

Взаимодействие модулированных сильноточных электронных импульсных пучков с плазмой, находящейся в продольном магнитном поле

А. К. Березин, Г. П. Березина, Л. И. Болотин, Ю. М. Ляпалко, Я. Б. Файнберг

Приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия модулированных сильноточных электронных импульсных пучков с плазмой, находящейся в продольном магнитном поле. Плазма образовывается самим пучком. Показано, что при определенных условиях модулированный электронный пучок значительно сильнее взаимодействует с плазмой, чем немодулированный. При этом в пучке и плазме возбуждаются продольные волны со значительно большей (примерно в семь раз) напряженностью электрического поля, чем без начальной модуляции. Приведено объяснение полученных результатов.

Как было показано теоретически [1, 2] и экспериментально [3—5], одной из причин эффективного взаимодействия первоначально немодулированного электронного пучка с плазмой является автомодуляция, приводящая к когерентному взаимодействию пучка с плазмой. Глубина модуляции определяется напряженностью поля возбуждаемых колебаний, а напряженность поля существенно зависит от начальной амплитуды возмущения, которая при первоначально немодулированных пучках определяется сравнительно небольшими флуктуационными полями. Поэтому автомодуляция становится существенной только в конце области взаимодействия, когда напряженности полей благодаря экспоненциальному росту становятся значительными.

Таким образом, можно ожидать, что, если пучки на входе в область взаимодействия прошли через область модулирующего поля, эффективность взаимодействия электронного пучка с плазмой существенно увеличится [2, 6—8]. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, значительно возрастает по сравнению с флуктуационными полями ампли-

туда начальных напряженностей поля, во-вторых, в определенных условиях при прохождении пучка через область стороннего ВЧ-поля создается группировка частиц, усиливающая эффекты когерентности.

Следует отметить, что при очень большой глубине модуляции в системе плазма — пучок в конечном счете установятся не увеличивающиеся со временем или в пространстве колебания.

Взаимодействие модулированных пучков заряженных частиц с плазмой может быть использовано для нагрева плазмы, захвата частиц в ловушки, разработки новых методов ускорения заряженных частиц, усиления и генерирования ВЧ-колебаний [2].

Экспоненциальный рост неустойчивости обусловлен, как известно, тем, что возникающие при неустойчивости поля увеличивают степень группировки частиц, а это, в свою очередь, усиливает поле. Глубокая модуляция на данной частоте приводит к тому, что с дальнейшим увеличением напряженности поля степень группировки частиц уже не меняется и рост полей прекращается. Предварительная модуляция нарушает группировку частиц на частотах, отличных от частоты модуляции, и приводит к срыву целого спектра неустойчивостей. Здесь необходимо следить за тем, чтобы для возбуждения собственных частот плазмы не выполнялись условия когерентности $a < \lambda_{пл}$, где a — длина сгустка частиц; $\lambda_{пл} = \frac{2\pi v_{ф}}{\omega_0}$ (здесь $v_{ф}$ — фазовая скорость волны; ω_0 — электронная ленгмюровская частота плазмы). Для этого достаточно, чтобы длина волны моду-

ляции $\lambda_m = \frac{a}{2}$. Следует отметить, что при устранении обычных неустойчивостей путем модуляции пучка могут возникнуть неустойчивости, обусловленные параметрическими резонансами, но так как ширина параметрических резонансов мала, то существующие неоднородности и соударения в реальной плазме приведут к срыву этих неустойчивостей.

Эффективность взаимодействия модулированного пучка с плазмой существенно зависит от способа модуляции. Так, например, при клистронном способе модуляции группировка частиц вызвана разностью их скоростей, поэтому в некоторых случаях он может ослабить или даже сорвать развитие неустойчивости из-за возникающего при этом большого разброса скоростей в пучке.

В наших экспериментах первоначальная модуляция осуществлялась с помощью короткой спирали ($L_{сп} < L_{пр.вз}$, где $L_{сп}$ — длина спирали; $L_{пр.вз}$ — длина пространства взаимодействия). В этом случае в зависимости от длины спирали может иметь место как клистронный, так и фазовый механизм группировки. Поскольку пока нет полного теоретического решения задачи о взаимодействии первоначально модулированного таким способом электронного пучка с плазмой, проведем только некоторые оценки возможностей повышения эффективности взаимодействия при начальной модуляции пучка.

При взаимодействии с неограниченной плазмой модулированного электронного пучка, в котором переменная плотность тока j изменяется по закону

$$j = \delta j_0 \exp[i(\omega t - k_{3z}z)], \quad (1)$$

максимальная напряженность электрических полей, возбуждаемых в системе [8],

$$E_z^0 = \frac{2\pi\delta j_0}{v}, \quad (2)$$

где δ — глубина модуляции электронного пучка; j_0 — плотность тока; v — частота соударений. Это соотношение получено для случая, когда можно пренебречь температурой пучка и плазмы и обратным воздействием поля на пучок. Для значений $j_0 = 5 \text{ а/см}^2$, $\delta \approx 0,1$ и $v = 10^3 \text{ сек}^{-1}$ получим

$$E_z^0 \approx 30 \text{ кв/см.}$$

Вопрос о взаимодействии с плазмой электронного пучка, промодулированного с помощью пары сеток, рассмотрен в работе [7]. Из этой

работы следует, что напряженность поля в системе пучок — плазма связана с модулирующим напряжением соотношением

$$E = V_0 \frac{\omega_0^2 e^{\gamma_{пр} z}}{8\pi v_0 \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) \omega} \quad (3)$$

в приближении $\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) \approx \frac{\gamma}{\omega_0}$ и $\gamma \approx \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{1/3} \omega_0$, где V_0 — модулирующее напряжение; ω_0 — плазменная частота; ω — частота модуляции; v_0 — скорость пучка; $\gamma_{пр}$ — инкремент пространственного нарастания; γ — инкремент пучковой неустойчивости; n_1 — плотность пучка; n_0 — плотность плазмы.

При токе 5 а, амплитуде модулирующего напряжения 10 в/см, длине взаимодействия 32 см, $v_0 = 8 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$ и $n_0 = 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ напряженность в конце системы по этой формуле должна составлять 8 кв/см. Эти числа могут служить только оценками, так как в нашем случае модуляция осуществляется короткой спиралью.

Экспериментальному исследованию взаимодействия плазмы и модулированных электронных пучков с относительно малым током посвящены работы [9—12]. В настоящей работе излагаются результаты экспериментальных исследований взаимодействия модулированных сильноточных электронных импульсных пучков с плазмой, находящейся в продольном магнитном поле.

Описание установки

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Источником электронов служила описанная ранее электронная пушка [13]. Электронный пучок диаметром 10—11 мм с током до 5а, энергией $\sim 20 \text{ кэв}$ (длительность импульса 4,5 мксек, 50 посылок в 1 сек) проходил через модулирующий спиральный переход, плазменную камеру, а затем демодулирующий спиральный переход и попадал на коллектор. ВЧ-колебания определенной частоты и заданной мощности от специального генератора через коаксиальный фидер подавались на модулирующий спиральный переход, с помощью которого осуществлялась начальная модуляция электронного пучка на входе в плазменную камеру. Этот спиральный переход служил также для создания перепада давлений от $1 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-3} \text{ торр}$ между камерой электронной пушки и плазменной камерой. Он представлял собой систему из двух коаксиальных спиралей, распо-

распространяющейся внутри и снаружи стеклянной трубки внутренним диаметром 13 мм и намотанных в противоположные стороны (радиус внутренней спирали ~0,6 см, радиус более короткой внешней спирали ~1,2 см). Параметры спиралей выбирались так, чтобы фазовая скорость волны, распространяющейся в спирали, была примерно равна скорости электронного пучка и, следовательно, фазовой скорости волны,

Проходя через плазменную камеру, электронный пучок ионизировал находящийся в ней газ (воздух), образовывал плазму и взаимодействовал с ней. Плотность плазмы измерялась методом, основанным на использовании свойств плазменных волноводов [4]. Для оптимального случая взаимодействия при давлении $2 \cdot 10^{-4}$ торр плотность составляла $2 \cdot 10^{10}$ см⁻³ без начальной модуляции. Ток пучка равнялся 5 а,

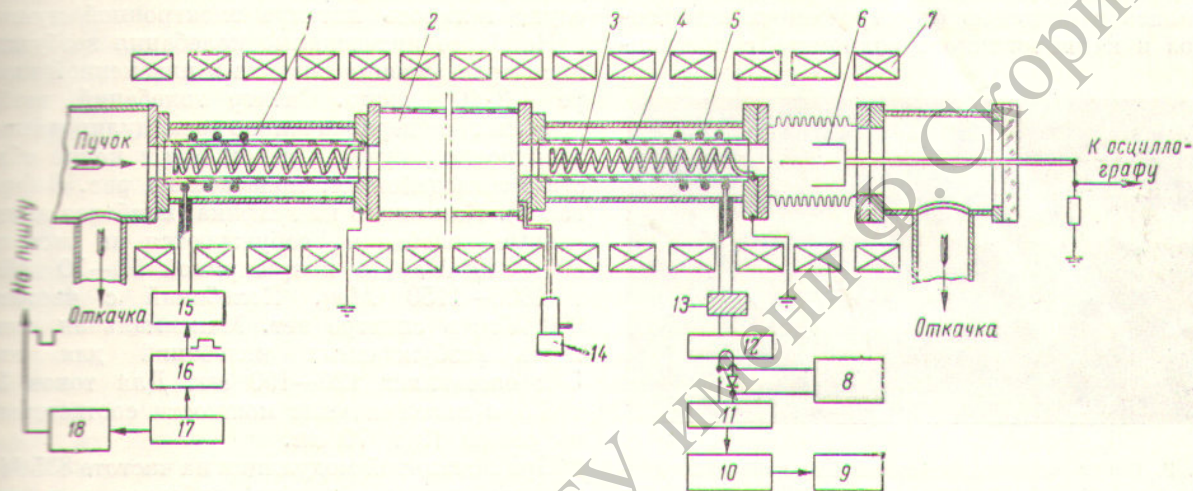


Рис. 1. Блок-схема установки для изучения взаимодействия модулированных электронных пучков с плазмой в продольном магнитном поле:

- 1 — первый спиральный переход; 2 — плазменная камера; 3 — внутренняя спираль второго спирального перехода; 4 — стеклянная трубка; 5 — наружная спираль; 6 — коллектор тока; 7 — соленоид для создания продольного магнитного поля; 8 — осциллограф; 9 — 3ПН-03М1; 10 — интегрирующая ячейка; 11 — ШУ-10; 12 — вольтмер; 13 — аттенюатор; 14 — механический датчик; 15 — генератор; 16 — модулятор; 17 — запускное устройство; 18 — модулятор для запуска пучка.

распространяющейся в плазме. Стеклянная трубка с обоих концов уплотнялась на вакуум.

Внешняя спираль соединялась с коаксиальным кабелем, волновое сопротивление которого составляло 75 ом. Внутренняя спираль была соединена с электродом, находящимся под нулевым потенциалом («заземлена»). Торцы стеклянной трубки покрывались слоем аквадага. Таким образом, электроны, попавшие на торцы стеклянной трубки и внутреннюю спираль, стекали на землю. Длина спирального перехода около 12 см. Коэффициенты стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе в этот спиральный переход в области частот 650—5000 Мгц не превышали 2,0. Начальная модуляция осуществлялась на частотах 835 и 900 Мгц, для которых КСВН < 1,4. Эти измерения были проведены на системах без электронного пучка. При прохождении электронного пучка через спираль КСВН практически не изменялся.

энергия электронов 21 кэв, напряженность магнитного поля 1300 э. При начальной модуляции на частоте ~835 Мгц с мощностью 600 вт плотность плазмы равнялась $2,5 \times 10^{10}$ см⁻³.

Пройдя через плазменную камеру, пучок попадал в демодулирующий спиральный переход, а затем на коллектор. С помощью демодулирующего спирального перехода от электронного пучка отбиралась ВЧ-мощность. Устройство и характеристики демодулирующего и модулирующего спиральных переходов аналогичны. Длина второго перехода 15 см. В связи с возможным расширением пучка диаметр проходного отверстия для пучка во втором спиральном переходе составлял 15 мм (в первом он был равен 10,5 мм). Через такую систему на коллектор проходило 75—80% общего тока пучка, взаимодействовавшего с плазмой.

Колебания, отбираемые с помощью демодулирующего спирального перехода от электрон-

ного пучка на выходе из области взаимодействия, через коаксиальный фидер с волновым сопротивлением 27 ом и фиксированные аттенюаторы поступали на резонансный волномер. Сигнал после кристаллического детектора на выходе волномера подавался на вертикальный вход электронно-лучевого осциллографа. Образец такой осциллограммы для тока 5 а, снятой на частоте 835 Мгц, приведен на рис. 2.

Максимальная мощность ВЧ-колебаний определялась с помощью фиксированных аттенюаторов и калиброванного волномера с полуши-

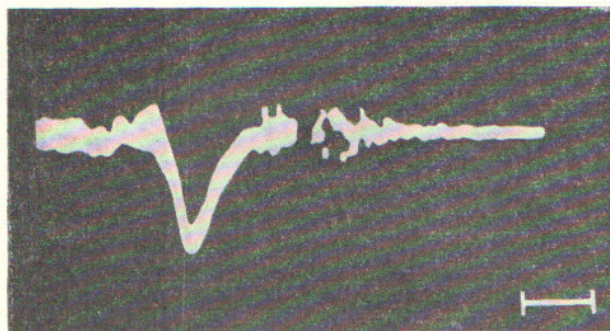


Рис. 2. Осциллограмма, показывающая изменение мощности колебаний во времени, полученная на выходе системы пучок — плазма.

Ток пучка 5 а, энергия 21 кэв; напряженность продольного магнитного поля 1300 э; частота модуляции 835 Мгц; масштаб 1 мксек.

риной полосы 1,5 Мгц. Волномер с кристаллическим детектором предварительно калибровался от генератора стандартных сигналов. К выходу волномера параллельно подключались осциллограф и широкополосный усилитель, который был соединен через катодный повторитель с интегрирующей ячейкой с электронным потенциометром ЭПП-09. При перестройке резонансного волномера по частоте на электронном потенциометре записывались частотные спектры колебаний, возбуждаемых в электронном пучке (зависимость интенсивности колебаний от их частоты).

Результаты измерений

По описанной методике были сняты частотные спектры колебаний, возбуждаемых при взаимодействии с плазмой первоначально модулированного, а также немодулированного электронных пучков с током 5; 3,8 и 2,3 а. При этом ток, достигший коллектора, соответственно равнялся 4; 3 и 2 а. Энергия пучка оста-

вляла 21 кэв, напряженность продольного магнитного поля ~1300 э. Модуляция пучка осуществлялась на частоте 835 Мгц. Задающий генератор работал в диапазоне 700—950 Мгц с выходной мощностью 1—16 вт в непрерывном режиме и 3—600 вт в импульсном режиме (длительность импульса 10 мксек).

В импульсном режиме генератор запускался специальной запускающей системой синхронно с запуском импульсной линии, от которой осуществлялось питание электронной пушки.

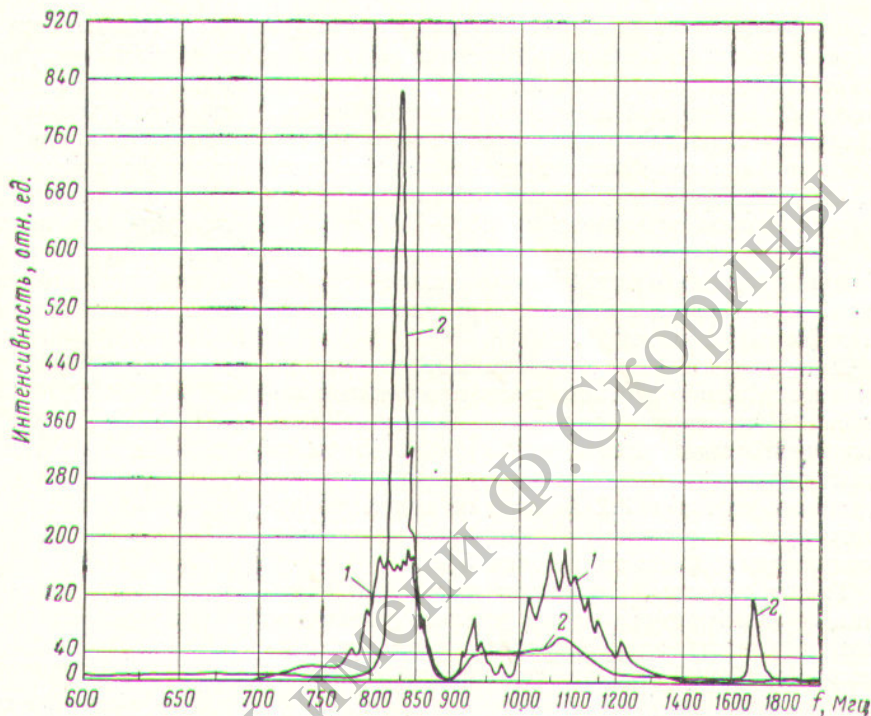
Наиболее интенсивные колебания возбуждались при давлении воздуха в плазменной камере ~2·10⁻⁴ торр. Спектр колебаний, возбуждаемых в первоначально немодулированном электронном пучке с током 5 а в конце области взаимодействия, приведен на рис. 3 (кривая 1). Как видно из графика, наиболее интенсивные колебания возбуждаются на частотах 800—840 Мгц (с полушириной 50—70 Мгц) и 1000—1150 Мгц. Колебаний с частотой 900 Мгц в спектре нет. Максимальная мощность возбуждаемых колебаний для тока 5 а составляет 120—150 вт. Для токов 2,3 и 3,8 а максимальные мощности соответственно равны 19 и 70 вт.

При начальной модуляции на частоте 835 Мгц система пучок — плазма работает как усилитель и на ее выходе регистрируются усиленные сигналы значительной интенсивности (с полушириной полосы 8—10 Мгц). Частотный спектр колебаний, возбуждаемых в промодулированном на частоте 835 Мгц пучке с током 5 а, приведен на рис. 3 (кривая 2).

Сравнивая спектры колебаний, возбуждаемых при взаимодействии модулированного и первоначально немодулированного электронных пучков с плазмой, можно заметить, что начальная модуляция (600 вт) приводит к подавлению колебаний для целой полосы частот, отличных от модуляционной (мощность уменьшилась в 16 раз). При этом мощность колебаний, генерируемых на частоте модуляции 835 Мгц, сильно возрастает (от 120—150 вт без начальной модуляции до 8 кет при модуляции с мощностью 600 вт).

На рис. 4, а, б приведены зависимости максимальной выходной мощности усиленных колебаний от начальной мощности модуляции (1—600 вт) на частоте 835 Мгц для токов 5; 3,8 и 2,3 а. Необходимо отметить, что при работе задающего генератора в непрерывном и импульсном режимах были получены идентичные данные и все экспериментальные точки хорошо укладывались на одни и те же кривые.

Рис. 3. Спектры колебаний, возбуждаемых в первоначально немодулированном (кривая 1) и модулированном (кривая 2) электронных пучках. Ток пучка 5 а, энергия 21 кэв, напряженность продольного магнитного поля 1320 в, давление $2 \cdot 10^{-6}$ торр, частота модуляции 835 Мгц.



Отсюда следует, что режим работы задающего генератора не влияет на полученные результаты.

Как видно из приведенных графиков, коэффициент усиления системы пучок — плазма увеличивается с ростом тока пучка. Под коэффициентом усиления в данном случае понимается отношение мощности ВЧ-колебаний на выходе системы к мощности модулирующего сигнала. Коэффициенты усиления на длине системы 40 см равны 12; 19 и 26 дб для токов 2,3; 3,8 и 5 а соответственно (мощность модуляции несколько ватт). С увеличением мощности модуляции коэффициент усиления системы па-

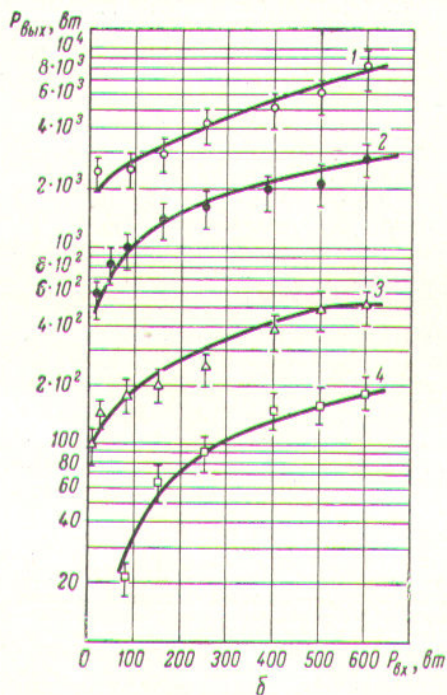
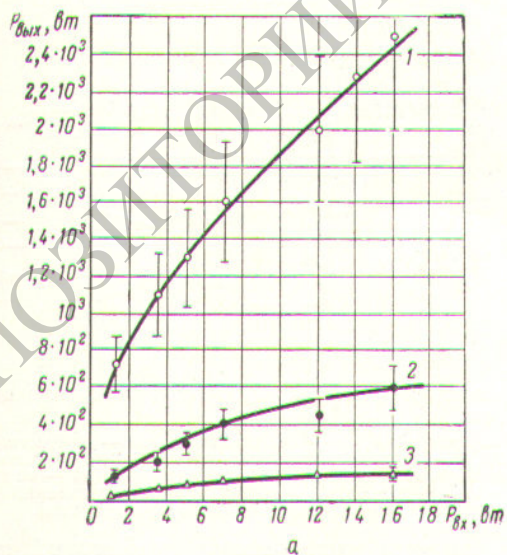


Рис. 4. Мощность ВЧ-колебаний на выходе системы пучок — плазма в зависимости от мощности модуляции для различных токов (а: 1—5 а, 2—3,8 а, 3—2,3 а; б: 1—3 — то же самое; 4 — вторая гармоника (1670 Мгц) для тока 5 а).

дает. Так, если при малых уровнях модулирующего сигнала (несколько ватт) он составляет 26 дБ для тока 5а, то при мощности 600 вт он уже равен 11 дБ на той же длине взаимодействия. Для тока 2,3 а при малых уровнях модулирующего сигнала коэффициент усиления составляет 12 дБ, а затем наступает насыщение для входных сигналов с мощностью 500—600 вт.

В конце области взаимодействия определены напряженности электрического поля колебаний, возбуждаемых в пучке в результате взаимодействия с плазмой.

Проведенные оценки показывают, что напряженности электрического поля продольных колебаний плотности заряда в конце области взаимодействия равны примерно 0,45 кВ/см для первоначально немодулированного электронного пучка и 3,2 кВ/см для модулированного пучка электронов с начальной мощностью модуляции 600 вт (ток пучка 5 а).

Таким образом, благодаря начальной модуляции электронного пучка удалось увеличить напряженность электрического поля продольных колебаний плотности заряда примерно в семь раз.

Как видно из графика, приведенного на рис. 3 (кривая 2), при начальной модуляции на частоте 835 Мгц кроме основной частоты наблюдаются также высшие гармоники модулирующей частоты, которых нет в спектре

сит от мощности модулирующего генератора и возрастает с увеличением последней. Из графика следует, что при мощности модулирующего генератора 600 вт мощность второй гармоники в конце области взаимодействия электронного пучка с плазмой составляет 180 вт.

Всего в наших экспериментах удалось зарегистрировать шесть гармоник. В таблице приведены значения мощности колебаний первых шести гармоник для пучка с током 5 а и начальной мощностью модуляции 600 вт.

Мощность высших гармоник модулирующей частоты

Номер гармоники	Частота колебаний, Мгц	Максимальная мощность колебаний, вт
1	835	$8 \cdot 10^3$
2	1670	180
3	2505	7
4	3340	0,2
5	4175	10^{-3}
6	5010	10^{-4}

Как видно из таблицы, амплитуды гармоник уменьшаются с увеличением номера гармоники.

Измерено распределение компоненты E_z ВЧ-поля в плазме вдоль оси системы. Блок-схема установки приведена на рис. 5. Для устранения отражения в конце плазменной

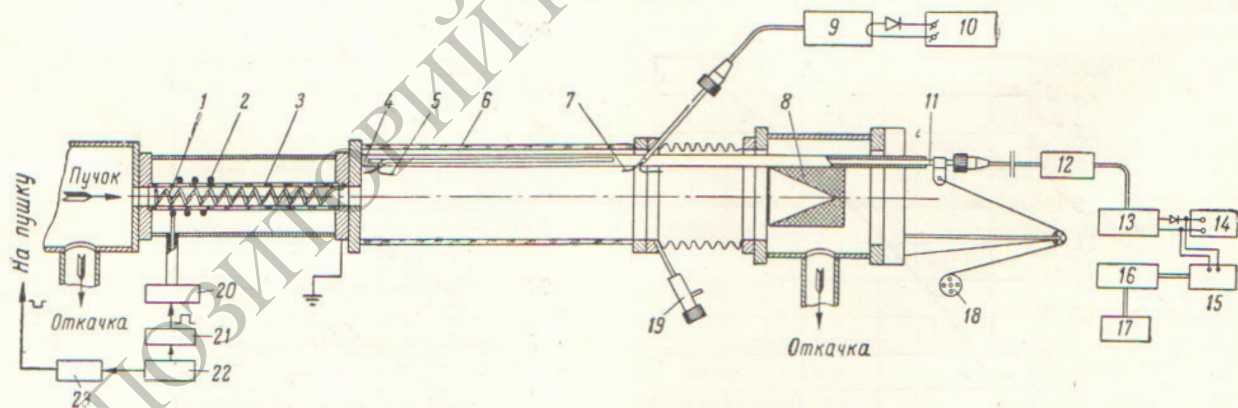


Рис. 5. Блок-схема установки для измерения распределения компоненты E_z ВЧ-поля в плазме вдоль оси системы:

1 — внутренняя спираль; 2 — внешняя спираль; 3 — стеклянная трубка; 4 — направляющая; 5 — полуволновый диполь; 6 — плазменная камера; 7 — приемная антенна (неподвижная); 8 — адиабатическая нагрузка (коллектор тока); 9 — резонансный вольтметр; 10, 14 — катодные осциллографы; 11 — коаксиальный кабель; 12 — аттенуатор; 13 — волномер; 15 — усилитель; 16 — интегрирующая схема; 17 — ЭПП-09; 18 — мотор РД-09; 19 — механический нагреватель; 20 — генератор; 21 — модулятор; 22 — запускающее устройство; 23 — модулятор для запуска пушки.

частот модулирующего генератора и первоначально немодулированного пучка. На рис. 4, б хорошо видна вторая гармоника на частоте 1670 Мгц. Мощность второй гармоники зави-

камеры располагался графитовый конус, служивший адиабатической нагрузкой для волн, распространявшихся в плазме, а также коллектором тока. Вдоль оси системы перемещался

аксиальный кабель с полуволновым диполем, ориентированным для измерения компоненты E_z ВЧ-поля.

Графики распределения компоненты E_z ВЧ-поля вдоль оси системы для различных значений мощности начальной модуляции (50; 80; 350 *вт*) при постоянном значении тока пучка 5 *а* приведены на рис. 6, *а*, *б*, *в*, а для различных значений тока пучка (2,3; 3,8 и 5 *а*)

стания $\gamma_{\text{пр}}$ для различных значений тока пучка и мощности начальной модуляции. Значение $\gamma_{\text{пр}}$ определялось из соотношения

$$\gamma_{\text{пр}} \approx \frac{1}{(z_2 - z_1)} \ln \frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{2(z_2 - z_1)} \ln \frac{W_2}{W_1}, \quad (4)$$

где E_1 , E_2 , W_1 и W_2 — напряженности поля и мощности распространяющейся волны в точках z_1 и z_2 .

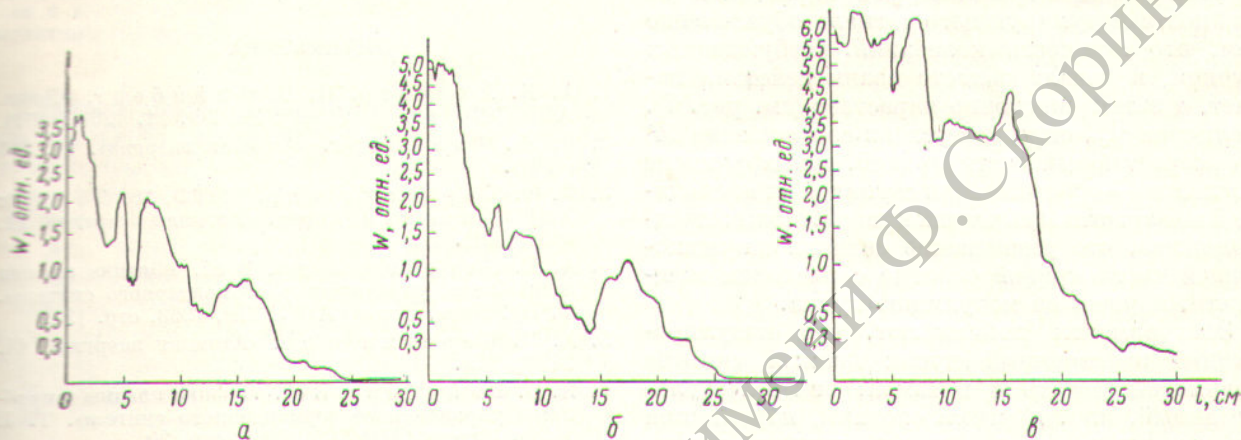


Рис. 6. Распределение компоненты E_z ВЧ-поля в плазме вдоль оси системы для различных значений мощности модуляции (*а* — 50 *вт*; *б* — 80 *вт* и *в* — 350 *вт*) при постоянном токе пучка 5 *а*.

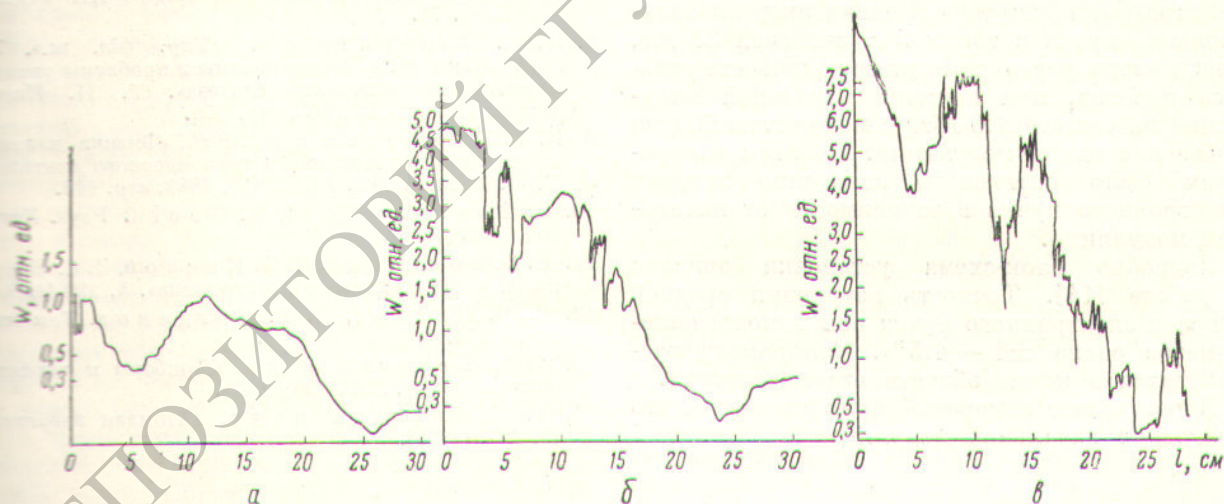


Рис. 7. Распределение компоненты E_z ВЧ-поля в плазме вдоль оси системы для различных значений тока пучка (*а* — 2,3 *а*; *б* — 3,8 *а* и *в* — 5 *а*) при мощности модуляции 600 *вт* (координата отсчитывается на графиках справа налево).

при одинаковой мощности начальной модуляции (600 *вт*) — на рис. 7, *а*, *б*, *в*.

Из приведенных графиков можно вычислить значения инкрементов пространственного нара-

Так, если при начальной мощности модуляции 50 *вт* инкремент пространственного нарастания составляет 0,8 см^{-1} , то при начальной мощности 600 *вт* он равен 0,13 см^{-1} (ток 5 *а*).

Для токов 5; 3,8 и 2,3 а при начальной мощности модуляции 600 *вт* инкременты соответственно равны 0,13; 0,09 и 0,06 *см*⁻¹.

Таким образом, из приведенных графиков следует, что с увеличением тока пучка и уровня ВЧ-мощности начальной модуляции инкременты пространственного нарастания сильно возрастают. Кажущееся противоречие между зависимостями для коэффициента усиления и инкремента пространственного нарастания от мощности модулирующего сигнала обусловлено тем, что мощность колебаний, возбуждаемых пучком, в начале области взаимодействия падает, а затем монотонно нарастает (см. рис. 7). Величина $\gamma_{пр}$ определяется из соотношения (4) на возрастающей части кривой, а коэффициент усиления — из отношения сигналов на нисходящей и возрастающей частях кривой. Можно предположить, что уменьшение сигнала на нисходящей части кривой связано с расходом мощности, идущей на модуляцию пучка.

Эксперименты показывают, что модулированный электронный пучок должен сильнее взаимодействовать с плазмой, чем немодулированный, или, другими словами, первый при прохождении через плазму должен терять больше энергии, чем второй. Для подтверждения этого при помощи чувствительного калориметра была измерена средняя энергия электронного пучка с током 5 а, энергией 21 *кэв*, прошедшего через демодулирующий спиральный переход, при наличии начальной модуляции на частоте 835 *Мгц* с мощностью 600 *вт* и без начальной модуляции. По этим измерениям было определено изменение энергии электронного пучка в зависимости от начальной модуляции.

Подробно блок-схема установки описана в работе [14]. Точность измерения средней энергии электронного пучка при помощи калориметра равна $\pm 1 - 1,5\%$. Калориметр располагался в конце области взаимодействия.

В результате измерений было показано, что благодаря начальной модуляции электронный

пучок дополнительно теряет $7 \pm 3\%$ своей первоначальной энергии по сравнению с потерями немодулированного электронного пучка при прочих равных условиях (ток пучка 5 а, энергия 21 *кэв*, напряженность продольного магнитного поля 1300 э). Таким образом, калориметрические измерения хорошо согласуются с проведенными ранее измерениями.

Поступила в Редакцию 1/VII 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Ахизер, Я. Б. Файнберг. «Докл. АН СССР», 69, 555 (1949); ЖЭТФ, 21, 1262 (1951).
2. Я. Б. Файнберг. «Атомная энергия», 11, 313 (1961).
3. И. Ф. Харченко и др. ЖЭТФ, 38, 685 (1960); А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 11, 493 (1961).
4. А. К. Березин и др. В сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». Т. III. Киев, Изд-во АН УССР, 1963, стр. 125.
5. А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 14, 249 (1963).
6. Я. Б. Файнберг. В сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». Т. I. Киев, Изд-во АН УССР, 1962, стр. 20.
7. Я. Б. Файнберг, Н. А. Хижняк. В сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза» Т. I. Киев, Изд-во АН УССР, 1962, стр. 71.
8. Н. А. Кондратенко. «Укр. фіз. ж.», 7, 371 (1962); в сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». Т. II. Киев, Изд-во АН УССР, 1963, стр. 176.
9. И. Ф. Харченко и др. В сб. «Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза». Т. II. Киев, Изд-во АН УССР, 1963, стр. 118.
10. G. Boyd, L. Field, R. Gould. Phys. Rev., 109, 1393 (1958).
11. Е. В. Богданов, В. Я. Кислов, З. С. Чернов. «Радиотехника и электроника», 5, 229 (1960).
12. В. Я. Кислов, Е. В. Богданов. Там же, стр. 1974.
13. А. К. Березин и др. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 136 (1962).
14. А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 18, 271 (1965).

