Форвакуумный импульсный источник электронов с плазменным катодом для модификации поверхности непроводящей керамики

Ю. Г. Юшков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники 634050 Россия, Томск e-mail: YuYushkov@sibmail.com

Описан плазменный источник электронов, предназначенный для формирования импульсного широкоапертурного электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений (5–20 Па). Источник основан на использовании тлеющего разряда с полым катодом. Достигнутые параметры электронного пучка и особенности функционирования источника в форвакуумной области давлений позволяют эффективно его использовать для модификации поверхностных свойств непроводящих материалов. Представлены результаты экспериментов по облучению непроводящей алюмооксидной керамики импульсным электронным пучком в форвакууме. Установлено сглаживание поверхности и возрастание твердости приповерхностного слоя в результате обработки электронным пучком.

Введение

На сегодняшний день как в научных лабораториях, так и в промышленности все большее применение находят пучковые технологии модификации поверхности материалов. С помощью этих технологий достигаются повышение износо- и коррозионной стойкости, динамической прочности изделий, полировка поверхности, уменьшение коэффициента трения, удаление отработанных покрытий. Пучковые технологии также применяются для отжига материалов после имплантации ионов. Интерес к этим технологиям обусловлен тем, что их применение в промышленности вместо традиционных методов, таких как термообработка в печах, закалка в кислотных и солевых растворах, гальваническое нанесение покрытий, экономит электроэнергию, повышает эффективность производства, уменьшает или исключает экологически вредные последствия производства. Плазменно-пучковые технологии в ряде случаев позволяют получать структурно-фазовые состояния материалов, которые при традиционных методах воздействия не реализуются.

Среди пучковых технологий значительное место занимает электроннолучевая обработка материалов. Она широко используется при обработке металлов и иных проводящих веществ. Электронный луч, как правило, получают и используют в вакуумных системах в интервале давлений от 10⁻⁴ Па (термокатодные пушки) до 10⁻¹ Па (пушки с плазменным катодом). В последнее время существенное развитие получили форвакуумные источники электронов с плазменным катодом [1]. Принципиальным отличием этих устройств является их способность к генерации пучков в ранее недоступной области давлений 5–20 Па, которая достигается использованием лишь одной механической (форвакуумной) ступени откачки.

Как было показано ранее, в форвакуумной области давлений при воздействии ускоренного электронного пучка на изолированную мишень, несмотря на энергию пучка в несколько килоэлектронвольт, установившийся плавающий потенциал этой мишени оказывается близким к потенциалу земли [2]. Это обусловливает возможность эффективной обработки диэлектриков электронным пучком с энергией, практически соответствующей величине ускоряющего напряжения. Применение форвакуумных плазменных электронных пушек для обработки непроводящих материалов успешно продемонстрировано на примере сварки алюмооксидной керамики непрерывным сфокусированным электронным пучком [3]. Для использования электронных пучков в импульсном режиме для непосредственной поверхностной обработки непроводящих материалов, в первую очередь различных керамик, следует обеспечить генерацию в форвакуумной области давлений импульсного пучка с относительно большим поперечным сечением. При этом удельные параметры пучка, главным образом плотность энергии пучка в импульсе, должны достигать значений, достаточных для эффективной обработки поверхности. В микросекундном диапазоне длительностей этот параметр должен быть порядка 10 Дж/см² [4]. Настоящая статья посвящена разработке форвакуумного широкоапертурного импульсного электронного источника и исследованию возможностей его применения для модификации поверхности непроводящей керамики.

Плазменный источник электронов, характеристики и параметры

Схематично конструкция форвакуумного плазменного источника импульсного пучка электронов представлена на рис. 1.



Рис. 1. Импульсный источник электронов: *l* – полый катод, *2* – катодная вставка, *3* – изолятор, *4* – анодый фланец, *5* – анодная сетка, *6* – изолятор ускоряющего промежутка, *7* – экстрактор

Выполненный из меди катод 1 содержит цилиндрическую полость диаметром 93 и высотой 70 мм. На оси полости установлена катодная вставка 2 диаметром 19 мм. Сеточный анод 5 выполнен в виде сетки из нержавеющей стали, размер ячейки сетки 0,6×0,6 мм, а геометрическая прозрачность 70 %. Сеточный анод 5 закреплен на фланце 4. Собранный узел полого катода установлен на изоляторе 6. Плоскопараллельный ускоряющий промежуток образован двумя сетчатыми электродами: анодом 5 и экстрактором 7. Сетка экстрактора 7 (2,5×2,5 мм, 70 %) также изготовлена из нержавеющей стали. Изоляторы 3 и 6 разрядного и высоковольтного промежутков выполнены из капролона. Диаметр и высота изоляторов соответственно равны 100 и 70 мм для разрядного и 146 и 40 мм для ускоряющего промежутков. Источник электронов размещался на вакуумной камере, откачиваемой механическим насосом до предельного давления 1 Па.

Источник работал в условиях постоянного напряжения на ускоряющем промежутке. Формирование импульсов тока осуществлялось подачей импульсного напряжения на разрядный промежуток. Напряжение на ускоряющем промежутке не только обеспечивало ускорение электронов, но и существенно облегчало зажигание разряда в полом катоде за счет потока ионов, сформированного в высоковольтном слаботочном разряде в ускоряющем промежутке [5].

Переход в форвакуумный диапазон давлений практически не влиял на высокую стабильность и повторяемость параметров импульсного электронного пучка, характерную для плазменных источников электронов в целом. Типичные осциллограммы тока разряда и тока эмиссии электронов (полного тока пучка) представлены на рис. 2. Обратим внимание на достаточно высокую эффективность извлечения электронов из плазмы (ток пучка достигает значений, близких к току разряда). Напряжение на ускоряющем промежутке во время импульса оказывалось на 1-2 кВ ниже исходного, что обусловлено падением напряжения на балластном резисторе, ограничивающем ток пробоя.



Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока разряда *1* и тока эмиссии электронов *2*. Ускоряющее напряжение 10 кВ, давление газа (воздуха) 12 Па

Вольт-амперные характеристики электронного источника приведены на рис. 3. На них наблюдается четко выраженный участок насыщения тока, однозначно свидетельствующий о незначительном вкладе в полный ток пучка вторичных электронов, выбитых с эмиссионной сетки обратным потоком ионов из области ускорения и транспортировки электронного пучка. Несмотря на то, что вклад вторичных электронов может существенно увеличивать ток электронного пучка [6], такой режим работы плазменного источника не представляется эффективным, поскольку вторичные электроны формируют положительную обратную связь с первичным током пучка, существование которой обусловливает возникновение неустойчивости эмиссионного тока, приводящей к пробою ускоряющего промежутка.



Рис. 3. Вольт-амперные характеристики источника при токах разряда, А: *I* – 80, *2* – 60, *3* – 40. Давление газа (воздуха) 15 Па

Для исследования распределения плотности тока по сечению пучка, использовался ленгмюровский зонд, расположенный на трехкоординатной перемещающейся системе.

Результаты измерений плотности тока пучка представлены на рис. 4. Как видно, распределения плотности тока имеют весьма неравномерный характер. Для выяснения причин этой неоднородности было определено радиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы путем измерения ионного тока на зонд, размещаемый в непосредственной близости к эмиссионному электроду. Полученная кривая (рис. 5) имеет форму, близкую к симметричной и отличается от кривой, представленной на предыдущем рисунке. Таким образом, неоднородность эмиссионного тока обусловлена не неоднородностью плазмы, но иными причинами. Одна из таких причин заключается в неплоской форме эмиссионного электрода. Это приводит к нарушению однородности ускоряющего поля и, как следствие, к неоднородности эмиссии.



Рис. 4. Распределение плотности тока



Рис. 5. Концентрация плазмы вблизи эмиссионной поверхности

В первом варианте анодный электрод представлял собой два плоских кольца выполненных из нержавеющей стали, между которыми зажималась сетка. Такая система не могла обеспечить равномерное натяжение анодной сетки. Для устранения данной проблемы был создан новый анодный узел (рис. 6).



Рис. 6. Система натяжения анодной сетки

Принцип конструкции заключается в том, что на одном из колец, между которыми зажимается сетка, выполнен паз, а на втором кольце (ответной его части) имеется выступ. Таким образом, при сжатии колец сетка натягивается, при этом качество натяжения сетки гораздо лучше, чем в первой конструкции. После изменения системы натяжения эксперименты были проведены повторно и показали улучшение равномерности распределения плотности тока по сечению пучка. Однако на оси пучка плотность тока оказалась заметно меньшей, чем на периферии (рис. 7), причем распределение плотности тока по форме соответствовало распределению плотности эмиссионной плазмы (см. рис. 5).



Рис. 7. Распределение плотности тока, L=70 мм

Для улучшения однородности плазмы проведена серия экспериментов, в которых исследовалась зависимость распределения плотности тока от длины L катодной вставки 2(см. рис. 1). Изменение L от нуля до максимального значения, соответствующего высоте катодной полости, вызывало изменение формы распределения плотности тока от колоколообразной до двугорбой с плотностью тока в центре, близкой к нулю. Оптимальная длина этой вставки оказалась равной 65 мм. Соответствующее распределение плотности тока представлено на рис. 8.



Рис. 8. Распределение плотности тока, L=65 мм

Проведенные эксперименты дают основания указать две основные причины неоднородности электронного пучка по его сечению. Первая связана с неоднородностью эмиссии электронов вследствие нарушения плоскопараллельности ускоряющего промежутка. Эта причина устраняется натяжением эмиссионной сетки. Вторая причина состоит в неоднородности самой эмиссионной плазмы. Эта неоднородность обусловлена особенностями разряда с полым катодом, содержащим цилиндрическую вставку. Оптимизация размеров этой вставки позволила устранить радиальную неоднородность эмиссионной плазмы и обеспечить в сечении пучка диаметром 40 мм неоднородность, не превышающую 10 % при плотности тока 0,6 A/см².

Применение электронного пучка для модификации поверхности керамики

Сфокусированные электронные пучки применялись для плавления поверхности алюмооксидной керамики. В качестве тестируемого объекта выбрана пластина толщиной 1 мм из керамики ВК95 на основе оксида алюминия. При этом количество импульсов, воздействующих на керамику, варьировалось от 50 до 500. Морфология поверхности изучалась с помощью трехмерного бесконтактного профилометра Micro Measure 3D Station. Твердость измерялась микротвердомером Виккерса ZHV1-М. Сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM1000, а также оптические микроскопы MEC-10 и JJ-Optics Digital Lab, использовались для определения толщины модифицированного слоя.

Как показали эксперименты, обработка керамических пластин в режиме одиночных импульсов с плотностью энергии выше 10 Дж/см² из-за возникающих напряжений часто приводила к растрескиванию и даже разрушению пластин. В связи с этим был выбран режим многократного облучения с меньшей плотностью энергии в пучке и периодом повторения 1 сек. Результатом такого облучения стало образование в приповерхностной области слоя со структурой, отличной от структуры исходного материала (рис. 9). Поверхность керамики заметно сглаживалась (рис. 10), что может указывать на преимущественное оплавление острых пиков. Еще один результат состоял в повышении твердости приповерхностного слоя (рис. 11, табл. 1). Этот результат не относится к категории неожиданных, поскольку аналогичный эффект наблюдался, например в работе [7], и объяснялся структурно-фазовыми изменениями при плавлении и последующей кристаллизации.



Рис. 9. Поперечный скол керамики, обработанной электронным пучком. Плотность энергии в импульсе 10 Дж/см², количество импульсов 300



Рис. 10. Профилограммы поверхности керамики до (*a*) и после (δ) облучения. Плотность энергии в импульсе 10 Дж/см², число импульсов 100



Рис. 11. Распределение микротвердости H по глубине x образца. Плотность энергии в импульсе 10 Дж/см², число импульсов 100

Ta	аблица	1
Микротвердость поверхности керами	іки	
до и после обработки		

Исходная керамика, МПа	4979	5664	7862	3864
Обработанная керамика, МПа	14587	14620	8996	8632

Продолжение табл. 1

Исходная керамика, МПа	6057	2473	5149
Обработанная керамика, МПа	8250	8683	10678

В таблице 2 приведены результаты взвешивания керамических образцов до и после обработки различным числом импульсов. Как можно заметить, при числе импульсов 10 с периодом следования 1 сек уноса материала не наблюдается. Большее число импульсов облучения вызывает заметное снижение массы образца. При увеличении периода следования импульсов до 60 сек унос материала отсутствует даже при 100 импульсах облучения.

Таблица 2

Результаты измерения массы керамических образцов до и после облучения

Число импульсов	10	30	100
Δm, г	0	0,010	0,045

Эти результаты подтверждают сделанный в [8] на основании расчетов вывод о решающей роли температуры всего образца, повышающейся от импульса к импульсу. При очередном облучении импульсным пучком поверхностный слой успевает прогреться до температуры, превышающей температуру испарения, что и вызывает унос вещества. Снимки, выполненные в растровом микроскопе, позволяют проследить эволюцию структуры приповерхностного слоя. Исходная керамика не содержит особенностей (рис. 12а). Ее структура состоит из преимущественно равноосных зерен размером от 0,5 до 7 мкм и содержит полости, обеспечивающие остаточную пористость до 10 %. Облучение исследуемого материала электронным пучком при числе импульсов, равном 10, и $\tau = 1$ сек существенным образом изменяет вид поверхности. Она представляет собой застывший после расплавления слой (рис. 12б). Это дает основания для предположения о рекристаллизации после плавления исходных кристаллитов. Переплавленный слой плотно упакован вытянутыми элементами длиной 0,5–1,5 мкм и поперечным размером 0,1–0,2 мкм. Эти участки, по-видимому, ответственны за повышение микротвердости обработанных образцов.





Рис. 12. Микрофотография поверхности исходной (*a*) и обработанной (*б*) керамики

Заключение

В результате выполненной работы показано, что источник электронов на основе разряда с полым катодом, содержащим осевую цилиндрическую вставку, обеспечивает в диапазоне давлений 5–15 Па генерацию импульсного пучка с параметрами: диаметр пучка 6 см, плотность тока 8 А/см², энергия 8 Дж/см². При длительности импульсов 250 мкс указанные параметры обеспечивают модификацию поверхности алюмооксидной керамики, что проявляется в ее сглаживании и возрастании микротвердости не менее, чем в два раза, в слое толщиной 3–4 мкм. Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 11-08-12052 ОФИ-м и Минобрнауки, проект РФ 3.2372.2011.

Литература

1. Burdovitsin V. A., Oks. E. M. $\prime\prime$ Laser and particle beams. 2008. Vol. 26 (4). P. 619.

2. Медовник А. В., Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // ФиХОМ. 2010. № 3. С. 39.

3. Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2009. № 11. С. 61.

4. Иванов Ю. Ф., Коваль Н. Н., Колубаева Ю. А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 10/3 (спец. выпуск). С. 29.

5. Жирков И. С., Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Осипов И. В. // ЖТФ. 2006. № 10. С. 138.

6. Григорьев С. В., Девятков В. Н., Коваль Н. Н., Тересов А.Д. // Письма в ЖТФ. 2010. № 4. С. 23.

7. Коваль Н. Н., Иванов Ю. Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Изв. вузов. Физика. 2008. № 5. С. 60–70.

8. Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Скробов Е. В., Юшков Ю. Г. Модификация поверхности керамики импульсным электронным пучком, генерируемым форвакуумным плазменным источником // Перспективные материалы. № 6. 2011. С. 77–82.