

## УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*Ю.В.Ткач, Я.Б.Файнберг, Е.А.Лемберг,  
Н.П.Гадецкий, В.В.Ермоленко, В.В.Дятлова,  
С.С.Пушкарев*

В работе приведены результаты экспериментов по ускорению ионов аргона и азота в релятивистском плазменном генераторе типа "убитрон". Показано, что при токе электронного пучка  $2 \div 3$  кА, энергии 0,3 МэВ и  $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$  сек наблюдается ток ускоренных ионов  $2 \div 3$  А с энергией до 1,0 МэВ и  $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$  сек.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по ускорению ионов в плазменном генераторе микроволнового излучения, основанном на взаимодействии сильноточного релятивистского пучка электронов микросекундной длительности с пространственно-периодическим магнитным полем [1].

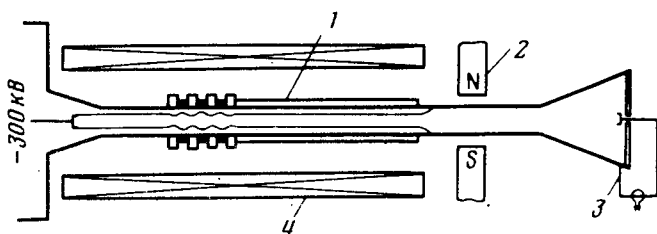


Рис. 1. 1 - Ускоритель электронов; 2 - постоянный магнит; 3 - цилиндр Фарадея и пояс Роговского; 4 - соленоид

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Ускоритель формировал кольцевой электронный пучок с током до 3 кА и энергией частиц  $\approx 280$  кВ при длительности импульса  $1 \cdot 10^{-6}$  сек. Внешний диаметр пучка равнялся 32 мм и ширина кольца составляла 3,5 мм. Электронный пучок инжектировался в круглый волновод с внутренним диаметром 49 мм, помещенный в аксиальное магнитное поле, модулированное по закону.

$$H = H_0 \left[ 1 + \epsilon \sin \frac{2\pi}{L} z \right].$$

В наших экспериментах, величина  $H_0$  могла достигать 10 кэ, глубина модуляции  $\epsilon = 8\%$ , период  $L = 6$  см при полной длине модулированного участка 18 см. Далее, следовала область однородного магнитного поля длиной 20 см и, наконец, за ней - участок со спадающим полем, предназначенный для развала пучка. Круглый волновод заполнялся газом, в результате ионизации которого пучком, образовывалась плазма с плотностью достаточной для зарядовой компенсации. Заполнение плазмой поз-

волило уменьшить разброс по скоростям в пучке, обусловленный кулоновским рассеянием, что в свою очередь, привело к увеличению мощности микроволнового излучения.

При взаимодействии пучка с указанными параметрами с пространственно-периодическим магнитным полем, как в вакуумном волноводе, так и в волноводе заполненном плазмой, наблюдается интенсивное микроволновое излучение при выполнении условия  $(k + K)V_{||} = n\omega_c$ ,  $k$  – волновой вектор поперечной волны;  $K = 2\pi/L$ ;  $V_{||}$  – продольная скорость частиц пучка;  $\omega_c = eH_0/mc\gamma$  – циклотронная частота;  $\gamma$  – релятивистский фактор. В вакуумном случае, генерация наблюдалась на частотах 10,5 и 11,5 Гц при ширине полосы излучения 3%, мощность генерации составляла  $7 \div 8$  МВт,  $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$  сек и резонансным образом зависела от напряженности магнитного поля, достигая максимума при  $H_0 = 3,7$  кэ. Заполнение волновода плазмой такое, что  $\omega_p < \omega_0$  ( $\omega_0$  – частота генерации), приводило к увеличению мощности генерации до 20 МВт, причем спектр излучения и длительность не изменялись.

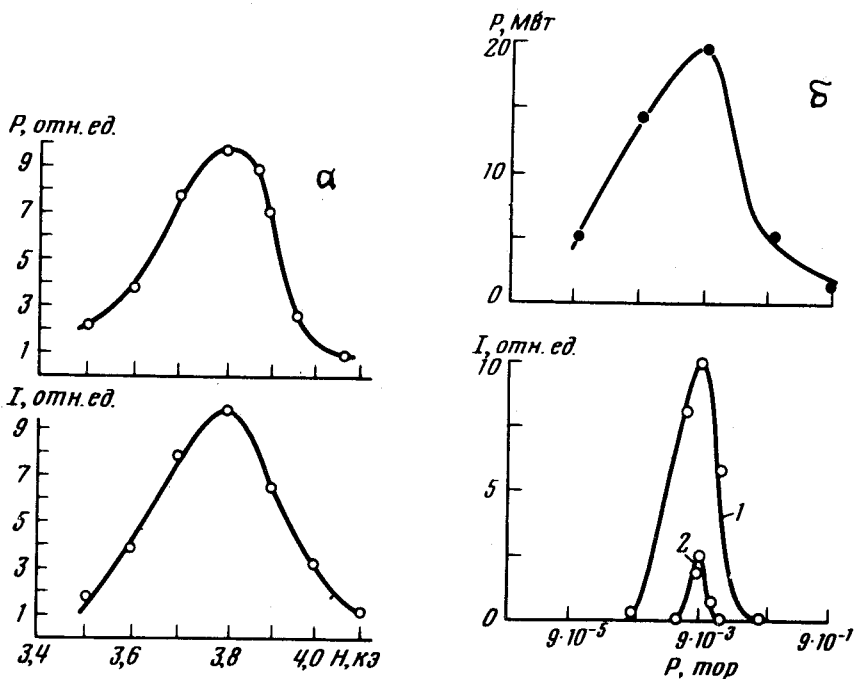


Рис. 2. а – Зависимость мощности излучения и тока ускоренных ионов от напряженности внешнего магнитного поля; б – зависимость мощности излучения и тока ионов от давления в волноводе: 1 – ток низкоэнергетических ионов; 2 – ток высокоэнергетических ионов

В режиме работы установки, соответствующем условиям получения максимальной мощности СВЧ излучения, при заполнении волновода газом, наблюдалось ускорение ионов газа, которым проводилось заполнение. Ускоренные ионы регистрировались на расстоянии 60 см от конца магнитного поля генератора датчиком, расположенным в плоскости

выходного рупора генератора. В качестве датчика использовался цилиндр Фарадея, совмещенный с поясом Роговского, сигнал которого регистрировался осциллографом. Дополнительно, ионы регистрировались с помощью пленок нитрата целлюлозы с последующим получением снимков поверхности на электронном микроскопе, и их обработкой, которая позволила получить параметры ускоренных ионов. В наших экспериментах исследовалось ускорение аргона и азота. Проведенные измерения показали, что величина полного тока ионов аргона составляет  $2 \div 3$  А, при энергии частиц достигающей 1 МэВ и длительности импульса  $1 \cdot 10^{-6}$  сек. Одновременно, регистрировалась более низкоэнергетичная группа ионов, ток которой достигал десятка ампер, однако энергия не превышала 100 кэВ. Площадь полученного ионного пучка составляла  $13 \text{ см}^2$ , т.е. ионы ускоряются по всему сечению волновода за исключением узкой пристеночной области.

Характер зависимости мощности излучения и тока ускоренных ионов от напряженности  $H_0$  внешнего магнитного поля приведен на рис. 2, а. На рис 2, б приведены кривые, иллюстрирующие зависимость мощности излучения и тока ионов от давления в волноводе. Видно, что имеется четкая корреляция между микроволновым излучением и наличием ускоренных ионов. Таким образом, в системе типа плазменный релятивистский убитрон, насколько нам известно, экспериментально впервые наблюдалось ускорение ионов.

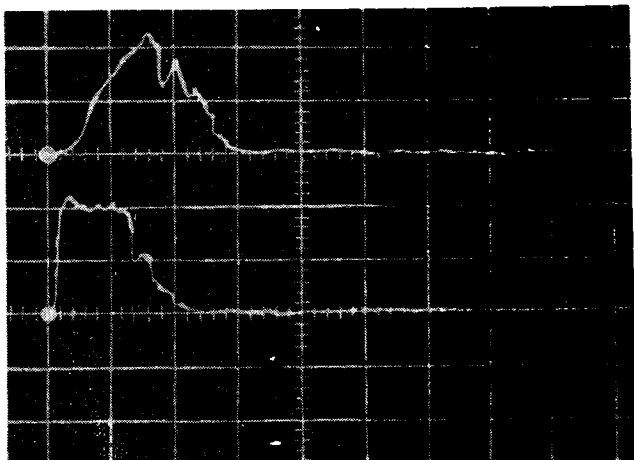


Рис.3. Осциллограмма СВЧ излучения и тока ионов

По-видимому в наших экспериментах, ускорение ионов обусловлено механизмом, теоретически рассмотренным в [2]. Следуя [2], процесс ускорения можно представить следующим образом. Взаимодействие пучка с пространственно-периодическим магнитным полем приводит к эффективной перестройке продольной составляющей скорости пучка в поперечную и, при выполнении условия  $(k + K) V_{||} = n \omega c$ , к мощной генерации. В результате пучок бунчируется в сгустки, которые нами наблюдались экспериментально на мишенях. Далее, имеет место захват

ионов плазмы полем сгустков, продольная скорость которых в результате взаимодействия с пространственно-периодическим магнитным полем, падает до величины

$$V \lesssim 10^{-2} c \sqrt{eZ/A},$$

где  $eZ$  — заряд иона,  $A$  — атомный вес иона.

Другим эффектом, который может привести к ускорению ионов в нашей системе является ускорение волнами с отрицательной энергией [3,4]

В описанной установке достигнута эффективность ускорения ионов  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  по отношению к мощности электронного пучка и  $\sim 1 \cdot 10^{-1}$  по отношению к мощности СВЧ излучения. Осциллограмма СВЧ излучения и тока ионов приведена на рис. 3. Дальнейшее увеличение эффективности генераторов, которое может достигать  $(2 \div 3) \cdot 10^{-1}$  позволит существенно увеличить ток и энергию ионного пучка.

В заключение авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук Б.И.Иванову за консультации при проведении измерений.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
17 сентября 1978 г.

### Литература

- [1] Ю.В.Ткач, Я.Б.Файнберг, Н.П.Гадецкий, Е.А.Лемберг, В.В.Дятлова, В.В.Ермоленко, А.В.Сидельникова. Письма в ЖЭТФ, **22**, 136, 1975.
- [2] А.Г.Бонч-Осмоловский, С.Н.Доля. Труды II симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976, стр.87.
- [3] M.L.Sloan, W.E.Drummond. Phys. Rev. Lett., **31**, 1234, 1973.
- [4] В.П.Индыкул, И.П.Панченко, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. Физика плазмы, **2**, 775, 1976.