

ГЕНЕРАЦИЯ СУБГАРМОНИК И ВЫСШИХ ГАРМОНИК ИОННО-ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

*А.Е.Акимов, В.Ю.Баранов, С.М.Козочкин, К.Н.Макаров,
Д.Д.Малюта, В.Д.Письменный, Ю.А.Сатов, А.П.Стрельцов*

Проведены измерения спектров излучения, рассеянного лазерной плазмой в апертуру фокусирующей линзы, при воздействии на мишень импульса CO_2 -лазера с плотностью мощности $5 \cdot 10^{14}$ Вт/см². Фурье-анализ доказывает присутствие в спектрах частот, соответствующих генерации в плазме субгармоник ионно-звуковых колебаний.

Согласно современным представлениям, в процессе взаимодействия мощного излучения CO_2 -лазера с плазмой важную роль играют нелинейные механизмы поглощения и рассеяния лазерного излучения. В ряде экспериментальных работ наблюдалось уширение спектра рассеянного излучения, которое обычно связывают с вынужденным рассеянием Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) ^{1, 2}. При этом не всегда с помощью простой модели удается согласовать даже ширину спектра, тем более нет единого мнения по поводу тонких деталей спектров, например, линейчатой структуры ¹⁻⁴.

Теоретический анализ ВРМБ для ограниченной системы с отражающей границей, предложенный в ⁵, на наш взгляд наиболее полно соответствует экспериментальной ситуации в случае больших плотностей мощности излучения CO_2 -лазера ($I \gtrsim 10^{14}$ Вт/см²). Световое давление при этом начинает играть существенную роль, вызывая сильное укручение профиля плотности, а режим взаимодействия становится сильно нелинейным. Отражающей границей в таких условиях может служить поверхность критической плотности. Согласно этой работе в нелинейном режиме интенсивность рассеянного света проявляет хаотическое поведение во времени, а в спектре появляются частоты, соответствующие гармоникам и субгармоникам ионно-звуковой частоты.

В нашей работе сообщается об исследованиях спектров излучения, рассеянного лазерной плазмой в апертуру фокусирующей линзы, для мишеней с разным Z . Для выявления спектральных составляющих, соответствующих гармоникам и субгармоникам ионного звука, проводился численный фурье-анализ экспериментальных спектральных распределений.

Измерения выполнялись на CO_2 -лазерной установке ТИР-1, подробно описанной в ⁶. Эксперименты проведены при следующих параметрах излучения: энергия 50 Дж, длина волны $\lambda = 10,591$ мкм (10P20), длительность импульса на половине интенсивности 2 нс, энергетический контраст $> 10^7$. Хорошее качество волнового фронта излучения позволяло фокусировать его асферической линзой из $\text{NaCl}(\text{F}/3)$ с фокусным расстоянием $F = 550$ мм в пятно диаметром 70 мкм, чем обеспечивалась плотность мощности излучения на мишени до $5 \cdot 10^{14}$ Вт/см². Схема измерений приведена на рис. 1. Излучение лазера, рассеянное плазмой в апертуру фокусирующей линзы (1), отражалось от одной из поверхностей клина из NaCl (2) и направлялось на дифракционную решетку (3) 100 штр./мм размером 100×100 мм². Особенностью такой схемы является высокое спектральное разрешение, которое достигается почти полным исключением аберраций. Величина разрешения в нашем случае определяется размером источника рассеянного излучения и составляет ~ 10 Å. Регистрация интегрального во времени спектра производилась методом сенсibilизации фотопленки ФТ-СК к инфракрасному излучению ⁷. Калибровка шкалы длин волн по абсолютным значениям осуществлялась по результатам вычислений относительного углового расположения – 17 и – 16 порядков дифракции для He-Ne-лазера, который совмещался с лучом CO_2 -лазера, и – 1 порядка дифракции излучения CO_2 -лазера. Максимальное отклонение измеренных значений длин волн от истинных определяется точностью совмещения лучей и не превышает ± 10 Å. На рис. 2 приведены спектры падающего (2а) и рассеянного излучения для случая полиэтиленовой (2б),

алюминиевой (2в) и свинцовой (2г) мишеней. Все спектры рассеянного излучения значительно уширены, причем их ширина на уровне половины интенсивности не зависит от материала мишени и составляет для потока $5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² ~ 160 Å (50 ГГц). В то же время ширина спектров на уровне 1/10 интенсивности для мишеней с разным Z отличается значительно и составляет для Pb, Al и $(\text{CH}_2)_n$ соответственно ~ 250 , ~ 300 , ~ 800 Å. Следует отметить, что линейчатая структура является характерной особенностью всех спектров.

Для оцифровки исходных данных с целью их математической обработки использовался автоматический микроденситометр АМД-1. Шаг сканирования составлял 10 мкм. При линейной дисперсии спектрографа 166,25 Å/мм это соответствовало спектральному сдвигу 1,6625 Å.

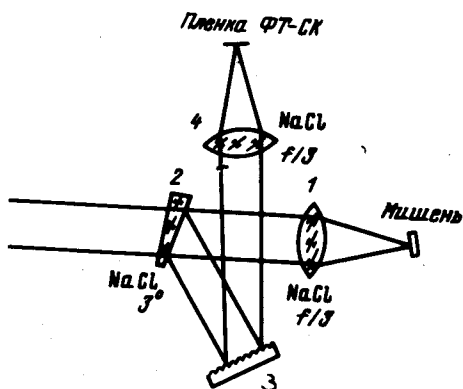


Рис. 1

I , отн. ед.

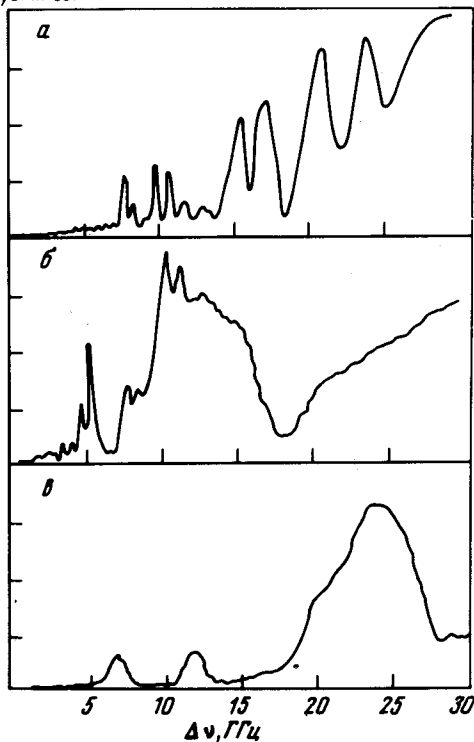


Рис. 3

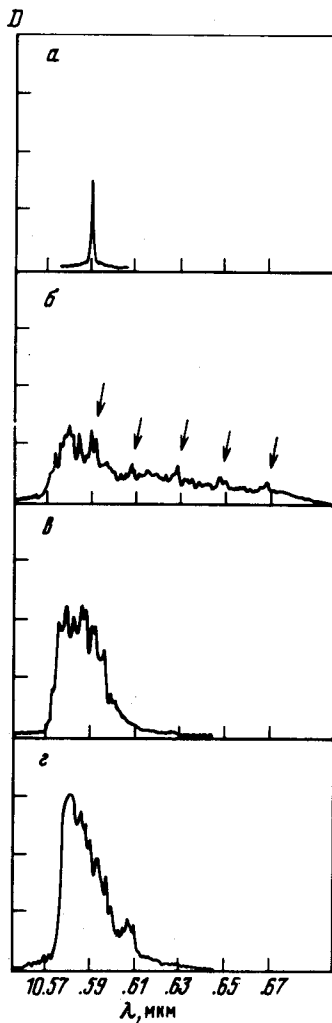


Рис. 2

что значительно меньше экспериментального разрешения. Такой выбор шага сканирования был сделан для увеличения разрешения численной схемы и соответственно исключения влияния шага на результаты обработки. При имеющейся ширине спектра количество оцифрованных точек составляло $300 \div 900$. Задачей обработки было получение спектра модуляций.

Это достигалось путем применения 1024-точечного "быстрого" преобразования Фурье. Для анализа выбирались отдельно "красные" и "синие" части спектров. Это делалось в связи с предположением о различии физических механизмов, дающих вклад в "синее" и "красное" уширение. На рис. 3, а, б, в приведены фурье-спектры "красных" частей исходных экспериментальных спектров, полученных при облучении мишеней из (CH₂), Al и Pb соответственно. На спектрах, полученных при использовании мишеней из свинца ярко выражены максимумы в области 6, 12, 24 ГГц, соответствующие первой, второй и третьей субгармоникам ионно-звуковой частоты, так как частота сдвига стоксовой компоненты ВРМБ, исходя из измеренных ранее значений электронной температуры $T_e \sim 800$ эВ⁸, составляет $\Delta\omega = 2K_0 c_s \approx 50$ ГГц. При переходе к мишеням из более легких элементов спектры существенно усложняются и четкая идентификация субгармоник становится невозможной.

Следует отметить, что в⁹ проведены эксперименты по нагреву плазмы излучением CO₂-лазера, в которых наблюдалась генерация первой и второй гармоник ионно-звуковой частоты. В наших экспериментах при облучении полиэтиленовых мишеней в спектре наблюдаются максимумы, соответствующие высшим гармоникам ионно-звуковых колебаний вплоть до пятой. По-видимому число гармоник и определяет ширину "красной" части спектров, которая максимальна в случае легкой мишени — полиэтилена ($\Delta\lambda = 600$ Å) и существенно меньше в случае мишеней из алюминия и свинца.

Согласно теории¹⁰ один из вариантов развития турбулентности заключается в последовательном нарастании гармоник основной частоты, субгармоник основной частоты и их гармоник.

Рис. 2 и рис. 3 качественно подтверждают выводы¹⁰: при обогащении спектра гармониками основной частоты увеличивается и число компонентов с $\omega < \omega_0$. Следует, однако, подчеркнуть, что прямое сравнение полученных экспериментальных результатов с выводами теории¹⁰ или численного расчета¹¹ невозможно, так как в условиях нашего эксперимента развитие ионно-звуковой турбулентности происходит в сильно неоднородной ограниченной области и для корректной интерпретации экспериментальных данных необходим численный расчет системы уравнений для связанных мод, аналогичной системе уравнений, например⁵, совместно с уравнениями, описывающими гидродинамику лазерной плазмы при плотностях потока $\sim 10^{15}$ Вт/см².

Тем не менее полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что для потоков излучения CO₂-лазера $\sim 5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² впервые наблюдалась генерация субгармоник и высших гармоник ионно-звуковой частоты в лазерной плазме.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность А.М.Дыхне за проявленный интерес к работе и полезные обсуждения.

Литература

1. Mitchell K.B., Stratton T.E., Weiss P.B. Appl. Phys., Lett., 1975, 27, 11.
2. Горбунов Л.М., Касьянов Ю.С., Коробкин В.В. и др. Препринт ФИАН, №126, 1979.
3. Turner R.E., Goldman L.M. Phys. Fluids, 1981, 24, 184.
4. Baldis A.A., Walsh C.Y. Phys. Fluids, 1983, 26, 3426.
5. Randal C.Y., Albritton Y.R. Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 1887.
6. Акимов А.Е., Баранов В.Ю., Борзенко В.Л. и др. Препринт ИАЭ, № 3559, 1982.
7. Mitchel G.R., Rev. Sci. Instrum, 1982, 53, 111.
8. Акимов А.Е., Баранов В.Ю., Борзенко В.Л. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 87.
9. Walsh C.J., Baldis H.A. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 1483.
10. Фейгенбаум М. УФН, 1983, 141, 343.
11. Casanova M., Laval G., Pellat R., Pesme D. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 2230.

Поступила в редакцию

25 декабря 1986 г.

23 марта 1987 г.