

## ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С АНОДНЫМ СЛОЕМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

*А.А. Гончаров, А.Н. Добровольский, С.Н. Павлов, И.М. Проценко, Е.Г. Костин*  
*Институт физики Национальной Академии наук Украины, г.Киев, Украина,*  
*dobr@iop.kiev.ua*

Современные технологии магнетронного напыления технологических и декоративных покрытий сегодня широко используются во всем мире. Наряду с использованием вакуумно-дуговых методов обработки они позволяют отказаться от экологически вредных химических методов получения слоев с заданными параметрами. Для получения качественных покрытий необходима предварительная очистка и активация поверхности непосредственно перед напылением. Наиболее логичным решением представляется использование для этих целей плазменных источников близкого к магнетронам типа. Представляемая статья посвящена рассмотрению возможности работы в едином технологическом цикле с магнетроном различных модификаций плазменного ускорителя с анодным слоем. Представленные результаты демонстрируют высокую эффективность таких устройств и возможность создания технологических линий по непрерывной обработке поверхностей с различной геометрией. Скорости травления по меди (больше 1 нм/с) не уступают лучшим известным данным для источников кауфмановского типа. Диапазон рабочих давлений (до  $1,2\text{-}3 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.) позволяет их размещать в общей камере с магнетроном.

### 1. ВСТУПЛЕНИЕ

В современном мире всё большее значение приобретают ресурсо- и энергосберегающие экологически чистые технологии. К их числу с полным правом можно отнести технологии плазменной модификации материалов. Наиболее отработанными можно считать технологии магнетронной и плазменно-дуговой обработки. Они позволяют отказаться от экологически вредных химических методов получения покрытий с заданными параметрами. Однако для получения ожидаемых результатов большое значение имеет чистота обрабатываемой поверхности.

Для построения полностью плазменной технологии необходимы методы эффективной очистки и активации обрабатываемой поверхности непосредственно перед напылением. Известно, что в этих целях можно использовать различные виды газового разряда и тот же магнетрон. Однако скорость обработки газовым разрядом невысока, и обрабатывается весь объем рабочей камеры, что часто очень не желательно. Переполюсовка магнетронного разряда вообще возможна только в случае проводящей мишени. Эти проблемы отсутствуют в случае использования для этих целей ионных источников типа Кауфмановского. Но получение с их помощью однородных пучков с большими линейными размерами задача очень не простая, и их обслуживание сопряжено со значительными затратами. Из литературы известно, что плазменный поток тоже модифицирует поверхность, и в случае применения перед нанесением покрытия улучшает адгезию, прочность, электрические и химические свойства получаемых покрытий.

Уже давно разработаны источники, способные

давать сформированный плазменный поток и обладающие хорошим потенциалом масштабируемости. Они достаточно простые по конструкции и в эксплуатации. Наибольшей простотой конструкции отличаются одноступенчатые плазменные ускорители с анодным слоем, УАС-ы. Исходя из всего этого, логично было изучить возможности их применения в установках плазменного напыления функциональных покрытий в качестве источников плазмы для очистки и активации поверхности обрабатываемых материалов.

Исследованию ускорителей с замкнутым дрейфом электронов посвящена обширная литература [1]. Однако за свою полувековую историю развития эти ускорители использовались преимущественно как ракетные двигатели. Поэтому большая часть исследований была направлена на достижение максимально возможной скорости плазменного потока и газовой экономичности ускорителя в условиях космических аппаратов.

В технологических применениях ускорителя на первое место выдвигаются – однородность обработки материала, отсутствие в системе накаливаемых элементов, простота обслуживания и легкость интеграции с существующими технологическими процессами. Это, в свою очередь, привело к необходимости пересмотра ряда положений, используемых при проектировании ускорителей. Эти изменения должны привести к появлению новых режимов работы и не могут не отразиться на динамике горения разряда.

Результатам изучения режимов работы и динамики горения разряда в этих условиях и посвящена эта статья.

## 2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Мы спроектировали, изготовили и испытали несколько модификаций УАС-ов с разрядным каналом нескольких геометрий. [2,3] Основной интерес для технологических применений представляет случай эллиптического канала известного в зарубежной литературе как “gasetrack”. Далее для удобства будем его называть – “стадион” (рис.1). В направлении длинной оси его можно легко “растягивать” до нескольких метров без потери функциональности. Вторым практически интересным вариантом является УАС в торообразной геометрии с конвергирующим ионно-плазменным потоком, направленным нормально к оси тора. Внешне прибор напоминает бублик через дырку которого пропускается обрабатываемая деталь. Ускорительный канал расположен на внутренней стороне поверхности тора. Так как ионно-плазменный поток сходится к центру отверстия, одновременно, происходит баллистическая фокусировка потока на обрабатываемой поверхности (рис.2). В тоже время, характеристики и особенности горения разряда во всех случаях практически совпадают со случаем классического кольцевого УАС-а (рис.3). Это говорит о возможности создания устройств очистки такого типа с почти любой геометрией.



Рис.1. УАС в геометрии тора



Рис.2. УАС в геометрии стадиона

Эксперименты выполнялись на разных установках. Основная часть результатов получена на установке, описанной в [2]. Ширина ускорительного канала для всех устройств составляет 1 см. Магнитные системы собраны на основе постоянных магнитов. Принудительная компенсация пространственного заряда получаемого потока в большей части экспериментов отсутствует. Катод ускорителя обычно заземлен, а напряжение величиной до 2,5 кВ прикладывается к аноду. Рабочий газ – аргон. Газ подается прямо в камеру. Диэлектрическая (обычно – стекло) или проводящая мишень находится на расстоянии  $\sim 7$  см от ускорителя.

Ранее [2,3] было установлено, что в технологических установках, где устройства будут использоваться в паре с магнетронными распылительными системами, оправдано подавать газ не через анод или катод ускорителя, а прямо в объем рабочей камеры. При этом двукратно возрастает скорость очистки для киловольтных напряжений на разряде с одновременным смещением рабочих давлений в область  $10^{-3}$  мм рт. ст.

Для проверки скоростей очистки, измеренных методом восстановления э.д.с. фотодиода, было выполнено прямое измерение глубины вытравленного канала. Образец травился в течение



Рис.3. УАС в коаксиальной геометрии с установленной подставкой для образцов

$\sim 2$  ч и затем измерялась глубина образовавшегося канала стандартным микрометром.

Анод расположен в нарастающем магнитном поле под полюсными наконечниками. Величина магнитного поля в месте расположения анода порядка 50% от максимальной в канале. Такая схема расположения анода отвечает рекомендациям по уменьшению влияния неустойчивостей различного типа на работу ускорителя и увеличивает скорости очистки. Соотношение глубины канала к его ширине близко к  $\frac{1}{2}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение полого анода в технологических целях не представляется оправданным [3]. В этом случае поток имеет кроссовер. Края зоны травления сильно “расплываются”, хотя его скорость на оси канала возрастает. В то же время, интегральная скорость в пересчете на площадь канала травления скорее падает.

В случае обычного плоского анода, под каналом ускорителя на образце видна зона, повторяющая форму канала шириной ~5...7мм в пределах которой

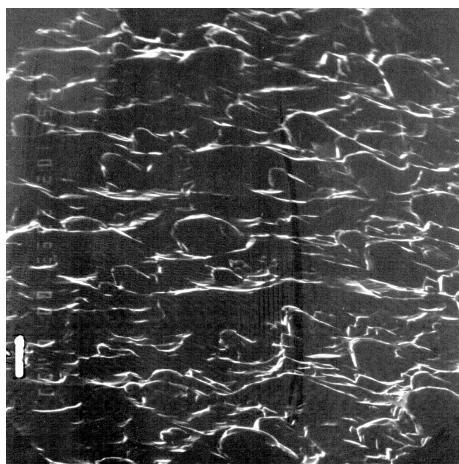


Рис.4. Поверхность меди в центре канала травления. Белая метка – 10 мкм

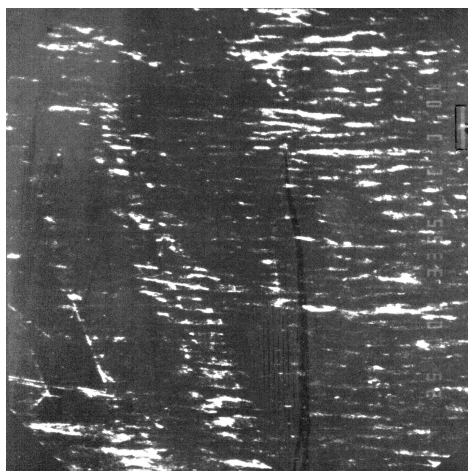


Рис.5. Поверхность меди до обработки

скорость травления практически одинакова. За её пределами скорость очистки резко падает. Профиль очистки оказывается близок к П-образному.

Полученные на растровом электронном микроскопе снимки поверхности меди до и после обработки показано на рис.4-6.

Все снимки сделаны в одном разрешении под углом 60° к поверхности образца. На них видны типичные фигуры ионного травления. В местах вкраплений или по граням кристаллических зерен образуются выступающие острова. На краю пучка (см. рис.5) образуется квазирегулярная структура таких выступов с учётом направления падения ионов потока. При малых временах травления шероховатость поверхности растет с последующим

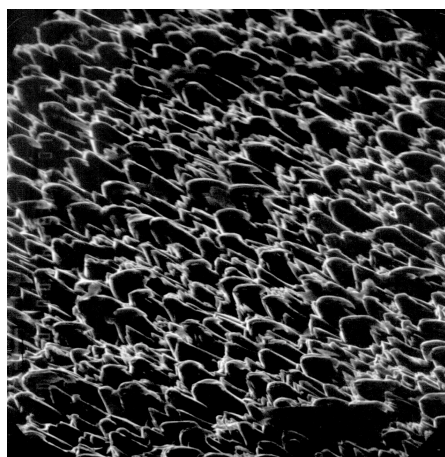


Рис. 6. Поверхность меди на краю канала травления

образованием собственно канала травления. На экране растрового микроскопа рельеф поверхности, обработанной с малой временной выдержкой до 1...5 минут в зависимости от материала, увидеть нельзя, но четко видна обработанная область. Те же результаты дает измерение шероховатости поверхности и атомная микроскопия поверхности [4]. Высота рельефа в этом случае порядка 1~10 нм.

Все варианты устройства очистки обеспечивают высокую скорость травления поверхности меди от 1 нм/с и выше в узком диапазоне давлений[3].

При переходе давления в область выше  $1,2 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. резко возрастает скорость напыления материала катода вне основного канала очистки. Начинается интенсивное распыление щечек канала ускорителя, и скорость осаждения распыленного материала катода превышает скорость распыления материала образующейся пленки ионами потока. Падение скорости очистки обусловлено ростом потенциала обрабатываемой диэлектрической мишени почти до уровня прикладываемого к разрядному промежутку разрядного напряжения. Кроме того, с ростом давления в пространстве перед и вокруг ускорителя могут загораться дополнительные несамостоятельные разряды. Подробно такое поведение системы обсуждается в [3,5]. В тоже время улучшение откачки полостей в магнитной системе за анодом ускорителя позволяет несколько продвинуться в область низких давлений. Рис.7 показывает пример типичных вольт-амперных

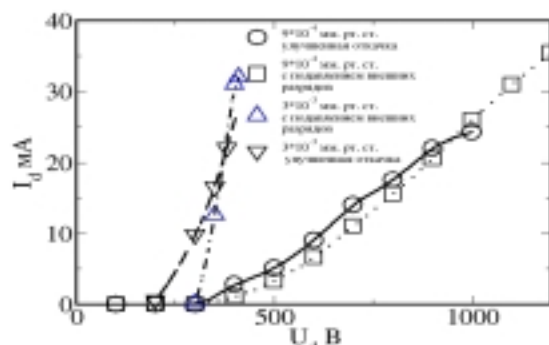


Рис. 7. Примеры ВАХ УАС-а в геометрии тора

характеристик (ВАХ) источника в геометрии тора с улучшенной откачкой и подавлением внешних дополнительных разрядов и без него. Видно, что подавление всех дополнительных разрядов улучшает электро-технические характеристики устройства. За счет улучшения электрической прочности разрядного промежутка удается получить больший разрядный ток при том же давлении и соответственно большую скорость травления. Выше указанных значений по напряжению разряд становится неустойчивым и может переходить в дуговую фазу.

Проблему компенсации плавающего потенциала мишени можно решить добавлением в схему очистки накатных эмиттеров. Но это сразу ухудшит технологические возможности системы. В [5] было показано, что при горении одного из дополнительных разрядов над лицевой поверхностью ускорителя, потенциал мишени ниже, чем при подавленных всех внешних разрядах. Это говорит о возможности использования дополнительного разряда любого типа для наработки компенсирующих электронов в пространстве транспортировки пучка.

Наиболее простым решением представляется добавление в промежутке между лицевой поверхностью ускорителя и мишенью конструкции типа полого катода [6]. Большой размер поверхности такого катода обеспечивает ему нормальный тепловой режим даже без принудительного охлаждения и позволяет ожидать генерации нужного количества электронов. Эксперимент подтверждает работоспособность такого решения с катодом простейшей конструкции. В нашем эксперименте потенциал падает не до нуля (рис.8). Скорее всего, это вызвано наличием магнитного поля сложной геометрии над лицевой поверхностью ускорителя [5] и неоптимальностью использованной конструкции катода. Кроме того, компенсатор не должен мешать эффективной обработке изделия. В нашем случае катод имел форму тора с прямоугольным сечением без внутренней поверхности. Анодом разряда служил сам ионный поток.

Известно, что на работу ускорителей оказывают влияние также и динамические свойства разряда.

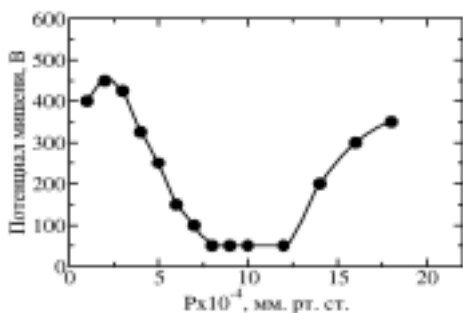


Рисунок 8. Плавающий потенциал мишени с компенсатором типа полого катода

Мы получили осциллограммы тока разряда и потенциала мишени в разных режимах работы

ускорителя. В области давлений ниже  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. разряд горит почти без модуляции. В диапазоне выше  $3 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. становится очень нестабильным и может переходить в дуговую форму.

В рабочем диапазоне давлений ток разряда очень сильно модулирован. Моменты максимума тока совпадают с минимумами потенциала мишени, т. е. очистка максимально эффективна. Большую часть времени ток разряда сильно ограничен. Характерные времена длительности выбросов тока порядка  $5 \cdot 10^{-9}$  с с периодичностью их следования около  $10^{-8}$  с. Возможно это связано с запираем ток электронов собственным объемным зарядом или наоборот с нехваткой электронов учитывая отсутствие компенсатора. Создание условий, уменьшающих модуляцию тока разряда, позволит существенно поднять значения скорости травления поверхности.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, повышение скорости очистки обрабатываемых поверхностей для устройств типа УАС-а с самостоятельным разрядом и повышении их рабочих давлений возможно путём использования дополнительных внешних разрядов с холодным катодом для генерации электронов в области транспортировки ионно-плазменного потока к мишени и стабилизации тока разряда.

Работа выполнена при частичной поддержке НТЦУ проект №1596.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ионные инжекторы и плазменные ускорители.* / Под. ред. А.И. Морозова и Н.Н. Семашко, М: «Энергоиздат», 1990.
2. A.A. Goncharov, A.M. Dobrovolskii, O.A. Panchenko, S.N. Pavlov, I.M. Protsenko. Technological accelerator with closed electron drift for surface treatment // *Problems of Atomic Science and Technology*, Series: Plasma Physics (6), 2000, #6, pp. 160-162.
3. A.N. Dobrovolskii, A.A. Goncharov, S.N. Pavlov, O.A. Panchenko, I.M. Protsenko. Modernized technological accelerator with anode layer for ion cleaning // *Problems of Atomic Science and Technology*. Series: Plasma Physics (7), 2002. #4. p.176-178.
4. Oleg Yaroshchuk, Ruslan Kravchuk and Andriy Dobrovolsky, Liou Qiu and Oleg D. Lavrentovich Two Modes of LC Parallel Alignment on the Plasma Treated Substrates // *SID 03 DIGEST*. 2003. SID 2003, 18-23 May, Baltimore, USA.
5. S.N. Pavlov, A.A. Goncharov, A.N. Dobrovolsky, I.M. Protsenko. Peculiarities of self-sustained discharge in closed electron drift accelerator based on permanent magnets // *Problems of Atomic Science and Technology*. Series: Plasma Physics (8), 2002. #5. p.133-135.
6. Б.И. Журавлев, В.А. Никитинский, А.С. Захаров Источник ионов на основе разряда в скрещенных полях // *Приб. и техн. эксперим.* 1977, #4, с.204.

