

Трехмерная микроскопия лазерной плазмы методом генерации третьей гармоники

Д.А.Сидоров-Бирюков*, А.Н.Наумов**, С.О.Коноров**, А.Б.Федотов**, А.М.Жёлтчиков**

Экспериментально исследована трехмерная микроскопия плазмы оптического пробоя на основе генерации третьей гармоники (ГТГ). Показано, что ГТГ может быть использована как универсальный способ трехмерной микроскопии неоднородностей линейных и нелинейно-оптических характеристик среды. Вследствие нелинейно-оптического характера процесса микроскопия с использованием ГТГ позволяет повысить поперечное пространственное разрешение по сравнению с традиционными методами спектроскопии. Высокое пространственное разрешение вдоль направления зондирования достигается за счет снятия запрета на ГТГ в режиме жесткой фокусировки при наличии неоднородностей линейных и/или нелинейных оптических характеристик среды.

Ключевые слова: генерация третьей гармоники, трехмерная микроскопия, лазерная плазма.

Введение

В последнее время активно обсуждается возможность использования генерации третьей гармоники (ГТГ) для микроскопии биологических объектов [1–4]. Основная идея данного метода заключается в том, что в режиме жесткой фокусировки сигнал третьей гармоники из однородной бесконечной непоглощающей среды с нормальной дисперсией равен нулю вследствие деструктивной интерференции волн третьей гармоники, генерируемых до и после фокальной области. В случае, когда излучение накачки фокусируется на границу между средами, нарушение симметрии задачи приводит к возникновению ненулевого сигнала третьей гармоники. Данный метод позволяет достичь высокого пространственного разрешения при получении микроскопических изображений биологических объектов [3, 5].

Цель настоящей работы – показать, что метод, основанный на процессе ГТГ, является не только способом визуализации границы между средами с разными показателями преломления, но может быть также использован в качестве универсального метода микроскопии неоднородностей пространственного распределения линейных (коэффициент поглощения и показатель преломления) и нелинейно-оптических (нелинейно-оптическая кубическая восприимчивость) параметров среды. Представленные экспериментальные данные показывают, что использование ГТГ дает возможность реализовать схему трехмерной микроскопии плазмы, позволяющую находить положение границы лазерной плазмы и неоднородностей пространственного распределения плотности частиц в плазме с пространственным разрешением, определяемым конфокальным параметром пучка накачки.

1. Основная идея метода

Мощность сигнала третьей гармоники в случае гауссова пучка накачки определяется выражением, хорошо известным из классических работ по нелинейной оптике [6]:

$$P_3 = \frac{768\pi^2 |\chi^{(3)}|^2}{n_3 \lambda_1^4 c^2} P_1^3 G, \quad (1)$$

где P_1 , λ_1 и n_1 – мощность, длина волны в вакууме и показатель преломления волны накачки соответственно; n_3 – показатель преломления третьей гармоники; $\chi^{(3)}$ – нелинейная восприимчивость среды третьего порядка;

$$G = \left| \int_{-2f/b}^{2(L-f)/b} \frac{\exp[-ib\Delta k \xi/2]}{(1+i\xi)^2} d\xi \right|^2 \quad (2)$$

– интеграл фазового согласования; Δk – фазовая расстройка ГТГ; L – длина нелинейной среды; f – координата перетяжки; b – конфокальный параметр пучка накачки.

Изменение знака фазы гауссова пучка в фокусе в режиме жесткой фокусировки в нелинейную среду ($L-f, f \gg b$) приводит к деструктивной интерференции сигналов третьей гармоники, генерируемых до и после точки фокуса. В результате в средах с нормальной дисперсией сигнал третьей гармоники оказывается равным нулю. Возникновение неоднородности показателя преломления, поглощения или нелинейной восприимчивости в фокальной области вызывает нарушение условий деструктивной интерференции, снимая запрет на ГТГ. Влияние фазового синхронизма и поглощения на генерацию оптических гармоник в плазме оптического пробоя исследовалось ранее как теоретически, так и экспериментально (см., напр., [7]).

Рассмотрим подробнее случай жесткой фокусировки в двухслойную нелинейно-оптическую среду, нелинейно-оптическая восприимчивость которой меняется скачком от нуля до некоторой величины χ на границе между сло-

*Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

**Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

ями, а остальные параметры постоянны во всем объеме среды. Из формул (1) и (2), видно, что в этом случае мощность третьей гармоники пропорциональна χ^2 . На рис.1 показано, что третья гармоника генерируется при фокусировке в область размером порядка конфокального параметра, расположенную вблизи границы слоев.

Таким образом, в соответствии с нашими интуитивными ожиданиями микроскопия ГТГ позволяет характеризовать неоднородность нелинейной восприимчивости и ее положение с пространственным разрешением, определяемым конфокальным параметром пучка накачки. Заметим, что в силу принципа суперпозиции полей гармоники, если нелинейно-оптическая восприимчивость меняется скачком на χ от некоторого ненулевого уровня, мощность третьей гармоники будет такой же, как и в рассмотренном выше примере.

2. Экспериментальная техника

Метод микроскопии ГТГ применялся нами для исследования плазмы оптического пробоя, создаваемой излучением Nd:YAG-лазера с энергией 150 мДж и длиной волны 1.06 мкм. Длительность импульсов составляла 15 нс. Для ГТГ использовалось излучение Nd:YAG-лазера с энергией не более 10 мДж и длительностью импульсов 15 нс, синхронизованного с лазером, создающим плазму (рис.2). Измерения производились при времени задержки между импульсом, создающим плазму, и импульсом, генерирующим третью гармонику, равным 3.5 мкс. Диаметр пучка накачки в фокусе составлял 12 мкм, конфокальный параметр пучка был равен 300 мкм.

Зондирование плазмы производилось вдоль оси x (рис.2). Изображение плазмы получалось путем сканирования лазерной искры относительно жестко сфокусированного пучка основного излучения по трем координатам. Шаг сканирования по вертикальной координате z составлял 100 мкм, по продольной координате x – 500 мкм, по поперечной координате y – 100 мкм. Результаты измерения энергии сигнала третьей гармоники усреднялись по 50 лазерным импульсам. При построении тоновых карт энергии сигнала третьей гармоники как функции пространственных координат использовался стандартный трехточечный метод сглаживания.

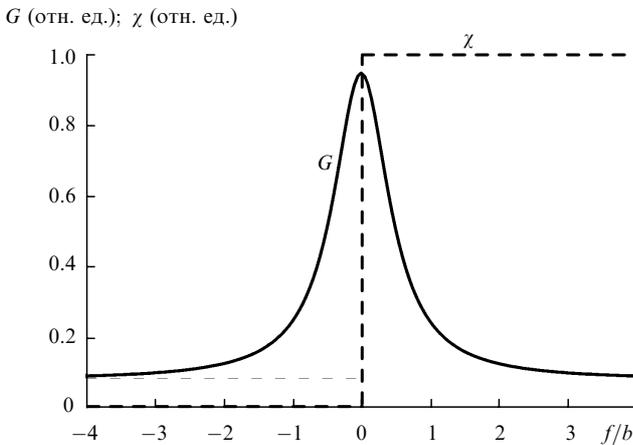


Рис.1. Зависимости интеграла фазового согласования G и нелинейно-оптической восприимчивости в фокусе пучка накачки χ от пространственного положения фокуса в схеме ГТГ при конфокальном параметре $b = 0.02$ см и $\Delta k = 2$ см $^{-1}$ (в воздухе при нормальных условиях на длине волны 1.064 мкм).

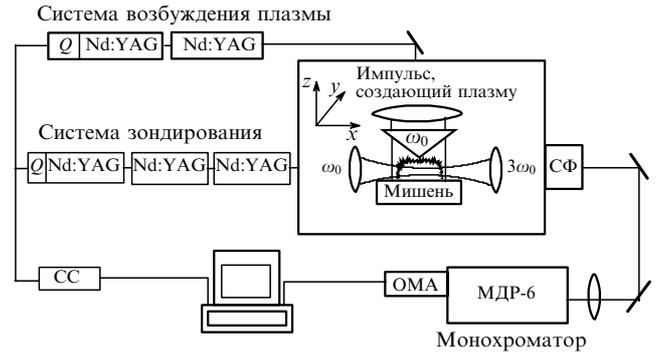


Рис.2. Схема экспериментальной установки для микроскопии лазерной плазмы методом ГТГ:

ОМА – оптический многоканальный анализатор; СФ – светофильтр; СС – система синхронизации.

3. Результаты и обсуждение

На рис.3 представлены двумерные карты пространственного распределения энергии третьей гармоники из различных областей плазмы, полученные путем сканирования лазерной искры относительно жестко сфокусированного пучка накачки вдоль координат x и y в горизонтальной плоскости. Уровнями серого тона показана энергия третьей гармоники в относительных единицах. Плазма оптического пробоя создавалась на поверхности мишеней из свинца (рис.3,а) и меди (рис.3,б). Представленные на рис.3 распределения энергии третьей гармоники измерялись в горизонтальной плоскости на высоте 1.1 мм (рис.3,а) и 0.5 мм (рис.3,б) от поверхности мишени.

Измеренное по описанной процедуре трехмерное пространственное распределение энергии третьей гармоники позволяет получить информацию о распределении внутренних неоднородностей плотности частиц в плазме и о положении ее границ. В частности, темные области на рис.3,а отчетливо указывают на положение границ возбужденного газа в случае лазерной плазмы, создаваемой на поверхности свинцовой мишени. Если плазма создается на поверхности медной мишени, как следует из кар-

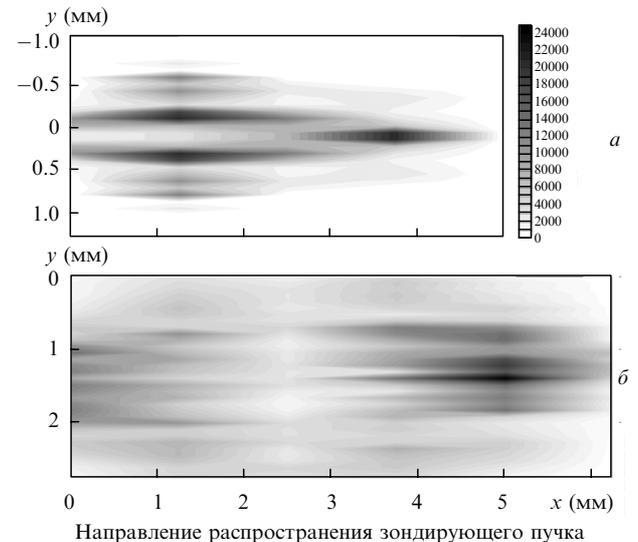


Рис.3. Карта распределения энергии третьей гармоники из плазмы оптического пробоя, создаваемого на мишени из свинца на высоте 1.1 мм от поверхности мишени (а) и на мишени из меди на высоте 0.5 мм от поверхности мишени (б).

ты, представленной на рис.3,б, границы возбужденного газа оказываются гораздо более размытыми.

Задача извлечения информации о пространственном распределении отдельных линейных и нелинейно-оптических характеристик плазмы, как видно из выражений (1) и (2), довольно сложна и вряд ли может быть решена в общем виде. Однако в целом ряде практически важных случаев, включая задачи построения изображений возбужденных газовых сред и биологических объектов (см. [1–5]), возможность визуализации пространственного распределения определенной комбинации параметров среды, обеспечиваемая методом ГТГ, представляется чрезвычайно полезной, т.к. при этом можно получить качественное представление о пространственном положении объекта, общих тенденциях изменения его параметров в пространстве и даже оценить характерные пространственные масштабы объекта.

Вследствие нелинейно-оптического характера процесса пространственное разрешение метода ГТГ-микроскопии плазмы в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка накачки, может быть оценено как 12 мкм. Пространственное разрешение в направлении зондирования, как показано выше, определяется конфокальным параметром и составляет в наших экспериментах 300 мкм. Результаты измерений, выполненных методом ГТГ, согласуются в пределах экспериментальных погрешностей и пространственного разрешения метода с данными, полученными методами эмиссионной спектроскопии, когерентной четырехфотонной спектроскопии [8], а также путем построения оптического изображения лазерной искры на фотокамере.

Заключение

Таким образом, ГТГ может быть использована в качестве универсального способа трехмерной микроскопии неоднородностей линейных и нелинейно-оптических характеристик среды. Вследствие своего нелинейно-оптического характера ГТГ-микроскопия позволяет повысить поперечное пространственное разрешение по срав-

нению с традиционными методами спектроскопии. Разрешение вдоль направления зондирования достигается за счет снятия запрета на ГТГ в режиме жесткой фокусировки при наличии неоднородности линейных и/или нелинейных оптических характеристик среды.

Работа выполнена при поддержке гранта № 00-15-99304 Президента Российской Федерации, гранта РФФИ № 00-02-17567, гранта ИНТАС № 97-0369, а также Государственных научно-технических программ России «Фундаментальная метрология» и «Фундаментальная спектроскопия».

1. Barad Y., Eizenberg H., Horowitz M., Silberberg Y. *Appl.Phys.Letts*, **70**, 922 (1997).
2. Muller M., Squier J., Wilson K.R., Brakenhoff G.J. *J.Microsc.*, **191**, 266 (1998).
3. Squier J., Muller M., Brakenhoff G.J., Wilson K.R. *Opt.Express*, **3**, 315 (1998).
4. Yelin D., Silberberg Y., Barad Y., Patel J.S. *Appl.Phys.Letts*, **74**, 3107 (1999).
5. Yelin D., Silberberg Y. *Opt.Express*, **5**, 169 (1999).
6. Reintjes J.F. *Nonlinear optical parametric processes in liquids and gases* (N.Y., Acad.Press, 1984).
7. Fedotov A.B., Koroteev N.I., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **5**, 835 (1995); Zheltikov A.M., Koroteev N.I., Naumov A.N., Fedotov A.B. *Laser Physics*, **6**, 49 (1996).
8. Akimov D.A., Fedotov A.B., Koroteev N.I., Miles R.B., Naumov A.N., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M. *Optics Letts*, **24**, 478 (1999); Akimov D.A., Fedotov A.B., Koroteev N.I., Miles R.B., Naumov A.N., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M. *J.Raman Spectrosc.* (in press).

D.A.Sidorov-Biryukov, A.N.Naumov, S.O.Konorov, A.B.Fedotov, A.M. Zheltikov. Three-dimensional microscopy of a laser plasma by the method of third harmonic generation.

Three-dimensional microscopy of the optical breakdown plasma is studied experimentally by the method of third harmonic generation (THG). It is shown that THG can be used as a versatile technique for three-dimensional microscopy of the inhomogeneities of linear and nonlinear optical parameters of a medium. The nonlinear THG microscopy allows one to improve the transverse spatial resolution compared to that inherent in conventional spectroscopy methods. A high spatial resolution along the probing direction is achieved due to the lift of the forbiddenness of THG upon tight focusing in the presence of inhomogeneities of linear and (or) nonlinear optical parameters of the medium.