

10, октябрь 2015

УДК 533.9, 621.039

Исследование разряда геликонного типа для применения в машиностроении, медицине и материаловедении

Полозова Т. Н., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

Научные руководители: Рыжков С.В., к.т.н, доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

Кузенов В.В., к.т.н, доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

svryzhkov@bmstu.ru

Введение

Благодаря пониженному давлению и высокой плотности геликоны находят широкое распространение в машиностроении, медицине и материаловедении. Многие источники плазмы начинают заменять на геликонные в связи с их большей эффективностью. К тому же, это позволяет избежать множество проблем, связанных с использованием разрядов других типов.

Типы разрядов в плазме

В наше время различные источники плазмы находят все больше применения в науке, технике и быту. Ионизация газов в них осуществляется различными способами (ионизация молекул газа электронным ударом, ионизация в газовом разряде, пробой газов лазером и т.д.). После пробоя в зависимости от свойств источника напряжения (конденсатор, генератор постоянного или переменного напряжения, свободное электромагнитное излучение) и характеристик внешней цепи (емкость, сопротивление, индуктивность), сформировавшийся разряд может быть стационарным или нестационарным, причем плазма может быть равновесной, либо неравновесной. Поэтому была введена классификация разрядов и разрядной плазмы по частоте приложенного внешнего поля и по стационарности [1]. Данная классификация представлена в таблице 1.

Классификация разрядов и разрядной плазмы

Частота поля, Гц	Пробой	Неравновесная плазма	Равновесная плазма
Постоянное до 100 – 1000	Искра между электродами	Положительный столб тлеющего разряда	Положительный столб дуги высокого давления
ВЧ $10^5 - 10^8$	Зажигание ВЧ-разряда	ВЧ-разряд в разреженных газах	ВЧ-индукционный плазматрон
СВЧ $10^9 - 10^{11}$	Пробой в волноводах и резонаторах	СВЧ-разряд в разреженных газах	СВЧ-плазматрон
Свет $10^{14} - 10^{16}$	Пробой газов лазером	Завершающая стадия оптического пробоя	Непрерывный оптический разряд

В данной работе подробнее будут рассмотрены периодические разряды, возбуждаемые переменным электрическим полем. Использование этих разрядов позволяет избежать множество проблем, возникающих при применении разрядов, поддерживаемых постоянным током. Большинство этих проблем появляется из-за необходимости нахождения двух электродов в непосредственном контакте с зоной плазмы (в случае периодических разрядов можно отказаться от контакта плазмы с электродами). Например, образование непроводящей пленки на электродах, ограниченность ресурса работы из-за процессов распыления, а также загрязнение основного процесса материалами с поверхности электрода в ходе химических реакций с частицами плазмы [2, 3].

В соответствии с таблицей 1 поле может рассматриваться как переменное, если период его изменения одного порядка с релаксационными процессами в плазме. Мы не будем рассматривать конкретные релаксационные процессы. Как правило, зависимость свойств разрядов от частоты начинает проявляться при частотах выше 1000 Гц.

Различают следующие виды переменных полей в зависимости от частот [1, 3]:

1. Высокочастотное поле ВЧ (радиочастотное) с частотой 0,1 – 100 МГц (длина волны $\lambda = 3 \cdot 10^3 - 3$ м);
2. Сверхвысокочастотное СВЧ (микроволновое) с частотой 1 – 100 ГГц ($\lambda = 0,3 - 3 \cdot 10^{-3}$ м);
3. Оптическое (излучение инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов) с частотой $10^{14} - 10^{16}$ Гц.

Таблица 2

Сравнение геликонного разряда с другими ВЧ разрядами

Тип разряда	Способ возбуждения разряда	Плотность плазмы, м^3	Вид электрического поля (ЭП)	Вид магнит. поля (МП)	Частота поля, МГц	Давление газа, Па
Индукц. разряд (<i>H</i> -тип)	Подача переменного тока в соленоид	$10^{17}-10^{18}$	Силовые линии ЭП – концентрич. окружности с витками соленоида	МП вдоль оси соленоида	0,1–100	10^4-10^5
Емкост. разряд (<i>E</i> -тип)	Переменное напряжение подается на электроды	$10^{14}-10^{17}$	Потенциальное ЭП	Вихревой характер МП	0,1–100	$0,1-10^4$
Геликон (<i>W</i> -тип)	Подача переменного тока в соленоид	$10^{17}-10^{21}$	Силовые линии ЭП – концентрич. окружности с витками соленоида	МП вдоль оси соленоида	2–70	$10^{-2}-10$

Разряды, поддерживаемые высокочастотным полем, широко используются в промышленности. Их разделяют на три типа: индукционный, емкостной и геликонный. Параметры высокочастотных разрядов приведены в таблице 2 [3–7].

Тип разряда зависит от мощности, поглощаемой в плазме: при низкой мощности наблюдается емкостной разряд (*E*-тип), при средней – индукционный (*H*-тип), и, наконец, при высокой – геликонный (*W*-тип). С изменением мощности можно наблюдать *E-H-W*-переходы, что представлено на рис. 1. Увеличение давления связано с увеличением плотности разряженных частиц.

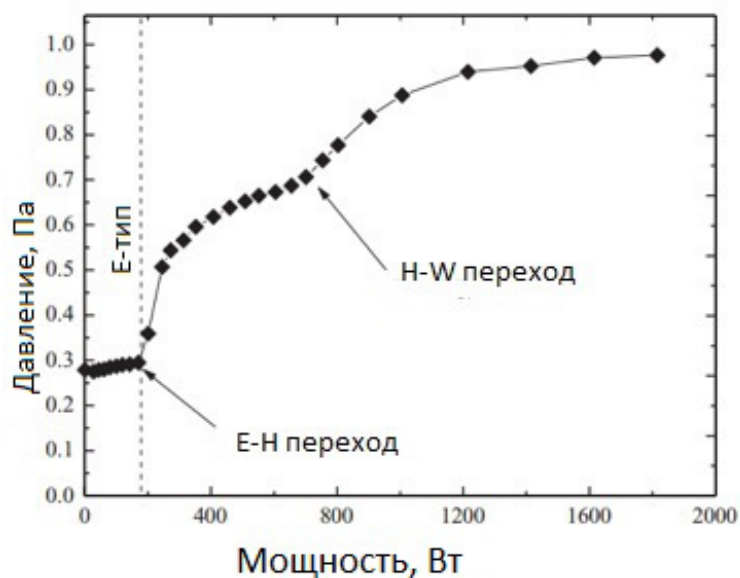


Рис. 1. Давление плазмы (газа SF_6), измеренное вблизи стенки в геликонном источнике [8]

Переходы между типами разрядов в ВЧ-источнике также представлены на рис. 2. Нижняя кривая поглощаемой мощности пересекает прямую мощности потерь в емкостной области разряда при низкой плотности (E -тип). Далее емкостной разряд прекращается. С увеличением тока индуктивный разряд (H -тип) – вторая кривая на рис. 2 и заканчивается с пересечением прямой мощности потерь при плотности порядка 10^{17} м^{-3} . При дальнейшем повышении тока наступает переход в геликонный режим разряда (H -тип).

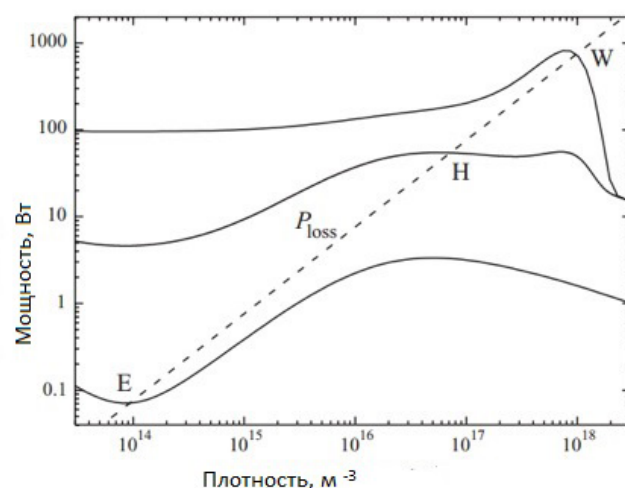


Рис. 2. E - H - W -переходы в зависимости от мощности. Сплошные линии показывают поглощаемую мощность в плазме, пунктирная – мощность потерь [8]

Параметры геликона и геликонный источник плазмы

Геликонный разряд – это высокоэффективный источник плотной плазмы, представляющий собой разновидность ВЧ индукционного разряда, усиленного слабым магнитным полем. Геликонные волны, возбуждаемые в плазме, впервые были исследованы в 60-х гг. 20-го века, сначала в твердотельной, а затем в газоразрядной плазме. Геликонные волны – правополяризованные, распространяются в плазме вдоль внешнего постоянного магнитного поля. Частота геликонов лежит в диапазоне между циклотронной ионной и электронной частотами [5, 9–12].

Таблица 3

Параметры геликонных разрядов

Плотность плазмы, м^{-3}	Температура, эВ	Давление газа, Па	Частота, МГц	Магнитное поле, Тл
$10^{17} - 10^{21}$	1 – 10	$10^{-2} - 10$	2 – 70	$5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$

Типичная установка на основе геликонного разряда представляет собой цилиндрическую камеру радиусом $a = 0,05$ м и длиной $L > 1$ м, которая находится в однородном продольном магнитном поле. С помощью специальной антенны в плазменном столбе генерируются слабо затухающие геликонные волны. Схема такого источника показана на рис. 3 [13].



Рис. 3. Схема геликонного источника плазмы [13]

Установки с геликонным источником плазмы

Название установки	Разработчик	Плотность плазмы, м ⁻³	Температура плазмы, кэВ	Магнитное поле, Тл
Реактор для ионного травления <i>MORI 200 (the M=0 Reactive Ion etcher)</i> [14]	<i>PMT, Inc. (Plasma and Materials Technologies)</i> , Чатсуорт (Калифорния), США	$> 10^{18}$	–	До 0,1
Геликонный источник <i>Vortex</i> [14]	<i>Lucas Signatone Corp.</i> , Саннивейл (Калифорния), США	$> 10^{18}$	–	До 0,02
Импульсная установка ГОЛ-3 [15]	ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия	$10^{18} - 10^{22}$	До 2	3,3 – 4,8
ВЧ геликонный источник плазмы [16, 17]	Национальная лаборатория Оук-Ридж (<i>Oak Ridge National Laboratory ORNL</i>), США	$10^{18} - 10^{20}$	До 0,2	До 0,8
Ионно-плазменная распылительная установка на основе пучково-плазменного разряда [13]	МФТИ, каф. «Физика лазерных и ионно-плазменных технологий», Россия	$10^{17} - 10^{19}$	0,5 – 1	До 0,05
Установка плазменного травления <i>NLD-6000 (Neutral Loop Discharge)</i> [13]	Компания <i>ULVAC inc.</i> (США и Япония)	$10^{17} - 5 \cdot 10^{20}$	2 – 3	–

В настоящее время во многих странах созданы и продолжают разрабатываться реакторы геликонного типа и геликонные источники плазмы (см. табл. 4). На установках данного типа проводится множество опытов, результаты которых необходимы для развития технологий плазменного эксперимента. Некоторые из них используются в промышленности (*MORI 200* и *Vortex*) [14].

Высокая плотность плазмы, низкое давление рабочего газа и высокий КПД, обусловленный способностью вкладывать в плазму полезную мощность без ограничений из-за глубины скинирования, характерной для обычного индукционного разряда, обеспечивают привлекательность геликонного разряда для ионно-плазменных технологий [13, 18].

Применение геликонных разрядов

Геликонные разряды находят очень широкое применение в самых разнообразных областях науки и техники. При этом ясно, что наиболее точные результаты могут быть получены, если рассматривать индуктивный и геликонный ВЧ-разряд, как нелинейную, самосогласованную физическую систему.

Прежде всего, геликонные волны могут служить источником плазмы для плазменного травления [19]. На сегодняшний день требования к оборудованию для плазменного травления возрастают [20]:

- Снижение рабочих давлений до уровня $10^{-2} - 10$ Па;
- Снижение температур ионов до 10 эВ;
- Увеличение плотности плазмы до $10^{17} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Работа с высокоплотной плазмой при низком давлении обеспечивает более тонкую область пространственного заряда и, соответственно, меньшую вероятность рассеяния ионов в этом промежутке, что гарантирует большую анизотропию процесса травления [21]. Указанным выше требованиям хорошо удовлетворяют геликонные волны.

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН разрабатывается геликонный источник плазмы для изучения взаимодействия плазмы с веществом с целью выбора оптимальных материалов для облицовки установок термоядерного синтеза. Кроме того, источники такого типа могут найти применение и в гибридных термоядерных установках [22–26].

Экспериментальные работы проводятся не только для разрядов в однородном поле, но и в сходящемся магнитном поле, что приводит к увеличению эффективности генерации плазмы [27].

Теперь рассмотрим применение геликонного разряда в материаловедении при обработке материалов. Одним из эффективных и экономичных путей повышения качества изделий, их надежности и срока службы является модификация поверхностного слоя рабочих элементов с целью придания им заданных свойств, позволяющих увеличить износ- и коррозионностойкость, а также усталостную прочность. Одним из лучших методов модификации различных материалов является обработка в плазме высокочастотного разряда пониженного давления. Такой разряд должен характеризоваться следующими параметрами: плотность плазмы $n = 10^{17} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, давление порядка 10 Па, температура $T = 1 - 3$ эВ. Под эти параметры подходит разряд геликонного типа [21, 28, 29].

Плазма ВЧ-разряда пониженного давления позволяет обрабатывать порошковые материалы, малогабаритные изделия, внутренние и наружные поверхности изделий

сложной конфигурации, органические и неорганические материалы с различными внутренним составом и структурой. Обработка в плазме ВЧ-разряда пониженного давления позволяет увеличить адгезию тонкопленочных покрытий к подложке, изменить физические свойства материалов [28].

Один из видов плазменной обработки материалов – плазменное напыление. При пониженном давлении исходный материал осаждается на подложку не в виде частиц, находящихся в оплавленном состоянии, а из паровой фазы. Таким образом, образуются тонкие пленки, которые можно получать как для легкоплавких, так и для тугоплавких материалов. Такого рода покрытия могут быть термостойкими, диэлектрическими, проводящими, жаропрочными и т.д.

Плазменное напыление широко используется в медицине при модификации поверхности имплантатов. Например, в стоматологии важна остеоинтеграция (непосредственный контакт имплантата с костной тканью без участия соединительной ткани), которую можно достигнуть путем модификации поверхности имплантата (придание шероховатости, микрорельефа) плазменным напылением [30]. Также имплантатам можно придать биомеханические характеристики и биоактивные свойства, способствующие процессу остеогенеза (образование костной ткани), для чего на поверхность протеза наносят кальций-фосфатные покрытия путем плазменного напыления [31, 32].

Другое важное применение геликонного разряда – обработка материалов с целью придания их поверхности заданных свойств. Например, для очистки поверхности от органических соединений, влаги, мелких частиц, удаления микродефектов, очистки и полировки подложек (часто применяется в оптике) [20].

Более того, материалы, обладающие антибактериальными свойствами, можно получать путем модификации их наночастицами серебра и обработки потоком плазмы геликонного разряда. Включение плазменной обработки позволяет решить проблему эффективного нанесения антибактериального аппарата на поверхность материалов синтетического и смесового состава, а также устойчивого закрепления нанесенного вещества [33, 34].

В настоящее время в России и за рубежом активно ведутся работы по созданию перспективного безэлектродного электрореактивного двигателя (ЭРД) с высокочастотной ионизацией, который носит название геликонный двигатель [35–39]. Основными преимуществами данного типа двигателя можно считать относительно высокий (по сравнению с другими ЭРД) ресурс работы, возможность использования различных

рабочих тел. Рассматриваемые ЭРД могут применяться в качестве двигателей коррекции и ориентации геостационарного или низкоорбитального космического аппарата (микроспутников), а также маршевых двигателей.

Заключение

Геликонные разряды имеют ряд преимуществ (высокая плотность плазмы и эффективность поглощения энергии при низком рабочем давлении) перед другими разрядами, что позволяет избежать множество конструктивных проблем и упростить работу установки. В работе проведен обзор литературы и указаны основные параметры разрядов и геликонных источников. Выполнен анализ схем и установок геликонного типа для применения в машиностроении, медицине и материаловедении. Системы на основе геликона могут служить источником плазмы для плазменного травления, могут быть использованы при обработки материалов и их поверхностей для придания им заданных свойств. Также геликоны нашли широкое применение в медицине, в частности при модификации поверхности имплантатов (плазменное травление) и при получении антибактериальных материалов. В наши дни активно ведется работа по созданию геликонного двигателя – безэлектродного ЭРД с высокочастотной ионизацией.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации № 13.79.2014/К.

Список литературы

1. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 416 с.
2. Сысун В.И. Источники плазмы высокой плотности на основе индукционно-связанного разряда // ЖЭТФ. 2003. Т. 62, № 6. С. 31.
3. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684 с.
4. Gao Z., Yu-Qing X., Chao M. et al. Characterization of plasma in a short-tube helicon source // Acta Physica Sinica. 2014. V. 63. Issue 23. P. 235202.
5. Сазонтов В.А., Семенов В.Е., Смирнов А.И. Одномерная модель геликонного разряда // Физика плазмы. 2007. Т.33, N 11. С.1048-1056.
6. Князев Б.А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд: учебное пособие. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2003. 290 с.

7. Александров А.Ф., Бугров Г.Э., Вавилин К. В. и др. Самосогласованная модель ВЧ индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 5. С. 434-449.
8. Chabert P., Braithwaite N. Physics of radio-frequency plasmas. Cambridge University Press, New York, 2011. 375 p.
9. Chen F.F. Helicon discharges and sources: a review // Plasma Sources Science and Technology. 2015. V. 24. P. 014001.
10. Chen F.F., Evans J.D., Tynan G.R. Design and performance of distributed helicon sources // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. P. 236-249.
11. Алексенко О.В., Мирошниченко В.И., Мордик С.Н. Пространственное распределение потерь ВЧ электромагнитного поля в плазменном источнике геликонного типа // Физика плазмы. 2014. Т. 40, № 8. С. 764-770.
12. Брагинский О.В., Васильева А.Н., Ковалев А.С. Геликонная плазма в неоднородном магнитном поле // Физика плазмы. 2001. Т. 27, № 8. С. 741-749.
13. Арсенин А.В. Моделирование источников плазмы для современных технологий микроэлектроники: автореф. дис. ... канд.техн.наук. Долгопрудный, 2005. 122 с.
14. Chen F.F. Helicon plasma sources / University of California. Los Angeles. 1994. 69 p.
15. Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V. Plasma Heating and Confinement in GOL-3 Multi Mirror Trap // Fusion Science and Technology. 2007. Vol. 51. № 2T. P. 106–111.
16. Goulding R., Caughman J., Peng Y-K M., Rapp J., Biewer T., Canik J., Fadnek A., Hillis D., Chen G. The ORNL high-flux helicon source and PhIX // VLT Conference Call. 2012. Available at: http://web.ornl.gov/sci/vlt/research/20120418_goulding.pdf, accessed 10.04.15.
17. Goulding R., Canik J., Caughman J., Cole M., Chen G., Diem S., Meitner S., Owen L., Peng M., Rusmussen D. Research at ORNL on an RF-based Intense Plasma Source // Intl. Workshop on Next Generation PMI Test Stands. 2010. Available at: http://web.ornl.gov/sci/fed/PMTS10/PMTS10_15.pdf, accessed 10.04.15.
18. Shinohara S., Hada T., Motomura T., Tanaka K., Tanikawa T., Toki K., Tanaka Y., and Shamrai K.P. Development of high-density helicon plasma sources and their applications // Physics of Plasmas. 2009. V. 16. P. 057104.
19. Takahashi K., Motomura T., Ando A., Kasashima Y., Kikunaga K., Uesugi F., Hara S. Transport of a helicon plasma by a convergent magnetic field for high speed and compact plasma etching // Journal of Physics D: Applied Physics. 2014. V. 47. Issue 42. P. 425201.

20. Фареник В.И. Высокочастотные разряды низкого давления в технологии малоэнергоемкого вакуумно-плазменного травления микроструктур // Физическая инженерия поверхности. 2004. Т. 2, № 1. С. 117–145.
21. Дудин С.В. Исследования и разработка технологических систем на базе ВЧ индукционного разряда для реактивного ионно-плазменного травления микро- и наноструктур // ФП ФИП PSE. 2009. Т. 7, № 3. С. 171-194.
22. Кузенов В.В. Разработка оценочной физико-математической модели ВЧ-разряда геликонного типа // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 6. Available at: <http://chemphys.edu.ru/media/files/11-30-002-.pdf>, accessed 20.03.15.
23. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical modeling of magnetized plasma compressed by the laser beams and plasma jets // Problems of Atomic Science and Technology. 2013. № 1 (83). P. 12-14.
24. Рыжков С.В. Современное состояние, проблемы и перспективы термоядерных установок на основе магнитно-инерционного удержания горячей плазмы // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78, № 5. С. 647-653.
25. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu., Ivanov A.A. Analysis of the compression and heating of magnetized plasma targets for magneto-inertial fusion // Fusion Science and Technology. 2013. V. 63. № 1T. P. 135-138.
26. Кузенов В.В., Лебо И.Г., Лебо А.И., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.
27. Вирко В.Ф., Шамрай К.П., Кириченко Г.С., Вирко Ю.В. Повышение эффективности геликонного разряда в сходящемся магнитном поле // Problems of Atomic Science and Technology. 2003. № 4. P. 241-246.
28. Абдулин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высоко-частотной плазме пониженного давления. Казань: Казан. гос. технол. ун-т. 2007. 370 с.
29. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. Радиочастотные источники плазмы малой мощности для технологических приложений. Геликонные источники плазмы // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 6. С.29-34.
30. Родионов И.В., Серянов Ю.В. Применение технологии анодного оксидирования при создании биосовместимых покрытий на дентальных имплантатах // Вестник

- Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 2, № 1. С. 77–87.
31. Верещагин В.И., Хабас Т.А., Старосветский С.И., Звигинцев М.А., Решетова А.А. Новые технологии создания и применения биокерамики в восстановительной медицине. Томск: Томский политехнический университет, 2013. 219 с.
 32. Ботаева Л.Б. Разработка технологии изготовления металлокерамических изделий для медицины на основе титана с оксидными и кальций-фосфатными покрытиями: автореф. дис. ... канд.техн.наук. Томск. 2005. 20 с.
 33. Абдулин И.Ш., Желтухин В.С., Бородаев И.А., Шемахин А.Ю. Модель взаимодействия плазмы индукционного высокочастотного разряда пониженного давления с наночастицами серебра // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 3. С. 291-295.
 34. Тимошина Ю.А. Разработка трикотажных и нетканых волокнистых материалов с антибактериальными свойствами: автореф. дис. ... канд.техн.наук. Казань. 2014. 179 с.
 35. Петров А.К. Характеристики модели высокочастотного ионного двигателя с ускорением ионов скачком потенциала двойного слоя // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 74. Available at: <http://www.mai.ru/upload/iblock/12f/12f6f6b359a00847f5c7ed6607514bed.pdf>, accessed дата обращения 09.04.15.
 36. Цаглов А.И., Лоян А.В., Кошелев Н.Н., Рыбалов О.П. Результаты испытаний безэлектродного электрореактивного двигателя малой мощности с ВЧ ионизацией РТ // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. № 8. С. 212-217.
 37. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Отдельные элементы физико-математической модели геликонного разряда // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 37-44.
 38. Chen F.F. Ion ejection from a permanent-magnet mini-helicon thruster // Physics of Plasmas. 2014. Vol. 21. P. 093511.
 39. Shabshelowitz A., Gallimore A.D., Peterson P.Y. Performance of a helicon Hall thruster operating with Xenon, Argon, and Nitrogen // Journal of Propulsion and Power. 2014. Vol. 30. P. 664-671.