

04

Исследование особенностей формирования внеэлектродной плазмы высоковольтным газовым разрядом

© В.А. Колпаков,^{1,2} А.И. Колпаков,¹ В.В. Подлипнов^{1,2}

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет (национальный исследовательский университет), 443086 Самара, Россия

e-mail: akolpakov@yandex.ru, kolpakov@ssau.ru

² Институт систем обработки изображений РАН,

443001 Самара, Россия

e-mail: kolpakov@ssau.ru

(Поступило в Редакцию 21 марта 2012 г. В окончательной редакции 6 августа 2012 г.)

Исследованы особенности формирования внеэлектродной плазмы высоковольтным газовым разрядом. Теоретически и экспериментально подтверждено возникновение и самоподдержание высоковольтного газового разряда и формируемых им потоков плазмы на прямолинейных участках силовых линий электрического поля. Показано, что фокусировка газового разряда и формируемых им плазменных потоков обеспечивается увеличением длины прямолинейного участка силовой линии в направлении оси симметрии отверстия в аноде. Установлено, что с повышением мощности разряда (ускоряющего напряжения, подаваемого на электроды газоразрядного прибора) происходит увеличение длины прямолинейных участков силовых линий поля и их сосредоточение в области оси симметрии отверстия в аноде. Даны практические рекомендации по применению внеэлектродной плазмы для микро- и наноразмерного структурирования поверхности материалов.

Введение

Высоковольтный газовый разряд (ВГР) впервые был открыт в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР в 70-х гг. прошлого столетия и успешно применен для сварки и в лазерной технике [1–3]. В 80-х гг. авторы работ [4,5] применили ионно-электронные пучки, формируемые ВГР, для пайки элементов полупроводниковых приборов. С целью расширения спектра областей применения разряда, в 2000-х гг. группой ученых [6–15] активизирован и осуществлен цикл исследований процессов, протекающих в ВГР, формируемой им плазме, а также в области взаимодействия такой плазмы с поверхностью. В результате проведенных исследований авторами перечисленных работ был предложен новый подход к формированию широкоформатных направленных потоков низкотемпературной плазмы вне межэлектродного пространства (внеэлектродной плазмы) и реализован новый класс соответствующих газоразрядных приборов (свободных от недостатков, характерных для современных отечественных и зарубежных аналогов) с целью их применения для изготовления микро- и наноразмерных дифракционных структур на широкоформатных пластинах оптических материалов, что свидетельствует о перспективности данного научного направления.

Указанное подтверждает актуальность настоящей работы, посвященной исследованию особенностей формирования внеэлектродной плазмы высоковольтным газовым разрядом и являющейся логическим продолжением описанного цикла исследований.

Экспериментальная часть. Результаты и обсуждение

Исследования проводились в рабочей камере вакуумной установки с установленным в ней газоразрядным прибором, формирующим внеэлектродную плазму [16]. Конструкция данного прибора позволяет получать значения тока разряда в диапазоне 0–200 мА, а ускоряющего напряжения от 0.3 до 6 кВ. Диаметр электродов выбирается в зависимости от размеров обрабатываемой пластины и может изменяться от 50 до 200 мм и более. В качестве материала катода использовались медь, сплав БрОЦ4-3 и алюминий. Применялись аноды, изготовленные в виде сетки с размером ячейки 1.8×1.8 мм, из проволоки диаметром 0.5 мм, выполненной из нержавеющей стали, что значительно снижает химическую активность материала анода с частицами плазмы и увеличивает его стойкость к температурному нагреву [17]. В качестве рабочих газов использовались кислород, воздух и аргон. Давление в рабочей камере изменялось в диапазоне $10^{-1} - 10^{-2}$ Torr. Исследование состояния поверхности материала катода после длительной работы проводилось с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Carl Zeiss Supra 25 и системы нанолитографии NanoINK DPN System.

Формирование потока внеэлектродной плазмы ВГР возникает за пределами электродного пространства при условии, что электроды располагаются на расстоянии, меньшем темного астонового пространства тлеющего разряда, и при наличии в аноде сквозного отверстия [1,6]. Это приводит к отсутствию ионизации атомов остаточного газа в пространстве между электродами

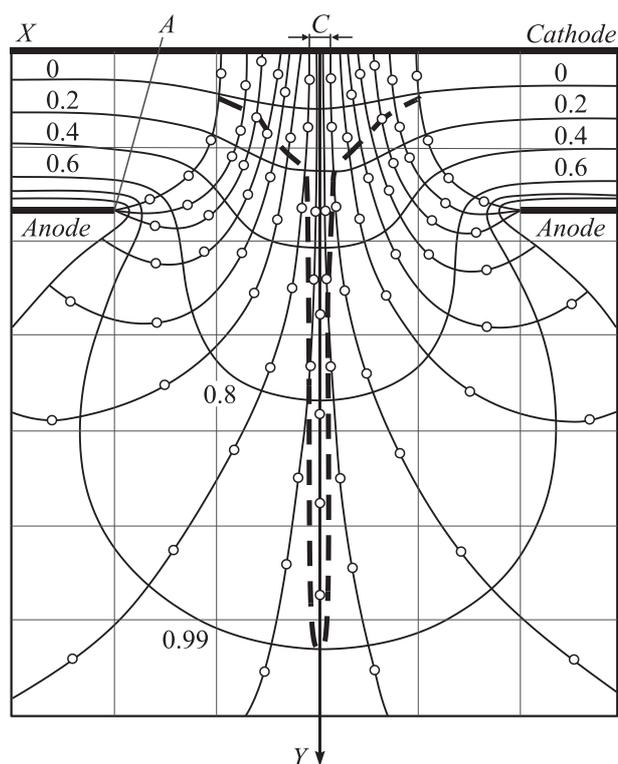


Рис. 1. Распределение электрического поля в области электродов газоразрядного прибора [6].

вне области сквозного отверстия в аноде и распределению электрического поля, вид которого представлен на рис. 1 [6]. Характерной особенностью представленного распределения являются силовые линии, содержащие прямолинейные участки, длина которых изменяется по параболическому закону в области отверстия в аноде. В области края отверстия в аноде *A* (рис. 1) длина прямолинейного участка меньше длины свободного пробега электрона, и процесс ионизации не возникает [1,6]. Ионы, обладая значительно большей по сравнению с электронами массой, непосредственно в момент формирования разряда строго следуют по направлению силовой линии и на длине ее прямолинейного участка набирают максимум энергии [7,15]. Следовательно, ионы, которые осуществляют движение по направлениям силовых линий области края отверстия, характеризующихся малыми длинами прямолинейных участков, не успевают набрать энергию, достаточную для ионизации поверхностных атомов материала катода, и в образовании ВГР не участвуют.

Применение катода, изготовленного из легкоплавкого материала (например, алюминия), приводит к нестабильности газового разряда, объясняемой, по-видимому, неравномерной десорбцией поверхности травления частиц углерода, возникающих в результате ионизации атомов углеродосодержащих рабочих газов, окислов материалов катода и анода, а также к увеличению

количества ионов и электронов в потоке плазмы, что качественно подтверждается кривыми плотности тока электронов (рис. 2, *a*). Использование катода из более тугоплавкого материала (например, меди) позволяет стабилизировать разряд (рис. 2, *b*). Распределение плотности тока электронов стремится в данном случае к гауссовой кривой, и получить равномерное тепловое поле при нагреве образца таким потоком плазмы не представляется возможным. Для устранения недостатка в настоящей работе предложено удалить часть материала катода в центральной зоне *C* (рис. 1) и заменить его материалом (медью), имеющим большую работу выхода электрона.

Подбирая экспериментально работу выхода указанных материалов, можно добиться равномерного распределения плотности тока электронов на некотором участке *D* кривой, представленной на рис. 2, *c*, а следовательно, и равномерного нагрева поверхности образца, геометрические размеры которого меньше размеров участка *D*.

Основой возникновения и самоподдержания ВГР является наличие в формируемой им плазме двух противоположно направленных потоков частиц [10,11]. Первый поток состоит из положительно заряженных ионов, осуществляющих движение в направлении поверхности катода.

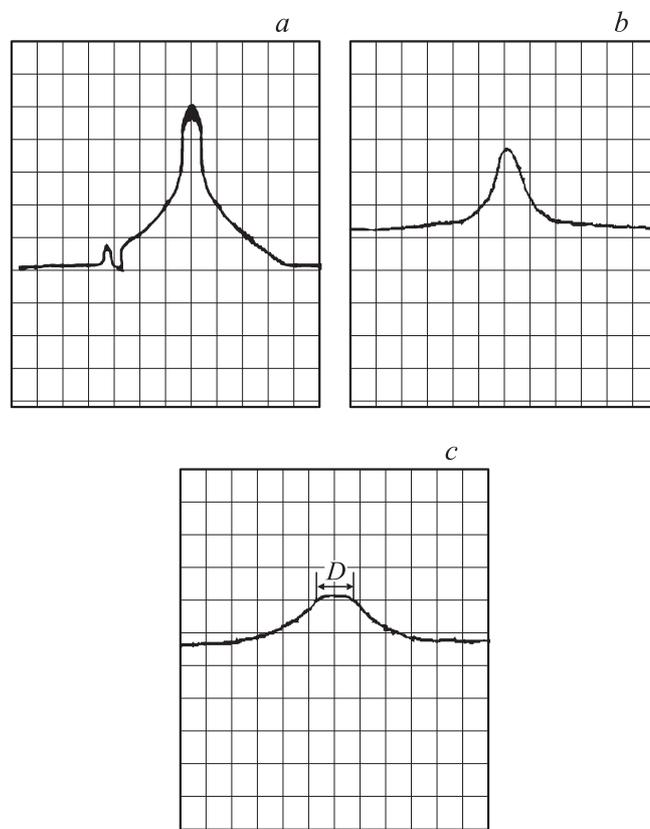


Рис. 2. Кривые плотности тока электронов для: *a* — катода из алюминия, *b* — катода из меди, *c* — катода из алюминия с областью *C* из меди.

Второй поток состоит из отрицательно заряженных ионов и электронов, образующихся за счет ионно-электронной эмиссии и объемной ионизации атомов и молекул рабочего газа электронным ударом [6,17], и направлен в сторону, противоположную направлению движения положительных ионов. Так как отрицательные ионы, так же как и положительные ионы, строго следуют по направлению силовых линий поля, то поверхности образца в процессе его обработки в плазме достигнут только те ионы, длина прямолинейных участков силовых линий которых равна или больше расстояния катод–образец.

Электрон, обладая значительно меньшей массой и большей скоростью по сравнению с ионом, при отклонении силовой линии от прямолинейности „срывается“ с нее и „переходит“ на прямолинейный участок соседней силовой линии поля [1,6]. Если при этом выполняется неравенство $E_e \geq E_i$, где E_e, E_i — энергии электрона и ионизации атома рабочего газа соответственно, то по направлению движения электрона возникают положительные и отрицательные ионы, образующиеся в результате реакций, подробно представленных в [11], и начинающие свое движение по направлению силовой линии к поверхности катода (положительные ионы) либо в противоположную от него сторону (отрицательные ионы).

В ВГР основную роль в ионизации молекул рабочего газа играют объемная ионизация электронным ударом (α -процесс) и ионизация за счет ионно-электронной эмиссии (γ -процесс) [6]. Анализ кривых, представленных на рис. 3, показывает, что полученный результат хорошо согласуется с аналогичными результатами исследований вольт-амперных характеристик и потенциала зажигания разряда, опубликованными в работе [17]. Потенциал зажигания ВГР в большей степени зависит от материала катода в диапазоне давлений $p \leq 6 \cdot 10^{-2}$ Torr. При $p > 6 \cdot 10^{-2}$ Torr потенциал зажигания определяется свойствами рабочего газа (рис. 3). Проведенный анализ хорошо подтверждается и зависимостями, представленными на рис. 4.

При использовании в качестве рабочего газа кислорода, обладающего значительным сродством к электрону, возникает механизм захвата электронов (прилипание). Следовательно, плазма кислорода характеризуется малым содержанием свободных электронов. В диапазоне $4 \leq P \leq 20$ W (кривые 1, 2) поддержание разряда в большей степени обеспечивается за счет α -процесса, так как большинство положительных ионов осуществляют движение по направлениям силовых линий поля с короткими прямолинейными участками, характерными для области края отверстия в аноде, и не успевают набрать энергию, необходимую для ионизации поверхностных атомов материала катода. С повышением мощности разряда (ускоряющего напряжение, подаваемое на электроды газоразрядного прибора) происходит увеличение длины прямолинейных участков силовых линий поля и их сосредоточение в области оси симметрии отверстия

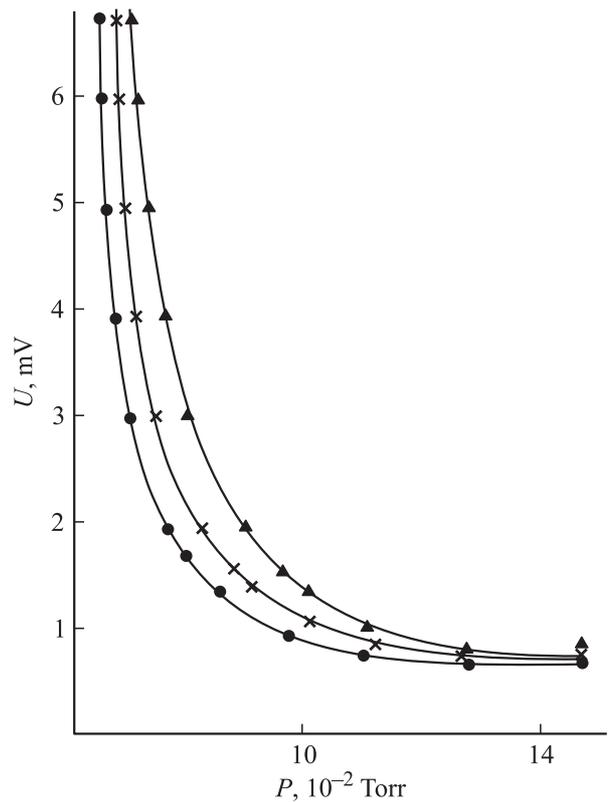


Рис. 3. Зависимость потенциала зажигания ВГР от величины давления в рабочей камере и материала катода газоразрядного прибора (\blacktriangle — медь, \times — сплав БрОЦ4-3, \bullet — алюминий).

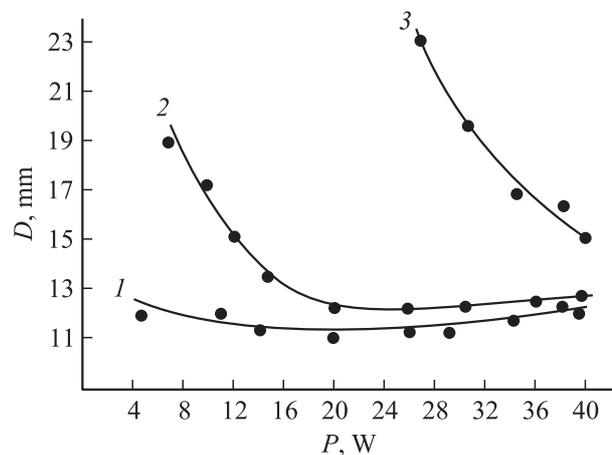


Рис. 4. Зависимость диаметра потока плазмы от мощности газового разряда в среде: 1 — кислорода, 2 — воздуха, 3 — аргона.

в аноде, что соответствует результатам, полученным в работе [1]. Именно данным обстоятельством объясняется уменьшение диаметра потока плазмы в указанном диапазоне значений мощности разряда (для кривых 1, 2) и во всем диапазоне значений P в случае плазмы аргона (кривая 3). При $P > 20$ W (кривые 1, 2) увеличивается концентрация электронов, так как они приобрета-

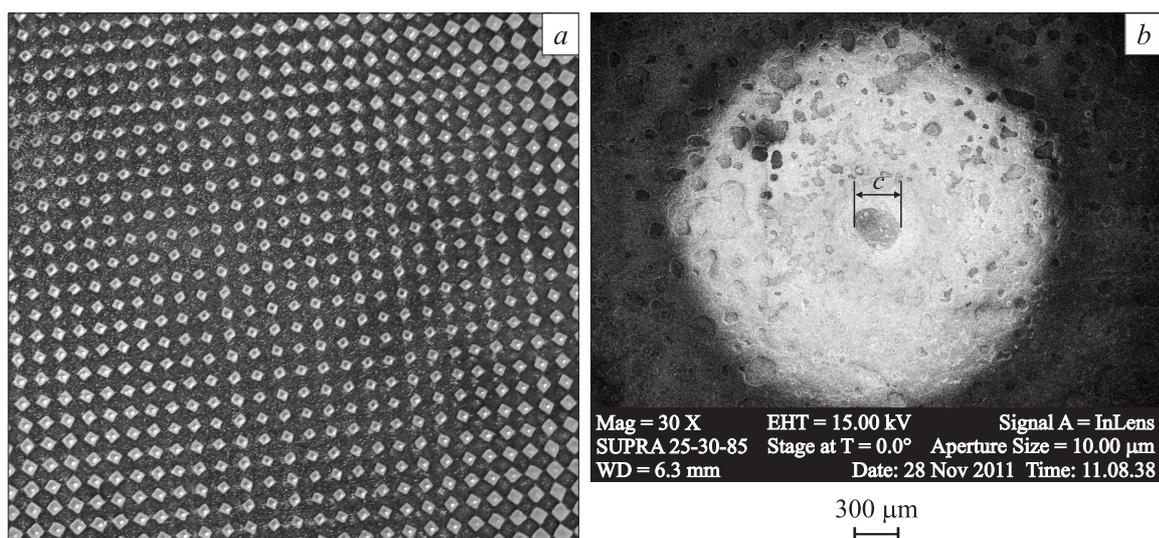


Рис. 5. Поверхность материала катода в области ее взаимодействия с потоком положительно заряженных ионов: *a* — общий вид локальной области катода, *b* — вид поверхности в области ячейки сетки анода.

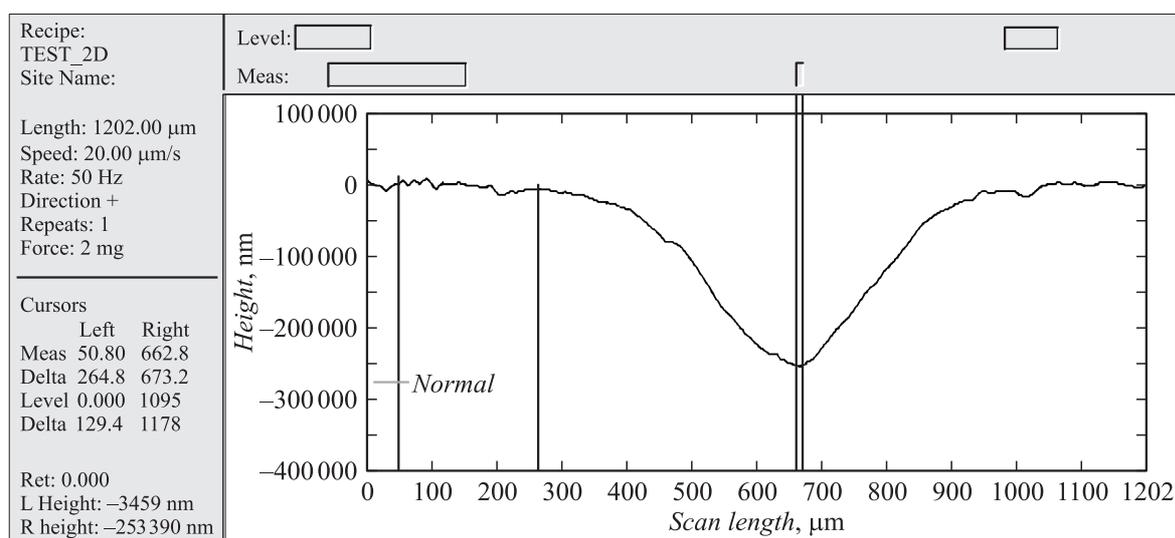


Рис. 6. Профиль ямок травления на поверхности катода, образованных положительными ионами.

ют энергии, при которых коэффициент прилипания α_n стремится к нулю, что подтверждается результатами моделирования и эксперимента, представленного в [10]. Это, в свою очередь, приводит к повышению концентрации положительных ионов, образованных в результате ионизации атомов и молекул рабочего газа электронным ударом и осуществляющих движение по направлениям силовых линий поля с наибольшими значениями длин прямолинейных участков области *C* (рис. 1), приобретая энергию, достаточную для ионизации поверхностных атомов материала катода. Начиная с данного момента поддержание ВГР в значительной мере обеспечивается ионно-электронной эмиссией (γ -процессом), происходит некоторое увеличение диаметра потока плазмы за счет соответствующего увеличения размеров области *C*.

Большие значения диаметра потока в случае плазмы в среде воздуха (кривая 2) объясняются большими по сравнению с плазмой в среде кислорода значениями концентрации свободных электронов. Максимальное количество таких электронов формируется в плазме в среде аргона (кривая 3), что характерно для инертных газов и приводит к большим значениям диаметра потока плазмы. Энергия ионизации атомов аргона (15.75 eV) превышает энергии ионизации кислорода (13.61 eV) и азота (14.53 eV), поэтому возникновение разряда происходит при мощности 26 Вт.

Для формирования широкоформатных потоков внеэлектродной плазмы в работе [16] предлагается газоразрядный прибор, в конструкции которого используется анод, выполненный из металлической сетки с размером

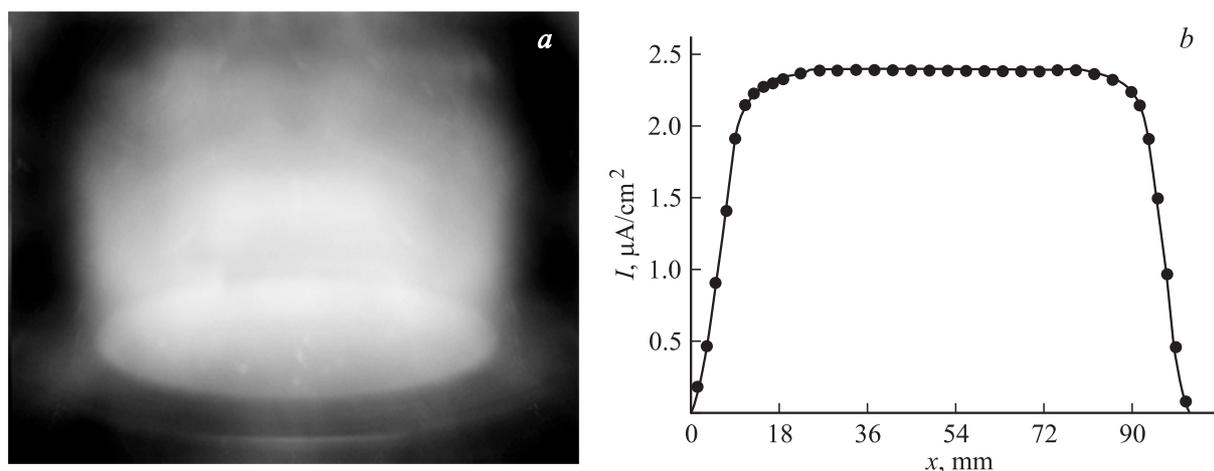


Рис. 7. Внешний вид внеэлектродной плазмы, формируемой ВГР (а), и характер распределения заряженных частиц по сечению плазменного потока (b) [7].

ячейки 1.8×1.8 mm из проволоки диаметром 0.5 mm. Каждая ячейка сетки представляет собой отверстие в аноде, является его полостью, отделенной от других подобных себе полостей расстоянием, равным диаметру проволоки. Весь поток плазмы в этом случае состоит из одинаковых микропотоков, параметры которых определяются размерами ячейки сетки и свойствами поверхности материала катода. При взаимодействии микропотоков положительных ионов с поверхностью катода возникают ямки травления размером 0.9×0.9 mm (рис. 5, а). Меньшие размеры зон травления на поверхности катода по сравнению с размерами ячеек сетки-анода (1.8×1.8 mm) свидетельствуют о наличии эффекта фокусировки внеэлектродной газоразрядной плазмы. Кроме этого, поверхность области травления материала катода имеет ямку травления в центральной области взаимодействия потока положительных ионов с поверхностью катода (зона С) размером 0.3 mm (рис. 5, b), наличие которой свидетельствует о том, что максимум энергетических и химически активных частиц располагается в области оси симметрии отверстия в аноде, где сосредоточены силовые линии поля с наибольшими значениями длин прямолинейных участков. Хорошая корреляция геометрических форм профиля ямок травления и кривой плотности тока электронов, представленных на рис. 2, b и 6, подтверждает правильную интерпретацию связи механизма возникновения и самоподдержания ВГР с длиной прямолинейных участков силовых линий электрического поля в области отверстия в аноде.

Сложение электрических полей, формируемых отдельными системами „катод–ячейка сетки“, позволяет получить суммарное поле, образованное электродной системой „катод–сетчатый анод“, и генерировать широкоформатный поток низкотемпературной плазмы вне межэлектродного пространства (рис. 7, а) с высоким уровнем равномерности распределения заряженных частиц по сечению плазменного потока (рис. 7, b). Анализ

зависимости, представленной на рис. 7, b, показывает, что равномерность распределения заряженных частиц по сечению потока плазмы в диапазоне $12 < x < 90$ mm не хуже 98% [7]. Необходимо отметить, что на расстояниях $y \leq 50$ mm от анода разряд имеет четкие границы, а диаметр плазменного потока соответствует диаметру электродов. При $y > 50$ mm наблюдается некоторое „размытие“ границ разряда, что приводит к снижению яркости свечения плазмы. Это объясняется уменьшением плотности прямолинейных участков силовых линий в направлении распространения разряда (y), что подтверждает результаты, полученные в настоящей работе.

Существование плазмы во внеэлектродном пространстве позволяет сделать вывод о том, что в ней частицы находятся в свободном движении [6]. Это резко снижает зависимость параметров частиц от режимов работы газоразрядного прибора, практически полностью устраняет возможность появления эффекта загрузки и взаимодействие плазмы со стенками реактора. Резко очерченные границы разряда и свободное движение частиц свидетельствуют и об их направленном движении за пределами анода в направлении нормали к его поверхности.

Заключение

Полученные в настоящей работе результаты расширяют существующие границы знаний о процессах, протекающих в ВГР и формируемой им внеэлектродной плазме, а также о механизмах их возникновения и самоподдержания, позволяют более точно понять принципы работы нового класса газоразрядных приборов, генерирующих широкоформатные направленные потоки низкотемпературной внеэлектродной плазмы [6,7,16]. Сказанное позволяет считать полученные результаты

основой для проведения фундаментальных и прикладных исследований по следующему ряду направлений:

— детальная диагностика внеэлектродной плазмы, например, с помощью современных методов, использующих зонд Ленгмюра, и интерпретация получаемых данных;

— уточнение физических и математических моделей взаимодействия частиц внеэлектродной плазмы с поверхностью;

— модернизация конструкций применяемых реакторов и устройств и создание новых приборов, комплексное исследование внеэлектродной плазмы, формируемой ими, и их электрофизических характеристик;

— применение внеэлектродной плазмы, формируемой ВГР для микро- и наноразмерного структурирования поверхности материалов.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9 и молодых российских ученых — докторов наук МД-1041.2011.2 и РФФИ (проект № 12-07-33-018).

Список литературы

- [1] Вагнер И.В., Болгов Э.И., Гракун В.Ф., Гохвельд В.Л., Кудлай В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 8. С. 1669–1674.
- [2] Handle S.K., Nordhage F.R. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 81. № 9. P. 6473–6475.
- [3] Донко З., Рожка К., Шалаи Л. // Физика плазмы. 1998. Т. 24. № 7. С. 637–648.
- [4] Комов А.Н., Колпаков А.И., Бондарева Н.И., Захаренко В.В. // ПТЭ. 1984. № 5. С. 218–220.
- [5] Колпаков А.И., Расстегаев В.П. // Деп. в ВИНТИ 18.04.79. № 1381-79 Деп.
- [6] Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220 с.
- [7] Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A. Heat Transfer — Engineering Applications / Ed. by V.S. Vikhrenko. InTech — Open Access Publisher, 2011. P. 87–118.
- [8] Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В. // Электронная промышленность. 1996. № 2. С. 41–44.
- [9] Колпаков В.А., Колпаков А.И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 15. С. 58–65.
- [10] Колпаков В.А. // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6. С. 431–440.
- [11] Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А. // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 3. С. 218–233.
- [12] Казанский Н.Л., Колпаков А.И., Колпаков В.А., Паранин В.Д. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 21–25.
- [13] Колпаков В.А. // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 5. С. 41–48.
- [14] Колпаков В.А. // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 1. С. 53–58.
- [15] Казанский Н.Л., Колпаков В.А. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 9. С. 41–46.
- [16] Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В. // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 1. С. 120–125.
- [17] Казанский Н.Л., Колпаков В.А. // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 112–117.