

3. А. К. Березин и др. «Атомная энергия», 18, вып. 3 (1965).
4. Я. Б. Файнберг. Диссертация. ФИАН СССР, 1960; «Атомная энергия», 11, 313 (1961).
5. В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко. ЖЭТФ, 42, 1515 (1962); В. Д. Шапиро. ЖЭТФ, 44, 613 (1963); диссертация, ОИЯИ, Дубна, 1963.
6. М. Ф. Горбатенко. «Ж. техн. физ.», 33, 173, 1070 (1963); диссертация, Харьковск. гос. ун-т, 1964.
7. А. Энгель, М. Штеенбек. Физика и техника электрического разряда в газах. Ч. I. М.—Л., ОНТИ, 1935.
8. P. Sturrock. Phys. Rev., 112, 1488 (1958).
9. Я. Б. Файнберг, В. И. Курилко, В. Д. Шапиро. «Ж. техн. физ.», 31, 633 (1961).



УДК 621.384.623

Взаимодействие сгустков плазмы с электромагнитной волной

В. И. Векслер, И. Р. Геккер, Э. Я. Гольц, Г. А. Делоне, Б. И. Кононов,
О. В. Кудреватова, Г. С. Лукьянчиков, М. С. Рабинович, М. М. Савченко,
К. А. Сарксян, К. Ф. Сергейчев, В. А. Силин, Л. Э. Цопп

Сообщаются предварительные экспериментальные результаты исследования ускорения плазмы в круглых волноводах. Исследования проводились в 10-сантиметровом диапазоне на установках с волнами типа H_{01} и H_{11} и различными плазменными инжекторами. Плазменные сгустки с начальной концентрацией частиц 10^{12} см⁻³ и выше инжектировались с начальной скоростью $5 \cdot 10^6$ см/сек из искрового источника или формировались непосредственно на оси волновода с помощью вакуума в ускорителе 10^{-7} — 10^{-6} мм рт. ст. Для диагностики использовались электрические зонды, СВЧ-методы и электростатический анализатор энергий частиц. Удержание плазмы осуществлялось с помощью внешних магнитных полей различной конфигурации. Были получены ускоренные ионы с энергией более 10 кэВ.

[4], так и источником плазмы с перепадом давления [5]. Проведенные исследования позволили получить первые экспериментальные данные по радиационному ускорению плазмы.

Ускорение плазмы на волне H_{01}

Выбор волны H_{01} определялся следующими соображениями:

1. Конфигурация поля волны H_{01} такова, что допускает введение по радиусу и вдоль оси металлических стержней малого поперечного сечения без существенного искажения картины поля. Это позволяет расположить внутри ускоряющего волновода плазменную пушку и зонды.
2. Волна H_{01} —одна из волн низшего типа и сравнительно легко возбуждается.
3. Конфигурация электрического поля волны H_{01} исключает возникновение СВЧ-пробоев на стенки волновода.

Для осуществления радиационного ускорения плазмы на волне H_{01} была создана установка, схема которой показана на рис. 1. Мощность от СВЧ-генератора поступает по волноводному тракту через ферритовый вентиль в преобразователь волны (типа Кинга). Здесь волна типа H_{01} в прямоугольном волноводе трансформируется в волну типа H_{01} в круглом волноводе. Ускоряющий волновод представляет собой трубу из нержавеющей стали с толщиной стенки 1 мм. Такая труба обеспечивает малое затухание СВЧ-волны (около 0,2 дБ) и практически не экранирует внешнее импульсное магнитное поле. Между ускоряющим волноводом и преобразователем имеется вакуумно-плотное СВЧ-окно. Уско-

В 1954 г. было предложено [1] использовать когерентное взаимодействие заряженных частиц с электромагнитной волной для ускорения плазмы. Последующие теоретические исследования показали, что, соблюдая определенные условия, можно осуществить длительное ускорение плазменных сгустков при сохранении их формы и размеров [2, 3].

В настоящей работе были экспериментально исследованы начальный этап ускорения и поведение плазмы в волноводе при наличии мощной электромагнитной волны. В исследованиях не ставилась задача обеспечить устойчивое ускорение плазменных сгустков и достижение больших энергий ускоренных частиц. Были изготовлены две установки, отличающиеся типом ускоряющей волны и методом инжекции плазмы. Для уменьшения диффузии плазмы на стенки волновода применялись внешние магнитные поля. Плазменные сгустки создавались в волноводе при вакууме 10^{-7} — 10^{-6} мм рт. ст. как искровым инжектором

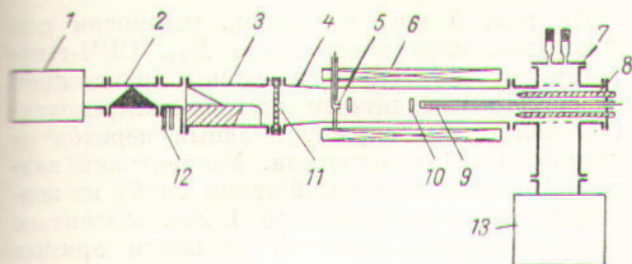


Рис. 1. Схема ускорителя на волне H_{01} :

1 — СВЧ-генератор; 2 — ферритовый вентиль; 3 — преобразователь типа волны ($H_{10} \rightarrow H_{01}$); 4 — ускоряющий волновод; 5 — искровой плазменный инжектор; 6 — магнитная система; 7 — секция откочки; 8 — поглощающая СВЧ-нагрузка; 9 — экранированный электрический зонд; 10 — окна для диагностики; 11 — вакуумно-плотное СВЧ-окно; 12 — секция с двумя детекторными головками; 13 — высоковакуумная откочка.

ряющий волновод оканчивается поглощающей СВЧ-нагрузкой, совмещенной с секцией откочки. В трубе ускоряющего волновода имеются окна для диагностики плазмы.

СВЧ-генератор 10-сантиметрового диапазона работает в режиме однократного импульса длительностью 8 мксек. Средняя плотность потока мощности через сечение ускоряющего волновода не превышает $8 \cdot 10^3$ вт/см². Коэффициент стоячей волны по напряжению всей волноводной системы ускорителя (без плазмы) не хуже 1,3.

Плазменный инжектор искрового типа вводится по радиусу в центр волновода и имеет симметрирующий «противовес», уменьшающий искажение основного типа волны. Максимальный ток через пушку в аперийном режиме составляет 1,8 ка при длительности 0,3 мксек. Искровая пушка создает плазму, содержащую около 50% ионов атомарного водорода. Полное количество ионов $10^{15} - 10^{16}$.

Для уменьшения ухода плазмы на стенки ускоряющего волновода использовали как продольное магнитное поле, так и магнитное поле, создаваемое системой прямых провод-

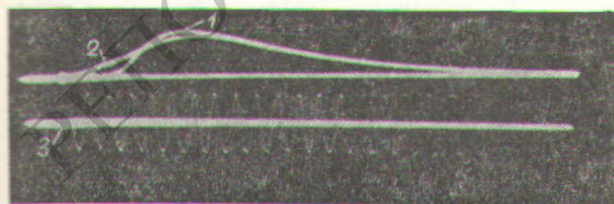


Рис. 2. Оциллограммы ионных токов экранированного электрического зонда:

1 — СВЧ-мощность выключена; 2 — СВЧ-мощность включена; 3 — калибровочный сигнал с периодом 2 мксек.

ников, параллельных оси волновода и питаемых токами с чередующимся направлением. За время движения плазмы в ускоряющем волновод (20 мксек) величина магнитных полей практически не изменялась.

Ускоренные ионы регистрировались с помощью электрических экранированных зондов [6], вводимых с торца волновода. На рис. 2 совмещены две оциллограммы ионного тока за зонд при включенной и выключенной СВЧ-мощности; продольное магнитное поле при этом равнялось 300 гс; расстояние пушка — зонд 45 см. Из рис. 2 видно, что включение ускоряющего поля приводит к сдвигу распределения частиц в сгустке по скоростям в сторону больших значений скоростей.

С помощью зондовой методики нельзя было определить полное число ускоренных частиц, так как при таком способе можно выделить только те частицы, скорости которых превышали максимальную скорость частиц в отсутствие ускоряющего СВЧ-поля. Такая оценка показала, что имеется не менее 10^{12} ускоренных частиц, причем максимальная скорость некоторой части ионов превышала 10^8 см/сек. Следует отметить, что указанные экспериментальные значения по порядку величины удовлетворительно согласуются с расчетом, если предполагается, что имеет место полная передача импульса СВЧ-волны плазме. Изменение числа частиц, создаваемых плазменным инжектором, на порядок (путем изменения режима работы искровой пушки) существенно не изменяет число ускоренных частиц.

Работа с магнитным полем, создаваемым системой прямых проводников, потребовала введения внутрь металлического ускоряющего волновода стеклянной трубы, поскольку, как показали эксперименты, потери плазмы при движении в металлической трубе в таком магнитном поле велики (теряется два порядка по плотности на расстоянии 1 см). Это связано с тем, что поляризация плазмы, возникающая из-за наличия поперечного магнитного поля, снимается металлическими стенками и по плазме постоянно текут поляризационные токи, тормозящие движение плазмы. Введение стеклянной трубы приводит к изоляции плазмы от металлической стенки.

Результаты, полученные по ускорению плазмы СВЧ-волной в указанном поле, аналогичны приведенным выше.

При помощи СВЧ-зонда (детекторная головка), располагаемого у диагностических окон ускоряющего волновода, было обнаружено

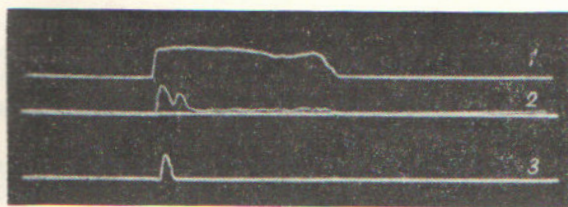


Рис. 3. Сигналы СВЧ-зонда, расположенного у окна ускоряющего волновода (длительность развертки 23 мксек):

1 — огибающая СВЧ-импульса без плазмы; 2 — то же при выстреле плазменной пушки; 3 — сигнал с пушки.

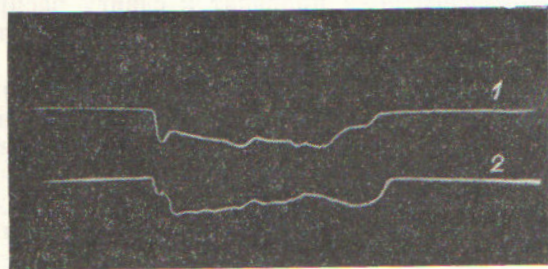


Рис. 4. Сигналы с двух детекторных головок, сдвинутых на расстояние 10 см (длительность развертки 17 мксек):

1 — первая головка; 2 — вторая головка.

(рис. 3), что после выстрела плазменной пушки волновод практически запирается, т. е. имеет место «пробка» для СВЧ-волны вне зависимости от конфигурации внешнего магнитного поля. Это же подтверждается проводившимися с помощью двух детекторных головок [7] измерениями отраженной от плазмы СВЧ-мощности. Наличие отраженной волны проявлялось в виде модуляции сигналов, поступающих с детекторных головок (рис. 4). Обработка экспериментальных данных показала значительное отражение СВЧ-волны от сгустка, достигающее до 90%.

Ускорение плазмы на волне H_{11}

Линейно-поляризованная волна H_{11} — волна низшего типа в круглом волноводе. Возможный недостаток волны H_{11} — значительная напряженность электрического поля у стенок волновода, облегчающая возникновение СВЧ-пробоев. Волна H_{11} на оси волновода в режиме, далеком от критического, приобретает вид, близкий к плоской волне, что в отдельных случаях может облегчить сопоставление эксперимента с расчетными данными.

На рис. 5 показана схема установки для ускорения плазмы на волне H_{11} . СВЧ-генератор тот же, что и в схеме, приведенной на рис. 1. Возбудителем линейно-поляризованной волны H_{11} служит плавный переход от прямоугольного волновода. Ускоряющий волновод представляет собой также трубу из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Магнитное поле образуется системой из шести прямых проводов с чередующимся направлением токов.

Для создания плазмы используется источник с перепадом давления. Принцип действия источника описан в работе [5]. Плазменный шнур с концентрацией частиц свыше 10^{12} см⁻³ формируется при разряде между электродами $A - K$ (см. рис. 5) в продольном магнитном поле. Давление напускаемого водорода у анода A и катода K равно 10^{-2} мм рт. ст. Давление в ускоряющем волноводе 10^{-6} мм рт. ст. Разность давлений поддерживается с помощью четырех диффузионных насосов. После образования плазменного шнура выключается напряжение $A - K$ и включается магнитное поле прямых проводов (время нарастания поля 25 мксек). После того как магнитное поле достигает величины порядка 10^3 гс (в пробках) и плазма отжимается от стенок, включается СВЧ-поле. При движении плазмы происходит перемещение стоячих волн в волноводе. Это было зарегистрировано детекторной головкой (см. рис. 5). Наблюдавшаяся модуляция огибающей СВЧ-колебаний аналогична приведенной на рис. 4.

Ускоренные частицы регистрировались экранированным от СВЧ-поля электрическим зондом (несимметричный двойной зонд), который вводился со стороны СВЧ-нагрузки и мог перемещаться по оси волновода.

На рис. 6 приведена осциллограмма огибающей СВЧ-колебаний и сигнала с электрического зонда, находящегося на расстоянии 30 см от места инъекции. При отсутствии СВЧ-волны сигналов с зонда не наблюдается. По задержке прихода плазмы можно оценить среднюю скорость ее движения, которая по порядку величины равна 10^7 см/сек.

Для измерения энергии ускоренных ионов используются электростатический анализатор с поворотом частиц на 127° и электронный умножитель в качестве детектора ионов. Анализатор позволяет измерять энергии ионов в пределах 1—100 кэВ. Он располагается на конце ускоряющего волновода, в 70 см от инъектора.

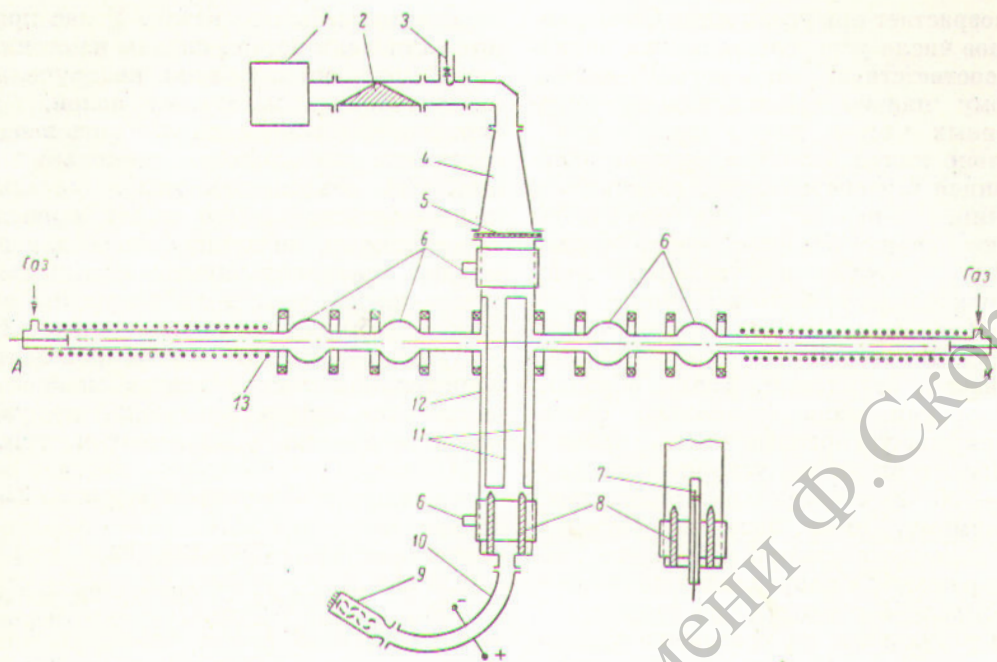


Рис. 5. Схема ускорителя на волне H_{11} :

- 1 — СВЧ-генератор; 2 — ферритовый вентиль; 3 — детекторная головка; 4 — преобразователь типа волны ($H_{10} \rightarrow H_{11}$); 5 — вакуумно-плотное СВЧ-окно; 6 — высоковакуумная откачка; 7 — электрический зонд; 8 — поглощающая СВЧ-нагрузка; 9 — электронный умножитель; 10 — электростатический (127°) анализатор энергии частиц; 11 — магнитная система; 12 — ускоряющий волновод; 13 — плазменный источник с перепадом давления.

На рис. 7 приведена зависимость тока детектора от энергии регистрируемых ионов. С повышением СВЧ-мощности энергетический спектр смещается в область больших энергий. При увеличении чувствительности схемы были зарегистрированы ионы с энергией до 50 кэВ.

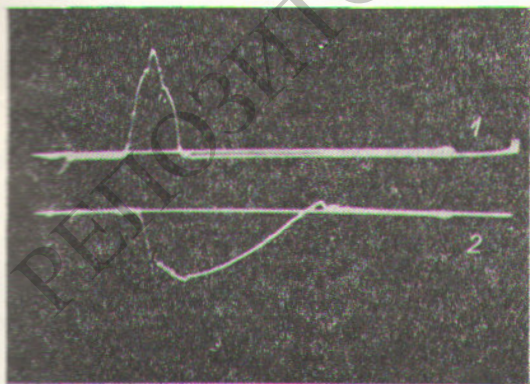


Рис. 6. Осциллограммы (длительность развертки 6,4 мксек):

- 1 — огибающая СВЧ; 2 — сигнал с электрического зонда.

Выводы

В результате проведенных экспериментов осуществлено радиационное ускорение плазмы. На обеих установках независимо от типа волны в волновом и вида плазменных инжекторов получены ускоренные ионы. Энергия ускорен-

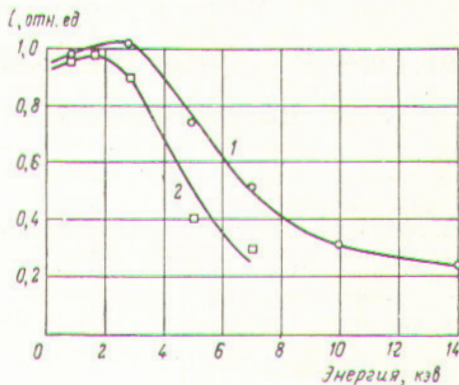


Рис. 7. Энергетический спектр ускоренных ионов: 1 — мощность СВЧ-волны $P = P_{\text{макс}}$; 2 — то же при $P = 0,5 P_{\text{макс}}$.

ных ионов возрастает при увеличении СВЧ-мощности. Полное число ускоренных частиц порядка 10^{12} , что соответствует импульсу СВЧ-волны, передаваемому плазме. Максимальная энергия ускоренных частиц до 50 кэВ.

Относительно малая величина средней энергии, полученная в экспериментах, объясняется рядом причин. Во-первых, наши инжекторы плазмы дают очень большое число частиц (до 10^{15} — 10^{16}), которые при заданной мощности ВЧ-поля не могут быть все существенно ускорены. Фон неускоренных частиц запирает волновод. Во-вторых, почти вся ВЧ-мощность отражается от плазмы. Таким образом, область ускорения мала (несколько сантиметров) и энергия ускоренных частиц практически не зависит от длины ускоряющего волновода (30—100 см). В-третьих, волна типа H_{11} , по-видимому, из-за больших размеров сгустка не оказывает стабилизирующего действия на его размеры в направлении движения, как это следовало бы ожидать по теории [2]. Полученные результаты по ускорению плазмы на волнах типа H_{01} и H_{11} близки друг другу (волна типа H_{01} не должна стабилизировать размеры сгустка в направлении ускорения). Это также объясняется экранирующим ВЧ-волну действием фоновых частиц. Достижение больших энергий, по-видимому, возможно не только при увеличении ВЧ-мощности, но и при создании более компактных сгустков в начале ускорения.

Применение неоднородных полей [3] для стабилизации поперечных размеров сгустков

полностью себя оправдало. У нас практически отсутствовали потери плазмы на стенках волновода при использовании квадрупольных или секстипольных магнитных полей. Однако до сих пор не удалось использовать неоднородные поля для стабилизации продольных размеров [3]. Это объясняется малой начальной скоростью сгустка и его малой проводимостью. По-видимому, по крайней мере для начальной стадии ускорения, нужно использовать одновременно два типа волн в круглом волноводе, как это было предложено ранее [2].

Таким образом, на основе проведенных предварительных экспериментов можно составить достаточно ясную программу по увеличению энергии и числа ускоряемых частиц.

Поступила в Редакцию 22/IV 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер. CERN, Simposium, vol. 1. Geneva, 1956, p. 80; «Атомная энергия», 2, 427 (1957).
2. М. Л. Левин, М. С. Рабинович, Г. А. Аскарьян. Proc. Internat. Conf., CERN, 1959.
3. Г. А. Аскарьян и др. Nucl. Fusion, Suppl., part 2, 797 (1962).
4. W. Bostic. Phys. Rev., 104, 292 (1956).
5. Б. П. Кононов, К. А. Сарксян. «Ж. техн. физ.», 31, 1294 (1961).
6. К. Д. Синельников и др. Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. Киев, Изд-во АН УССР, 1962, стр. 102.
7. A. Bloch, F. Fisher, G. Hunt. Proc. IEE, 100, 93 (1953).



УДК 621.384.60

Определение возмущений параметров магнитной и ускоряющей систем электронного синхротрона на основе анализа информации о пучке

И. П. Карабеков

Предлагается метод отбора и обработки информации о положении центра тяжести пучка в сечении вакуумной камеры ускорителя, на основе которой можно определить величину отклонения некоторых основных параметров электронного синхротрона.

Все устройства, из которых состоит ускоритель, можно изготовить лишь с некоторой

конечной точностью. Соответственно и параметры магнитной и ускоряющей систем могут быть поддержаны с некоторой точностью около их расчетных значений. Отклонения этих параметров сверх допустимых значений приводят к значительным потерям частиц. Поэтому вопросу измерения параметров магнитной и ускоряющей систем по данным о пучке и их