

УДК 621.455.4; 533.9...15, 537.525.72

Характеристики модели высокочастотного ионного двигателя с ускорением ионов скачком потенциала двойного слоя

Петров А.К.

Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, 1, стр.2, Москва, 119991, Россия

e-mail: alpetrov57@gmail.com

Аннотация

В работе представлены характеристики трех моделей высокочастотного (ВЧ) индуктивного ионного двигателя. Ускорение ионов осуществляется скачком потенциала двойного слоя, возникающего на выходе ионного двигателя. Были исследованы закономерности возникновения двойного слоя и возможности управления скачком потенциала двойного слоя. Для этого были испытаны модели ионного двигателя при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля различной конфигурации, с выходным каналом различного диаметра и длины, а также с дополнительным электродом, формирующим емкостную ветвь разряда. Получено, что использование расходящегося магнитного поля, уменьшение диаметра выходного канала и увеличение его длины, также как и наличие емкостной составляющей разряда приводят к увеличению энергии ускоренных ионов. Исследованные модели двигателя позволяют получать пучок ускоренных ионов с энергиями от 10 до 300эВ и ионным током от 0 до 250мкА/см² при подводимой мощности менее 300Ватт.

Ключевые слова: электроракетные двигатели, ионные двигатели, высокочастотный, индуктивный разряд, геликоны, косые ленгмюровские волны.

Введение

Появление электроракетных двигателей было предсказано около века назад. За прошедшие сто лет благодаря усилиям ученых и инженеров экономически развитых стран ЭРД стали реальностью. В настоящее время уже несколько сотен ЭРД работают в составе спутников связи. С помощью космических аппаратов, оснащенных ионными и плазменными двигателями, осуществлено несколько дальних космических полетов. Однако, несмотря на большое число существующих схем ЭРД [1-3], а также значительный прогресс в улучшении их параметров, новые космические программы ставят перед разработчиками задачи создания новых, еще более совершенных моделей ионных и плазменных двигателей.

В настоящее время потребности в управлении малыми спутниками, исследовании далекого космоса выдвигают на первый план задачи создания ЭРД с высоким ресурсом. Наиболее часто используемые двигатели, работающие на постоянном токе, продемонстрировали возможность длительной работы: NSTAR – 16265 часов в космосе и 30000 часов на Земле, XIPS-13 – 21000 часов, XIPS-25 – 16000 часов, 12см ИД для космических аппаратов серии ETS (Япония) – 16000 часов. Известно, что одним из основных факторов, снижающих ресурс ионных двигателей, работающих на разряде постоянного тока, является ограниченное время жизни катода, являющегося основным элементом двигателя. В связи с этим в мире

большое внимание стало уделяться разработке ВЧ и СВЧ ЭРД, рабочий процесс которых основан на безэлектродном разряде, не требующем наличия катода.

Одним из подобных двигателей является геликонный ионный двигатель, предложенный К.Чарльз и Р.В.Босвеллом [3-6]. Рабочий процесс двигателя основан на ВЧ индуктивном разряде, помещенном во внешнее магнитное поле. Для поддержания высокоплотной плазмы используется явление резонансного поглощения ВЧ мощности плазмой в силу возбуждения связанных геликонных и косых ленгмюровских волн [7-8]. Формирование и ускорение ионного пучка происходит благодаря падению потенциала в двойном слое, образуемом на границе газоразрядной (ГРК) и вакуумной камер при наличии внешнего магнитного поля [6]. Значения плотности плазмы для геликонного источника ионов составляют 10^{12} - 10^{13} см⁻³ при ВЧ мощности 1кВт и расходе газа 30см³/мин. Средняя энергия ионов составляет порядка 60eV [3, 5].

Меньшая эффективность данного двигателя в сравнении с другими плазменными двигателями, компенсируется большим предполагаемым временем жизни, а также возможностью получения тяги при работе двигателя на химически активных газах [9]. Последнее позволяет использовать для работы двигателя топливо, которое в избытке остается после завершения работы первых ступеней космического аппарата.

В настоящей статье представлены результаты испытания моделей высокочастотного индуктивного ионного двигателя, в котором также как и в работах К.Чарльз и Р.В. Босвелла ускорение ионов осуществлялось скачком падения в двойном слое, возникающем на выходе ионного двигателя.

Целью работы являются исследования закономерностей возникновения двойного слоя и возможности управления скачком потенциала двойного слоя при наложении на индуктивный ВЧ разряд внешнего однородного, сходящегося и расходящегося магнитного поля, изменения диаметра и длины выходного канала двигателя, а также введения дополнительного электрода, формирующего емкостную ветвь разряда. Измерения проводились в аргоне, расход аргона изменялся в диапазоне 6 – 50 см³/мин. Рабочая частота равнялась 13.56МГц, диапазон рассмотренных мощностей составлял 30-300Вт.

Экспериментальная установка.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Экспериментальная установка состоит из следующих секций: газоразрядной и вакуумной камер, ВЧ генератора, газораспределительной системы, системы охлаждения и насосных систем и диагностического оборудования. Вакуумная камера объемом 0.18м³ откачивается роторным насосом АВР-50 (50л/с) и диффузионным насосом высокого вакуума НВДМ-400 (5900л/с) до рабочего давления 10⁻⁵-10⁻⁶ Тор. Сверху на вакуумную камеру устанавливается модель ионного двигателя. Он представляет собой газоразрядную камеру (ГРК), в которой поджигается индуктивный разряд с помощью внешней спиральной антенны, расположенной на боковой поверхности камеры. Индуктор выполнен из охлаждаемой медной трубки диаметром 5 мм. Снаружи ГРК расположен электромагнит. Система подачи газа соединена с верхним концом ГРК. ВЧ-мощность подводится к катушке индуктивности через систему согласования (см. рис.1б) от ВЧ генератора Cesar 1310 с рабочей частотой 13.56MHz.

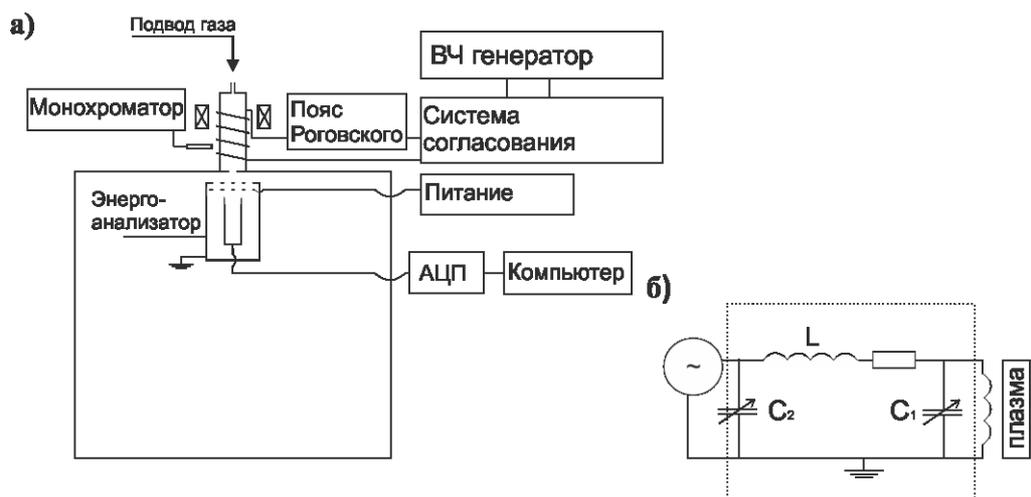


Рисунок 1. (а) Общий вид экспериментальной установки; (б) Система согласования

Были протестированы три модели ГРК.

Первая модель – «ГРК с простым сужением» представляла собой стеклянный цилиндр диаметром 5см, длиной 15см, выходом для газоввода и выходным отверстием диаметром 2см (рис. 2а).

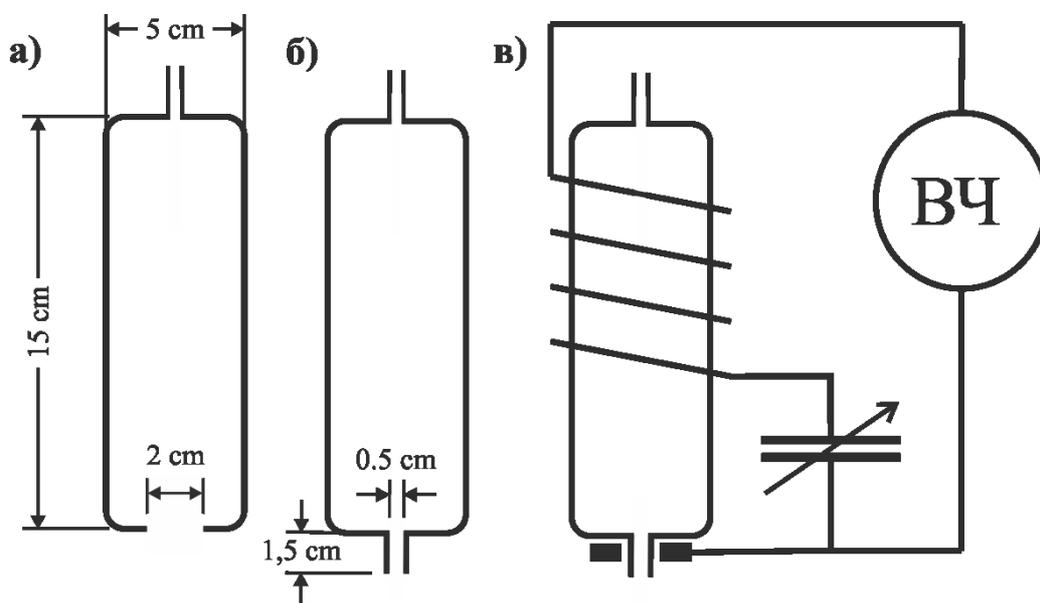


Рисунок 2. Эволюция ГРК: (а) ГРК с простым сужением; (б) ГРК с протяженным сужением; (в)

ГРК с переменным конденсатором

Вторая модель имела выходной канал с диаметром выходного отверстия 0,5см и длиной 1,5см (см. рис. 2б). Даная модель была названа «ГРК с протяженным сужением».

Третья модель двигателя была получена из второй путем расположения дополнительного кольцевого электрода на боковой стороне сужения ГРК и последовательного подключения к индуктору через переменный конденсатор (рисунок 2в). Было предположено, что возникшая в виду организованного емкостного канала мощности квазистационарная компонента электрического поля приведет к дополнительному ускорению ионов. Ниже эта конфигурация ГРК упоминается как ГРК с переменным конденсатором.

Магнитное поле, используемое для усиления индуктивного ВЧ разряд, поддерживалось электромагнитом. В зависимости от положения электромагнита, магнитное поле вблизи отверстия ГРК формировалось в сходящейся, однородной и расходящейся конфигурации. Границы ГРК и силовые линии магнитного поля представлены на рисунке 3.

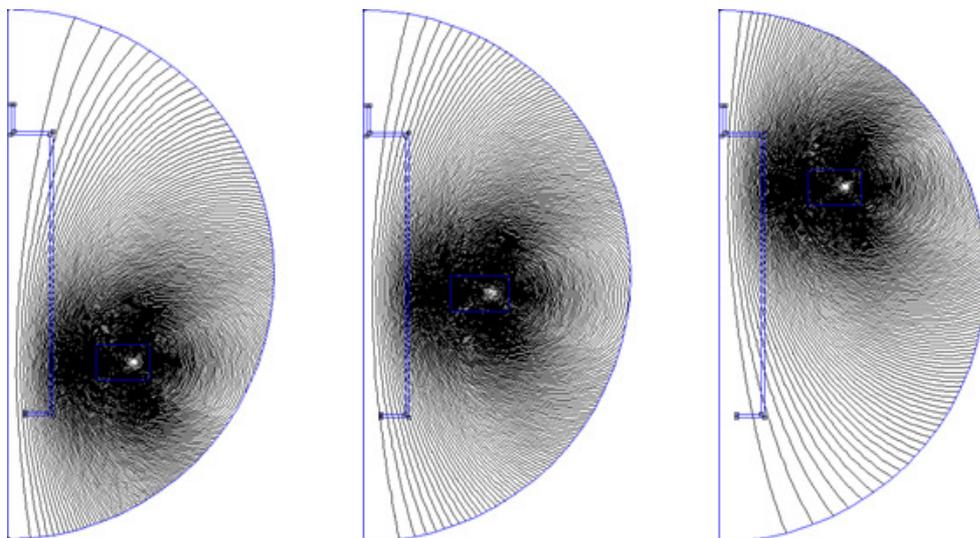


Рисунок 3. Геометрия внешнего магнитного поля в зависимости от положения магнита.

Рабочая частота составляла 13.56МГц. Рассматриваемые значения ВЧ мощности изменялись в диапазоне от 30 до 300Ватт, расхода газа – от 6 до 50см³/мин, магнитного поля – от 0 до 30мТл. В качестве диагностического аппарата использовались пояс Роговского, электростатический энергоанализатор, зонды Фарадея и Ленгмюра, а также система спектральной диагностики.

С помощью пояса Роговского измерялась величина тока, текущего через антенну. На основании этой величины, а также значений мощности, поглощенной системой при наличии и в отсутствие разряда, определялась величина фактической ВЧ мощности, поглощенной плазмой [10]. С помощью электростатического энергоанализатора определялись кривые задержки. Путем последующего дифференцирования кривых рассчитывались функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ). Зонды Ленгмюра использовались для определения потенциала плазмы. Зонды Фарадея использовались для определения величины тока ионного пучка.

Результаты

Гистерезис по расходу газа.

Первые эксперименты показали, что при расходе аргона меньшем, чем 10см³/мин, разряд успешно поджигается, но двойной слой отсутствует, также как и пучок ускоренных частиц (см. рисунок 6). Увеличение потока газа приводило при определенных величинах, зависящих от конструкции ГРК, к внезапному появлению пучка ионов в вакуумной камере снаружи от ГРК. Одновременно формировался плазменный мостик между ГРК и стенками вакуумной камеры. Возникновение

двойного слоя, ускоряющего ионы от газоразрядной к вакуумной камере, подтверждается показаниями энергоанализатора. Дальнейшее увеличение расхода аргона вело к слабому увеличению энергии ионов пучка. Уменьшение расхода после возникновения двойного слоя вело к увеличению энергии ионов. Резкое увеличение энергии ионов наблюдалось сразу перед прекращением разряда при низких расходах рабочего тела. Судя по всему подобный эффект наблюдается в связи с тем, что двойной слой обеспечивает непрерывность тока в проводящем промежутке между ГРК и стенками вакуумной камеры. Схожий гистерезис наблюдали в Харьковском национальном авиационном университете [11].

Стоит подчеркнуть, что на ветви, отвечающей уменьшению расхода аргона после возникновения двойного слоя, было возможным работать при расходах меньших, чем $10\text{см}^3/\text{мин}$. Все дальнейшие эксперименты проводились, используя режимы с низкими расходами после возникновения пучка заряженных частиц.

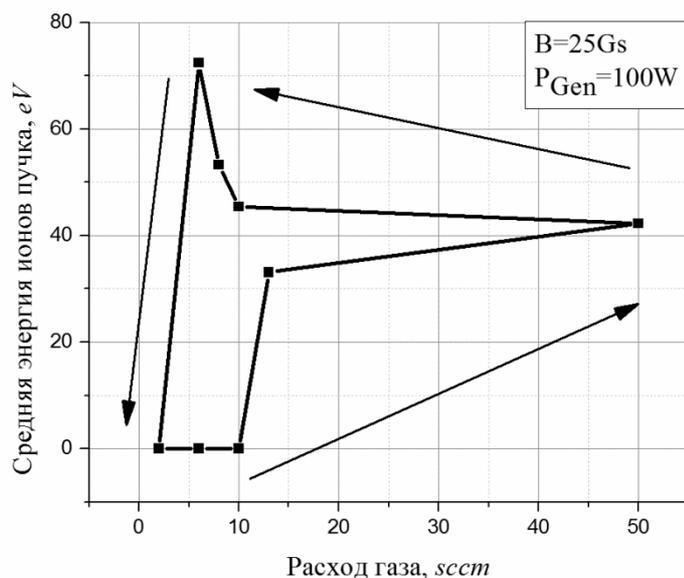


Рисунок 6. Средняя энергия ионов пучка на выходе из ГРК в зависимости от расхода газа

ГРК с простым сужением

Эксперименты с ГРК с простым сужением проводились с использованием индуктивного ВЧ разряда, усиленного внешним магнитным полем. Зависимости вложения мощности в плазму от величины магнитного поля представлены на рисунке 7. Измерения показали резонансное увеличение вложения мощности в области 50-225 Гс, что соответствует резонансному возбуждению геликонных и косых ленгмюровских волн [10, 12-13].

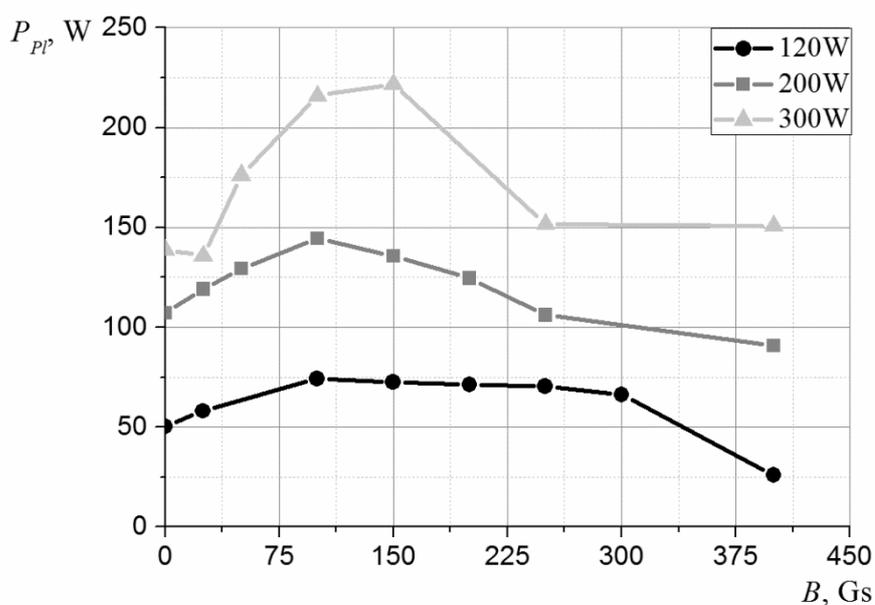


Рисунок 7. Поглощенная ВЧ мощность в зависимости внешнего магнитного поля

(при расходе аргона $6\text{см}^3/\text{мин}$)

Интенсивность спектральных линий в зависимости от подведенной ВЧ мощности приведена на рисунке 8. Измерения проводились для центральной области ГРК вблизи электромагнита. Для каждого значения ВЧ мощности, значение магнитного поля отвечало условиям резонансного поглощения мощности. Поведение атомной и

ионной спектральных линий сильно различается. Для того чтобы продемонстрировать их взаимосвязь, линии были отмасштабированы и представлены в случайных величинах. Атомная линия сначала растет, а затем насыщается, в то время как ионная линия растет во всем рассмотренном диапазоне мощностей. Наиболее вероятной причиной подобного поведения является увеличение степени ионизации разряда.

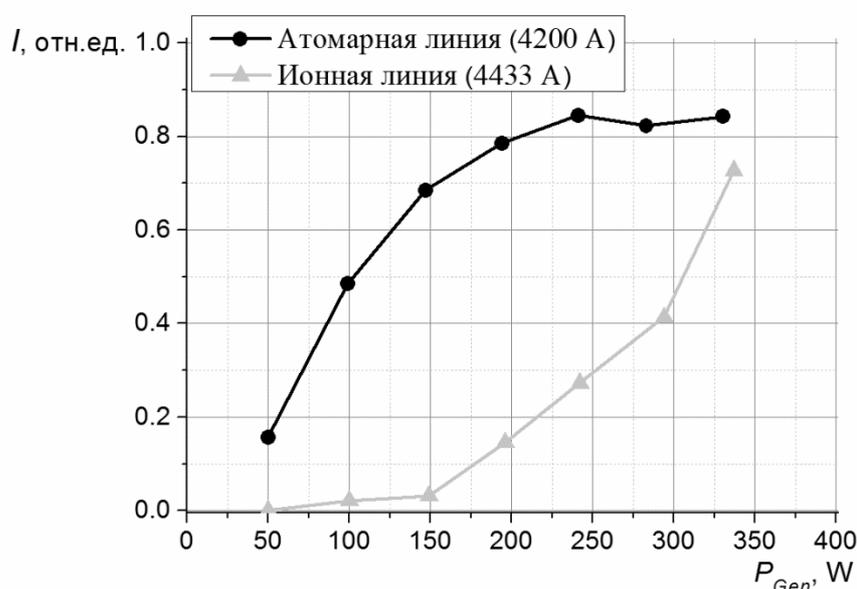


Рисунок 8. Интенсивность спектральных линий от подводимой ВЧ мощности.

Типичная ФРИЭ для ГРК с простым сужением, измеренная с помощью электростатического энергоанализатора при условии резонансного поглощения ВЧ мощности, приведена на рисунке 9.

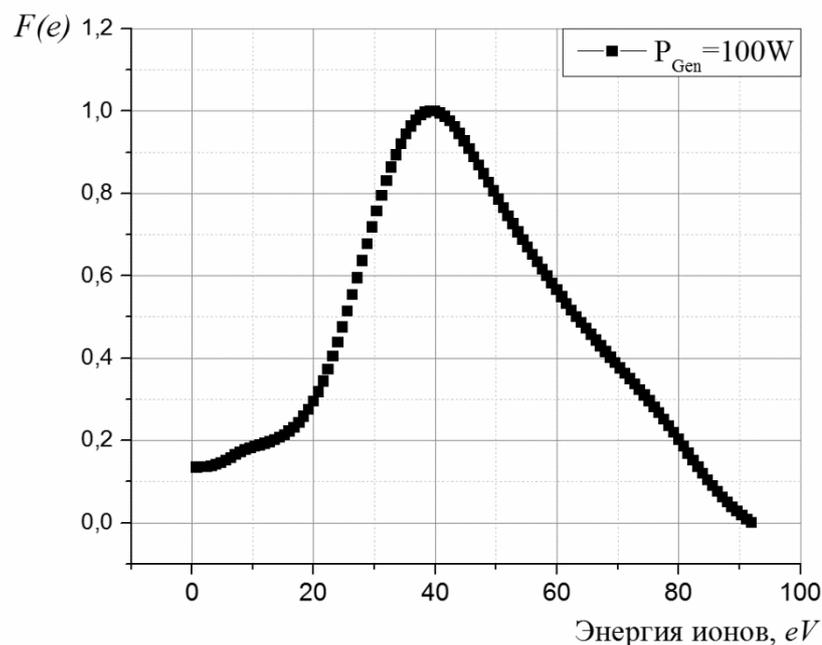


Рисунок 9. ФРИЭ, нормализованная по максимальному значению для расхода аргона $6\text{см}^3/\text{мин}$, магнитного поля 180Гс и 100Ватт подводимой мощности.

Видно, что пик ФРИЭ расположен на отметке в 40эВ , что согласуется с результатами [14]. Эксперименты показали, что максимальные значения средней энергии ионного пучка соответствуют расходящейся конфигурации магнитного поля. Так, максимальная энергия ионного пучка составила 120эВ при подводимой ВЧ мощности в 100Ватт .

Для того чтобы оценить влияние геометрии магнитного поля на скачок потенциала двойного слоя и среднюю энергию ионов пучка, они были измерены при различных положениях электромагнита, отвечающих сходящейся (2см), однородной (4см) и расходящейся ($6\text{-}8\text{см}$) конфигурациям магнитного поля.

Для измерения скачка потенциала использовался компенсационный метод [15]. С этой целью два зонда Ленгмюра были помещены внутри и снаружи ГРК и

соединены друг с другом через амперметр и источник напряжения. Условия, когда ток через цепь становится равным нулю, отвечают случаю, когда оба зонда принимают плавающий потенциал. Измеренное напряжение, таким образом, полагалось равным разнице плазменных потенциалов в двух точках. Данное утверждение верно только при условии, когда электронные температуры в местах расположения зондов равны. Однако, в нашем случае при скачке потенциала 40-60эВ и разнице электронных температур в пределах 3эВ в ГРК, ошибка измерения скачка потенциала двойного слоя остается в пределах 10-20эВ.

Результаты измерений зондов Ленгмюра и энергоанализатора представлены на рисунке 10. Максимальное значение скачка потенциала отвечает случаю расходящегося магнитного поля. Также видно, что максимальные значения измерений энергии ионов согласуются с зондовыми измерениями падения потенциала.

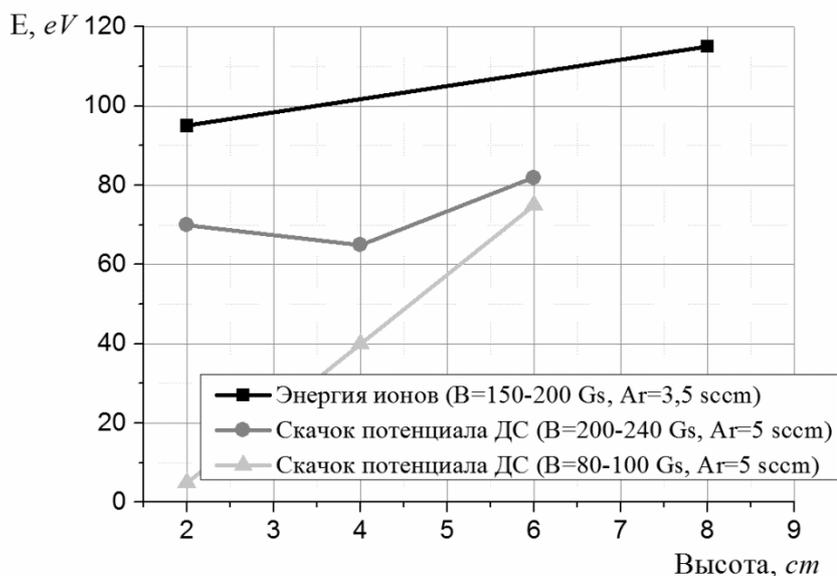


Рисунок 10. Скачок потенциала и максимальная энергия ионов вблизи выхода из ГРК.

ГРК с протяженным сужением

На рисунке 11 изображена средняя энергия ионов пучка в зависимости от внешнего магнитного поля для разных значений ВЧ мощности, поглощенной плазмой. Средняя энергия ионов не зависит от величины мощности в пределах ошибки и растет с увеличением магнитного поля. Абсолютные значения энергии ионов систематически выше, чем в случае с ГРК с простым сужением. Таким образом, использование канала с меньшим диаметром ведет к увеличению средней энергии ионов.

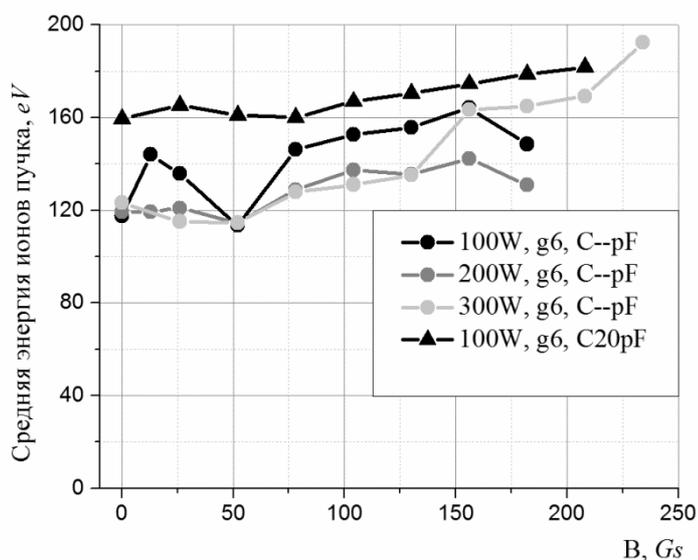


Рисунок 11. Средняя энергия ионов пучка в зависимости от магнитного поля. Заполненные кривые – ГРК с протяженным сужением; полая кривая – ГРК с переменным конденсатором.

Рисунок 12 представляет зависимость интегральной плазменной светимости в зависимости от внешнего магнитного поля и мощности генератора. Интенсивность излучения измерялась вблизи выходного канала. Видно, что интенсивность растет с увеличением мощности и падает при увеличении магнитного поля. Вероятнее всего,

это происходит в связи с уменьшением плотности плазмы в непосредственной близости от двойного слоя. В свою очередь уменьшение плотности плазмы ведет к увеличению скачка потенциала, обеспечивающего токовую непрерывность в проводящем канале между стенками вакуумной камеры и ГРК. Подобное поведение совпадает с результатами исследований гистерезиса. Другими словами, чем хуже условия для поддержания плазмы, тем больше падение потенциала в двойном слое.

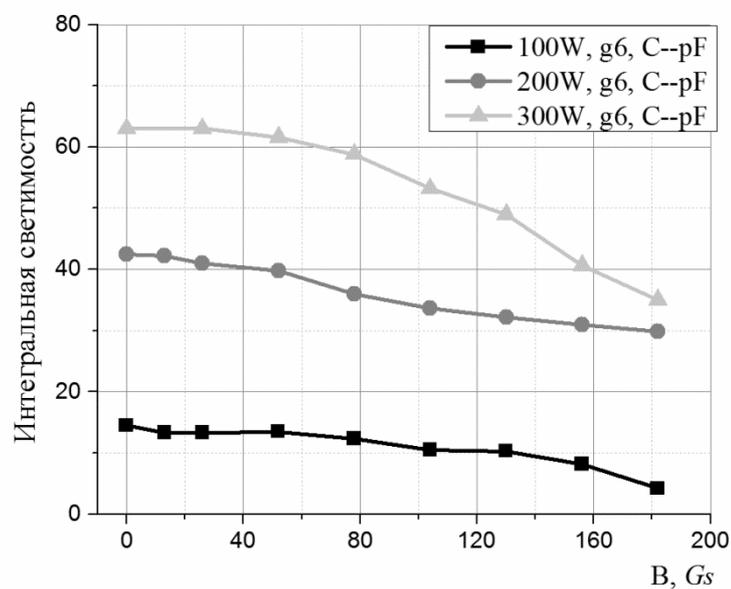


Рисунок 12. Интегральная интенсивность излучения в зависимости от магнитного поля.

ГРК с переменным конденсатором.

Эксперименты с ГРК с переменным конденсатором проводились с и без внешнего магнитного поля. В первую очередь была измерена зависимость средней энергии ионов пучка в зависимости от величины емкости переменного конденсатора (см. рис. 13). Эксперимент показал, что изменение емкости в пределах 20-40пФ не оказывает влияния на энергию пучка. В то же время ток ионного пучка зависит от

величины емкости: чем больше емкость, тем меньше ионный ток (Рисунок 14). При постоянной емкости, ток пучка может быть увеличен путем увеличения расхода рабочего тела и величиной магнитного поля (Рисунок 15).

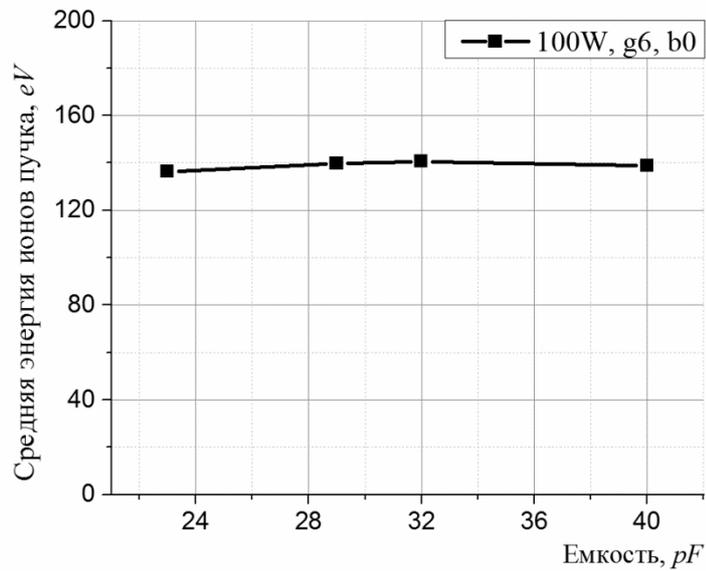


Рисунок 13. Средняя энергия ионов в зависимости от величины разделительной емкости.

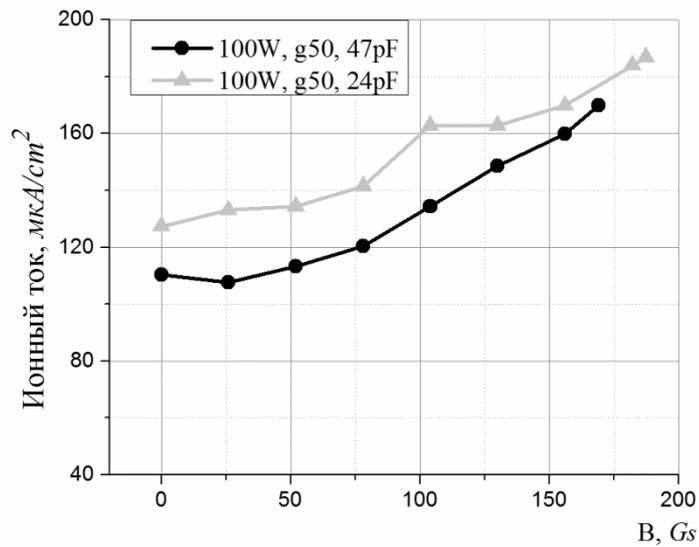


Рисунок 14. Ионный ток в зависимости от магнитного поля для 24 и 47 пФ.

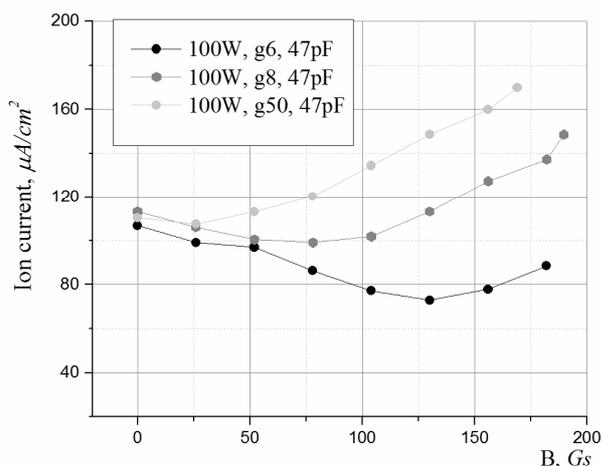


Рисунок 15. Ионный ток в зависимости от магнитного поля для разных расходов аргона.

Преимуществом ГРК с разделительной емкостью является возможность независимого управления средней энергией пучка и его током: средняя энергия ионов управляется потоком газа и магнитным полем, в то время как ионный ток управляется величиной разделительной емкости.

Сравнение ГРК с переменным конденсатором с ГРК с протяженным сужением показало значительное увеличение средней энергии ионов (Рисунок 11). Использование ГРК в конфигурации с разделительной емкостью позволяет получить пучки ускоренных ионов со средней энергией в 160эВ и максимальной – в 230эВ соответственно даже в отсутствие магнитного поля (Рисунок 16а). Приложение внешнего магнитного поля позволяет увеличить эти показатели до 180эВ и 300эВ соответственно (Рисунок 16б).

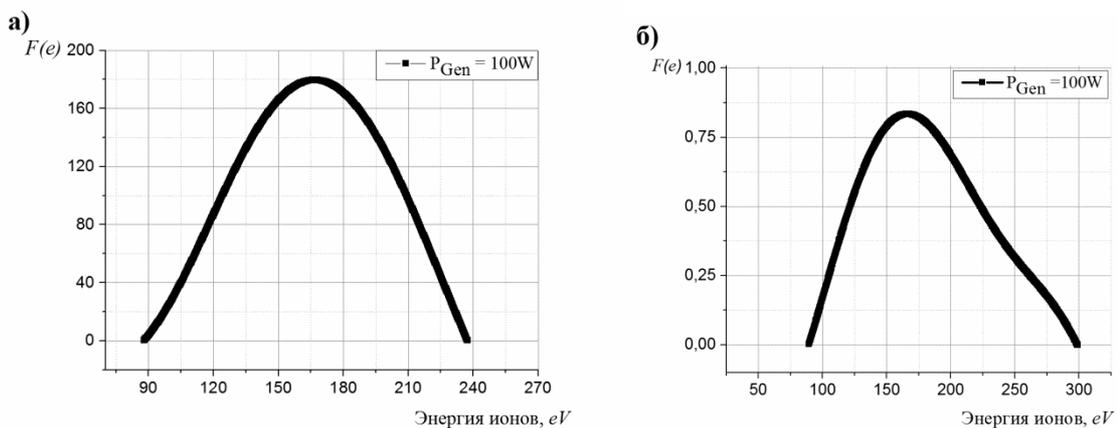


Рисунок 16. Нормированная ФРИЭ для ГРС с разделительной емкостью (а) – в присутствии и (б) – в отсутствие магнитного поля.

Учитывая результаты, представленные на рисунках 11 и 17, можно видеть, что идея увеличения скачка потенциала на выходе из источника за счет обогащения двойного слоя на выходе двойным слоем, характерным для емкостного вч разряда была экспериментально подтверждена. Увеличение скачка потенциала составляет величину порядка 20-60 эВ. На настоящий момент управляемые параметры устройства могут изменяться в следующих пределах: средняя энергия ионов пучка – от 10 до 300эВ, ионный ток – от 0 до 250мкА/см².

Эволюция ФРИЭ устройства, соответствующая эволюции ГРК (Рисунок 2) представлена на рисунке 17 (рабочие условия: газ – аргон; расход - бсм³/мин; рабочая частота - 13,56МГц; ВЧ мощность – 100 Ватт, внешнее магнитное поле – 180Гс).

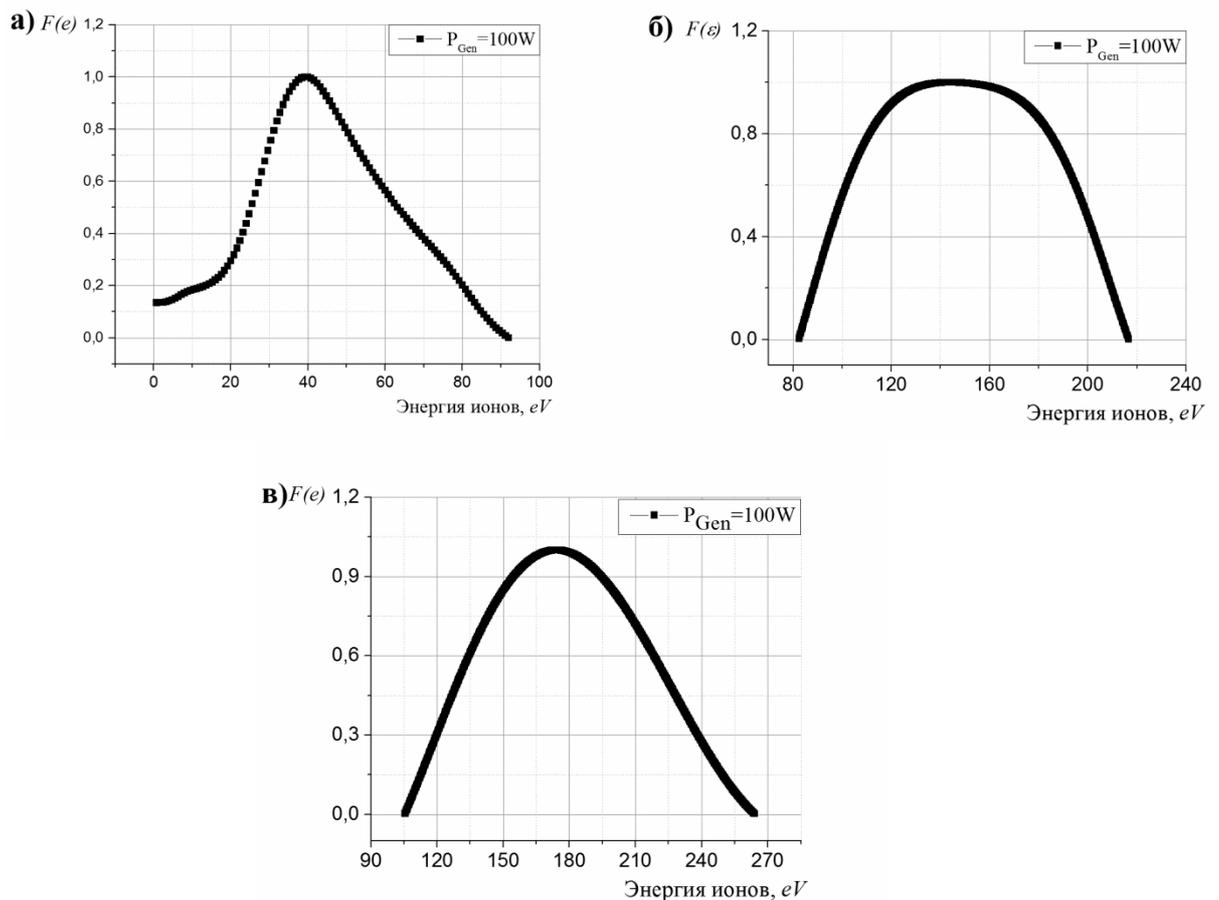


Рисунок 17. Эволюция ФРИЭ: (а) – ГРК с простым сужением; (б) – ГРК с протяженным сужением; (в) – ГРК с разделительной емкостью.

Выводы

Наличие сужения на выходе ГРК ведет к увеличению средней энергии ионов пучка. Чем уже и длиннее выходной канал, тем выше энергия ускоренных ионов. Идея увеличения изменения потенциала на выходе ГРК за счет появления дополнительного квазистационарного скачка потенциала, была экспериментально подтверждена со средним улучшением в 20-60эВ. Показана возможность создания эффективного прототипа ионного двигателя с гибкими возможностями

независимого контроля параметров. Подобное устройство способно изменять энергию ионов пучка от 10 до 300эВ и ионный ток – от 0 до 250мкА/см².

Данная статья была написана при финансовой поддержке Гранта РФФИ 12-02-31760-мол_а.

Список литературы

- [1] Goebel D.M. and Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion, Hoboken, USA, Wiley, 2008.
- [2] Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. «Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов», *Машиностроение*, Москва, 2008, 292с.
- [3] Charles C. Plasmas for spacecraft propulsion, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, no. 16, 2009, pp. 163001.
- [4] Charles C., Boswell R.W. Current-free double-layer formation in a high-density helicon discharge, *Appl. Phys. Lett.*, 2003, vol. 82, no. 9, pp. 1356-1358.
- [5] Charles C., Boswell R.W., Takahashi K. Investigation of radiofrequency plasma sources for space travel, *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, 2012, vol. 54, no. 12.
- [6] Charles C., Boswell R.W. Laboratory evidence of a supersonic ion beam generated by a current-free "helicon" double-layer, *Physics of Plasmas*, 2004, vol. 11, no. 4, pp. 1706-1714.
- [7] Arnush D. The role of Trivelpiece-Gould waves in antenna coupling to helicon waves, *Physics of Plasmas*, 2000, vol. 7, no. 7, pp. 3042-3050.
- [8] Blackwell D.D., Madziwa T.G., Arnush D., Chen F.F. Evidence for Trivelpiece-Gould modes in a Helicon discharge, *Phys. Rev. Lett.*, 2002 APR, vol. 88(14).

- [9] Charles C., Boswell R.W., Laine R. and MacLellan P. An experimental investigation of alternative propellants for the helicon double layer thruster, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 175213, pp. 1–6..
- [10] Кралькина Е.А. «Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе».// *Успехи физических наук*; 2008;**178**:5, 519 – 540с.
- [11] Цаглов А.И., Лоян А.В., Кошелев Н.Н., Рыбалов О.П. «Исследование лабораторной модели геликонного двигателя с двойным слоем малой мощности». *Авиационно-космическая техника и технология*; 2010; **7**(74):90-5.
- [12] Aleksandrov A.F., Bugrov G.E., Kerimova I.F., Kondranin S.G., Kralkina E.A., Pavlov V.B., Plaksin V.J., Rukhadze A.A., Vavilin K.V. Self-consistent model of an RF inductive plasma source located in an external magnetic field, *Lomonosov Readings, MSU, Physical Faculty*, April 18–25, 2003, Annotation, pp. 90–92.
- [13] Vavilin K.V., Rukhadze A.A., Ri K.M., Plaksin V.Y. Low-power RF plasma sources for technological applications: III. Helicon plasma sources, *Technical Physics*, 2004, vol. 49, no. 6, pp. 691-697.
- [14] Lafleur T., Charles C., Boswell R.W. Characterization of the ion beam formed in a low magnetic field helicon mode, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, vol. 44, no. 14.
- [15] Райзер ЮП «Физика газового разряда». Москва: *Наука*; 1992. 536 с.