УДК 535:621.373.826:539

ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПРОБОЕ МОРСКОЙ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

© 2020 г. А. В. Буланов^{1,*}, Е. В. Соседко¹

Представлено академиком РАН В.А Акуличевым 9.10.2019 г. Поступило 20.12.2019 г. После доработки 16.01.2020 г. Принято к публикации 19.01.2020 г.

Проведены исследования оптоакустических эффектов, сопровождающих лазерный пробой в воде, генерируемый сфокусированным лазерным и ультразвуковым излучением. Впервые получены экспериментальные результаты, показывающие резко усиливающиеся эффекты акустической эмиссии из зоны пробоя при совместном воздействии лазерного и ультразвукового облучения. Эксперименты проводились с использованием наносекудных импульсов от Nd:YAG-лазера с длиной волны 532 нм. Акустическое излучение создавалось акустическими фокусирующими системами на различных частотах. Показано, что метод регистрации акустической эмиссии из зоны пробоя позволяет исследовать пороги и динамику лазерного пробоя, которые согласуются с высокоскоростными оптическими методами. Полученные результаты позволяют найти применения акустического способа диагностики лазерного пробоя и кавитации в непрозрачных средах, где оптические методы неприменимы. Установлен эффект увеличения разрешающей способности спектральных линий химических элементов в морской воде при воздействии ультразвукового поля. Последнее свидетельствует о возможности создания комбинированного метода лазерно-искровой спектроскопии с применением ультразвука, который позволит приблизиться по чувствительности к анализу прецизионными химическими методами, но благодаря оперативности и высокой детальности измерений новый метод может стать более практичным и перспективным.

Ключевые слова: лазерный индуцированный пробой, ультразвук

DOI: 10.31857/S2686739720030020

Создание новых методов, позволяющих изучать элементный состав конденсированных сред, включающих как растворенные вещества, так и взвеси различного масштаба, составляет научную проблему, которая является актуальной для изучения структуры сложных по составу конденсированных сред. Ярким примером конденсированной среды, в которой присутствуют различные неоднородности и растворенные вещества, является морская вода. Анализ состава морской воды на практике проводится традиционными химическими методами анализа, сопровождаемого трудоемким и дорогостоящим процессом отбора проб в море. Возникла настоятельная необходимость в разработке новых методов, оперативных во времени и позволяющих реализовать высокую детальность измерений в пространстве. В последнее время появились новые оптические методы на основе лазерно-искровой спектроскопии (ЛИС) измерения содержания химических веществ в морской воде, которые позволяют оперативно проводить анализ конденсированных сред, но, к сожалению, традиционный метод ЛИС пока не позволяет реализовать чувствительность, сравнимую с химическими методами анализа. В настоящей работе показано, что создание комбинированного метода ЛИС с применением ультразвука позволяет приблизиться по чувствительности к анализу прецизионными химическими методами, но благодаря оперативности и высокой детальности измерений новый метод может стать более практичным и перспективным.

Оптический пробой, генерируемый лазерным излучением, обладает свойствами взрыва [1, 2]. В статье [3] представлен обзор последних достижений в области изучения динамики пузырьков в

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия *E-mail: a bulanov@me.com



Рис. 1. Спектральная плотность акустической эмиссии при различных режимах пробоя в воде: а – при наличии пробоя в толще (верхняя кривая) и вблизи поверхности воды, б – при наличии смешанного пробоя в воде (фото на вставке).

жидкости, образующихся под действием лазерного излучения. В [4] был изучен баланс энергии различных механизмов уноса энергии из зоны пробоя и показана высокая эффективность преобразования оптической энергии в акустическую, заключенная в интервале 10-49% и существенно зависящая от энергии и длительности лазерного импульса. Столь высокий разброс эффективности акустико-оптического преобразования в жидкости связан с наличием различных механизмов генерации акустических волн при оптическом пробое, обусловленном лазерными импульсами с различной энергией и при различной фокусировке лазерного излучения в жидкости. В связи с этим было интересно изучить зависимость особенностей акустической эмиссии и интенсивности спектральных линий элементов от энергии лазерного импульса и его фокусировки в жидкости, а также от наличия дополнительного источника звука, который мог облегчить оптический пробой. Эксперименты проводились с различными акустическими пьезокерамическими фокусируемыми излучателями.

Для возбуждения оптического пробоя использовался ND:YAG-лазер "Brilliant B"со следующими параметрами излучения: длина волны 532 нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе до 180 мДж, изменяющаяся в режиме модулированной добротности. Плотность мощности лазерного излучения дополнительно возрастала за счет острой фокусировки излучения в необходимом месте (в толще жидкости, на поверхности или вблизи поверхности жидкости) с помощью линз с различными фокусными расстояниями F = 40 мм, 75 мм и 125 мм. Регистрация оптического пробоя осуществлялась с применением оптического многоканального анализатора спектров Flame Vision PRO System, с временным разрешением 3 нс. Управление акустическим излучением осуществлялось с помощью цифрового генератора сигналов произвольной формы GSPF_053 (Руднев и Шиляев, Россия) и широкополосного усилителя с амплитудой ультразвука до 105 кПа. Внутрь ячеек наливалась морская или пресная вода, акустическая эмиссия регистрировалась с помощью гидрофона типа 8103 фирмы Брюль и Къер (Дания). Запись аналоговых сигналов осуществлялась на персональный компьютер с помощью АЦП типа E20-10 фирмы Л-кард с частотой квантования от 1 до 5 МГц. Анализ одновременно записанной акустической информации позволял связать динамику пузырьков с параметрами акустической эмиссии из области оптического пробоя [5, 6].

Различные виды пробоя в воде достигались путем фокусировки лазерного излучения с помощью различных линз. Пробой происходил либо в глубине воды, либо в приповерхностных слоях, либо в сочетании этих двух типов. На рис. 1 представлена спектральная плотность акустической эмиссии для двух различных типов пробоя в воде: вблизи поверхности и внутри воды одновременно. Фото смешанного пробоя показано на вставке.

Ниже представлены результаты по оптическому пробою жидкости с дополнительным воздействием ультразвука. На рис. 2а представлена разница в спектре акустической эмиссии, когда пробой происходит без ультразвукового облучения, по сравнению со спектром, когда пробой идет в присутствии ультразвука. Видно несколько гармоник облучающего ультразвука (основная гармоника с частотой 29 кГц). Превышение уровня шума в интервалах между гармониками составляет в среднем 18 дБ на частотах около 100 кГц в отличие от превышения уровня шума на отдельных частотах, достигающих 40 дБ. Таким образом, показано, что дополнительное ультразвуковое облу-



Рис. 2. Спектр акустической эмиссии при одновременном ультразвуковом и лазерном облучении: а – превышение спектра акустической эмиссии над спектром без ультразвука; б – эффект большого увеличения акустической эмиссии в морской воде по сравнению с пресной водой.

чение приводит к увеличению акустической эмиссии из зоны взаимодействия лазерного излучения с жидкостью, что свидетельствует о существовании механизма дополнительной передачи энергии к содержимому полости лазерного пробоя.

Важным эффектом, обнаруженным в экспериментах по регистрации акустической эмиссии при лазерном пробое воды, является значительное увеличение акустической эмиссии в морской воде по сравнению с пресной. Этот эффект представлен на рис. 26. Таким образом, показано, что акустическая эмиссия при оптическом пробое морской воды с ультразвуком или без него превышает акустическую эмиссию в пресной воде.

В литературе имеются данные по использованию метода ЛИС для обнаружения химических элементов в больших объемах воды при воздействии внешнего давления [8]. Методом ЛИС исследовали интенсивные линии натрия, марганца, кальция, калия, лития в растворенных растворах при статическом давлении 27.6 МПа. Было исследовано влияние на оптический спектр эффектов давления, энергии лазерного импульса, задержки импульса, температуры и концентрации соли NaCl. В работах [7, 9] показано, что улучшения интенсивности спектральных линий кальшия и натрия при повышении давления не выявлено, однако, такой эффект присутствовал для марганца. Присутствие NaCl увеличило интенсивность эмиссии для кальция, но не оказало влияния на пиковую интенсивность Mn или К. Из результатов [7] можно сделать вывод, что ЛИС является эффективным методом обнаружения химических элементов при натурных измерениях в среде с высоким статическим давлением. Очевидно, что важно попытаться заменить статическое воздействие давления влиянием акустического давления. В этом случае можно было бы реализовать ЛИС в сфокусированных акустических полях с целью выявления эффективности такого усовершенствованного метода оперативного обнаружения химических элементов в различных жидкостях.

На рис. 3 представлен эффект резкого возрастания разрешения спектральных линий калия, кислорода и кальция в воде при лазерном пробое в поле мощного ультразвука. Из рис. 3 видно, что увеличение разрешения всех линий для воды в ультразвуковом поле зависит от амплитуды ультразвука. Фактически при превышении амплитуды 10–15 кПа ультразвука происходит резкое усиление интенсивности линий всех элементов. Ранее нами было показано, что интенсивность линии ионного Са зависит также от фазы ультразвукового поля [7, 10].

Таким образом, впервые получены экспериментальные результаты, показывающие эффекты резкого усиления акустической эмиссии из зоны пробоя при совместном воздействии лазерного и ультразвукового облучения. Наблюдаются существенно различные пороги пробоя и характер акустической эмиссии в пресной и морской воде. Показано, что метод регистрации акустической эмиссии из зоны пробоя позволяет исследовать пороги и динамику лазерного пробоя, которые согласуются с высокоскоростными оптическими методами. Полученные результаты позво-



Рис. 3. Эффект резкого возрастания разрешения спектральных линий калия, кислорода и кальция в воде при лазерном пробое в поле мощного ультразвука: а – линии калия (К) (максимумы 1 и 2) и кислорода (О) (максимум 3): оранжевая и зеленая кривые – с ультразвуком, синяя пунктирная кривая – без ультразвука; б – линии иона кальция (Са) в поле ультразвука различной амплитуды, пунктирная кривая – без ультразвука.

ляют найти важные практические применения акустической эмиссии для диагностики лазерного пробоя и кавитации в непрозрачных средах, где оптические методы неприменимы. Установлен эффект увеличения разрешающей способности спектральных линий различных элементов в морской воде при воздействии ультразвукового поля. Разрешение линии для лазерного пробоя резко увеличивается в ультразвуковом поле, что свидетельствует о возможности создания комбинированного метода ЛИС с применением ультразвука. который позволит приблизиться по чувствительности к анализу прецизионными химическими методами, но благодаря оперативности и высокой детальности измерений новый метод может стать более практичным и перспективным.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18–32– 20146 мол а вед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Radziemski L.J. //Spectrochimica Acta. Part B. 2002. V. 57. P. 1109–1113.

- Hahn D.W., Omenetto N. // Appl. Spectrosc. 2010. V. 64. № 12. P. 335A–366A.
- 3. *Hahn D.W., Omenetto N.* // Appl. Spectrosc. 2012. V. 66. № 4. P. 347–419.
- 4. Yu J., Ma Q.L., Motto-Ros V., Lei W.Q., Wang X.C., Bai X.S. // Front. Phys. 2012. V. 7. № 6. P. 649–669.
- Cremers D.A., Radziemski L.J. // Handbook of Laserinduced Breakdown Spectroscopy, Second ed., John Wiley & Sons, Chicester. 2013. 432 p.
- Буланов А.В., Нагорный И.Г. // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 2. С. 241–244.
- Буланов А.В., Нагорный И.Г., Соседко Е.В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 16. С. 55–60.
- Michel A.P.M., Lawrence-Snyder M., Angel S.M., Chave A.D. // Appl. Spectrosc. 2007. V. 61. № 2. P. 171–176.
- Bulanov A.V., Nagorny I.G., Sosedko E.V. // Proc. SPIE 11026, 110261H (30 April 2019). https://doi.org/10.1117/12.2525003
- Буланов А.В., Нагорный И.Г., Соседко Е.В. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 23. С. 34–37. https://doi.org/10.21883/000000000

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 491 № 1 2020

OPTOACOUSTIC EFFECTS IN LASER BREAKDOWN OF THE SEA WATER IN AN ULTRASONIC FIELD

A. V. Bulanov^{*a*,[#]} and E. V. Sosedko^{*a*}

^a V.I. Il'ichiov Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation [#]E-mail: a_bulanov@me.com</sup> Presented by Academician of the RAS V.A. Akulichev October 9, 2019

Studies of the optoacoustic effects accompanying the laser breakdown in water generated by focused laser and ultrasonic radiation have been carried out. For the first time, experimental results were obtained showing sharply increasing effects of acoustic emission from the breakdown zone under the combined influence of laser and ultrasonic irradiation. The experiments were carried out using nanosecond pulses from an Nd: YAG laser with a wavelength of 532 nm. Acoustic radiation was generated by acoustic focusing systems at different frequencies. It is shown that the method of recording acoustic emission from the breakdown zone allows to study the thresholds and dynamics of the laser breakdown, which are consistent with high-speed optical methods. The obtained results allow to find applications of acoustic method of diagnostics of laser breakdown and cavitation in opaque environments where optical methods are not applicable. The effect of increasing the resolution of spectral lines of chemical elements in seawater under the influence of ultrasonic field is established. This effect indicates the possibility of creating a combined method of laser-spark spectroscopy using ultrasound, which will allow to approach the sensitivity to the analysis by precision chemical methods, but due to the efficiency and high detail of measurements, the new method can become more practical and improvement.

Keywords: laser induced breakdown, ultrasound