быть полезно и при изучении колебательных явлений в других разделах физики.

Представленный механизм поведения сформировавшихся усов на основе известных свойств света в тонких пленках [8] и СВЧ-антенн [9–11] дает ряд ответов на поставленные в [4] вопросы, определяет направления дальнейших практических и теоретических исследований разнообразных управляемых оптических антенно-волноводных устройств [9, 11] с селективным возбуждением мод и их использования вплоть до оптических компьютеров.

Итак, моды определенно имеют отношение к трекам в пленках, но остается вопрос: как в однородной двумерной среде образуется линия трека?

5. О нелинейном механизме образования треков

Приведенные результаты показывают, что сформировавшийся трек, питаемый отдельной модой, может работать как световая антенна. Но каков механизм возникновения и формирования такого именно узкого канала в широкой пленке? Каков механизм выделения светового стримера? У света в треке имеется, по крайней мере, четыре причины совсем для другого — для того, чтобы не идти узким каналом, а расширяться:

1) световой канал микронной ширины (5–30 мкм) должен иметь дифракционную расходимость;

2) в мутной среде мыльного раствора должно осуществляться рассеяние света;

3) на неровностях поверхности пленки, покрытой капиллярными волнами, делающих (наряду с рассеянием в растворе) треки яркими и заметными сверху, должно происходить рассеяние энергии;

4) свет от точки фокуса в однородной пленке должен расходиться, поскольку возбуждающий лазерный луч имеет апертурный конус угла фокусировки около 0,02.

Каждой из этих причин достаточно для расширения лазерного трека длиной 30 см, по крайней мере, до долей сантиметра, но, как видно из рис. 19, при наличии одновременно всех четырех факторов у трека, идущего от сфокусированного непрерывного полупроводникового лазера-указки (5 мВт) по вогнутой жидкой пленке по сложной многовитковой траектории с общей длиной более 30 см, такой расходимости нет. В однородной среде пленки просто не может существовать такая узкая волноводная мода трека, которая не направлялась бы явной диэлектрической структурой.

Необычность свойств и поведения лазерных каналов определенно связана с *нелинейными* свойствами пленочной среды, содержащей молекулы мыла, которые (наряду с узостью треков) особенно четко проявляются в следующих уже отмечавшихся особенностях.

1. Образование усов при освещении пленки под скользким углом по воздуху (согласно классическому представлению свет, вошедший в пленку под скользким углом, должен после нескольких отражений быстро

выйти из нее без образования длинных, идущих практически с полным внутренним отражением треков).

2. Возникновение в тонкой предчерной (серебристой) пленке толщиной менее 100–150 нм не одного трека, не одной основной моды, как следовало бы по классической формуле (2) при $n_2 = 1,5$, а 3–7 узких треков, идущих по четко выделенным разным направлениям со своими показателями преломления.

3. Формирование по длине этих треков заметной штриховой структуры, которая совсем не характерна для классической основной моды, идущей вдоль тонкого слоя.

4. Вхождение луча и движение его в круглой провисающей пленке по хордам с полным внутренним отражением (среда выпускает свет, но затем его не выпускает).

Наличие треков в виде узких, нерасходящихся волноводных каналов однозначно указывает на локальное увеличение в треках пленки показателя преломления среды n_2 под действием лазерного излучения даже малой интенсивности. Величину этого приращения n_2 можно оценить по значению скользкого угла ($\approx 5^\circ$), под которым надо направить луч сверху на пленку, чтобы в пленке он чуть увеличил бы этот показатель с n_2 до $(n_2 + \Delta)$ и дальше уже шел бы в ней с полным внутренним отражением на десятки сантиметров. Оценки показывают, что величина Δ/n_2 не превышает 1 %.

При ширине трека 30 мкм и разнице показателей преломления между треком и граничащей с ним пленкой в 1 % по формуле (2) при $t = 30$ мкм получаем, что в таком самообразовавшемся волноводном канале (даже в тонкой пленке с толщиной 150 нм) может распространяться около 7 мод. Из-за малой величины Δ и разных питающих мод каналы не видят друг друга, и можно ожидать их слабого взаимодействия только при углах пересечения, меньших 1° .

Тонкие каналы (в виде волноводных световых антенн) удлиняются под действием идущего по ним лазерного излучения, быстро преобразуя (увеличивая) показатель преломления среды у своих вершин. При выключении света канал исчезает. Свет преобразует среду, среда собирает свет. Известно много схем такого взаимовлияния [12, 13], но представленный выше механизм преобразования среды светом имеет отличительную особенность. Он связан, по нашим оценкам, не столько с интенсивностью лазерного поля, которая при слабых потоках весьма мала ($30\text{--}1000\text{ В см}^{-1}$), сколько с *резкими градиентами* этого поля в пленке и возникающим диэлектрорефом составляющих пленку молекул.

Диэлектрореф (движение частиц в электрическом поле) появляется, когда в постоянном или переменном электрическом поле имеется неоднородность, градиент. Это явление известно уже более 2500 лет [14] и наглядно проявляется в притяжении кусочков бумаги к наэлектризованной палочке. Неоднородность электрического поля создает силу, воздействующую на любые поляризуемые объекты, заряженные и незаряженные. Под воздействием такого неоднородного поля на разные концы частицы и на среду, в которой она находится, частицы с более высокой (при заданной частоте) поляризуемостью, чем у среды, втягиваются в область сильного поля (положительный диэлектрореф), а с меньшей — выталкиваются в область более слабого поля (отрицательный диэлектрореф). Сила воздействия определяется градиентом квадратично усредненного по времени поля и

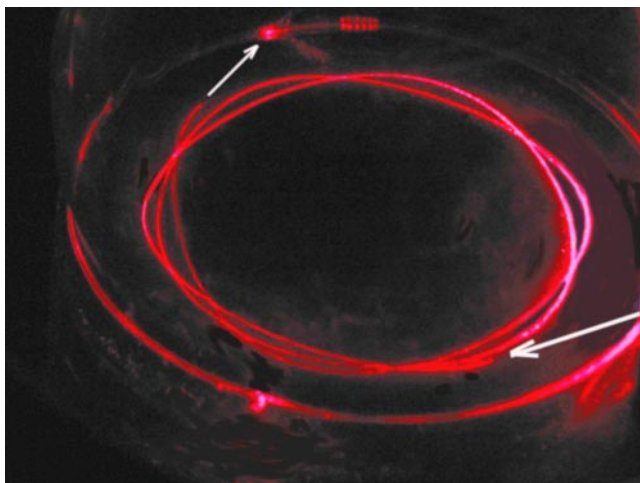


Рис. 19. Трехвитковый трек на вогнутой жидкой пленке диаметром 65 мм. Общая длина трека 35 см. Точка фокусировки лазерного луча и выход света из пленки показаны стрелками.

не зависит от направления поля. Наибольшие градиенты поля возникают вблизи электродов с вершинами предельно малых нанометровых радиусов кривизны [14–17], но такие электроды весьма трудно изготавливать.

В нашем же случае градиенты, требующиеся для ориентации и перемещения молекул и частиц раствора вследствие диэлектрофореза, возникают сами по себе, точнее, их создает введенное в пленку лазерное излучение вблизи частотола острых (ангстремных) концов плотно упакованных молекул мыла в двух близко расположенных друг к другу мономолекулярных поверхностных слоях пленки [18]. Такой лазерный диэлектрофорез приводит к изменению ориентации, к перемещению и изменению упаковки молекул и частиц в растворе, их взаимовлиянию, дипольно-индуцированному притяжению и образованию растущих цепочек [17], что вызывает отмеченное увеличение показателя преломления и появление в пленках тонких световых каналов. Лазерный диэлектрофорез [18] представляется интересным с точки зрения нанотехнологий и может быть также использован для селективного отделения наночастиц и молекул. Предстоит выяснить динамику диэлектрофореза: возникают ли в водных растворах между молекулами в треках новые водородные связи и изменяется ли, например, температура замерзания раствора в треках?

Отмеченное увеличение показателя преломления позволяет сделать общий вывод о природе этих лазерных каналов. Поверхностные световые волны, идущие по прямым или изогнутым пленкам узкими нерасходящимися треками, связаны с перестройкой и со стимулированным изменением поляризационных свойств среды, поэтому они представляют собой особую совокупность электромагнитной и поляризационной энергии, т.е. особый вид поверхностных поляритонных солитонов, описанных в [3] без детализирования механизма их образования и реализующихся при очень малых интенсивностях световых потоков. Усы демонстрируют способность слабого света воздействовать на свойства прозрачной материи, изменяя ее атомно-молекулярную структуру.

Для практики и с научно-познавательной точки зрения важно, что благодаря легко реализуемым узким лазерным трекам (например с помощью обычной полупроводниковой лазерной указки) высоконаучный раздел нелинейной оптики стал наглядным и доступным самым широким слоям населения, в частности школьникам [19], т.е., образно говоря, вышел в народ.

6. Заключение

За представленной качественной картиной поведения усов скрывается достаточно сложная задача их теоретического описания. Предложенный механизм образования лазерных треков требует дальнейшей проработки и уточнений для определения границ его применимости и оптимальных условий проявления. Предстоит освоить переключение световых каналов и управление ими, определить их энергетическую и информационную пропускную способность. В этой связи вызывает интерес изучение динамики прохождения широкополосных фемтосекундных "пульс" по лазерным трекам.

Обнаруженное явление самосжатия, концентрации слабого лазерного луча с образованием самоподдерживающихся тонких треков привлекает внимание исследователей к особенностям взаимодействия нанообъектов с

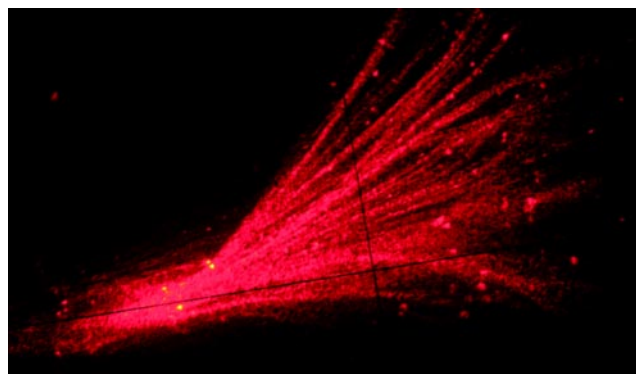


Рис. 20. Вид треков под микроскопом в свободной сухой пленке из даммарного лака толщиной около 1 мкм.

лазерным световым полем. Предстоит выяснить процесс перестройки молекул в треке в жидкой среде, роль остаточной жидкости и подвижности молекул в жестких, но очень гигроскопичных мыльных пленках. Интересно также, почему немного похожие лазерные треки мы наблюдаем под микроскопом не только в мыльных, но иногда и в свободных тонких пленках (рис. 20), полученных из маленькой капли даммарного лака, разбежавшейся по поверхности воды до диаметра примерно 6 см, застывшей в виде очень тонкой пленки и затем поднятой на рамке в воздух. Судя по видимым на них в отраженном свете нескольким интерференционным полосам, толщина таких пленок не превышает 1 мкм. Отметим, что в толстых жидких пленках из меда или водного раствора яичного белка мы не замечали узких лазерных каналов. В ранее исследованных нами пленочных испарителях с их бурными потоками [20] лазерные каналы видны, но на вид они не такие узкие, как в спокойных мыльных пленках.

Наблюдаемые лазерные треки несут богатую информацию о структуре и свойствах как самих пленок, так и наночастиц, поэтому треки могут использоваться для изучения этих структур. Замечена любопытная, по-видимому, весьма глубокая аналогия — по внешнему виду лазерные треки являются просто копиями не наблюдаемых, но теоретически рассчитываемых траекторий движений пучка электронов в тонких пленках между точечными рассеивающими центрами [21]. В мыльных пленках тоже есть рассеивающие центры, которые меняют направление лазерного трека, и представляет интерес сделать эти центры управляемыми. Исследования треков, их лазерных свойств в давно и детально изучаемых, трансформирующихся мыльных пленках разной толщины [22, 23] и разного состава вызывают большой интерес, как и изучение лазерных треков в биомембранах, из которых состоит все живое. Отметим еще раз, что, по существу, пленка с усами — это непрерывно работающий мощный оптический компьютер с гигантским параллельным процессором, пропускающим через миллиарды своих ячеек формируемый тонкий лазерный трек с изменением как направления его движения, так и одновременно своих собственных свойств под действием лазерного луча и внешних условий.

Наши усилия по расширению работ и привлечению внимания к этому явлению по понятным причинам [24–

26] пока не принесли должных результатов, но надеемся, что когда-нибудь выросшие из душевной потребности и чистого любопытства наши наблюдения будут полезны. "Народная тропа" не зарастет, а созданный нами задел послужит основой для многих направлений будущих исследований. Благодарим друзей за поддержку, обсуждения, лазеры, за образцы шампуней, чистых поверхностно-активных веществ и растворов для жестких пленок.

Список литературы

- Boys C V *Soap Bubbles and the Forces which Mould Them* (London: Society for Promoting Christian Knowledge, 1890)
- Герузин Я Е *Пузыри* (М.: Наука, 1985)
- Старцев А В, Стойлов Ю Ю "Способ получения поверхностных поляритонов", Заявка на патент № 20022132754 от 5 декабря 2002 г.
- Старцев А В, Стойлов Ю Ю, Препринт ФИАН № 2 (М.: ФИАН, 2003); <http://ellphi.lebedev.ru/2/Stoilov.pdf> (с приложенным кинофильмом о поведении усов)
- Старцев А В, Стойлов Ю Ю *Квантовая электроника* **33** 380 (2003); **34** 569 (2004)
- Старцев А В, Стойлов Ю Ю, Препринт ФИАН № 22 (М.: ФИАН, 2003); <http://ellphi.lebedev.ru/4/Stoilov1.pdf>
- Repling R "Soap bubbles" *Chem. Eng. News* **81** (17) 34 (2003); <http://pubs.acs.org/cen/whatstuff/stuff/8117sci3.html>
- Ярив А, Юх П *Оптические волны в кристаллах* (М.: Мир, 1987)
- Марков Г Т, Сазонов Д М *Антенны* (М.: Энергия, 1975)
- Будаган И Ф "Оптоэлектронные элементы для интегральной голографии", в сб. *Материалы Шестой всесоюзной школы по голографии, 11–17 февраля 1974 г., Ереван* (Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1974) с. 507; <http://bsfp.media-security.ru/school6/29.htm>
- Калашников А М, Степук Я В *Колебательные системы* (Сер. "Основы радиотехники и радиолокации", Вып. 4) (М.: Военное издательство Мин. обороны СССР, 1972)
- Chiao R Y, Garmire E, Townes C H *Phys. Rev. Lett.* **13** 479 (1964)
- Poladian L et al. *Phys. Rev. E* **69** 016608 (2004)
- Burke P J "Nanodielectrophoresis: electronic nanotweezers", in *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* Vol. 10 (Ed. H S Nalwa) (Stevenson Ranch, Calif.: American Scientific Publ., 2003) p. 1; <http://nano.ece.uci.edu/papers/NanoDEPproof.pdf>
- Zheng L et al., in *IEEE-NANO 2003: Proc. of the 2003 3rd IEEE Conf. on Nanotechnology, 12–14 August 2003, San Francisco, CA, USA* Vol. 1 (Piscataway, NJ: IEEE, 2003) p. 437; <http://nano.ece.uci.edu/papers/singlemolecule.pdf>
- Pethig R, Markx G H, US Patent 5,814,200 (Sept. 29, 1998); USPTO Patent Full-Text and Image Database, <http://164.195.100.11/netahtml/search-bool.html>
- Hermanson K D et al. *Science* **294** 1082 (2001); http://crystal.che.ncsu.edu/pdfs/Science_microwires.pdf; The Kaler Research Group, <http://www.kalergroup.che.udel.edu/index.htm>
- Стойлов Ю Ю "Способ разделения частиц методом диэлектрфореза", Заявка на патент № 2004104449 от 17 февраля 2004 г.
- Намер Л *Химия и жизнь — XXI век* (6) 72 (2004)
- Старцев А В, Стойлов Ю Ю *Квантовая электроника* **32** 463 (2002)
- Vaniček J, Heller E J *Phys. Rev. E* **67** 016211 (2003)
- Stubenrauch C, von Klitzing R J. *Phys.: Condens. Matter* **15** R1197 (2003)
- Stoyanov S D et al. *Langmuir* **13** 1400 (1997); <http://www.lcpe.unisofia.bg/publications/1997/pdf/1997-14-IBI.pdf>
- Кайтуков В М *Эволюция диктата: опыты психологической истории* (М.: Урамос, 1991); <http://www.philosophyevolution.com/index.htm>
- Шевкин А В, Газета *Первое сентября* (46) (2003); <http://www.shevkin.ru/Modules/Publ.php?action=ReadS1&id=21>
- Шарыгин И Ф *Новый мир* **10** 110 (2004) (см. http://magazines.russ.ru/Novyi_mi/2004/10/shar10pr.html)

Laser beam in a soap film

Yu.Yu. Stoilov

P.N. Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences

Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

Tel. (7-095) 135-86 49

Fax (7-095) 938-22 51

E-mail: stoilov@sci.lebedev.ru

A laser beam introduced into a soap film shows an unusual behavior in that it breaks the film into thin (micron-thick) branching channels which remain unspread sometimes for as long as tens of centimeters as they go through the film. The physical interpretation and possible applications of the phenomenon are discussed in this paper.

PACS numbers: 42.25.Bs, 42.65.Tg, **68.60.-p**

Bibliography — 26 references

Received 25 March 2004, revised 12 July 2004