

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ ЧЕРЕЗ ГАЗ И ПЛАЗМУ

Ю. В. Ткач, Я. Б. Файнберг, И. И. Магда, В. Д. Шапиро,
В. И. Шевченко, А. И. Зыков, Е. А. Лемберг,
И. Н. Мондрус, Н. П. Гадецкий

Цель настоящей статьи – изложить предварительные результаты экспериментов по взаимодействию сильноточных релятивистских пучков с плазмой. Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Электронный пучок с параметрами: ток до 60 кА,

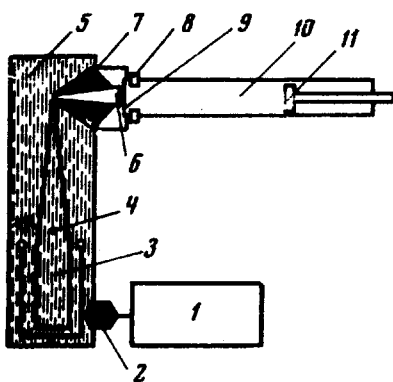


Рис. 1. Схема установки: 1 – генератор Маркса, 500 кВ, 2 – зарядный изолятор, 3 – коаксиальная двойная формирующая линия, 4 – коаксиальный трансформатор, 5 – жидкий диэлектрик (дистиллированная вода), 6 – катод вакуумного диода, 7 – проходной изолятор, 8 – шунтовой регистратор тока. Сопротивление 0,1 Ом, 9 – анод (алюминиевая фольга, толщина 40 мк), 10 – камера дрейфа, 11 – передвижной коллектор

энергия электронов до 1,0 МэВ, разброс по энергии $\sim 20\%$, длительность импульса $3 \cdot 10^{-8}$ сек создавался с помощью двойной формирующей линии (ДФЛ) цилиндрического типа, заполненной дистиллированной водой. Линия заряжалась от импульсного генератора Маркса, рассчитанного на выходное напряжение до 0,5 МВ с высокой крутизной переднего фронта импульса напряжения [1]. В качестве источника электронов в экспериментах использовался игольчатый катод, геометрия которого обеспечивала хорошее согласование электронной пушки с ДФЛ.

Исследовалось прохождение релятивистского пучка через камеру длиной 3 м, заполненную азотом, при давлении $10^{-2} \div 20$ мм рт.ст. При прохождении пучка через газ создавалась плазма с плотностью $10^{12} \div 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³, и электронный пучок компенсировался как по заряду, так и по току. Величина обратного тока в плазме составляла 70 ÷ 80% тока в пучке. Область давлений, соответствующая наилучшему прохождению пучка, лежала в диапазоне $5 \cdot 10^{-2} \div 8 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. При давлениях меньших $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. пучок запирается, так как не происходит газовая фокусировка. При давлениях выше 2 мм рт.ст. становится существенным рассеяние электронов обратного тока в газе. Образование плазмы при прохождении сильноточного релятивистского пучка обусловлено, по-видимому, коллективными эффектами – ионизацией в полях, возбуждаемых пучком колебаний [2, 3]. При этом

наблюдается характерная периодическая структура и образуются перетяжки по длине пучка (рис. 2, а). В условиях оптимальной газовой фокусировки минимальный радиус пучка в области перетяжки достигал 3 мм. Период релаксации в пучке порядка $40 \div 50$ см.

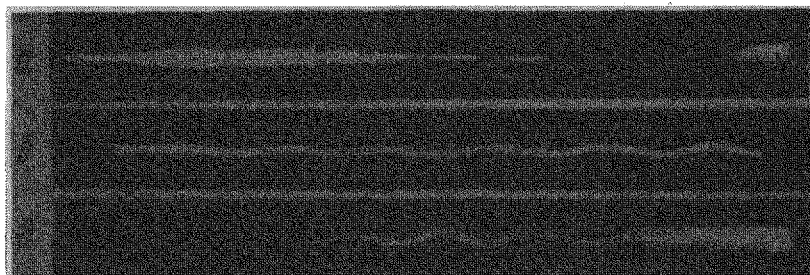


Рис. 2. Прохождение электронного релятивистского пучка через газ при различных условиях: а — ток пучка 30 кА, давление $2 \cdot 10^{-1}$ тор, б — ток пучка 50 кА, давление $4 \cdot 10^{-1}$ тор, в — ток пучка 55 кА, давление 1 тор

При больших токах в пучке $I \geq 40$ кА и энергии $\mathcal{E} = 1,0$ МэВ наблюдалось развитие макроскопической неустойчивости пучка типа "шланговой" [4]. Неустойчивость приводит к поперечному смещению пучка и возникновению возмущений типа плоской "змейки" (рис. 2, б). Инкременты неустойчивости [5]:

$$\delta_{\text{шл}} = \left(\frac{n_1 m}{n_0 M} \right)^{1/2} \frac{c}{r_0} \langle \theta \rangle \quad (1)$$

(где $n_1 n_0$ — соответственно плотность пучка и плазмы, m — масса электронов, M — масса ионов, $c \langle \theta \rangle$ — средний разброс поперечных скоростей, r_0 — начальный радиус пучка).

В условиях эксперимента $\delta_{\text{шл}}$ имеет величину $3 \cdot 10^8 \div 10^8$ сек $^{-1}$, т. е. $\delta_{\text{шл}} \tau_{\text{имп}} \approx 10 \div 3$. Поэтому неустойчивость удается наблюдать только при максимально возможных в данном эксперименте токах пучка. Длины волн возбуждаемых колебаний ограничены условием

$\lambda > \frac{2\pi r_0}{\langle \theta \rangle} \approx 20 \div 40$ см. Измеренные в эксперименте значения λ при "шланговой" неустойчивости, $\sim 40 \div 50$ см.

Были проведены эксперименты по генерированию СВЧ излучения при взаимодействии релятивистского пучка с плазмой. Ввиду малого углового разброса в пучке $\theta \lesssim (n_1/n_0)^{1/3}$ и малого разброса по продольным энергиям $\Delta\mathcal{E}/\mathcal{E} < (n_1/n_0)^{1/3} \gamma_0$ (γ_0 — релятивистский фактор), неустойчивость, возникающая при взаимодействии такого пучка с плазмой — гидродинамическая, с инкрементом, равным

$$\delta = \omega_p \left(\frac{n_1}{n_0 \gamma_0} \right)^{1/3} \left(\frac{k_z^2}{k^2} \frac{1}{\gamma_0^2} + \frac{k_{\perp}^2}{k^2} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где ω_p — ленгмюровская частота плазмы, k_x , k_z — поперечная и продольная составляющие волнового вектора. Известно, что переход к релятивистским энергиям пучка приводит к значительному увеличению энергии СВЧ колебаний, возбуждаемых при гидродинамической неустойчивости ($\sim \gamma_0^2$) [6]. Вместе с тем, при больших γ_0 существенно увеличиваются длины нарастания колебаний, и для получения заметных эффектов на небольших длинах необходим переход к модулированным пучкам. Из-за трудности модуляции сильнооточных пучков при релятивистских энергиях весьма перспективной представляется использование автомодуляции, возникающей при взаимодействии пучка с периодической структурой с резонансной частотой близкой к плазменной.

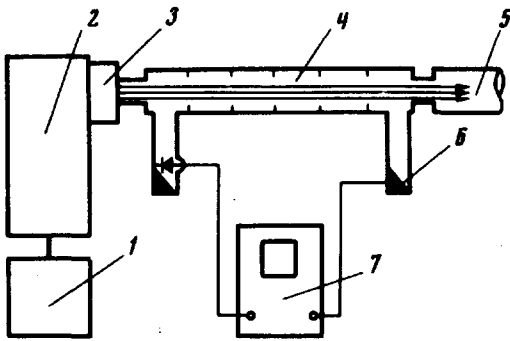


Рис. 3. Схема эксперимента по взаимодействию пучка с периодической структурой: 1 — зарядный генератор Маркса, 2 — двойная формирующая линия, 3 — вакуумный диод, 4 — диафрагмированный волновод, 5 — камера дрейфа, 6 — согласованная нагрузка-калориметр, 7 — осциллограф ОК-19М

Для получения этого эффекта использовалась замедляющая структура, являющаяся секцией диафрагмированного волновода длиной 1 м, рассчитанная на частоту $2500 \div 2800$ МГц и замедление $\beta_{\text{ф}} = 0,7$ (рис. 3). В дальнейшем предполагается переход к более высокочастотным волноводам с тем, чтобы автомодуляция пучка происходила на частотах близких к плазменной. При давлениях $0,1 \div 1$ мм рт. ст. пучок, проходя через секцию, создавал плазму с плотностью $10^{12} \div 10^{13}$ см⁻³, что приводило к увеличению замедления в секции до величины $0,3 \div 0,5$ в рассматриваемом диапазоне частот.

В течение импульса энергия в пучке изменялась в пределах $0,3 \div 1,0$ Мэв. Ширина резонанса между пучком и возбуждаемыми волнами с частотой ω и волновым числом k_z :

$$\left| \frac{\omega}{k} - v_0 \right| \sim \left(\frac{\omega_b}{\omega_0} \right)^{2/3} \frac{v_0^{4/3}}{v_g^{1/3}} \sim v_0 \quad (3)$$

где v_0 — скорость пучка, ω_b — ленгмюровская частота пучка, v_g — групповая скорость волны, ω_0 — резонансная частота секции. В условиях эксперимента пучок в течение всего импульса находится в резонансе с возбуждаемыми волнами.

Длина, на которой происходит нарастание колебаний составляет величину порядка: $l \sim 10 \frac{v_0^{2/3} v_g^{1/3}}{\omega_b^{2/3} \omega_0^{1/3}} \approx (20 \div 30)$ см т. е. существенно меньше длины секции.

Таким образом, эффект автомодуляции пучка в секции оказывается значительным. Автомодуляция сопровождается генерацией интенсивных СВЧ колебаний на резонансной частоте ω_0 . Измерения мощности СВЧ проводились двумя способами: с помощью калиброванного детектора и калориметром, согласованным с волноводным трактом ($K_{СВ} = 1,35$). Величина мощности достигала 10^7 *вт*. Генерация излучения наблюдалась во всем диапазоне частот волновода с максимумом на частоте 2600 *Мгц* и имела длительность $2 \cdot 10^{-8}$ *сек.*

Физико-технический институт
Академии наук УССР

Поступила в редакцию
28 июля 1972 г.

Литература

- [1] О.Г.Загороднов, И.Н.Магда, Н.П.Гадецкий, В.И.Беляев, Ю.В.Ткач. ПТЭ, №6, 89, 1971.
 - [2] M.L.Andrews, H.Davitan, H. H.Fleishman, J. A.Nation. Phys. Fluids, 14, 11, 1971.
 - [3] В. J. Eastlund. Nucl. Fusion, 11, 15, 1971.
 - [4] А.А.Веденов, Р.З.Сагдеев. Сб. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. Изд. АН СССР, 3, 278, 1958.
 - [5] А.А.Иванов, Л.И.Рудаков. ЖЭТФ, 58, 1332, 1970.
 - [6] Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. ЖЭТФ, 57, 966, 1969.
-