

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ СТРУКТУРА КОНУСА РАССЕЯНИЯ В ЛАЗЕРНОЙ ИСКРЕ

*И.А.Буфетов, Г.А.Буфетова, А.М.Прохоров, В.Б.Федоров*

*Институт общей физики РАН  
117942 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 июня 1993 г.

Впервые наблюдались интерференционные полосы в конусе лазерного излучения, рассеянного в плазме оптического пробоя воздуха. Предложено объяснение наблюдаемой картины как результат интерференции лазерного излучения, рассеянного в двух или более центрах самофокусировки в плазме лазерной искры в воздухе. Для различных частот лазерного излучения определена зависимость диаметра фокуса в плазме от давления газа в камере.

Многофокусная структура [1,2] самофокусировки интенсивного света изучалась экспериментально в различных нелинейных средах, но в лазерной плазме никогда ранее не наблюдалась. Относительно самофокусировки в лазерной искре в настоящее время, начиная с первых работ [3,4], известно лишь следующее [5]. Внутри каустики линзы, фокусирующей лазерный луч в область оптического пробоя газа, существует неоднородность коэффициента преломления плазмы с малым по сравнению с диаметром каустики поперечным размером. За искрой наблюдается конус рассеянного лазерного излучения с углом при вершине, превышающим угловую апертуру фокусирующей линзы. В настоящей работе впервые зафиксированы интерференционные полосы в конусе рассеяния, формирование которых может быть объяснено наличием многофокусной структуры самофокусировки лазерного излучения в искре.

В наших экспериментах конус рассеяния регистрировался путем фотографирования экрана, освещенного рассеянным лазерным излучением. Экран располагался параллельно оси искры на удалении  $(2 \div 6)$  мм от нее. Время экспозиции при фотографировании было большим в сравнении с временем жизни лазерной искры. Для получения искры использовалось излучение импульсного Nd-лазера, работавшего в режиме одной продольной моды с длиной волны  $\lambda_0 = 1,06$  мкм и расходимостью, близкой к дифракционной. Энергия лазерного импульса во всех опытах составляла  $(0,2 \div 4)$  Дж, длительность  $\approx 10$  нс, диаметр луча на фокусирующей линзе – 40 мм. Лазерный импульс имел относительно резкий ( $\approx 1$  нс) передний фронт и сравнительно медленный временной ход амплитуды на заднем фронте. Лазерное излучение или, после преобразования в кристаллах KDP, излучение его второй, третьей или четвертой гармоник фокусировалось с помощью длиннофокусной линзы  $f = 1$  м внутрь камеры в каустику длиной 2 мм и диаметром 80 мкм. Лазерная искра в фокусе линзы изучалась при давлении воздуха в камере от 10 до 760 торр.

Интерференционная картина внутри конуса рассеяния (см. рис.1) наблюдалась нами в экспериментах с первой, второй и третьей гармониками неодимового лазера при сравнительно небольших энергиях в импульсе ( $\leq 0,5$  Дж) и высоких давлениях ( $p \sim 1$  атм). При больших энергиях и снижении давления контраст полос уменьшался или они не наблюдались вовсе. Наиболее четко полосы наблюдались при пробое воздуха при  $p = 1$  атм излучением с длиной

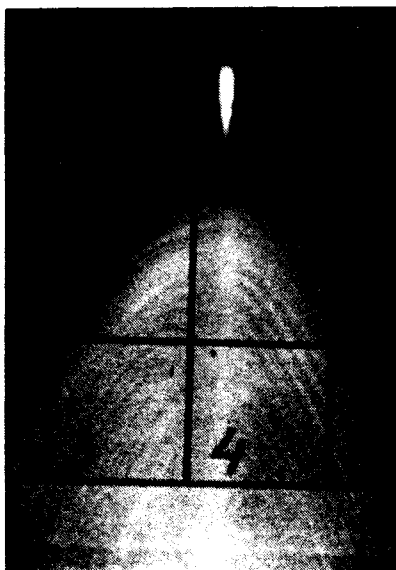


Рис.1

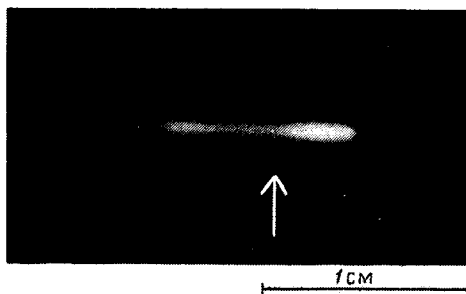


Рис.2

Рис.1. Интегральная по времени фотография экрана, освещенного рассеянным в искре лазерным излучением. Луч лазера распространяется справа налево. Перед конусом рассеяния находится изображение искры,  $\lambda = 0,353$  мкм,  $p = 760$  торр, расстояние от оси искры до экрана 6 мм. На экране нанесена масштабная сетка со стороной 1 см

Рис.2. Интегральная по времени фотография лазерной искры со следом движения фокуса. Луч лазера распространяется справа налево. Стрелкой обозначено положение точки фокусировки. Часть искры слева от стрелки формируется на спаде лазерного импульса со скоростью более  $10^8$  см/с,  $\lambda = 0,265$  мкм,  $p = 102$  торр

волны  $\lambda = 0,353$  мкм. В экспериментах с четвертой гармоникой интерференционная структура рассеянного в искре излучения нами не обнаружена во всем диапазоне экспериментальных условий.

Вид полос на рис.1 аналогичен интерференционной картине от двух когерентных источников, расположенных на оси искры, причем расстояние между ними много меньше расстояния между экраном и осью лазерного луча. Если каждый из источников является вершиной конуса рассеяния, то при наложении этих конусов на экране должны наблюдаться интерференционные полосы в виде системы вложенных гипербол, что соответствует рис.1. Измеренные по рис.1 углы между асимптотами темных полос и расстояния между соседними темными полосами позволяют оценить в этом эксперименте расстояние между источниками излучения  $\approx 50\lambda = 18$  мкм. В экспериментах с другими гармониками оценки расстояния между источниками также дают величины порядка 20 мкм. Это расстояние значительно меньше длины фокальной области.

Образование такой структуры в искре может быть объяснено на основе самофокусировки в плазме с формированием двух или более центров самофокусировки. При наличии нескольких неэквидистантно расположенных точек фокусировки и, тем более, при их движении во время лазерного импульса интерференционная картина должна получаться смазанной. Если же возникают только две точки самофокусировки, расстояние между которыми вблизи

максимума импульса изменяется мало, то появляется возможность регистрации интерференции и на интегральной по времени фотографии, что демонстрирует рис.1. Наконец, если образуется только один центр самофокусировки, интерференционная картина полностью отсутствует, что соответствует, по-видимому, нашим опытам с четвертой гармоникой. Отсутствие в них наблюдаемой системы интерференционных полос может быть обусловлено возрастанием пороговой мощности самофокусировки с уменьшением длины волны.

На заднем фронте лазерного импульса, когда мощность излучения снижается и возрастает величина длины самофокусировки, возможно наблюдение движения точки самофокусировки за пределами первоначальной области оптического пробоя, если оно сопровождается ионизацией газа. С этой целью нами регистрировалось с помощью электронно-оптической камеры движение фронтов плазмы по ее собственному свечению. Измерения показали, что после пробоя газа плазма движется навстречу лазерному лучу со скоростью до  $\sim 10^7$  см/с. При давлениях  $p \sim 1$  атм плазма по лучу практически не распространяется. Но при пониженных давлениях на спаде мощности лазерного импульса имеет место кратковременное, в течение  $\approx 1$  нс, возрастание скорости движения фронта плазмы по лазерному лучу до величин более  $10^8$  см/с. Вне этого отрезка времени его скорость составляет менее  $10^7$  см/с. На рис.2 тонкий "хвост" искры соответствует участку движения фронта плазмы со скоростью  $\geq 10^8$  см/с. Данные результаты могут быть объяснены [2] как следствие увеличения длины самофокусировки до величин, превышающих размеры плазмы, на заднем фронте лазерного импульса. При этом точка схождения лучей частично сфокусированного пучка перемещается по оси луча за пределы плазмы искры, образуя тонкий след.

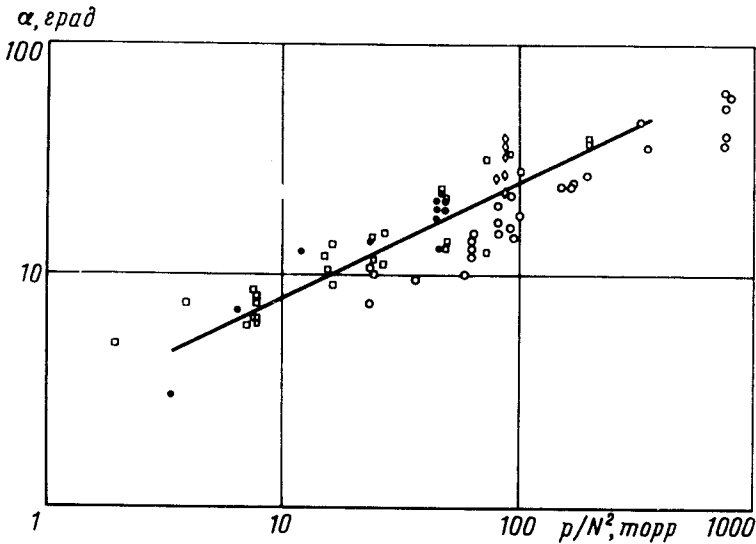


Рис.3. Максимальный угол рассеяния лазерного излучения в искре  $\alpha$  в опытах с  $N$ -ой гармоникой излучения лазера и давлением  $p$  в камере. Сплошная линия - аппроксимация  $\alpha_0 = 2,5[p(\text{торр})/N^2]$  град,  $\circ$  -  $\lambda = 1,06$  мкм;  $\square$  -  $\lambda = 0,53$  мкм;  $\diamond$  -  $\lambda = 0,353$  мкм;  $\bullet$  -  $\lambda = 0,265$  мкм

В большинстве экспериментов фотографии, подобные представленной на рис.1, позволяют определить максимальный угол рассеяния лазерного излучения в искре – угол  $\alpha$  между осью конуса рассеяния и его образующей. Наблюдается (см. рис.3) вполне определенная зависимость  $\alpha(p/N^2)$ , которая хорошо аппроксимируется как  $\alpha_0 = 4,4 \cdot 10^{-2} [p(\text{торр})/N^2]$  рад. Здесь  $N$  – номер гармоники излучения Nd-лазера.

Полученные результаты позволяют оценить поперечный размер области самофокусировки  $d$  по соотношению  $\sin \alpha = 1,22\lambda/d$ . Учитывая, что  $\lambda = \lambda_0/N$ , и используя аппроксимацию для  $\alpha_0$ , в области  $\alpha_0 < 1$  получим  $d \approx 30\lambda_0 [p(\text{торр})]^{-1/2}$ , то есть в наших условиях минимальный диаметр луча при самофокусировке в плазме не зависит от длины волны лазерного излучения и определяется только давлением  $p$ .

Зависимость  $d \sim p^{-1/2}$  может иметь следующее объяснение. Если считать, что в плазме реализуется самофокусировка с несколькими центрами, и в каждый фокус входит мощность порядка пороговой для самофокусировки ( $P_0$ ), то величину  $d^2$  можно оценить как  $d^2 \approx P_0/I_{max}$ , где  $I_{max}$  – интенсивность лазерного излучения в центре самофокусировки. Величина  $I_{max}$  определяется из условия превышения создаваемого лазерным излучением стрикционного давления над тепловым давлением плазмы ( $n_e/n_{cr})(I_{max}/c) \approx n_e T_e$ . Здесь  $n_e$  – концентрация электронов, равная  $n_{cr}$  в критической точке,  $c$  – скорость света,  $T_e$  – температура. Если для стрикционного механизма самофокусировки в плазме [6] справедливо  $P_0 \approx 2cT_e n_{cr}/r_0 n_e$ , то получаем  $d \approx (r_0 n_e)^{-1/2}$ , здесь  $r_0$  – классический радиус электрона.

В то же время, в наших экспериментах при интенсивностях  $\sim 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> происходит, по-видимому, полная ионизация газа в фокальном объеме. В этом случае величина  $p$  полностью определяет концентрацию электронов  $n_e$ , если пренебречь разлетом плазмы; аппроксимирующая функция  $\alpha_0$  приобретает вид  $\alpha_0 = 2(n_e/n_{cr})^{1/2}$ , а соответствующее выражение  $d \approx \lambda/\alpha_0 \approx (r_0 n_e)^{-1/2}$ , что совпадает с приведенной выше теоретической оценкой. Совпадение оценок размеров пятна фокусировки, полученных из экспериментальных данных и из оценок на основании предположения о реализации многофокусной фокусировки в плазме, является дополнительным аргументом в пользу указанного предположения.

- 
1. А.Л.Дышко, В.Н.Луговой, А.М.Прохоров, Письма в ЖЭТФ **6**, 655 (1967).
  2. В.Н.Луговой, А.М.Прохоров, Письма в ЖЭТФ **7**, 153 (1968).
  3. A.J.Alcock and V.V.Korobkin, Phys. Rev. Lett. **21**, 1433 (1970).
  4. A.J.Alcock, C.DeMichelis, and M.C.Richardson, IEEE J.QE **6**, 622 (1970).
  5. В.В.Коробкин, Нелинейное распространение мощных световых пучков в лазерных экспериментах. Доклад по совокупности работ на соискание ученой степени д.ф.-м.н. М.: ИОФАН, 1988.
  6. J.F.Lam, B.Lippman, and F.Tappet, Phys. Fluids. **20**, 1176 (1977).