

О ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЛАЗМЕННОЙ КОРОНЫ

В.В.Александров, С.И.Анисимов, Н.Г.Ковальский,
А.М.Рубенчик, Л.Н.Щур

О температуре лазерной плазмы обычно судят по ее рентгеновскому излучению. Однако этот метод дает усредненные по пространству и времени значения электронной температуры T_e , тогда как больший интерес представляет ее локальное значение в зоне поглощения. В работе ¹ было предложено измерять температуру по расстоянию между "красным" и "синим" спутниками гармоники $3/2\omega_0$. Однако использованные в ¹ рассуждения применимы лишь при малых превышениях над порогом неустойчивости, связанной с распадом падающей электромагнитной волны на два плазменных колебания ($2\omega_{pe}$ -неустойчивость). В настоящей работе показано, что в широком интервале интенсивностей лазерного излучения электронную температуру в зоне поглощения можно определить, регистрируя временной профиль излучения гармоники $3/2\omega_0$.

Эксперименты проводились на установке "Мишень 1" ². Излучение неодимового лазера ($\tau_{имп} = 3,5$ нс, энергия до 50 Дж) фокусировалось на поверхности плоских дисков, размещенных в вакуумной камере, линзой с относительным отверстием 1 : 3,5 (диаметр пятна фокусировки не превышал 100 мкм). Энергетический контраст лазерного импульса 10^4 . Плоские массивные диски из полиэтилена $(CH_2)_n$, алюминия, меди и свинца облучались при различных углах наклона поверхности дисков относительно оси лазерного пучка. В каждом эксперименте регистрировались энергия и форма лазерного импульса, распределения интенсивности лазерного пучка в дальней зоне, интенсивность отраженного и рассеянного излучения на рабочей частоте лазера ω_0 ; интенсивность излучения плазмы на частотах $2\omega_0, 3/2\omega_0$ и ω_0 с разрешением во времени ($\leq 5 \cdot 10^{-11}$ с); спектр рентгеновского излучения плазмы в области энергий 5 – 30 кэВ ³. Измерения выполнены в диапазоне плотностей светового потока $10^{13} - 10^{14}$ Вт/см². Подробные исследования ⁴ позволили установить, что при использованных размерах фокального пятна разлет плазмы в области с плотностями от $n_{тв.тела}$ вплоть до $n_{крит}/4$ можно считать одномерным. Исходя из этих представлений была проведена серия численных расчетов в рамках одномерной двухтемпературной гидродинамической модели с учетом процессов тормозного и аномального поглощения, электронной теплопроводности с ограничением по потоку, лучистых потерь, обмена энергией между электронами и ионами. Расчеты проводились для условий наших экспериментов (форма лазерного импульса во времени) в диапазоне интенсивностей $10^{13} - 10^{14}$ Вт/см². Была рассчитана временная эволюция интенсивности гармоники $3/2\omega_0$. Это излучение возникает в результате слияния падающего излучения (ω_0) с плазменным колебанием $\omega_{pe} \approx \omega_0/2$, появившемся в результате $2\omega_{pe}$ -неустойчивости. Аномальное поглощение, обусловленное этой неустойчивостью, учитывалось ⁵ введением эффективной частоты столкновений $\bar{\nu}_{эфф} = \alpha\omega_{pe}(v_T/c)^2$, где ω_{pe} – плазменная частота, v_T – тепловая скорость электронов, c – скорость света, α – коэффициент порядка единицы.

На рис. 1 приведена полученная в этих расчетах зависимость $I_{3/2\omega}(t)$ (интенсивность вычислялась в соответствии с ^{5, 6}). На рис. 2 показаны синхронизированные во времени лазерный импульс и импульс излучения на частоте $3/2\omega_0$. Видно, что расчетная и экспериментальная зависимости достаточно хорошо совпадают. Импульс излучения $3/2\omega_0$ заметно запаздывает по сравнению с началом облучения. Его максимум сдвинут относительно максимума интенсивности лазерного импульса, генерация гармоник прекращается при заметно меньших интенсивностях, чем в момент ее возникновения.

В условиях наших экспериментов порог $2\omega_{pe}$ -неустойчивости определяется столкновениями. На это указывает наблюдавшееся возрастание порога упомянутой неустойчивости с ростом Z вещества мишени ($I_{порог} = 8 \cdot 10^{12}$ Вт/см² для полиэтилена, $I_{порог} = 2 \cdot 10^{13}$

для алюминия и $I_{\text{пор}} > 10^{14}$ для свинца) и одновременное уменьшение температуры¹⁾ ($T_e = 0,5$ кэВ для полиэтилена и $T_e \approx 0,3$ кэВ для свинца). Тогда в момент появления и исчезновения гармоники $3/2\omega_0$ должно выполняться условие $\gamma = \sqrt{3/8}\omega_{pe}(I_0/m_e n c^3)^{1/2} = v_{ei}/2$ (где m_e – масса электрона, n – плотность плазмы, I_0 – интенсивность лазерного пучка, v_{ei} – частота электрон-ионных столкновений), из которого можно определить температуру. Полученные таким образом значения температуры, а также значения температуры, определенные по рентгеновскому излучению, приведены в таблице.

Материал	Интенсивность лазерного пучка	T_e включ.	T_e выкл.	T_e рент.
	10^{14} Вт/см ²	0,8 кэВ	1,2 кэВ	0,5 кэВ

где T_e включ. – температура, соответствующая моменту появления гармоники $3/2\omega_0$; T_e выключ. – температура, соответствующая моменту исчезновения гармоники $3/2\omega_0$; T_e рент. – температура, определенная по рентгеновскому излучению.

Видно, что температура в момент "выключения" гармоники в полтора раза превышает температуру в момент "включения". Это можно объяснить разогревом плазмы в течение импульса. Температура плазмы в области $n_{\text{крит}}/4$ превышает среднее значение, измеряемое по рентгеновскому излучению, что свидетельствует о локальном перегреве плазмы в этой области. К аналогичному результату приводят и численные расчеты.

Отметим, что приведенные в таблице значения температуры вблизи $n_{\text{крит}}/4$ согласуются с оценкой, полученной из измеренной ширины линии $3/2\omega_0$ (см. ⁶).

Рис.1. Лазерный импульс (сплошная линия) и импульсы излучения плазмы на частоте $3/2\omega$ ($\lambda = 1,06$ мкм) --- $I = 10^{14}$ Вт/см², - - - $I = 10^{13}$ Вт/см². Результаты численных расчетов.

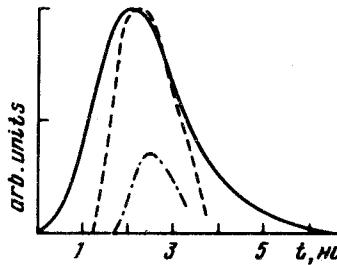
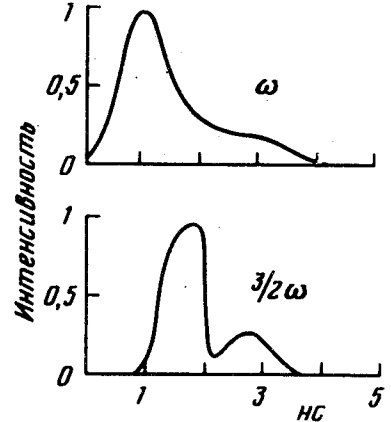


Рис.1

Рис.2. Временная развертка лазерного импульса накачки (ω) и импульса излучения на гармонике $3/2\omega$. Мишень Al, $I = 1 \cdot 10^{14}$ Вт/см²



Из рис. 1 и рис. 2 следует, что интенсивность гармоники $3/2\omega_0$ резко возрастает с ростом интенсивности лазерного излучения. Аналогичные зависимости для импульсов наносекундного и пикосекундного диапазонов наблюдались в работах ^{2, 7}. Качественно наблюдаемую зависимость можно объяснить следующим образом. Интенсивность гармоники $3/2\omega_0$ сильно зависит от температуры и в условиях указанных экспериментов, когда поглощение вблизи $n_{\text{крит}}/4$ не слишком велико, определяется соотношением ^{5, 6}:

$$I_{3/2\omega} \sim I_0 (v_T/c)^5 (m_e/M)^{1/2} (\omega_{pe} L/c) / (I_0/m_e n c^3)^{1/3}$$

где M – масса иона, L – характерный размер градиента плотности.

¹⁾ Вопрос о зависимости температуры от Z , по-видимому, не решается однозначно и зависит от формы импульса, геометрии облучения и т. д. В наших экспериментах измеренная по рентгеновскому излучению средняя температура уменьшалась с ростом Z .

Если принять, что тепловой поток пропорционален nTv_T и учесть, что поглощаемая вблизи $n_{\text{крит}}/4$ доля излучения составляет $v_{\text{эфф}} L/c$, получим $I_{3/2\omega} \sim I_0^{17/3}$. Рост $I_{3/2\omega_0}$ продолжается до интенсивностей, при которых пондеромоторные силы вызывают заметную деформацию профиля плотности в поглощающем слое.

Таким образом, анализ временной эволюции излучения гармоники $3/2\omega_0$ дает существенную информацию о локальной температуре плазмы в области $n_{\text{крит}}/4$.

Литература

1. Авров А.И., Быченков В.Ю., Крохин О.Н., Тустовалов В.В., Рупасов А.А., Силин В.П., Склизков Г.В., Тихончук В.Т., Шиканов А.С. ЖЭТФ, 1977, 72, 970.
2. Александров В.В., Анисимов С.И., Бренер М.В., Велихов Е.П., Вихарев В.Д., Зотов В.П., Ковальский Н.Г., Пергамент М.И., Ярославский А.И. ЖЭТФ, 1976, 71, 1826.
3. Александров В.В. и др. Диагностика плазмы, вып. 4, под редакцией М.И.Пергамента, М.: Энергоиздат, 1981.
4. Александров В.В. и др. Препринт ИАЭ-3196, М.: 1979; Александров В.В., Ковальский Н.Г., Силин В.П. ЖЭТФ, 1980, 79, 850.
5. Rubenchik A.M. Proc. of XIII IEPIC, Berlin, 1977.
6. Rubenchik A.M. Proc. of Spring College on Fusion Energy, Vienna, 1982.
7. Pant H.E. et al. Opt.Comm. 1976, 16, 396.

Поступила в редакцию
18 ноября 1982 г.