

В.И. Букатый, О.В. Гаськова

ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ПРОБОЕ ВОЗДУХА ИЗЛУЧЕНИЕМ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА

Зафиксированы низкочастотные акустические колебания, генерируемые плазмой оптического пробоя при интенсивности падающего излучения $I \approx 10^6$ Вт/см². С помощью программы быстрого преобразования Фурье оценен частотный спектр акустического сигнала. Частота акустических колебаний лежит в интервале $10^3 \div 10^4$ Гц. Зондовые измерения показали, что в плазме происходят колебания электронной плотности с частотой $\sim 10^5 \div 10^6$ Гц, а электронная плотность, соответствующая максимуму сигнала с зонда, равна 10^{16} см⁻³.

В связи с развитием методов дистанционного зондирования в настоящее время большой интерес к себе привлекает оптический пробой воздуха [1–3]. Было выяснено, что возникающее при этом плазменное образование может генерировать акустические колебания, пригодные для диагностики области пробоя. Так, в [4] обнаружено, что плазменная область генерирует единичный звуковой импульс, такой, что амплитуды положительного и отрицательного полупериодов приблизительно равны. Однако данные [4] явно недостаточны для характеристики акустических процессов при оптическом пробое.

В предлагаемой статье приведены результаты экспериментальных исследований акустических возмущений, возникающих при оптическом пробое на сажиистой частице. Для диагностики плазмы использовался электрический зонд, позволяющий проследить колебания электронной плотности, наличие которых было зафиксировано в [5] спектральным методом. Схема экспериментальной установки для исследования динамики акустических возмущений и электронной плотности представлена на рис. 1. Оптический пробой инициировался на аэрозольной затравке, в качестве которой использовались сферические сажиистые частицы диаметром $d \approx 600 \div 800$ мкм. Одиночные частицы соответствующего диаметра закреплялись в фокальной плоскости на стеклянной нити толщиной примерно 100 мкм, чем обеспечивался малый отток тепла через подложку и сферичность процесса взаимодействия. Разряд обеспечивался фокусировкой излучения неодимового лазера ГОС-1001 с длиной волны 1,06 мкм и энергией в импульсе 500 Дж линзой с фокусным расстоянием 15 см в фокальном пятне с поперечным размером $2R = 5$ мм. При этом интенсивность излучения в фокусе $I = 0,63 \cdot 10^6$ Вт/см². Определенный экспериментально порог составлял $I = 0,59 \cdot 10^6$ Вт/см² при энергии в импульсе 470 Дж. Лазер работал в режиме свободной генерации с длительностью импульса 0,75–1 мс по уровню 0,5. Контроль за положением частицы точно в точке фокуса обеспечивался излучением вспомогательного гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,63$ мкм, диаметр фокального пятна в месте расположения частицы порядка 0,1 мм), излучение

которого с помощью зеркал направлялось по оси воздействующего лазера. Регистрация плазмы пробоя осуществлялась с помощью двойного электрического зонда Ленгмюра, помещенного в разрядный промежуток. Звуковые сигналы принимались с пьезодатчика типа ЦТС-19 (цирконат-титанат-свинца) с полосой пропускания до 1 МГц и серийного датчика акустических колебаний типа КД-45 с паспортной полосой пропускания до 20 кГц. Перечисленные акустические датчики устанавливались на расстояниях $r = 10$ см от центра фокальной области. Осциллограммы сигналов регистрировались запоминающим осциллографом марки С9-8 с частотой дискретизации 20 МГц и двухлучевым осциллографом С1-74, оцифровывались и затем подвергались Фурье-обработке. Развертки осциллографов были синхронизированы с запускающим импульсом воздействующего лазера.

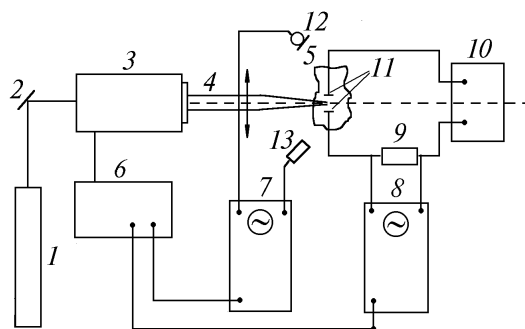


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования динамики акустических возмущений: 1 – He-Ne-лазер; 2 – делительная пластина; 3 – Nd-лазер; 4 – линза; 5 – плазма оптического разряда; 6 – блок питания Nd-лазера; 7 – двухканальный осциллограф; 8 – запоминающий осциллограф; 9 – балластное сопротивление $R = 61,9$ кОм; 10 – блок питания зонда; 11 – зонд; 12 – микрофон; 13 – датчик акустических колебаний

Достоверность привязки сигналов акустических датчиков непосредственно к процессам в исследуемом объекте подтверждается следующими обстоятельствами:

- 1) в отсутствие аэрозоля сигнал как с зонда, так и с акустических датчиков не регистрировался;
- 2) компоновка экспериментальной зоны исключала появление звукового эха на акустических датчиках в пределах длительности развертки, а также

влияние звукового импульса от ламп накачки лазера, так как время пробега звука от лазерной установки до акустического датчика $t \approx 10$ мс, а время развертки не превышало 2 мс.

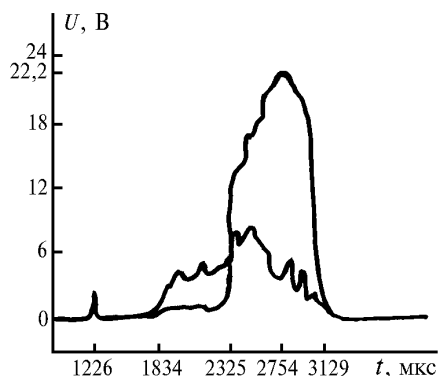


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с зонда

Характерная осциллограмма сигналов с зонда приведена на рис. 2. Из осциллограммы видно, что при $t = 1,2$ мс появляется электрический импульс, соответствующий времени начала разряда конденсаторов через лампы накачки лазера, а после чего через 400 мкм начинается процесс формирования плазменной области. Из рис. 2 также следует, что плазма существует около 1,5 мс. Проводимость, соответствующая максимуму сигнала с электродов, зарегистрированная в экспериментах $\sigma = 0,2 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Это говорит о том, что при пробое образовалась плазма, так как величина электропроводности среды, измеренная в [6] в отсутствие излучения, составляла $\sigma = 3 \cdot 10^{-17} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Измеренному значению проводимости соответствует концентрация электронов $n_e = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Осциллограмма акустических импульсов, снятая с помощью датчика KD-45, приведена на рис. 3. Акустические возмущения регистрируются через 3,38 мс после начала развертки запускающего импульса, т.е. спустя 2,1 мс после лазерного импульса. Акустический импульс имеет ярко выраженную начальную фазу сжатия и последующую фазу разряжения. Максимальная амплитуда давления в звуковой волне $P \sim 0,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Длительность фазы разряжения ~ 300 мкс, что соответствует времени пробега звука со скоростью ~ 300 м/с через объем энерговыделения, который имеет размеры порядка размеров плазменного образования (~ 1 см). Для расчета акустической энергии в предположении сферической симметрии можно воспользоваться формулой

$$W_a = 4\pi d^2 P_n^2 \tau / (\rho_v c),$$

где d – расстояние от датчика до центра фокальной плоскости; ρ_v – плотность воздуха; c – скорость звука; P_n – максимальное давление, регистрируемое датчиком; τ – длительность фаз сжатия и разряжения.

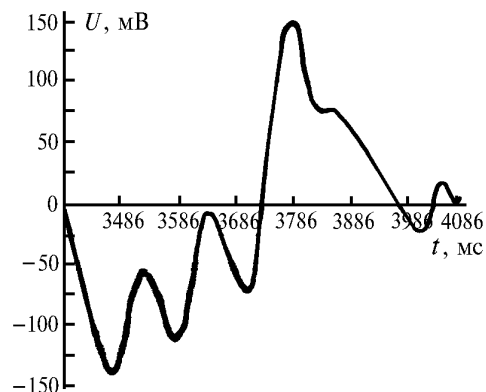


Рис. 3. Акустический сигнал, генерируемый плазмой оптического пробоя

Если $d = 0,1$ м, $\rho_v = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $c = 331$ м/с, $P = 0,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\tau = 0,7$ мс, тогда $W_a = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$.

Скорость расширения плазменной области можно оценить следующим образом:

$$v \approx R/\tau,$$

где R – характерный размер плазменной области; τ – время существования плазмы.

Размер плазменной области R можно определить по интегральной фотографии разряда. В продольном направлении он составляет 2 и 1 см в поперечном направлении. Время существования плазмы по результатам зондовых измерений можно принять равным 1 мс. Соответствующие скорости распространения фронта волны пробоя равны 20 и 10 м/с. Это говорит о том, что распространение волны пробоя осуществляется в режиме медленного горения.

Эксперименты с затравочными частицами различного размера показали, что форма акустического импульса и величина пикового давления не зависят от размера частицы.

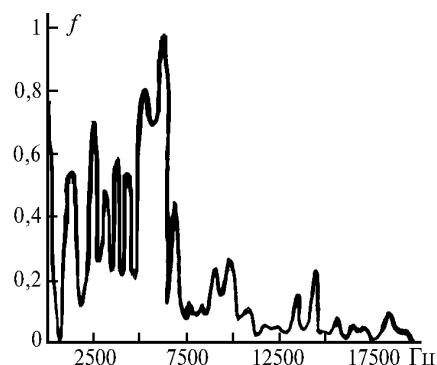


Рис. 4. Частотный спектр акустического сигнала

Основной вклад в погрешность эксперимента вносят ошибка при калибровке датчика, которая составляет 15%, и погрешность осциллографа. Для запоминающего осциллографа марки С9-8 основ-

ная погрешность измерения временных интервалов в рабочих условиях не превышает $\pm(0,5 T_0/\Delta t_x)\%$, где T_0 – длительность развертки записи, а Δt_x – временной интервал, измеряемый прибором. Соответствующая ошибка равна 1%.

При оценке спектра акустических колебаний (рис. 4) погрешность зависит от количества точек разбиения. Вычисление дисперсии флуктуаций производилось по $N=64$ отсчетам и по частоте дискретизации $9 \cdot 10^5$ Гц. Поскольку нормированная случайная ошибка вычисления дисперсии

$$\varepsilon(\sigma_T^2) \approx 1/\sqrt{N},$$

то ошибка равна 12% для $N = 64$.

Алтайский государственный университет,
Барнаул

1. Копытин Ю.Д., Сорокин Ю.М., Скрипкин А.М. и др. Оптический разряд в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1990. 159 с.
2. Королев И.Я., Кособурд Т.П., Крикунова Э.М. и др. // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 8. С. 1547–1553.
3. Королев И.Я., Самохвалов А.В., Сорокин Ю.М. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 1. С. 73–80.
4. Шаманаева Л.Г. // 3-й Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана». (Тезисы докл.). Томск: ИОА СО РАН, 1996. С. 81–82.
5. Букатый В.И., Дейнес К.И., Тельнихин А.А. // Оптика атмосферы. 1991. N 7. С. 753–756.
6. Протасевич Е.Т., Хан В.А. Распространение пучков электромагнитных волн через атмосферу. Томск: Изд-во ТГУ, 1994. 207 с.
7. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.

Поступила в редакцию
5 мая 1997 г.

V.I. Bukaty, O.V. Gas'kova. The Acoustic Fluctuation Generation at the Optical Discharge by Means of Nd-Laser Radiation.

Low-frequency acoustic fluctuations generated by plasma of optical discharge at the intensity radiation $I \approx 10^6$ Wt/cm² are fixed. With the help of the Fourier-transform program a frequency spectrum of an acoustic signal was appreciated. The frequency of acoustic fluctuations lays in the interval $10^3 \div 10^4$ Hz. The measurements have shown, that there are the fluctuations of electronic density with frequency $10^5 \div 10^6$ Hz in plasma; and the electronic density, appropriate to the maximum of a signal is equal to 10^{16} cm⁻³.