

ИГРА ЛАЗЕРНОГО ТРЕКА С РЕБРОМ В МЫЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ

А. В. Старцев, д. ф. - м. н., Ю. Ю. Стойлов, д. ф. - м. н., ФИАН им. П. Н. Лебедева, Москва

Поведение света при его распространении в толще вязкой пленки связано с механизмами светового давления, наномеханикой и фотоникой. Лазерный трек, взаимодействуя со структурой ребра жидкой пленки, проявляет необычные свойства. В статье на основе анализа экспериментальных результатов идет обсуждение этих вопросов.

Выдуйте мыльный пузырь и смотрите на него: вы можете заниматься всю жизнь его изучением, не переставая извлекать из него уроки физики.

Лорд Кельвин (1824–1907)

Игра? Взаимодействие лазерного трека с граничным ребром мыльной пленки можно ли назвать нехарактерным для физики термином – игрой? Если считать игрой деятельность, которая дает ее конкурирующим участникам возможность реализовать свои глубинные потаенные процессы (часто весьма озадачивающие сторонних наблюдателей и ускользающие от их понимания), то – да, мы озадачены и имеем непонятную игру трека с ребром в мыльной пленке. Но при всей игривости заголовка нас будет интересовать поиск базовых физических причин необычного поведения лазерного луча в мыльной пленке.

Ранее неоднократно отмечалась некоторая несуразность: лазерный трек, подходящий под скользящим углом к ребру, иногда без видимых причин полностью отражается от границы этого прозрачного расширения пленки [1]. Отражаются треки и от спускающейся по вертикальной пленке капли раствора. При всей ненормальности такого отражения в научной литературе пока не встречаются никакие подходы к решению этой проблемы. Высказывалось даже предположение, что по какой-то причине в ребре показатель преломления для трека оказывается меньше, чем в тонкой пленке, и поэтому на границе трек испытывает полное внутренне отражение. Как это проверить?

Для ответа надо знать величину показателя преломления для лазерного трека в ребре. Но на пути прямого определения показателя преломления из геометрического хода (траектории) светового луча в ребре пленки встает проблема. Она связана со схемой реализации эксперимента: светящийся трек, хорошо заметный в пленке при наблюдении сверху, при переходе в про-

зрачное ребро становится мало заметным. Экран для наблюдения выходящего из пленки света обычно расположен на значительном расстоянии от ребра, это затрудняет восстановление траектории светового луча в ребре.

Преодолеть указанные трудности помогает иная схема [2]. Для натягивания мыльной пленки на воздухе используется рамка в виде дуги радиусом 3 см из непрозрачной проволоки диаметром 0,2 мм. Ее концы надо соединить



Рис. 1. Пленка на дуге из проволоки: 1 – дуга из проволоки, 2 – тонкая нить (стрелка показывает место фокусировки лазерного луча)

тонкой нитью толщиной 20 мкм (рис. 1). Направляя лазерный пучок от указки мощностью 10 мВт (красный: $\lambda = 650$ нм; зеленый: $\lambda = 532$ нм) под небольшим углом к пленке, надо сфокусировать его вблизи ребра пленки у проволоки. В такой схеме лазерный трек выходит из пленки через ребро, оставляя одновременно с этим освещенное пятно на непрозрачной проволоке, как на экране. По положению линии, соединяющей конец трека, приходящийся на ребро, и освещенное им пятно, можно определить ход луча в ребре (рис. 2).

Оценка величины показателя преломления света в ребре, полученная таким образом, имеет разброс. Она показывает, что показатель преломления среды в ребре больше, чем в среде прилегающей тонкой пленки ($n \sim 1,2 \pm 0,1$). В таком случае, опираясь на законы геометрической оптики, мы не должны наблюдать полного отражения трека от ребра пленки. Но вопреки этому явление существует. При этом отражение трека от ребра получается каким-то не точечным, как от зеркала, а в виде заметно растянутой зоны отражения трека подобно дуге, расположенной вдоль ребра [1]. Это дает основания для предположения о существовании странностей в структуре ребра, которые дают треку возможность отразиться от него.

О сложном взаимно-нелинейном игровом взаимодействии трека с ребром пленки свидетельствуют и результаты более ранних опытов [3] по наблюдению расщепления одиночного трека при почти нормальном падении на выходное ребро устоявшейся пленки. Это расщепление (соответствующее количеству ярких полосок на экране) и его динамика показывают, что зона перехода из пленки в ребро как-то постоянно перестраивается. И в этой взаимной игре динамика границы проявляется в изменениях расщепления трека и, соответственно, в количестве ярких полосок на экране.

Еще более сложная динамика трансформации излучения треков на выходном ребре пленки продемонстрирована в кинофильме, снятом при опытах с пленкой на паутине (приложение к [2]). Не вызвана ли эта сложность слабой поддержкой ребра тонкой нитью? Таким образом, есть основания считать, что иногда проявляется непонятная динамика у границы ребра, но в то же время есть опыты, в которых такой нестабильности границы ребра пленки не видно [1].

Речь идет о некоторых особенностях, замеченных в ранее проведенных опытах по получению

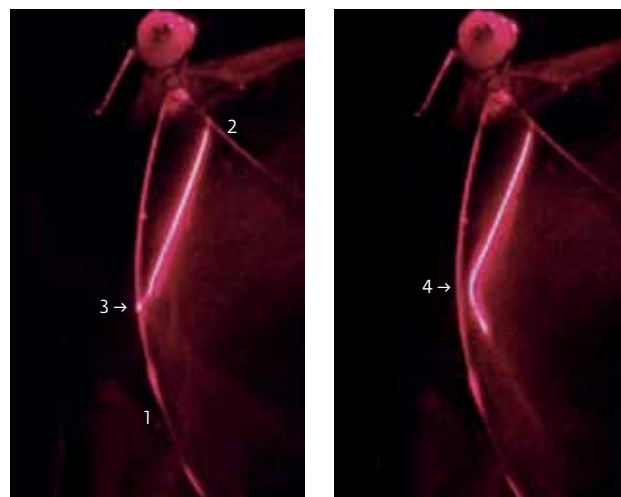


Рис. 2. Преломление трека в ребре и отражение трека от ребра: 1 – дуга из проволоки, 2 – тонкая нить, 3 – зона преломления трека в ребре, 4 – вид трека при отражении от ребра

одиночного лазерного трека в вязкой пленке [3]. Зафиксировано, что в пленке обычно образуется нестабильный пучок, состоящий из многих бегающих треков. Они распространяются прямо от точки фокусировки, когда сфокусированный лазерный луч вводится в пленку нормально к ребру. Но если сфокусированный лазерный луч вводить в пленку через ребро под скользящим углом 30–40° к линии его границы с пленкой, то в пленке почему-то удается получить стабильный одиночный трек, живущий часами и даже не претерпевающий расщепления на выходном ребре. Взаимодействие с ребром при этих двух способах ввода излучения, видимо, разное, что и обеспечивает существенно различаемый характер получаемых треков.

Ранее полученные результаты демонстрируют медленное обратимое изменение пленки у входного ребра под действием излучения накачки в вязкой пленке [4]. Однако зафиксировать похожую разницу в менее вязких пленках пока не удастся.

По преломлению треков на границе пленок разной толщины [5] можно сделать вывод, что в пленках большей толщины величина показателя преломления для светового пучка больше. Из-за небольшого утолщения пленки в области трека показатель преломления среды внутри самого трека тоже может быть немного больше, чем у граничащей с ним пленки. Величина этого превышения, вероятно, отражается в малой рас-

ходимости выходного излучения в плоскости пленки, которое в пересчете на излучение внутри трека составляет $\sim 0,005$ радиана [3]. При этом в возбуждающем сфокусированном лазерном излучении свет идет в конусе $\sim 0,04$ радиана, но в треках в плоскости пленки такого широкого конуса лучей нет, т. е. широкий угол лучей в треке в плоскости пленки не удерживается.

Если считать, что половину угла ($0,005$ радиан) отражает предельный угол полного внутреннего отражения от боковой границы трека, то относительный показатель преломления внутри трека по сравнению с соседней с ним пленкой составляет $\sim 1,000003$. Слабое предположение, но остается вопрос – дает ли это превышение в треке какой-то вклад в его взаимодействие с ребром при полном отражении трека от ребра?

Приведенные результаты показывают, что вводимое в пленку лазерное излучение имеет сложную и непонятную динамику взаимодействия треков с утолщением пленки, которое требует дополнительных догадок, предположений и исследований.

Попробуем взглянуть на эту проблему с иной стороны и попытаемся ответить на следующий вопрос: как может выглядеть свет лазерного луча после прохождения жидкого волновода с плоскими торцами? Можно ли ожидать каких-то особенностей от гибкости стенок волновода? В качестве жидкого волновода возьмем ребро, которое всегда образуется в месте контакта трех мыльных пленок. В нем свет идет как в настоящем волноводе с полным отражением от границ с воздухом (в отличие от ребра пленки на стенке).

Под микроскопом выходной торец (и сечение) этого волновода выглядит как треугольник (рис. 3). Поверхностное натяжение контактирующих с ним пленок растягивает этот волновод, снижая в нем давление. Это приводит к сбору, дренажу (вытягиванию) раствора в него из пленок. Снижение давления определяется как $D_p = 2s/d$, где $2s$ – это величина натяжения двух поверхностей удерживающей ребро пленки ($2s \approx 0,08$ Н/м), d – поперечный размер канала ($0,01$ – $0,02$ см). Тогда снижение давления составит 5 – 10 Г/см². Чем меньше d , тем с большей интенсивностью ребро собирает раствор из прилегающих пленок. Ребро по длине может быть прямым, а может быть изогнутым (рис. 4).

Из-за неоднородности собираемой в ребре жидкости можно ожидать, что лазерный свет после прохождения такого стабильного на вид волновода даст на экране серию крупных пятен, медленно меняющих свое положение из-за движения потоков раствора. Но динамика изменений реальной картины света на экране оказывается весьма подвижной. Широкая яркая область с ореолом вокруг нее, состоящая из большого количества мелких ярких пятнышек, которые (при любой интенсивности лазера) мигают с частотой до десятка появлений в секунду, быстро и непрерывно перемещаются по экрану во время жизни ребра (несколько часов) (рис. 4).

Это показывает, что в основном мигание вызвано не действием лазерного излучения, а далекой от стабильности динамикой поступления раствора в ребро. Раствор вытягивается из пленки, но не медленно и плавно по всей длине, как можно было бы предположить, глядя на спокойное ребро, а крайне неоднородно и интенсивно. Местами по длине ребра скорость поступления раствора уменьшается, одновременно увеличиваясь в других местах. Какая причина ведет к снижению скорости притока раствора? Пленка не успевает поставлять к ребру требуемый отводом поток раствора, и из-за сильного отсоса

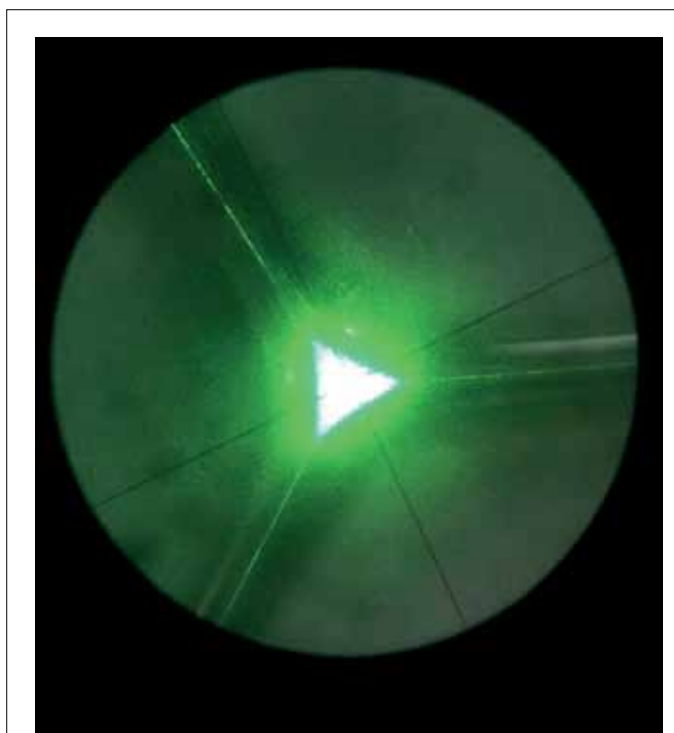


Рис. 3. Торец ребра между трех пленок (диаметр круга около 1 мм)

у ребра в пленке образуется локальное утончение, перетяжка, которая с приходом нового раствора может чуть расширяться и пульсировать.

Вес утонченного участка ребра меньше веса исходной пленки. В отраженном свете можно наблюдать, как локальный участок принимает округлый вид, под действием архимедовой силы отрывается от ребра и, как пузырек во вскипающей жидкости, уходит на верх пленки. На его место приходит более толстая исходная пленка, поставляющая новую порцию раствора в ребро. Если же ребро находится на самом вершине пленки, то тонкие участки не уходят, а собираются под ним и уменьшают скорость поступления в ребро от этой пленки по всей его длине. Но в ребро импульсами продолжает поступать раствор из пленок, которые расположены выше него.

Таким образом, пульсации связаны с гравитацией, из-за которой более легкие утонченные участки пленки всплывают. В условиях невесомости (при отсутствии гравитации) утонченные участки не будут отходить от ребра, поэтому динамика сбора раствора в ребро и динамика выходного пятна лазера на экране будет не такой подвижной.

Наличие утончения у ребра объясняет демонстрируемую лазером неожиданную сложную динамику выходного излучения на экране, но для нас важно другое: со стороны пленки утончение у ребра выглядит как оптический клин, в котором идущий под скользящим углом к ребру свет лазерных треков разворачивается и отражается [1]. В прозрачной пленке небольшой клин у ребра не виден. Однако на его наличие однозначно указывают динамика на экране светового пучка, выходящего из ребра, и характерная картина отражения треков растянутой дугой, а не в виде отражения от четкой границы.

Таким образом, обнаружение клина позволило решить давно не дававшую покоя загадку отражения и расщепления лазерных треков у ребра пленки. В вязкой пленке динамика раствора у ребра другая – замедленная, и исследование его особенного поведения у ребра требует отдельного рассмотрения.

Наличие клина позволило по-новому взглянуть и на отражение лазерных треков от спускающейся по вертикальной пленке капли того же раствора, из которого сделана и сама пленка [1].

Отражение показывает, что толстая капля на своей границе не делится своим содержанием с пленкой, как можно было бы интуитивно предположить, а интенсивно вытягивает раствор из граничащей с ней пленки, утончает ее и создает клин для отражения.

Лазерный свет в жидком волноводе открывает возможность изучения сложной динамики его структуры. Чувствительный микрофон, помещенный в волновод ребра, мог бы зафиксировать импульсы перепада давления в нем как постоянный дробовой шум, вызывающий световой шум света на экране. Интенсивность шума будет зависеть от динамики утончений и некоторого воздействия на нее давления введенного в ребро интенсивного лазерного света. Отметим, что для регистрации шелеста светового прибора, для уменьшения фонового шума от ребра необходимо будет рамку для пленки выполнять из нитей, меньшей толщины, чем сама пленка. Выполнение такого условия необходимо, чтобы исключить утолщение и возникновение шума от ребра при сборе раствора.

ВЫВОДЫ

1. Найден подход и решена загадка причины отражения трека от ребра. Ребро отражает свет из-за образуемого самим ребром клина в пленке перед ним.
2. С помощью лазерного пучка показано, что спокойное на вид ребро между трех пленок является крайне нестабильным дрожащим образованием, непрерывно меняющим свою форму, что открывает новую главу в изучении гидродинамики пленок и их ребер. Понятно, что отмеченное в треках давление интенсивного лазерного света может на эту гидродинамику влиять.

Изучение подробностей такого игрового взаимодействия света с ребром, как и гидродинамика образования треков под действием светового давления [3,6,7], требуют более детальной экспериментальной и теоре-

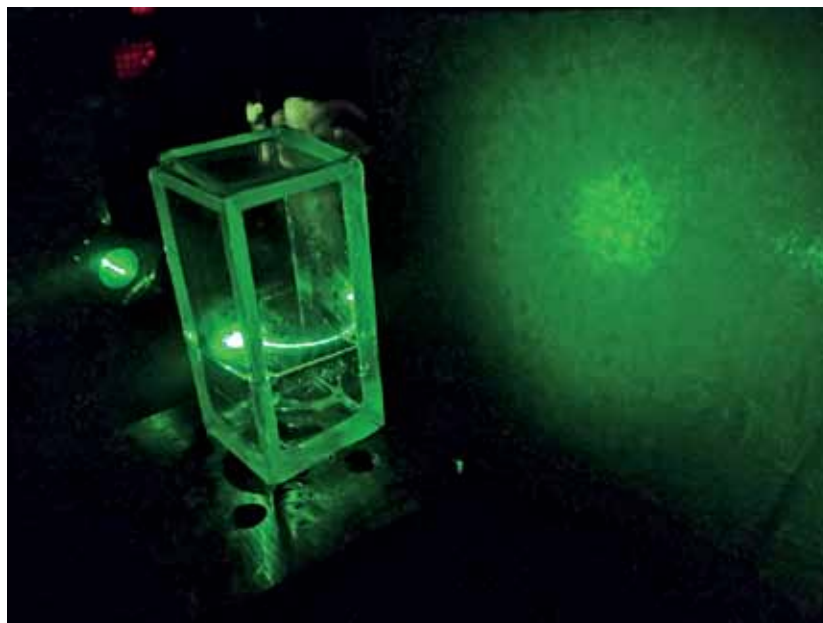


Рис. 4. Лазер фокусируется в четырехгранную кювету (2×2 см) с прозрачными стенками на входной торец изогнутого жидкого ребра между тремя пленками и, выходя, дает на экране мигающее шумовое пятно

тической проработки, что из-за сложностей проблемы и из-за эволюции диктата [8] пока лежит в стороне от заинтересованных исследователей и ждет соответствующего отклика в научных кругах. Надеемся, что сказанные более ста лет назад слова лорда Кельвина о мыльных пузырях останутся в силе и следующее столетие.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Стойлов Ю.Ю.** О странном отражении лазерных треков от прозрачного ребра жидкой пленки и о возможности управления ими. – Препринт ФИАН, 2015, № 11.
2. **Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю.** Мыльная пленка на паутине как объект оптических исследований. – Препринт ФИАН, 2016, № 10.
3. **Стойлов Ю.Ю.** Излучение лазерных треков в тонких пленках и потребность теоретического описания. – Препринт ФИАН, 2011, № 30.
4. **Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю.** Лазерные треки в желатиновой пленке. – Препринт ФИАН, 2014, № 2.
5. **Старцев А.В., Стойлов Ю.Ю.** Симфония оптических треков. – Препринт ФИАН, 2008, № 5.
6. **Стойлов Ю.Ю.** Механизм образования световых каналов в тонких пленках. – Фотоника, 2011, №№ 1, 2.
7. Эл. код доступна: http://www.astro.websib.ru/sites/default/files/userfiles/milo_plenka.pdf.
8. Эл. код доступна: http://philosophyevolution.com/main_ru.htm.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДИОДНЫХ ЛИНЕЕК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МОЩНЫХ ЛАЗЕРАХ

В Санкт-Петербурге с 4 по 8 июня состоялась конференция и выставка Laser Optics 2018 (ICLO2018)

В рамках данной выставки в различных подгруппах мы отметили для себя множество интересных докладов и презентаций, особенно в группе R1 и R2.

На выставке компания FEDAL представила свои популярные решения, такие как SF5xx – источник питания лазера, работающий в режиме CW/QCW. Наиболее популярен этот источник для применения в металлообработке (резке и сварке), а также и в других областях, в том числе и для лабораторных исследований.

Предпосылкой для создания прототипа и реализации данного направления лазерной электроники послужили обращения от наших заказчиков. Компаниям, занимающимся резкой по металлу и сваркой, потребовалось создание лазеров, работающих одновременно в импульсном и непрерывном режиме. Данная технология обусловлена спецификой резки металла, толщина которого достигает 16 мм.

Представители компании FEDAL также провели презентацию, в которой рассказали о преимуществах таких лазерных комплексов, созданных на основе наших источников питания, а именно: увеличение поглощения энергии в металлах; широкий диапазон параметров процесса; улучшенное качество и гладкость резки; увеличенная скорость обработки.

Источник питания лазера SF5xx, представленный в двух модификациях SF530 и SF550, предназначен для питания диодных линеек, используемых для накачки мощных твердотельных или волоконных лазеров. Основными производителями диодов, с которыми работает данный источник, являются компании BWT, Focusight, Dilas, Инжект и Laser II-VI. Представитель компании Laser II-VI также посетил конференцию, и мы смогли обсудить дальнейшее возможное сотрудничество благодаря нашим дистрибьюторам – компании "ОЭС Спецпоставка".

Мы отметили для себя высокий уровень подготовки мероприятия и качество презентаций и докладов, представленных на конференции. Также хотели бы поблагодарить организаторов выставки и конференции.

Мы отметили для себя высокий уровень подготовки мероприятия и качество презентаций и докладов, представленных на конференции. Также хотели бы поблагодарить организаторов выставки и конференции.

З. Павлова, FEDAL,
office@fedalel.com

