

Чудо с лазерным лучом в мыльной пленке

А.В.Старцев, Ю.Ю.Стойлов

При введении сфокусированного луча (например, с $\lambda = 632.8$ нм) мощностью 10 мкВт–3 Вт в обычную мыльную пленку толщиной от 10 нм до 10 мкм сбоку или через дефект в поверхности наблюдаются самосжатие идущего по пленке лазерного излучения и его саморазветвление на субмикронные прожилки, так называемые усы, длиной десятки сантиметров. Обсуждаются результаты экспериментов по динамике поведения этих усов в мыльной пленке, их поляритонный характер и возможные применения.

Ключевые слова: мыльная пленка, самосжатие лазерного излучения, поверхностные поляритоны.

Слово «чудо» используется в физике только в крайних случаях, когда сталкиваются с чем-то новым, удивительным и непонятным, к чему необходимо привлечь внимание коллег. Здесь, похоже, мы имеем дело как раз с таким случаем. В физике известно такое явление, как поверхностные волны (поляритоны) [1–3]. Длина пробега поляритонов квадратично уменьшается с длиной волны накачки, и в видимой области в исследованных образцах она не превышает 10 мкм. В жидкостях из-за большого затухания и в газах вследствие малой концентрации частиц поляритонное излучение не наблюдается.

И вдруг мы обнаруживаем, что в обычных мыльных пленках толщиной от 10 нм до 10 мкм (рис.1, 2) возбуждаемое специфическое поверхностное поляритонное излучение видимого диапазона распространяется на десятки сантиметров (вместо 10 мкм) и, что уж совсем странно, поляритоны в пленке самосжимаются и идут в ней, образуя прожилки, без какой-либо заметной расходимости в виде тонких субмикронных каналов (усов).

Вот это мы и называем чудом. Мыльные пленки имеют молекулярно-слоистую структуру, их внутренний слой толщиной менее 10 мкм всегда однороден, а на поверхности с обеих сторон лежит сплошной слой толщиной всего в одну молекулу из пространственно ориентированных перпендикулярно пленке полярных молекул мыла, образующих плотно упакованный кристаллический слой типа двумерного кристалла Лэнгмюра–Блоджетт (см., напр., [4, 5]). По мере стекания раствора толщина пленки уменьшается, и на ней в отраженном свете становятся видны интерференционные полосы, по количеству и цвету которых и определяют толщину пленки [4, 5]. При толщине менее 0.1 длины волны видимого света пленка становится черной, т. е. почти перестает отражать падающий на нее свет. Раствор из черной пленки вытекает до тех пор, пока два слоя молекул не образуют самую черную (ньютонскую) пленку, состоящую только из двух кристаллических слоев мыла общей толщиной

около 5 нм, т. е. в 100 раз меньше длины волны видимого света. По краям пленки, в месте ее контакта со стенками

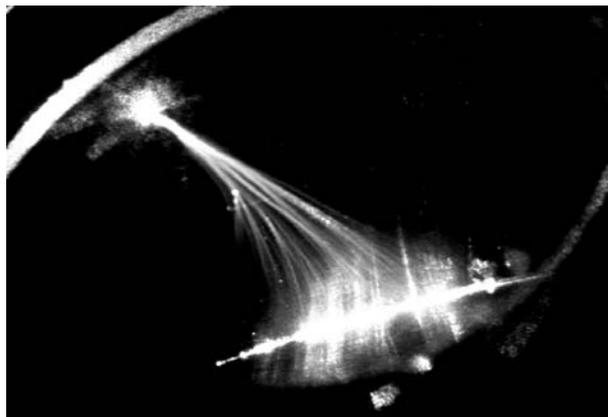


Рис.1. Вид треков (усов) поверхностного поляритонного излучения в мыльной пленке длиной 2.5 см и толщиной около 50 нм при фокусировке на край пленки излучения непрерывного He–Ne-лазера с $\lambda = 632.8$ нм и мощностью около 5 мВт сферической линзой с $f = 10$ см.

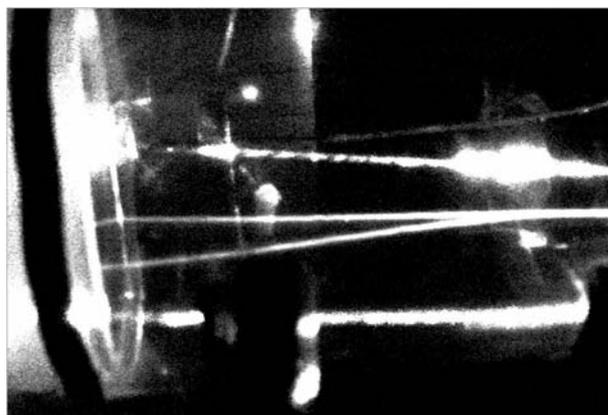


Рис.2. Вид треков (усов) поверхностного поляритонного излучения в мыльной пленке длиной 10 см и толщиной около 10 нм при фокусировке на край пленки излучения непрерывного He–Ne-лазера с $\lambda = 632.8$ нм; излучение входит справа и затем разветвляется на два трека.

или с другой пленкой, имеются утолщения (ребра), удерживающие пленку в натяжении. Для опытов подходит пленка из любого мыла и обычной воды из-под крана. В зависимости от состава, вязкости раствора и окружающей атмосферы пленка до разрыва «живет» от нескольких минут до нескольких недель и месяцев.

Усы в пленке возбуждаются лучом непрерывного или импульсного лазера любого цвета. Для контроля настройки удобнее брать лазер видимого диапазона: гелий-неоновый ($\lambda = 632.8$ нм), красный полупроводниковый (типа указки, 660–670 нм), на парах металлов (Cd, 441.6 нм), аргоновый лазер (514 и 488 нм) любой доступной мощности (10 мкВт–3 Вт). Лазерный луч и пленка совмещаются в одной плоскости, и линзой с $f = 3 - 10$ см луч фокусируется на торец (ребро) пленки. Толщина пленки постепенно изменяется на три порядка, но весьма интересные результаты получаются при любой толщине. При оптимальной настройке в пленку обычно входит менее 10 % лазерного излучения.

Лазерное излучение любого цвета в пленке от точки фокуса сразу разбивается на множество тонких (буквально субмикронных) треков (усов), которые не расширяются и без заметного уменьшения яркости распространяются по пленке иногда на десятки сантиметров. В свежей пленке усы ветвятся и десятки раз в секунду меняют направление. По виду это напоминает изломанные каналы не исчезающей молнии, бассейн реки с притоками или фантастическое ветвистое дерево. Усы имеют разную яркость, изломы, изгибы, они пересекаются, а в некоторых случаях разворачиваются на 180° .

Наиболее эффективно усы образуются при поляризации луча (вектор E) перпендикулярно пленке. При изменении плотности мощности лазеров на 9 порядков вид и характер поведения тонких усов не меняется. При встрече с пылинкой они рассыпаются веером на множество более мелких усов, и при этом какой-либо заметный порог их возбуждения отсутствует. В пленках из всех опробованных нами сортов мыла и водных растворов химически чистых поверхностно-активных веществ при всех возможных концентрациях картина распространения усов с небольшими вариациями практически одинакова. По мере старения пленок движение усов замедляется, они становятся менее ветвистыми и более прямыми.

Усы прижаты к поверхности плоской или изогнутой пленки. 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 мигающие полосы. Длина волны выходящего из усов излучения с точностью 0.001 нм совпадает с длиной волны падающего на пленку лазерного излучения. При наличии в растворе молекул красителя усы возбуждают флуоресценцию этих молекул и в этом случае дополнительно окрашиваются в ее цвет. В мутных пленках или пленках с поглотителями лазерного света (типа красителя или чернил), в объемных растворах которых лазерный луч поглощается на расстоянии около 1 см, усы поляритонного излучения возбуждаются и по мере уменьшения толщины пленок распространяются на расстояния, в 5–10 раз большие, чем при прохождении толстого слоя того же раствора. Как показали измерения углов преломления усов, в пленках толщиной 0.01–10 мкм показатель преломления для усов составляет 1–1.28, т. е. усы воспринимают пленки разной толщины как среды с

разными показателями преломления. В пленках толще 10 мкм и в желеобразных вязких пленках усы отсутствуют. Специфичность наблюдаемых поляритонов связана с наличием двух или трех близко расположенных поверхностей.

В случае перпендикулярной пленке поляризации луча на пленке любой толщины (вплоть до черной) можно получить усы при освещении не только сбоку, но и через поверхность пленки. Однако это возможно лишь при падении луча на пылинку под скользким углом, составляющим с поверхностью менее 10° . Если угол больше, усы в центре пленки не образуются.

Поляризация излучения накачки в пленке может меняться. Так, если сбоку под скользким углом менее 20° направить на свежеприготовленную ветриальную пленку сфокусированное лазерное излучение с вертикальной (параллельной пленке) поляризацией, то большая часть пучка (90 %–95 %) от пленки отражается и лишь 5 %–10 % проходит через нее. Треки усов спонтанно возникают только тогда, когда в области фокусировки на пленке оказывается случайная неровность или пылинка. При этом во время существования поляритонных усов интенсивность света, проходящего через пленку, увеличивается в несколько раз, а его поляризация при этом (в отличие от поляризации пучка накачки) оказывается перпендикулярной пленке.

В опытах с мыльным ребром (в месте контакта трех пленок) как с одномерным волноводом толщиной 1–0.01 мкм, засвечиваемым с торца, мы не видим отдельных усов, но характер поведения выходящего из ребра мигающего поля позволяет нам утверждать, что поляритоны рождаются в такой тонкой нитке раствора в течение многих суток ее жизни. Нить диаметром 0.1 мкм для объемных мод света является запертым волноводом, поэтому наблюдаемое прохождение по ней энергии могут обеспечить только специфические поверхностные поляритоны.

Теория поляритонного излучения на границе с молекулярно тонкими двумерными кристаллами и над гибкими двойными слоями из таких кристаллов еще не создана. Неоднородности, вызывающие отклонения усов на пленке, по-видимому, не превышают по размерам ее толщину. Это означает, что усы дают субмикронное (наноскопическое) разрешение неоднородностей в пленке.

Направление наиболее эффективной для возбуждения усов поляризации подсказывает возможный механизм их образования. В тонкой пленке лазерное излучение вызывает поляризацию длинных молекул мыла в обоих поверхностных слоях, и молекулы начинают интенсивно взаимодействовать друг с другом. Это взаимодействие (притяжение) при сближении усиливается (как лавинные каналы ионизации в молнии), приводя к образованию нанометровых усов. Такое разбиение поляритонов на узкие усы ранее ни в каких образцах не наблюдалось, оно вызвано особенностями структуры наших пленок и их нелинейными свойствами.

Как и ожидалось [8], высокая концентрация молекул красителей в тех же пленках позволяет при интенсивном возбуждении (532 нм, 20 мДж, 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 исследование взаимодействия генерируемого излучения с поверхностным поляритонным излучением. В

пленках без красителя при малых интенсивностях накачки (0.2 мДж) тонкие усы длиной 3–5 см хорошо видны при одиночном лазерном импульсе, т. е. время их образования меньше 10 нс. Динамику формирования, каналирования и перестройки направления усов предстоит изучить. Пленка с тонкими бегающими усами – это реальная модель мощного самоуправляемого оптического компьютера, постоянно вычисляющего и переключающего направления посылки своих усов.

Представляет также интерес исследование других жидких пленок (типа биолипидных) и создание прочных полимерных пленок с поверхностными полярными слоями, подобными слоям мыльной пленки, для поляритонной оптоволоконной техники. Как мы понимаем, отсутствие необходимого финансирования и интереса к этому явлению связано только с одним – с не лучшей для науки стадией эволюции диктата [9]. Препринт «Рецепт чуда» смотрите в Сети: <http://ellphi.lebedev.ru/2/Stoilov.pdf>, а

видеофильм эксперимента – по <http://ellphi.lebedev.ru/2/stoilov.wmv>, http://ellphi.lebedev.ru/2/stoilov_divx.avi.

1. *Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред.* Под ред. В.М.Аграновича, Д.Л.Милла (М.: Наука, 1985).
2. Виноградов Е.А. *УФН*, **172** (12), 1371 (2002).
3. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Способ получения поверхностных электромагнитных волн (поверхностных поляритонов)*. Заявка на патент № 20022132754 от 5 декабря 2002 г.
4. Dean D.S., Horgan R.R. *Phys. Rev. E*, **65**, 061603 (2002).
5. Casteletto V., Cantat I., Sarker D., Bausch R., Bonn D., Meunier J. *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 048302 (2003).
6. Sirota E.B., Pershan P.S., Sorensen L.B., Collett J. *Phys. Rev. A*, **36**, 2890 (1987).
7. Huibers P.D.T., Shah D.O. *Langmuir*, **13**, 5995 (1997).
8. Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю. *Квантовая электроника*, **32**, 463 (2002).
9. Кайтуков В.М. *Эволюция диктата* (М.: Урамос, 1991) (<http://www.philosophyevolution.com/index.htm>).