

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМПТОНОВСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИСКРЕ

Н.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.М.Прохоров

В последнее время в ряде теоретических работ [1–3, 6] указывалось на то, что вынужденное комптоновское рассеяние может играть заметную роль в поглощении плазмой достаточно интенсивного электромагнитного излучения. Как известно, обычное тормозное поглощение излучения резко падает с ростом температуры плазмы и пропорционально квадрату концентрации электронов в плазме. В то же время согласно теории вынужденное комптоновское поглощение должно сравнительно слабо зависеть от электронной температуры и пропорционально первой степени концентрации. Следовательно, при определенных условиях рассматриваемый механизм поглощения в принципе может играть заметную роль в процессе разогрева высокотемпературной плазмы с помощью интенсивного лазерного излучения.

В настоящей работе были впервые проведены эксперименты по наблюдению вынужденного комптоновского поглощения (БКП) лазерного излучения в плазме. Методика измерений основывается на том факте, что в процессе БКП общее число квантов излучения остается неизменным, а передача энергии от излучения к электронам плазмы происходит в результате изменения частоты рассеянных квантов. Следовательно, спектр рассеянного, то есть прошедшего через плазму излучения при БКП должен отличаться от спектра падающего излучения наличием деформации в длинноволновую сторону. Такую деформацию спектра при взаимодействии излучения с плазмой трудно объяснить какими-либо другими причинами.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Пикосекундный импульс излучения рубинового лазера 1 после прохождения через оптический усилитель 2 попадал на входную линзу камеры 3. Подробно эта часть установки

описана ранее [4]. Контрольные измерения лазерного импульса осуществлялись с помощью калиброванной системы фотоэлемента 4 и широкополосного осциллографа 5. Длительность лазерного импульса, измеренная с помощью скоростного фотохронографа, составляла 50 псек.

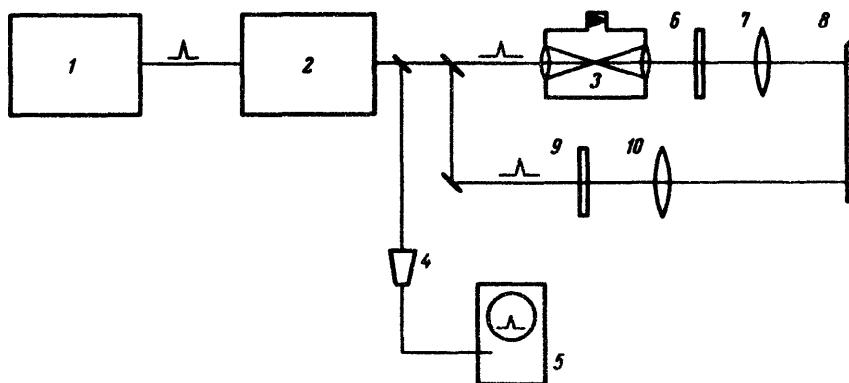


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — оптический усилитель, 3 — камера, 4 — фотоэлемент, 5 — скоростной осциллограф, 6, 9 — ослабляющие фильтры, 7, 10 — коллимирующие линзы, 8 — входная щель спектрографа

Плотность потока в фокусе линзы с $f = 2 \text{ см}$ составляла $2 \cdot 10^{14} \text{ вт/см}^2$, что значительно превышало пороговую плотность пробоя и возникновения искры в газообразном гелии. Импульс излучения, прошедший через образованную им плазму, коллимировался линзой 7 на верхнюю половину входной щели спектрографа 8. Одновременно часть излучения, не проходящая через камеру, отражалась на нижнюю половину входной щели спектрографа с помощью линзы 10. Такая схема обеспечивала сравнение спектра излучения, прошедшего через плазму, с опорным спектром лазерного излучения в каждом измерении. Для измерения относительного положения этих спектров одновременно фотографировался дуговой спектр железа. Спектрограф имел линейную дисперсию в исследуемой области $12 \text{ см}^{-1}/\text{мм}$ и аппаратную функцию $0,18 \text{ см}^{-1}$. Ошибка определения относительного сдвига спектров не превышала $0,1 \text{ см}^{-1}$.

Результаты эксперимента с гелиевой плазмой при исходном давлении газа три атмосферы приведены на рис. 2, а. Кривая 1 представляет собой спектр опорного излучения, а кривая 2 — спектр излучения, прошедшего через плазму. Видно, что происходит поглощение коротковолновых компонент спектра излучения и усиление длинноволновых компонент. При длине плазмы $l = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ максимальный коэффициент поглощения спектральной компоненты составляет $\alpha_\nu = 24 \text{ см}^{-1}$. Перераспределение энергии в спектре излучения из-за вынужденного комптоновского рассеяния приводит к поглощению части падающей энергии плазмой. Относительное интегральное по всему спектру поглощение может быть вычислено из кривых 1 и 2 следующим образом

$$k = \frac{\int h\nu f_1(\nu) d\nu - \int h\nu f_2(\nu) d\nu}{\int h\nu f_1(\nu) d\nu},$$

где $f_1(\nu)$ и $f_2(\nu)$ формы кривых 1 и 2 соответственно. При этом, поскольку наряду с БКП в плазме происходит поглощение из-за тормозного эффекта, кривые 1 и 2 нормировались так, чтобы площади под этими кривыми оказались равными. Такая нормировка соответствует сохранению полного числа фотонов при БКП. В случае гелиевой плазмы для k получаем следующую величину $k = (1,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$. Отсюда для среднего по спектру коэффициента поглощения плазмой падающего излучения $\alpha = k/\ell$ получаем $\alpha = 0,26 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

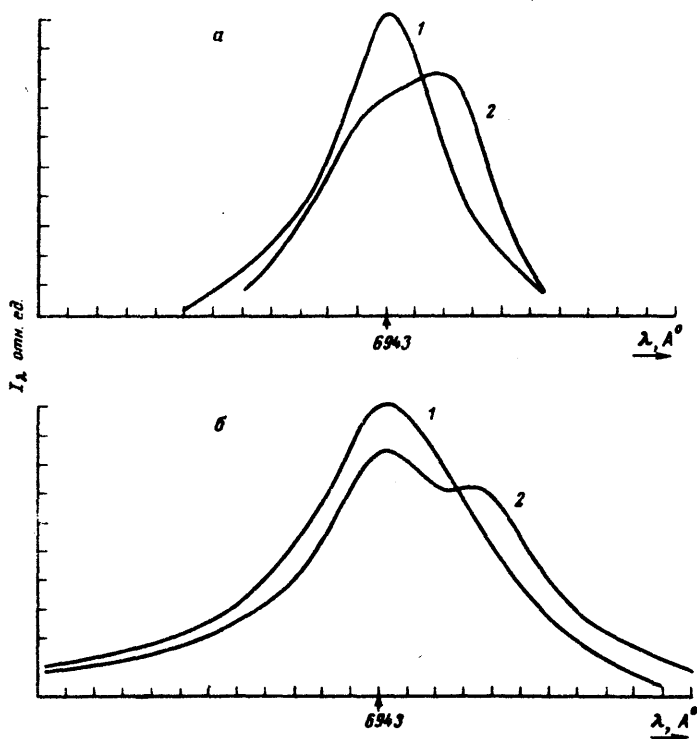


Рис. 2. Экспериментально полученные формы спектров опорного лазерного излучения 1 и излучения, прошедшего через плазму, 2. *a* — гелиевая плазма, *b* — алюминиевая фольга. Цена деления по оси длин волн 0,12 Å. Величины: ошибки измерений указаны в тексте

Аналогичные результаты рис. 2, *b* получены в эксперименте, когда в откачанную камеру в область фокуса линзы помещалась алюминиевая пленка толщиной около 150 Å на лавсановой основе толщиной $4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Как и в случае гелиевой плазмы наблюдается деформация спектра в сторону длинных волн и появление дополнительного максимума, смещенного на величину $(0,8 \pm 0,1) \text{ см}^{-1}$. Уширение линии составляет $(0,4 \pm 0,1) \text{ см}^{-1}$. В числения указанным выше способом дают величину для относительного поглощения $k = (1,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$. Коэффициент поглощения плазмой падающего излучения в этом случае равен $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Количественное сравнение измеренных величин α с теоретически вычисленными на основе выражений работы [1] затруднено, поскольку не все необходимые параметры известны из эксперимента. Оценочные расчеты показывают, что $\alpha_{\text{теор}}$ несколько превышает экспериментально измеренные величины α .

Совокупность экспериментальных результатов, а также условий, при которых они были получены, показывает, что наблюдаемый сдвиг спектра излучения в длинноволновую область связан с эффектом вынужденного комптоновского рассеяния. Следует отметить, что к подобному эффекту могли бы привести такие механизмы как вынужденное рассеяние в неизотермической плазме из-за коллективных эффектов и изменение во времени показателя преломления вещества в области фокуса из-за возбуждения атомов или молекул и электрострикции. Однако сравнение характерных времен развития и длительности лазерного импульса показывает, что эти механизмы не могут дать заметного вклада в наблюдаемый эффект.

Экспериментальное наблюдение вынужденного комптоновского поглощения в плазме, выполненное в данной работе подтверждает теоретические предположения [1-3] о том, что этот эффект может играть существенную роль в процессе нагрева плазмы электромагнитным излучением. Если интенсивность излучения достаточно велика, то для невысоких плотностей плазмы и в области высоких температур БКП может преобладать над классическим тормозным поглощением, которые к тому же уменьшается из-за нелинейных эффектов в сильном поле [5, 6]. Однако физическая природа этого типа поглощения позволяет надеяться на получение достаточно эффективного вклада энергии излучения в плазму, если только ширина спектра излучения $\Delta \nu$ сравнима с частотой излучения ν [3]. Это ставит проблему создания специальных источников когерентного излучения большой мощности.

Полученные нами экспериментальные результаты не согласуются с предположениями автора работы [1] о том, что рассматриваемый механизм разогрева электронов может играть существенную роль в стадии развития пробоя на оптических частотах. В частности, оценка величины данного эффекта для условий опытов по пробую пикосекундными импульсами [7] показывает, что он не является определяющим в возникновении лазерной искры.

В заключение авторы благодарят Ф.Б.Бункина за обсуждения, которые способствовали выполнению данной работы.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 сентября 1970 г.

Литература

- [1] P.I.Peyraud. J. de Physique, 29, 88, 306, 872, 1968.
- [2] Я.Б.Зельдович, Е.В.Левич. Письма в ЖЭТФ, 11, 57, 1970.
- [3] Я.Б.Зельдович, Е.В.Левич. Письма в ЖЭТФ, 11, 497, 1970.
- [4] И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.М.Прохоров. Письма в ЖЭТФ, 9, 581, 1969.
- [5] Б.П.Силин. ЖЭТФ, 47, 2254, 1964; Ф.Б.Бункин, М.В.Федоров. ЖЭТФ, 49, 1215, 1965.
- [6] Ф.Б.Бункин, А.Е.Казаков. ЖЭТФ, 59, вып. 12, 1970.
- [7] И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.М.Прохоров. ЖЭТФ, 58, 1608, 1970.