

ВЛИЯНИЕ ПРОБОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ НА НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПРОЕКОТРОНЕ

П.И.Блинов, Л.П.Закатов, А.Г.Шахов,
Р.В.Чикин, В.В.Шапкин

Использование электронных пучков для нагрева плазмы стимулируется рядом теоретических работ, в которых указывается на наличие сильного механизма торможения пучка с передачей части его энергии плазме [1-3]. Экспериментально показано, что плазме передается значительная часть энергии пучка [4,5].

Высокие электронные температуры получены в работах [6,7]. В этих экспериментах плазма создавалась электронным пучком при прохождении через нейтральный газ.

В данной работе изучалось взаимодействие электронного пучка с заранее подготовленной высокоионизованной плазмой.

Установка (рис.1) представляет собой ловушку с магнитными пробками. На оси ловушки за пробками на одном конце помещается электронная пучка, на другом - плазменный инжектор. Электронная пучка работает в импульсном режиме. Длительность прямоугольного импульса напряжения - 450 мксек, амплитуда импульса 9 кв, ток в импульсе 5 а. Плазменный инжектор собран из титановых шайб, налитых водородом. Плазма и электронный пучок инжектируются в ловушку одновременно. Остаточное давление в камере 10^{-6} мм рт.ст.

Электронная концентрация n измерялась СВЧ-интерферометром ($\lambda = 3$ см). Величина nT (T - температура плазмы) определялась по диамагнитному эффекту. Тормозное излучение регистрировалось фотоумножителем с кристаллом $NaJ(Tl)$.

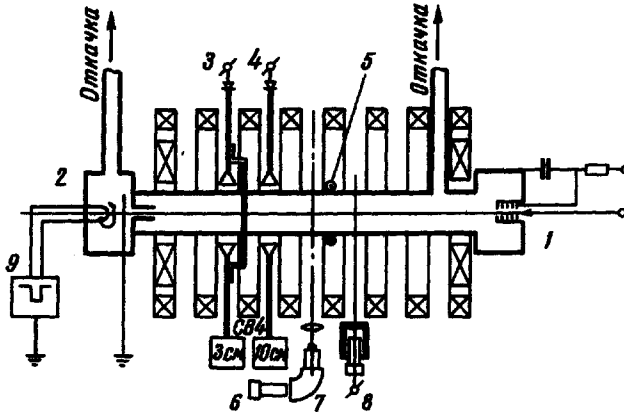


Рис. 1. Схема установки: 1 - плазменный инжектор, 2 - электронная пушка, 3, 4 - источник СВЧ, 5 - диамагнитный зонд, 6, 7 - электронно-оптическая и спектральная аппаратура, 8 - регистратор тормозного излучения, 9 - высоковольтный импульсный источник

На рис. 2, а показана осциллограмма сигнала с диамагнитного зонда при срабатывании только плазменного инжектора. Верхняя часть осциллограммы 2, а отвечает накоплению плазмы, нижняя - ее распаду. Оценка nT для первичной плазмы дает величину 10^{13} эв.см⁻³. Максимальное значение концентрации достигает $n = 10^{12}$ см⁻³, откуда получаем величину электронной температуры первичной плазмы $T = 10$ эв.

При одновременной инъекции в ловушку плазмы и электронного пучка концентрация не повышается, но значительно увеличивается энергосодержание плазмы, о чем свидетельствует осциллограмма диамагнитного сигнала на рис. 2, б. Обработка этой осциллограммы дает величину $nT = 3 \cdot 10^{14}$ эв. см⁻³. Величина nT за полное время инъекции электронного пучка (450 мксек) достигает $5 \cdot 10^{14}$ эв.см⁻³.

Эти значения nT получены в опытах при пробочном отношении $R = 4$ и магнитном поле $500 \text{ э. нТ} = 0,6 \cdot 10^{14} \text{ эв. см}^{-3}$ в диапазоне полей $500 \div 2000 \text{ э}$ при $R = 1,8$.

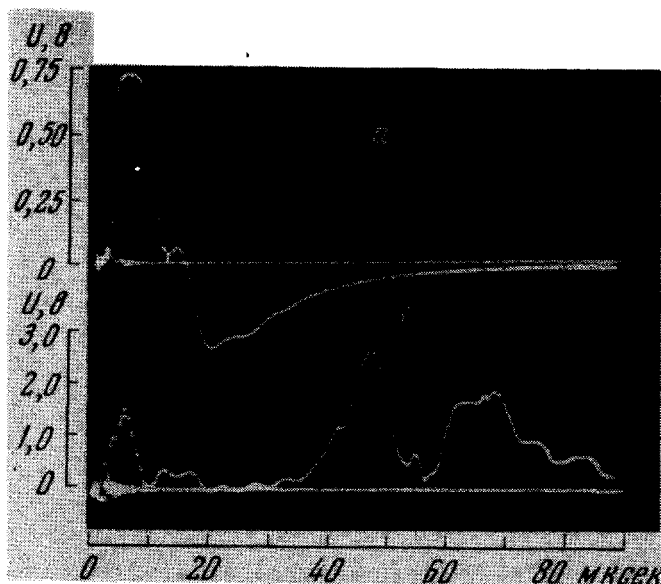


Рис. 2. Сигнал диамагнитного зонда: а - при срабатывании только плазменного инжектора, б - при одновременной инжекции электронного пучка и плазмы

Из рис. 3 видно, что в случае $R = 1,8$ концентрация спадает с постоянной времени $\tau = 300 \text{ мксек}$. При $R = 4$ кривая претерпевает излом вблизи $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$, и распад плазмы замедляется. Это можно объяснить двухкомпонентным составом плазмы. "Холодная", но более плотная компонента распадается со временем порядка 500 мксек . Ниже уровня $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ τ резко возрастает, что связано с наличием "горячих" электронов с плотностью порядка 10^{10} см^{-3} .

О наличии "горячих" электронов в ловушке свидетельствует также длительное, интенсивное и жесткое тормозное излучение. Если при $R = 1,8$ тормозное излучение по длительности никогда не превышает 1 мсек , то в случае $R = 4$ оно длится свыше 100 мсек . Интен-

сивность излучения резко увеличивается, энергия квантов возрастает в несколько раз. Оценка температуры по спектральному распределению тормозного излучения дает величину $T = 40$ кэВ.

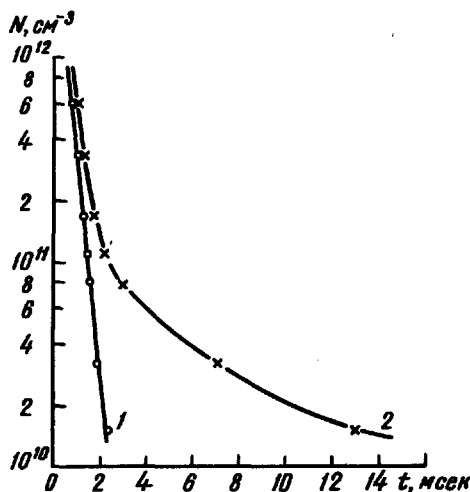


Рис. 3. Распад плазмы при различном пробочном отношении: 1 - $R = 1,8$, 2 - $R = 4$

Таким образом, эффективность нагрева электронов плазмы пучком существенно зависит от пробочного отношения. При изменении пробочного отношения от 1,8 до 4 давление плазмы увеличивается в 10 раз. Увеличивается время жизни плазмы в ловушке. Появляется группа длительно удерживаемых в ловушке "горячих" электронов с плотностью, близкой к 10^{10} см^{-3} . Потери энергии электронного пучка на нагрев плазмы соответственно увеличиваются от долей процента до 3,5%, а в начальной стадии нагрева (за первые 90 мксек) эти потери достигают 10%.

Влияние пробочного отношения на нагрев плазмы прямым током наблюдалось также в опытах М.В.Бабкиной и др.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Е.К.Завойскому за постоянный интерес и ценные советы.

Поступило в редакцию
9 сентября 1965 г.

Литература

- [1] Я.Б. Файнберг. Атомная энергия, II, 313, 1961.
- [2] В.Д.Шапиро. ЖЭТФ, 44, 613, 1963.
- [3] А.А.Веденов, Е.П.Велихов, Р.З.Сагдеев. УФН, 73, 701, 1961.
- [4] А.К.Березин, Г.П.Березина, Л.И.Болотин, Я.Б.Файнберг.
Атомная энергия, 14, 249, 1963.
- [5] А.К.Березин, Я.Б.Файнберг, Л.И.Болотин, Г.П.Березина.
Атомная энергия, 18, 273, 1965.
- [6] I. Alexeff, R.V. Heidigh, W.F. Peed, E.D. Shipley. Phys. Rev. Lett., 10, 273, 1963.
- [7] I. Alexeff, R.V. Heidigh, W.F. Peed. Phys.Rev., 136, 689, 1964.