

[6] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Коссы И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. СВЧ разряды высокого давления. Труды ФИАН. 1985. Т. 160. С. 174-203.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
16 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 8

26 апреля 1989 г.

04; 10

РАЗВИТИЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО МОДУЛИРОВАННОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА В ГАЗЕ

В.А. Киселев, А.Ф. Линник,
Я.Б. Файнберг, В.Н. Белан,
А.К. Березин, Ю.П. Блюх,
А.М. Егоров, Б.И. Иванов,
И.Н. Онищенко, В.В. Усков

Исследования по пучково-плазменному разряду (ППР) ранее проводились при инъекции в нейтральный газ электронных пучков [1-3]. При инъекции в нейтральный газ ионных пучков с небольшими токами и с энергией 20-100 кэВ [4, 5] аналогичных явлений обнаружено не было, т.к. из-за захвата электронов плазмы и перезарядки ионов пучка стабилизация пучковой неустойчивости происходила при амплитудах возбуждаемых полей ниже пробойных. Однако ППР наблюдался при инъекции сильнотоочного ионного пучка с энергией 100 кэВ в газовую мишень, находящуюся в продольном магнитном поле [6, 8].

В настоящей работе исследовалось экспериментально и даны теоретические оценки развития ППР при транспортировке высокоэнергетичного модулированного по плотности протонного пучка в газе без внешнего магнитного поля. Источником протонного пучка служил резонансный линейный ускоритель с ВЧ-фокусировкой [7]: энергия протонов - 5 МэВ; ток в импульсе ≈ 30 мА, длительность импульса - 2 нс, эмиттанс пучка - 10^{-3} рад. см; каждый импульс состоял из $3 \cdot 10^3$ протонных сгустков с частотой следования - $\omega_M \sim 9.2 \cdot 10^8$ с $^{-1}$. Плотность протонов на оси пучка - $n_b \sim 10^7$ см $^{-3}$. Камера взаимодействия представляла собой стеклянную трубу диаметром 10 см и длиной 100 см, имеющую автономную откачку и отделенную от ускорителя ловсановой пленкой толщиной 12 мкм. Рабочий газ - водород или воздух.

Для диагностики пучка и плазмы были использованы: цилиндр Фарадея, расположенный в конце камеры взаимодействия, специаль-

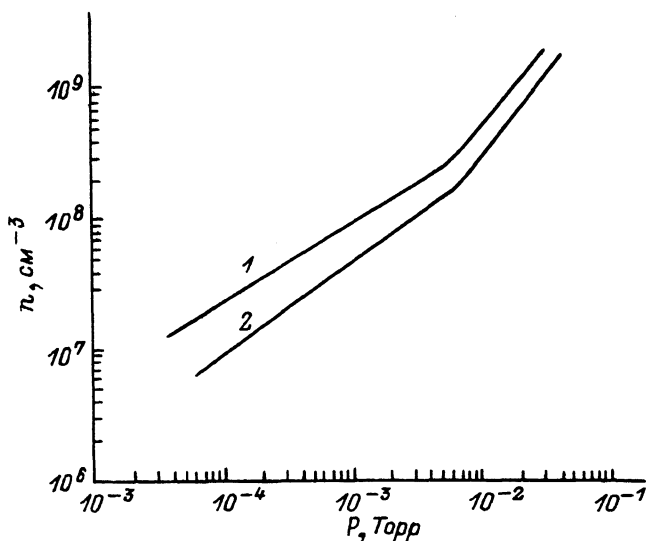


Рис. 1. Зависимость плотности плазмы от давления воздуха: 1 - $I_b = 17$ мА, 2 - $I_b = 12$ мА.

ный ВЧ-резонатор для измерения плотности плазмы, находящийся в 50 см от цилиндра Фарадея, магнитный анализатор энергетического спектра протонного пучка, пьезодатчик для регистрации импульса давления пучка, а также плавающий зонд, расположенный у цилиндра Фарадея.

Давление газа в камере взаимодействия менялось от 10^{-5} до $3 \cdot 10^{-2}$ торр, во всем этом диапазоне давлений сигнал с пьезодатчика оставался постоянным (точность измерений $\pm 10\%$). При давлении газа выше $4-6 \cdot 10^{-3}$ торр (критическое давление) плотность плазмы, образованной пучком, возрастает быстрее, чем при более низких давлениях (рис. 1), а магнитный анализатор спектра при давлениях выше критического регистрирует уширение энергетического спектра протонного пучка (рис. 2). Одновременно с аномальным поведением плотности плазмы и уширением энергетического спектра пучка в 5-10 раз возрастает сигнал с плавающего зонда. Для объяснения этих явлений ниже приводится ряд оценок. До критического давления стационарное значение плотности плазмы n_p , определяемое балансом частиц, рождающихся при неупругих соударениях и убывающих при свободном разлете плазмы, соответствует следующему выражению:

$$n_p = \frac{n_b N \sigma U_b R}{2 U_{Ti}}$$

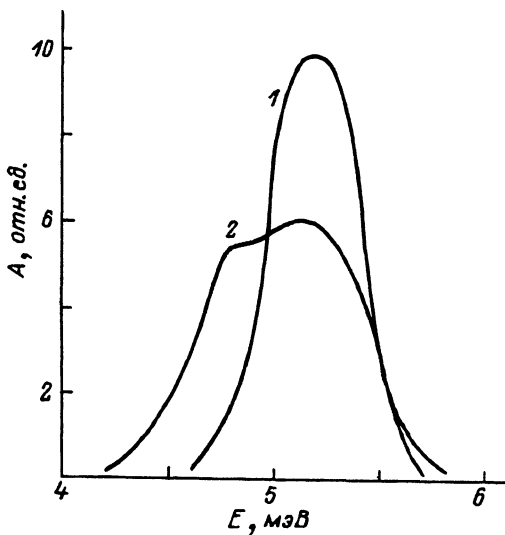


Рис. 2. Энергетический спектр протонного пучка: 1 - P в диапазоне 10^{-5} - $3 \cdot 10^{-2}$ торр, 2 - $P \sim 1 \cdot 10^{-2}$ торр.

где N - плотность нейтрального газа, U_b и U_{Ti} скорости пучка и ионов плазмы, σ - сечение ионизации, R - радиус пучка.

При критическом давлении плотность плазмы достигает величины $n_p = n_{kp} \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$. Это значение n_p обеспечивает возможность резонансного возбуждения плазменных колебаний протонным пучком $\omega_p = \omega_M \approx 9.2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Время, за которое образуется такая

плотность плазмы (при $P \sim P_{kp}$), $\tau \approx \frac{n_p}{n_0 \sigma U_b N} \approx 10^{-7} \text{ с}$. Учиты-

вая, что длительность импульса тока пучка $T \gg \tau$, можно рассматривать движение основной части ионного пучка в плазме с $n_p \gg n_{kp}$ и предполагать развитие пучковой неустойчивости с ускорением электронов плазмы в поле возбуждаемых волн до энергий, превышающих энергию ионизации нейтрального газа. В результате развивается ионный ППР, аналогичный ППР на электронных пучках [1-3].

Оценка величины пробойного СВЧ поля может быть получена из уравнения для скорости набора энергии вторичным электроном в поле возбуждаемой волны:

$$n_p \frac{d\bar{\epsilon}}{dt} = \nu_c \frac{E^2}{4\pi}, \quad \nu_c \ll \omega_p,$$

где $\bar{\epsilon}$ - средняя энергия электрона, ν_c - частота упругих столкновений. Полагая, что энергия электрона $\bar{\epsilon}$ должна возрасти до энергии ионизации ϵ_i за время меньше обратного времени потерь

электрона, обусловленного прилипанием и диффузией электронов, получаем для пробойного поля выражение

$$E_{пр} = \frac{m \omega_p}{2 \gamma_c \epsilon^2} \epsilon_i.$$

Для параметров эксперимента это дает $E_{кр} \sim 200$ В/см. Если стабилизация неустойчивости определяется захватом электронов плазмы, т.е. $e\varphi_{max} \approx \frac{m U_b^2}{2}$, то максимальная величина напряженности

поля возбуждаемой волны $E_{max} \approx 0.7$ кВ/см. Следовательно, в результате неустойчивости возбуждаются поля, достаточные для СВЧ пробоя газа. Отметим, что в экспериментах с низкоэнергетичными ионными пучками [4, 5] $E_{max} \sim 50$ В/см $< E_{пр}$ и ППР не развивается. Таким образом, модулированный по плотности моноэнергетический протонный пучок с энергией 5 МэВ, током 10–30 мА и небольшим фазовым объемом может вызывать развитие ППР в нейтральном газе при давлении больше $P_{кр} = 4-6 \cdot 10^{-3}$ торр.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Харченко И.Ф., Файнберг Я.Б., Корнилов Е.А., Николаев Р.М., Педенко И.С., Луценко Е.И. // ЖТФ. 1961. Т. 31. С. 761.
- [2] Лебедев П.М., Онищенко И.Н., Ткач Ю.В., Файнберг Я.Б., Шевченко В.И. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. С. 407.
- [3] Кингсеп А.С., Новобранцев И.В., Рудаков Л.И., Смирнов В.П., Спектр А.М. // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. С. 2132.
- [4] Габович М.Д. // УФН. 1977. Т. 121. С. 259.
- [5] Лиситченко В.В., Солошенко И.А., Циолко В.В., Фашук А.К. // УФЖ. 1987. Т. 32. С. 1359.
- [6] Кияшко В.А., Корнилов Е.А., Коляда Ю.Е., Файнберг Я.Б. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 17. С. 1073–1077.
- [7] Теплюков В.А. Исследование ускорителя с ВЧ фокусировкой // Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускор. заряд. частиц. М.: Наука, 1978. Т. 1. С. 288.
- [8] Keyashko V.A., Kornilov E.A., Kolyada Yu.E., Fainberg Ya.B. Proc. of the 3rd Inter. Topical Conf. High power electron and ion beam, Novosibirsk, 1979. V. 1. P. 97–102.