

УДК 533.92; 621.384.647

А.М. Жукешов*, А.У. Амренова, А.Т. Габдуллина, К. Фермахан, Е. Налибаев,
Ж. Молдабеков, К. Серик, А. Кайбар, Г. ШигаеваНИИ экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
Казахстан, г. Алматы*E-mail: zhukeshov@physics.kz

Исследование распределения тока и определение скорости плазмы при различной плотности газа

В данной статье проведено экспериментальное изучение работы импульсного плазменного ускорителя с коаксиальной геометрией электродов при различном начальном давлении рабочего газа. Особый интерес представляет использование горячих плазменных потоков для обработки материалов. В связи с этим очень актуальным является исследование распределения тока и определение скорости плазмы при различной плотности. Магнитное поле движется вперед по аксиальной оси к выходу из электрода. Средняя скорость фронта сигнала составила 2,5 см/мкс. Скорость нарастания фронта составляет около 1 мкс, поэтому толщина токового слоя, по которому проходит разрядный ток, составляет 2-3 см. При давлении 1 торр средняя скорость фронта сигнала составила 2,3 см/мкс, что почти равно скорости при давлении 0,1 Торр. Скорость нарастания фронта составила около 2 мкс, поэтому толщина токового слоя, по которому проходит разрядный ток, составила 4-5 см. Таким образом, скорость токового слоя слабо зависит от давления. Представляет интерес определение скорости другим способом, а именно по двум поясам, установленным на расстоянии друг от друга. Показано, что величина начального давления оказывает существенное влияние на процесс ускорения плазмы.

Ключевые слова: Импульсный плазменный ускоритель, магнитный зонд, электродинамический клапан, пояс Роговский, коаксиальный электрод.

А.М. Жукешов, Ә.У. Әмренова, А.Т. Габдуллина, Қ. Фермахан, Е. Нәлібаев, Ж. Молдабеков,
Қ. Серик, А. Қайбар, Г. Шигаева

Әртүрлі газ тығыздығында токтың таралуын және плазманың жылдамдығын зерттеу

Осы мақалада импульсті плазмалық үдеткіштің коаксиалды геометриялық электродымен әртүрлі бастапқы газ қысымындағы жұмысы зерттелді. Бұнда біз үшін қызған плазма ағыны материалдарды өндеуде өте қажетті. Сол үшін әртүрлі газ тығыздығында токтың таралуын және плазманың жылдамдығын анықтау өзекті мәселе болып саналады. Магнит өрісі электродтан шығып аксиаль өсін бойлап жылжиды. Сигнал фронтының орташа жылдамдығы 2,5 см/мкс болады. Фронт үдеуінің жылдамдығы 1 мкс айналасында болады. Сондықтан разрядтық ток өтетін ток қабатының қалыңдығы – 2-3 см. 1 торр қысым кезінде сигнал фронтының орташа жылдамдығы 2,3 см/мкс болады, бұл нәтиже қысым 0,1 торр болған жағдаймен бірдей болады. Фронт үдеуінің жылдамдығы 2 мкс айналасында болады, сондықтан разрядтық ток өтетін ток қабатының қалыңдығы 4-5 см. Осы жағдайда, осындай қабаттың жылдамдығы тығыздыққа әлсіз тәуелді болады. Негізгі қызығушылық плазманың жылдамдығын басқа әдіспен, яғни екі белдіктің бір-бірінен белгілі арақашықтықта орналасуы бойынша анықтауға қаратылған. Нәтижесінде, егер бастапқы қысымды ұлғайтсақ онда ол плазманың жылдамдығына әсер етеді.

Түйін сөздер: импульстік плазмалық үдеткіш, магниттік зонд, электродинамикалық клапан, Роговский белдігі, коаксиальдық электрод.

A.M. Zhukeshov, A.U. Amrenova, A.T. Gabdullina, K. Fermakhan, Ye.Nalibayev,
Zh. Moldabekov, K. Serik A., Kaibar, G. Shygayeva

Research distribution of current and determination speed of plasma at different closeness of gas

In this article the experimental study of work of the impulsive plasma accelerating is conducted with coaxial geometry of electrodes at different initial pressure of working gas. Particular interest presents the use of hot plasma

streams for treatment of materials. In this connection, for us very topically distribution of current is investigational and speed of plasma is certain at a different closeness. In the magnetic field advanced on an axial axis to the exit from an electrode. Middle speed of front of signal made a 2,5 cm/мкс. Speed of growth of front makes about 1 мкс, therefore the thickness of current layer a bit current passes on that makes a 2-3 cm. At pressure 1 torr middle speed of front of signal made a 2,3 cm/мкс, that is almost equal to speed at pressure 0,1 Torr. Speed of growth of front made about 2 мкс, therefore the thickness of current layer a bit current passes on that made a 4-5 cm. Thus, speed of current layer poorly depends on pressure. There is of interest determination of speed by other method, namely on two belts set in the distance one from another. It is shown that the size of initial pressure renders substantial influence on the process of acceleration of plasma.

Key words: Impulsive plasma accelerating, magnetic probe, electrodynamic valve, belt Rogovsky, coaxial electrode.

Введение

Импульсные плазменные ускорители используются для получения плазменных потоков большой мощности. Такие потоки находят широкое применение в науке и технологии. Особый интерес представляет использование горячих плазменных потоков для обработки материалов [1-3]. С экспериментальной стороны работа этих ускорителей достаточно подробно исследована, однако, до сих пор не существует единой теоретической модели, описывающей все многообразие процессов в них. В связи с этим необходимо сравнение полученных экспериментальных данных на соответствие существующим теоретическим моделям, описывающим динамику формирования плазменных сгустков и процесса ускорения.

Ранее на основании зондовых исследований авторами было установлено, что формируемые в импульсном плазменном ускорителе КПУ-30 потоки имеют скорости порядка 10^5 м/с и, возможно состоят из отдельных сгустков, следующих один за другим [4]. В последующих экспериментах наблюдались такие явления, как выброс тока за электроды, а также особенности на кривых тока и энергии от напряжения [5]. Однако вопрос о структуре такого плазменного образования остается до конца не выясненным. Для плазмы разделение потока на компоненты возможно только при небольших плотностях, когда радиус Дебая становится соизмеримым с размерами системы. В любой плазменной установке динамику процессов определяет конфигурация электромагнитных полей. Поэтому необходимо выяснить наличие и распределение магнитного поля в коаксиале и тока в плазменном потоке, и здесь магнитные зонды, в принципе, хорошо применимы [6]. В данной работе исследована динамика формирования плазменных сгустков в импульсном

коаксиальном ускорителе с применением магнитных зондов.

Работа импульсных плазменных ускорителей хорошо исследована при импульсном напуске газа через быстрый клапан, однако, режим с постоянным начальным давлением газа, называемый «режим со сплошным наполнением», мало исследован. Изменяя давление рабочего газа, мы можем регулировать плотность плазмы и исследовать динамику формирования плазменных сгустков при различной плотности.

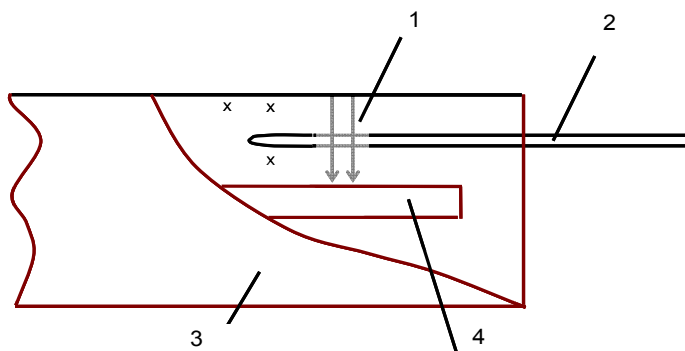
Установка и методика измерений

Эксперименты проводились на коаксиальном плазменном ускорителе КПУ-30. Установка состоит из рабочей камеры с коаксиальными электродами из меди (диаметр анода 24 мм, диаметр катода 90 мм), батареи высоковольтных конденсаторов емкостью 70 мкФ, электродинамического клапана, управляемого вакуумного разрядника, системы зарядки и поджига, системы откачки и напуска газа, диагностических устройств. Длина внешнего электрода ускорителя составляет 60 см, внутреннего – 45 см. Разрядное напряжение варьируется в диапазоне $U = 10-30$ кВ. Запасаемая энергия накопителя $W = 5-32$ кДж. Амплитуда разрядного тока до – 500 кА, период тока – 14 мкс. Использовался режим работы ускорителя при постоянном давлении внутри разрядной камеры в диапазоне $(0,05-5) \pm 20\%$ Торр. В качестве рабочего газа использовался воздух.

Распределение магнитного поля и тока измерялось с помощью магнитных зондов и поясов Роговского. Для измерения высоких напряжений использовался комбинированный омический и емкостной делитель напряжения с коэффициентом деления 1:10000. Сигналы исследовались с помощью цифрового осциллографа с полосой 200 МГц. Перед

каждым разрядом камера откачивалась до давления 10^{-3} Торр. После этого, в зависимости от задачи, давление в камере поднималось до значений в диапазоне 0,05-5 Торр. Для исследований применялся миниатюрный магнитный зонд. Изготовленный магнитный зонд представлял собой 15 витков провода диаметром 0,13 мм, намотанного на каркасе

диаметром 1,5 мм. Катушка укреплялась на конце плотно перевитого провода, который помещался в кварцевую трубку диаметром 4 мм и длиной 60 см. Зонд крепился на специальном держателе, который был помещен между коаксиальными электродами, как показано на рисунке 1.



1 – радиальный ток, 2 – зонд, 3, 4 – внешний и внутренний коаксиальные электроды

Рисунок 1 – Схема расположения магнитного зонда в межэлектродном пространстве

Концы обмотки были перевиты и выведены наружу; на выходе из защитной трубки они соединялись с 50-омным коаксиальным кабелем, по которому сигнал подавался к измерительному осциллографу. Эквивалентная площадь катушки зонда nS равна $0,26 \text{ см}^2$, а индуктивность L составляет $1,0 \text{ мкГн}$. При этом постоянная времени L/R_0 порядка 2 нс , то есть является очень короткой для рассматриваемого эксперимента. Так как время, в течение которого рассматривались изменения магнитного поля, было порядка 10 мкс , то

использовалась пассивная интегрирующая цепочка с $RC = 50 \text{ Ом}$, $1,5 \text{ мкФ} = 75 \text{ мкс}$. Отсюда чувствительность зонда равна

$$\frac{V}{B} = \frac{nS}{RC} = 34 \text{ мкВ} / \text{Гс} . \quad (1)$$

Такая чувствительность обеспечила возможность прямого подключения к осциллографу без использования дополнительных усилителей при невысоком, но приемлемом отношении сигнал/шум.

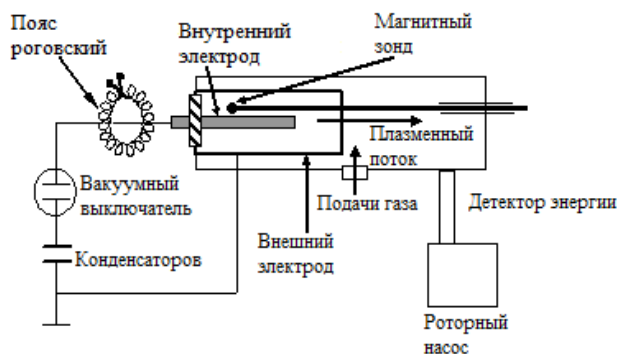


Рисунок 2 – Схема экспериментов на установке КПУ-30

Экспериментальные результаты

Типичные осциллограммы тока при давлениях 0,1 и 0,05 Торр показывают, что разряд тока в ускорителе представляет собой аperiодический затухающий сигнал. Количество полупериодов практически не зависит от начального давления в камере. Период тока слабо возрастает на 1-2 мкс, амплитуда тока падает по экспоненте с декрементом $\sim 10^5$.

Распределение магнитного поля внутри межэлектродного пространства снималось с помощью магнитных зондов и поясов Роговского (за срезом электрода). Осциллограммы от магнитных зондов, снятых на расстоянии 26 см от среза внешнего электрода, представлены на рисунке 3. При понижении давления зонд регистрирует высокочастотные колебания магнитного поля. Эти коле-

бания представляют собой широкополосный сигнал в диапазоне 2-5 МГц, избавиться от колебаний можно путем подключения интегрирующей цепочки с постоянной интегрирования более 3 мкс.

С помощью магнитных зондов были получены осциллограммы $B(t)$ для различных положений зонда в середине между цилиндрическими электродами на расстоянии от 1 до 40 см от среза внешнего электрода. Разряды производили при одинаковых условиях: напряжении на конденсаторах 20 кВ и давлении 0,1 и 1 Торр. Результаты показали хорошую воспроизводимость сигнала от разряда к разряду. Далее рассмотрим серию осциллограмм магнитного поля вдоль аксиальной оси, на различных расстояниях от среза внешнего электрода, представленных на рисунке 4.

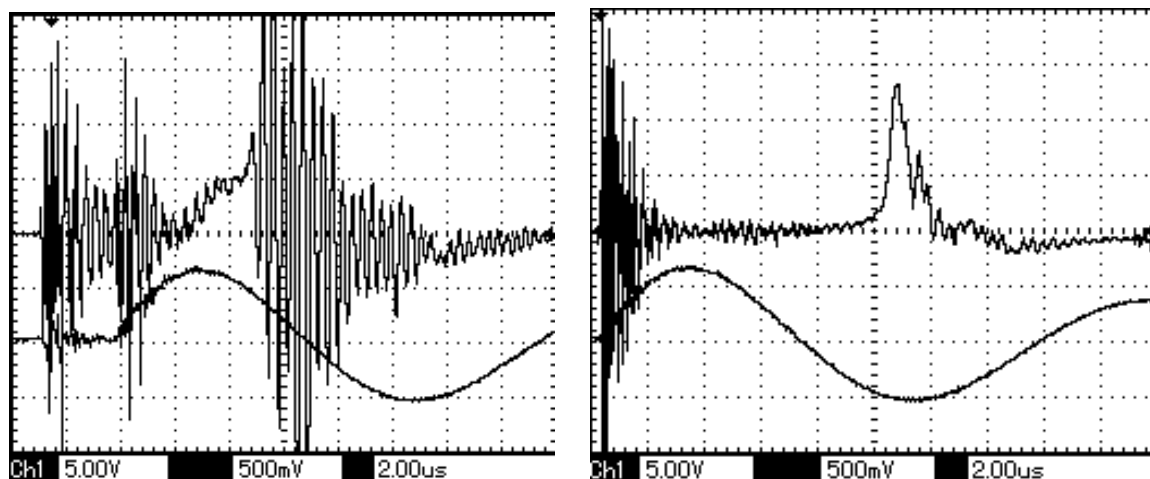


Рисунок 3 – Сигналы от магнитного зонда без интегрирования при давлении 0,1 Торр (слева) и 1 торр (справа)

Из осциллограмм видно, что магнитное поле движется вперед по аксиальной оси к выходу из электрода. Средняя скорость фронта сигнала составила 2,5 см/мкс. Скорость нарастания фронта составляет около 1 мкс, поэтому толщина токового слоя, по которому проходит разрядный ток, составляет 2-3 см. При давлении 1 торр средняя скорость фронта сигнала составила 2,3 см/мкс, что почти равно скорости при давлении 0,1 Торр

Таким образом, скорость токового слоя слабо зависит от давления. Представляет интерес определение скорости другим способом, а именно по двум поясам, установленным на расстоянии друг от друга. Результаты экспериментальных измерений показаны на рисунке 4.

В соответствии с рисунком 5, зависимость скорости от напряжения нелинейная. Максимальная скорость потока при напряжении 26

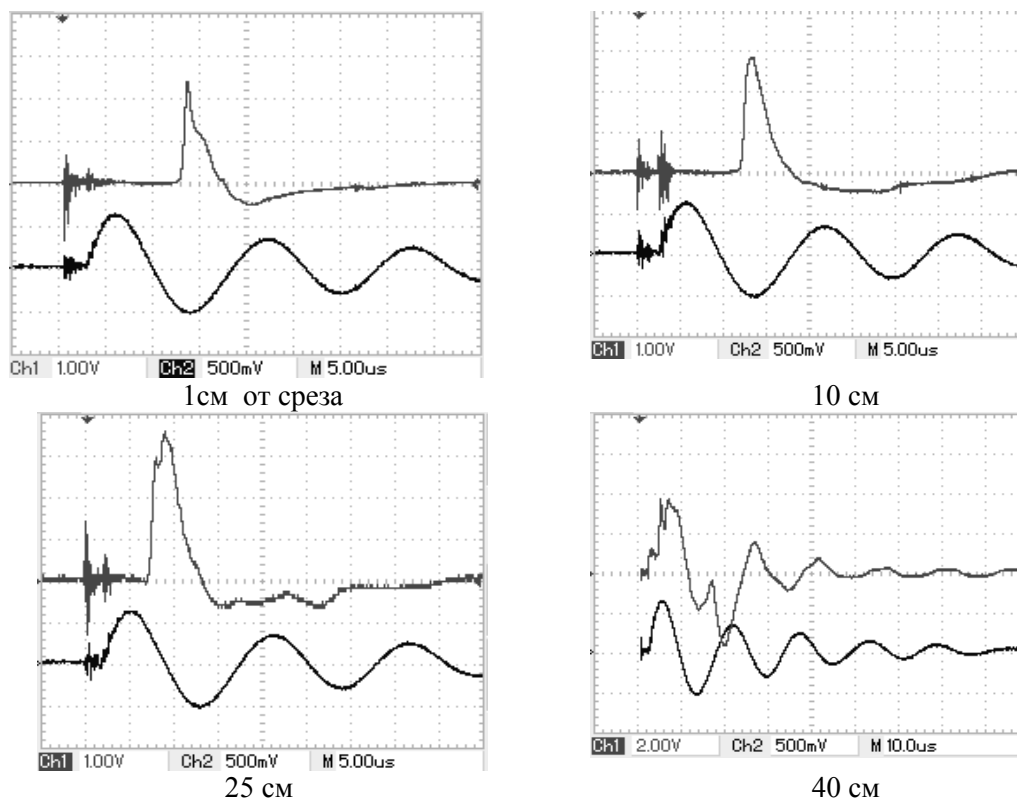


Рисунок 4 – Осциллограммы магнитного поля при 0,1 Торр

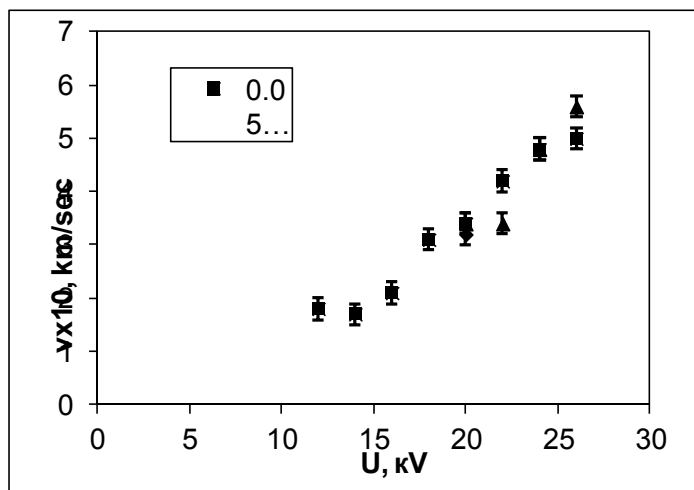


Рисунок 5 – Зависимость скорости потока от напряжения при различных давлениях

Далее на рисунке 6 показан график зависимости амплитуды магнитного поля в межэлектродном пространстве. Амплитуда магнитного поля вдоль электродов ведет себя неоднозначно.

Если при давлении 1 Торр оно по порядку величины одинаково в начале и у среза (на графике слева) электрода, то при давлении 0,1 Торр амплитуда уменьшается от 30 к Гаусс до нуля.

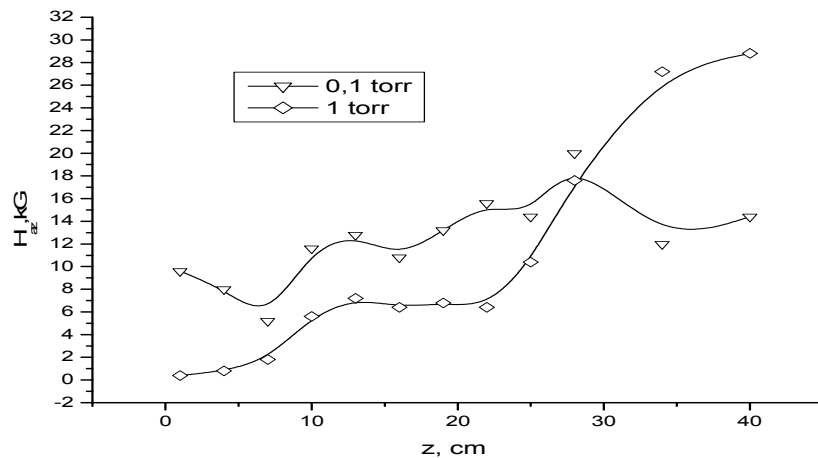


Рисунок 6 – Зависимость магнитного поля от расстояния в межэлектродном пространстве при давлениях 0,1 и 1 Торр

Выводы

Таким образом, в данном исследовании методом магнитных зондов исследовано распределение магнитного поля вдоль электродов ускорителя КПУ-30. Установлено, что магнитное поле движется по направлению к срезу электродов. При этом средняя скорость потока практически не зависит от начального давления газа в камере ускорителя, по крайней мере, в пределах 0,1-1 Торр. Данный результат можно объяснить тем, что согласно формуле Спитцера концентрация заряженных частиц в плазме определяется степенью ионизации. В этом случае, при достаточно высоком напряжении на разряде достигается полная ионизация газа, и в дальнейшем разрядный ток и скорость потока не зависят от давления плазмообразующего газа.

Зависимость скорости от напряжения нелинейная и описывается степенной зависимостью. Эти результаты являются свидетельством того, что в данном ускорителе основной силой движения является электродинамическая сила Ампера [8], так как в этом случае скорость потока

$$v \sim J^2 t^n. \quad (2)$$

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что величина начального давления в камере оказывает существенное

влияние на динамику магнитного поля внутри электродного пространства. При низком давлении газа электромагнитная энергия, пропорциональная величине магнитного поля, реализуется в начальной стадии процесса ускорения. При высоком давлении она равномерно распределена по длине ускорителя. В данном случае ускорение происходит магнитной силой ампера. В то же время, при давлении ниже 0,1 Торр в ускорителе наблюдаются значительные осцилляции магнитного поля, но они имеют тенденцию к затуханию при повышении давления. Можно предполагать, что в этом случае в ускорителе формируется неустойчивость, связанная с аномальным сопротивлением плазмы, образуются структуры типа филаментов [7], что приводит к повышению напряжения на электродах в начале разряда. Дальнейшее развитие неустойчивости приводит к раскачке колебаний значительной амплитуды. Как отмечено выше, в ряде случаев в ускорителе наблюдалось явление выноса тока за срез электродов, и следует предполагать, что причиной этого является возникновение колебаний. Однако появление колебаний не вписывается в рамки электродинамической модели ускорения, но возможно объяснение с учетом эффекта Холла в ускорителях [8]. Наличие скольжения тока вдоль электродов можно определить путем детальных измерений линий тока, что, возможно, явится предметом дальнейших исследований.

References

1. Chebotarev V.V., Garkusha I.E., Bovda A.M., Tereshin V.I. Application of pulsed plasma accelerators for surface modification. *Nukleonika*, 46, 27-30 (2001).
2. Peng Z., Miao H., Wang W. Hard and wear-resistant titanium nitride films for ceramic cutting tools by pulsed high energy density plasma. *Surf. Coat. Tech.*, 166 (2), 183-188 (2003).
3. Tereshin V.I., Bandura A.N., Byrka O.V. et al. Surface Modification and Coatings Deposition under Plasma Streams Processing. *Adv. Appl. Plasma Sci.*, 4, 265-270 (2003).
4. Baimbetov F. B., Zhukeshov A. M., Amrenova. A. U. Dynamics of plasma flow formation in a pulsed accelerator operating at a constant pressure. *Tech. Phys. Lett.*, 33, 77-79 (2007).
5. Zhukeshov A. M. Plasma flow formation in a pulse plasma accelerator in continuous filling regime. *Plasma Dev. Oper.*, 17, 73-81 (2009).
6. Baimbetov F.B., Zhukeshov A.M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T. Measuring the Parameters of pulsed plasma flow by means of magnetic probes. *J. of Engineering Thermophysics*, 16 (1), 40-43 (2007).
7. Soto L. New trend and future perspectives on plasma focus research. *Plasma Phys. Contr. Fus.* 47(5a), 361-381. (2005)
8. Woong C.K., Chung K.H. and Byung H.C. Characteristics of Hall effect plasma accelerator for industrial application. *Rev.Sci. Instr.*, 65(4), 1356-1358 (1994).