

Изменение спектра оптического излучения, проходящего через плазму при нарастании степени ионизации

В. В. Букин, С. В. Гарнов, А. Д. Трофимов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 17 марта 2011 г.

Экспериментально зарегистрировано возникновение синего сдвига у зондирующего лазерного импульса при его распространении в нестационарной плазме. Продемонстрирована возможность использования данного метода для диагностики плотной фемтосекундной плазмы.

В работе исследуется временная динамика электронной плотности неравновесной микроплазмы, возбуждаемой в газе остросфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами. Возникающие в плазме в результате оптического пробоя свободные электроны приводят к изменению значения диэлектрической проницаемости ϵ и, соответственно, показателя преломления n , что дает возможность измерять электронную плотность оптическими методами. В частности, изменение показателя преломления плазмы, вызванное изменением степени ионизации, приводит, как было показано еще в [1], к изменению спектра проходящего через плазму излучения. Этот эффект исследовался ранее экспериментально [2, 3]. В данных работах использовалась схема, при которой зондирующий и возбуждающий плазму импульсы распространяются в ней коллинеарно, то есть искомый эффект усредняется за все время прохода импульсом плазмы. В настоящей работе рассматривается поперечное зондирование плазмы, то есть такое, при котором зондирующее излучение попадает в плазму перпендикулярно направлению импульса, возбуждающего плазму, и, соответственно, проходит плазму за меньшее время (так как плазма имеет вытянутую форму). Такая геометрия эксперимента повышает временное разрешение метода, что позволяет исследовать плазму в различных фазах ее развития. Использование данной методики (измерения сдвига спектра прошедшего через плазму излучения), в отличие от иных (например, интерферометрических) измерений, позволяет измерить скорость изменения степени ионизации плазмы за один импульс лазера.

Нами был поставлен эксперимент, где было зарегистрировано рассматриваемое изменение спектра при поперечном зондировании плазмы. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

В эксперименте использовались фемтосекундные импульсы Ti:Sa лазера (центральная длина волны $\lambda_0 = 800$ нм, длительность импульса $\tau = 35$ фс,

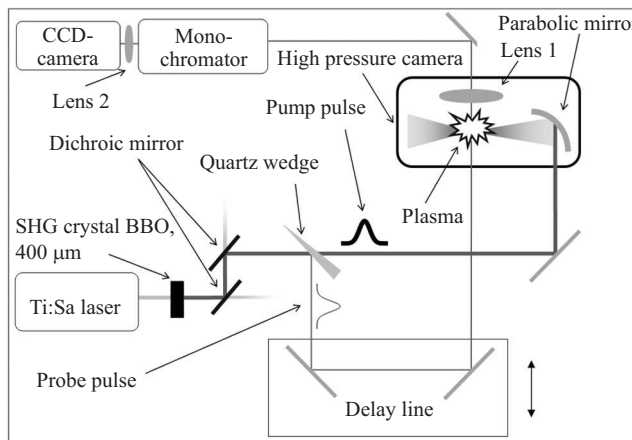


Рис. 1. Схема эксперимента

диаметр пучка по уровню $e^{-2} = 12$ мм, энергия 2.5 мДж). Импульс преобразовывался (используется кристалл β -бората бария ВВО толщиной 400 мкм) во вторую гармонику ($\lambda = 400$ нм, длительность импульса $\tau = 50$ фс, ширина спектра 10 нм, энергия 1 мДж). Использование второй гармоники излучения позволило в значительной степени повысить его контрастность. Импульс очищался от первой гармоники на двух дихроичных зеркалах. Далее импульс разделялся на две неравные части, проходя через кварцевый клин: основная часть, несущая большую долю мощности, и часть с малой долей мощности, которая в дальнейшем использовалась для зондирования. Основная часть импульса попадала в камеру высокого давления, где фокусировалась внеосевым параболическим зеркалом (эффективное фокусное расстояние $f = 20.3$ мм) в точку, инициируя оптический пробой. Зондирующий импульс проходил через линзу задержки, а затем сквозь сформированную основной частью импульса плазму. После этого объективом 1 (микроскопный объектив с увеличением $\times 20$, числовая апертура 0.5) строилось изображение

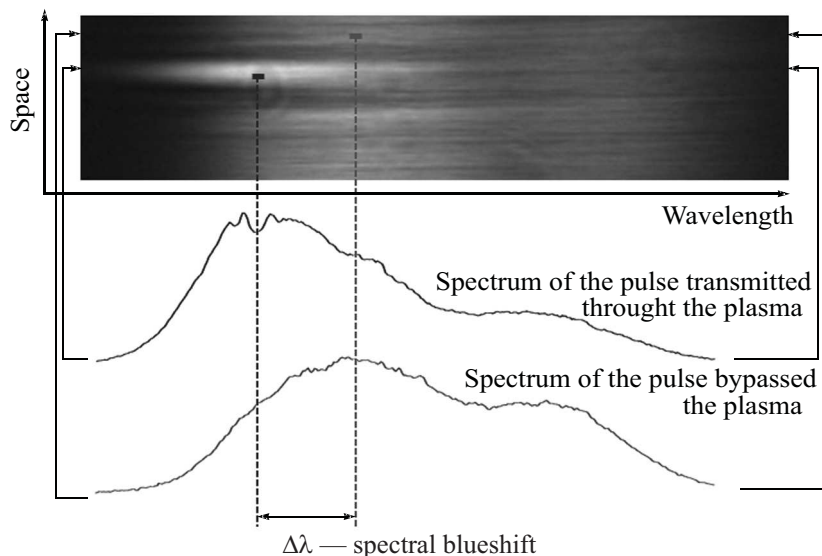


Рис. 2. Изображение плазмы, зарегистрированное в эксперименте. Сечение плазмы в окрестности перетяжки (по вертикали) развернуто по спектру с помощью монохроматора (по горизонтали)

сечения плазмы в области перетяжки силового импульса в лучах зондирующего импульса на входной щели спектрального прибора (монохроматор МДР-4 со снятой выходной щелью; используется решетка 1200 штр./мм). Спектральный прибор развертывал это изображение по спектру. Полученное изображение сечения плазмы, развернутое по спектру, подавалось через объектив 2 на ПЗС-камеру.

Линия задержки позволяла варьировать время прихода зондирующего импульса относительно момента поджига плазмы, что дало возможность исследовать плазму в различных фазах ее развития. Камера высокого давления была заполнена азотом при давлении 7 атм. Проведение эксперимента при повышенном давлении газа увеличивает концентрацию электронов в образовавшейся плазме, что приводит к большему изменению показателя преломления и вызванному этим сдвигу спектра. Диаметр образующейся в камере плазмы – около 10 мкм.

На рис. 2 можно ясно видеть, что спектр той части зондирующего импульса, которая прошла через плазму, смещен относительно исходного спектра (спектра части импульса, не прошедшего через плазму). Данное смещение можно оценить в 2 нм.

Теоретическое рассмотрение: Для плазмы оптического пробоя газов фемтосекундными лазерными импульсами время столкновений значительно превышает длительность импульса, и такую плазму можно считать бесстолкновительной. Тогда, согласно модели Друде, диэлектрическая проницаемость плазмы

(и, соответственно, показатель преломления) описывается следующими соотношениями [4]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}},$$

где N_e – электронная плотность, ω – частота лазерного излучения, e – заряд электрона, m_e – его масса, $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e}$ – плазменная частота, n – показатель преломления плазмы. Это выражение справедливо и для нестационарной плазмы с меняющейся во времени концентрацией N_e при условии медленности этого изменения по сравнению с частотой оптического поля: $dN_e/dt \ll N_e \omega$ [4].

Для расчета спектра импульса, прошедшего через плазму, нами была использована следующая модель: плазма фиксированной толщины L с показателем преломления $n(t)$, зависящим от времени, но не зависящим от координат, то есть одинаковым во всей плазме; зондирующее излучение считаем обладающим плоским волновым фронтом (одномерная модель). Если считать $n(t)$ линейным, меняющимся медленно по сравнению с периодом оптического излучения ($n(t) = n_0 + \alpha t$, $dn/dt \ll n\omega$, $n > 0$) и не зависящим от частоты падающей волны, то задача решается аналитически.

Пусть на входе в плазму (при $x = 0$) электрическое поле падающего излучения колеблется с частотой ω_0 : $E(t, x = 0) \sim e^{i\omega_0 t}$. Используя работу [5], можно показать, что в таком случае мгновенная частота поля в заданной точке x в плазме будет равна

$$\omega(t, x) = \frac{\partial \varphi(t, x)}{\partial t} = \omega_0 e^{-\alpha \frac{x}{c}},$$

что в приближении тонкой ($L \ll c/\alpha$) плазмы дает следующую формулу для частоты излучения на выходе из плазмы:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{L}{c} \alpha \right), \quad (1)$$

где ω_0 – частота волны до прохождения плазмы, ω – частота волны после выхода из плазмы.

Из интерферометрических экспериментов [6, 7] известны данные о нарастании концентрации электронов в плазме. Характерное время изменения показателя преломления $\Delta t \sim 230$ фс, электронная плотность нарастала до значения $N_e \sim 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. По формулам Друде получим изменение показателя преломления после ионизации:

$$\Delta n = 1 - \sqrt{1 - \frac{N_e(t)e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2}} \approx 0.03.$$

Используя формулу (1) и данные о характеристиках плазмы (размер L и скорость нарастания электронной концентрации dN_e/dt), получим, что из-

менение показателя преломления составило $\Delta n = \Delta t \frac{dn}{dt} = \Delta t \frac{c}{L} \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \sim 230 \text{ фс} \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ нм}}{10 \text{ мкм} \cdot 400 \text{ нм}} \approx 0.03$, что согласуется с Δn , полученным из модели Друде.

Нами было рассмотрено влияние резкого изменения показателя преломления плазмы на спектр проходящего сквозь нее лазерного импульса. Произведено сравнение результатов, полученных с применением данной методики, с результатами, полученными из интерферометрических измерений. Показано, что данную методику можно применять для диагностики фемтосекундной плазмы.

1. E. Yablonovitch, Phys. Rev. Letters **31**, 877 (1973).
2. W. M. Wood, C. W. Siders, and M. C. Downer, Phys. Rev. Letters **67**, 3523 (1991).
3. S. C. Rae and K. Burnett, Phys. Rev. A **46**, 1084 (1992).
4. В. Л. Гинзбург, *Распространение электромагнитных волн в плазме*, М.: Физматлит, 1960.
5. А. Б. Шварцбург, Успехи физ. наук **175**, 833 (2005).
6. В. В. Букин, Н. С. Воробьев, С. В. Гарнов и др., Квантовая электроника **36**, 638 (2006).
7. В. В. Букин, С. В. Гарнов, А. А. Малютин, В. В. Стрелков, Квантовая электроника **37**, 961 (2007).