

О ВОЗМОЖНОСТИ ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ, ИНИЦИИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Д.Б. Золотухин, А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
пр. Ленина 40, 634050 Томск, Россия,
zolutukhinden@gmail.com, tyunkov84@mail.ru, yushkovyu@mail.ru

Представлены результаты, показывающие возможность осуществления процесса иницируемого и контролируемого электронным пучком ионного травления поверхности алюмооксидной керамики, расположенной на дне диэлектрической полости, в области давлений среднего вакуума. Исследования поверхности образца бесконтактным профилометром показали значительное снижение ее шероховатости в области взаимодействия с пучком. Следов потемнения либо оплавления поверхности керамики в области взаимодействия с пучком не зафиксировано, что свидетельствует об уносе вещества под действием ионной бомбардировки без существенного теплового воздействия.

Ключевые слова: электронный пучок; ионное травление; средний вакуум; травление поверхности диэлектриков.

ON THE POSSIBILITY OF ION ETCHING INITIATED BY ELECTRON BEAM

Denis Zolotukhin, Andrey Tyunkov, Yuriy Yushkov
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia,
zolutukhinden@gmail.com, tyunkov84@mail.ru, yushkovyu@mail.ru

The presented results demonstrate the possibility of carrying out the process of electron-beam initiated and controlled ion etching of the surface of alumina ceramics, located at the bottom of the dielectric cavity, in medium vacuum. Studies of the surface of the sample with a non-contact profilometer showed a significant decrease in its roughness in the area of interaction with the beam. No traces of darkening or melting of the ceramic surface in the area of interaction with the beam were recorded, which indicates the removal of the substance under the action of ion bombardment without any significant thermal effects.

Keywords: electron beam; ion etching; medium vacuum; surface etching of dielectrics.

Введение

Начиная с 90-х годов прошлого века в лаборатории плазменной электроники ТУСУР были проделаны работы, направленные на разработку оригинального форвакуумного плазменного электронного источника, способного функционировать в области давлений среднего вакуума 1-100 Па [1]. Известные к тому времени источники электронов функционировали в области, ограниченной верхним пределом давления ниже 0.1 Па.

Отличительной особенностью источников, функционирующих в диапазоне давлений среднего вакуума, является генерация плотной пучковой плазмы (до 10^{10} см⁻³) в области транспортировки электронного пучка. Наличие этой плазмы обеспечивает практически полную нейтрализацию отрицательного заряда, наносимого электронным пучком на изолированную мишень [2]. Данный факт позволил осуществить обработку диэлектриков без использования дополнительных мер по нейтрализации заряда на их поверхности. В дальнейшем был создан ряд источников электронов с различной конфигурацией электронного пучка (коаксиальный, ленточный), функционирующих как в постоянном, так и в импульсном режиме.

Форвакуумные плазменные источники успешно используются для электронно-лучевой сварки диэлектрических деталей, пайки металлокерамических соединений, формирования покрытий, обладающих высокими изоляционными свойствами и повышенной твердостью, а также для ионно-ассистированного азотирования поверхности металла [3].

В указанных выше процессах электронный пучок используется как нагреватель либо испаритель, 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 [4], но только в качестве генератора пучковой плазмы. Травление проходило в газах Ar+SF₆, O₂+SF₆, SF₆ за счет распыления ионами пучковой плазмы, энергия которых задавалась ВЧ генератором.

Авторы [5] 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.

В настоящей работе представлены результаты, показывающие возможность осуществления процесса ионного травления поверхности иницируемого и контролируемого электронным пучком в области давлений среднего вакуума поверхности

алюмооксидной керамики, расположенной на дне диэлектрической полости.

Методика и техника эксперимента

На дно кварцевой полости 3 размещался образец 4, изготовленный из фрагмента алюмооксидной керамики размером 2×2 см² (рис. 1). Плазменный источник электронов формировал пучок электронов 1 с энергией 3.5 кэВ и током 100 мА. Пучок электронов инжектировался в кварцевую полость и частично попадал на фрагмент алюмооксидной керамики.

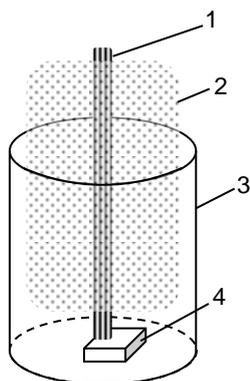


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – электронный пучок; 2 – пучковая плазма; 3 – кварцевая полость; 4 – фрагмент алюмооксидной керамики

Fig. 1. Schematic of the experiment: 1 – electron beam; 2 – beam plasma; 3 – quartz flask; 4 – alumina ceramics

Энергия и ток пучка выбирались таким образом, чтобы, с одной стороны, минимизировать тепловое воздействие электронного пучка на поверхность фрагмента алюмооксидной керамики, с другой стороны, обеспечить потенциал поверхности керамики в месте их взаимодействия на уровне 500 В и выше. Генерируемая в условиях форвакуума пучковая плазма 2 являлась источником ионов, бомбардирующих поверхность керамики.

В качестве рабочего газа использовался аргон. Напуск аргона осуществлялся непосредственно в вакуумную камеру. Для минимизации влияния на процесс травления газов остаточной атмосферы (кислород, углерод и вода), камера предварительно откачивалась до давления порядка 0.01 Па высоковакуумным турбомолекулярным насосом Edwards Next 3000. Затем осуществлялась подача аргона до давления 2.5 Па.

При неизменных параметрах эксперимент продолжался в течение 3 часов, после чего источник пучка выключался, и все элементы установки остывали в вакууме в течение 8 часов. После извлечения фрагмента из камеры следов оплавления или изменения цветового оттенка поверхности керамики (по сравнению с исходным образцом) не зафиксировано.

Анализ профиля поверхности керамики осуществлялся на трехмерном бесконтактном профилометре MicroMeasure 3D Station.

Результаты и их обсуждение

Исследования поверхности образца бесконтактным профилометром показали значительное

снижение ее шероховатости в области взаимодействия с пучком (рис. 2, область внутри овала). Стоит отметить, что значение шероховатости R_a части поверхности образца, не подверженной воздействию электронного пучка, совпадает со значением шероховатости исходной керамики, и составляет порядка 5 мкм. Значение шероховатости R_a области взаимодействия с пучком электронов составляет порядка 2 мкм.

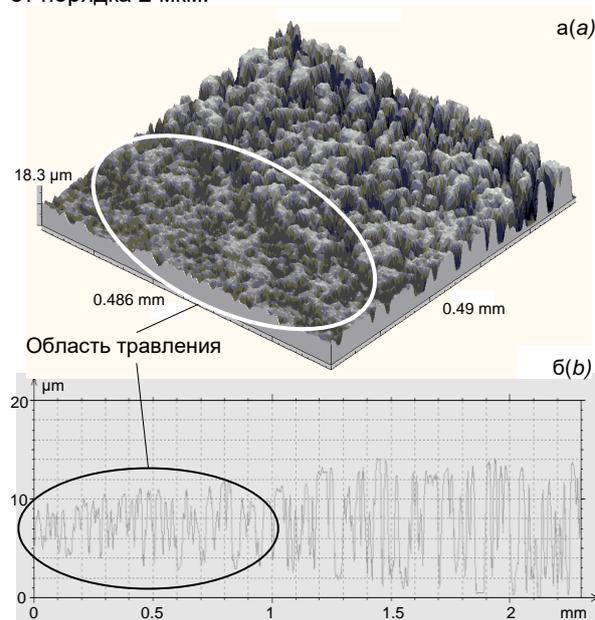


Рис. 2. Профиль поверхности алюмооксидной керамики после травления: а – 3D профиль; б – 2D профиль

Fig. 2. Surface profile of alumina ceramics after etching: (a) - 3D profile; (b) - 2D profile

Наблюдаемый эффект можно объяснить в рамках следующих соображений. В отсутствие облучения поверхности диэлектрика непрерывным электронным пучком энергия (в эВ) однозарядных ионов (преобладающих в пучковой плазме в среднем вакууме) определяется преимущественно температурой плазменных электронов, и, поэтому, определяется разностью потенциалов между плазмой и диэлектриком, численно равной плавающему потенциалу: $e\Delta\varphi_{fl} = kT_e \ln(\sqrt{M_i/2\pi m_e})/2$ [6]. При инжекции электронного пучка в замкнутую диэлектрическую полость [7] удаление заряда из ее объема затруднено, поэтому потенциал дна полости будет формироваться преимущественно за счет приходящих на него пучковых электронов, и область максимального значения отрицательного потенциала будет совпадать с отпечатком пучка.

Необходимость компенсации избыточного заряда ионами плазмы приводит к увеличению протяженности ионного слоя вблизи дна полости, что, в свою очередь, приводит к росту разности потенциалов U между облучаемым участком дна полости и плазмой до величин порядка сотен вольт [5, 7]. Таким образом, плотность энергии ионов, приходящаяся на единицу площади керамики в единицу времени, будет в $\eta = j_i(\Delta\varphi_{fl} + U)/j_i\Delta\varphi_{fl}$ раз больше на участках, непосредственно облуча-

емых пучком электронов и, следовательно, отделенных повышенной разностью потенциалов U от плазмы, при одной и той же концентрации придонной плазмы (рис. 3).

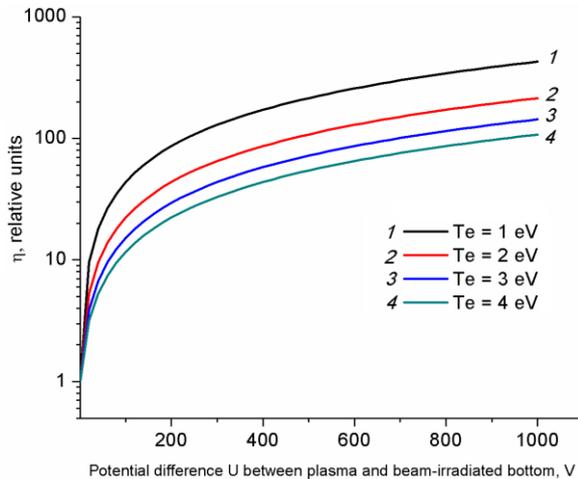


Рис. 3. Зависимость η от величины U при разных значениях температуры плазменных электронов

Fig. 3 Dependence of η on U for different values of electron temperature in beam plasma

Из рис. 3 следует, что, чем меньше температура электронов плазмы и выше разность потенциалов U , тем значительнее доля плотности энергии ионов, ускоренных разностью потенциалов U , обусловленной электронным пучком. Это позволяет предположить возможность осуществления режима сканирующего ионного травления поверхности диэлектрика в результате сканирования его поверхности сфокусированным электронным пучком в среднем вакууме.

Заключение

Показана возможность ионного травления поверхности диэлектрика, инициируемого электронным пучком в области давлений среднего вакуума.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-48-703002 р_мол_а.

Библиографические ссылки

1. Burdovitsin V.A., Oks E.M. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources. *Laser and Particle beams* 2008; 26(4): 619-635.
2. Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений. *Письма в ЖТФ* 2009; 35(11): 61-66.
3. Burdovitsin V.A., Golosov D.A., Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Yu.G., Zolotukhin D.B., Zavadsky S.M. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum. *Surface & Coatings Technology* 2019; 358: 726-731.
4. Leonhardt D., Walton S.G., Muratore C., Fernsler R.F., Meger R.A. Etching with electron beam generated plasmas. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films* 2004; 22(6): 2276-2283.
5. 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; 24(9): 093502.
6. Chen F.F., Arnush D. The floating potential of cylindrical Langmuir probes. *Physics of Plasmas* 2001; 8(11): 5051-5052.
7. Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at fore-vacuum pressures. *Plasma Sources Science and Technology* 2016; 25(1): 015001.

References

1. Burdovitsin V.A., Oks E.M. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources. *Laser and Particle beams* 2008; 26(4): 619-635.
2. Burdovitsin, V.A., Klimov, A.S., Oks, E.M. On the possibility of electron-beam processing of dielectrics using a forevacuum plasma electron source. *Technical Physics Letters* 2009; 35(6): 511-513.
3. Burdovitsin V.A., Golosov D.A., Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Yu.G., Zolotukhin D.B., Zavadsky S.M. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum. *Surface & Coatings Technology* 2019; 358: 726-731.
4. Leonhardt D., Walton S.G., Muratore C., Fernsler R.F., Meger R.A. Etching with electron beam generated plasmas. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films* 2004; 22(6): 2276-2283.
5. Burdovitsin, 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; 24(9): 093502.
6. Chen F.F., Arnush D. The floating potential of cylindrical Langmuir probes. *Physics of Plasmas* 2001; 8(11): 5051-5052.
7. Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at fore-vacuum pressures. *Plasma Sources Science and Technology* 2016; 25(1): 015001.