

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

ШИПКО М.Н., д-р техн. наук, ВОРОБЬЕВ В.Ф., канд. техн. наук, БЕЛЯЕВ Г.В., асп., КРАЙКОВ А.Н. студ.

Рассмотрен вопрос оптимизации электродной системы ускорителей ионов. Предложена конструкция катодов, позволяющая производить максимальное ускорение ионов при заданной конфигурации электрического поля.

Ключевые слова: система ускорителей ионов, ионизация, электродная система, удельная мощность.

ELECTRODE ION ACCELERATOR SYSTEM OPTIMIZATION

M.N. SHIPKO, Ph.D., V.F. VOROBIEV, Ph.D., G.V. BELYAEV, engineer, A.N. KRAIKOV, student

This paper is devoted to the problem of electrode ion accelerator system optimization. The authors have suggested cathode construction, which allows producing maximum ion acceleration according to the given configuration of electric field.

Key words: ion accelerator system, ionization, electrode system, specific power.

В настоящее время интенсивно проводятся исследования в области обработки поверхности твердых материалов с целью изменения их свойств. Одним из современных и наиболее перспективных способов обработки является метод имплантации ионов в приповерхностные слои материала.

Для эффективной имплантации ионов в материал необходимо их ускорить до энергий не менее 1 кэВ. Реализация подобной технологии в настоящее время осуществляется с помощью громоздких, дорогостоящих и сложных в эксплуатации линейных ускорителей ионов. Более простым и экономичным способом ускорения ионов может стать способ их ускорения непосредственно из газоразрядной плазмы низкого давления. Однако ускорить поток ионов из плазмы путем непосредственного приложения высокого напряжения к межэлектродному промежутку не представляется возможным. Ионы, движущиеся к катоду, постоянно испытывают столкновения с нейтральными частицами газа. После соударения практически половина энергии иона передается нейтральной частице. За счет этого процесса максимально возможная энергия ионов в плазме может достигать порядка 1,0–5,0 эВ [1]. Поэтому для реализации метода ускорения ионов из плазмы газового разряда необходимо исключить их взаимодействия с нейтральными компонентами плазмы на пути движения ионов к катоду. Это может быть достигнуто посредством увеличения степени ионизации плазмы. Для реализации данной технологии предлагается процесс ускорения ионов разделить на два этапа. На первом этапе достигается высокая степень ионизации газа в разрядном промежутке, на втором этапе осуществляется непосредственное ускорение ионов из этой плазмы в сильном электрическом поле.

Рассмотрим проблемы получения холодной плазмы газового разряда с высокими степенями ионизации. Длина свободного пробега иона (λ) зависит от концентрации частиц, с которыми взаимодействует ион (n), и сечения столкновения (σ) [1, 2]:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma}, \quad (1)$$

В соответствии с (1) длину свободного пробега ионов λ можно увеличить, уменьшая n и σ . Однако сечение столкновений – величина практически неизменная, поэтому увеличить λ можно только за счет уменьшения концентрации нейтральных частиц n . Для достижения высокой степени ионизации плазмы целесообразно использовать электродную систему с эффектом потенциальной ловушки электронов (рис. 1). Этот эффект состоит в увеличении ионизационной способности электронов за счет придания им сложной траектории движения. Предположим, что электрон начинает свое движение от одной стенки катода в направлении силовой линии электрического поля ко второй стенке катода. При движении электрона на первой половине участка внутри катода он ускоряется, а на второй половине – замедляется (движение против сил электрического поля). Вблизи второй стенки катода электрон полностью затормозится, и затем процесс его движения повторится в обратном направлении. Наличие небольшой тангенциальной силы, действующей на электрон в направлении оси катода, приводит к изменению траектории его движения, и он, совершая колебательные движения внутри катода, будет постепенно дрейфовать к краям электродной системы. Таким образом, в потенциальной ловушке длина свободного пробега электронов значительно увеличивается, и за счет этого возрастает вероятность ионизации нейтральных молекул газа, находящихся внутри полого катода.

В экспериментальной установке (рис. 2) в качестве вакуумной камеры используется установка БУЛАТ-3Т. Электродная система, в которой достигается эффект потенциальной ловушки электронов, выполнена в виде двух коаксиальных цилиндров. Эти цилиндры являются катодами, а анодом – заземленный корпус камеры. Внутренний диаметр внешнего цилиндра катода равен 55 мм, диаметр внутреннего цилиндра изменяется в диапазоне от 12 до 40 мм. В качестве газовой среды используются аргон и азот. Давление газа в рабочей камере изменялось от 1 до 50 Па. Источник постоянного напряжения, использованный в экспериментах, обеспечивал плавную регулировку напряжения в пределах от 100 до 2000 В при токах до 10 А.

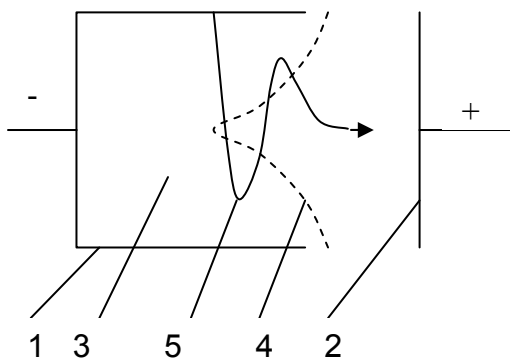


Рис. 1. Схема движения электрона в системе с потенциальной ловушкой: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – межэлектродное пространство полого катода; 4 – граница высокоионизированной плазмы; 5 – траектория электрона, совершающего колебания внутри полого катода

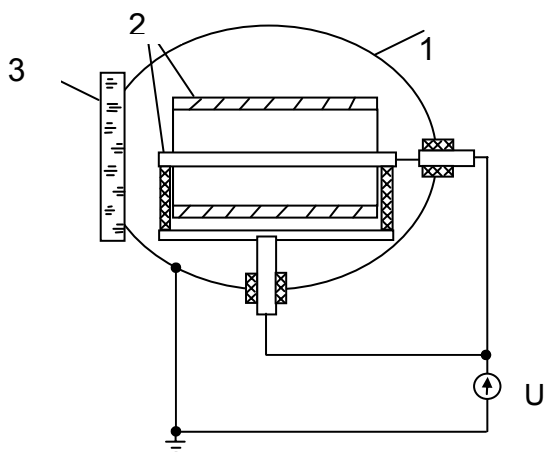


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, являющаяся анодом; 2 – катод; 3 – смотровое стекло

Перед проведением эксперимента электроды тщательно очищались бензином, ацетоном с применением ультразвукового стимулирования. Непосредственно перед проведением эксперимента производилась окончательная обработка электродов в тлеющем разряде в средах аргона и азота.

Испытания проводились при постоянном давлении, поддерживавшемся с помощью автоматики. При определенном напряжении между стенкой камеры и внешним цилиндром катода зажигался тлеющий разряд. Внутри полого катода разряд при этом отсутствовал. Дальнейший подъем напряжения приводил к возникновению внутри катода яркого свечения, причем ток в данный момент увеличивался скачком. Это напряжение фиксировалось как напряжение зажигания разряда с полым катодом. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда состоит из двух участков – возрастающей ветви и падающей ветви. На возрастающем участке ВАХ с увеличением тока напряжение возрастает, причем скорость его роста уменьшается. Дальнейшее увеличение тока приводит к появлению падающей ветви в ВАХ разряда. При этом наблюдается жгутирование разряда с сильно

выраженным каналом дуги и яркими катодными пятнами на поверхности электродов.

Анализ вольт-амперных характеристик разряда с полым катодом (рис. 3) показал, что суммарный ток зависит от отношения диаметров электродов катода. Электродной системе с меньшим отношением диаметров катода соответствует меньшее значение суммарного тока. Если для системы электродов с отношением радиусов 0,22 полный ток I_{Σ} как функция от напряжения имеет ярко выраженный экспоненциальный характер, то для системы электродов с отношением радиусов 0,73 он изменяется практически по линейному закону. В последнем случае тлеющий разряд после зажигания практически сразу переходит в дуговой. Таким образом, системам с наибольшим суммарным током соответствуют наибольшие значения напряжений зажигания.

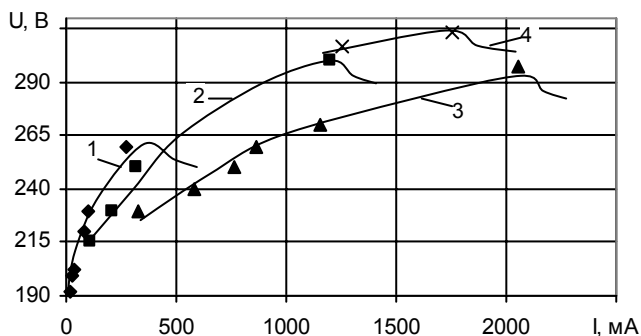


Рис. 3. Зависимость напряжения от полного тока при следующих отношениях радиусов электродов: 1 – 0,22; 2 – 0,36; 3 – 0,55; 4 – 0,73

Напряжения, в пределах которых изменяется суммарный ток, зависят от отношения радиусов электродной системы. Электродным системам с наибольшим межэлектродным расстоянием соответствует наибольшая разность между напряжением зажигания и напряжением перехода в дугу (рис. 4).

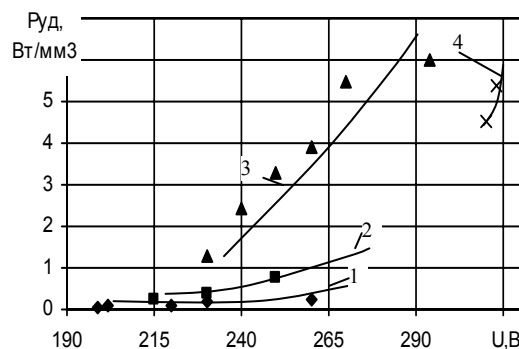


Рис. 4. Зависимость удельных мощностей электродной системы от напряжения при следующих отношениях радиусов электродов: 1 – 0,22; 2 – 0,36; 3 – 0,55; 4 – 0,73

По результатам измерений проведен расчет удельной мощности разряда $P_{уд}$, выделяемой в единице объема межэлектродного пространства полого катода (рис. 5). Анализ полученных результатов показал, что с увеличением отношения радиусов цилиндров катода мощность $P_{уд}$ возрастает

ет. Крутизна зависимости $P_{уд}(U)$ определяется отношением радиусов электродов r/R . При отношении $r/R = 0,73$ достигается наибольшее значение крутизны $P_{уд}(U)$. Зондовые исследования показывают, что удельную мощность разряда ($P_{уд}$) можно использовать в качестве показателя степени ионизации газа. Анализ зависимости максимально достигаемых удельных мощностей разряда $P_{уд\ max}$ от отношения радиусов электродов r/R (рис. 6) показал, что существует оптимальное отношение радиусов электродов, при котором достигается наибольшая степень ионизации газа в разрядном промежутке. Это оптимальное отношение r/R равно 0,55.

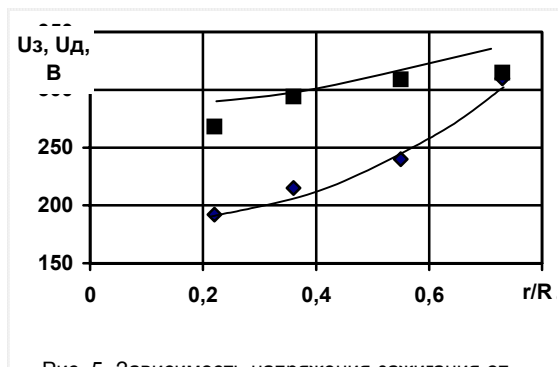


Рис. 5. Зависимость напряжения зажигания от отношения радиусов цилиндров катода

Шипко Михаил Николаевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики,
телефон (4932) 26-99-27,
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

Воробьев Виктор Федорович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
телефон (4932) 26-97-28,
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

Беляев Георгий Владимирович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики
телефон (4932) 26-97-28,
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

Крайков Алексей Николаевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
студент,
телефон (4932) 26-99-23,
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

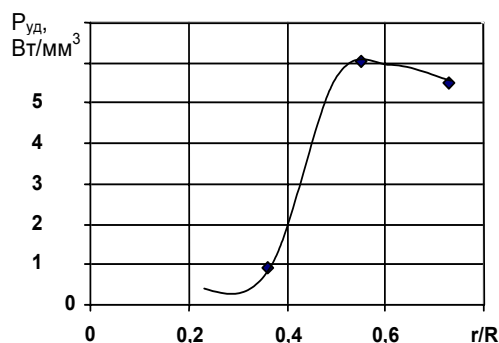


Рис. 6. Зависимость удельной мощности разряда $P_{уд}$, выделяемой в единице объема межэлектродного пространства полого катода, от отношения радиусов электродов r/R

Таким образом, в ходе исследований было показано, что электродная система с полым катодом позволяет эффективно ионизировать газ в разрядном промежутке. При этом степень ионизации зависит от конфигурации катода. При использовании катода в виде коаксиальных цилиндров максимальная степень ионизации достигается при отношении радиусов цилиндров, примерно равном 0,55.

Список литературы

1. Воробьев В.Ф., Ильин Н.В., Шипко М.Н. Повышение коррозионной стойкости постоянных магнитов в устройствах магнитожидкостных уплотнений // Вестник машиностроения. – 2002. – №1. – С. 20–23.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.