

Генерация электрического сигнала при взаимодействии излучения HF-лазера с донной поверхностью столба воды

С.Н.Андреев, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, П.П.Пашинин, К.Н.Фирсов

Экспериментально исследована генерация электрического сигнала (ЭС) при взаимодействии импульса нецепного электропроводящего HF-лазера с донной поверхностью столба воды. Обнаружено, что на амплитуду ЭС влияют присутствующие в исследуемой системе тонкие водные пленки (водные контакты), которые подвергаются механическому воздействию в процессе иницированного лазером перемещения столба воды. Наблюдалось приблизительно десятикратное увеличение амплитуды ЭС при появлении водной пленки в зазоре между торцом кюветы с водой и поверхностью кварцевой пластины, закрывающей кювету и контактирующей с верхней границей столба, по сравнению со случаем, когда эта граница была свободной. На качественном уровне обсуждаются возможные причины влияния тонкой водной пленки на характеристики ЭС, а также механизм образования второго пика ЭС при схлопывании паровой полости, образующейся в результате объемного взрывного вскипания воды под действием лазерного излучения.

Ключевые слова: электрический сигнал, вода, разделение зарядов, паровая полость, объемное взрывное вскипание, лазерное излучение.

1. Введение

Эффект генерации электрического сигнала (ЭС) при облучении поверхности воды импульсным ИК лазером (длина волны $\lambda = 2.92$ мкм, длительность импульса на половине высоты $\tau = 150$ нс, энергия в импульсе $E \approx 10$ мДж) с плотностью потока излучения ниже порога плазмообразования был обнаружен в работе [1]. Авторы [1] предположили, что ЭС генерируется в результате увеличения степени диссоциации воды в тонком (~ 1 мкм) перегретом поверхностном слое воды, подвергаемом облучению, и разделения зарядов в этом слое в условиях градиента температуры из-за разности скоростей диффузии ионов H^+ и OH^- . В работах [2, 3] эффект генерирования ЭС исследовался с применением мощных импульсных HF- и CO_2 -лазеров. Были зарегистрированы ЭС с амплитудами более 15 В при облучении как открытой (свободной) поверхности воды, так и поверхности, находящейся в контакте с прозрачной для ИК излучения пластиной («зажатая» поверхность). Исследования [2, 3] позволили однозначно связать генерирование ЭС с объемным взрывным вскипанием воды, сопровождающимся образованием паровой полости с разноименно заряженными границами.

В работе [4] на основе предположения [1] о механизме генерирования ЭС развита математическая модель разделения зарядов при воздействии HF-лазера на «зажатую» поверхность воды. В этой модели учитывались процессы диффузионного разделения зарядов при нагреве тонкого приповерхностного водного слоя и объемного взрывного вскипания воды с возникновением плоской паровой по-

лости, границы которой разноименно заряжены. Из расчетов [4] следует, что разность потенциалов на границах паровой полости должна вносить определяющий вклад в величину регистрируемого ЭС. На качественном уровне результаты этого моделирования согласуются с экспериментальными результатами [2, 3]. В работе [5] исследовано генерирование ЭС при взаимодействии излучения импульсного HF-лазера с донной поверхностью водного столба, причем поверхность, противоположная облучаемой (в отличие от [2, 3]), оставалась свободной. Была обнаружена выраженная двухпиковая временная структура ЭС с интервалом между пиками, линейно зависящим от энергии лазерного излучения и более чем на порядок превышающим время, в течение которого давление в паровой полости, образуемой при объемном взрывном вскипании воды, превосходит атмосферное. Установлено, что второй пик ЭС генерируется в момент схлопывания паровой полости, а большой временной интервал между пиками (соответственно, и большое время существования паровой полости после уменьшения давления в ней до атмосферного) определяется инерцией движения водного столба, набравшего скорость в начальной фазе расширения паровой полости.

В [5] отмечено, что изменение условий облучения, а именно, появление свободной поверхности водного столба, противоположной облучаемой (в отличие от [2, 3], где обе границы столба были «зажатыми»), привело к уменьшению амплитуды ЭС более чем на порядок. Предварительные эксперименты, проведенные нами [6], показали, что на амплитуду ЭС может влиять тонкая водная пленка, образующаяся между поверхностью окна, через которое вводится излучение лазера, и торцом заполняемой водой ячейки при герметизации последней. Целью настоящей работы являлось подробное экспериментальное исследование роли тонких водных пленок в формировании ЭС при взаимодействии излучения импульсного HF-лазера с «зажатой» поверхностью воды.

С.Н.Андреев, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, П.П.Пашинин, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: k_firsov@rambler.ru

Поступила в редакцию 27 июня 2010 г.

2. Экспериментальная установка и методика экспериментов

В экспериментах использовалась дистиллированная вода, имевшая при температуре 20°C удельное сопротивление $\rho \approx 10 \text{ МОМ} \cdot \text{см}$. Схема эксперимента приведена на рис.1. Вода наливалась в кювету, представлявшую собой вертикально расположенный отрезок трубки из плавленного кварца, к нижнему торцу которой была приварена плоскопараллельная пластина из кварца марки КИ. Внутренний и внешний диаметры трубки составляли 37 и 42 мм, длина – 50 мм. В большей части экспериментов кювета заполнялась водой до верхнего края, т. е. высота водного столба составляла 50 мм, если это специально не оговорено в тексте. Излучение нецепоного электролразрядного HF-лазера вводилось в кювету снизу, что позволяло реализовать условия взаимодействия с «зажатой» поверхностью воды. Распределение плотности энергии лазерного излучения W по радиусу пятна фокусировки r на поверхности изучаемого объекта, как и в [5], с достаточной точностью могло быть аппроксимировано гауссовой зависимостью: $W(r) = W_0 \exp(-r^2/a^2)$ при $a = 8.5 \text{ мм}$. Спектральной селекцией излучения HF-лазера не проводилось, спектр генерации представлял собой совокупность линий различной интенсивности в диапазоне длин волн от 2.7 до 3.1 мкм [5]. Длительность лазерного импульса по полувысоте (τ) и максимальная энергия излучения (E) на поверхности воды за входным окном составляли соответственно 140 нс и 1.3 Дж. Отметим, что максимальная плотность энергии лазерного излучения на поверхности ($W = 0.57 \text{ Дж/см}^2$) была

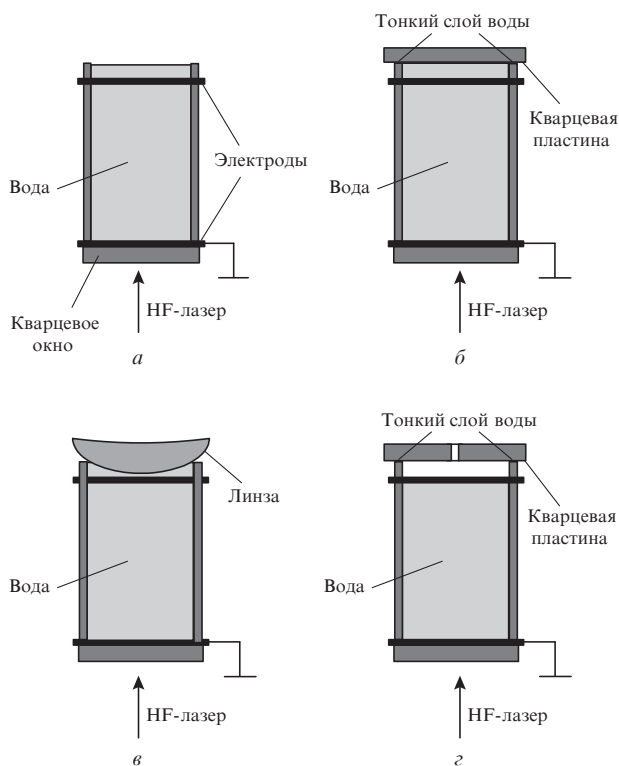


Рис.1. Схемы эксперимента: верхняя граница водного столба свободна (а); «зажатая» верхняя граница водного столба, между торцом кюветы и поверхностью кварцевой пластины присутствует тонкий слой воды (б); кювета накрыта линзой, которая выпуклой поверхностью контактирует со всей верхней границей водного столба (в); верхняя граница водного столба свободна, но между торцом кюветы и поверхностью столба есть водный контакт (з).

значительно ниже порога плазмообразования. ЭС снижался с кольцевых электродов шириной 3 мм, огибающих кварцевую трубку по линии ее сварки с входным окном снизу (заземленный электрод) и по верхнему краю, и подавался на осциллограф через повторитель напряжения (аналогично, как в [2, 3, 5]).

В первом варианте эксперимента (рис.1,а) верхняя граница водного столба, как и в экспериментах [5], была свободной. Во втором варианте (рис.1,б) кювета с водой накрывалась плоскопараллельной пластиной из плавленного кварца таким образом, чтобы нижняя поверхность пластины контактировала с поверхностью водного столба. При этом между торцом ячейки и поверхностью пластины появляется тонкий слой воды (водный контакт). В третьем варианте (рис.1,в) плоскопараллельная пластина заменялась сферической линзой, чтобы обеспечить минимальную площадь водного контакта между линзой и торцом ячейки. В этом случае тонкие водные слои между элементами конструкции исследуемой системы практически отсутствуют. В четвертом варианте (рис.1,з) кювета накрывалась плоскопараллельной кварцевой пластиной с отверстием диаметром 4 мм в центре. Отверстие давало возможность производить отбор части воды из закрытой кюветы таким образом, чтобы водный столб перестал контактировать с пластиной, но сохранился водный контакт в зазоре между поверхностью пластины и торцом кюветы.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.2 представлены осциллограммы ЭС при энергии излучения лазера $E \approx 0.9 \text{ Дж}$, снятые в различных экспериментальных условиях. Осциллограмма на рис.2,а получена в схеме, показанной на рис.1,а. ЭС на этой осциллограмме несущественно отличается от сигнала, измеренного в тех же условиях в [5]. Он имеет характерную двухпиковую структуру, временной интервал между пиками определяется временем инерционного перемещения водного столба, разгоняющегося в начальной фазе воздействия лазерного импульса на донную поверхность за счет расширения паровой полости, которая образуется вследствие объемного взрывного вскипания воды в придонной области. Второй пик ЭС регистрируется в момент схлопывания паровой полости при возвратном движении водного столба [5]. Вопрос о механизме генерации этого пика (и ряда последующих пиков, воспроизводимых не в каждом импульсе [5]) в настоящее время остается открытым. Вероятно, данное явление можно связывать со скачком температуры воды, сопутствующим кавитационным процессам (см., например, [7] и ссылки в ней), в результате чего увеличивается степень диссоциации воды и происходит повторное диффузионное разделение зарядов (по аналогии с [1, 4]).

На рис.2,б приведена осциллограмма ЭС, полученная в схеме, соответствующей рис.1,б. Видно, что при изменении условий эксперимента двухпиковая временная структура сигнала сохранилась, но амплитуды пиков увеличились практически на порядок. Значительно выросло также время τ_1 , в течение которого первый пик ЭС достигает максимума. В варианте свободной верхней границы водного столба $\tau_1 \approx 23 \text{ мкс}$, в варианте «зажатой» – $\tau_1 \approx 65 \text{ мкс}$. Условия экспериментов в схемах на рис.1,а и 1,б отличаются лишь наличием водного контакта между торцом кюветы

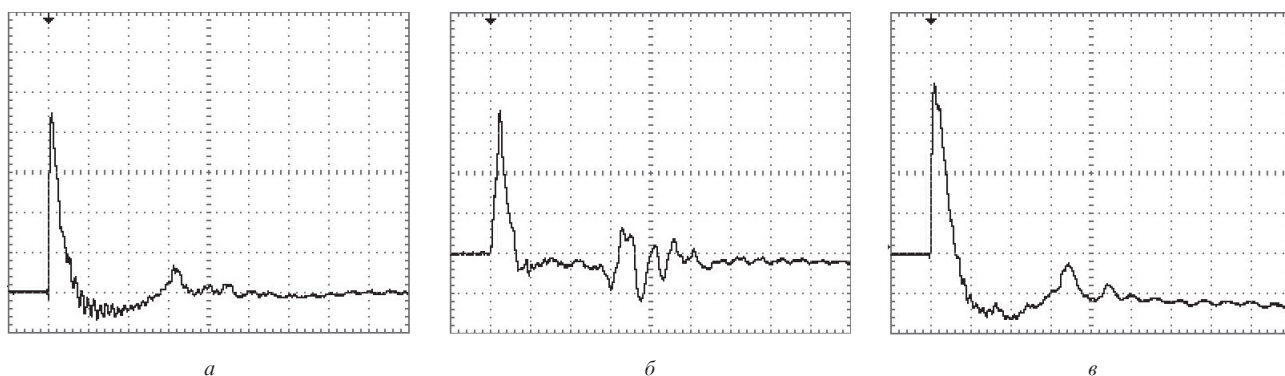


Рис.2. Осциллограммы ЭС, полученные в схемах эксперимента рис.1,*a–v* соответственно. Чувствительность осциллографа 50 мВ/дел. (*a, v*) и 500 мВ/дел. (*б*). Развертка 250 мкс/дел.

ты и нижней гранью кварцевой пластины. Поэтому можно полагать, что именно присутствие тонкого водного слоя, подвергающегося механическому воздействию (растяжению и сжатию) в процессе инициированного лазерным импульсом перемещения столба воды, и является основной причиной увеличения амплитуды ЭС на рис.2,*б* по сравнению с рис.2,*а*. В пользу данного предположения свидетельствуют также результаты эксперимента, проведенного в соответствии со схемой на рис.1,*в*, в которой водный контакт между торцом кюветы и выпуклой поверхностью закрывающей кювету линзы отсутствует, хотя столб воды контактирует с линзой по всей его верхней границе, определяемой внутренним диаметром кюветы. Осциллограмма ЭС для этого случая приведена на рис.2,*в*. Амплитуда и временная структура ЭС незначительно отличаются от таковых, полученных в условиях свободной верхней границы водного столба (осциллограмма на рис.2,*а*).

На рис.3,*а* приведена осциллограмма ЭС, полученная в схеме рис.1,*г* при той же энергии лазерного излучения $E \approx 0.9$ Дж. В данном эксперименте через отверстие в кварцевой пластине, закрывающей кювету, было отобрано приблизительно 4 мм воды, и, соответственно, высота водного столба составляла 46 мм. На рис.3,*б* представлена для сравнения осциллограмма ЭС, полученная при такой же высоте водного столба в открытой кювете. Снижение амплитуды ЭС по сравнению с показанной на рис.2,*а* обусловлено уменьшением высоты столба (из-за уменьшения емкостной связи между электродом и зоной, в которой генерируется ЭС [5]). Из осциллограмм на рис.3,*а* и 3,*б* видно, что присутствие водной пленки в зазоре между

торцом кюветы и кварцевой пластиной хотя и приводит к искажению ЭС (вероятно, из-за того что при отборе воды через отверстие в пластине не удастся полностью избавиться от водной пленки на стенках кюветы), но его амплитуда (по отношению к амплитуде в условиях свободной верхней границы водного столба) изменяется значительно меньше, чем при полном контакте поверхности столба с пластиной, закрывающей кювету. Следовательно, основной вклад в увеличение амплитуды сигнала в схеме эксперимента на рис.1,*б* по отношению к амплитуде в схеме на рис.1,*а* вносит механическое воздействие водного столба на кварцевую пластину и через нее на тонкий водный слой, присутствующий в зазоре между торцом кюветы и нижней поверхностью пластины.

На рис.4,*а* и 4,*б* приведены осциллограммы первого пика ЭС соответственно для схем экспериментов на рис.1,*а* и 1,*б*, полученные при одинаковой чувствительности осциллографа на развертке 5 мкс/дел. Электрический шум на сигналах вызван включением разрядников системы накачки лазера. Лазерный импульс генерируется с задержкой примерно 150 нс относительно начала второго шумового импульса. Из рис.4 видно, что после воздействия на воду лазерного импульса ЭС в течение времени до 14 мкс в обеих схемах отличаются незначительно, а затем скорость роста сигнала в схеме с тонкой водной пленкой резко увеличивается. Данный временной интервал (14 мкс) приблизительно соответствует времени, которое необходимо для выхода на верхний край кюветы звуковой волны, распространяющейся по поверхности кварцевой трубки (скорость волны $v = 3411$ м/с [8]). Звуковая волна, распространяющаяся в воде, достигает верхней границы

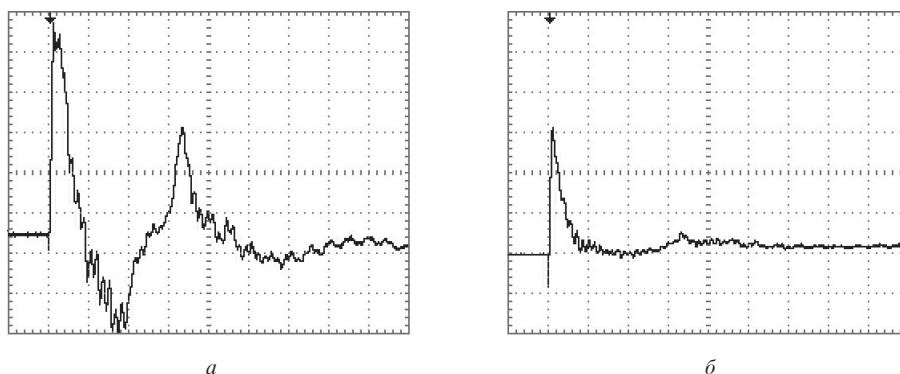


Рис.3. Осциллограммы ЭС, полученные при условиях: свободная верхняя граница водного столба, присутствует водный контакт между торцом ячейки и поверхностью закрывающей ячейку пластины (*а*); свободная поверхность, водный контакт отсутствует (*б*). Развертка 250 мкс/дел., чувствительность осциллографа 50 мВ/дел., высота водного столба 46 мм.

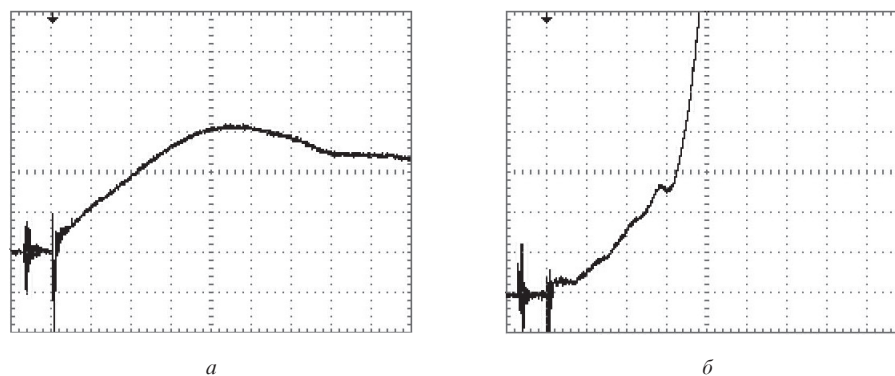


Рис.4. Осциллограммы первого пика ЭС в случае свободной верхней границы водного столба (а) и «зажатой» верхней границы водного столба, когда между торцом кюветы и поверхностью кварцевой пластины присутствует тонкий слой воды (б). Развертка 5 мкс/дел., чувствительность осциллографа 50 мВ/дел.

столба приблизительно через 34 мкс, что также отражается на осциллограмме ЭС (на рис.4,б изменений осциллограммы, вызванных этой звуковой волной, не видно из-за ухода сигнала за пределы экрана). Таким образом, в случае, когда в схеме присутствует тонкий водный слой, лишь начальный участок ЭС может определяться диффузионным разделением зарядов и образованием в результате объемного взрывного вскипания воды расширяющейся паровой полости с разноименно заряженными границами. Основной рост ЭС происходит вследствие механического нагружения тонкой водной пленки.

На качественном уровне влияние тонкой водной пленки на параметры генерируемого ЭС, по-видимому, можно объяснить следующим образом. В процессе инерционного перемещения водного столба, набравшего скорость на начальной стадии расширения паровой полости, тонкий водный слой подвергается растяжению и сжатию, в результате чего изменяется площадь водного контакта между верхним торцом кюветы и поверхностью пластины. Вследствие этого изменяется и энергия поверхностного натяжения, что должно приводить к скачку потенциала [9] и, соответственно, к дополнительному генерированию ЭС по сравнению со случаем свободной верхней границы водного столба.

На рис.5 приведена зависимость амплитуды первого пика ЭС от энергии лазерного излучения на поверхности

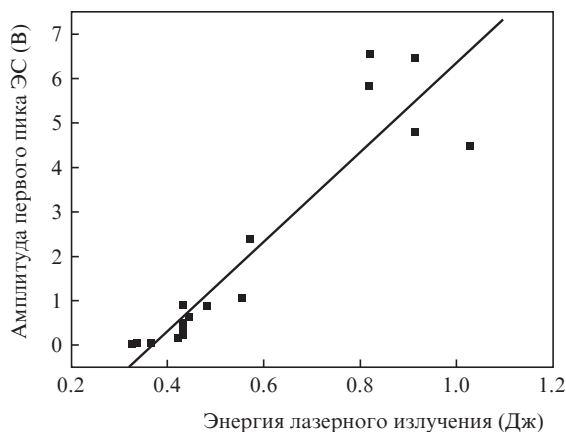


Рис.5. Зависимость амплитуды первого пика ЭС от энергии лазерного излучения для случая «зажатой» верхней границы водного столба и водного контакта между торцом ячейки и поверхностью закрывающей ячейку пластины.

воды при наличии водного контакта между торцом кюветы и поверхностью пластины, закрывающей кювету (условия эксперимента соответствуют схеме на рис.1,б). Видна общая тенденция роста амплитуды сигнала с увеличением энергии излучения, однако наблюдается большой разброс точек, что, вероятно, обусловлено изменением толщины водного контакта от выстрела к выстрелу, а также неконтролируемым присутствием капель воды на линии контакта с наружной стороны кюветы.

4. Заключение

Экспериментально исследована генерация ЭС при взаимодействии излучения импульсного HF-лазера с донной поверхностью столба воды. Установлено, что на амплитуду ЭС влияют присутствующие в исследуемой системе тонкие водные пленки, подвергающиеся механическому воздействию (растяжению и сжатию) в процессе инициированного лазерным импульсом перемещения водного столба. Регистрировалось приблизительно десятикратное увеличение амплитуды ЭС в присутствии водной пленки (водного контакта) между торцом ячейки и поверхностью плоскопараллельной кварцевой пластины, закрывающей ячейку с водой и контактирующей с верхней границей водного столба, по сравнению со случаем свободной верхней границы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №09-02-00581).

1. Ильичев Н.Н., Кулевский Л.А., Пашинин П.П. *Квантовая электроника*, **35** (10), 959 (2005).
2. Andreev S.N., Il'ichev N.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kulevsky L.A., Pashinin P.P. *Laser Phys.*, **17**, 1041 (2007).
3. Andreev S.N., Il'ichev N.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kulevsky L.A., Pashinin P.P. *Abstr. Conf. ICONO-LAT 2007* (Minsk, 2007, LO2-15, p. 40).
4. Андреев С.Н., Кулевский Л.А. *Прикладная физика*, № 4, 30 (2008).
5. Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Пашинин П.П., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **39**, 179 (2009).
6. Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Pashinin P.P. *VI Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology PPPT-6* (Minsk, 2009, Contributed papers, II, p. 417).
7. Маргулис М.А. *УФН*, **170**, № 3, 263 (2000).
8. *Физические величины. Справочник под ред. И.С.Григорьева и Е.З.Мейлихова* (М.: Энергоатомиздат, 1991).
9. Салем Р.Р. *Теория двойного электрического слоя* (М.: Физматлит, 2003).