

Лазерная установка с использованием нелинейных оптических эффектов и ее применение для зондирования высокотемпературной импульсной плазмы

Ю.Г.Калинин, А.В.Корельский, Е.В.Кравченко, А.Ю.Шашков

Рассмотрен лазерный диагностический комплекс, в котором для зондирования имплодирующей плазмы на сильноточном генераторе С-300 используется излучение второй гармоники YAG: Nd-лазера. Комплекс позволяет проводить пятикадровое теневое фотографирование высокотемпературной импульсной плазмы с экспозицией 1 нс и интервалом 10 нс. Укорочение лазерного импульса осуществляется в результате вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в четыреххлористом углероде. Получены серии теневых фотографий различных короткоживущих плазменных образований. Оценены плотность плазмы и скорость ее движения.

Ключевые слова: лайнер, Z-пинч, лазерное зондирование, вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, теневая фотография.

1. Лазерное зондирование (интерферометрия, теневая и шпирен-фотография и т.д.) давно является классическим методом диагностики имплодирующей плазмы, позволяющим судить о поведении плазмы с вполне определенными плотностями или их градиентами. Однако использование таких методов на мощных импульсных сильноточных генераторах требует решения целого ряда проблем, связанных с конструктивными особенностями последних и спецификой проводимых экспериментов. Типичные условия эксперимента – это большие расстояниями между источником зондирующего излучения и исследуемым объектом, сравнительно малые размеры объекта, очень высокий уровень электромагнитных помех в экспериментальном зале и прилегающих помещениях и, наконец, необходимость жесткой временной синхронизации лазерного зондирующего импульса с импульсом тока установки с точностью до нескольких наносекунд.

В настоящей работе рассмотрен лазерный диагностический комплекс для зондирования плазмы на сильноточном генераторе С-300 [1], достаточно удобный, по нашему мнению, для применения в подобных условиях.

Восьмимодульный генератор С-300 (рис.1) с током $I = 4$ МА, временем его нарастания $\tau = 100$ нс и импедансом 0.15 Ом предназначен для экспериментов с высокотемпературной импульсной плазмой (легкие лайнеры и Z-пинчи) [1]. Объекты наблюдения и исследования размещаются в центре вакуумной камеры. Входное и выходное диагностические окна диаметром 100 мм находятся от них на равных расстояниях (~ 2.4 м), определяющих величину апертурного угла (не более 2.5°) для зондирующих пучков.

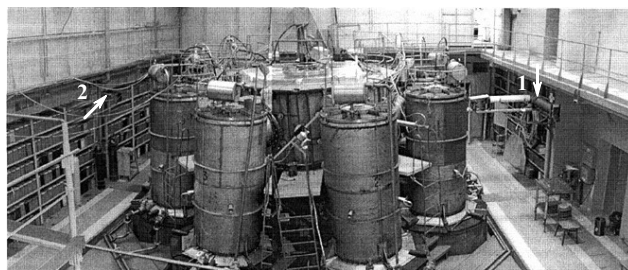


Рис.1. Общий вид сильноточного импульсного генератора С-300 (стрелкой 1 отмечена фотокамера, стрелкой 2 – кронштейн с поворотными зеркалами).

2. Лазерный диагностический комплекс состоит из зондирующей лазерной установки и приемной части. Приемная часть комплекса, служащая для фотографической регистрации теневых изображений плазмы, включает в себя объектив ($f = 1600$ мм), который строит изображение плазменного объекта с увеличением $2\times$, и камеру, снабженную необходимым набором светофильтров и кассетой с фотопластинкой. Отклоняющие клинья с преломляющим углом 1° , расположенные вблизи фокальной плоскости объектива, разводят зондирующие объект пучки на необходимое расстояние в плоскости изображений. Разрешающая способность системы для неподвижных объектов составляет не менее 35 штр./мм.

Лазерная зондирующая установка располагалась в отдельном помещении. Расстояние между лазерным комплексом и мишенным узлом превышало 18 м.

Предел пространственного разрешения δ при движении плазмы в направлении, перпендикулярном зондирующему пучку, определяется произведением скорости движения плазмы на длительность зондирующего импульса: $\delta = vt$. Известно, что скорости движения плазмы достигают 5×10^7 см/с. Следовательно, для поддержания пространственного и временного разрешения используемого диагностического метода на необходимом уровне длительность зондирующего лазерного импульса не должна превышать 1 нс.

Ю.Г.Калинин, А.В.Корельский, Е.В.Кравченко, А.Ю.Шашков РНЦ «Курчатовский институт», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова, 1; e-mail: kalinin@dap.kiae.ru, alexkrl@mail.ru, gladiolus@newmail.ru, shash@issph.kiae.ru

Поступила в редакцию 8 января 2004 г.

Для уменьшения экспозиции была применена компрессия импульса задающего генератора при вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в нелинейной оптической среде. Такой метод укорочения лазерного импульса имеет ряд преимуществ по сравнению с электрооптическим. Это, прежде всего, увеличение мощности за счет высокого уровня перекачки энергии из исходного импульса (накачки) в рассеянный (стоксов) импульс и возможность усиления стоксова излучения лазерными усилителями накачки, а также отсутствие какой-либо задержки между исходным и сжатым импульсами. Наконец, ВРМБ не создает дополнительных проблем при синхронизации лазерного комплекса с экспериментальной установкой. Заметим, что явления обращения волнового фронта (ОВФ) и компрессии импульса в различных нелинейных оптических средах при ВРМБ подробно исследовались многими авторами (см., напр., [2–8]) и уже применяются в диагностике плазмы [9, 10].

Оптическая схема передающей части комплекса приведена на рис.2. Задающий генератор (ЗГ) на $YAG:Nd$ с электрооптическим затвором работал с небольшим превышением уровня накачки над порогом генерации на основной поперечной моде TEM_{00} с длительностью импульса 7 нс и энергией 0.3–0.5 мДж. Длина резонатора составляла 20 см, диаметр выделяющей основную моду диафрагмы – 1 мм. Исследование продольной модовой структуры с помощью эталона Фабри–Перо показало, что ЗГ имеет случайным образом меняющийся от импульса к импульсу набор мод (от одной до пяти-шести).

Следует отметить, что во всех работах по ОВФ и компрессии использовались одночастотные источники накачки, обычно $YAG:Nd$ -лазер с пассивной модуляцией добротности резонатора. Однако и в нашем случае удалось получить достаточно стабильное сжатие исходного импульса до 1.2 нс.

Импульс ЗГ 1 проходил через ячейку Фарадея 2, поворачивающую плоскость поляризации на 45° , пространственную развязку 4, состоящую из интерференционного поляризатора и четвертьволновой пластинки, и поступал на два однопроходных усилителя 5. Усиленный сигнал фокусировался линзой 6 ($f = 900$ мм) в кювету 7 длиной 1300 мм, заполненную четыреххлористым углеродом. Рассеянный обратно стоксов импульс усиливался и с помощью развязки 4 направлялся на каскады генераторов второй гармоники. Первые три из них содержали одно-

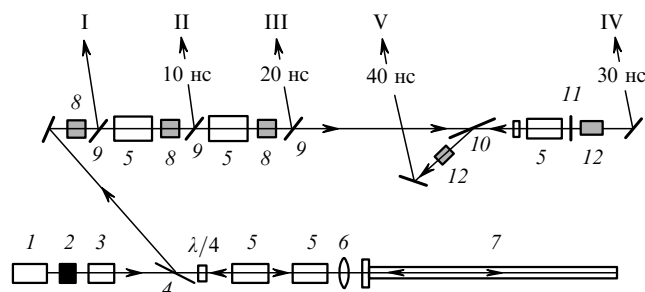


Рис.2. Оптическая схема передающей части лазерного диагностического комплекса:

1 – задающий $YAG:Nd$ -генератор; 2 – ячейка Фарадея; 3 – телескоп; 4, 10 – пространственные развязки; 5 – $YAG:Nd$ -усилители; 6 – линза ($f = 900$ мм); 7 – кювета рассеяния с CCl_4 ($l = 1300$ мм); 8, 12 – нелинейные кристаллы; 9 – селективные зеркала; 11 – зеркало с коэффициентом отражения 30%. Все пять пучков второй гармоники (I–V) проходят свои оптические линии задержки и направляются на входное диагностическое окно.

проходный усилитель 5, нелинейный кристалл ниобата лития или КТР 8 и селективное зеркало 9, которое отводило излучение второй гармоники. Излучение основной частоты проходило в прямом направлении для дальнейшего усиления и ГВГ в последующих каскадах. После этого оно поступало на пространственную развязку 10 и усиливалось. Зеркало 11 (коэффициент отражения 30%) отражало часть сигнала, частота прошедшего через зеркало излучения удваивалась в кристалле КТР 12. Этот пучок второй гармоники являлся четвертым зондирующим пучком. Отраженное от зеркала 11 излучение усиливалось при обратном проходе, отклонялось развязкой 10 и удваивалось по частоте в другом кристалле КТР (пятый зондирующий пучок).

Все пять пучков второй гармоники поступали на систему зеркал (на рис.2 не показана), которая формировала 10-наносекундные задержки зондирующих лазерных импульсов друг от друга и направляла их в экспериментальную установку, а затем в приемную часть комплекса. Длительность импульсов второй гармоники не превышала 1 нс, а их энергия составляла 3–5 мДж, что больше энергии собственного свечения плазмы.

Описанный метод последовательного «отщепления» каждого пучка второй гармоники существенно уменьшает лучевую нагрузку на нелинейные кристаллы и другие оптические элементы по сравнению с традиционной схемой деления выходного пучка и с минимальными затратами позволяет наращивать число зондирующих пучков. В представляемой схеме генерации зондирующих пучков все лазерные и нелинейные оптические элементы работают в режиме, далеком от предельных нагрузок. Это существенно повышает надежность работы комплекса и позволяет проводить юстировку и отладку всей диагностической системы в импульсно-периодическом режиме работы с частотой следования 0.25–0.5 Гц, что особенно важно в экспериментах на больших ускорителях. Следует отметить, что такая невысокая частота повторения определялась возможностями блоков питания ламп накачки, а не процессами при ВРМБ, которые позволяют получать стабильную компрессию лазерного импульса при частотах следования до 10 Гц и выше [4, 6, 8].

Теневые пятикадровые фотографии плазмы Z-пинча приведены на рис.3. Такие же фотографии плазмы сжимающихся лайнеров – на рис.4.

Изучая полученные изображения плазменных образований, можно оценить значения плотности плазмы, скоростей и размеров отдельных ее фрагментов, а следовательно, сделать выводы о том, как развивается процесс имплозии. В частности, обсудив возможные причины формирования темных изображений на фотографиях, авторы считают, что более вероятным является образование тени из-за обратного тормозного поглощения зондирующего излучения в плазме, т. к. оно происходит при меньших плотностях на периферии плазмы объекта [11]. В нашем случае минимальная ионная плотность для плазмы металлов может составлять $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, для других объектов – $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, с помощью описанного лазерного диагностического комплекса нам удалось исследовать горячие импульсные плазменные объекты с плотностями выше указанных, наблюдая их конфигурации и изменения во времени. В эксперименте с Z-пинчами впервые обнаружены мелкомасштабные плазменные образования каплевидной формы со скоростями разлета (2–5)

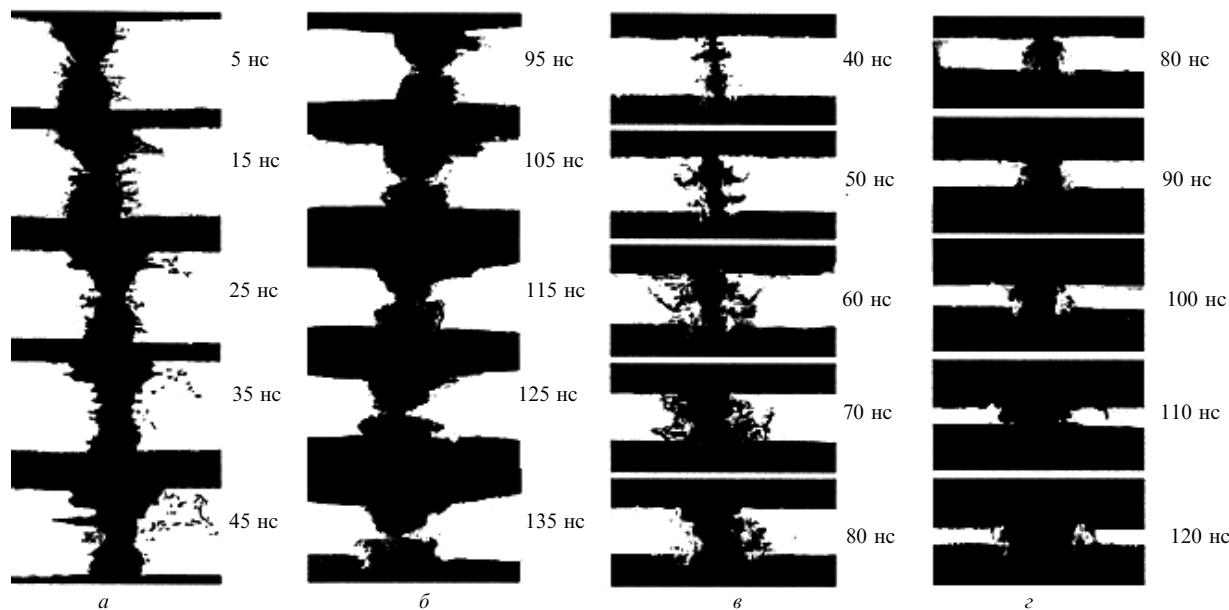


Рис.3. Пятикадровые теневые фотографии различных Z-пинчей в профилированном агар-агаре диаметром 5 мм и длиной 1 см при токе через нагрузку 1.9 (а) и 1.65 МА (б) и в медной проволочке диаметром 120 мкм и длиной 0.8 см при токе через нагрузку 1.75 (в) и 2.7 МА (г); справа от кадров – задержка экспозиции относительно начала тока генератора С-300.

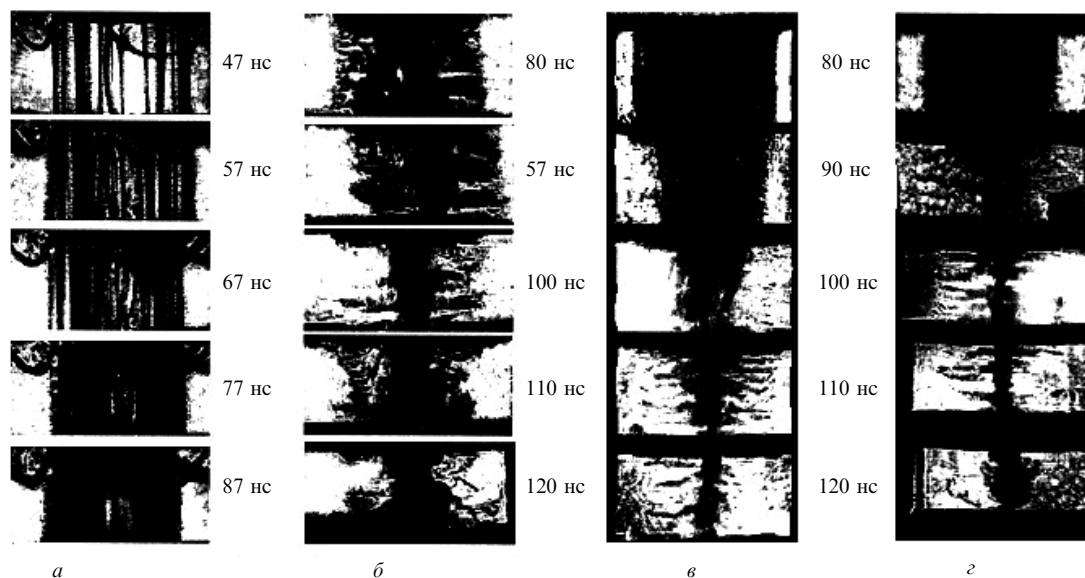


Рис.4. Пятикадровые теневые фотографии сжимающихся проволочных лайнеров диаметром 1.2 см и длиной 1 см: а – лайнер из 12 вольфрамовых проволочек диаметром 6 мкм и 12 алюминиевых проволочек диаметром 25 мкм, ток через нагрузку 2.6 МА; б – лайнер (погонная масса 440 мкг/см) из 80 вольфрамовых проволочек диаметром 6 мкм, ток через нагрузку 2.6 МА; в – лайнер (погонная масса 440 мкг/см) из 80 вольфрамовых проволочек диаметром 6 мкм, скорость движения плазмы 1.3×10^7 см/с, ток через нагрузку 2.6 МА; г – лайнер (погонная масса 264 мкг/см) из 48 вольфрамовых проволочек диаметром 6 мкм, скорость движения плазмы 2.6×10^7 см/с, ток через нагрузку 2.1 МА. Справа от кадров – задержка экспозиции относительно начала тока генератора С-300, снимки в и г сделаны с одинаковой задержкой.

$\times 10^7$ см/с. При исследовании плазмы лайнеров измеренные скорости схлопывания достигали 5×10^7 см/с.

Авторы весьма признательны П.И.Блинову за большую помощь в настройке и отладке самых разных элементов диагностического комплекса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-02-17359).

1. Chernenko A.S. et al. *Proc. XI Int. Conf. Power Particles Beams* (Prague, 1996, p.154).
2. Власов Д.В. *ЖЭТФ*, **64**, 1986 (1973).
3. Горбунов В.А., Иванов В.Б., Паперный С.Б., Старцев В.Р. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **48** (8), 1580 (1984).
4. Бузалис Р.Р., Дементьев А.С., Косенко Е.К. *Квантовая электро-*

ника, **12** (10), 2024 (1985).

5. Бельдогин И.М., Зельдович Б.Я., Золотарев М.В., Шкунов В.В. *Квантовая электроника*, **12** (12), 2394 (1985).
6. Багдасаров В.Х., Денисов Н.Н., Пашинин П.П., Шкловский Е.И. *Квантовая электроника*, **14** (7), 1364 (1987).
7. Белоусов В.Н., Низинко Ю.К. *Препринт ИАЭ-4707/7* (М., 1988).
8. Alliaga-Rossel R., Bayley J., Mamin A., Nizienko Y. *Proc. IV Int. Conf. Dense Z-pinchs* (Vancouver, AIP Conf. Proc., 1997, p. 463).
9. Lebedev S.V., Alliaga-Rossel R., Chittenden J.P., Dangor A.E., Haines M.G., Worley J.F., Saavedra R. *Proc. IV Int. Conf. Dense Z-pinchs* (Vancouver, 1997, p.79).
10. Kalinin Yu.G., Korel'skii A.V., Kravchenko E.V., Shashkov A.Yu. *Probl. Atomic Science and Technol.*, No.4, 193 (2002).
11. Калинин Ю.Г., Корельский А.В., Кравченко Е.В., Шашков А.Ю. *Физика плазмы*, **28** (9), 858 (2002).