

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ПРЕПРИНТ

А. В. СТАРЦЕВ, Ю. Ю. СТОЙЛОВ

2

**РЕЦЕПТ ЧУДА: “ЛАЗЕРНЫЙ ЛУЧ
В МЫЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ”**

Москва 2003

Рецепт чуда: «Лазерный луч в мыльной пленке»

А.В. Старцев, Ю.Ю. Стойлов

Слово “чудо” разрешено использовать в физике только в крайних случаях, когда сталкиваются с чем-то новым, крайне удивительным и непонятным, к чему необходимо привлечь внимание коллег. Здесь, похоже, мы имеем дело как раз с таким случаем. Хотя рецепт чуда «Направьте лазерный луч в мыльную пленку» выглядит по-детски простым и уж совсем не чудесным и люди уже много сотен лет играют с мыльными пузырями, однако, как показывают наши результаты, к ним надо присмотреться и исследователям.

В физике известно такое явление как поверхностные волны /1-5/. Поверхностные электромагнитные волны, или поверхностные поляритоны, это особый вид макроскопических электромагнитных волн, распространяющихся вдоль поверхностей (границ) раздела сред. Поле таких волн прижато к поверхности и локализуется в основном в слое, размеры которого с каждой стороны от границы, как правило, порядка длины волны. Такие волны называются поверхностными в отличие от объемных, которые распространяются в объемных средах и не чувствуют существенного влияния их поверхностей.

Условия существования поверхностных поляритонов в случае контакта изотропных сред состоят прежде всего в том, что диэлектрические проницаемости граничных сред должны иметь противоположные знаки, т.е. одна из них должна быть отрицательной. В статике это сделать нельзя, а при воздействии с частотой и при наличии у среды резонансных свойств можно реализовать ситуацию, при которой наведенная в среде поляризация имеет противоположное направление относительно возбуждающего

ее поля и таким образом получить отрицательную диэлектрическую проницаемость. Энергия поверхностной волны складывается из электромагнитной части и составляющей, связанной с резонансными свойствами среды. Это могут быть механические колебания решетки, электронов в металлах, экситонов в полупроводниках. В зависимости от вида механической добавки поверхностные волны называют поляритами, плазмонами, плазмон-фононами, магнонами, но суть у них одна - они прижаты к поверхности и идут вдоль нее.

Поверхностные волны это нерадиационные волны, их нельзя возбуждать прямым образом с помощью световых волн, распространяющихся в одной из двух сред, и их фазовая скорость меньше, чем фазовая скорость света в среде. Поверхностные электромагнитные волны имеют смешанный электромагнитно-механический характер, связанный с резонансными свойствами граничных поверхностей.

Вот эти волны представляют собой объекты крайне интересные в физическом плане, поскольку их поле максимально на поверхности, и они несут богатую информацию о свойствах этих поверхностей. В настоящее время большое внимание уделяется их получению и исследованию с их помощью качества поверхностей металлических зеркал, полупроводников, предельно тонких молекулярных покрытий на металлах, используют их в качестве сверхчувствительных датчиков, для ближнеполных сканирующих оптических микроскопов, исследуют их роль в прохождении света через малые отверстия в темных экранах диаметром в десятую долю длины волны. С помощью поляритонов осваивается нанометровый мир.

Известно несколько способов /1,2/ возбуждения поляритонов на поверхностях металлов, кристаллов, полупроводников,

твердотельных многослойных структур. Это метод внешнего отражения при воздействии лазерным лучом на случайные шероховатости поверхности или на периодически профилированную поверхность под скользящим углом, метод нарушенного полного внутреннего отражения через призму с зазором до поверхности образца (геометрия Отто), или через призму, на грань которой нанесена тонкая пленка образца (геометрия Кречманна).

Для возбуждения поляритонов используют микроволновое и видимое излучение. При распространении вдоль поверхности интенсивность поля поляритона по мере движения затухает. Длины пробега поляритонов по поверхности уменьшается квадратично с длиной волны накачки, и поэтому в видимой области длины пробега поверхностных волн в исследованных образцах обычно не превышают 10 мкм. В жидкостях из-за большого затухания и в газах из-за малой концентрации частиц поляритонное излучение не наблюдается.

Можно, конечно, желать, чтобы поверхностное излучение для видимого света шло по поверхности не микроны, а в десять раз дальше, и чтобы шло так, чтобы не растрчивалось по сторонам, а шло как бы направленным нерасходящимся каналом. Хорошо бы так, но это мечты о нереальном, о чуде. Это все равно, как мечтать о том, чтобы зарплата выросла в десять раз, и чтобы ты деньги тратил, а они при этом еще и не расходовались. Есть же экономические законы, есть физические законы, которые ограничивают наши возможности, в их пределах и надо мечтать. Длины пробега микронные, расходимости дифракционные. О чем тут говорить?

И вдруг, как гром среди ясного неба, мы обнаруживаем, что в обычных мыльных пленках толщиной от 10 нм до 10 мкм (Рис. 1,2):

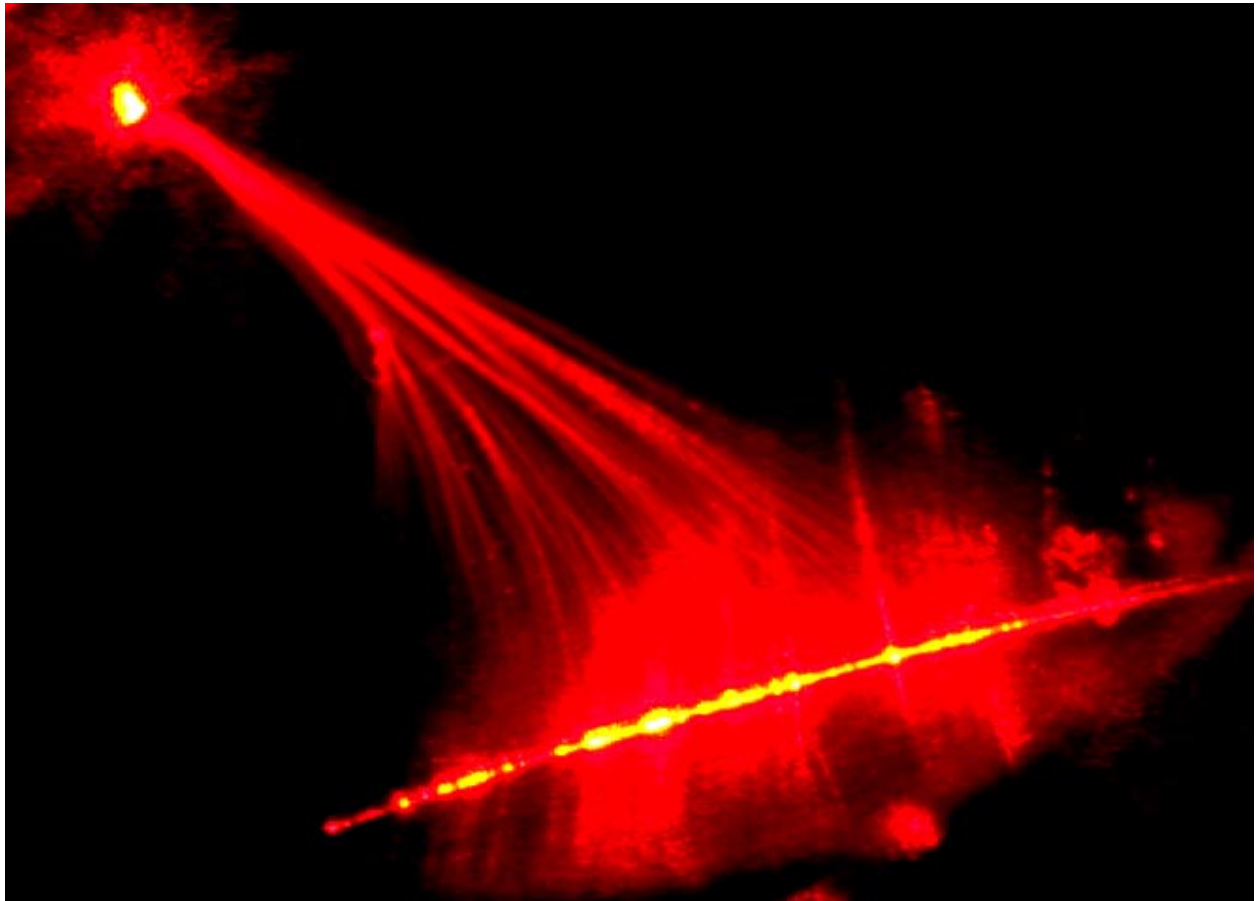


Рис.1. Вид треков (усов) поверхностного поляритонного излучения в мыльной пленке длиной 2.5 см и толщиной около 50 нм при фокусировке на край пленки излучения непрерывного He-Ne лазера 632.8 нм мощностью около 5 мВт сферической линзой с $F=10$ см.

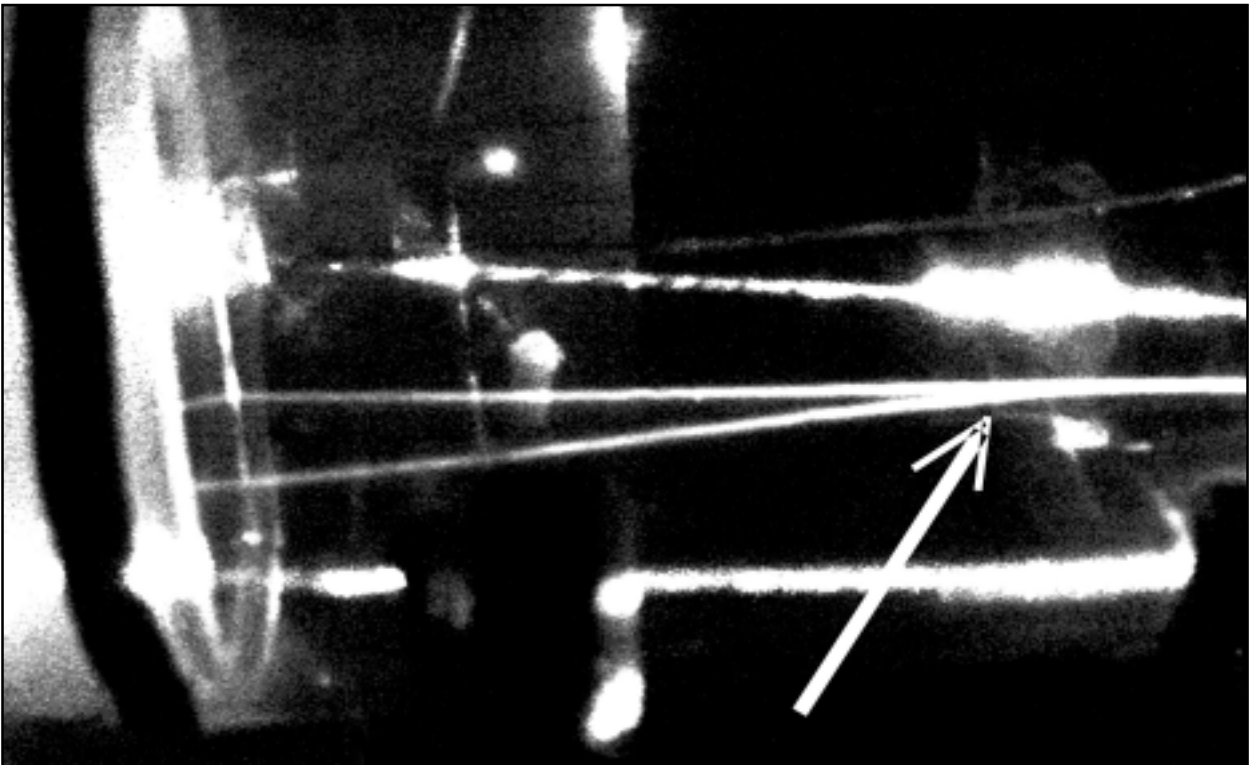


Рис.2. Вид треков (усов) поверхностного поляритонного излучения в мыльной пленке длиной 10 см и толщиной около 10 нм при фокусировке на край пленки излучения непрерывного He-Ne лазера 632.8 нм.

1. Возбуждаемое поляритонное излучение видимого диапазона идет на десятки сантиметров (вместо 10 мкм).

2. Бегущие поляритоны самосжимаются, чего раньше не видели, и идут по поверхности в виде тонких субмикронных каналов (усов).

Вот это мы и называем чудом.

Прежде чем рассказывать о деталях посмотрим, как выглядит поверхностное поляритонное излучение в наших пленках толщиной 50 нм. (Рис.1). Излучение непрерывного красного гелий-неонового лазера 633 нм фокусируется на край, идет по пленке и, становясь как бы жидкостью с поверхностным натяжением, разбивается на отдельные струи в виде узких каналов. Длина образца 2.5 см. Пленки могут быть прямыми или изогнутыми. В более тонкой пленке (Рис.2) излучение поляритона выглядит как длинный трек с разветвлением при общей длине 10 см.

Если поставить такую теоретическую задачу – какими свойствами должна обладать пленочная среда, чтобы длины пробега видимых поляритонов в ней составляли десятки сантиметров, и при этом в среде возникали сверхузкие каналы, то, по-видимому, в такой формулировке без наших исследований задача выглядит малоразрешимой и малопривлекательной, как задача о шаровой молнии, но мы уже можем подсказать теоретикам, где надо искать решение.

Начнем со структуры пленки. (Рис. 3). Мыльные пленки имеют молекулярно-слоистую структуру, внутренний слой толщиной меньше 10 мкм всегда однородный, а на поверхности с обеих сторон имеется сплошной слой толщиной всего в одну молекулу из пространственно ориентированных перпендикулярно к пленке молекул мыла, плотно упакованных в двумерный кристаллический

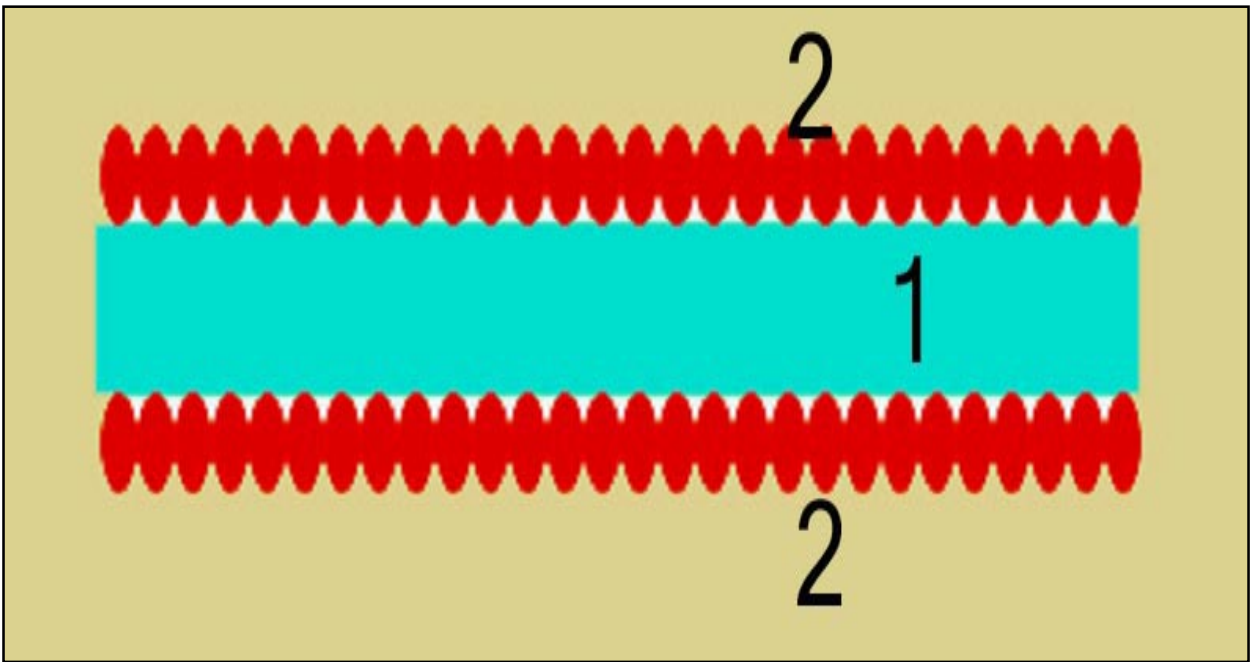


Рис. 3. Молекулярно-слоистая структура мыльной пленки. 1-прослойка раствора, 2-одномолекулярный слой молекул мыла на поверхностях пленки.

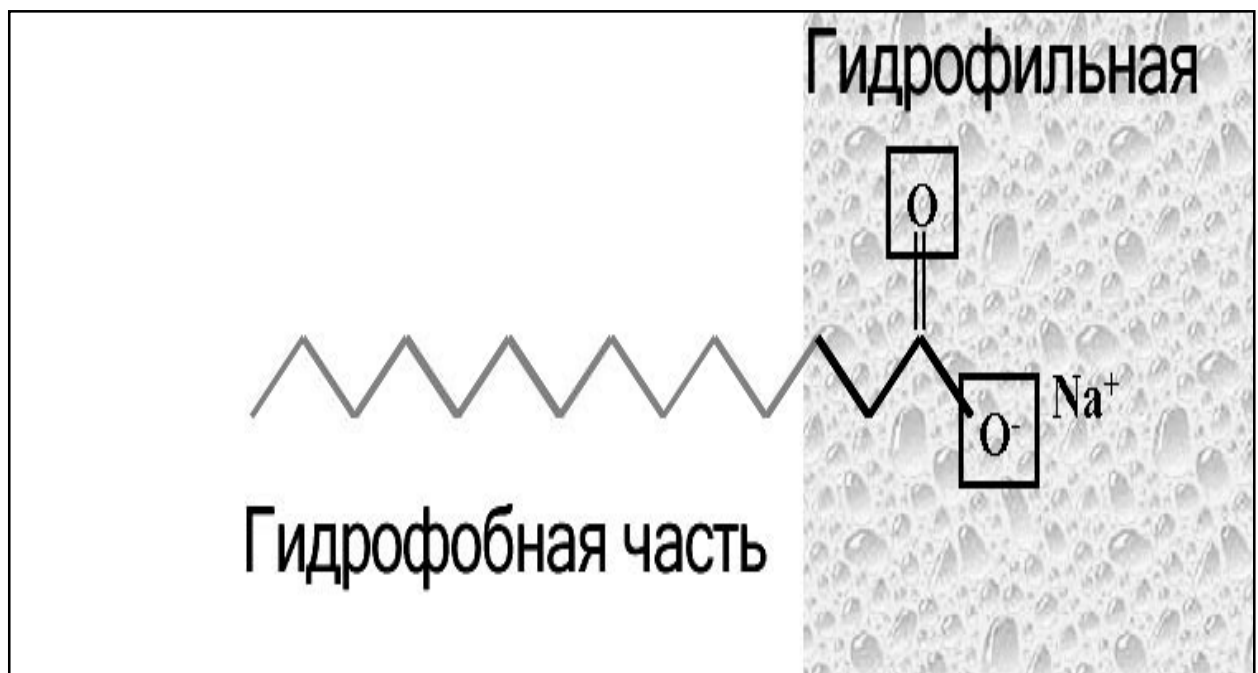


Рис. 4. Типичная структура молекулы мыла.

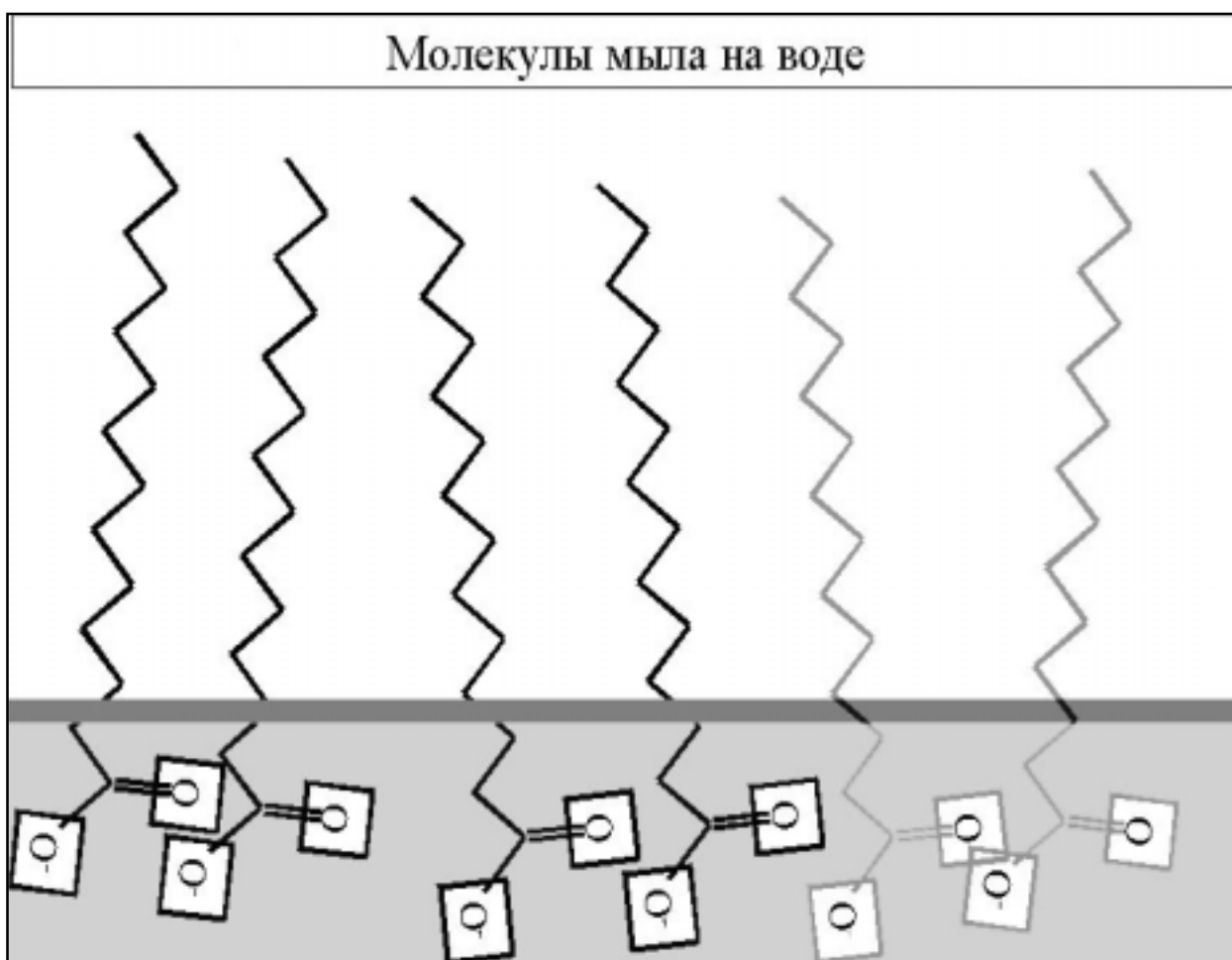


Рис. 5. Расположение молекул мыла на поверхности пленки.

слой, типа слоя двумерного кристалла Лэнгмюра-Блоджетт. Толщина такого бутербродного образца зависит от толщины среднего слоя и может меняться на три порядка от 10 мкм до 10 нм. Структура покрывающего поверхностного слоя практически всегда одинакова, но может иметь разный химический состав используемых молекул.

Мыло являются поверхностно активным веществом, т.е. его длинные молекулы (Рис.4) всегда с одного конца гидрофильны (любят оставаться в воде), а с другого гидрофобны (выталкиваются из воды). Поэтому они самоорганизуются, выстраиваются рядышком на поверхности (Рис.5), и концентрация молекул мыла на поверхности раствора особенно велика, это их любимое место. Они снижают поверхностное натяжение воды, и именно наличие этих молекул на поверхности позволяет создавать из растворов свободные тонкие пленки – из чистой воды пленки не образуются. Эти полярные молекулы мыла на поверхности ориентированы перпендикулярно к пленке и образуют с двух ее сторон наметровые мономолекулярные слои плотно или не очень плотно упакованных двумерных кристаллов из молекул мыла, разделенных прослойкой из водного раствора.

Толщина свежей пленки обычно не превышает 10 мкм. По мере стекания раствора пленка уменьшает свою толщину на несколько порядков, она постепенно становится тоньше, на ней в отраженном свете становятся видны интерференционные полосы, по виду и количеству которых можно определять толщину пленки [6,7]. Когда толщина пленки становится меньше примерно 0.1 длины волны видимого света, она для внешнего наблюдателя становится сначала 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, пока,

наконец, два слоя молекул почти сходятся и образуют так называемую истинную черную (ньютоновскую) пленку только из двух кристаллических слоев покрывающих молекул общей толщиной около 5 нм, т.е. в 100 раз меньше длины волны видимого света.

По краям пленки имеется утолщение, так называемое ребро в месте контакта пленки со стенками, удерживающими пленку в натяжении. Такое же ребро существует между соседними мыльными пузырями, когда они граничат друг с другом. Раствор из пленки выходит в ребра, а по ребрам стекает вниз. Когда пленка становится совсем тонкой, она рвется. В зависимости от состава раствора, его вязкости и окружающей атмосферы до разрыва пленки проходит от нескольких минут до нескольких недель и месяцев.

Пленки может быть сделана из любого обычного мыла и обычной воды из-под крана. Остается только бросить лазерный луч на пленку. Как говорил Козьма Прутков: «Если вы бросаете в воду камушки, то смотрите на расходящиеся круги. Иначе ваше занятие превратится в пустое времяпрепровождение». Препятствием началу таких занятий является именно здравый смысл, который естественно задает вопрос – Зачем бросать лазерный луч на пленку? Не пустое ли это времяпрепровождение?

Похоже, что не пустое. Теперь более внимательно посмотрим на то, что в данном случае можно назвать «расходящимися кругами». Тем из читателей, кто захочет сам провести эти простые опыты, остальное можно просто отмечать для проверки, при которой самим воочию убедиться в наличии чудес. Весь дальнейший материал будет весьма сухой констатацией фактов, динамику которых описать трудно. Скорее это будет попытка оживить воображение читателя и

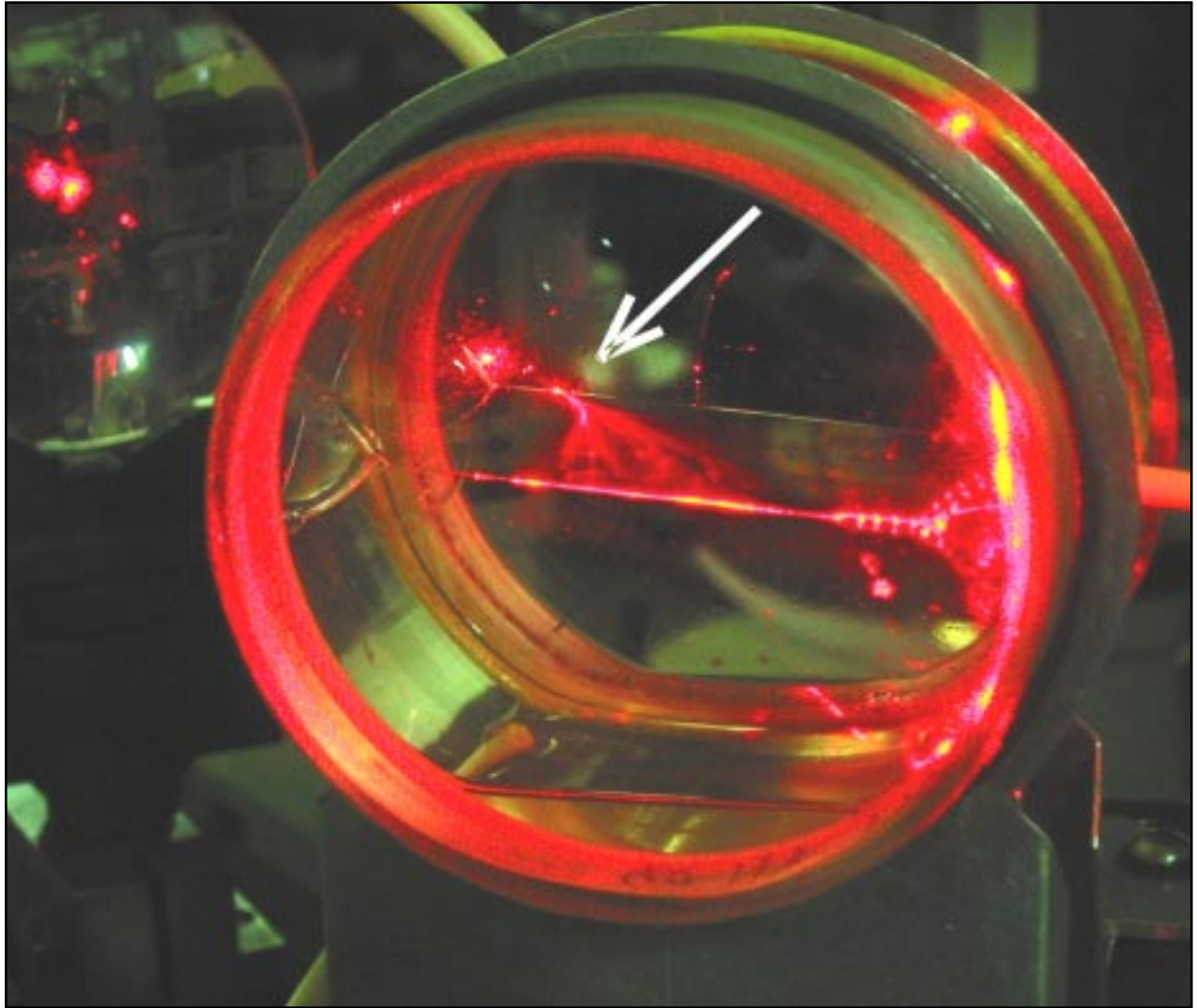


Рис. 6. Вид кюветы с горизонтальной мыльной пленкой. Стрелкой указано место фокусировки лазерного луча на край пленки.

представить явление, которое безусловно заслуживает того, чтобы увидеть его своими глазами.

Итак, как ставится эксперимент. Берется обычный луч непрерывного лазера любого цвета (для контроля настройки удобнее брать лазер видимого диапазона – гелий-неоновый (632.8 нм), красный полупроводниковый (типа указки, 660-670 нм), на парах металлов (Cd-441.6 нм), аргоновый лазер (514 и 488 нм) практически любой мощности от милливатт до ватт. Лазерный луч сферической линзой с фокусным расстоянием 3-10 см фокусируется и направляется на пленку с любой концентрацией мыла (лишь бы была пленка). Хотя толщина пленки меняется больше, чем на три порядка, при любой толщине получаются весьма интересные результаты. Вид нашей кюветы с горизонтальной пленкой (она отмечена стрелкой) показан на рисунке (Рис.6). Диаметр кюветы 6 см и расстояние между окнами 2.5 см. Внизу кюветы виден мыльный раствор, из которого создается мыльная пленка между окнами.

Перед опытом лазерный луч и пленка совмещаются в одной плоскости, излучение через окно просто фокусируется на край пленки. При оптимальной настройке в пленку входит около 1% лазерного излучения. Но, тем не менее, это излучение в пленке из прозрачного раствора хорошо видно невооруженным глазом потому, что оно рассеивается на неровностях на поверхности и на пылинках. И первая неожиданность состоит именно в том, что в пленке из самого прозрачного раствора это излучение хорошо видно, оно оставляет в ней хорошо видимый яркий след.

Еще больше удивление вызывает странный вид этого излучения в пленке. При любом цвете лазера от точки фокуса излучение в пленке идет не однородным расходящимся потоком, как в воздухе, а сразу

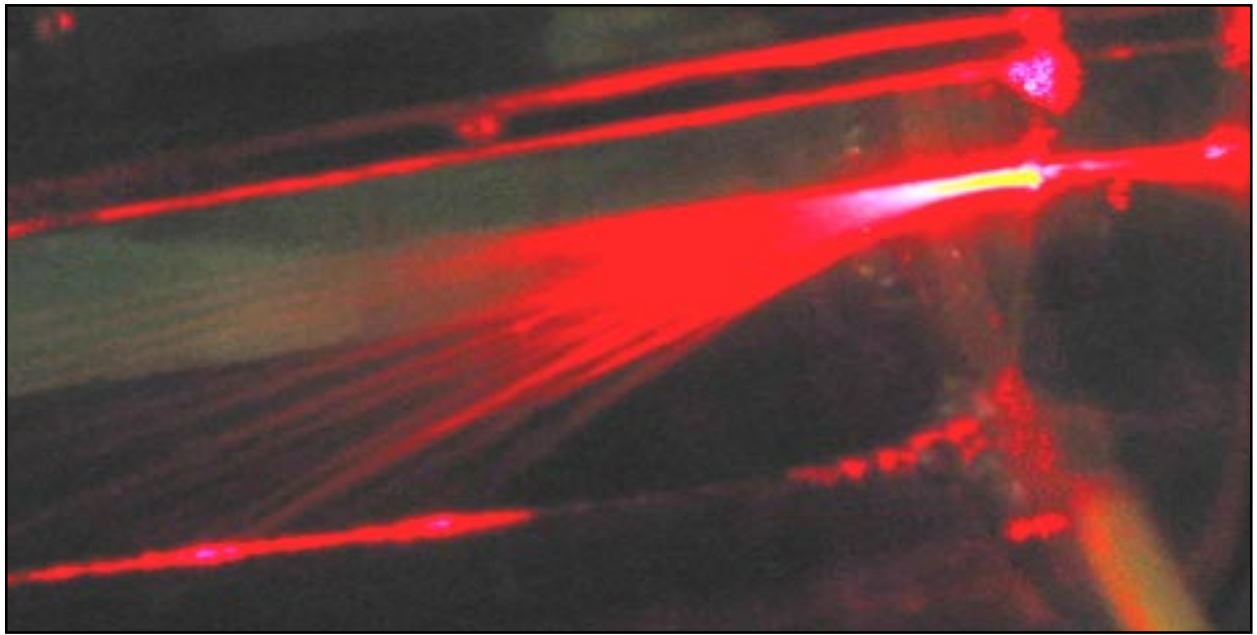


Рис. 7. Вид усов поверхностного поляритонного излучения в вертикальной мыльной пленке длиной 10 см при фокусировке на край пленки излучения непрерывного He-Ne лазера 632.8 нм.

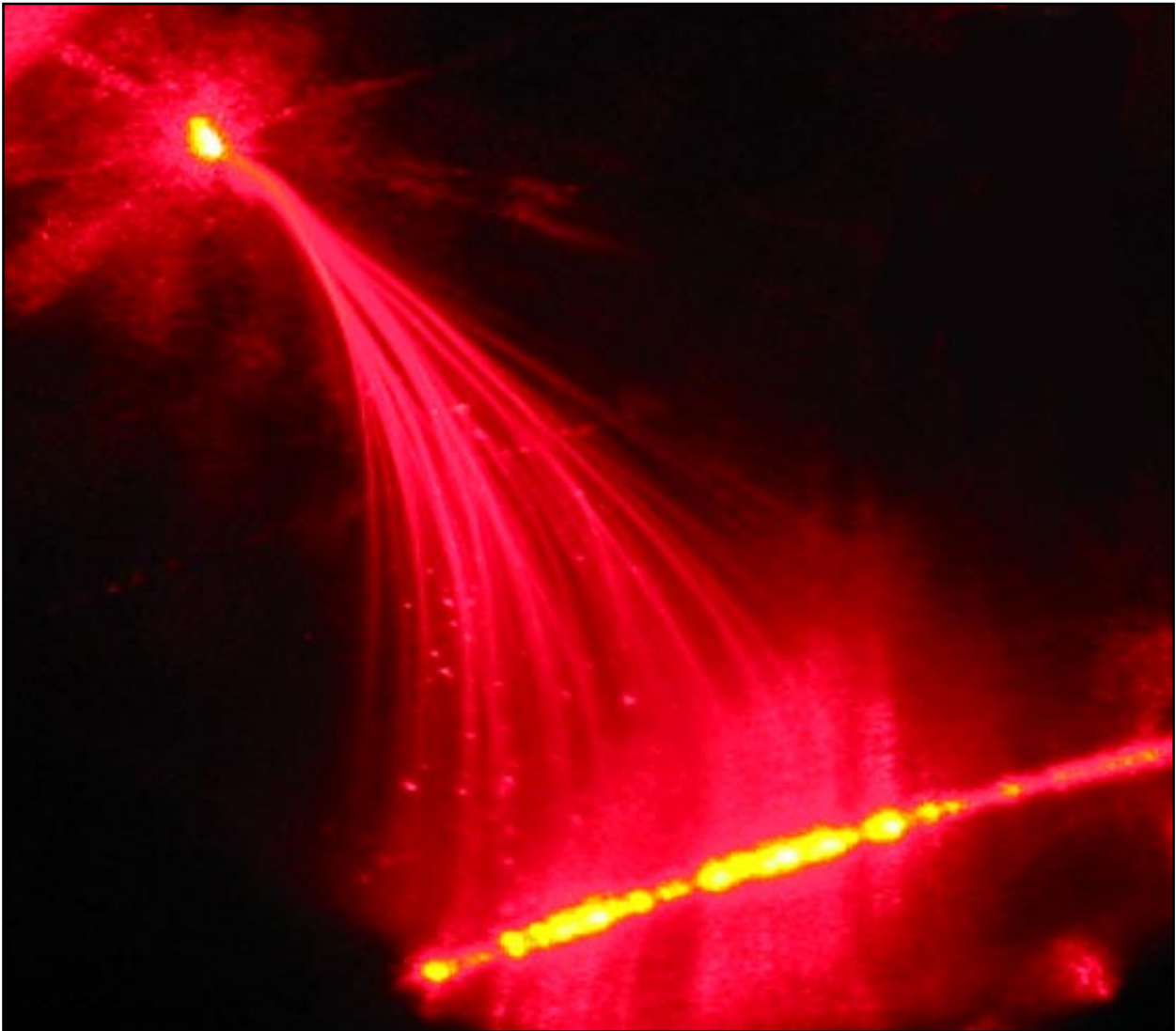


Рис. 8. Вид усов поверхностного поляритонного излучения в горизонтальной мыльной пленке длиной 2.5 см (50нм) при фокусировке на край пленки излучения непрерывного He-Ne лазера 632.8 нм.



Рис. 9. Вид усов поверхностного поляритонного излучения в горизонтальной мыльной пленке длиной 6 см при фокусировке на край пленки излучения непрерывного аргонового лазера нм с мощностью 3 Вт.



Рис.10. Вид усов поверхностного поляритонного излучения в горизонтальной мыльной пленке длиной 2.5 см толщиной около 50 нм при фокусировке на край пленки излучения непрерывного Cd-лазера 441.6 нм с мощностью 5 мВт.

от точки фокуса разбивается на множество тонких (буквально субмикронных) треков (усов) (Рис.7-10), которые не расширяются, а без заметного уменьшения своей яркости идут по пленке иногда на десятки сантиметров (Рис. 2). Эти усы в свежих пленках постоянно десятки раз в секунду меняют направление, и по виду напоминает изломанные каналы живой молнии, бассейн реки с притоками или фантастическое ветвистое дерева (Рис.7-10). Метание усов происходит без каких-либо четко видимых физических причин. Усы имеют разную яркость, изломы, загибы, они самопересекаются, иногда в образце есть развороты уса на 180 градусов.

Наиболее эффективно усы образуются при поляризации луча (его векторе E), перпендикулярном пленке (усы лучше наблюдать по ходу луча через выходную подложку), но при вводе через край пленки усы почти также эффективно возбуждаются и при поляризации луча, параллельной плоскости пленки (усы лучше видны перпендикулярно к пленке).

Сразу возникает подозрение на самофокусировку. Но вот что выясняется - такое разбиение на усы в пленке происходит при любой мощности лазерного излучения – как при его фокусировке, так и в прямом луче без фокусировки и во всем диапазоне исследованных мощностей, отличающихся в тысячи раз - от 1 мВт до 3 Вт. Плотность мощности возбуждения меняется почти в миллионы раз, а усы остаются. Увеличение мощности потока лазеров на много порядков не меняет вида и характера поведения тонких усов. Трек луча состоит из пучка многих узких лучей (усов), которые, если в пленке при встрече с пылинкой и рассыпаются, то тоже на множество более мелких усов, и отсутствует какой-либо заметный порог их возбуждения.

Усы можно было бы назвать самоидуцированными конденсатами, пространственными солитонами, идущими по среде узкими каналами при непрерывной накачке. О возможном механизме мы поговорит чуть позже, а пока посмотрим на другие особенности излучения в пленке.

Во всех жидких пленках из всех доступных и опробованных нам сортов мыла и из растворов химически чистых поверхностно активных веществ при всех их концентрациях картина усов примерно одинакова, и по мере старения пленок эти движения усов замедляются, они становятся менее ветвистыми и более прямыми. Особой зависимости метаний бегающих усов от концентрации мыла в растворе нет, хотя при высокой концентрации мыла яркость усов несколько увеличивается.

При выходе излучения из противоположного края пленки в воздух или в раствор тонкие усы преобразуются и становятся расходящимися, как положено объемным лучам. На экране они интерферируют и дают узкие полосы, как показано на следующем рисунке (Рис. 11). Усы прижаты к поверхности плоской или выпуклой пленки. При наличии в растворе молекул красителя, они возбуждают флуоресценцию этих молекул, и в этом случае усы окрашены в цвет флуоресценции. Эти усы в пленке не рассыпаются, как в мутной среде, а на всем пути остаются, на взгляд, одинаково тонкими и яркими.

Понижение температуры делает усы чуть более ветвистыми, волокнистыми. Но окружающая температура мало влияет на общий характер поведения усов в пленках, и усы наблюдаются при всех комнатных температурах от 0 до 30 С.

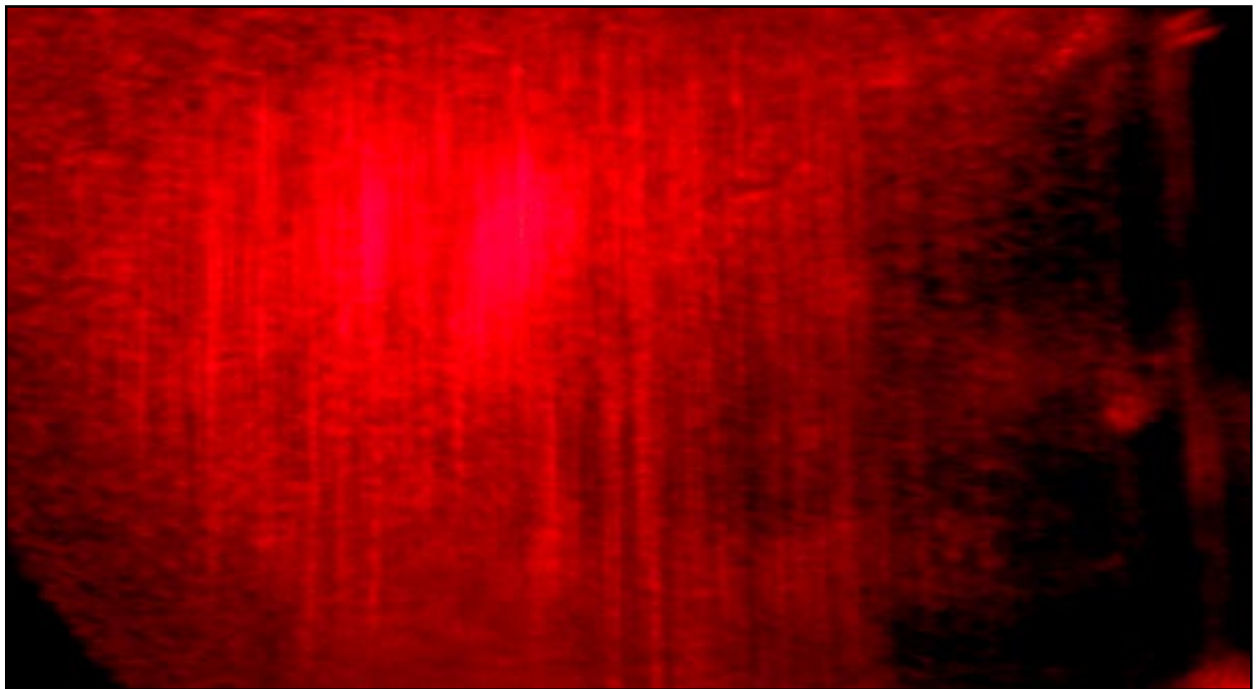


Рис. 11. Вид интерференционных полос от выходящего из пленки излучения на экране на расстоянии 30 см от кюветы.

Представляло интерес проверить следующее. Если луч лазера как-то действует на поверхность или на молекулы раствора, то будут ли тонкие каналы на поверхности объемного налитого в стакан раствора или внутри в объеме мыльного раствора? Проверяем, на поверхности раствора таких каналов нет, как нет их и в объеме раствора. Получается, что для образования усов нужны две близко расположенные поверхности пленки.

А если по-другому. Будут ли усы в тонком слое мыльного раствора на металлическом зеркале? Проверяем, нет, в таких тонких слоях усов не видно. В полиэтиленовой и тефлоновой 5 мкм пленках сфокусированный на ребро лазерный луч усов не дает. Усов в очень тонкой (3 мкм) прозрачной слюдяной пластинке при подсветки с торца нет. В тонкой слюдяной пластинке, смоченной мыльным раствором нет. В двух тонких слюдяных пластинках с мыльным раствором между ними тоже нет.

В слабо мутной пленке усы все равно видны, и если мутность такая, что рассеяние в объеме происходит на расстоянии 1 см, то усы в пленке образуются, но имеют очень тонко-ветвистый характер, как очень ветвистое дерево.

В пленках с поглотителями лазерного света (типа красителя или чернил), в объемных растворах которых лазерный луч поглощается на расстоянии около 1 см, поляритонное излучение в виде усов возбуждается, 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.

Наблюдаемые следы отличаются от обычных объемных волноводных мод в пленке, идущих внутри по раствору с показателем преломления 1.3, своим видом (в однородных средах

излучение не собирается в усы), и еще их поведением в пленках разной толщины.

Были поставлены опыты для оценки показателя преломления треков излучения в пленке. Пленки могут иметь разную толщину, и участки с разной толщиной могут граничить друг с другом. На резкой границе тонкого и толстого образца усы преломляются и отражаются, чего для внутреннего объемного излучения быть не должно. (Рис.12). Здесь виден узкий пучок в тонком образце меньше 50 нм, где его трек мало интенсивный. Когда этот слабо видимый трек попадает под скользким углом на горизонтальную границу с толстой пленкой 100 нм (отмеченную белой линией), то преломляется в толстую пленку равномерно светящейся полосой шириной около 1 см, которая на порядок ярче, чем трек узкого луча в черной пленке, и этот параллелограмм состоит из десятков близко расположенных почти параллельных усов примерно одинаковой интенсивности (на порядок ярче, чем трек узкого луча в тонком образце). Можно сделать вывод, что при преломлении толстая среда собирает в себя (в усах) больше энергии из воздушной части поляритона, чем было в тонком образце, и поэтому в толстой среде усы заметно лучше светятся.

В тонких пленках (50-5 нм) (Рис.12) усы, запущенные с края под углом в пленку, идут по пленке прямо вдоль луча (почти не преломляясь, как по воздуху). Это показывает, что показатель преломления тонкой среды (пленка+воздух), по которой идет луч, близок к единице. Для объемного луча, идущего по раствору, такого не должно быть. В зависимости от толщины пленки показатель преломления составляет $n=1-1.28$.

Еще такой опыт. Имеется вертикальная пленка, которая сидит прямо на растворе. Снизу через раствор направляется в нее лазерный

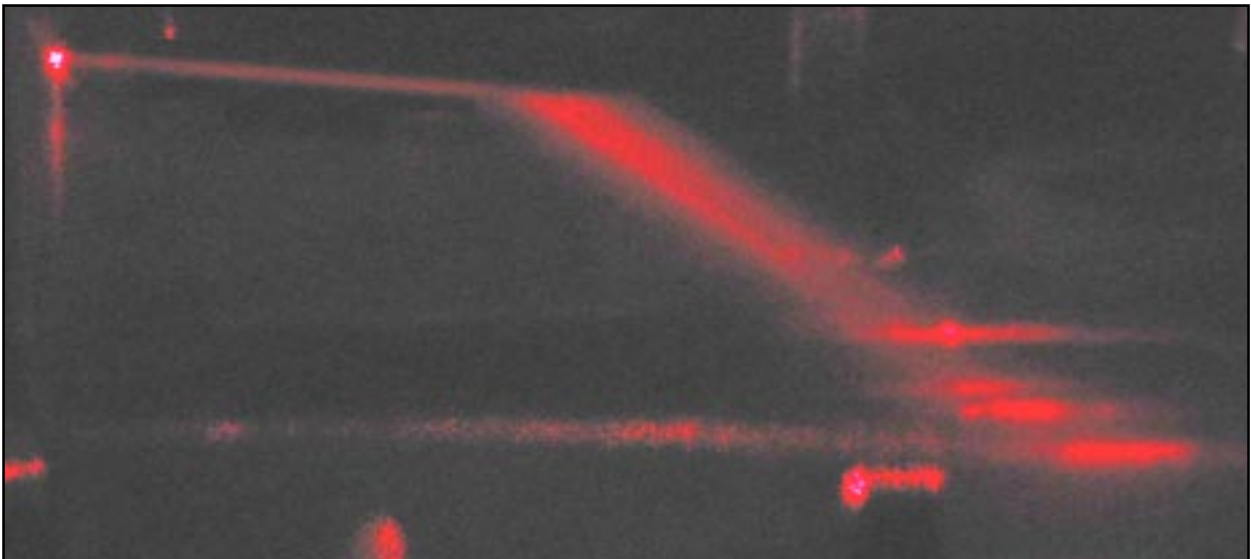


Рис.12. Преломление трека усов на горизонтальной границе тонкого (<50 нм) и толстого (>100 нм) участков на вертикальной пленки.

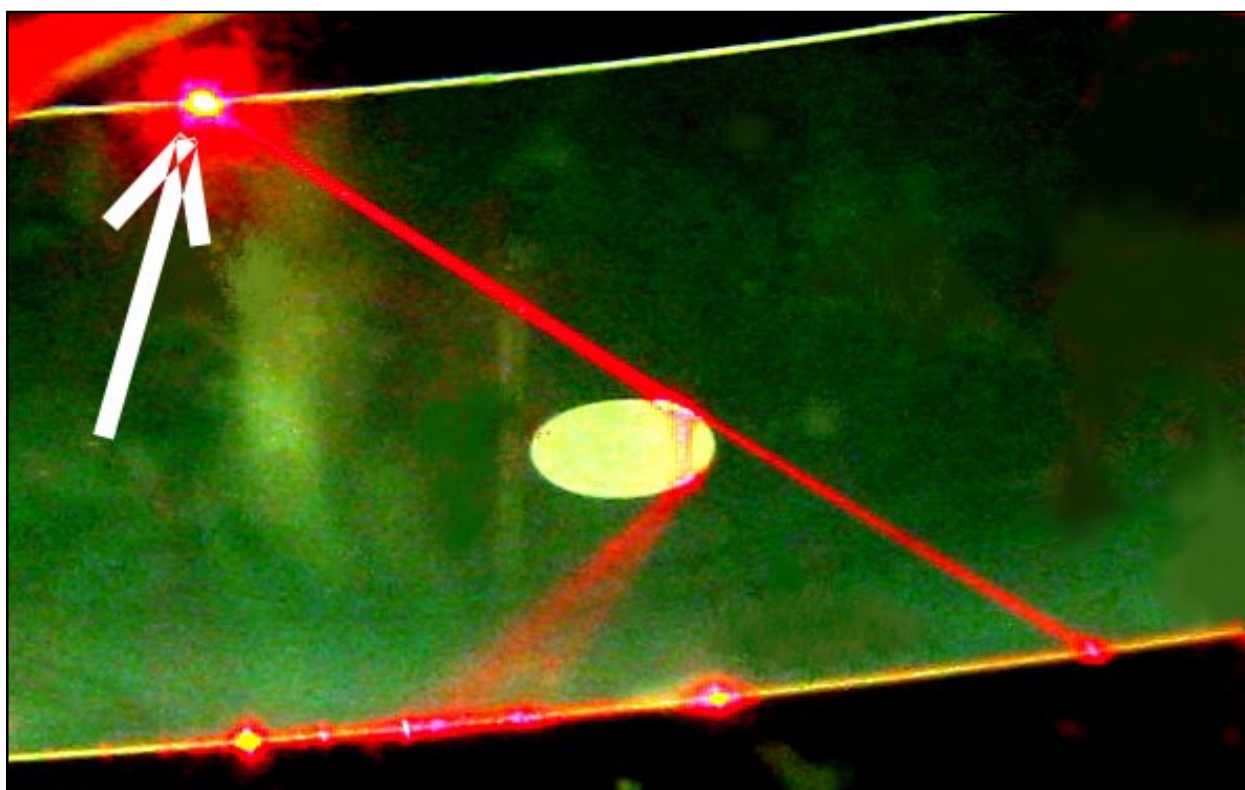


Рис.13. Трек усов на черной пленке (10 нм) и преломления его части на круглом более толстом участке пленки (>100 нм). Стрелкой отмечено место на крае пленки, куда фокусируется лазер 632.8 нм.

луч и дает в пленке обычные усы. Но если луч направлен под скольльзящим углом к границе, то он в пленку не заходит, а от границы отражается. Угол от нормали, при котором луч снизу из раствора начинает заходить в пленку, рождают усы, это около 50 ± 2 градуса. Из этого предельного угла получаем, что показатель преломления для света усов в пленке чуть больше единицы (1.023) (для воды $n=1.33$).

А вот предельного угла для ввода излучения в тонкую пленку по воздуху с краю, при освещении сбоку нет. Преломление части усов трека на толстом круглом участке пленки (Рис. 13) позволяет изучать оптику поляритонов. Малый (меньше, чем у раствора) показатель преломления показывает, что мы имеем дело именно с поверхностной поляритонной волной, и что энергия волны, прижатая к поверхности пленки, идет и по воздуху, но какое-то малое время проводит и в пленке.

При перпендикулярной к пленке поляризации луча на пленке при любой ее толщине (до черной) практически всегда можно получить усы при освещении не с краю, а по воздуху в центре пленки. Но только при падении луча на пылинку под скольльзящим углом менее 5-6 градусов. Если угол больше, усов в центре пленки нет. С точки зрения пленки как тонкой плоскопараллельной пластины что-то от падающего излучения (по Френелю) должно проходит через пленку, что-то отражаться, но в пленке **ничего** не должно оставаться. А в ней при этом рождаются яркие, длинные, бегающие усы, что показывает явно неклассических характер поведения света в таких тонких пленках. О ширине усов можно судить по опытам в еще одном интересном объект для исследования. Что будет со световым потоком накачки, если рождающая усы область пленки станет очень узкой,

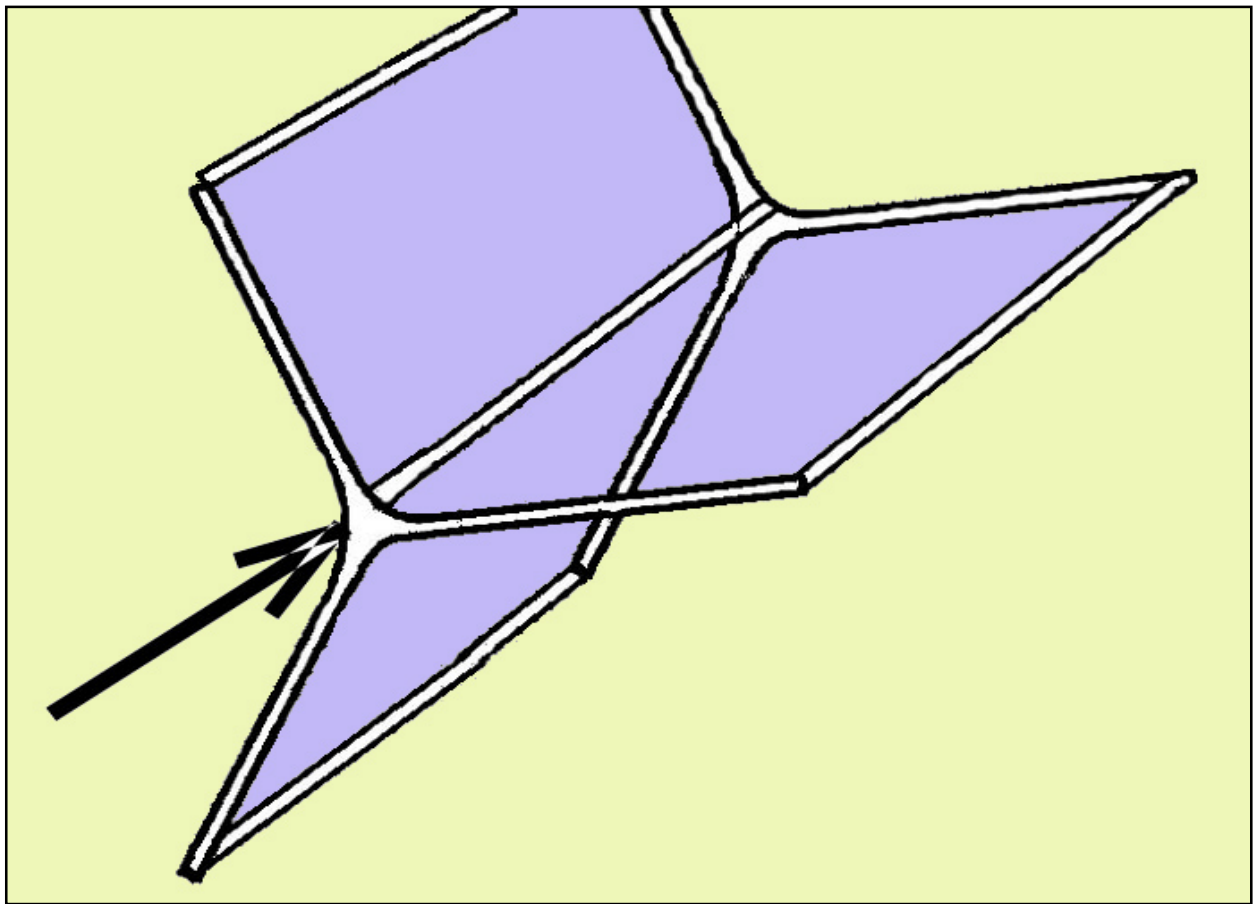


Рис.14. Схематический вид ребра между тремя мыльными пленками.
Торец ребра отмечен стрелкой.

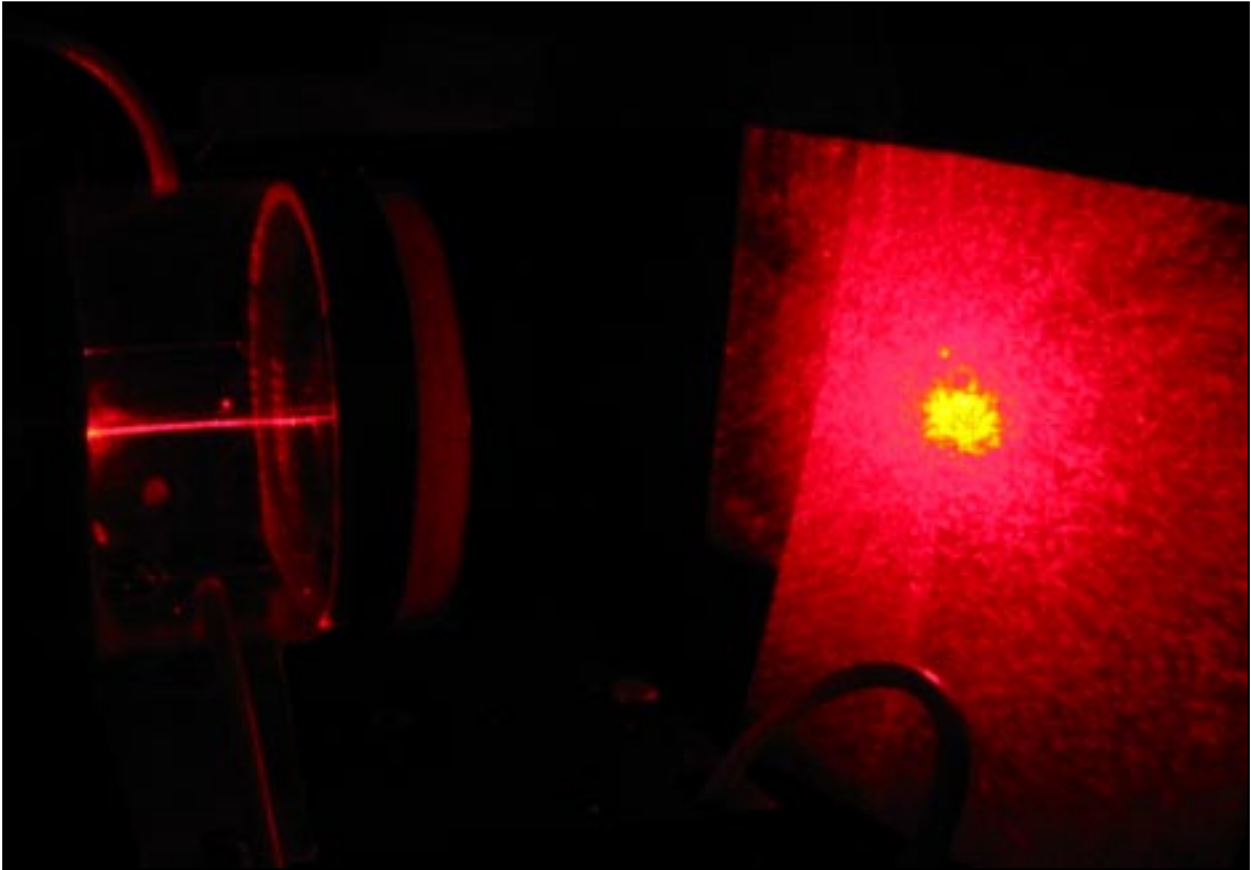


Рис.15. Ребро между трех черных пленок и вид пятен на экране от выходящего из ребра излучения He-Ne лазера 632.8 нм.

субмикронной полоской, ниточкой? В пленке такой ниточкой является ребро между трех пленок (Рис.14). Вот что мы видим при направлении лазерного луча в торец ребра между пленками. Яркое центральное пятно выходного из ребра излучения (Рис15) окружено широким пятнистым, мигающим полем, которое по виду очень напоминает мигание полосок поляритонов на экране. В тонком ребре мы не видим отдельных усов поляритонов, но характер поведения мигающего поля позволяет нам утверждать, что поляритоны рождаются и в тонкой нитке раствора в виде ребра. Толщина ребра со временем приближается к толщине пленок. И эта нить толщиной меньше десятой доли длины волны много суток продолжает проводить свет и давать на экране мигающую картину. Тонкая нить диаметром в 0.1 мкм для объемных мод света является запределельным волноводом, поэтому наблюдаемое прохождение по ней энергии могут обеспечить только поверхностные поляритоны, усы с шириной меньше 0.1 мкм.

Поскольку мечущиеся усы видны в пленках и ребрах, толщины которых меньше 0.1 длины волны, то можно предположить, что и вызывающие отклонения усов неоднородности не превышают по размерам толщину пленки. Значит, усы дают субмикронное разрешение неоднородностей в пленке.

Теория поляритонного излучения на границе с молекулярно тонкими двумерными кристаллами и над гибкими двойными слоями из таких кристаллов еще не создана. Есть трудности приложения макроскопической электродинамики и уравнений Максвелла к таким структурам, связанные с нелокальным характером их параметров. Поляризация каждой молекулы в слое определяется не только локальным полем световой волны, но и диполь-дипольным

взаимодействием с соседними полярными молекулами, величина которого зависит от нежесткого пространственного расположения этих молекул. Необходимо искать ответ в виде решение самосогласованной задачи по воздействию светового поля на два близко расположенных слоя воздействующих друг на друга полярных молекул.

Направление наиболее эффективной для возбуждения усов поляризации подсказывает возможный механизм образования усов. В тонкой пленке лазерное излучение вызывает поляризацию длинных молекул мыла в обеих поверхностных слоях, и эти молекулы начинают интенсивно взаимодействовать друг с другом. В толстой пленке слои далеко друг от друга и эффект взаимного влияния слаб, а в тонких, субмикронных он велик, и это взаимодействие по какой-то причине усиливается и приводит к образованию нанометровых усов. Когда начальная пленка толстая, она дает на взгляд более широкие каналы (усы), в тонких пленках усы крайне тонкие (субмикронные).

В появлении поляритонов на пленке нет явной зависимости от мощности лазера, нет взаимодействия поляритонов между собой, и поэтому с одной стороны кажется, что мы находимся в линейном режиме взаимодействия света и среды. С другой стороны постоянное наличие тонких усов показывают, что в пленке есть очень эффективное преобразование ровного лазерного фронта в тонкие усы и волокна, и это явно нелинейный процесс. Наличие тонких усов указывает на то, что здесь имеется какой-то резонансное усиление и лавинное нарастание в механизм их образования (как каналов ионизации в молнии). Электродинамика процесса требует дальнейшего рассмотрения, но она весьма интересна. Мы имеем дело с нелинейной поляритонной средой.

Итак, опыты по наблюдению узких треков, углов преломления и отражения усов от границ, их прижатость к поверхности свободной пленки, опыты с поляризацией показывают, что излучение в усах связано с пленкой, но поскольку ему соответствует очень малый показатель преломления, оно идет не только по раствору, и что это излучение действительно является поверхностным поляритоном. Мы имеем дело с самоорганизующимися поверхностными лучами, которые прижаты к пленке, направляются пленкой (толщина которой в десятки раз меньше длины волны), как антенной, но идут в ней и рядом по воздуху. Следует отметить, что разбиение поляритонов на узкие усы ранее ни в каких образцах не наблюдалось и вызвано особенностями структуры наших пленок и их нелинейными свойствами.

В дальнейшем представляет интерес задача исследования других жидких типа био-липидных и не жидких пленок и, возможно, создание прочной полимерной пленки с теми же поверхностными слоями и свойствами, как у мыльной пленки. Разобравшись на мыльных пленках с желаниями света, ему можно помочь. Например, можно сделать специальную жесткую пленку толщиной 0.1 длины волны с полярными молекулами на ее поверхностях с заранее приготовленными на ней полосками-усами, концентрирующими свет, (т.е. заранее проделать ту работу, которую свет делает в мыльной пленке при создании в ней узких каналов). Если затем осветить ее с одной стороны, то свет пойдет по этим полосковым волноводам, как по прямым предельно тонким каналом по заданным адресам. Это поможет световодной технике. Изучение поляритонного излучение в био-мембранах тоже представляет большой интерес, поскольку все живое состоит из таких мембран.

При больших мощностях луч может сам влиять на динамику изменения n (например, своим световым давлением или нагревом). Возможность управления величиной n внешним полем (электрическим, магнитным, звуковым, температурным) открывает перспективы простых пленочно-оптических устройств, переключателей, ответвителей и т.д., возможность исследования биологических мембран, реализаций устройств типа лазерной «иглы», изучения оптической турбулентности, связи усов с цилиндрическими поверхностными фонон-поляритонными волнами на монослойной кристаллической решетке молекул, изучения взаимодействия поляритонных волн на близко расположенных параллельных мыльных пленках из многих слоев.

Подытоживая, можно сказать, что тонкая мыльная пленка служит преобразователем направления и вида падающего на нее лазерного пучка в усы. Свету по каким-то причинам удобнее путешествовать по пленке в виде тонких усов. Образно говоря, если в толстых средах свет при распространении ведет себя по социалистически – равномерно распределяет по пространству свою энергию, а в тонкой мыльной пленке – по капиталистически, он собирает свою энергию в сверхтонкие усы. Сколько он на это преобразование в тонкие каналы тратит времени и энергии, где она концентрируется и куда потом девается – это второй вопрос. Примем как экспериментальный факт, что свету так удобнее идти между парой слоев поляризуемых молекул.

А.М. Прохоров неоднократно говаривал: «Только дайте нам экспериментальный факт, а уж теоретически мы его объясним». Так вот задача для теоретиков – определить почему и какие еще среды, среды каких классов и с какими свойствами могут обеспечить

рождение в видимом диапазоне и поддержание в пленке нанометровых усов поверхностных поляритонов на больших расстояниях? Каковы пределы данного эффекта по частоте, мощности, толщине образцов, какова динамика формирования усов и их предельная толщина?

С мыльной пленкой нет никаких проблем. В любом объеме из любого мыльного водного раствора создается прозрачная мыльная пленка. Пленку можно делать и в бутылке, и на воздухе, но на воздухе она обычно мало живет и для опытов это не всегда удобно.

Как мы обнаружили, высокая концентрация молекул красителей в тех же пленках, в которых наблюдается образование поляритонного излучения, позволяет одновременно их 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) в диапазоне 630-640 нм, и в дальнейшем представляет интерес исследовать ее взаимодействие с поверхностным поляритонным излучением.

Если есть механизм, по которому малая часть материи (пленки) способна концентрировать и удерживать энергию света в сверхтонких усах при больших и малых мощностях лазера, то нет ли возможности такому же механизму сосредотачивать энергию поля внутри объемных сред, капель? Не он ли удерживает энергию в маленьком кусочке материи в шаровой молнии?

Еще несколько слов о наших догадках о возможном механизме образования усов. Как видно по яркости усов в пленках, свойства пленок зависят от их толщины. Почему-то особенно интенсивно реагирует на освещение переход от черной к более толстой пленке, к ребру или капле. Освещенный участок перехода очень ярко

переизлучает свет в пленку. Можно представить, что усы, как и вся поверхность на пленке, ведут себя, как антенны, как параметрические генераторы, которые под действием света меняют свои параметры и самонастраиваются под резонанс со световым полем, а чувствительность и добротность этих резонаторов очень высокая, и они откликаются на самую слабую накачку. Участки, которым раньше других удается настроиться на резонанс и сосредоточить в себе поле, и составляют трек уса. (Следует отметить, что возможность прохождения поляритонов по узкому нано-каналу рядом расположенных круглых частиц золота диаметром 50 нм обсуждается, например, в /8/.) Около образовавшегося трека уса световое поле меняется так, что у соседних с ним участков пленки образование такого же резонанса замедляется. Это обеспечивает локально-лавинный характер образования уса и его наноскопическую узость. Усы – это наноскопы. Возможно, эти молекулярные нанорезонаторы возникают при сближении молекул слоев и действуют, как короткое замыкание (соседние молекулы уже не сближаются) (Рис.16). И рождаются усы с лавинным нарастанием, и исчезают с выключением света. Видимо, каждая из сблизившихся молекул мыла, находясь в соседстве с похожим наноострием от противоположной пленки, начинает в сотни и тысячи раз интенсивнее поглощать свет и излучать его. Для частиц с резонансными переходами это может быть. У молекул мыла нет резонансного поглощения света в видимом диапазоне, но, похоже, что их сближение тоже резко усиливает их взаимодействие со светом. И чем ближе они подходят друг к другу, тем интенсивнее взаимодействуют, тем интенсивнее стягивают на себя свет. Это и есть та возможная нелинейность, которая приводит к образованию

Механизм Образования Усов

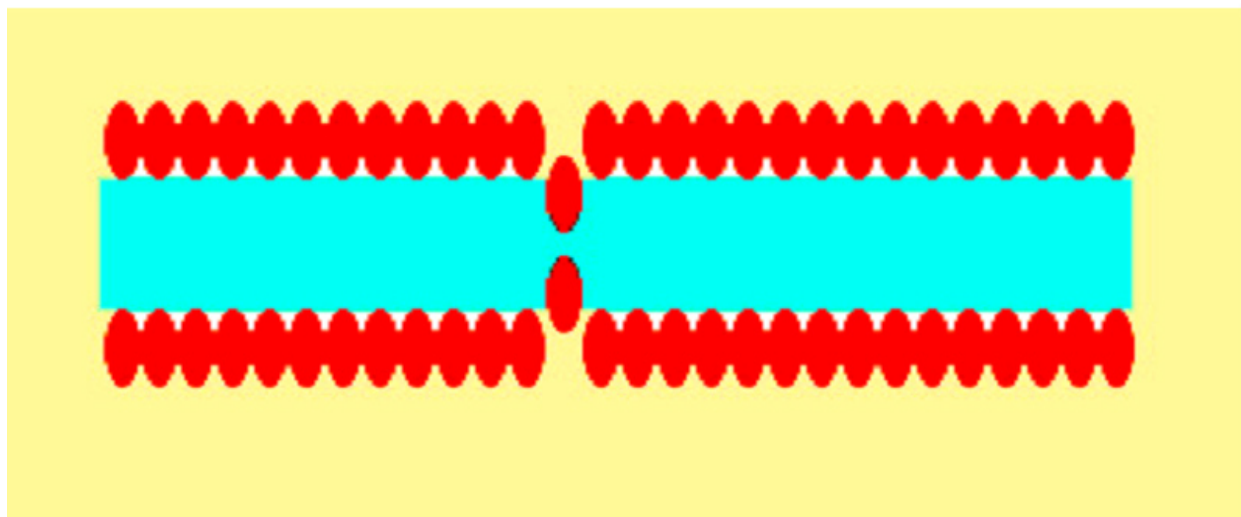


Рис.16. Предполагаемый механизм образования усов на пленке под действием лазерного излучения.

тонкого уса. Свет в образовавшемся в пленке усе приобретает свойство поверхностного натяжения, пинчуются и имеют такую сильную связь с наружным полем, что поле от него не может отойти. Так они вместе и идут по пленке. Поскольку результат схлопывания всегда один и тот же (узкая область черной пленки), и за счет резонанса достигается он при любой мощности (с разными временами), то это объясняет отмеченную независимость эффекта усов от мощности лазера и некоторое видоизменение поведения усов от толщины пленки. Если мы правы, то жидкость между поверхностными слоями нужна для эффекта – она дает возможность слоям слипнуться до черноты. А на слюде такой свободны нет.

Это странно, но если подумать, то все мы, исследователи, представляем поле таких же самонастраивающихся резонаторов, настраивающихся на новое. И когда кто-то из нас теряет возможность настраиваться, настраиваться начинают другие. Главное, чтобы было кому настраиваться. Здесь открывается новая наномасштабная область оптики, электродинамики, физики, и похоже, что ряд устоявшихся для макромира понятий для нано-объектов придется пересматривать. Через гипотезы, сомнения, эксперименты, поиски.

Можно перечислить ряд задач для исследователей, прояснение которых представляет интерес:

1. Механизм образования и поддержания канальных поляритонов, усов (что и как в пленке резонирует, параметрические солитоны, самоконденсация, поверхностное натяжение у лучей и т.д.),

2. Причины их заостренности и разбиения на узкие усы на пылинках,

3. Усы в других средах и био-мембранах, включая не жидкие среды,
4. Диапазон частот накачки (УФ, микро и радиодиапазон),
5. Какую минимальную и максимальную энергию можно передавать по усу?
6. Требуемая когерентность источников накачки,
7. Допустимая мощность источников накачки,
8. Эффективность возбуждения и энергетический баланс,
9. Роль поляризации накачки относительно пленки и ее преобразование в среде,
10. Влияние толщины пленок и ее состава,
11. Роль рассеяния и поглощения,
12. Минимальная толщина усов,
13. Максимальные длины пробега,
14. Управляемость усами в зависимости от внешних условий (электрические, магнитные, тепловые, звуковые поля), (оптроника),
15. Связь с генерацией в пленках на лазерах на красителях, обратимость явления,
16. Применение усов для исследования поверхностей, пленок и в качестве датчиков,
17. Временные характеристики (образования, жизни, затухания), отклики на нано- и фемто- секундные импульсы накачки,
18. Какой минимальный радиус изгиба плоскости пленки могут пройти усы? Какой минимальный радиус загиба трека усов может быть в плоскости пленки?
19. Какой поток информации можно передать по усам?
20. Взаимодействие поляритонных усов в близко расположенных параллельных пленках.

Следует, правда, отметить, что за решение таких задач исследователям не платят, и научные фонды на эту тему денег выделять не хотят. Рокфеллер говаривал: “Где бы, кто бы в мире не сделал фундаментальное открытие, основные доходы от этого открытия будут наши!”. Так что, не очень торопитесь. Дирекция, академия здесь помочь не могут. Всем приходится обращаться к этим удачным финансистам и олигархам, а им по закону “Эволюции диктата” /9/ и без нас живется хорошо. Будем рассчитывать на нашу взаимовыручку и кооперацию институтов.

Благодарим всех сотрудников КРФ, предоставивших нам свои домашние шампуни, химические чистые образцы поверхностно активных веществ и лазеры для наших исследований.

Литература

1.«Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред», Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Милла, М: «Наука» 1985.

2.Н.Л. Дмитрук, В.Г. Литовченко, В.Л. Стрижевский. «Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках» Киев: «Наукова Думка» 1989.

3.J. C. Weeber, A. Dereux, Ch. Girard, G. Colas, J. R. Krenn, J. P. Goudonnet “Optical addressing at the subwavelength scale”, *Phys. Rev. E* (2000) V. 62, #5, p. 7381.

4.Виноградов Е.А. «Поляритоны полупроводниковой микрополости», *УФН* (2002) №12, с. 1371. (http://ufn.ioc.ac.ru/ufn02/ufn02_12/Russian/r0212b.pdf) .

5. А.В. Старцев, Ю.Ю. Стойлов, «Способ получения поверхностных электромагнитных волн (поверхностных

поляритонов)», заявка на патент №20022132754 от 5 декабря 2002 года.

6. E.B. Sirota, P.S. Pershan, L.B. Sorensen, J. Collett “X-ray and optical studies of the thickness dependence of the phase diagram of liquid-crystal films”, *Phys. Rev. A*, (1987) 36, 2890.

7. P. D. T. Huibers, D. O. Shah, “Multispectral Determination of Soap Film Thickness”, *Langmuir* (1997), 13, 5995. (<http://surfactants.net/huibers/la960738n.pdf>) .

8. S. A. Maier, P.G. Kik, M.L. Brongersma, H.A. Atwater, A.A.G. Requicha, B.E. Koel “Observation of coupled plasmon-polariton modes of plasmon waveguides for electromagnetic energy transport below the diffraction limit” *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 722 (2002) p. L6.2.1. http://www.csem.caltech.edu/Publications/MRS_Spring2002.pdf_1.pdf

9. В.М. Кайтуков “Эволюция диктата” М.,:Урамос, 1991, 468 с. (<http://www.philosophyevolution.com/index.htm>)
