

Увеличение чувствительности метода Fs-LIBS посредством управления типом поляризации лазерного излучения

П.А. Бабушкин

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зуева, 1, bra@iao.ru*

Эмиссионный анализ вещества посредством метода спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя фемтосекундным излучением (Fs-LIBS) представляет большой интерес в различных областях: науке, технике, медицине, экологическом мониторинге. Данный метод позволяет проводить качественный и количественный анализ вещества, находящегося в любом агрегатном состоянии. Чувствительность данного метода зависит от многих параметров лазерного излучения, один из которых поляризация. В докладе представлены результаты исследования влияния типа поляризации лазерного излучения на интенсивность линий вещества при определенной его концентрации. В качестве исследуемой смеси использован речной песок, в состав которого в основном входят SiO_2 и FeO . Показано, что при изменении типа поляризации возбуждающего излучения и приближении его к круговому типу интенсивность линий Si, O и Fe увеличивается до 80%.

Ключевые слова: лазерно-индуцированный пробой, температура плазмы, загрязнение; fs-libs, plasma temperature, pollution.

Введение

Диагностика химического состава аэрозолей остается актуальной проблемой. Существенным это оказывается для промышленных районов с высоким уровнем выбросов антропогенных жидких и твердых аэрозолей [1, 2], а также для регионов с аридным или полуаридным климатом, где высока вероятность возникновения пылевых бурь [3].

Решение данной задачи возможно за счет метода спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя фемтосекундным излучением (Fs-LIBS). При этом существует проблема связанная с чувствительностью метода и расстоянием между объектом диагностики.

Повышение чувствительности метода можно достичь различными способами, например, повышая энергию излучения или изменяя длительность импульса, но это приводит к смещению области филаментации фемтосекундного излучения относительно изучаемого объекта. Управление типом поляризации излучения позволяет не меняя другие параметры увеличивать температуру плазмы и, соответственно, увеличивать число возбужденных частиц [4–6]. Изменения типа поляризации можно достичь различными способами, один из которых – использование КТР кристалла в качестве четвертьволновой пластинки. При этом излучение второй гармоники нелинейного кристалла можно использовать также для диагностики других веществ.

Таким образом, целью данной работы является повышение чувствительности метода Fs-LIBS за счет управления типом поляризации фемтосекундного лазерного излучения посредством КТР кристалла.

Постановка эксперимента

Эксперимент по увеличению интенсивности эмиссии в методе Fs-LIBS за счет изменения типа поляризации лазерного излучения проведен по схеме, представленной на рис. 1. По схеме эксперимента фемтосекундное лазерное излучение формируется лазерной системой (1) и имеет следующие параметры: длина волны 805 нм, длительность 60 фс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия излучения изменялась в диапазоне от 2 до 14 мДж. Затем импульс распространяется через КТР кристалл второй гармоники (2). За счет поворота кристалла в плоскости перпендикулярной распространению излучения достигалась необходимая форма и ориентация эллипса поляризации. При этом значение мощности второй гармоники (2ω), частично отраженной от дихроического зеркала (3), не создает условий для формирования плазмы. Излучение с эллиптической поляризацией, отражаясь от дихроического фокусирующего зеркала направляется на частицы песка, падающие поперек пучка.

Поскольку зеркало (3) имеет высокий коэффициент пропускания вне лазерной длины волны, то излучение второй гармоники почти полностью проходит через него и, отражаясь от плоских зеркал (4), (5) и фокусирующего зеркала (6), также направляется в область взаимодействия, приобретая задержку в 24 нс. Это можно использовать для реализации явления вынужденного излучения на переходах, попадающих в полосу второй гармоники.

Эксперимент проводился на частицах речного песка, в состав которого входит в основном диоксид кремния SiO_2 и оксид железа FeO . На рис. 2 представлена фотография частиц песка и распределение их по размерам.

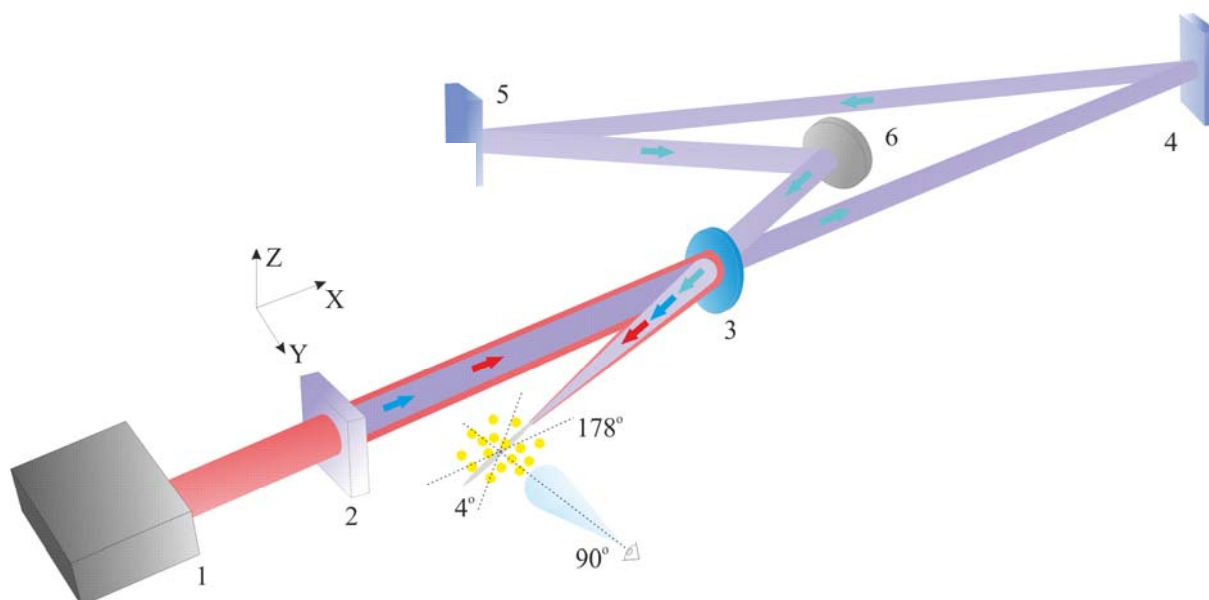


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – Ti:Sa лазерная система, 2 – КТР кристалл второй гармоники, 3 – фокусирующее дихроичное зеркало 1 м, 4, 5 – плоское селективирующее зеркало второй гармоники, 6 – фокусирующее зеркало 1 м

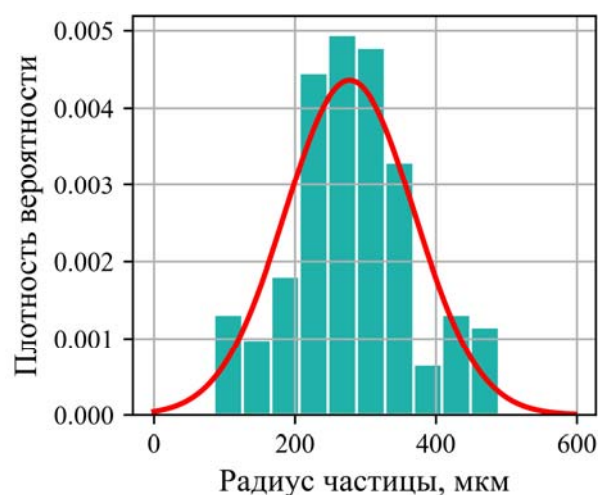
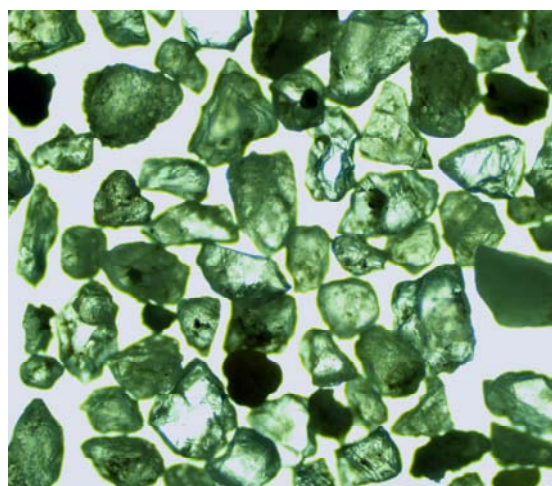


Рис. 2. Частицы песка и их распределение по размерам

Выбор песка обусловлен тем, что чувствительные линии эмиссии вещества находятся вдали от излучения суперконтинуума, что облегчает их выделение в принимаемом сигнале. Кроме того, в кристаллах песка нелинейные эффекты наступают при мегаваттном уровне мощности излучения. При этом одна из интенсивных эмиссионных линий кислорода – 394,7 нм попадает в контур излучения второй гармоники. Это обстоятельство можно использовать для демонстрации явления стимулированного излучения вызванного второй гармоникой, формируемой КТР кристаллом.

Результаты

На рис. 3 представлен спектр свечения плазмы из области филаментации при накачке излучением 10 мДж с линейной и эллиптической поляризацией, зарегистрированный под углом 90° по отношению к падающему излучению.

На графике заметно усиление интенсивности эмиссии при эллиптической поляризации и увеличение интенсивности континуального спектра, который формируется за счет обратного тормозного излучения электронов плазмы. Увеличение эмиссии сплошного спектра говорит о возрастании средней температуры плазмы в зоне пробоя, что согласуется с аналогичными исследованиями, например, [5, 6].

Также на рисунке видно излучение атомарного кислорода на длине волны 394,7 нм, которое в случае применения КТР кристалла может быть вызвано явлением вынужденного излучения.

На рис. 4 представлены зависимости изменения интенсивности эмиссии на выбранных линиях от угла поворота кристалла КТР, связанного с типом поляризации лазерного излучения.

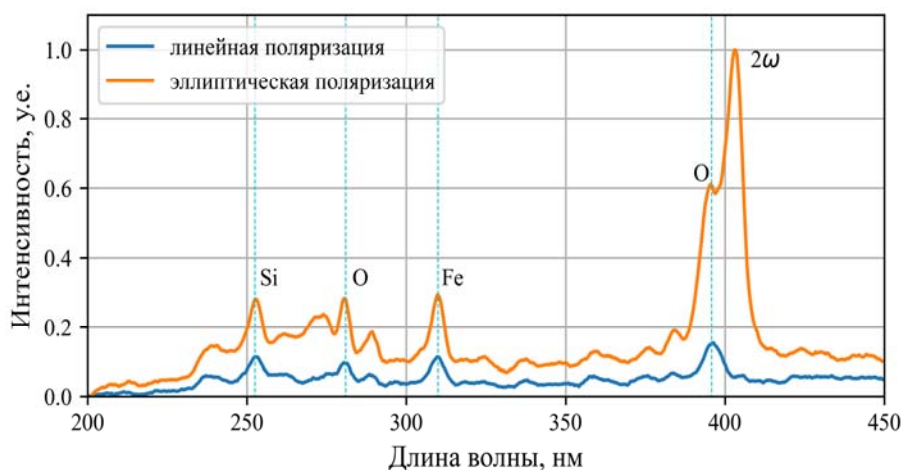


Рис. 3. Спектры свечения плазмы, полученной в области филаментации от частиц речного песка в зависимости от типа поляризации фемтосекундного излучения

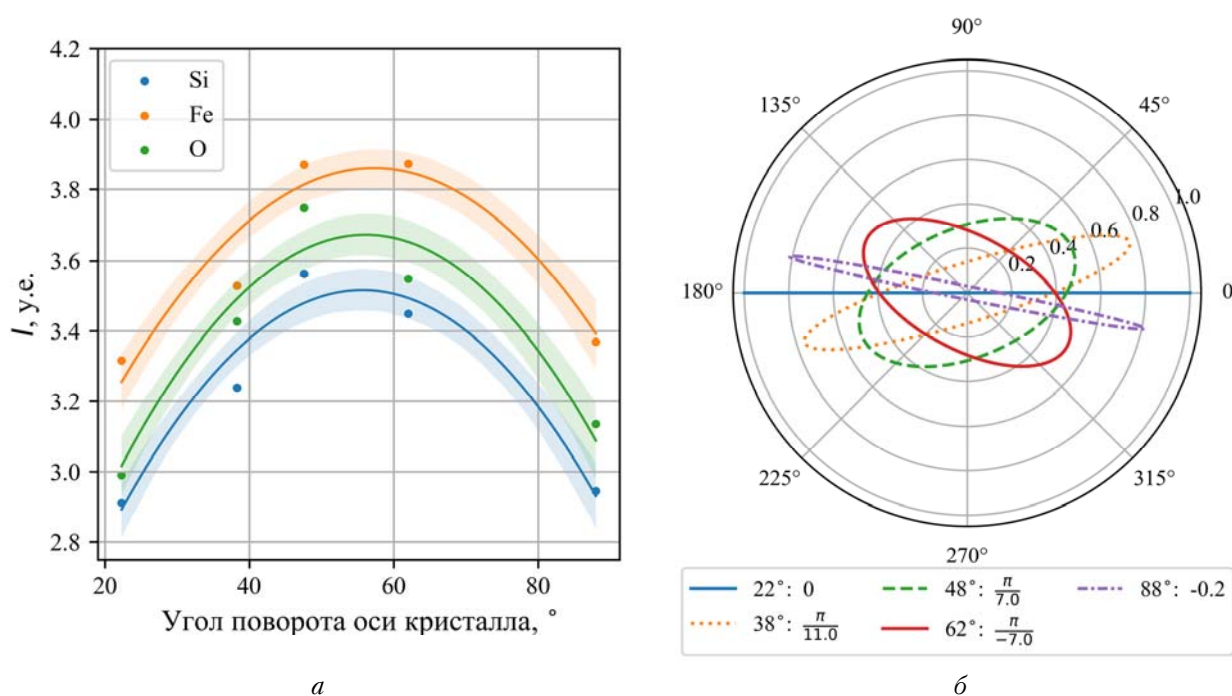


Рис. 4. Зависимость интенсивности линии Si, Fe, O от угла поворота кристалла (а) и эллипсы поляризации от угла поворота оси КТР кристалла (б)

Из рис. 4, а и б видно, что при приближении типа поляризации к круговой происходит увеличение интенсивности линий эмиссии. При этом угол фазового синхронизма КТР кристалла равен $22^\circ 3'$, что соответствует нулевой фазовой задержке между обыкновенным и необыкновенным пучками, а тип поляризации суммарной волны является линейным (синяя сплошная кривая на рис. 4, б).

В легенде к рис. 4, б приведены фазовые задержки между обыкновенным и необыкновенным пучками, формирующимися при повороте КТР кристалла. Как можно видеть с увеличением угла поворота оси кристалла тип поляризации суммарной волны меняется с линейной на эллиптическую, а при углах поворота оси кристалла более 48° фазовая задержка меняет знак, что вызвано двухосностью кристалла.

Сравнение интенсивностей эмиссионных линий для линейной поляризации при фазовой синхронизме и эллиптической при угле поворота оси кристалла на 48° демонстрирует прирост интенсивности на 80%.

Заключение

Представленные результаты показывают, что применение КТР кристалла второй гармоники позволяет достигать усиления интенсивности эмиссии анализируемого вещества до 80% посредством изменения типа поляризации возбуждающего излучения с линейной на эллиптическую

Финансирование. Исследования выполнены в рамках госзадания ИОА СО РАН и при частичной поддержке проекта СМУ ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Загрязнение* атмосферного воздуха (воздуха вне помещений) и здоровье человека [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health> (Дата обращения: 01.04.2025).
2. Горчаков Г.И., Губанова Д.П., Еланский Н.Ф., Иорданский М.А., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И., Садовская Н.В. О возможностях применения метода экспресс-анализа для определения химического состава приземных аэрозолей с целью идентификации их источников // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. 2018. С. 124–124.
3. Artamonova M.S., Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Lebedev V.A., Maksimenkov L.O., Minashkin, V.M., Chketiani O.G. Variations of the aerosol concentration and chemical composition over the arid steppe zone of Southern Russia in summer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. P. 769–783.
4. Mitryukovskiy S., Liu Y., Ding P., Houard A., Couairon A., Mysyrowicz A. Plasma luminescence from femtosecond filaments in air: evidence for impact excitation with circularly polarized light pulses // *Physical review letters*. 2015. V. 114, N 6. P. 063003.
5. Yang L., Liu M., Liu Y.T., Li Q.X., Li S.Y., Jiang Y.F., Jin M.X. Influence of polarization of laser beam on emission intensity of femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy // *Chinese Physics B*. 2020. V. 29, N 6. P. 065203
6. Shi Y., Chen A., Jiang Y., Li S., Jin M. Influence of laser polarization on plasma fluorescence emission during the femtosecond filamentation in air // *Optics Communications*. 2016. V. 367. P. 174–180.

P.A. Babushkin. Increasing the sensitivity of the Fs-LIBS method by controlling the type of laser radiation polarization.

Emission analysis of matter by femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy (Fs-LIBS) has great interest in various fields: science, technology, medicine, and environmental monitoring. This method allows to carry out qualitative and quantitative analysis of matter in any aggregate state. The sensitivity of this method depends on many parameters of laser radiation, one of which is polarization. The report presents the results of a study the effect of laser radiation polarization on the intensity of the plasma emission lines. River sand was used as the test mixture, it mainly consists of SiO₂ and FeO. River sand is a good imitation of particles carried during dust storms. Tracking and controlling dust storms is an urgent task in the problem of environmental monitoring and improving the efficiency of agricultural management in arid zones. The study shows that when changing the polarization type of the excitation radiation and approaching a circular polarization state, the intensity of Si, O, and Fe emission lines increases by 80%. These results have important practical significance in the problem of increasing the sensitivity of the Fs-LIBS method.