

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

24 $\frac{53}{A-92}$

п БИБЛИОТЕКА

Атомная энергия

147612

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ,
Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН,
И. Ф. КВАРЦАВА, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора),
А. К. КРАСИН, А. В. ЛЕБЕДИНСКИЙ, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ,
М. Г. МЕШЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор),
И. И. НОВИКОВ, В. С. ФУРСОВ, В. В. ШЕВЧЕНКО,
К. Э. ЭРГИС, М. В. ЯКУТОВИЧ

МАРТ
ТОМ 14 1963 ВЫП. 3



Когерентное взаимодействие электронного пучка с плазмой

И. Ф. Харченко

В работах [1, 2] приведены схема установки и результаты экспериментального исследования взаимодействия электронного пучка с плазмой. Показано, что при таком взаимодействии происходит усиление и возбуждение колебаний с частотой, близкой к частоте плазмы, сопровождающееся когерентными потерями энергии. В настоящей работе приводятся более детальные результаты измерений когерентных потерь энергии модулированного электронного пучка, проходящего через плазму.

Механизм когерентных потерь энергии сгустков электронов в плазме является обращением механизма когерентного ускорения частиц, предложенного В. И. Векслером [3].

Потери энергии электронного пучка измерялись электростатическим цилиндрическим анализатором и фазовым анализатором. Фазовый анализатор представляет собой две резонаторные отклоняющие системы, расположенные перпендикулярно; они позволяют получать на флуоресцирующем экране круговую развертку электронного пучка с частотой, равной частоте модуляции ($f_M = 2800$ МГц). По угловому смещению сгустка на круговой развертке можно судить о потерях энергии электронного пучка. Разрешающая способность анализаторов составляет 0,2—0,4% от начальной энергии пучка.

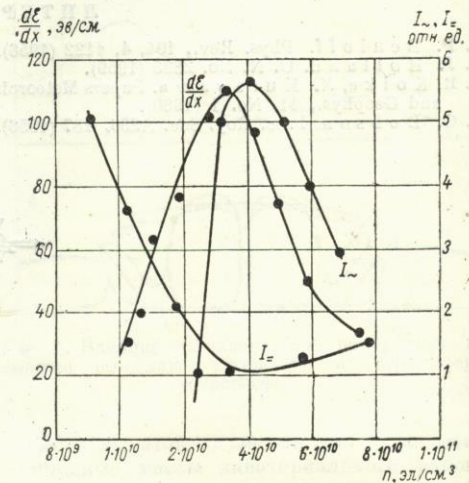
На рисунке приведены значения удельных потерь энергии dE/dx в зависимости от плотности плазмы для модулированного электронного пучка с начальной энергией 60 кэВ и током 1 а. При изменении плотности плазмы от $n = 10^{10}$ до $n = 6 \cdot 10^{10}$ потери составляют несколько десятков электронвольт на 1 см. Потери энергии отдельного электрона в этом случае должны быть на много порядков ниже и составят всего $10^{-7} - 10^{-8}$ эВ/см. Большие значения полученных потерь можно отнести только за счет когерентного взаимодействия сгустков электронов с плазмой. При когерентном взаимодействии каждая частица сгустка теряет энергию пропорционально числу частиц в сгустке.

В работах [3, 4] приведено следующее выражение для потерь энергии электрона в цилиндрическом сгустке длиной l радиуса R при прохождении через плазму ($v_0 \gg v_T$ и $R \ll \frac{v_0}{\omega_0}$)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^2 \omega_0^2 N}{v_0^2} \left(\frac{2v_0}{\omega_0 l} \sin \frac{\omega_0 l}{2v_0} \right)^2 \ln \frac{2v_0}{\omega_0 R}, \quad (1)$$

где v_0 — скорость сгустка; v_T — средняя тепловая

энергия электронов плазмы; $\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi n l^2}{m}}$ — плазменная частота (n — плотность плазмы); N — число электронов в сгустке. Значение интерференционного множителя $\left(\frac{2v_0}{\omega_0 l} \sin \frac{\omega_0 l}{2v_0} \right)^2$ зависит от отношения продольного размера сгустка l к длине волны тормозящего поля $\lambda_p = \frac{2\pi v_0}{\omega_0}$ возбуждаемого в плазме. При $l \ll \frac{v_0}{\omega_0}$ этот множитель близок к максимуму.



Кривые удельных потерь энергии dE/dx , высокочастотной составляющей тока I_{\sim} и полного тока I_{\sim} электронного пучка в зависимости от плотности плазмы.

В нашем случае при $N = 10^9$, $R \approx 1$ см, $l \approx 1$ см и $n = 10^{10} \div 10^{11}$ расчет по формуле (1) дает значения потерь энергии по порядку величины, совпадающие с результатами эксперимента.

Но величина потерь не растет линейно с увеличением плотности плазмы, как следовало ожидать из формулы (1), а имеет максимум при плотности плазмы $n = 3,5 \cdot 10^{10}$. Это объясняется тем, что в нашем случае при длине взаимодействия 10 см и расстоянии между сгустками $L = \frac{v_0}{f_M} \approx 5$ см необходимо учитывать эффект когерентного взаимодействия серии сгустков. Этот эффект заключается в том, что волны, возбуждаемые отдельными сгустками, интерферируют. В зависимости от соотношения между длиной волны возбуждаемых колебаний λ_p и расстоянием между сгустками L последующие сгустки могут усиливать или гасить поле волны, возбуждаемой предыдущим сгустком, и тем самым изменять среднюю потерю энергии. Для учета взаимодействия серии сгустков в формулу (1) следует ввести множитель [4]

$$\frac{\sin^2 \frac{m+1}{2} \frac{\omega_0 L}{v_0}}{\sin^2 \frac{\omega_0 L}{2v_0}}, \quad (2)$$

где $(m+1)$ — число интерферирующих сгустков. При выполнении условия когерентности серии сгустков $\left(\frac{\omega_0 L}{v_0} = 2\pi k, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots\right)$ взаимодействие наиболее сильное. Эта область соответствует максимуму кривой потерь энергии на рисунке. Производить точное количественное сопоставление теории с экспериментом не имеет смысла, так как результаты теории справедливы для цилиндрического сгустка однородной плотности с резкими границами, что не выполняется в экспериментах. Кроме того, трудно определить число интерферирующих сгустков, так как к ним следует, очевидно, отнести не только сгустки, размещающиеся на длине взаимодействия, но и сгустки, приходящие в плазму в тот момент, когда поле от предыдущего сгустка не успело затухнуть.

На рисунке отложены также значение высокочастотной составляющей тока в пучке I_{ω} на частоте f_M и величина тока на выходе из плазмы I_{ω} . Максимальная величина высокочастотной составляющей и минимальная величина тока соответствуют области максимальных потерь. Это соответствует физической картине когерентного взаимодействия сгустков электронов с плазмой. Потери энергии обусловлены усилением продольных упорядоченных коле-

баний в плазме на частоте ω_0 , которые приводят к увеличению высокочастотной составляющей в пучке и к рассеянию тока на этих колебаниях.

Несовпадение плотности плазмы, при которой должен наблюдаться резонанс ($\omega_0 = 2\pi f_M$), с плотностью, измеренной двойным высокочастотным зондом, можно отнести за счет неравномерного распределения плотности по радиусу. По-видимому, на оси плотность плазмы в несколько раз выше средней плотности.

При исследовании взаимодействия немодулированного пучка с плазмой когерентные потери порядка 20–40 эв/см и возбуждение колебаний на частоте ω_0 наблюдались только при увеличении длины взаимодействия пучка с плазмой до 20 см. В этом случае механизм взаимодействия объясняется следующим образом. При прохождении через плазму электронный пучок возбуждает колебания с частотой ω_0 , появившееся поле модулирует пучок образуются сгустки электронов размером меньше половины длины волны плазменных колебаний и с расстоянием между сгустками, равным длине плазменной волны. Такая автомодуляция пучка приводит к когерентному взаимодействию с плазмой. При малой длине взаимодействия в связи с тем, что относительно малы начальные флуктуации в пучке и плазме, амплитуда высокочастотного поля и степень модуляции пучка малы и когерентное взаимодействие не наблюдается.

В заключение автор выражает благодарность Я. Б. Файнбергу за руководство работой.

Поступило в Редакцию 12/VI 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Д. Синельников, И. Ф. Харченко, Я. Б. Файнберг и др. Доклад № 2211, представленный СССР на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
2. И. Ф. Харченко, Я. Б. Файнберг, Р. М. Николаев, Е. А. Корнилов, Е. И. Луценко, Н. С. Педенко. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 38, 685 (1960).
3. В. И. Векслер. «Атомная энергия», 2, 427 (1957).
4. А. И. Ахизер, Я. Б. Файнберг. Сб. «Теория и расчет линейных ускорителей». М., Госатомиздат, 1962, стр. 320.
5. Б. М. Болотовский. Диссертация, ФИАН СССР (1954).

Определение фактора накопления в барьерной геометрии

Л. Р. Кимель

Решение задач о дозах полях протяженных источников за защитой с учетом многократного рассеяния в последней значительно упрощается при использовании аналитической формы фактора накопления [1]:

$$B = A_1 e^{-a_1 \mu x} + A_2 e^{-a_2 \mu x},$$

где B — фактор накопления; A_1, A_2, a_1 и a_2 — числовые коэффициенты, не зависящие от μx . Эти коэффициенты табулированы для дозовых и энергетических факторов накопления в бесконечной среде в зависимости от начальных энергий γ -излучения и для различных защитных материалов [2].

Однако в практических расчетах приходится