

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ CO_2 -ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ СПЕКТРАМ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

*А.Е.Акимов, В.Ю.Баранов, В.Л.Борзенко, С.М.Козочкин,
К.Н.Макаров, Д.Д.Малюта, Ю.А.Сатов, И.Ю.Скобелев,
С.С.Соболев, А.П.Стрельцов, А.Я.Фаенов*

Проведены измерения профилей электронной плотности и температуры в закритической области CO_2 -лазерной плазмы. Отмечено формирование плато на профиле плотности при $q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см².

Рентгеноспектральные методы диагностики ¹ продемонстрировали свою высокую эффективность при исследованиях нагрева плазмы лазерным излучением с различными длинами волн и, в первую очередь, исследованиях связи таких параметров плазмы, как n_e и T_e с характеристиками нагревающего лазерного излучения (длиной волны, энергией, плотностью потока и т.д.). Однако проводившиеся ранее эксперименты были выполнены для областей плазменной короны ($n_e < n_c$) и сферического сжатия ($n_e \sim n_{\text{ТВ. тела}}$). В то же время закритическая область лазерной плазмы ($n_c < n_e < n_{\text{ТВ. тела}}$) до сих пор исследовалась в экспериментах по нагреву плазмы излучением с $\lambda = 10,6$ мкм ($n_c = 10^{19}$ см⁻³) только интерферометрическими методами ², которые, обладая большой информативностью о пространственном распределении $n_e(r)$, не позволяют ничего сказать о температуре плазмы в исследуемой зоне.

В настоящей работе впервые методами рентгеновской спектроскопии многозарядных ионов проводятся одновременные измерения профилей температуры и плотности закритической области плазмы, создаваемой излучением CO_2 -лазера.

Эксперименты проводились на установке ТИР-1, подробно описанной в ^{3,4}. Выполнены две группы экспериментов: 1) лазерное излучение с энергией ~ 50 Дж и длительностью по полувысоте ~ 2 нс фокусировалось линзой из NaCl с фокусным расстоянием $f = 1$ м в пятно диаметром ~ 300 мкм, что обеспечивало плотность потока на облучаемой поверхности $q \sim 3 \cdot 10^{13}$ Вт/см²; 2) излучение с энергией ~ 100 Дж фокусировалось асферической линзой из NaCl с $f = 550$ мм в пятно диаметром ~ 100 мкм ($q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см²).

Облучались массивные плоские пластины из Al.

Линейчатое излучение ионов Al XI и Al XII регистрировалось спектрографом с плоским кристаллом кварца, либо CsAP, оптическая ось которого была направлена параллельно облучаемой поверхности. Пространственное разрешение вдоль нормали к поверхности обеспечивалось использованием входной щели шириной ~ 100 мкм, ориентированной параллельно дисперсии кристалла. Для регистрации спектров применялась фотопленка типа УФ-ВР.

На рис. 1 приведены типичные денситограммы спектров ионов Al XI и Al XII на разных расстояниях r от облучаемой поверхности для двух потоков греющего излучения. Из их сравнения можно отметить характерное отличие спектров для этих двух случаев: если при меньшем потоке q интенсивности резонансной линии He-подобного иона Al I_R , интеркомбинационной

I_I и спутников I_S на больших расстояниях от поверхности близки, то с ростом потока $I_R > > I_I > > I_S$. Качественно такой факт указывает на большую температуру и плотность плазмы во втором случае.

Параметры плазмы измерялись следующим образом. Электронная температура T_e определялась из отношения интенсивности спутников k, l, j, q, r и резонансной линии He-подобного иона Al^{1, 5}. При этом вклад в интенсивность резонансной линии, возникающий за счет рекомбинационных процессов, несуществен, так как плазма в критической и за критической областях является ионизирующей (перегретой), а именно эти области исследовались в этой работе. Эффект пленения резонансного излучения в данном случае был также несуществен, поскольку поперечный размер плазмы в нашем эксперименте составлял $\cong 100$ мкм и был значительно меньше, чем величина $l_{кр}^1$, при которой самопоглощение сказывается на интенсивности резонансной линии.

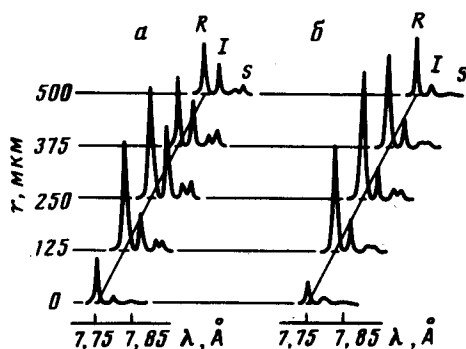


Рис. 1. Характерные денситограммы спектров излучения ионов AlXI и AlXII на разных расстояниях r от облучаемой поверхности при $a - q \sim 3 \cdot 10^{13}$ Вт/см² и $б - q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см²

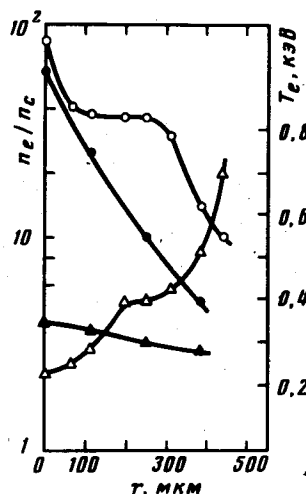


Рис. 2. Профили электронной плотности n_e (кружочки) и температуры T_e (треугольнички); для $q \sim 3 \cdot 10^{13}$ Вт/см², (темные) и $q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² (светлые)

Измеренные усредненные по времени профили $T_e(r)$ для $0 \leq r < 500$ мкм приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, максимальные значения T_e при $q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² реализуются на расстоянии ~ 500 мкм от облучаемой поверхности и составляют ~ 700 эВ. Такое поведение температуры обусловлено тем, что критическая точка, в которой происходит поглощение лазерного излучения с $\lambda = 10,6$ мкм находится на некотором расстоянии от облучаемой поверхности; в этом случае максимальная температура должна быть вблизи критической поверхности, а в за критической области нагрев плазмы значительно меньший и осуществляется за счет теплопроводности. При $q \cong 3 \cdot 10^{13}$ Вт/см² в пределах экспериментальной ошибки температура в области $0 \div 400$ мкм практически постоянна, что может быть связано с увеличением влияния электронной теплопроводности при понижении плотности плазмы.

Электронная плотность n_e определялась из отношения резонансной и интеркомбинационной линий He-подобного иона Al XII¹. Измеренные профили плотности $n_e(r)$ также приведены на рис. 2. Следует отметить наличие при $q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² плато в области $n_e \sim 3,7 \cdot 10^{20}$ см⁻³, т.е. $\sim 37n_c$. Такой вид профиля плотности связан с тем, что при больших потоках q радиационное давление греющего излучения становится сравнимым с газокинетическим давлением плазмы. Роль светового давления в формировании профиля плотности плазмы впервые отмечена в работе⁶, затем продемонстрирована в численных расчетах^{7,8} и экспериментально впервые была подтверждена в работе², где методами пикосекундной интерферометрии при плотности потока нагревающего излучения CO₂-лазера $q \sim 10^{14}$ Вт/см² наблюдалось плато в области $n_p \sim 7n_c$. Оценка, основанная на балансе давления света и плазмы дает в нашем случае высоту плато

$$n_p \sim E_0^2 / 8\pi T_e \approx 25n_c.$$

Таким образом, в настоящей работе показано, что при нагреве плазмы излучением CO_2 -лазера вид профиля плотности в закритической области существенно зависит от плотности потока, причем при $q \sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² на профиле плотности наблюдается плато. Требуется как дальнейшее развитие теоретических представлений о механизмах модификации профиля плотности, так и проведение более детальных экспериментальных исследований.

Литература

1. Бойко В.А., Виноградов А.В., Пикуз С.А., Скобелев И.Ю., Фаенов А.Я. Рентгеновская спектроскопия лазерной плазмы. "Итоги науки и техники. сер. Радиотехника", М.: ВИНТИ, 1980, 27.
2. Fedosejevs R., Tomov I. V., Burnett N.H., Enright G.D., Richardson M.C. Phys. Rev. Lett., 1977, 39, 932.
3. Анисимов В.Н., Баранов В.Ю., Борзенко В.Д. и др. Квантовая электроника, 1980, 7, 1451.
4. Акимов А.Е., Баранов В.Ю., Бойко В.А. и др. Квантовая электроника, 1983, 10, 1533.
5. Бойко В.А., Скобелев И.Ю., Фаенов А.Я. Физика плазмы, 1984, 10, 143.
6. Kidder R.E. In Proceedings of Japan - US. Seminar on Laser Interaction with Matter edited by C.Yamanaka (Tokyo International Book Co., Tokyo, 1975), p. 331.
7. Estabrook K. G., Valeo E.J., Kruer W.L. Phys. Fluids, 1975, 18, 1151.
8. Lee K., Forslund D.W., Kindel J.M., Lindman E.L. Phys. Fluids, 1977, 20, 51.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
6 июня 1985 г.