

УДК 537.563; 537.533.9

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-23-27

EDN: RPHZVC

PACS: 52.50.Dg



## Травление внутренней поверхности металлической трубки в разряде, поддерживаемым электронным пучком

*В. А. Бурдовицин, К. И. Карпов, Л. Ж. Нгон А Кики, Е. М. Окс*

*Приведены экспериментальные результаты измерения скорости травления внутренней стенки металлической трубки при наличии в трубке разряда, поддерживаемого инжектируемым электронным пучком. При токах разряда 50–200 мА скорость травления повышается в интервале 10–30 нм/мин.*

*Ключевые слова:* форвакуумный электронный источник, узкая металлическая трубка, инжекция электронного пучка, газовый разряд, ионное травление.

### Введение

Модификация внутренних поверхностей металлических трубок может проводиться для улучшения таких характеристик, как прочность, износостойкость и сопротивление коррозии [1]. Один из перспективных способов проведения такой модификации заключается в ионно-плазменном воздействии, реализуемом при зажигании разряда в трубке [2, 3]. Создание газоразрядной плазмы в узкой протяженной металлической трубке представляет собой нетривиальную задачу, как со стороны технической реализации, так и с точки зрения физики процессов [4]. Как отмечалось нами ранее [5], один из способов инициирования и под-

держания разряда в металлической трубке состоит в инжекции в нее электронного пучка. При этом трубка поддерживается под отрицательным потенциалом относительно заземленных элементов вакуумной камеры, т.е. является катодом. Характер распределения токов на стенки трубки, а также потенциал плазмы внутри трубки существенным образом зависят от давления рабочего газа, тока электронного пучка, тока разряда в цепи трубки, а также от геометрии трубки и расположения анодов [6]. Все вышеизложенное должно оказывать влияние на технологический результат, связанный с изменением состояния внутренней поверхности стенки трубки под воздействием плазмы газового разряда. Один из таких результатов состоит в ионном травлении поверхностного слоя, исследованию которого посвящена настоящая работа.

### Техника и методика эксперимента

Эксперимент проводился на установке, схематично изображенной на рис. 1. Форвакуумный плазменный электронный источник 1 на основе разряда с полым катодом располагался на верхнем фланце вакуумной камеры 2, изготовленной из нержавеющей стали. Камера предварительно откачивалась до давления 1 Па, после чего давление устанавливалось в диапазоне 4–5 Па напуском аргона. Электродная схема, принцип работы, а также характе-

**Бурдовицин Виктор Алексеевич**, в.н.с., д.т.н., профессор.

E-mail: burdov@fet.tusur.ru

**Карпов Кирилл Игоревич**, м.н.с., инженер.

E-mail: kkarпов99@gmail.com

**Нгон А Кики Лионель Жоэль**, инженер.

E-mail: joelngon52@gmail.com

**Окс Ефим Михайлович**, зав. лаб., д.т.н., профессор.

E-mail: oks@fet.tusur.ru

Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 14.07.2023

После доработки 22.08.2023

Принята к публикации 20.11.2023

© Бурдовицин В. А., Карпов К. И., Нгон А Кики Л. Ж., Окс Е. М., 2023

ристики и параметры электронного источника такого типа подробно описаны в [7]. Электрическое питание разрядного и ускоряющего промежутков источника осуществлялось стабилизированными источниками постоянного напряжения  $U_d$  и  $U_a$ . Электронный пучок 3 извлекался из плазмы через эмиссионный электрод с 15 отверстиями диаметром 0,8 мм, расположенными на круглом участке диаметром 7 мм. Ток электронного пучка составлял 10 мА при ускоряющем напряжении источника, равном 3,5 кВ.

В пространстве дрейфа электронный пучок фокусировался магнитной линзой 4 и инжектировался внутрь узкой протяженной трубки 5 из нержавеющей стали. В экспериментах использовалась трубка с внутренним диаметром 18 мм и длиной 200 мм. Ток электронного пучка контролировался током  $I_e$  эмиссии в цепи источника  $U_a$ , задающего напряжение на ускоряющем промежутке.

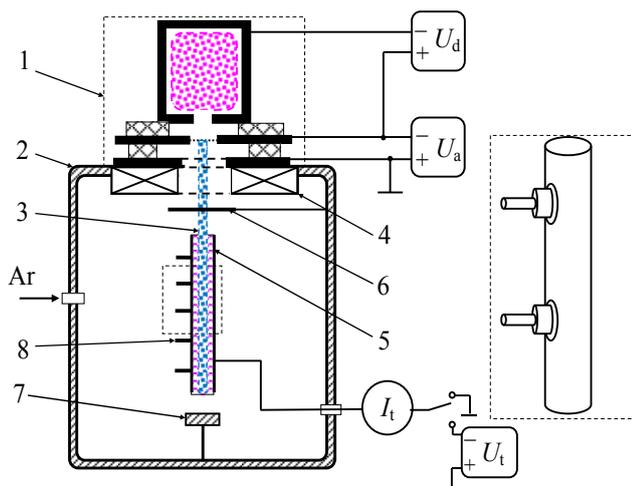


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Между магнитной линзой и трубкой располагалась диафрагма 6 с центральным отверстием диаметром 10 мм. Роль диафрагмы состояла в исключении попадания пучка на торцевую поверхность трубки. Нижний торец трубки был открыт. Прошедший трубку электронный пучок поступал на заземленный коллектор 7. Напряжение  $U_t$  на трубку подавалось от стабилизированного источника постоянного напряжения. При достижении порогового значения  $U_t$ , зависящего от давления газа, в трубке формировался разряд между трубкой и заземленными элементами 6, 7 с током  $I_t$ , поддерживаемый инжектированными электронами. Бомбардировка ионами разряда внутрен-

ней поверхности трубки приводила к ее травлению.

Для измерения скорости ионного травления была использована следующая методика. В стенке трубки были выполнены равномерно расположенные по ее длине 5 отверстий, каждое диаметром 10 мм. В эти отверстия были вставлены измерительные керны 8. Каждый керн представлял собой два коаксиальных электрода 1, изолированных друг от друга слоем стекла 2 (рис. 2). Радиусы внутреннего и внешнего электродов составляли, соответственно 1,0 и 3,5 мм. При этом каждый электрод керна был отдельно электрически соединен со стенкой трубки. Торцевая часть измерительного керна полировалась, после чего на нее осаждался металлический слой, получаемый электронно-лучевым испарением нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Исходная толщина  $d$  слоя определялась ее измерением на отдельном свидетеле с применением интерференционного микроскопа МИИ-4. В качестве свидетеля использовалась стеклянная пластинка, располагавшаяся рядом с керном. После осаждения слоя проводились измерения сопротивления между внутренним и внешним электродами каждого керна.

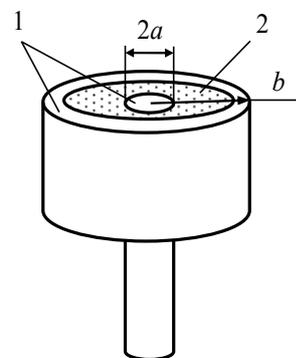


Рис. 2. Измерительный керн

Связь сопротивления  $R$  и толщины  $d$  слоя выражалась известной формулой

$$d = \frac{\rho}{2\pi R} \ln \frac{b}{a},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла,  $b$  и  $a$  – радиусы внешнего и внутреннего электродов. Таким образом, изменение толщины слоя при ионном травлении может быть оценено по изменению его сопротивления. Для измерения распределения разрядного тока по длине трубки керны 8 (рис. 1) заменялись на стеночные зонды, площадь приемной поверхности

которых совпадала с площадью зерна. Для контроля изменения морфологии и состава поверхности стенки трубки при ионном травлении в отверстиях размещались металлические вкладыши, изготовленные из нержавеющей стали и титана с полированной торцевой частью. Измерения проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S3400N оборудованного приставкой Bruker X'Flash 5010 для энергодисперсионного анализа.

### Результаты экспериментов

Как показали эксперименты, скорость травления стенок трубки составляет десятки нанометров в минуту и возрастает с повышением разрядного тока  $I_t$  (рис. 3а). Слабое изменение скорости травления в зависимости от координаты  $x$ , отсчитываемой от верхнего конца трубки, указывает на однородность плазмы, что подтверждается измерениями токов стеночных зондов (рис. 3б).

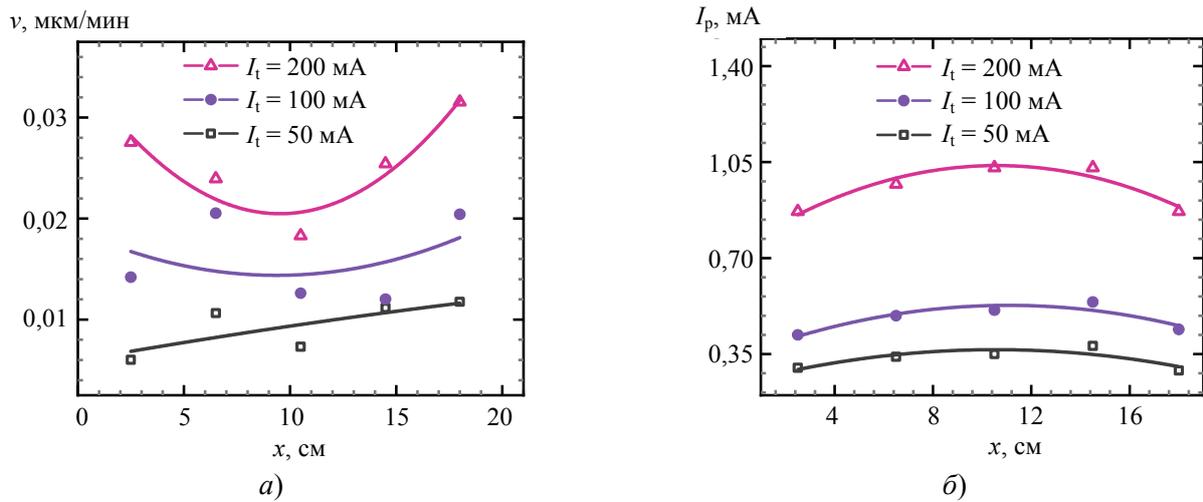


Рис. 3. Скорость травления (а) и токи стеночных зондов (б) как функции координаты  $x$  для разных разрядных токов  $I_t$  при  $U_t = 500$  В

Возможное объяснение снижения скорости травления в средней части трубки при  $I_t = 200$  мА (рис. 3а) состоит в снижении потенциала плазмы, а следовательно, и разности потенциалов между плазмой и стенкой трубки от концов трубки к ее середине, наблюдавшееся в [5].

Как показали измерения, ионное травление не вызывает изменения элементного состава и морфологии нержавеющей стали, но проявляется в заметной эрозии титана. На рис. 4 представлены микрофотографии поверхности титановых вкладышей до и после травления в течение 20 мин.

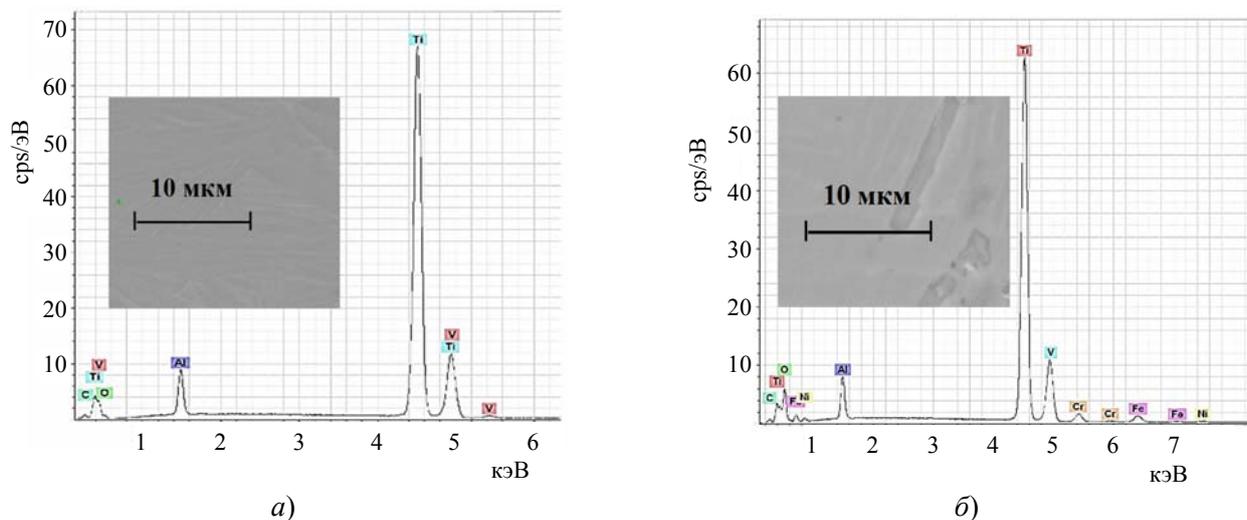


Рис. 4. Микрофотографии и элементный состав поверхности вкладышей из титана до (а) и после (б) травления

На поверхности титана после травления появляются следы железа и хрома, что, по-видимому, вызвано осаждением продуктов распыления трубки [8]. В спектрах свечения плазмы (рис. 5) кроме серии пиков, соответствующих аргону и азоту, наблюдаются линии, принадлежащие железу [9]. Увеличение мощности, вводимой в разряд, не только повышает интенсивности всех линий спектра, но

и изменяет их соотношение. В частности, сопоставление интенсивностей линий аргона (811,5 нм) и железа (404 нм и 407 нм), приведенное в таблице, подтверждает сделанные выше выводы о распылении стенки трубки, поскольку с повышением разрядного напряжения возрастает коэффициент распыления, что и проявляется в возрастании относительной интенсивности линий железа.

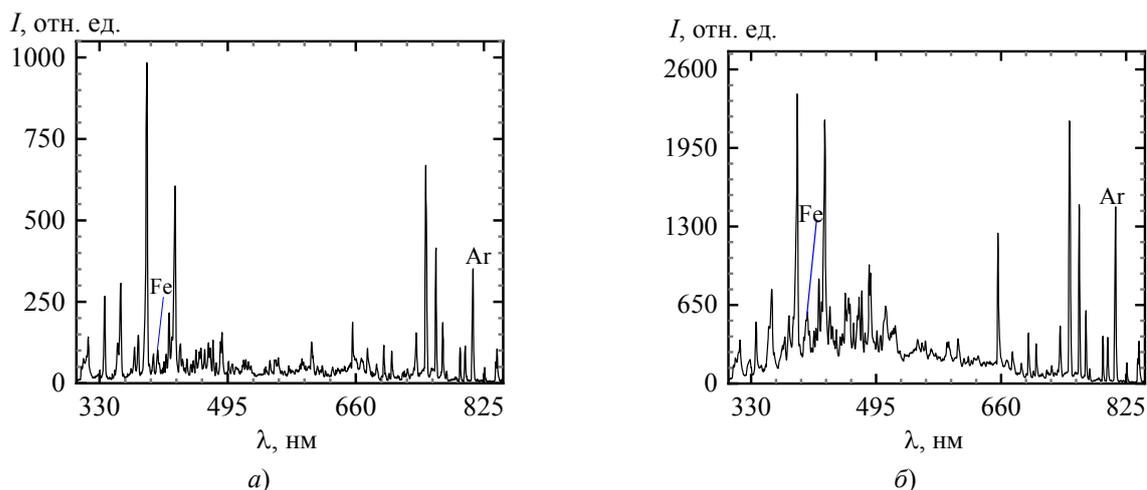


Рис. 5. Спектры свечения плазмы в трубке при разных параметрах разряда: а) –  $I_t = 50$  мА,  $U_t = 360$  В; б) –  $I_t = 400$  мА,  $U_t = 800$  В

Таблица

Соотношение интенсивностей линий аргона и железа в спектре свечения плазмы

$\lambda$ , нм	$I_1$ , отн.ед.	$I_2$ , отн.ед.	$I_{1Fe} / I_{1Ar}$	$I_{2Fe} / I_{2Ar}$
811,5 Ar	351	1462		
404 Fe	102	595	0,29	0,407
407 Fe	61	433	0,17	0,296

Ток и напряжение разряда в трубке равны:  $I_{t1} = 50$  мА,  $I_{t2} = 400$  мА,  $U_{t1} = 360$  В,  $U_{t2} = 800$  В.

## Заключение

Экспериментально подтверждено наличие ионного травления в металлической трубке при реализации разряда, поддерживаемого инжектируемым электронным пучком. При токах разряда 50–200 мА скорость травления повышается в интервале 10–30 нм/мин. Осаждение металла, распыленного со стенок трубки, не препятствует травлению.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-10217.

## ЛИТЕРАТУРА

- Guling Z., Xingfang W. U., Weichao G. U. et al. / Progress in natural science. 2006. Vol. 16. № 11. P. 1119–1126.
- Ueda M., Silva C., Marcondes A. R., Reuther H., de Souza G. B. / Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 355. № 15. P. 98–110.
- Chenggang J., Yongqi Z., Chen W., Manxing L. et al. / Materials. 2023. Vol. 16. № 1. P. 11.
- Lozovan A. A., Frangulov S. V., Chulkov D. V., Rodin A. I. / Welding International. 2010. Vol. 24. № 8. P. 646–649.
- Burdovitsin V. A., Karpov K. I., Bakeev I. Yu., Oks E. M. / Physics of Plasmas. 2022. Vol. 29. P. 093503.

6. Burdovitsin V. A., Bakeev I. Y., Karpov K. I., Oks E. M. / Plasma Sources Science and Technology. 2022. Vol. 31. № 5. P. 055008.

7. Burdovitsin V. A., Zhirkov I. S., Oks E. M., Osipov I. V., Fedorov M. V. / Instruments and Experimental Techniques. 2005. Vol. 48. № 6. P. 761.

8. Matsunami N., Amamura Y., Itikawa Y., Itoh N. et al. / Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1984. Vol. 31. Iss. 1. P. 1–80.

9. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М., Славный В. А., Шрейдер Е. Я. Таблицы спектральных линий. – М.: ГИФМЛ, 1977.

PACS: 52.50.Dg

## Etching of the inner surface of a metal tube in a discharge supported by an electron beam

V. A. Burdovitsin, K. I. Karpov, L. J. Ngon A. Kiki and E. M. Oks

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: burdov@fet.tusur.ru

Received 14.07.2023; revised 22.08.2023; accepted 20.11.2023

**Experimental results are presented for measuring the etching rate of the inner wall of a metal tube in the presence of a discharge in the tube supported by an injected electron beam.**

**Keywords:** fore-vacuum electron source, narrow metal tube, electron beam injection, gas discharge, ion etching.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-23-27

### REFERENCES

1. Guling Z., Xingfang W. U., Weichao G. U. et al., Progress in natural science **16** (11), 1119–1126 (2006).
2. Ueda M., Silva C., Marcondes A. R., Reuther H. and de Souza G. B., Surface and Coatings Technology **355** (15), 98–110 (2018).
3. Chenggang J., Yongqi Z., Chen W., Manxing L. et al., Materials **16** (1), 11 (2023).
4. Lozovan A. A., Frangulov S. V., Chulkov D. V. and Rodin A. I., Welding International **24** (8), 646–649 (2010).
5. Burdovitsin V. A., Karpov K. I., Bakeev I. Yu. and Oks E. M., Physics of Plasmas **29**, 093503 (2022).
6. Burdovitsin V. A., Bakeev I. Y., Karpov K. I. and Oks E. M., Plasma Sources Science and Technology **31** (5), 055008 (2022).
7. Burdovitsin V. A., Zhirkov I. S., Oks E. M., Osipov I. V. and Fedorov M. V., Instruments and Experimental Techniques **48** (6), 761 (2005).
8. Matsunami N., Yamamura Y., Itikawa Y., Itoh N., et al., Atomic Data and Nuclear Data Tables **31** (1) 1–80 (1984).
9. Zaidel' A. N., Prokof'ev V. K., Raikii S. M., Slavnyi V. A. and Shreider E. Ya., Tablitsy spektral'nykh linii, Moscow, GIFML, 1977.