

04:07
©1994

ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМ ГОРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА РЕФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА

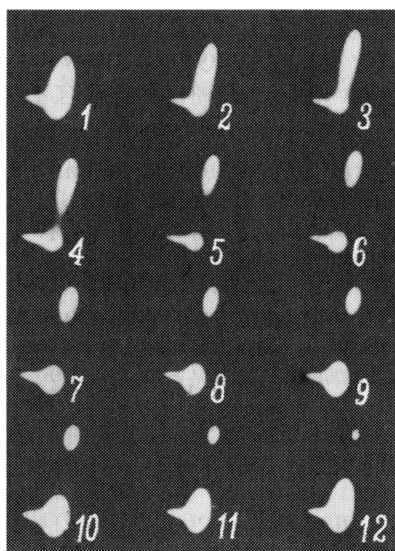
Г.И.Козлов, В.А.Кузнецов

В экспериментах по поджиганию оптического разряда в сфокусированном лазерном луче с помощью вносимой в область фокусировки металлической мишени [1] наблюдался любопытный эффект, связанный с периодическим “световым воспламенением” плазмы у мишени. При этом после очередного инициирования плазмы у мишени происходило распространение фронта волны светового горения (ВСГ) по лазерному лучу, которое завершалось распадом плазмы на некотором расстоянии от мишени. Вслед за распадом плазмы вблизи мишени наблюдался новый процесс “воспламенения”, и процесс повторялся. Такая периодичность процесса была характерной для длиннофокусных систем. Для короткофокусных же систем картина была иной: процесс распространения фронта ВСГ по лучу завершался локализацией плазмы в некоторой точке, расположенной вблизи области фокусировки. Это явление получило название непрерывного оптического разряда [2].

Однако неясно, почему в длиннофокусных системах плазма предпочитает распасться, а не отступить, скажем, назад в область больших значений интенсивности лазерного излучения. Что мешает ей сделать это? Быть может это связано со струей пара, возникающей в процессе взаимодействия мощного лазерного луча с мишенью?

С целью уточнения наших представлений об этом процессе и сведения к минимуму газодинамических эффектов мы провели эксперименты по анализу распространения фронта ВСГ по слабосходящемуся лучу CO_2 лазера мощностью 10 кВт в ситуации, когда в фокусе лазерного луча размещалась не металлическая мишень, как в работе [1], а непрерывно горящий оптический разряд, стационарное горение которого поддерживалось излучением другого CO_2 лазера.

Оказалось, что периодический процесс поджигания оптического разряда и распространения волны светового горения по лучу имеет место и для случая плазменной мишени. Покадровая фотография процесса представлена на



рисунке. Частота покадровой съемки составляла $2 \cdot 10^3$ кадров/с. В условиях наших экспериментов при фокусировке лазерного излучения линзой с фокусным расстоянием $f = 100$ см частота процесса воспламенения оптического разряда в мощном лазерном луче равнялась примерно 15 Гц.

Как следует из анализа представленных на рисунке снимков, картина процесса выглядит следующим образом: в начальный момент происходит зарождение волны светового горения от плазменного источника. Передний фронт волны распространяется по лазерному лучу (кадры 1-4), а за ним постепенно формируется перемычка из распадающейся плазмы. В некоторый момент времени (кадры 9-10) в результате распада плазмы образуется почти сферической формы плазмоид. Постепенно плазмоид уменьшается в своих размерах и, наконец, исчезает вовсе. Характерно, что по мере распада плазмоида и еще до его исчезновения вблизи плазменного источника происходит зарождение новой ВСГ (кадры 9-12), передний фронт которой сначала медленно, а потом все быстрее распространяется по лазерному лучу. И процесс повторяется.

Любопытно, что распад плазмы начинается как бы с тыла и распространяется в направлении переднего фронта ВСГ. Как следует из наших измерений, коэффициент по-

глощения воздушной плазмы при атмосферном давлении на длине волны 10.6 мкм составляет 0.42 см^{-1} и поэтому ослабление луча в плазме за счет поглощения не столь уж велико. Тогда почему же образуется перемычка и происходит распад плазмы на расстоянии всего 8–10 мм от переднего фронта ВСГ?

Причина этого, судя по представленным выше снимкам развития процесса, несомненно связана с рефракцией лазерного излучения на градиенте показателя преломления в плазме. Оценим возможную величину рефракции в условиях нашего эксперимента.

Световой луч, проходящий в направлении оси x участок плазмы длиной L с градиентом показателя преломления $\frac{dn}{dy}$ в направлении оси y , перпендикулярном лучу, постепенно отклоняется на угол α :

$$\alpha(y) = \int_0^L \frac{1}{n} \left(\frac{dn}{dy} \right) dx; \quad (1)$$

считая в первом приближении, что $\frac{dn}{dy}$ не зависит от x , получим:

$$\alpha(y) = \frac{L}{n} \frac{dn}{dy}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что искривление траектории луча в плазме будет происходить с радиусом кривизны R , равным:

$$R = \frac{n}{\frac{dn}{dy}}. \quad (3)$$

Отклонение луча δ от первоначального направления при прохождении в плазме пути длиной L составит:

$$\delta = \frac{L^2}{2R}. \quad (4)$$

Показатель преломления плазмы связан с электронной плотностью N_e и длиной волны излучения λ известным соотношением:

$$n = 1 - \frac{e^2}{2\pi mc^2} \cdot \lambda^2 N_e. \quad (5)$$

Из измерения параметров плазмы оптического разряда [3] следует, что распределение электронной плотности приближенно можно представить в виде:

$$N_e = N_m \cdot e^{-\frac{y}{\lambda_e}}. \quad (6)$$

Здесь λ_e — характерная длина изменения электронной плотности, а N_m — значение электронной плотности на оси луча. Тогда отклонение лазерного луча в плазме составит (в см):

$$\delta = 2.2 \cdot 10^{-14} \frac{\lambda^2 N_e L^2}{\lambda_e}. \quad (7)$$

Подставляя в это выражение характерные для условий наших экспериментов значения параметров плазмы оптического разряда ($N_e \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\lambda_e = 0.3 \text{ см}$, $L = 2 \text{ см}$) найдем, что величина отклонения лазерного луча в плазме в наших экспериментах может составлять $\delta \approx 0.1 \text{ см}$. Это весьма существенная величина. Таким образом, эффект рефракции очень сильный и сказывается на распределении интенсивности в плазме разряда уже на малых расстояниях от переднего фронта ВСГ.

Теперь развитие процесса можно представить в следующем виде. Передний фронт ВСГ распространяется по лучу до тех пор, пока не дойдет до сечения, где интенсивность будет соответствовать пороговому значению S_t для поддержания горения оптического разряда [4]. Оказывается, что при этих условиях плазмод в длиннофокусных системах существовать не может, так как интенсивность лазерного излучения на его переднем фронте равна S_t , а в глубь плазмы разряда интенсивность уменьшается $S < S_t$ из-за поглощения излучения плазмой и недостаточной компенсации за счет подфокусировки луча. В области задней кромки плазмоида ситуация будет еще хуже, так как вследствие рефракции и соответственно дефокусировки лазерного излучения происходит увеличение диаметра светового луча и падение интенсивности излучения. В этой области, как это видно из снимков, происходит распад плазмы оптического разряда. В результате из зоны распада в направлении переднего фронта разряда распространяется волна деионизации плазмы, которая уничтожает плазмод.

Любопытна характерная особенность развития процесса, заключающаяся в том, что пока плазмод существенно не уменьшится в своих размерах, граница плазмы иницирующего плазменного источника стоит практически на месте. Это однозначно указывает на сильную рефракцию лазерного излучения на плазмоеде.

В заключение отметим, что эффект рефракции лазерного излучения на плазме разряда был замечен нами еще в первых работах по получению непрерывного оптического разряда. Однако ее влияние на режим горения оптического разряда установлен только в ходе настоящих экспериментов. Следует также подчеркнуть, что рефракция безусловно оказывает значительное влияние на распределение

интенсивности лазерного излучения в плазме разряда, как это было установлено в ходе численных расчетов. Поэтому расчеты параметров плазмы мощных оптических разрядов, выполненные без ее учета, однозначно следует считать неточными.

Авторы выражают глубокую благодарность А.Д.Сокуренко за большую помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Klosterman E.L., Byron S.R.* // J. Appl. Phys. 1974. N 4. P. 4751.
- [2] *Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П.* // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 343.
- [3] *Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А.* // Оптика и спектроскопия. 1974. Т. 37. В. 6. С. 1049.
- [4] *Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А.* // ЖЭТФ. 1974. Т. 666. В. 3. С. 954.
- [5] *Гладуш Г.Г., Мамзер А.Ф., Явочкин А.Н.* // Физика плазмы. 1985. Т. 11. В. 3. С. 236.
- [6] *Райзер Ю.П., Силантьев А.Ю., Суржиков В.А.* // ТВТ. 1987. Т. 25. С. 454.

Институт проблем
механики,
Москва

Поступило в Редакцию
22 сентября 1991 г.
