

УДК 533.9.07

ДИНАМИКА СВОБОДНОГО РАЗЛЕТА СГУСТКА
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМЕС. Г. АРУТЮНЯН, Г. А. ГАЛЕЧЯН, К. Р. ДАРБИНЯН,
М. Г. САРКИСЯН

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

(Поступила в редакцию 26 декабря 1983 г.)

Работа посвящена экспериментальному исследованию пространственно-временного распределения параметров лазерной плазмы, разлетающейся в вакууме. Показано, что плазменный сгусток у поверхности твердой мишени под действием лазерного излучения ($\tau_n \approx 30$ нс) с плотностью мощности $W \approx 10^9$ Вт/см² отрывается от мишени и летит в направлении, перпендикулярном к поверхности мишени. Приводятся профили равной концентрации заряженных частиц для фиксированного момента времени.

Исследование лазерной плазмы помимо научной цели представляет также большой прикладной интерес. Плазма, образованная при воздействии сфокусированного излучения лазера с модулированной добротностью ($W \approx 10^9$ Вт/см²) на поверхность твердой мишени в вакууме, получила ряд практических применений, таких как лазерно-плазменные источники ионов, лазерный масс-анализ вещества, лазерное напыление материалов и др. В связи с этим появилось большое число как теоретических (например [1]), так и экспериментальных [2, 3] работ, посвященных исследованию параметров лазерной плазмы как вблизи мишени, так и на более поздних стадиях ее разлета в вакууме.

Однако до настоящего времени нет полной картины динамики образования и разлета лазерной плазмы. В частности, отсутствуют измерения пространственного распределения параметров лазерной плазмы, нет описания процесса формирования и отрыва плазменного сгустка от мишени и динамики его разлета в вакууме. Отрыв плазменного сгустка от мишени не следует также из результатов теоретических расчетов [4, 5] разлета плазмы в вакууме, проведенных в гидродинамическом приближении.

Излучение лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) с пассивной модуляцией добротности ($\tau_n \approx 30$ нс) фокусировалось на поверхности мишени из Al в пятно диаметром 0,5 мм. Энергия лазерного импульса составляла 0,2 Дж. В камере разлета поддерживался вакуум не хуже 10^{-4} Торр. Для диагностики плазмы использовались зонды длиной 3 мм и диаметром 0,8 мм, которые располагались в плоскости, перпендикулярной к поверхности мишени, в направлениях, составляющих углы 0, 15, 30, 45 и 60° с нормалью к мишени на расстояниях от 5 до 25 см от точки облучения через 2 см.

Сигналы с шести зондов одновременно регистрировались на осциллографах типа С8-14, что позволяло определять концентрацию плазмы в

6 точках одновременно. Это дает возможность исключить случайные отклонения, возникающие из-за разброса энергии импульсов лазера и соответственно параметров плазмы. По времени появления сигнала на зондах определялась скорость движения фронта плазмы в вакууме. Анализ осциллограмм показал, что скорость разлета плазмы на расстоянии 5—25 см не зависит от расстояния до мишени. Соответственно постоянной является и скорость движения максимальной концентрации плазмы. Как скорость движения фронта, так и скорость перемещения максимальной концентрации плазмы зависят от угла между направлением расположения зондов и нормалью к поверхности мишени. Как видно на рис. 1, обе эти скорости

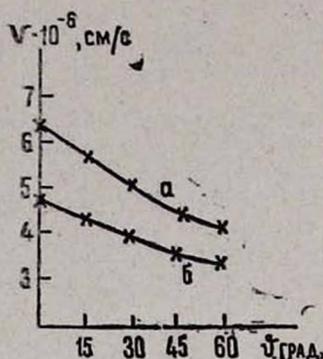


Рис. 1. Зависимость скорости разлета плазмы от угла между направлением расположения зондов и нормалью к поверхности мишени: а) скорость движения фронта плазмы; б) скорость движения максимума концентрации плазмы.

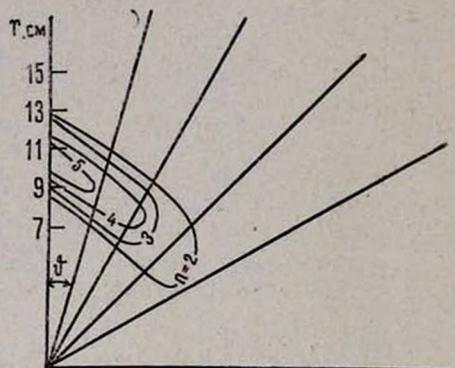


Рис. 2. Профили равной концентрации для $t = 1,2$ мкс; линии соответствуют концентрации $2,5 \cdot 10^{11} \cdot n \text{ см}^{-3}$.

уменьшаются с увеличением угла. Различие скорости фронта и максимальной концентрации говорит о том, что длительность плазменного импульса с расстоянием увеличивается. Это означает, что увеличивается пространственный размер сгустка плазмы.

Из осциллограмм зондового тока при напряжении на зонде — 30 В получена зависимость $n_e(t)$ при различных значениях r и θ . Из этих зависимостей по максимальным значениям концентрации плазмы в данной точке в течение импульса построена зависимость $n_{e, \max}(r)$ для различных углов разлета. Анализ показал, что при $r > 9$ см спад концентрации плазмы происходит примерно как r^{-3} , что соответствует разлету в вакууме бесстолкновительной плазмы. Из зависимостей $n_e(r)$ были построены профили равной концентрации в сгустке плазмы в горизонтальной плоскости. Семейство таких профилей для $t = 1,2$ мкс приведено на рис. 2. Из рисунка следует, что плазменный сгусток представляет собой сплюсненное образование с выдвинутым вперед центром. Это является следствием того, что скорость разлета плазмы с ростом угла падает. Поскольку система имеет осевую симметрию, то сгусток представляет собой тело вращения типа конуса с углом при вершине $\approx 100^\circ$. Обращает на себя внимание тот факт, что поперечный размер сгустка в несколько раз

больше его размера в направлении разлета. Отсюда также можно сделать вывод, что на больших расстояниях плазма является бесстолкновительной. В противном случае сгусток имел бы форму шара.

Для определения формы сгустка необходимо решить кинетическое уравнение, так как гидродинамическое приближение, использованное в работах [4, 5], нельзя считать корректным в случае, когда длина свободного пробега намного больше дебаевского радиуса в плазме. На основе вольт-амперной характеристики была определена температура плазмы. В пределах ошибок эксперимента T_e оставалась неизменной в диапазоне расстояний до мишени 7—25 см, что еще раз свидетельствует о том, что плазма в этой области является бесстолкновительной.

Все процессы, приводящие к изменению температуры плазмы, происходят на малых расстояниях от мишени, $r < 7$ см. Получено значение температуры электронов $T_e \approx 0,9$ эВ, что совпадает с температурой, измеренной в [6] на расстояниях $r > 10$ см. Из сравнения полученных результатов с результатами работы [6], в которой облучение мишени производилось импульсом такой же длительности с плотностью мощности падающего излучения $4 \cdot 10^8 - 10^9$ Вт/см², но с энергией в импульсе 2 Дж, следует, что при облучении импульсом с меньшей энергией, но одинаковой плотностью мощности падающего излучения концентрация плазмы оказывается соответственно ниже. Это связано с тем, что при одинаковых значениях плотности мощности падающего излучения на мишени и длительности импульса полное число частиц в плазменном образовании пропорционально энергии в импульсе. Следовательно, когда плазма разлетается на некоторое расстояние, ее концентрация будет тем выше, чем больше общее число частиц в плазме. В то же время скорость разлета плазмы в [6] оказалась примерно в 4 раза меньше, чем измеренная у нас.

Таким образом, в работе показано, что плазменный сгусток, образованный при облучении металлической мишени в вакууме лазерным излучением умеренной плотности мощности ($W \approx 10^9$ Вт/см²), отрывается от мишени и летит в направлении, перпендикулярном к поверхности мишени. Поперечные размеры сгустка в несколько раз больше его размеров в направлении разлета, он представляет собой тело вращения типа воронки с углом раствора $\approx 100^\circ$. На расстоянии $r > 9$ см плазма является бесстолкновительной с постоянной температурой электронов $T_e \approx 0,9$ эВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carrol P. K., Kennedy E. T. Contemp. Phys., 22, 61 (1981).
2. Chang C. T., Hashmi M., Pant H. C. Plasma Phys., 19, 1129 (1977).
3. Segall B. B., Koopman D. W. Phys. Fluids, 16, 1149 (1973).
4. Чутов Ю. И., Кравченко А. Ю. Физика плазмы, 6, 272 (1980).
5. Чутов Ю. И., Кравченко А. Ю., Пижок В. В. Тезисы докладов VI Всесоюзной конф. по физике низкотемпературной плазмы. Ленинград, 1983, т. I, с. 407.
6. Ахсаханян А. Д. и др. ЖТФ, 52, 1584 (1982).

ԼԱԶԵՐԱՑԻՆ ՊԼԱԶՄԱՑԻ ԱՄՊԻ ԱԶԱՏ ՏԱՐԱԾՄԱՆ
ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ ՎԱԿՈՒՈՒՄՈՒՄ

Ս. Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ. Ա. ԳԱԼԵՉՅԱՆ, Կ. Ռ. ԴԱՐԲԻՆՅԱՆ, Մ. Գ. ՍԱՐԿԻՍՅԱՆ

Աշխատանքը նվիրված է ցածր ջերմաստիճանային լազերային պլազմայի խտության և ջերմաստիճանի տարածական բաշխվածության ժամանակային փոփոխության փորձնական հետազոտությանը: Ցույց է տրված, որ պլազման պոկվում է թիրախից և տարածվում է ամպի տեսքով՝ ուղղահայաց թիրախի հարթությանը, աստիճանաբար ընդարձակվելով լայնական և երկայնական ուղղություններով: Բերված են պլազմայի կոնցենտրացիայի պրոֆիլները լազերային իմպուլսի սկզբից տարբեր պահերի համար:

THE DYNAMICS OF FREE FLIGHT OF LASER
PRODUCED PLASMA BLOB IN VACUUM

S. H. ARUTYUNYAN, G. A. GALECHYAN, K. R. DARBINYAN,
M. G. SARKISYAN

The variation with time of the spatial distribution of low temperature laser plasma concentration and temperature was studied experimentally. It was shown that the plasma broke off the target and flew perpendicular to the target surface in the form of a swelling blob. The profiles of equal concentrations of plasma in different moments after the start of laser pulse are given.