

НЕСЕЛЕКТИВНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ ВЕЩЕСТВА В МЕТОДЕ FS-LIBS ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ ЗАДЕРЖКОЙ МЕЖДУ *О* И *Е* ПУЧКАМИ

Бабушкин П.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: bpa@iao.ru

Метод лазерно-индуцированного пробоя (LIBS) нашел широкое применение в различных областях, таких как научные исследования, неразрушающий контроль чистоты материала, диагностика химического состава смеси. Комбинация с фемтосекундным лазерным излучением (FS-LIBS) в качестве источника позволила увеличить чувствительность данного метода посредством уменьшения шумовой составляющей, обусловленной тормозным излучением электронов плазмы оптического пробоя.

В настоящее время активно ведутся исследования по увеличению чувствительности метода FS-LIBS различными способами. В данной работе представлены результаты исследования увеличения чувствительности метода посредством управления фазовой задержкой между обыкновенным (*о*) и необыкновенным (*е*) пучками, формирующихся при прохождении фемтосекундного импульса через нелинейный КТР кристалл. Результатом является усиление интенсивности линий эмиссии SiO₂ от тестового аэрозоля в УФ диапазоне до 80% из области оптического пробоя.

Введение. Фемтосекундное лазерное излучение находит широкое применение во многих областях науки и техники в том числе для спектроскопического анализа вещества методом лазерно-индуцированного пробоя [1]. В отличие от наносекундного лазерного излучения фемтосекундное не разогревает плазму, что позволяет ей остывать быстрее, уменьшая влияние тормозного эффекта на электроны, что снижает зашумленность сигнала.

Интенсивность спектральной линий и температура плазмы связаны, при этом последняя определяется кинетической энергией электронов. При линейной поляризации возбуждающего излучения электроны испытывают чередующиеся ускорения и замедления в каждом оптическом цикле импульса. При приближении типа поляризации к круговой, электроны приобретают большую энергию, так как не испытывают замедления при смене направления вектора напряжённости электрического поля [2, 3].

В данной работе тип поляризации менялся с линейной на эллиптическую посредством КТР кристалла, в котором соотношение интенсивностей обыкновенной (*о*) и необыкновенной (*е*) волны и фазовой задержки между ними задавалось поворотом оси кристалла.

Целью данной работы является повышение чувствительности метода FS-LIBS управлением типом поляризации возбуждающего излучения посредством изменения фазовой задержки между обыкновенным и необыкновенным пучком в КТР кристалле.

Постановка эксперимента. Эксперимент по увеличению интенсивности эмиссии в методе Fs-LIBS проведен по схеме, представленной на рисунке 1.

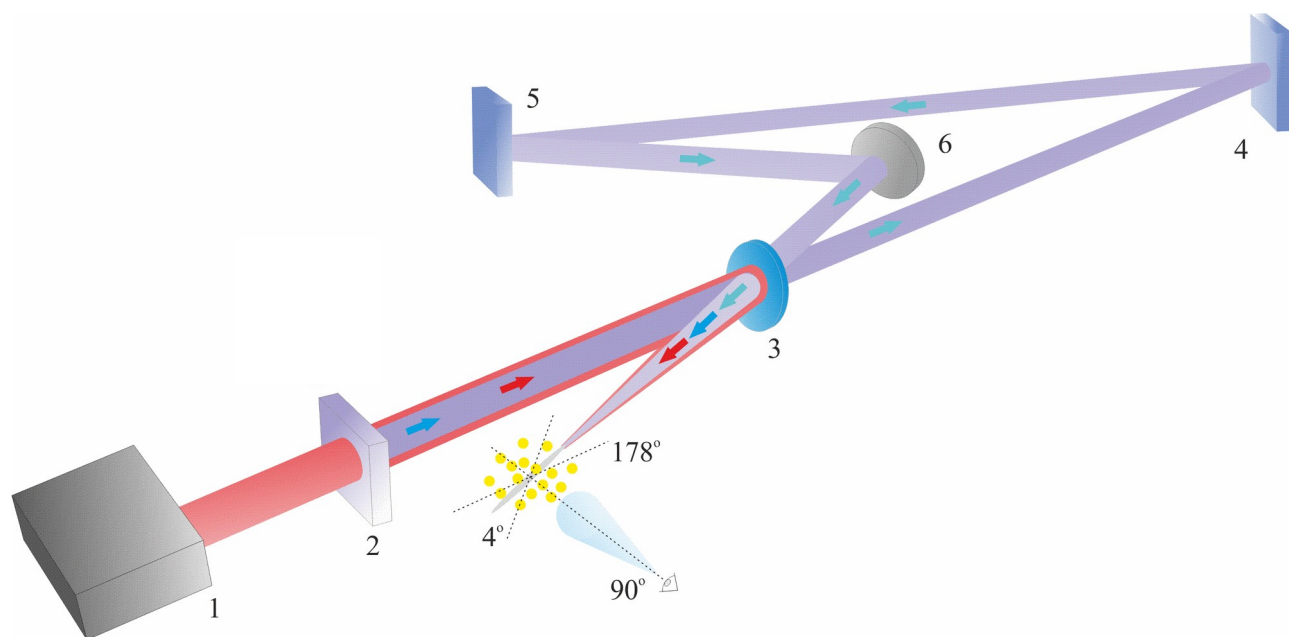


Рисунок 1. Схема эксперимента: 1 – Ti:Sa лазерная система (805 нм, 60 фс), 2 – КТР кристалл второй гармоники, 3 – фокусирующее дихроическое зеркало 1 м, 4, 5 – плоское селектирующее зеркало второй гармоники, 6 – фокусирующее зеркало 1 м.

Схема эксперимента, представленная рисунке 1 предусматривает одновременное усиление эмиссии благодаря управлению типом поляризации посредством КТР кристалла (неселективное усиление) и за счет явления вынужденного излучения посредством стимулированной разгрузки перехода атома кислорода на длине волны 394,7 нм излучением второй гармоники с центром на 402 нм (селективное усиление).

Эксперимент проводился на частицах речного песка, в состав которого входит в основном диоксид кремния SiO_2 и оксид железа FeO . 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.

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 оптического 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.

Результаты. На рисунке 2 представлен спектр свечения плазмы из области филаментации при накачке излучением с линейной и эллиптической поляризацией.

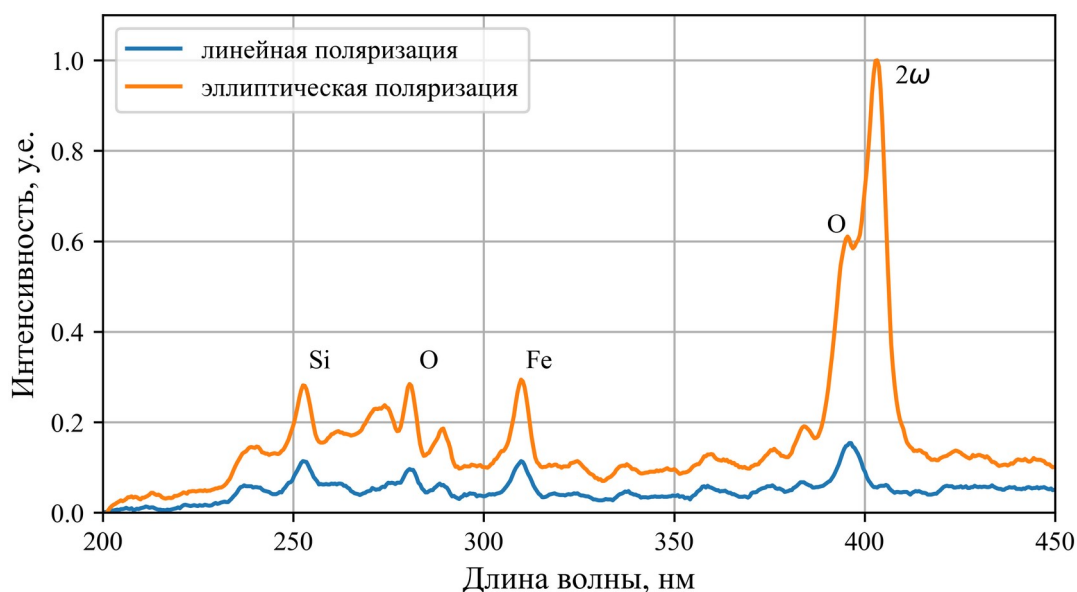


Рисунок 2. Спектры свечения элементов речного песка в плазме области филаментации в зависимости от типа поляризации фемтосекундного излучения

На графике заметно усиление интенсивности эмиссии при эллиптической поляризации и 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, [3], где подобный эффект объясняется увеличением вероятности заселенности верхних энергетических состояний атомов, что следует из распределения Больцмана.

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 рисунке 3 представлены зависимости изменения интенсивности эмиссии на выбранных линиях от угла поворота кристалла КТР связанного с фазовой задержкой между o и e пучками.

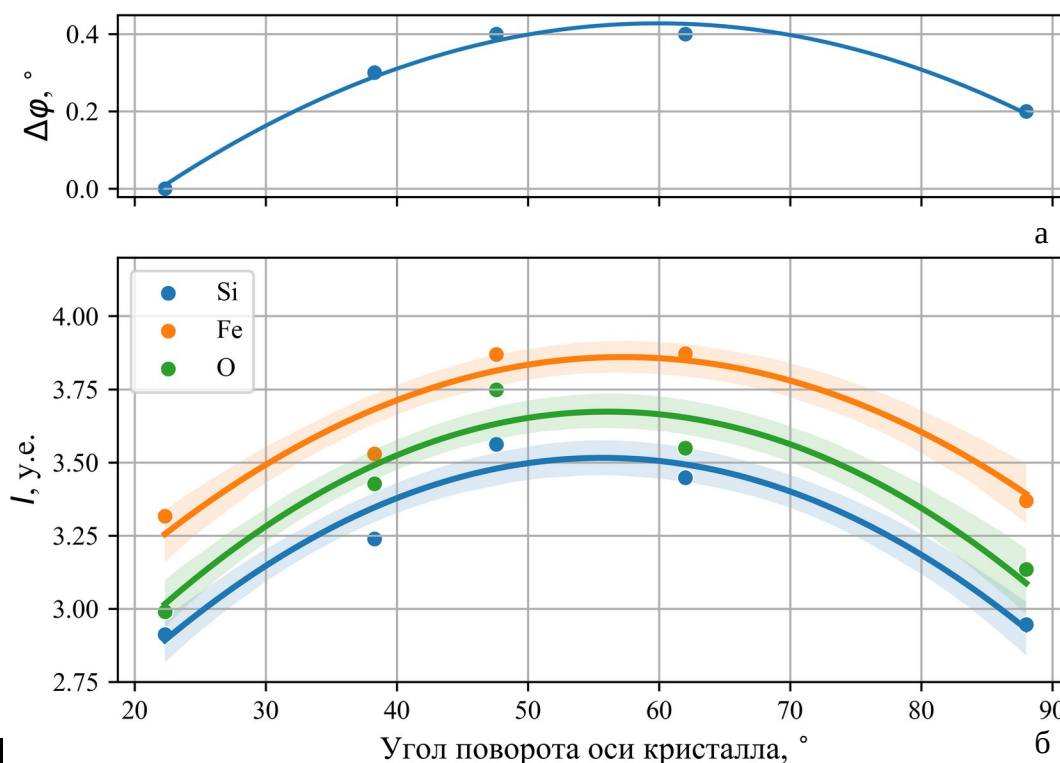


Рисунок 3. Зависимость изменения фазовой задержки между о и е пучками (а) и зависимость интенсивности эмиссионной линии от угла поворота оси кристалла (б)

Из рисунка видно, что зависимость изменения интенсивности эмиссии для каждого из элементов аналогична и при увеличении угла поворота оси кристалла или увеличении фазовой задержки между о и е пучками растет интенсивность линий эмиссии.

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, а также получать вынужденное излучение на переходах веществ, попадающих в полосу излучения второй гармоники.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН и при частичной поддержке проекта, поддержанного СМУ ИОА СО РАН.

1. Gurevich E.L., Hergenröder R. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy: Physics, applications, and perspectives // Appl. Spectrosc. 2007. V. 61, N 10. P. 233A–242A.

2. 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.

3. *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