

УДК 538.971

А.В. Тюньков, Д.Б. Золотухин, Ю.Г. Юшков, А.В. Казаков

Ионно-плазменное травление, инициированное электронным пучком

Представлены результаты травления образца кварца потоком энергичных ионов из пучковой плазмы. Плазма генерировалась в диэлектрической колбе при инъекции в нее непрерывного электронного пучка. Процесс травления осуществлялся в среде аргона при давлении 2,7 Па. Энергия бомбардирующих ионов регулировалась падением напряжения на слое между границей плазмы и дном полости в результате ее зарядки электронами пучка. Электронный пучок был единственным источником генерации ионов и регулирования их энергии. Установлено, что скорость травления растет с ростом энергии электронного пучка вслед за увеличением абсолютной величины придонного падения напряжения.

Ключевые слова: травление диэлектриков, пучковая плазма, электронный источник с плазменным катодом, средний вакуум.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-3-79-84

Электронные пучки широко используются в технологическом оборудовании для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления, фундаментальных и прикладных исследований, в том числе в нанотехнологиях [1, 2]. Так как диапазоны мощности и концентрации энергии в электронном пучке велики, возможно получение всех видов термического воздействия на материал: нагрев его до заданных температур, плавление и испарение с высокими скоростями [3, 4]. В качестве источников электронных пучков, работающих в условиях высокого вакуума (порядка 10^{-2} Па), исторически широко используются устройства с термокатодом [4, 5]. Однако в условиях реального производства использование данных устройств затруднительно по причине ряда факторов, ограничивающих интервал бесперебойной работы источника: высокие требования к чистоте вакуума, направленный парогазовый поток из области расплава, частая разгерметизация вакуумной камеры. Данные факторы обусловили разработку источников электронов, альтернативных термокатодным. В результате исследований в данном направлении были разработаны источники с плазменным катодом на основе высоковольтного тлеющего разряда [6], источники с поверхностным разрядом и на основе взрывной эмиссии [7] и источники электронов с плазменным эмиттером [8].

Среди разработчиков источников электронов с плазменным катодом в последние годы являются популярными исследования, направленные на увеличение рабочего давления электронного источника до форвакуумного диапазона [9, 10]. Транспортировка электронного пучка в атмосфере газа данного диапазона давлений обеспечивает генерацию пучковой плазмы, что значительно расширяет применение электронных источников. Генерируемая плазма пучка успешно применяется в процессах азотирования поверхности различного рода металлов и сплавов [11, 12], обеззараживания внутренних поверхностей сосудов [13], формирования покрытий из газовой фазы [14], травления поверхности [15]. А способность нейтрализовать накопленный заряд, привне-

сенный электронным пучком, с поверхности непроводящей мишени позволила осуществить процессы спекания, сварки и пайки электрически непроводящих изделий, осаждения диэлектрических покрытий на основе керамики [16] и бора [17].

В указанных выше процессах электронный пучок используется как источник нагрева либо испарения облучаемой поверхности, а генерируемая им плазма – как нейтрализатор заряда либо инициатор плазмохимической реакции. Свойство пучка приносить электрический заряд в представленных выше процессах и заряжать таким образом обрабатываемую поверхность диэлектрика до определенного отрицательного потенциала ранее считалось нежелательным эффектом. Эффект зарядки поверхности обрабатываемого образца электронным пучком может оказаться весьма полезным для организации травления поверхности диэлектрической мишени ионами пучковой плазмы. В среднем вакууме для осуществления ионного травления электронный луч уже использовался [15], но только в качестве генератора пучковой плазмы. Травление проходило в газах $\text{Ar}+\text{SF}_6$, O_2+SF_6 , SF_6 за счет распыления ионами пучковой плазмы, энергия которых задавалась ВЧ-генератором.

Авторы [18, 19] показали, что в диапазоне давлений среднего вакуума при инъекции непрерывного электронного пучка внутрь диэлектрической полости энергия ионов, бомбардирующих ее дно, может быть весьма значительна ввиду большой разности потенциалов (сотни – тысячи вольт) между плазмой и этим дном. Размещение на дне такой полости диэлектрической мишени и сканирование ее поверхности электронным пучком обеспечит задание потенциала в локальной области диэлектрика, подверженной воздействию пучка, и соответственно энергии ионам пучковой плазмы, необходимой для распыления поверхности мишени.

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по влиянию величины энергии электронного пучка на скорость травления поверхности кварцевого стекла.

Методика и техника эксперимента

В качестве основного инструмента использовался форвакуумный плазменный источник электронов, функционирующий в постоянном режиме, параметры и конструкция которого подробно представлены в [20]. На рис. 1 показана схема эксперимента.

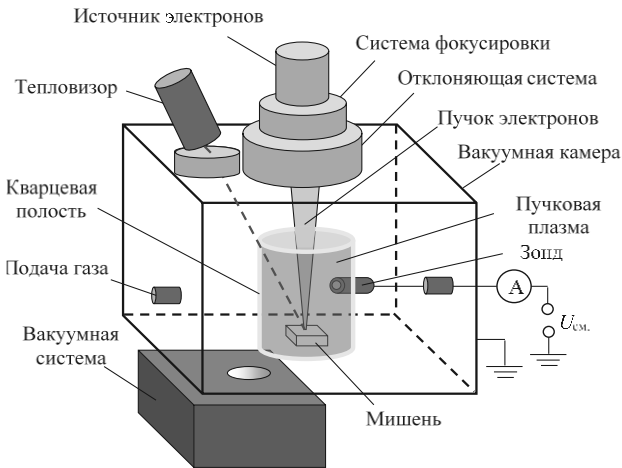


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Вакуумная камера объемом 11 л откачивалась двухступенчатым пластинчато-роторным насосом Vos Edwards E2M80 со скоростью откачки 22,2 л/с, далее вся система промывалась аргоном высокой чистоты (99,998%). Далее при подаче потока рабочего газа (тот же аргон) в вакуумную камеру устанавливалось давление, при котором осуществлялся процесс травления.

Сгенерированный электронный пучок диаметром d около 2 мм фокусировался магнитной фокусирующей системой и направлялся магнитной отклоняющей системой в кварцевую колбу (внутренний диаметр $D = 43$ мм, высота $H = 240$ мм), на дне которой размещался образец кварцевого стекла ($15 \times 20 \times 4$ мм³). Параметры, при которых осуществлялись исследования, подбирались таким образом (табл. 1), чтобы не оказывать существенного теплового воздействия на поверхность кварцевого стекла, а именно – исключить процесс ее плавления или сублимации.

Таблица 1

Параметры эксперимента

Параметр	№ образца		
	1	2	3
Остаточное давление, Па	1		
Рабочее давление, Па	2,7		
Ток пучка, мА	15		
Ускоряющее напряжение, кВ	4	6	8
Мощность пучка, Вт	60	90	120
Время травления, ч	3		

Контроль температуры при электронно-лучевом воздействии на поверхность кварцевого стекла реализовывался бесконтактным методом с использованием тепловизора FLUKE 200Ti, позволяющим измерять температуру в диапазоне от -20 до $+650$ °С с

точностью ± 2 °С. Преимущество тепловизионного метода перед измерениями, проводимыми оптическим пирометром, заключается в возможности измерения распределения температуры по поверхности всего изделия, а не только в локальной области.

Концентрация пучковой плазмы определялась с использованием зондовой методики. Одиночный зонд Ленгмюра, выполненный из нержавеющей стали с диаметром собирающей поверхности 3 мм, размещался в кварцевой колбе посредством его ввода внутрь через технологическое отверстие на расстоянии 10 см от поверхности мишени.

Анализ состояния поверхности, подверженной воздействию пучка и ионов пучковой плазмы, выполнялся портативным контактным профилометром фирмы «Mahr» – MarSurf PS10, принцип измерения которого заключается в ощупывании индуктивным опорным щупом поверхности. Радиус наконечника щупа – 2 мкм, измерительное усилие 0,75 мН.

Результаты и обсуждение экспериментальных результатов

На рис. 2 представлены измерения шероховатости поверхности образцов после электронно-ионной обработки локального участка поверхности профилометром.

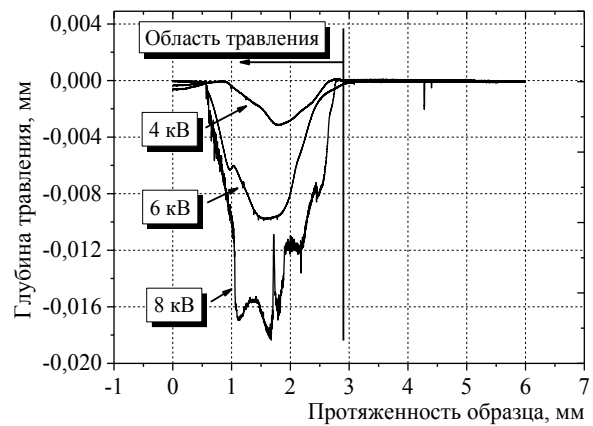


Рис. 2. Профилометрические измерения шероховатости поверхности

Видно, что по мере увеличения энергии электронов пучка увеличивается глубина и, соответственно, скорость травления поверхности кварцевого образца. Это указывает на то, что энергия ионов пучковой плазмы и, соответственно, потенциал мишени, задаваемый пучком, увеличивается с ростом его энергии. Косвенно данное предположение подтверждается визуальной картиной свечения плазмы в колбе (рис. 3). Из рис. 3 видно, что по мере увеличения энергии электронного пучка визуально увеличивается протяженность l области, отделяющей поверхность мишени от плазмы пучка. Эта область представляет собой так называемый ионный слой, в котором происходит некоторое замедление электронов пучка и ускорение ионов пучковой плазмы.

Мониторинг тепловых полей поверхности образцов показал, что температура образцов в области взаимодействия пучка электронов с поверхностью

не превышает 613 °С при максимальных параметрах эксперимента.

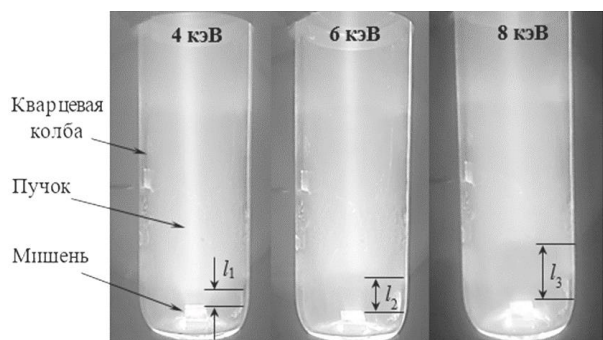


Рис. 3. Свечение пучковой плазмы при различных энергиях пучка

Данное значение значительно меньше температуры плавления (1713–1728 °С) или испарения кварцевого стекла, что указывает на то, что результатом картины шероховатости поверхности, представленной на рис. 2, является именно травление, а не нагрев до плавления или испарения.

Для подтверждения данного предположения проводился следующий эксперимент. Подбирался режим, в котором отсутствовал ионный слой где происходит ускорение ионов из плазмы электронного пучка, что сразу исключало процесс травления поверхности кварца. При этом температура образца составляла 630 °С. На высокоточных весах (погрешность 0,001 г) взвешивался образец до обработки, а затем после обработки электронным пучком. В результате измерений изменение в весе образца находилось на уровне погрешности весов, что свидетельствует об отсутствии уноса материала с поверхности образца при температуре 630 °С. При этом следов травления, плавления или испарения также не обнаружено. Таким образом, если создать условия, в которых формируется ионный слой, ускоряющий ионы до энергии, достаточной для распыления, а температурная нагрузка на поверхность образца диэлектрика не будет превышать 600 °С, то можно будет добиться травления его поверхности.

Выполним анализ полученных результатов по ионному травлению кварца. Прежде всего, обратим внимание, что, судя по рис. 3, придонный ионный слой является достаточно протяженным при всех исследованных энергиях пучка – его ширина l сравнима с диаметром полости. Это дает основание предполагать достаточно большую разность потенциалов $\Delta\phi$ между плазмой и облучаемой пучком поверхностью кварцевой мишени (т.е. потенциал мишени). На основании известной формулы [21], используя экспериментально измеренные значения ширины слоя l и параметров плазмы (концентрации n и электронной температуры T_e), можно оценить величину $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \left[l (ekT_e)^{1/4} / (\epsilon_0/n)^{1/2} \right]^{4/3}. \quad (1)$$

Результаты оценок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величина потенциала образцов для различных энергий пучка

Энергия пучка, кэВ	Ширина слоя l , см	Концентрация плазмы n , см ⁻³	Потенциал мишени $\Delta\phi$, В
4	0,5	$2,43 \cdot 10^{10}$	490
6	1,5	$2,13 \cdot 10^{10}$	1960
8	2,5	$2,16 \cdot 10^{10}$	3910

Как видно из табл. 2, потенциал кварцевой мишени на дне кварцевой полости может достигать достаточно больших значений, сравнимых с энергией пучка. Судя по рис. 2, ширина профилей травления совпадает с диаметром пучка. Это свидетельствует о том, что электроны пучка являются основной причиной формирования высокого отрицательного потенциала в области «отпечатка пучка» на поверхности мишени. С учетом этого рассчитаем скорости ионного травления кварцевой мишени и сравним их с экспериментальными значениями (т.е. оцененными по рис. 2 с учетом длительности эксперимента 3 ч). Большие протяженности придонных ионных слоев свидетельствуют о пренебрежимо малой вторично-электронной эмиссии с поверхности кварца, поэтому вкладом вторичных электронов в образование плазмы можно пренебречь [22]. Тогда радиальное распределение плотности ионного потока $j_i(r)$ с поверхности плазмы на мишень будет определяться исключительно распределением плотности тока электронного пучка $j_b(r)$ и запишется в виде

$$j_i(r) = j_b(r) \sigma_{iAr} (U_a - \Delta\phi) S_b n_g / \pi D, \quad (2)$$

где σ_{iAr} – сечение ионизации атома аргона электронами с энергией, заданной ускоряющим напряжением U_a и уменьшенной на величину потенциала, S_b – площадь поперечного сечения пучка в плоскости мишени, n_g – концентрация газа.

С достаточной степенью точности распределение плотности тока электронного пучка $j_b(r)$ в пределах его радиуса r_b можно описать в виде

$$j_b(r) = j_{b0} \left(1 - r^2/r_b^2 \right), \quad (3)$$

где – плотность тока пучка на его геометрической оси (при $r = 0$), определяемая из условия нормировки:

$$j_{b0} = \frac{I_b}{\int_0^{r_b} \left(1 - r^2/r_b^2 \right) 2\pi r dr}, \quad (4)$$

где I_b – ток электронного пучка, непосредственно измеряемый в эксперименте.

Тогда радиальное распределение скорости ионного травления (в нм/с) кварцевой мишени запишется в виде [23]

$$v(r) = j_i(r) \frac{M_q}{e\rho_q N_a} K_{sp}, \quad (5)$$

где M_q , ρ_q – молярная масса и плотность кварца, K_{sp} – зависящий от энергии ионов коэффициент ионного распыления, который в рамках данных оценок использовался в качестве параметра.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных профилей скорости травления мишени приведено на рис. 4.

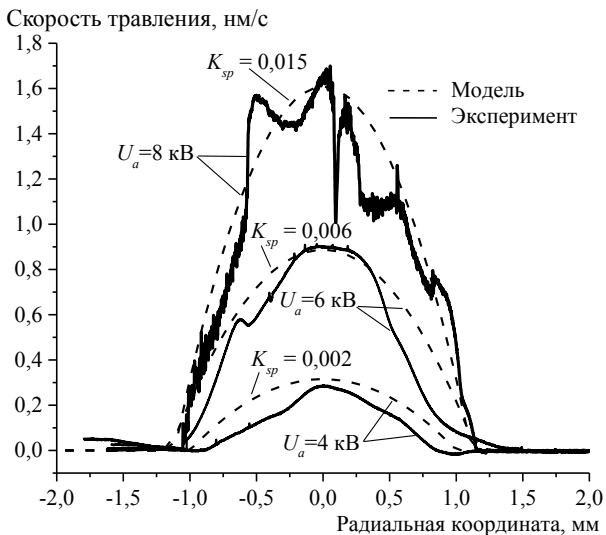


Рис. 4. Экспериментально измеренные (жирные линии) и рассчитанные (пунктирные линии) радиальные распределения скоростей ионного травления кварцевой мишени электронным пучком током 15 мА и энергией 4,6 или 8 кэВ, в кварцевой полости при давлении аргона 4 Па

Из рис. 4 видно, что расчетные распределения скоростей распыления удовлетворительно соответствуют экспериментальным. Отметим, что для всех трех энергий пучка коэффициенты распыления оказались много меньше единицы. Скорее всего это связано с тем, что несмотря на довольно большое падение напряжения в придонном ионном слое (см. табл. 2), его протяженности l все же не хватает для того, чтобы ионы набрали значительную энергию для эффективного распыления мишени. Именно поэтому в этих условиях определяющий вклад в установление скорости травления вносит в основном плотность ионного потока, а не энергия ионов, и, следовательно, максимум скорости распыления совпадает с максимумом плотности ионного потока на оси пучка (рис. 5). Немонотонный характер экспериментальной кривой для $U_a = 8$ кВ объясняется, скорее всего, нарушением симметричности профиля пучка при высоких ускоряющих напряжениях вследствие деформации плазменной эмиссионной границы в форвакуумном источнике электронов.

Заключение

Продемонстрирована возможность ионного травления диэлектрика (кварца) при его размещении на дне диэлектрической полости и облучении непрерывным электронным пучком в форвакуумной области давлений. Профили травления в этом случае будут определяться профилем плотности тока электронного пучка. Достигнуты скорости ионного травления кварца в максимуме профилей от 0,3 до 1,6 нм/с в зависимости от энергии пучка.

Работы по модернизации системы фокусировки и системы отклонения электронного пучка поддержаны грантом Министерства науки и высшего обра-

зования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2020-0038. Работы по осуществлению травления кварца, измерению параметров пучковой плазмы и численному моделированию выполнены при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-703002 р_мол_а.

Литература

1. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr, S.M. Gaytan, D.A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K.N. Amato, P.W. Shindo, F.R. Medina, R.B. Wicker // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2012. – Vol. 28, No. 1. – P. 1–14.
2. Hohn F.J. Electron beam lithography: its applications // *Journal of Vacuum Science and Technology B (Microelectronics Processing and Phenomena)*. – 1989. – Vol. 7, No. 6. – P. 1405–1411.
3. Кайдалов А.А. Сварочные электронные пушки / А.А. Кайдалов, Е.И. Истомин. – Киев: Научно-технический комплекс «Институт электросварки им. Е.О. Патона» Национальной академии наук Украины, 2003. – 153 с.
4. Молоковский С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 303 с.
5. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: Советское радио, 1966. – 455 с.
6. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
7. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 212 с.
8. Крейндел Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 145 с.
9. Generation of electron-beam produced plasmas and applications to surface modification / D. Leonhardt, C. Muratore, S.G. Walton, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, R.A. Meger // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 177–178, No. 30. – P. 682–687.
10. Abraha P. Surface modification of steel surfaces by electron beam excited plasma processing / P. Abraha, Y. Yoshikawa, Y. Katayama // *Vacuum*. – 2009. – Vol. 83. – P. 497–500.
11. Low-temperature nitriding of stainless steel in an electron beam generated plasma / C. Muratore, D. Leonhardt, S.G. Walton, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, R.A. Meger // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 191. – P. 255–262.
12. Nitriding of titanium in electron beam excited plasma in medium vacuum / A.V. Tyunkov, D.A. Golosov, D.B. Zolotukhin, A.V. Nikonenko, E.M. Oks, Y.G. Yushkov, E.V. Yakovlev // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 383. – P. 125241.
13. Gavrilov N.V. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel / N.V. Gavrilov, A.I. Men'shakov // *Technical Physics*. – 2012. – Vol. 57, No. 3. – P. 399–404.
14. On the formation of nanocomposite TiC/a-C:H coatings by the method of the magnetron sputtering of Ti in an electron-beam activated Ar/C₂H₂ mixture / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, A.A. Komarskiy, A.M. Murzakaev, A.V. Chukin // *Journal of Surface Investigation*. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 846–852.

15. Etching with electron beam generated plasmas / D. Leonhardt, S.G. Walton, C. Muratore, R.F. Fernsler, R.A. Meger // *Journal of Vacuum Science and Technology A. Vacuum Surfaces and Films.* – 2004. – Vol. 22, No. 6. – P. 2276–2283.

16. Ceramic coating deposition by electron beam evaporation / E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin // *Surface and Coatings Technology.* – 2017. – Vol. 325. – P. 1–6.

17. Deposition of boron-containing coatings by electron-beam evaporation of boron-containing targets / Y.G. Yushkov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, C. Corbella, D.B. Zolotukhin // *Ceramics International.* – 2020. – Vol. 46, No. 4. – P. 4519–4525.

18. Zolotukhin D.B. On the role of secondary electrons in beam plasma generation inside a dielectric flask by forevacuum plasma cathode electron source / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Physics of Plasmas.* – 2017. – Vol. 24, No. 9. – P. 093502.

19. Zolotukhin D.B. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at forevacuum pressures / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Plasma Sources Science and Technology.* – 2016. – Vol. 25, No. 1. – P. 015001.

20. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum / V.A. Burdovitsin, D.A. Golosov, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, S.M. Zavadsky // *Surface and Coatings Technology.* – 2019. – Vol. 358. – P. 726–731.

21. Lieberman M.A. Fundamental of plasmas and sheaths. Chapter 2 in book: *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition* / Editor A. Anders. – Wiley and Sons, 2000. – 14 p.

22. On the connection between secondary electron emission yield and the potential of an electron-beam-irradiated target / V.A. Burdovitsin, D.B. Zolotukhin, E.M. Oks, N.A. Panchenko // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2019. – Vol. 52. – P. 285204.

23. Behrisch R. *Sputtering by Particle bombardment. Solid State Physics Spectroscopy and Microscopy.* – Berlin. Heidelberg: Springer, 1981. – 284 p.

Тюньков Андрей Владимирович

Канд. техн. наук, с.н.с., доцент каф. физики
Томского государственного ун-та систем управления
и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9742-9636
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: tyunkov84@mail.ru

Золотухин Денис Борисович

Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., доцент каф. физики ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-5206-9486
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: zolotukhinden@gmail.com

Юшков Георгий Юрьевич

Доктор. техн. наук, в.н.с., доцент каф. физики ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-5762-2463
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: yushkovyu@mail.ru

Казаков Андрей Викторович

Канд. техн. наук, н.с., доцент каф. физики ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: andrykazakov@gmail.com

Tyunkov A.V., Zolotukhin D.B.,
Yushkov Yu.G., Kazakov A.V.

Ion-plasma etching initiated by the appearance of a beam

The etching of quartz sample by the flow of energetic ions from the beam plasma produced by continuous electron beam injected in a dielectric cavity in argon in medium vacuum (2.7 Pa) was demonstrated. The energy of bombarding ions was adjusted by the voltage drop on a sheath between a plasma boundary and the cavity bottom charging by the electron beam, so the beam was the only source of generating ions and adjusting their energy. It was found that the etching rate grows with the electron beam energy following the increase in the absolute value of the near-bottom voltage drop.

Keywords: dielectrics etching, beam-produced plasma, plasma-cathode electron source, medium vacuum.

doi: 10.21293/1818-0442-2022-25-3-79-84

References

1. Murr L.E., Gaytan S.M., Ramirez D.A., Martinez E., Hernandez J., Amato K.N., Shindo P.W., Medina F.R., Wicker R.B. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science and Technology*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 1–14.

2. Hohn F.J. Electron beam lithography: its applications. *Journal of Vacuum Science and Technology B (Microelectronics Processing and Phenomena)*, 1989, vol. 7, no. 6, pp. 1405–1411.

3. Kaydalov A.A., Istomin E.I. *Svarochnie electronnie pushki* [Welding guns]. Kiev, Scientific and technical complex «Institute of Electric Welding named after. E.O. Paton National Academy of Sciences of Ukraine», 2003. 153 p. (in Russ.).

4. Molokovskiy S.I., Sushkov A.D. *Intensivnie electronnie i ionnie puchki* [Intense electron and ion beams]. M., Energoatomizdat, 1991. 303 p. (in Russ.).

5. Alyamovskiy I.V. *Electronnie puchki i electronnie pushki* [Electron beams and electron guns], M., Sovetskoe radio, 1966. 455 p. (in Russ.).

6. Novikov A.A. *Istochniki electronov visokovoltного tleyuschego razryada s anodnoy plasmoy* [Electron sources of a high-voltage glow discharge with anode plasma]. M., Energoatomizdat, 1983. 96 p. (in Russ.).

7. Zavyalov M.A., Kreyndel Yu.E., Novikov A.A., Shanturin L.P. *Plasmennye processy v tehnologicheskikh electronnikh pushkakh* [Plasma processes in technological electron guns]. M., Energoatomizdat, 1989. 212 p. (in Russ.).

8. Kreyndel Yu.E. *Plasmennye istochniki electronov* [Plasma sources of electrons]. M., Atomizdat, 1977. 145 p. (in Russ.).

9. Leonhardt D., Muratore C., Walton S.G., Blackwell D.D., Fernsler R.F., Meger R.A. Generation of electron-beam produced plasmas and applications to surface modification. *Surface and Coatings Technology*, 2004. vol. 177–178, no. 30, pp. 682–687.

10. Abraha P., Yoshikawa Y., Katayama Y. Surface modification of steel surfaces by electron beam excited plasma processing. *Vacuum*, 2009. vol. 83, pp. 497–500.

11. Muratore C., Leonhardt D., Walton S.G., Blackwell D.D., Fernsler R.F., Meger R.A. Low-temperature nitrid-

ing of stainless steel in an electron beam generated plasma. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 191, pp. 255–262.

12. Tyunkov A.V., Golosov D.A., Zolotukhin D.B., Nikonenko A.V., Oks E.M., Yushkov Y.G., Yakovlev E.V. Nitriding of titanium in electron beam excited plasma in medium vacuum. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 383, pp. 125241.

13. Gavrilov N.V., Men'shakov A.I. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Technical Physics*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 399–404.

14. Gavrilov N.V., Kamenetskikh A.S., Komarskiy A.A., Murzakaev A.M., Chukin A.V. On the formation of nanocomposite TiC/a-C:H coatings by the method of the magnetron sputtering of Ti in an electron-beam activated Ar/C₂H₂ mixture. *Journal of Surface Investigation*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 846–852.

15. Leonhardt D., Walton S.G., Muratore C., Fernsler R.F., Meger R.A. Etching with electron beam generated plasmas. *Journal of Vacuum Science and Technology A. Vacuum Surfaces and Films*, 2004, vol. 22, no. 6, pp. 2276–2283.

16. Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Y.G., Zolotukhin D.B. Ceramic coating deposition by electron beam evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 325, pp. 1–6.

17. Yushkov Y.G., Oks E.M., Tyunkov A.V., Corbella C., Zolotukhin D.B. Deposition of boron-containing coatings by electron-beam evaporation of boron-containing targets. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 4, pp. 4519–4525.

18. Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M. On the role of secondary electrons in beam plasma generation inside a dielectric flask by fore-vacuum plasma cathode electron source. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, no. 9, pp. 093502.

19. Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at forevacuum pressures. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 015001.

20. Burdovitsin V.A., Golosov D.A., Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Y.G., Zolotukhin D.B., Zavadsky S.M. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 358, pp. 726–731.

21. Lieberman M.A. *Fundamental of plasmas and sheaths. Chapter 2 in book: Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition, Editor A. Anders.* Wiley and Sons, 2000. 14 p.

22. Burdovitsin V.A., Zolotukhin D.B., Oks E.M., Panchenko N.A. On the connection between secondary electron emission yield and the potential of an electron-beam-irradiated target. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, vol. 52, pp. 285204.

23. Behrisch R. *Sputtering by Particle bombardment. Solid State Physics Spectroscopy and Microscopy.* Berlin. Heidelberg, Springer, 1981. 284 p.

Andrey V. Tyunkov

Candidate of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Physics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9742-9636
Phone: +7 (382-2) 41-33-69
Email: tyunkov84@mail.ru

Denis B. Zolotukhin

Candidate of Science in Physics and Mathematics, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-5206-9486
Phone: +7 (382-2) 41-33-69
Email: zolotukhinden@gmail.com

Yury G. Yushkov

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-5762-2463
Phone: +7 (382-2) 41-33-69
Email: yushkovyu@mail.ru

Andrey V. Kazakov

Candidate of Science in Engineering Sciences, Assistant Professor, Department of Physics, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-69
Email: andrykazakov@gmail.com