

- [3] Головашкин А.И., Екимов Е.В., Красно-
свободцев С.И., Печень Е.В. - Письма в ЖЭТФ,
1988, т. 47, в. 3, с. 157-159.
- [4] Ахсахалян А.Д., Гапонов С.В., Гусев С.А.,
Лучин В.И., Платонов Ю.Я., Салашен-
ко Н.Н. - ЖТФ, 1984, т. 54, в. 4, с. 755-762.
- [5] Дмитриев В.А., Баранов И.М., Ивано-
ва Н.Г., Морозенко Я.В. В сб.: Тезисы УП Кон-
ференции по процессам роста и синтеза полупроводниковых
кристаллов и пленок. 9-13 июня 1986 г., Новосибирск, т. 1,
с. 223-224.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
9 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 19 12 октября 1988 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ЖИДКОСТИ
СТРОБОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
С ПОМОЩЬЮ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА
С АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Э.С. Гулямова, Н.Н. Ильичев,
Д.Г. Кочиев, А.А. Малютин

Впервые описание явлений, происходящих при фокусировке мощно-
го лазерного излучения в жидкость, дано в работе Г.А. Аскарьяна и
др. [1]. С тех пор интерес к явлению оптического пробоя в жидкос-
тях проявлялся специалистами разных областей физики, механики,
акустики, медицины и биологии. И, хотя к настоящему времени про-
ведено большое количество исследований (по крайней мере качествен-
ных), даже такая существенная стадия явления, как образование и
динамика развития паро-газовой каверны [2-6], изучена недоста-
точно.

Наиболее удобным способом получения информации об указанной
стадии пробоя, использовавшимся целым рядом исследователей, яв-
ляется метод теневой кадровой скоростной фоторегистрации. При
этом, поскольку каверна существует до нескольких сот микросекунд,
детальное изучение ее динамики наталкивается на значительные
трудности. Например, при использовании скоростных фоторегистра-
торов, работающих в кадровом режиме, ограничения возникают либо
из-за большой длительности кадра в случае механических, либо из-
за их малого числа в случае электро-оптических систем. В режиме
же линейной развертки, если не отказываться от наблюдения явле-
ния в его полном объеме, для стробоскопической регистрации необ-

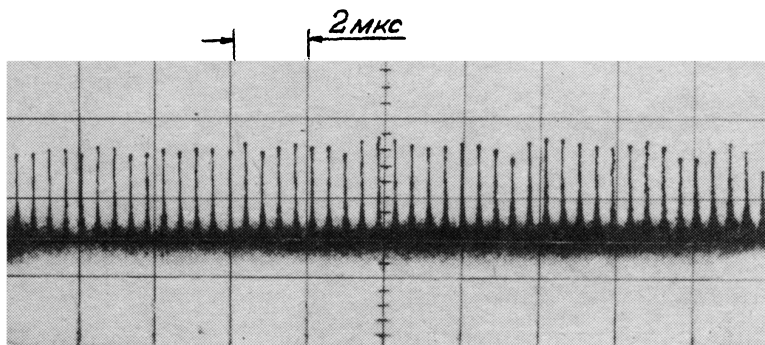


Рис. 1. Осциллограмма фрагмента импульса подсветки для стробоскопической регистрации.

ходимы специальные источники подсветки, обладающие одновременно высокой яркостью и способностью излучать короткие импульсы в течение длительного (до 100 мкс и более) времени и с высокой скважностью. Такими источниками являются лазеры с синхронизацией мод (СМ). Впервые возможность применения таких лазеров для стробоскопической кадровой регистрации несамосветящихся объектов была продемонстрирована в [7].

В настоящей работе исследовался оптический пробой в воде, для создания которого применялся лазер на неодимовом стекле (длина волны 1.055 мкм) с длительностью импульса 10 нс и энергией излучения около 15 мДж. Теневая кадровая стробоскопическая регистрация осуществлялась камерой ВФУ-1, работающей в режиме линейной развертки при скорости 40 тыс. об./мин.

Частота следования и длительность кадров определялась параметрами подсветки, для которой использовался лазер на неодимовом стекле с активной СМ [8]. Параметры импульсов подсветки были следующими: длительность отдельного импульса (длительность кадра регистрации) 3–5 нс, период следования импульсов 430 нс (т.е. частота кадров более 2 МГц), полная длительность цуга импульсов до 100 мкс (для обеспечения столь большой длительности цуга коротких импульсов в схему управления активной СМ была введена отрицательная обратная связь [8]). Для удобства наблюдения и фотографической регистрации излучение лазера подсветки было преобразовано в излучение второй гармоники 0.53 мкм. Осциллограмма импульсов подсветки приведена на рис. 1. Синхронизация работы обоих лазеров производилась от пульта управления камеры ВФУ-1.

Оптическая схема эксперимента показана на рис. 2,а. Излучение, инициирующее пробой (1), направлялось в кювету с водой (4) с помощью призмы (2) и фокусировалось ($F = 2.5$ см) линзой (3), оптическая ось которой располагалась вертикально. Последним до-

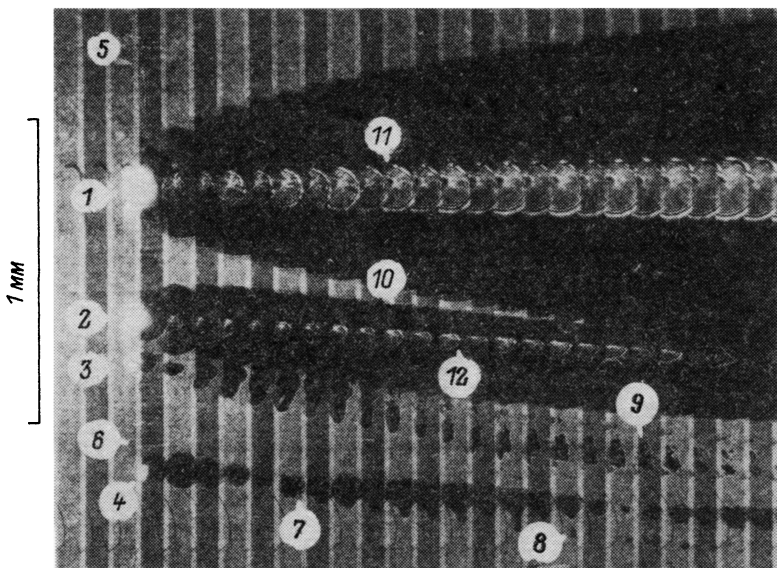
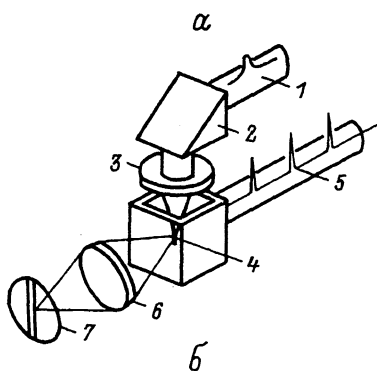


Рис. 2. Схема теневой регистрации пробоя в жидкости стробоскопическим методом (а) и фрагмент фоторегистрограммы (б). Обозначения в тексте.

стигалось согласование ориентации оси пробоя, отображаемого с увеличением линзой (6), и входной щели (7) камеры ВФУ-1. Излучение лазера подсветки (5) через кювету с жидкостью направлялось по оси линзы (6). Ширина входной щели (7) определяла размер кадра регистрации в направлении развертки камеры.

В наших экспериментах энергии излучения лазера ≈ 15 мДж, как правило, было недостаточно для создания устойчивого пробоя в чистых жидкостях. Как единичные, так и множественные пробои

возникали лишь по мере естественного (из атмосферного воздуха) или искусственного загрязнения вещества в кювете. Протяженность области пробоев и разброс их положения вдоль оси фокусирующей линзы, несмотря на принятые меры по укорочению каустики (использование короткофокусной линзы и увеличение диаметра лазерного пучка), удалось снизить только примерно до 1 мм.

Поскольку в экспериментах образование пробоя было однозначно связано с его инициированием на взвешенных в жидкости примесях („тепловой взрыв“), размеры которых и статистика появления в каустике лазерного пучка неуправляемы, наблюдение одиночных пробоев позволило получить лишь ограниченную информацию. При этом не было обнаружено корреляции между максимальными размерами образующейся паро-газовой каверны и энергией лазерного излучения, инициирующего пробой, что естественно при случайных размерах частиц и малости их размера по сравнению с диаметром каустики. Степень сферичности каверны при одиночных пробоях на всех стадиях (при расширении и схлопывании) была высокой. Динамика осцилляций в целом следует формуле Виллиса [9]. Измеренные скорости фронта ударной волны, сопровождающей образование пробоя, превышают скорость звука в невозмущенной среде в среднем в 1.5–2 раза, что соответствует давлению во фронте до 7–15 кБар. Надежных измерений скорости ударной волны, сопровождающей схлопывание каверны, провести не удалось.

Наиболее часто в экспериментах наблюдались случаи множественного пробоя, фрагмент теневой фоторегистрограммы одного из которых приведен на рис. 2,б. На рисунке показана только начальная стадия развития каверны (26 кадров, разделенных светлыми зонами, отвечающими областям перекрытия кадров). Видны четыре области свечения плазмы (1–4), отличающиеся размером. Для двух наиболее интенсивных из них виден фронт ударной волны (5–6), сформировавшейся в момент пробоя. Каждой точке пробоя соответствует образование паро-газовой каверны.

Динамика осцилляций каверн определяется начальными условиями – энергией теплового взрыва. В обычных условиях (в случае одиночного пробоя) период колебаний размера каверн убывает со временем. При множественном пробое каждая из каверн оказывает воздействие на соседние (в частности, через ударную волну). С этой точки зрения наиболее интересным является поведение каверн (3, 4), внутренняя энергия которых, по-видимому, сравнима с энергией возмущения ударной волной. При этом наблюдается, во-первых, нарушение регулярности колебаний: первый период для (4), как видно, оказывается короче, чем второй. Во-вторых, каверны приобретают импульс движения в направлении распространения ударной волны: в начальный момент времени (первые 2–3 мкс) каверны движутся со скоростью 70 м/с (3) и 11 м/с (4). В-третьих, происходит возмущение их формы (4, 7) настолько сильное, что возможен как отрыв микрокаверны (8), так и ее полное разрушение (3, 9).

Динамика колебаний более крупных каверн (1, 2), испытавших воздействие ударной волны от соответственно более слабых микро-

взрывов, также претерпевает изменения. Так, для (1) наблюдается нарушение сферичности, проявляющееся в асимметрии формы пятна рефрагированного каверной зондирующего излучения (11). Каверна (2), занимающая промежуточное положение, испытывает как изменения формы, так и смещение центра тяжести (10, 12). Последнее может быть результатом действия не только ударной волны, но и потока жидкости, сопровождающего расширение каверн.

В заключение отметим, что стробоскопическое наблюдение множественных оптических пробоев в жидкостях, несмотря на кажущуюся сложность, представляет удобный метод исследования гидродинамических явлений.

Л и т е р а т у р а

- [1] А с к а р ь я н Г.А., П р о х о р о в А.М., Ч а н т у р и я Г.Ф., Ш и п у л о Г.П. - ЖЭТФ, 1963, т. 44, в. 6, с. 2180-2183.
- [2] Б у з у к о в А.А., П о п о в Ю.А., Т е с л е н к о В.С. - ПМТФ, 1969, № 5, с. 17-24.
- [3] Т е с л е н к о В.С. - ПМТФ, 1976, № 4, с. 109-117.
- [4] Г о л у б н и ч и й П.И., Д я д ю ш к и н П.И., К а л ю ж н ы й Г.С., К о р ч и к о в С.Д., К у д л е н к о В.Г. - ПМТФ, 1979, № 5, с. 103-106.
- [5] Д р е й д е н Г.В., О с т р о в с к и й Ю.Н., Э т и н - б е р г М.И. - Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, в. 11, с. 669-675.
- [6] Е г е р е в С.В., П а ш и н А.Е. - ЖТФ, 1981, т. 51, вып. 1, с. 226-228.
- [7] К о р о б к и н V.V., М а л у т и н А.А., S c h e l e v M.Ya. In: Proc. of the 9th ICHSP. SMPTE, NY, 1970, p. 232-236.
- [8] Г у л ь я м о в а Э.С., И л ь и ч е в Н.Н., М а л ю т и н А.А., П а ш и н и н П.П. - Препринт ИОФАН. М., 1984, № 262, с. 15.
- [9] К о у л Р. Подводные взрывы. М.: ИЛ., 1950.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
10 мая 1988 г.