

Управление температурой плазмы в задаче эмиссионного анализа посредством КТР кристалла

П.А. Бабушкин

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

Нелинейные кристаллы нашли широкое применение в лазерной технике для решения таких задач, как преобразование лазерного излучения во вторую гармонику или для электрооптической модуляции. Наряду с генерацией второй гармоники КТР кристалл может быть использован для увеличения кинетической энергии электрона в плазме за счет управления типом поляризации лазерного излучения. Данное явление имеет важное значение при проведении элементного анализа вещества методом спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя фемтосекундным излучением (Fs-LIBS). В докладе представлены результаты исследования влияния типа поляризации лазерного излучения на температуру плазмы при реализации метода Fs-LIBS в зависимости от угла поворота кристалла и эффективности генерации второй гармоники. Показано, что при увеличении разности фаз между обычным и необыкновенным излучением температура плазмы растет, что приводит к неселективному усилению интенсивности эмиссионных линий вещества. Полученные результаты имеют важное практическое значение в проблеме усиления чувствительности метода Fs-LIBS.

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

Введение

Определение состава аэрозолей остается актуальной задачей во многих проблемах, в том числе оценке качества воздуха городской среды, эрозии почв в том числе аридных или полуаридных зон [1–3].

Решение данной задачи возможно за счет метода спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя фемтосекундным излучением (Fs-LIBS). При этом существует проблема, связанная с чувствительностью метода. Одним из параметров, которые влияют на чувствительность метода Fs-LIBS, является температура плазмы. Управление ею возможно различными способами, например, 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]. Управления типом 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 температурой плазмы в задаче эмиссионного анализа посредством КТР кристалла.

Постановка эксперимента

Эксперимент по увеличению интенсивности эмиссии в методе Fs-LIBS за счет изменения температуры плазмы 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 изменялась температура плазмы, которой соответствует определенный эллипс 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 рисунке представлены частицы речного песка, используемого в эксперименте.

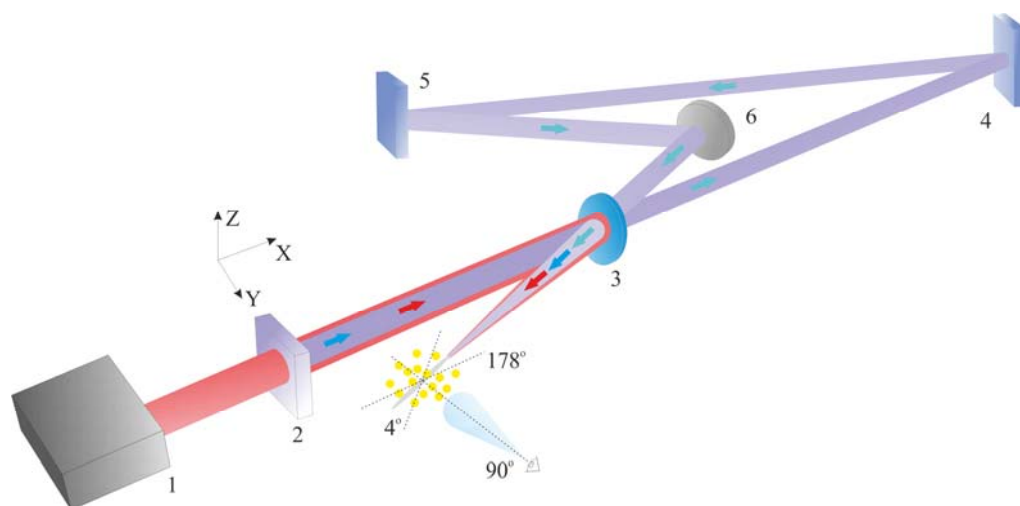


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — Ti:Sa лазерная система, 2 — КТР кристалл второй гармоники, 3 — фокусирующее дихроичное зеркало 1 м, 4, 5 — плоское селективирующее зеркало второй гармоники, 6 — фокусирующее зеркало 1 м

Результаты

На рис. 2 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 вставке представлена фотография частиц речного песка, полученная с помощью микроскопа.

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], где подобный эффект объясняется увеличением вероятности заселенности верхних энергетических состояний атомов, что следует из распределения Больцмана.

Согласно уравнению Больцмана интенсивность спектральной линии связана с температурой плазмы следующим образом

$$I = N_k A_{ki} h \nu_{ki} \frac{g_k}{g_i} e^{-\frac{\Delta E_{ki}}{kT}}, \quad (1)$$

где N_k — концентрация частиц в возбужденном состоянии; A_{ki} — коэффициент Эйнштейна для данного перехода; h — постоянная Планка; ν_{ki} — частота излучения; E_{ki} — энергия данного перехода; k — постоянная Больцмана; T — температура плазмы.

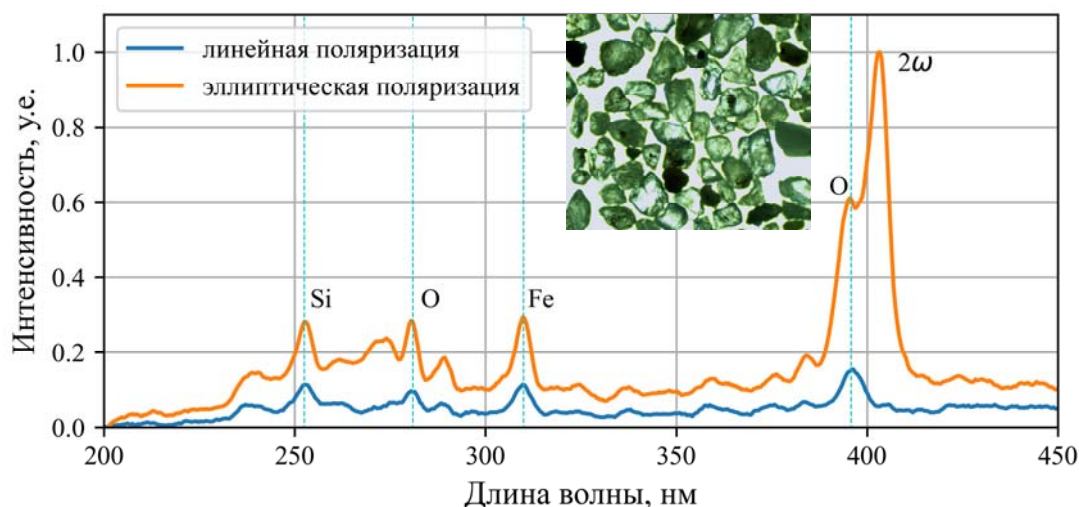


Рис. 2. Спектры свечения плазмы, полученной в области филаментации от частиц речного песка в зависимости от типа поляризации фемтосекундного излучения

На основе формулы (1) можно оценить изменение температуры плазмы, используя метод *Boltzman plot*. Для его реализации необходимы две спектральные линии одного вещества в одинаковом энергетическом состоянии (атом или ион). В данном случае для реализации данного метода можно использовать спектральные линии атома кислорода входящего в состав диоксида кремния: 280,65 нм и 288,36 нм.

На рис. 3 представлены зависимости изменения температуры плазмы от угла поворота кристалла КТР связанной с типом поляризации лазерного излучения.

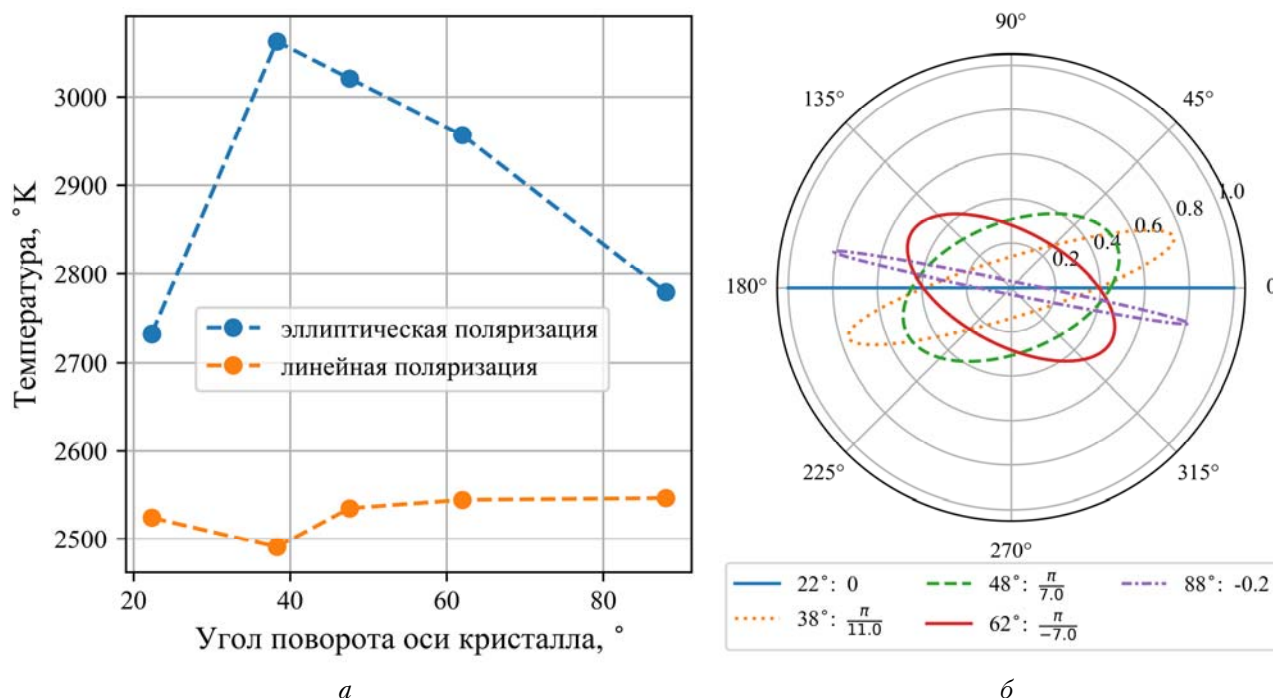


Рис. 3. Зависимость температуры плазмы (а) и эллипсы поляризации (б) от угла поворота оси КТР кристалла

Из рис. 3 видно, что температура плазмы для линейной поляризации ниже, чем при эллиптической. При приближении типа поляризации к круговой происходит увеличение температуры плазмы, что видно по графику на рис. 3, а. 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. 3, б).

В легенде к рис. 3, 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.

Заключение

Представленные результаты показывают, что применение КТР кристалла второй гармоники позволяет управлять температурой плазмы посредством изменения типа поляризации лазерного излучения и достигать неселективного усиления интенсивности эмиссии анализируемого вещества.

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. Application of KTP crystal to change plasma temperature in emission analysis problem.

Nonlinear crystals have found wide application in laser technology for solving such problems as converting laser radiation into the second harmonic or for electro-optical modulation. Along with the second harmonic generation, the KTP crystal can be used to increase the kinetic energy of an electron in plasma by controlling the type of laser radiation polarization. This phenomenon has great importance for performing elemental analysis of a substance by femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy method (Fs-LIBS). The report presents the results of study the effect of laser radiation polarization on the plasma temperature when implementing the Fs-LIBS method depending on the crystal rotation angle and effective second harmonic generation. It is shown that the increasing of the phase difference between ordinary and extraordinary radiation, the plasma temperature increases, which leads to a non-selective increase in the intensity of the emission lines of the substance. The obtained results have great practical importance in the problem of increasing the sensitivity of the Fs-LIBS method.