

Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.384.5:537.523.9

А.И. Кузьмичёв, канд.техн.наук, **Р.Ю. Чаплинский**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
проспект Победы, 37, город Киев, 03056, Украина.

Плазменные системы высокого давления с микроструктурированными электродами. Часть 2.

Конструкции микроструктурированных электродных систем для генерации нетермической неравновесной плазмы при атмосферном давлении

В работе описаны конструктивные особенности микроструктурированных электродных систем, таких как: система для генерации мультикоронного разряда, система в виде пчелиных сот, система с пилообразным электродом и система для генерации компланарного барьерного разряда, система для генерации капиллярного разряда, система для генерации микроструктурированного полокатодного разряда, система для генерации плазменного потока при атмосферном давлении и система с плазменными электродами. В работе также рассмотрено ряд перспективных областей применения таких систем. Библ. 25, рис. 9, табл. 1.

Ключевые слова: нетермическая неравновесная плазма, атмосферное давление, микроструктурированные электроды, электродные системы, применение газовых разрядов.

Введение

В первой части данной работы [22] проведён обзор физических особенностей генерации нетермической неравновесной плазмы (ННП) при атмосферном давлении, в результате которого

установлено, что предпочтительным является получение такой плазмы в газоразрядных системах с микроструктурированными электродами. В данной части работы будет проведён обзор подобных систем с целью определить конструкцию электродной системы, наиболее подходящую для генерации ННП при атмосферном давлении.

При атмосферном давлении генерацию ННП можно осуществлять в таких газовых разрядах, как: коронный, барьерный, тлеющий разряд атмосферного давления (в англоязычной литературе – One Atmospheric Uniform Glow Discharge Plasma или OAUGDP), капиллярный разряд, полокатодный разряд атмосферного давления (в англоязычной литературе – Atmospheric Pressure Hollow Cathode Discharge или APHCD), а также в электродном и безэлектродном высокочастотном ёмкостном разряде [3]. Основные характеристики этих разрядов приведены в табл. 1. Дальнейшая классификация микроструктурированных электродных систем для генерации нетермической неравновесной плазмы при атмосферном давлении будет основана на этих разновидностях газового разряда.

Таблица 1. Основные характеристики разрядов для генерации ННП при повышенном давлении

		Вид питающего напряжения	Uв (кВ)	I (А)	f(кГц)	d(мм)	Особенности
Коронный разряд	Безстримерный	DC	1-100	10^{-10} - 10^{-3}		10 - 10^3	–
	Стриммерный	DC, PC	5-200	10^{-5} - 10^{-2}	10		F
Барьерный разряд	Объемный	AC, PC	1-20	10^{-3} - 10^{-1}	5×10^{-2} - 2×10^1	0,1-1	F
	Поверхностный	AC, PC		10^{-2} - 10^0		1-10	F
OAUGDP		AC, PC	1-5	10^{-3} - 5×10^{-2}	$0,2 \times 10^2$	1-20	G
Капиллярный разряд		AC	20	0,1-1	–	0,1-1	H
APHCD		DC	0,2-0,5	$< 10^{-3}$	–	0,05-0,1	G
Ёмкостный ВЧ разряд	Электродный	AC	0,1-0,5	4×10^{-2} -0,5	6×10^3 - 1×10^5	0,1-2	L, G
	Безэлектродный	AC	0,3-1,0	4×10^{-2} - 10^0	6×10^3 - 1×10^5	0,1-2	L, G

G – гомогенная плазменная область; F – нитеобразная структура; L – существует в слаботочном (α – режим) и сильноточном режимах (γ – режиме). Плазма разряда отделена от электродов слоем положительного пространственного заряда; H – состоит из конусообразных вихрей с вершиной у капиллярного отверстия; DC, AC, PC – постоянное, переменное и импульсное питающие напряжения, соответственно, f – диапазон частот питающего напряжения.

Далее в работе будут рассмотрены конструктивные особенности микроструктурированных электродных систем для генерации вышеперечисленных разрядов.

1. Микроструктурированные электродные системы для генерации коронного разряда

Коронный разряд возникает в разрядном промежутке в виде светящегося плазменного ореола (“короны”) вокруг электрода с наибольшей величиной электрического поля. Выделяют коронный разряд с положительной короной (коронирующий электрод – анод), отрицательной короной (коронирующий электрод – катод) и биполярный коронный разряд.

Лимитирующим фактором для генерации ННП при атмосферном давлении в коронном разряде является малый объем области, где электрическое поле достаточно для поддержания разряда. С целью увеличения суммарного объема коронирующих слоёв применяют электродные системы типа “ряды иглы-плоскость”, “провод с иглами-плоскость” и т.д. Такие электродные системы можно назвать системами с мультикоронным разрядом. Несколько примеров таких систем представлены на рис. 1.

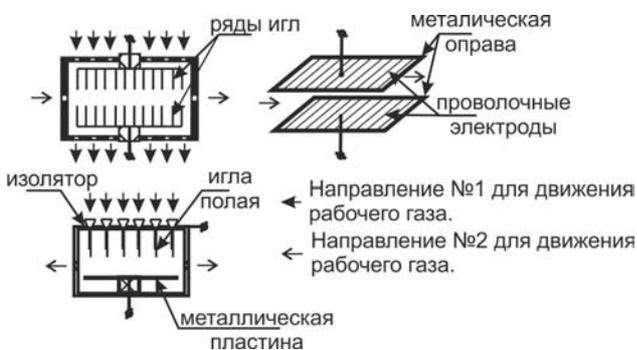


Рис. 1. Электродные системы для генерации мультикоронного разряда. Стрелками обозначены возможные пути протока рабочего газа [21]

При малом токе разряда на отдельное острие его вольт-амперная характеристика (ВАХ) обычно имеет положительный наклон [21], что допускает параллельное устойчивое существование разрядов на многих остриях без индивидуальных балластных сопротивлений, как это показано на рис. 1. Однако с повышением тока ВАХ становится пологой и нарушается устойчивость параллельного существования разрядов. Для предотвращения срыва разряда в термическую форму напряжение подают на каждое острие через отдельный балластный резистор.

Для упрощения системы питания можно применять интегральный балластный резистор в виде пластины из слабо легированного кремния, на который наложено множество коронирующих электродов. Благодаря этому на меньшей площади можно расположить большое количество игольчатых электродов и получить более однородную плазму. Также применяют жидкостной электролитический интегральный балластный резистор, такой подход одновременно позволяет охлаждать и ограничить ток каждого электрода [2].

Повышение напряжения на электродах и тока коронного разряда приводит к возникновению стримерного коронного разряда. Это крайне неоднородная форма коронного разряда, которая состоит из тонких плазменных каналов (стримеров), случайным образом распределённых в межэлектродном промежутке и сходящихся к электроду с наибольшей неоднородностью электрического поля. Такой разряд при постоянном напряжении питания быстро трансформируется в разряд с термической плазмой. Поэтому чаще всего стримерный коронный разряд получают в системах с импульсным питанием.

2. Микроструктурированные электродные системы для генерации объёмного и поверхностного барьерного разряда

Барьерный разряд возникает в электродной системе, где один или оба электрода покрыты слоем диэлектрика. Такой разряд возникает исключительно при переменном или импульсном напряжении питания. Он состоит из нитеобразных (филаментарных) микрозарядов, относительно равномерно заполняющих разрядный промежуток [24].

К микроструктурированным электродным системам для генерации барьерного разряда

относятся: аналоги систем мультикоронного разряда – система “ряды игл-плоскость”, система с пилообразным электродом, компланарные системы, электродная система в виде пчелиных сот.

Система “ряды игл-плоскость” отличается от аналогичной системы для генерации коронного разряда наличием диэлектрического барьера на поверхности плоского электрода. Диэлектрический барьер чаще всего представляет собой пластину из кварцевого стекла или керамики, полностью покрывающую электрод. Эта электродная система позволяет получать барьерный разряд, состоящий из нитеобразных микро-разрядов. В такой электродной системе переход к термическим разрядам ограничен распределённым ёмкостным балластным сопротивлением, в виде диэлектрического барьера.

Компланарные системы для генерации объёмного и поверхностного барьерного разрядов представляют систему тонкоплёночных электродов нанесённых на поверхность или внедрённых во внутрь диэлектрической пластины. Саму пластину чаще всего изготавливают из керамики. Толщина диэлектрической пластины составляет от 10^{-2} до 1 мм. Материалами электродов могут быть Al, Au, Pt, Cu, Cr, Ni-Cr, но из-за сильной термической нагрузки их целесообразно изготавливать из тугоплавких металлов. Их толщина составляет от десятых долей до сотен микрометров. Несколько разновидностей этих систем показаны на рис. 2. В таких электродных системах получают тонкий, толщиной до миллиметра, лист ННП, ограниченный площадью электродной системы. Благодаря распределению разряда по большой поверхности такая компланарная геометрия электродной системы эффективна для генерации озона и низкотемпературной плазмохимии, нежели система электродов для генерации объёмного барьерного разряда.

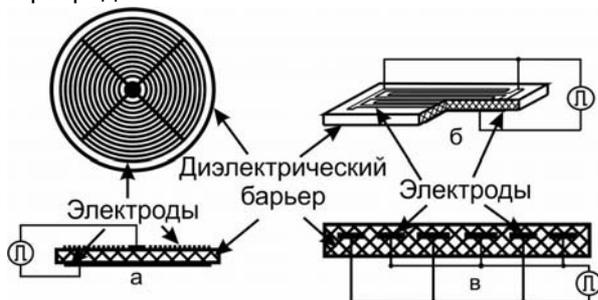


Рис. 2. Электродные системы компланарной геометрии для генерации объёмного и поверхностного барьерных разрядов: а – круглой геометрии, б – с электродами на поверхности и в – внутри диэлектрического барьера [5]

Оригинальной конструкцией является электродная система воздушного фильтра, описанная в [8]. Конструкция напоминает систему пчелиных сот. Она представляет собой цельный, пористый карбид-кремниевый электрод (диаметр пор 70 мкм) с продольными отверстиями (рис. 3). Его проводимость задавалась степенью легирования SiC. Вторым, высокопотенциальным электродом этой системы выступает провод покрытый слоем Al_2O_3 , расположенный внутри каждого продольного отверстия. Геометрия сот может быть различной (рис. 3 б).

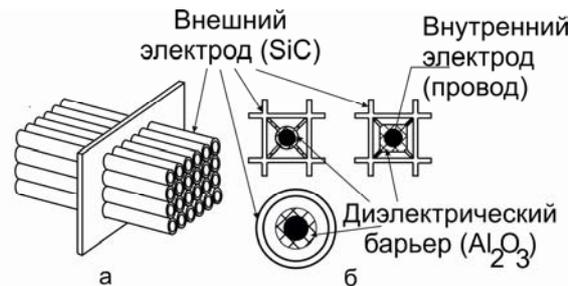


Рис. 3. Электродная система в виде пчелиных сот. а – общий вид системы, б – различные конфигурации поперечного сечения каждой соты [8]

В электродной системе, изображенной на рис. 4, поверхность высоковольтного электрода выполнена в виде пилообразных продольных выступов.



Рис. 4. Электродная система с пилообразным электродом [17]

При наличии зазора между остриями зубцов и поверхностью диэлектрического барьера, в такой электродной системе образуется объёмный барьерный разряд. При отсутствии зазора между остриями зубцов и поверхностью диэлектрической пластины между остриями высоковольтного электрода возникает поверхностный барьерный разряд, а объёмный барьерный разряд в промежутке между дном продольной канавки и диэлектриком. При этом, увеличение глубины канавок ведёт к увеличению напряжения поддержания разряда, а уменьшение – к увеличению вкладываемой в разряд мощности за счёт увеличения тока [17].

3. Микроструктурированные электродные системы для генерации капиллярного разряда

Наличие микроструктурированных капиллярных отверстий расположенных в поперек разрядного промежутка в одном или обоих диэлектрических барьерах основная особенность этой электродной системы. При частоте питающего напряжения ниже критической и соблюдении прочих условий (амплитуды питающего напряжения и длины разрядного промежутка), в такой системе генерируется классический объёмный барьерный разряд. Если частота приложенного к электродам напряжения превышает граничную величину, зависящую от L/D , где L и D – длина и диаметр капиллярных отверстий, то между капиллярными отверстиями и противоположным электродом образуются конусообразные плазменные области с повышенной степенью ионизации газа и плотностью электронов около 10^{12} см^{-3} [7]. Перфорация одного диэлектрического барьера ведёт к возникновению капиллярного разряда на протяжении лишь одного полупериода питающего напряжения. В системе с перфорированными диэлектрическими барьерами на обоих электродах капиллярный разряд возникает в оба полупериода питающего напряжения. Это несомненное преимущество по сравнению с классическим барьерным разрядом, длительность которого не превышает 10-20 нс за полупериод в не зависимости от частоты питающего напряжения.

4. Системы для генерации микроструктурированного полукатодного разряда

Полокато́дный разряд имеет такую же структуру, что и тлеющий разряд атмосферного давления, но за счёт цилиндрической геометрии катода электроны в нём движутся по колебательным траекториям, отражаясь от противоположных участков катодной поверхности.

В результате такого движения электрон на пути к аноду совершает много столкновений с молекулами и атомами газа, поэтому степень ионизации газа в полукатодном разряде выше, чем в тлеющем разряде плоско-параллельной геометрии. Очевидно, что для эффективной генерации такого разряда нужно, чтобы диаметр полости катода не превышал длины свободного пробега электрона. Поэтому для реализации полукатодного разряда при атмосферном давлении надо уменьшить диаметр полости катода до 200-700 мкм.

Для генерации существенного объёма ННП необходимо одновременно применять множество подобных электродных систем. Впервые такая конструкция описана в [14], где была представлена микроструктурированная электродная система, состоящая из тонкой диэлектрической пластины (толщиной ~ 250 мкм), и покрытая с обеих сторон слоем металлической фольги с микроразмерными отверстиями по всей площади пластины. Генерацию стабильного полукатодного разряда лучше всего осуществлять при импульсном питании из-за большой вероятности возникновения перегревно-ионизационной неустойчивости. При питании постоянным или низкочастотным переменным напряжением в отверстиях образуется цилиндрический столб термической плазмы, что чревато повреждением электродов системы.

5. Электродные системы для генерации плазменного потока при атмосферном давлении

На рис. 5 изображена электродная система для генерации потока ННП при атмосферном давлении. В англоязычной литературе такие электродные системы называют Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ). Она состоит из двух, чаще всего цилиндрических электродов, через которые продувается рабочий газ (Ar, He, O₂ и т.п.). Основным преимуществом такой конструкции является низкая величина напряжения поддержания разряда и большая концентрация активных частиц [13]. Низкая величина напряжения (сотни вольт) поддержания разряда достигается за счёт сочетания ВЧ напряжения питания, небольшой длины разрядного промежутка и неоднородного распределения электрического поля в цилиндрической геометрии.

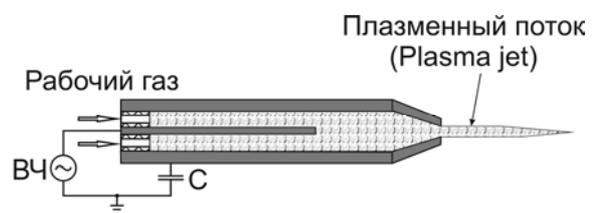


Рис. 5. Электродная система генерации плазменной струи [13]

Плазменный поток в такой системе генерируется за счёт продувки разрядного промежутка рабочим газом и неоднородного распределения напряжённости поля снаружи реактора, достаточной для генерации активных частиц лишь вблизи сопла. Плотность заряженных частиц в такой плазме достигает 10^{11} - 10^{12} м^{-3} , что на несколько порядков меньше аналогичных показате-

телей остальных микроструктурированных электродных систем. Также не велика и температура электронов в такой плазме (1-2 эВ). Это обусловлено преобладанием рекомбинационных явлений в выходящем плазменном потоке. На рис. 8 показана цилиндрическая геометрия электродной системы без диэлектрических барьеров. Эта конструкция имеет ряд недостатков, например: контакт плазмы разряд с металлическими поверхностями повышает вероятность перехода разряда в термические формы и способствует распылению электродов. Введение диэлектрических барьеров в разрядный промежуток устраняет эти недостатки. Но для некоторых применений такая конструкция не годится из-за малого поперечного сечения плазменного потока.

Этого недостатка лишены системы с плоскопараллельной геометрией, в которых электроды – плоские параллельные пластины покрытые слоем диэлектрика [19]. Напряжение поддержания разряда в таких системах несколько выше, чем в цилиндрических, из-за однородного распределения электрического поля в разрядном промежутке и падения напряжения на диэлектрических барьерах. Продувка таких систем способствует созданию однородного листа ННП длиной до полусантиметра.

Чаще всего плазму в таких системах получают при помощи ВЧ разряда на частоте 13,56 МГц или 27,12 МГц, хотя известны конструкции с НЧ барьерным и поверхностным барьерным разрядами. С помощью таких электродных систем получают большие концентрации химически активных частиц, например, возбуждённый, метастабильный и атомарный кислород. Вдобавок к малой величине напряжения возникновения, это делает такие системы подходящими для применения в различных областях медицины, науки и техники.

6. Трёхэлектродные системы для генерации нетермической неравновесной плазмы при атмосферном давлении

Для промышленного применения ННП при атмосферном давлении необходимо обеспечить получение большого объёма однородной плазмы при как можно меньших величинах напряжений возникновения и поддержания разряда. С учётом этих требований описанные выше электродные системы имеют ряд недостатков. Коронный разряд хоть и широко применяется в промышленности, но генерирует относительно малый объём неравновесной плазмы. ННП в системах на основе НЧ барьерного разряда

имеет микроструктуру с квазистохастическим, заполнением разрядного промежутка, а это, как и плазма, полученная в капиллярных системах и системах с микроструктурированным полукатодным разрядом, не обеспечивает высокую однородность. Однородный плазменный объём можно получать в системах с тлеющим разрядом атмосферного давления (ОАУГД), однако его генерация возможна лишь в определённых газах, величине вторичной эмиссии с электродов, производной $\frac{\partial \alpha}{\partial (E/n)}$ и при определённом

питании. А плазменный лист, который получают в плоско-параллельных системах для генерации плазменного потока, имеет малую длину и ширину.



Рис. 6. Электродная система с инициирующим электродом [6]

Удовлетворить вышеперечисленным требованиям могут трёхэлектродные системы с плазменными электродами. В основе этих систем лежит идея понижения напряжения возникновения и гомогенизации разряда, часто применяемая в газоразрядной лазерной технике. Эта идея состоит в инициации основного разряда кратковременным вспомогательным разрядом с меньшей длиной разрядного промежутка. Пример такой электродной системы изображён на рис. 6.

Для генерации большого объёма ННП, можно, в качестве одного из электродов применять копланарную электродную систему или системы для генерации объёмного и поверхностного барьерного разрядов, либо систему микроструктурированного полукатодного разряда, а также систему для генерации плазменного потока [19]. В качестве противоположного электрода, можно, применять как плоскопараллельную металлическую пластину, так и электрод, покрытый слоем диэлектрика. В случае применения системы для генерации плазменного потока в качестве плазменного электрода, третий электрод способствует выходу разряда наружу реактора за счёт увеличения напряжённости электрического поля в области плазменного потока. Не-

достатками таких систем является сложность конструкции системы питания, также велика вероятность возникновения плазменных нестабильностей в пограничных областях.

7. Применение микроструктурированных электродных систем для генерации нетермической неравновесной плазмы атмосферного давления

Сегодня ННП при высоком давлении широко применяется для генерации озона и в процессах полимеризации [24], энергетике (в топках теплоэлектростанций) для предварительной ионизации газа в мощных плазматронах, плазмохимии, для очистки поверхностей и электрофильтрации пылевых загрязнений. Но чаще всего применяется ННП низкого давления. К примеру, в производстве микро- и наноэлектронных изделий как минимум 30% всех технологических операций производится при помощи разрядов с ННП низкого давления [20]. Часть этих процессов можно заменить процессами с микроструктурированными электродами при давлении порядка атмосферного. Стоит также отметить, что кроме этого микроструктурированные электродные системы для генерации ННП находят большое количество новых и не менее значимых применений. К ним можно отнести:

- генерацию активной среды в мощной лазерной технике [18];
- создание на их основе эксимерных источников света [16];
- медицинской стерилизацию и биологическую деконтаминацию [4];
- электро-фильтрацию газовых пылевых загрязнений, очистку (озонирование) сточных вод и т.п. [12].

Микроструктурированные электродные системы применяются в технике отображения информации [15]. Например, современные плазменные панели созданы на основе копланарной геометрии микроструктурированной электродной системы для генерации барьерного разряда. Ввиду повышенной степени ионизации ННП в капиллярных разрядах, интенсивность излучения областей с конусообразной плазменной струей также выше, и поэтому этот эффект можно применить для повышения световых характеристик современных плазменных панелей [9]. Микроструктурированные электродные системы также можно применять в качестве ключевых элементов адресации в жидкокристаллических и светодиодных дисплеях как замена тон-

коплённых транзисторных структур ввиду сложности изготовления последних.

Важную роль ННП при высоком давлении может играть в экологии, в частности, очистке выхлопных газов дизельных двигателей, конвертации промышленных отходов, содержащих NO_x , SO_x , CO газы, а также очистке питьевых и сточных вод [10].

Рот (J.C. Roth) с сотрудниками провели ряд исследований, по изучению влияния ННП на аэродинамические характеристики летательных аппаратов на дозвуковой скорости и получили результаты, которые говорят о возможности изменять подъёмную силу и сопротивление воздуху летательного аппарата при помощи ННП, распределённой по его фюзеляжу [11].

Выводы

В результате анализа физических особенностей генерации ННП при атмосферном давлении установлено, что выгоднее всего получать такую плазму в системах с размерами электродов или длиной разрядного промежутка не больше 1 мм. В результате обзора разновидностей разрядов и конструкций электродных систем, в которых целесообразно получать такую плазму, установлено, что системы с плазменными электродами наилучшим образом подходят для этих целей, благодаря возможности получения однородной ННП при атмосферном давлении в относительно большом объёме. В качестве плазменного электрода целесообразно применять барьерный высокочастотный разряд из-за относительно малого напряжения возникновения, эффективного энерговклада и отсутствия загрязнения плазмы разряда материалом металлических электродов.

Анализ опубликованных данных в научнотехнической литературе показывает, что кроме замены разрядов низкого давления ННП атмосферного давления может применяться в качестве ключевых элементов адресации в ЖК дисплеях, для нейтрализации выхлопных газов, в аэродинамике и многих других областях науки и техники. Таким образом, было показано, что поиск альтернативных применений ННП при атмосферном давлении может быть перспективной областью дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Akishev Yu.S., Aponin G.I., Karal'nik V.B., Monich A.E., Trushkin N.I. Phenomenology of a high-current negative point-to-plane corona in nitrogen // Plasma Physics Reports. - 2004. - Vol. 30. - № 9. - Pp. 779-787.

2. *Antoniuk D.M., Seguin H.J.J., Capjack C.E.* Electrode design for a magnetically stabilized glow discharge // *Appl. Phys. B.* - 1984. - Vol. 35. - Pp. 155-162.
3. *Becker K. H., Kogelschatz U., Barker R. J. and Schoenbach K. H.* Non equilibrium air plasma at atmospheric pressure. - London: IOP Publishing, 2004. - Pp. 682.
4. *Fridman A.* Plasma Chemistry. - New York: Cambridge University Press, 2008. - 978 p.
5. *Jodzis S., Smoliński T., Sówka P.* Ozone Synthesis Under Surface Discharges in Oxygen: Application of a Concentric Actuator // *IEEE Trans. Plasma Sci.* - 2011. - Vol. 39, №. 4. - Pp. 1055-1060.
6. *Kaneda S., Hayashi N., Ihara S., Satoh S., Yamabe C.* Application of dielectric material to double-discharge-type ozonizer. - Vol. 73. - Pp. 567-571.
7. *Kunhardt E.E.* Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas // *IEEE Trans. Plasma Sci.* - 2000. - Vol. 28. - № 1. - P.189-200.
8. *Muller S., Conrads J., Best W.* Reactor for decomposing soot and other harmful substances contained in flue gas // *Proc. of Int. Symp. High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Hakone VII).* - 2000. - Vol. 2. - Pp 340-344.
9. *Park Soo-Ho, Cho Tae-Seung, Becker Kurt H., Kunhardt Erich E.* Capillary plasma electrode discharge as an intense and efficient source of vacuum ultraviolet radiation for plasma display // *IEEE Trans. Plasma Sci.* - 2009. - Vol. 37. - № 8, Pp.1611-1614.
10. *Penetrante B.M., Brusasco R. M., Merritt B. T., Vogtlin G. E.* Environmental application of low temperature plasmas // *Pure Appl. Chem.* - 1999. - Vol. 71. - № 10. - Pp. 1829-1835.
11. *Roth J.C.* Prospective industrial applications of the one atmosphere uniform glow discharge plasma // 39th IAS Annual Meeting of Industry Applications Conference. - 2004.
12. *Rutgers W. R., van Velthaizen E.M.* Pulsed corona discharge for gas and waste water treatment // *Proc. Int. Conf. HAKONE VII.* - 2000. - Vol. 2. - Pp. 335-339.
13. *Schütze A., Jeong J.Y., Babayan S.E., Park J., Selwyn G.S., Hicks R.F.* The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources // *IEEE Trans. Plasma Sci.* - 1998. - Vol. 26. - № 6. - Pp. 1685-1695.
14. *Schoenbach K.H., EL-Habachi A., Shi W. Ciocca M.* High-pressure hollow cathode discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* - 1997. - Vol. 6. - Pp. 468-477.
15. *Sobel A.* Plasma Displays // *IEEE Trans. Plasma Sci.* - 1991. - Vol. 19. - № 6. - Pp.1032-1047.
16. *Wieneke S., Viol W.* Gas lasers excited by silent discharge. - *Proc. Int. Conf. HAKONE VII.* - 2000. - Vol.1. - Pp. 8-12.
17. *Yamada M., Ehara Y., Ito T.* The influence of saw tooth-shaped electrode form on NOx treatment by trenced type discharge reactor // *Papers of Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan.* - 1999. - Vol. ED-99. - Pp. 94-108.
18. *Zvereva G.* Investigation of Kr gas discharge plasma as a possible laser medium // *Proc. Int. Conf. HAKONE IX.* - 2002.
19. Заявка на патент Украины № u201307319.
20. *Киреев В.Ю.* Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. / В.Ю. Киреев, Б.С. Данилин, В.И. Кузнецов. - М: Радио и связь, 1983. - 128 ст.
21. *Крижанівський В.І.* Плазмові реактори для генерації озону на коронному розряді з вторинними емітерами електронів / В.І. Крижанівський, А.І. Кузьмичев, Р.Ю. Чаплинський // *Наукові вісті НТУУ«КПІ».* - 2010. - № 5. - С. 5-9.
22. *Кузьмичёв А.И., Чаплинский Р.Ю.* Плазменные системы высокого давления с микроструктурированными электродами. Часть первая. Физические основы генерации нетермической плазмы при атмосферном давлении / А.И. Кузьмичёв, Р.Ю. Чаплинский // *Электроника и связь.* - 2014. - № 3. - С. 5-9.
23. *Лёб Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах. / Л. Лёб. - М. - Л.: Государственное издательство теоретико-технической литературы, 1950. - 672с.
24. *Самойлович В.Г.* Физическая химия барьерного разряда. / В.Г. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. - М.: Изд. МГУ, 1989. - 176с.
25. *Филиппов Ю.В.* Электросинтез озона. / Ю.В. Филиппов, В.А. Вобликова, В.И. Пантелеев. - МГУ им. М. В. Ломоносова. - М.: Изд. МГУ, 1987.

Поступила в редакцию 02 апреля 2014 г.

УДК 621.384.5:537.523.9

А.І. Кузьмичев, канд. техн. наук, **Р.Ю. Чаплинський**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
проспект Перемоги, 37, місто Київ, 03056, Україна.

Плазмові системи високого тиску з мікроструктурованими електродами. Частина 2. Конструкції мікроструктурованих електродних систем для генерації нетермічної нерівноважної плазми при атмосферному тиску

В роботі описані конструктивні особливості мікроструктурованих електродних систем, таких як: система для генерації мультикоронного розряду, система у вигляді бджолиних сот, система з пилкоподібним електродом і система для генерації компланарного бар'єрного розряду, система для генерації капілярного розряду, система для генерації мікроструктурованого полокатодного розряду, система для генерації плазмового потоку при атмосферному тиску і система з плазмовими електродами. У роботі також розглянуто ряд перспективних областей застосування таких систем. Бібл. 25, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: нетермічна нерівноважна плазма, атмосферний тиск, мікроструктуровані електроди, електродні системи, застосування газових розрядів.

UDC 621.384.5:537.523.9

A.I. Kuzmichev, Ph.D., **R.Y. Chaplinskiy**

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",
Prospect Peremohy, 37, Kiev-56, 03056, Ukraine.

High-pressure plasma system with microstructured electrodes. Part 2. Design of microstructured electrode systems for the generation of non-thermal equilibrium plasma at atmospheric pressure

This paper is describe the design and features of microstructured electrode systems, such as: a system for generating multicorona discharge, system in the form of a honeycomb, a sawtooth electrode system and a system for generating a coplanar barrier discharge, a system for generating a capillary discharge, a system for generating microstructured hollow cathode discharge, system for generating a plasma flow under atmospheric pressure and a systems with plasma electrodes. The paper is also discuss a potential applications of such systems. References 25, figures 9, Table 1.

Keywords: non-thermal nonequilibrium plasma, atmospheric pressure, microstructured electrodes, electrode systems, application of gas discharges.

References

1. Akishev Yu.S., Aponin G.I., Karal'nik V.B., Monich A.E., Trushkin N.I. (2004), "Phenomenology of a high-current negative point-to-plane corona in nitrogen". Plasma Physics Reports. Vol. 30, no. 9, pp. 779-787.
2. Antoniuk D.M., Seguin H.J.J., Capjack C.E. (1984), "Electrode design for a magnetically stabilized glow discharge". Appl. Phys. B. Vol. 35, pp 155-162.
3. Becker K. H., Kogelschatz U., Barker R. J. and Schoenbach K. H. (2004), "Non equilibrium air plasma at atmospheric pressure". London, IOP Publishing. P. 682.
4. Fridman A. (2008), "Plasma Chemistry". New York: Cambridge University Press. P 978.
5. Jodzis S., Smoliński T., Sówka P. (2011), "Ozone Synthesis Under Surface Discharges in Oxygen: Application of a Concentric Actuator". IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 39, no. 4, pp. 1055-1060.

6. *Kaneda S., Hayashi N., Ihara S., Satoh S., Yamabe C.* (2004), "Application of dielectric material to double-discharge-type ozonizer". *Vacuum*. Vol. 73, pp. 567-571.
7. *Kunhardt E.E.* (2000), "Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas". *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vol. 28, no. 1, pp.189-200.
8. *Muller S., Conrads J., Best W.* (2000), "Reactor for decomposing soot and other harmful substances contained in flue gas". *Proc. of Int. Symp. High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Hakone VII)*. Vol. 2, pp 340-344.
9. *Park Soo-Ho, Cho Tae-Seung, Becker Kurt H., Kunhardt Erich E.* (2009), "Capillary plasma electrode discharge as an intense and efficient source of vacuum ultraviolet radiation for plasma display". *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vol. 37, no. 8, pp.1611-1614.
10. *Penetrante B.M., Brusasco R. M., Merritt B. T., Vogtlin G. E.* (1999), "Environmental application of low temperature plasmas". *Pure Appl. Chem.* Vol. 71, № 10, pp. 1829-1835.
11. *Roth J.C.* (2004) "Prospective industrial applications of the one atmosphere uniform glow discharge plasma". 39th IAS Annual Meeting of Industry Applications Conference.
12. *Rutgers W. R., van Velthuis E.M.* (2000), "Pulsed corona discharge for gas and waste water treatment". *Proc. Int. Conf. HAKONE VII*. Vol. 2, pp. 335-339.
13. *Schütze A., Jeong J.Y., Babayan S.E., Park J., Selwyn G.S., Hicks R.F.* (1998), "The Atmospheric Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources". *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vol. 26, no. 6, pp. 1685-1695.
14. *Schoenbach K.H., EL-Habachi A., Shi W. Ciocca M.* (1997), "High-pressure hollow cathode discharges". *Plasma Sources Sci. Technol.* Vol. 6, pp. 468-477.
15. *Sobel A.* (1991), "Plasma Displays". *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vol. 19, no. 6, pp.1032-1047.
16. *Wieneke S., Viol W.* (2000), "Gas lasers excited by silent discharge". *Proc. Int. Conf. HAKONE VII*. Vol.1, pp. 8-12.
17. *Yamada M., Ehara Y., Ito T.* (1999) "The influence of saw tooth-shaped electrode form on NO_x treatment by trenched type discharge reactor". *Papers of Technical Meeting on Electrical Discharges, IEE Japan*. Vol. ED-99, pp. 94-108.
18. *Zvereva G.* (2002) "Investigation of Kr gas discharge plasma as a possible laser medium". *Proc. Int. Conf. HAKONE IX*.
19. Ukrainian Patent № u201307319.
20. *Kireev V.Yu., Danilin B.S., Kuznetsov V.I.* (1983), "Plasma-chemical and ion-chemical etching of microstructures". *Moskva: Radio i sviaz*, P. 128. (Rus)
21. *Kruzshaniivskiy V.I., Kuzmichev A.I., Chaplinskiy R.Yu.* (2010), "Plasma reactors to generate ozone for corona discharge with secondary electron emitters". *Naukovi visti NTUU "KPI"*, no. 5, pp. 5-9. (Ukr)
22. *Kuzmichev A.I., Chaplinsky R.Y.* (2014) "Plasma high-pressure system with microstructured electrodes. Part One. Physical basis of generating non-thermal plasma at atmospheric pressure". *Electronics and Communications*, no 3. (Rus)
23. *Leb L.* (1950), "Basic processes of electrical discharges in gases". *Moskva, Leningrad, Gosudarstvennoe izdatel'stvo teoretiko-tehnicheskoy literatury*. P 672. (Rus)
24. *Samoylovich V.G. Gibalov V.I., Kozlov K.V.* (1989), *Physical chemistry of the barrier discharge*, Moscow, Publishing House MSU. P 176.
25. *Filippov Yu.V., Voblikova V.A., Pantelev V.I.* (1987), "Electrosynthesis of ozone" *Moskva, Izd. MSU*. (Rus)