

Влияние потенциала узкой металлической трубки на распространение в ней сфокусированного электронного пучка в форвакуумной области давлений

*И.Ю. Бакеев**

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

**bakeeviyu@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния отрицательного потенциала металлической трубки на распространение в ней сфокусированного электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником электронов. Показано, что подача отрицательного потенциала на трубку может приводить к противоположному эффекту. При малом давлении и параметрах электронного пучка, которых недостаточно для зажигания несамостоятельного тлеющего разряда в трубке, ток коллектора, ток трубки и скорость нагрева коллектора монотонно уменьшаются при увеличении потенциала трубки. При условиях зажигания разряда в трубке, повышение потенциала приводит к росту скорости нагрева коллектора.

Ключевые слова: электронный пучок, форвакуум, фокусировка, металлическая трубка, несамостоятельный тлеющий разряд.

1. Введение

Ионно-плазменная обработка внутренних поверхностей узких трубчатых изделий с поперечным размером в несколько миллиметров требует совокупного решения проблем проникновения плазмы внутрь трубки и обеспечения ее однородности по всей длине обрабатываемого изделия. Обе эти проблемы осложнены тем фактором, что газоразрядная плазма, создаваемая вне трубки, отделена от обрабатываемого изделия, которое, как правило, находится под отрицательным, относительно плазмы, потенциалом, т.е. является катодом [1]. Именно поэтому заполнение узкой протяженной полости трубки однородной по всей длине плазмой возможно лишь при обеспечении условий дополнительной ионизации рабочего газа непосредственно внутри полости.

Такие условия, с одной стороны, могут осуществляться в аномальном тлеющем разряде [2, 3] при высоких давлениях рабочего газа (несколько сотен паскалей). Нарботка газовой плазмы в обрабатываемой металлической полости усиливается благодаря возникновению эффекта полого катода. Минимальный диаметр обрабатываемой полости, представленной в качестве примера азотирования, был ограничен величиной 6 мм с аспектным отношением (отношение протяженности полости к ее диаметру) менее 50. При столь высоких давлениях и соответственно, многократных столкновениях. Ионы из плазмы достигают обрабатываемой поверхности с энергией, не превышающей несколько десятков эВ вне зависимости от ее потенциала. Такие низкоэнергетичные ионы обладают крайне низкой способностью к травлению, что при ионно-плазменном азотировании не позволяет очистить поверхность от оксидного слоя на поверхности, препятствующего поступлению азота вглубь металла.

Более эффективная ионно-плазменная обработка изделий осуществляется при использовании для генерации газовой плазмы внутри трубчатой полости разрядов низкого давления (менее 1 Па) [4, 5]. Повышение эффективности в подобных системах вызвано возможностью производить воздействие ионами с высокой энергией, определяемой приложенным отрицательным напряжением смещения, так как при данных давлениях ионы проходят прикатодный слой с низкой вероятностью столкновения. Кроме того, при плазменном азотировании наблюдается повышение эффективности насыщения поверхности по сравнению повышенными давлениями, связанное с более интенсивной наработкой в плазме разряда низкого давления активных частиц атомарного азота вблизи обрабатываемой поверхности. В работе [1] представлена схема реализации заполнения длинной трубки плазмой при низком давлении путем зажигания несамостоятельного тлеющего разряда с

обрабатываемой трубкой в качестве полого катода при инжекции электронов в полость посредством вспомогательного генератора плазмы. Также в данной работе представлены результаты азотирования внутренней поверхности трубок из стали марки 12Х18Н10Т с внутренним диаметром 25 мм и длиной 300 мм.

Сохранение преимуществ ионно-плазменной обработки, присущих разрядам низкого давления, при меньших внутренних диаметрах и более высоких давлениях, нежели в [1], возможно при инжекции в трубчатую полость сфокусированного электронного пучка. Такая задача может быть решена с использованием так называемых форвакуумных плазменных источников электронов [6]. Такие источники обеспечивают генерацию электронного пучка непосредственно в области повышенных давлений от единиц до десятков паскаль. Достигнутые параметры электронного пучка (диаметр в кроссовере менее 1 мм и плотность мощности в кроссовере, достигающая 10^6 Вт/см² [7]), генерируемого форвакуумным плазменным источником, обуславливают возможность его использования для инициирования вспомогательного тлеющего разряда в узкой протяженной металлической трубке, направленной на ионно-плазменную модификацию ее внутренней поверхности. Исследованию ключевых процессов распространения электронного пучка в заземленной металлической трубке диаметром несколько миллиметров посвящены работы [6]. Однако, образование дополнительного электрического поля в металлической трубке при подаче на нее отрицательного относительно стенок вакуумной камеры потенциала, предназначенного для зажигания разряда в трубке, может изменить условия прохождения электронного пучка в трубке. Поэтому, цель настоящей работы заключалась в исследовании характера влияния потенциала узкой металлической трубки на распространение сфокусированного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником.

2. Методика и техника эксперимента

Форвакуумный плазменный источник 1 сфокусированного электронного пучка 2 устанавливался на вакуумной камере, оборудованной лишь одной ступенью механической откачки на основе форвакуумного насоса VocEdwards. Расположение функциональных электродов источника электронов, а также оборудования для диагностики распределения тока и мощности пучка при распространении в трубке схематично представлены на Рис.1.

Подробное описание конструкции форвакуумного источника электронов, предназначенного для генерации сфокусированного электронного пучка, и принципа его работы изложено в [7]. Принцип работы электронного источника основан на эмиссии электронов из плазмы 3 стационарного тлеющего разряда с полым катодом 4 через одиночный эмиссионный канал, выполненный в центре анода 5. Ускорение электронов производилось электрическим полем ускоряющего промежутка, образованного анодом 5 и экстрактором 6. Фокусировка электронного пучка обеспечивалась магнитным полем одиночной магнитной линзы 7. Отклонение электронного пучка производилось при помощи магнитной отклоняющей системы 8.

Вакуумная камера откачивалась механическим насосом до предельного давления 1 Па. Затем в нее напускался азот до рабочего давления $p = 2-6$ Па. Питание тлеющего разряда с полым катодом и ускоряющего напряжения осуществлялись источниками электропитания 9 и 10. При этом ускоряющее напряжение в экспериментах составляло $U_a = 10-20$ кВ. Ток разряда $I_d = 100-1000$ мА.

Эксперименты по исследованию распределения тока сфокусированного электронного пучка при низких давлениях рабочего газа производились для металлической трубки 11 из нержавеющей стали с внутренним диаметром полости $D_t = 5.8$ мм и протяженностью $L_t = 30$ см. Металлическая трубка ориентировалась вертикально вдоль распространения

сфокусированного электронного пучка 2. За нижним торцом трубки устанавливался коллектор, представляющий собой цилиндр Фарадея 12. В ходе экспериментов измерялись значения тока I_t в цепи трубки, также тока I_c коллектора. Ток через трубку I_t в данном случае определяется потерями электронов пучка на стенках внутренней поверхности и верхнего торца трубки. Полный ток пучка I_b измерялся как ток коллектора при отсутствии трубки (трубка отодвигалась и возвращалась обратно после измерения тока пучка посредством горизонтальной системы перемещения).

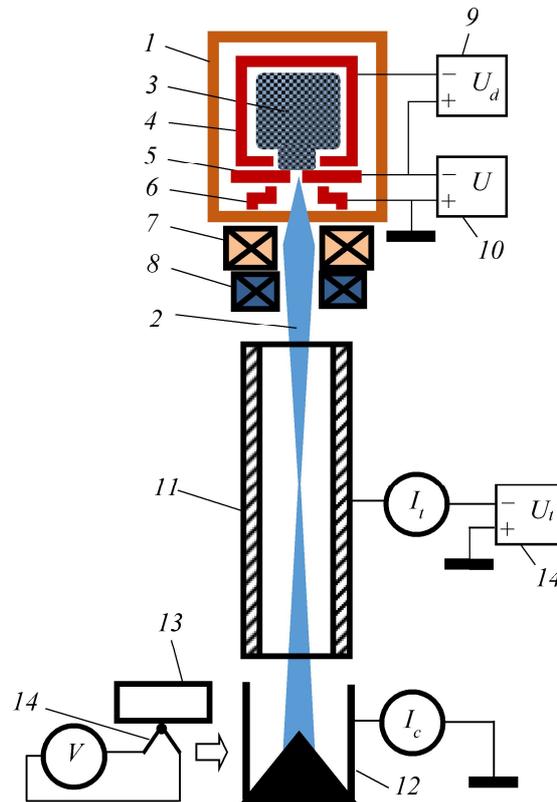


Рис.1. Схема экспериментальной установки и методики эксперимента: 1 – форвакуумный плазменный источник электронов; 2 – сфокусированный электронный пучок; 3 – эмиссионная плазма; 4 – полный катод; 5 – анод с центральным эмиссионным каналом; 6 – экстрактор; 7 – магнитная фокусирующая линза; 8 – магнитная отклоняющая система; 9 – источник питания разряда; 10 – источник ускоряющего напряжения; 11 – металлическая трубка; 12 – цилиндр Фарадея; 13 – коллектор; 14 – термопара.

При высоких давлениях рабочего газа в условиях интенсивной ионизации рабочего газа, анализ распространения сфокусированного электронного пучка основывался на калориметрических измерениях. Для этих целей, вместо цилиндра Фарадея 12, под нижним торцом трубки устанавливался небольшой стальной коллектор в виде диска 13, к нижней стороне которого монтировалась термопара 14. Мощность электронного пучка, прошедшая через трубку, оценивалась по скорости нагрева коллектора V_t при включении электронного пучка.

Отрицательный потенциал трубки относительно заземленных стенок вакуумной камеры задавался источником стабилизированного напряжения 14 $U_t = 0-300$ В. Для всех экспериментов электронный пучок фокусировался таким образом, чтобы плоскость кроссовера пучка располагалась в пределах трубки и потери пучка на стенках трубки были

минимальными при заземленной трубке ($U_t = 0$). При подаче на трубку потенциала, условия фокусировки не менялись по сравнению с заземленной трубкой.

3. Результаты

Проведенные эксперименты показали, что несмотря на значительное превышение ускоряющего напряжения U_a (энергии электронов пучка) над подаваемым напряжением на металлическую трубку U_t , потенциал трубки может приводить к значительному изменению характера распространения пучка в трубке. При этом характер влияния определяется множеством факторов, как параметрами электронного пучка, так и давлением рабочего газа.

На Рис.2 представлены зависимости соотношений тока пучка и тока трубки к полному току пучка. Проведенные исследования показали, что при низком давлении $p = 2$ Па ток пучка, дошедший через трубку до коллектора, уменьшается при увеличении потенциала трубки (кривая 1). Причем, значения соотношения I_c/I_b , как и степень уменьшения их на зависимости $I_c/I_b(U_t)$ не зависят от тока разряда. Ток трубки при этом, испытывает сильное влияние от тока разряда (кривые 2–4). Так, отношение тока трубки к току пучка I_t/I_b резко уменьшается при увеличении потенциала трубки U_t . При наименьшем токе разряда отношение I_t/I_b резко падает от 0.6 до 0, т.е. указанного потенциала трубки достаточно для полного прекращения попадания электронов пучка на трубку. Чем больше тока разряда, тем меньше крутизна зависимости $I_t/I_b(U_t)$ (кривые 3 и 4).

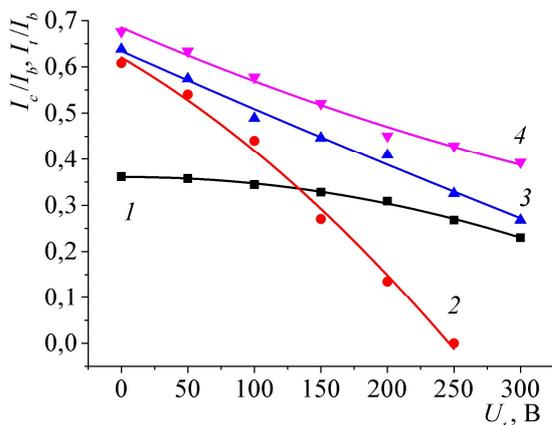


Рис.2. Зависимости отношения тока коллектора к току пучка I_c/I_b (кривая 1) и отношения тока трубки к току пучка I_t/I_b (кривые 2–4) от потенциала трубки U_t для различных токов разряда I_d : 1 – $I_d = 500$ мА, $I_b = 7$ мА; 2 – $I_d = 100$ мА, $I_b = 3$ мА; 3 – $I_d = 500$ мА, $I_b = 7$ мА; 4 – $I_d = 1000$ мА, $I_b = 10$ мА. Давление $p = 2$ Па. Ускоряющее напряжение $U_a = 20$ кВ.

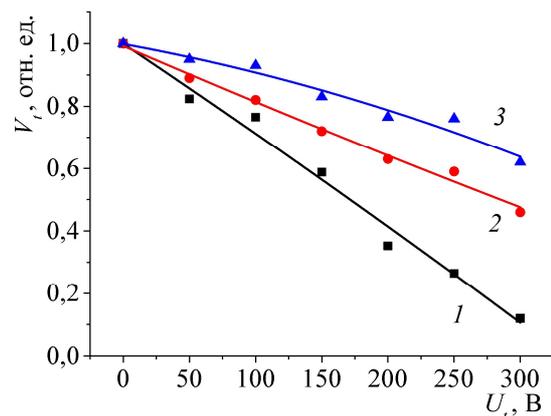


Рис.3. Зависимости скорости нагрева коллектора V_t от потенциала трубки U_t для различных ускоряющих напряжений U_a : 1 – $U_a = 5$ кВ; 2 – $U_a = 10$ кВ; 3 – $U_a = 20$ кВ. Давление $p = 2$ Па. Ток разряда и ток пучка $I_d = 500$ мА, $I_b = 7$ мА.

Подобное поведение кривых на Рис.2 говорит о том, что в конечном счете при малом давлении рабочего газа подача потенциала на металлическую трубку приводит к образованию электрического поля, затрудняющего транспортировку пучка в трубке. Так, при отрицательном смещении потенциала на трубке, трубка выступает в качестве электрода электронной линзы, расположенной около верхнего конца трубки. Данная электронная линза приводит к некоторой расфокусировке электронного пучка на входе в трубку. Причем, тот факт, что увеличение потенциала трубки приводит к падению как тока коллектора, так и тока пучка, говорит о том, часть электронного потока отклоняется и распространяется за пределами металлической трубки. Особенно это предположение подтверждает уменьшение тока трубки до нуля для наименьшего тока разряда (кривая 1 на Рис.2). Уменьшение

крутизны зависимости $I_t/I_b(U_t)$ при увеличении тока разряда на Рис.2 может быть вызвано изменением положения эмиссионной плазменной границы в эмиссионном канале и вызванного этим увеличения разброса энергетического спектра электронного пучка и углов распространения электронов в пучке.

Проведенные калориметрические измерения подтверждают уменьшение мощности электронного пучка, дошедшей до коллектора, по мере увеличения потенциала на трубке. Так, зависимости скорости нагрева коллектора также монотонно уменьшаются при увеличении потенциала трубки (Рис.3). Кроме того, из Рис.3 видно, что на степень уменьшения скорости нагрева коллектора сильное влияние оказывает ускоряющее напряжение. При ускоряющем напряжении $U_a = 5$ кВ (кривая 1), скорость нагрева коллектора уменьшается практически на 90%. Чем больше ускоряющее напряжение, тем меньше уменьшение мощности, дошедшей до коллектора, в результате подачи на трубку отрицательного потенциала (кривые 2 и 3).

При повышении давления до $p = 6$ Па, характер влияния потенциала трубки на мощность электронного пучка, дошедшую до коллектора, имеет различный вид в зависимости от параметров электронного пучка. Так, при токах разряда менее 500 мА и обеспечиваемом при этом токе пучка менее 15 мА, зависимость $V_t(U_t)$ также является монотонно спадающей. Однако при повышении тока разряда возникает пороговый эффект, заключающийся в зажигании несамостоятельно тлеющего разряда в трубке и образования плотной плазмы разряда в верхней части трубки. Начиная с этого момента, зависимость $V_t(U_t)$ имеет вид, представленный на Рис.4.

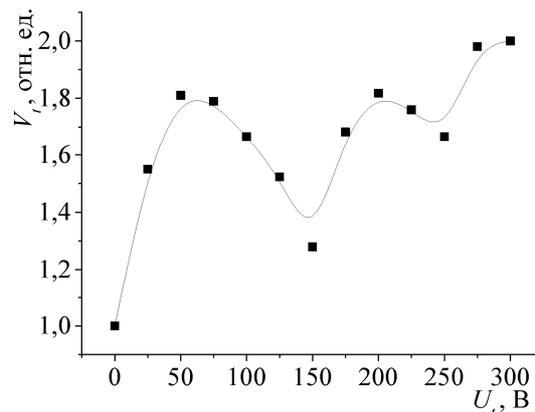


Рис.4. Зависимости скорости нагрева коллектора V_t от потенциала трубки U_t . Давление $p = 6$ Па. Ускоряющее напряжение $U_a = 10$ кВ. Ток разряда и ток пучка $I_d = 500$ мА, $I_b = 15$ мА.

В данном случае, на Рис.4 видно, что скорость нагрева коллектора растет при увеличении потенциала трубки. Однако, данная зависимость не является монотонной, а имеет периодический характер. В ходе экспериментов, было обнаружено, что значения потенциалов трубки, при которых наблюдаются характерные максимумы и минимумы на Рис.4, при условии зажигания разряда в трубке остаются неизменными как при изменении тока разряда, так и ускоряющего напряжения. Повышение мощности пучка, дошедшей до коллектора, в случае зажигания разряда в трубке может объясняться тем, что поданное между трубкой и стенками камерами напряжение теперь сосредоточено в слое между стенками трубки и плазмой разряда. Электрическое поле таким образом является радиальным и сосредоточено вблизи стенок трубки, благодаря чему оказывает отражающий эффект от стенок для электронов пучка. Ввиду малых углов распространения пучка по отношению к азимутальной составляющей, слоя вблизи стенок трубки с падением

напряжения в несколько десятков вольт может быть достаточно для торможения радиальной составляющей скорости пучка.

4. Заключение

Представлены результаты исследования влияния отрицательного потенциала металлической трубки на распространение в ней сфокусированного электронного пучка, генерируемого форвакуумным источником электронов. Были исследованы зависимости распределений токов трубки и коллектора, принимающего часть электронного пучка, прошедшую через трубку, а также скорости нагрева коллектора, коррелирующего с мощностью дошедшего до коллектора, в зависимости от потенциала трубки. Показано, что подача отрицательного потенциала на трубку может приводить к противоположному эффекту. При малом давлении и параметрах электронного пучка, которых недостаточно для зажигания несамостоятельного тлеющего разряда в трубке, ток коллектора, ток трубки и скорость нагрева коллектора монотонно уменьшаются при увеличении потенциала трубки. При условиях зажигания разряда в трубке, повышение потенциала приводит к росту скорости нагрева коллектора.

Благодарности

Работы были поддержаны Российским научным фондом в рамках проекта № 21-79-10217.

5. Литература

- [1] Ignatov D.Y., Lopatin I.V., Denisov V.V., Koval N.N., Ahmadeev Y.H., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **48**(6), 2050, 2020; doi: 10.1109/TPS.2020.2996739
- [2] Borisyyuk Y.V., Mozgrin D.V., Oreshnikova N.M., Berdnikova M.M., Pisarev A.A., *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **12**(3), 603, 2018; doi: 10.1134/S1027451018030254
- [3] Borisyyuk Y.V., Oreshnikova N.M., Berdnikova M.A., Tumarkin A.V., Khodachenko G.V., Pisarev A.A., *Phys. Procedia*, **71**, 105, 2015; doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.322
- [4] Akhmadeev Y.H., Denisov V.V., Koval N.N., Kovalsky S.S., Lopatin I.V., Schanin P.M., Yakovlev V.V., *Plasma Phys. Rep.*, **43**(1), 67, 2017; doi: 10.1134/S1063780X17010020
- [5] Ivanov Y.F., et al., *High Temp. Mater. Processes: Int. Q. High-Tech. Plasma Processes*, **21**(1), 2017; doi: 10.1615/HighTempMatProc.2017020052
- [6] Burdovitsin V.A., Oks E.M., *Laser and Part. Beams*, **26**(4), 619, 2008; doi: 10.1017/S0263034608000694
- [7] Bakeev I.Y., Klimov A.S., Oks E.M., Zenin A.A., *Plasma Sources Sci. and Technol.*, **27**(7), 075002, 2018; doi: 10.1088/1361-6595/aacb55