

Метод формирования распределения ионных потоков для операций плазменно-ионной обработки

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Разработан метод формирования ионных потоков, суть которого заключается в комбинировании различных распределений ионного потока, получаемых при воздействии на плазму магнитного поля. Выделяются две основные схемы – подложка является электродом в цепи генерации плазмы, т.е. является частью источника; и подложка взаимодействует с внешним источником плазмы и не является электродом в цепи генерации плазмы. В первом случае предложено использовать магнитное поле арочной конфигурации для управления шириной распределения путем изменения радиуса кривизны силовых линий магнитного поля в области поддержания разряда. Для второго случая рационально формирование ионных потоков с помощью магнитных ловушек, которые создаются на пути следования потока плазмы с помощью магнитных полей с конфигурацией пробкотрона.

Ключевые слова: плазменно-ионная обработка; формирование ионных потоков.

Введение

Плазменно-ионные технологии (ПИТ) широко используются в различных отраслях промышленности для травления, очистки, модификации поверхности и осаждения покрытий, что позволяет изменять оптические свойства поверхности, повышать стойкость инструмента, увеличивать ресурс изделий, создавать биосовместимые материалы и осаждать декоративные покрытия. Основными параметрами обрабатываемого потока являются энергия ионов и плотность ионного тока, которые вместе определяют температуру изделия, скорость обработки, а также физико-химические процессы формирования поверхности с целью получения заданных характеристик. В предыдущих работах [1–4] была описана проблема формирования ионных потоков с заданными характеристиками и показана возможность формировать распределение плотности ионного потока вдоль поверхности обрабатываемой подложки путем использования магнитных полей. В данной работе описан метод формирования ионных потоков для реализации различных распределений ионных потоков на разных операциях ионной обработки с целью повышения эффективности плазменно-ионной обработки. Основными критериями эффективности ионных технологий являются (рис. 1) высокая производительность (которая выражается в высокой скорости обработки поверхности или большом количестве одновременно обрабатываемых изделий), низкая материалоемкость и энергоемкость (предполагает осаждение потока ионов на выбранную поверхность и недопущение его потери на стенках вакуумной камеры), возможность реализации на одном технологическом оборудовании (концентрация операций техпроцесса и сокращение времени на подготовительные операции). Отдельным требованием современных ПИТ является необходимость равномерной обработки деталей на подложках порядка 400 мм. Для технологий осаждения покрытия основными операциями являются очистка и формирование подслоя, нагрев и функционализация поверхности, формирование переходного слоя и осаждение покрытия.

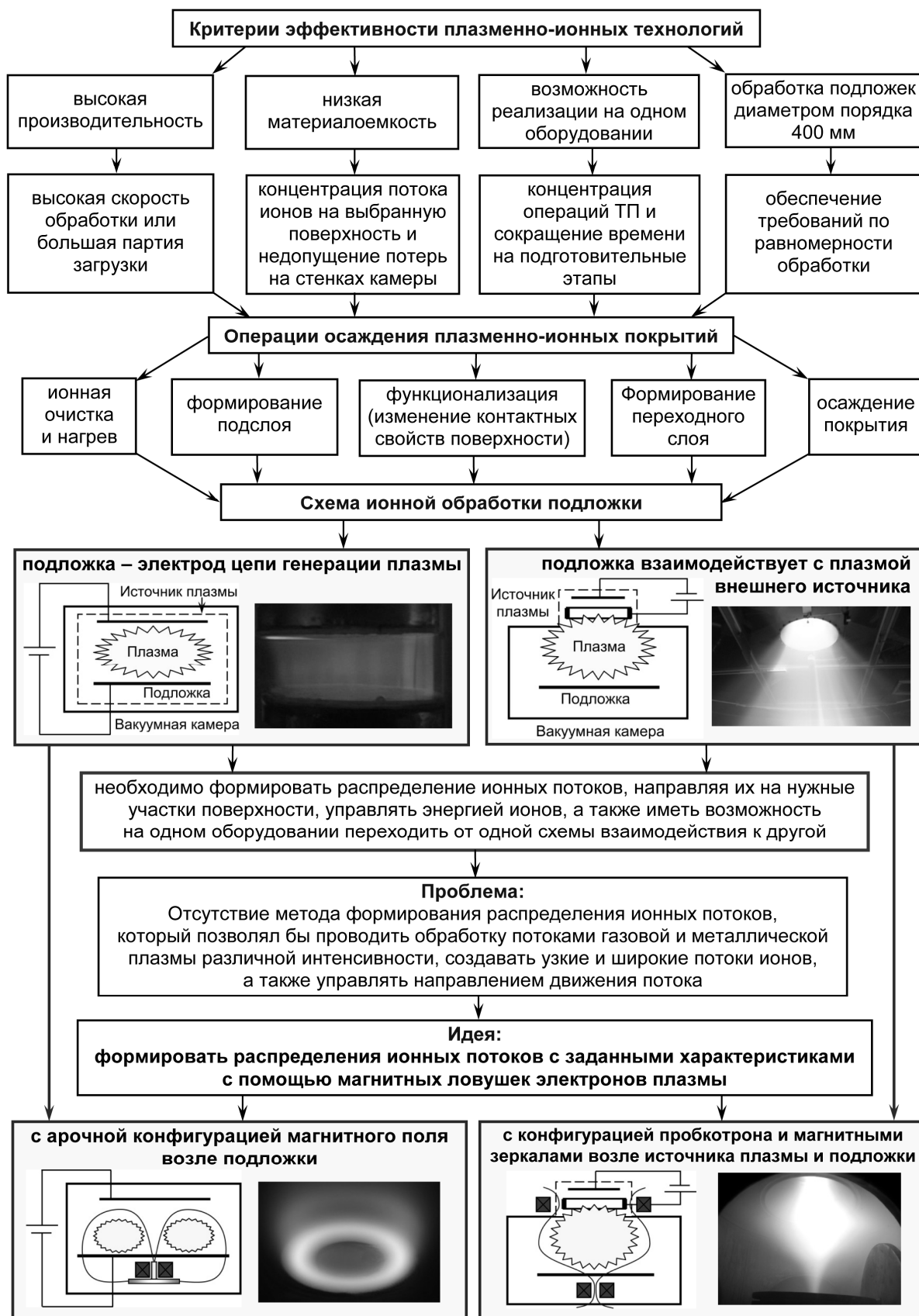


Рис. 1. Формирование ионных потоков для повышения эффективности плазменно-ионных технологий

Анализ литературы показал, что для реализации этих операций могут использоваться две схемы взаимодействия подложки с плазмой: 1) подложка – электрод цепи генерации плазмы и 2) подложка взаимодействует с плазмой внешнего источника. Для этих схем соответствие критериям эффективности заключается в возможности формировать распределение ионных потоков, управлять энергией ионов, а также иметь возможность на одном оборудовании переходить от одной схемы к другой. Обзор и анализ путей повышения эффективности ПИО поверхности показал перспективность использования магнитных полей различной конфигурации для формирования распределения ионных потоков в установках ПИО. Было выделено две основные схемы использования магнитных полей: 1) схема с арочной конфигурацией магнитного поля возле обрабатываемой поверхности – для формирования ионного потока при обработке в системе «поверхность – электрод цепи генерации плазмы» и 2) схема с магнитными ловушками с конфигурацией пробкотрона – при обработке поверхности плазмой внешнего источника. Использование первой схемы позволяет отдельно управлять энергией ионов и плотностью ионного тока и ограничивать плотность обрабатываемого потока только мощностью источника питания. Использование второй схемы позволяет использовать внешние источники плазмы, управлять энергией ионов, используя метод КИБ, хотя плотность потока ограничена режимом работы источника плазмы.

Проведенные исследования позволили предложить метод формирования на одном технологическом оборудовании различных распределений для разных операций ионной обработки и для обеих схем взаимодействия подложки с плазмой («поверхность обрабатывается плазмой внешнего источника» и «поверхность – электрод цепи генерации плазмы»). Суть метода – последовательное воздействие на плазму различных конфигураций магнитного поля с целью генерации различных распределений потока ионов вдоль обрабатываемой поверхности. Усредненное по времени распределение ионного потока формируется путем изменения относительной длительности воздействия отдельных конфигураций магнитного поля, что определяет статистический вес определенного «элементарного» распределения ионного потока. Полагая, что «элементарные» распределения могут быть аппроксимированы совокупностью распределений Гаусса, результирующее распределение может быть записано в виде:

$$\bar{J}(x, y) = \frac{1}{t_{\Sigma}} \sum_i^n t_i \left(\sum_j^m J_{0ij} \exp \left[- \left(\frac{(x - x_{0ij})^2}{\Delta x_{ij}^2} + \frac{(y - y_{0ij})^2}{\Delta y_{ij}^2} \right) \right] \right), \quad (1)$$

где t_{Σ} – общее время обработки поверхности;
 t_i – время воздействия на плазму i -й конфигурации магнитного поля;
 J_{0ij} , x_{0ij} , y_{0ij} , Δx_{ij} , Δy_{ij} – параметры распределения j -го компонента i -го распределения.

1. Формирование распределения ионного потока при генерации плазмы с помощью обрабатываемой поверхности

Схемы магнитных полей, фотографии плазмы и распределения плотности ионного тока, представленные на рис. 2, визуально иллюстрируют метод формирования ионных потоков арочной конфигурацией магнитного поля на

операциях, когда обрабатываемая поверхность является электродом в цепи генерации плазмы [2, 3]. Схемы управляющих магнитных полей представлены на рис. 2, а, г, ж; фотографии разряда – на рис. 2, б, д, з. Распределения плотности ионного тока, измеренные с помощью плоского зонда, показаны на рис. 2, в, е, и.

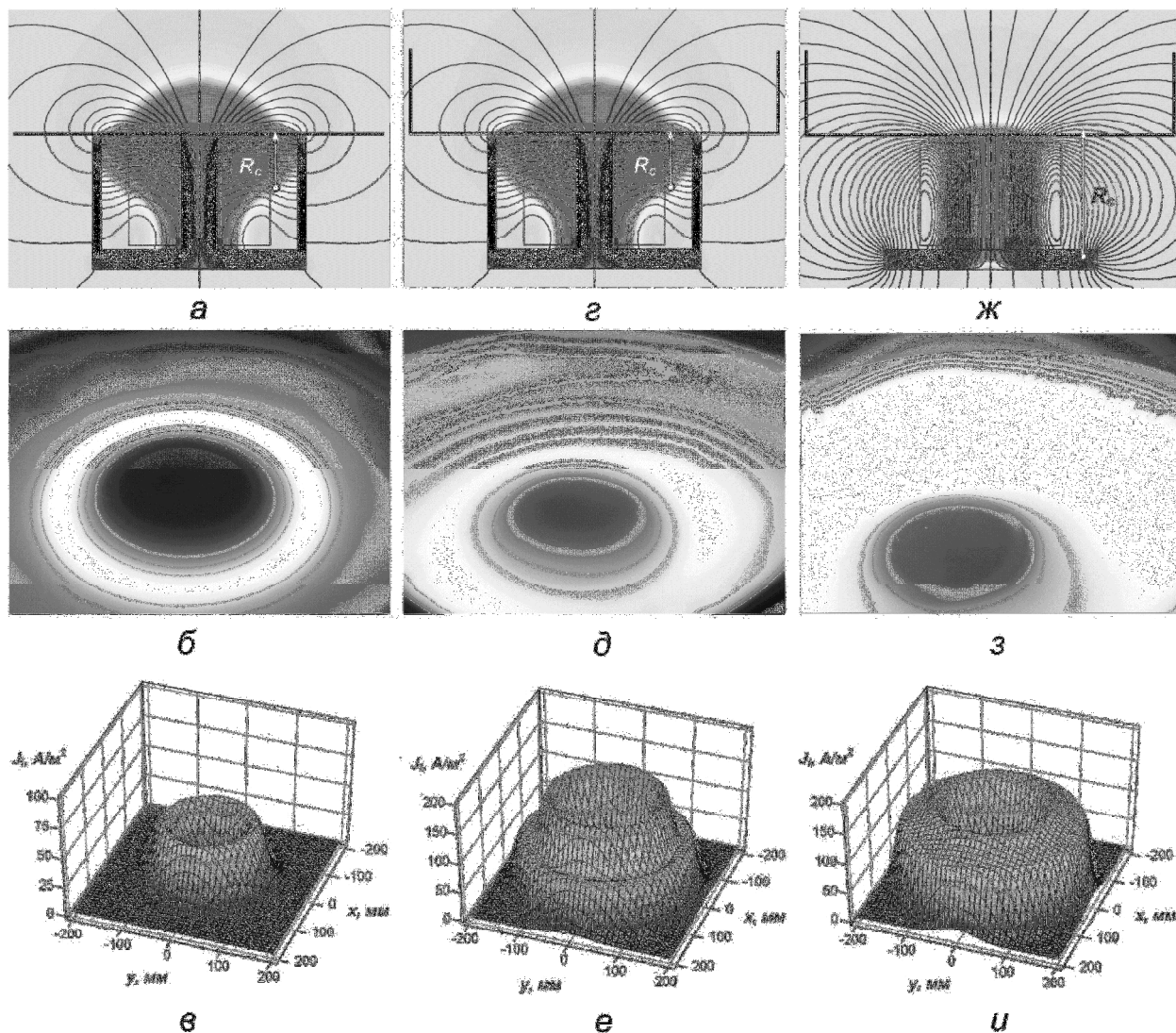


Рис. 2. Формирование ионного потока при генерации плазмы с помощью обрабатываемой поверхности: а, г, ж – структура магнитного поля для формирования ионного потока; б, д, з – фотографии разряда; в, е, и – распределения плотности ионного тока; а, б, в – режим планарного магнетрона, 0,7 Па, 800 В, 10 А; г, д, е – магнетрон с кольцевой структурой на катодe, 0,6 Па, 470 В, 11 А; ж, з, и – планарный магнетрон с удаленными частями магнитопровода и кольцевой структурой на катодe, 1,7 Па, 440 В и 15 А

Схема, представленная на рис. 2, а, б, в, соответствует работе планарного магнетрона с дисковым катодом. Структура разряда (рис. 2, б) характеризуется относительно узкой зоной распыления и высокой плотностью плазмы, которая сконцентрирована между внешним и внутренним полюсами магнитопровода в арочной магнитной ловушке над поверхностью (рис. 2, а). Измеренное распределение плотности ионного тока также соответствует типичному

распределению разряда планарного магнетрона, пик распределения находится между полюсами сердечника (рис. 2, в). Этот же планарный магнетрон, оснащенный кольцевой структурой на катоде, показан на рис. 2, г, д, е. Добавление боковых стенок трансформирует разряд, как показано на рис. 2, д – яркость разряда над периферийной зоной обрабатываемой поверхности (катода) увеличивается по сравнению с разрядом на рис. 2, б, однако наиболее яркая плазма по-прежнему концентрируется между полюсами сердечника. Зондовые измерения (рис. 2, е) также подтверждают значительное увеличение ионного тока возле боковых стенок благодаря наличию структуры полого катода, как показано на рис. 2, г. Планарный магнетрон с кольцевой структурой и без внутренней и наружной цилиндрических частей магнитопровода показан на рис. 2, ж, з, и. Согласно расчетам, эта конфигурация позволяет значительно увеличить радиус R_c кривизны силовых линий магнитного поля, по сравнению с ранее рассмотренными конфигурациями. Изменение конфигурации магнитопровода (рис. 2, ж) при наличии кольцевой структуры приводит к значительному расширению разряда вдоль обрабатываемой поверхности, как видно на рис. 2, з. Результаты измерений, показанные на рис. 2, и, подтверждают значительное изменение формы распределения ионного потока – видно, что начальное распределение Гаусса трансформировалось в широкое плато с высокой степенью равномерности. Увеличение тока в обмотках электромагнита приводит к увеличению плотности ионного тока без значительного изменения формы распределения. Для всех конфигураций магнитопровода, мощность разряда контролировалась посредством тока обмотки, позволяя таким образом управлять производительностью обработки. Мощность разряда ограничивалась только условиями охлаждения обрабатываемой поверхности. Результаты измерений подтвердили возможность формирования ионных потоков путем использования арочной конфигурации магнитного поля. Двумя основными параметрами управления являются кривизна силовых линий магнитного поля над обрабатываемой поверхностью и размер области магнитного удержания электронов. Для прогнозирования режимов работы планарного магнетрона могут быть использованы результаты работы [5], где приведена теоретическая модель магнетронного разряда.

2. Формирование распределения ионного потока при обработке поверхности плазмой внешнего источника

Исследование взаимодействия подложки с плазмой вакуумно-дугового испарителя [4, 5] показало возможность фокусировки ионного потока при воздействии на плазму испарителя внешнего магнитного поля, источник которого установлен под обрабатываемой поверхностью. Вместе с тем установлено, что подобная система не обладает широкими возможностями, поскольку позволяет изменять только ширину распределения, не изменяя значительно его форму. Изложенная в работе [5] математическая модель позволяет не только описать экспериментально обнаруженную фокусировку ионного потока, но и прогнозирует возможность получения как широких ионных потоков, так и узких ионных пучков, при условии воздействия на плазму внешнего источника системой двух электромагнитов, расположенных под обрабатываемой поверхностью. Результаты формирования отдельных распределений конфигурацией пробкотрона при обработке плазмой внешнего источника представлены на рис. 3.

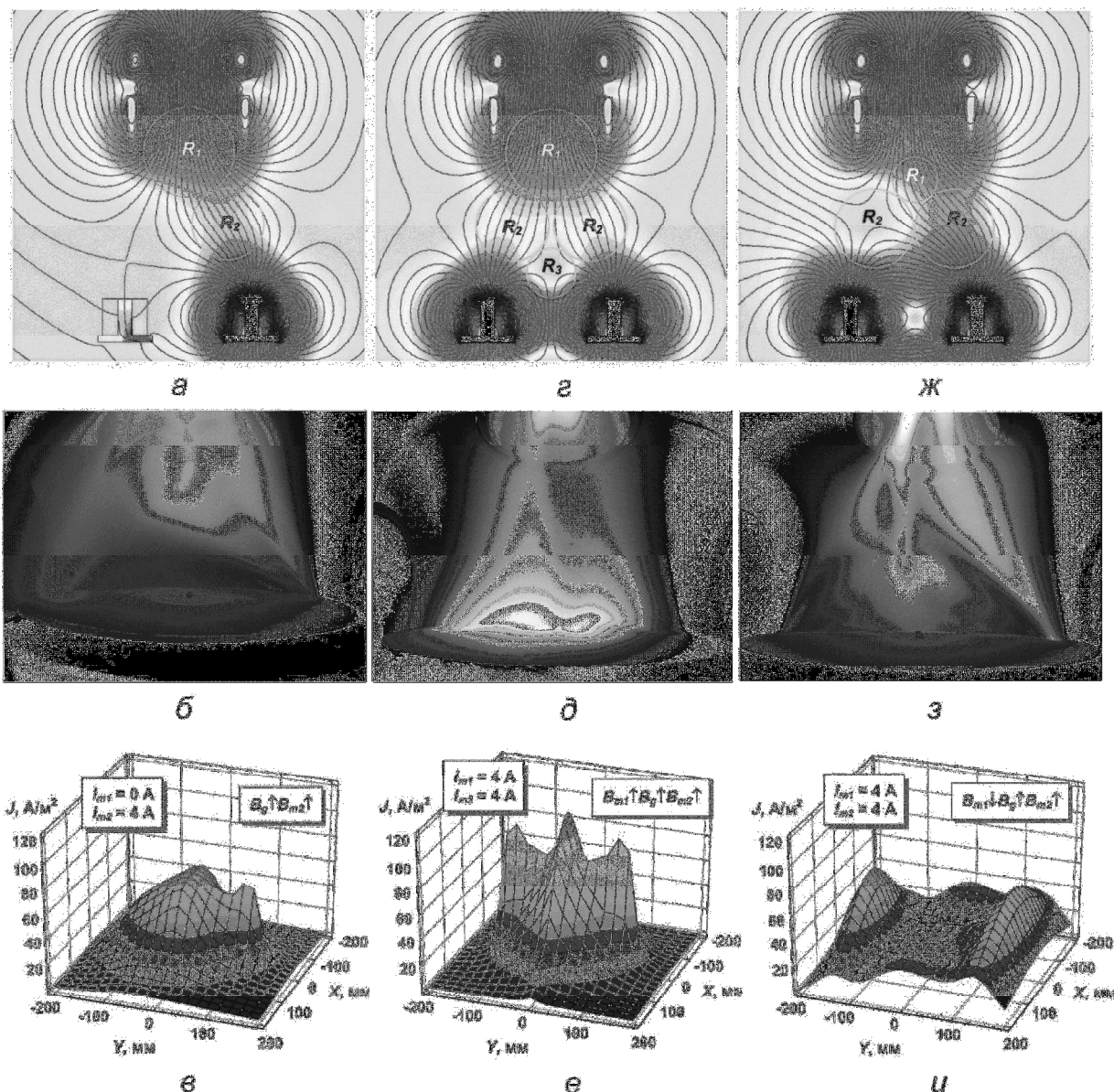


Рис. 3. Формирование ионного потока при обработке поверхности плазмой внешнего источника: а, г, ж – структура магнитного поля для формирования ионного потока (при включенном магнитном поле вакуумно-дугового источника плазмы, изображенного сверху, а также включении одного или двух дополнительных электромагнитов, расположенных под обрабатываемой поверхностью – изображены снизу); б, д, з – фотографии разряда; в, е, и – распределения плотности ионного тока; а, б, в – включен правый дополнительный электромагнит, магнитное поле которого направлено согласно магнитному полю источника плазмы; г, д, е – включены оба дополнительных электромагнита, магнитное поле которых направлено согласно магнитному полю источника плазмы; ж, з, и – включены оба дополнительных электромагнита, магнитное поле правого направлено согласно магнитному полю источника плазмы, а магнитное поле левого – встречно магнитному полю источника плазмы

Видно, что некоторые конфигурации магнитного поля позволяют фокусировать ионный поток на деталь небольших размеров, что увеличивает

производительность обработки; кроме того, имеется возможность расфокусировать ионный поток, что позволяет увеличивать площадь обработки [6]. Комбинация различных распределений, согласно предложенному методу, позволяет реализовывать различные распределения согласно требованиям к поверхностному слою. Количество «элементарных» распределений ионных потоков может быть увеличено путем комбинации влияния магнитного поля на плазму с относительным движением поверхности и плазмы. Так, на рис. 4, а, показано распределение ионного потока, полученного из распределения, показанного на рис. 2, и, путем смещения поверхности на 75 мм вдоль оси x и вращения поверхности относительно оси z . Распределение, показанное на рис. 4, б, получено путем комбинации различных распределений, полученных при воздействии на плазму внешнего источника по схеме на рис. 3, с одновременным вращением поверхности относительно оси z . Оба распределения для поверхности вращающейся были получены путем вычисления интеграла:

$$J_i(r) = \frac{1}{\pi} \int_{-r+x_0}^{r+x_0} \bar{J}\left(x, \sqrt{r^2 - (x-x_0)^2}\right) \frac{1}{\sqrt{r^2 - (x-x_0)^2}} dx, \quad (2)$$

где $\bar{J}(x, y)$ определяется зависимостью (1).

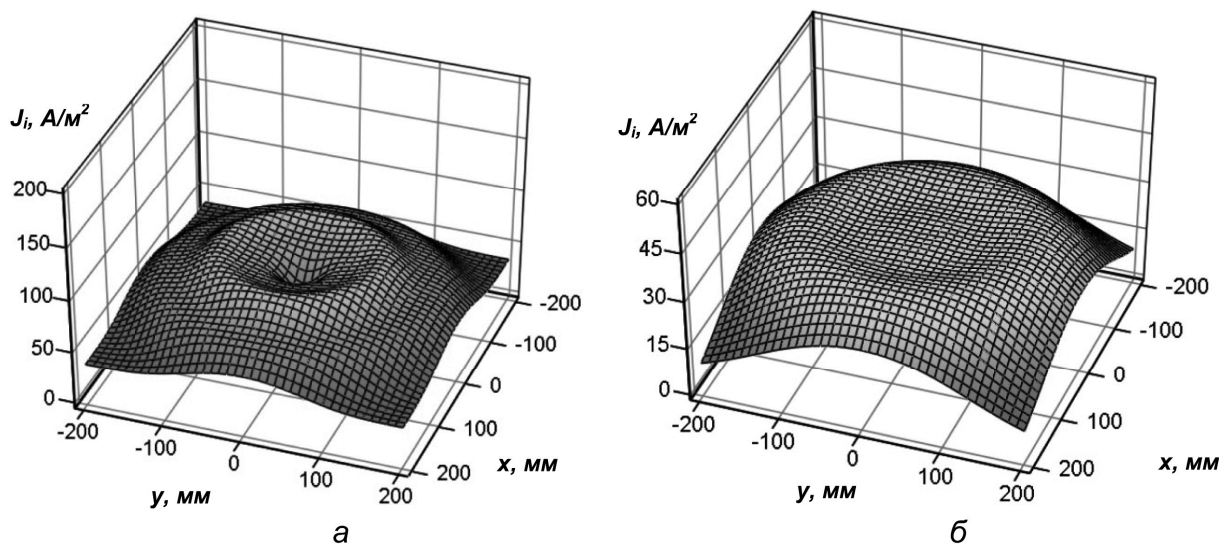


Рис. 4. Распределение ионного потока вдоль поверхности при формировании потока для различных схем взаимодействия поверхности с плазмой:
 а – комбинация влияния арочного магнитного поля, как показано на рис. 2, и, смещения поверхности на 75 мм вдоль оси x и вращения вдоль оси z ,
 б – комбинация различных распределений, полученных при воздействии на плазму внешнего источника по схеме на рис. 3, с одновременным вращением поверхности относительно оси z

Комбинация различных распределений позволяет на различных операциях технологического процесса реализовывать на одном оборудовании разные распределения ионного потока по заданию технолога. Это дает возможность концентрировать операции обработки и сокращать время на подготовительные операции, а также обрабатывать поверхности диаметром 400 мм, что соответствует требованиям современной промышленности.

3. Использование метода формирования ионных потоков в технологиях плазменно-ионной обработки

Полученные результаты позволяют уменьшать потери ионов на стенках камеры, снижая материалоемкость ионной обработки. Кроме того, есть возможность реализации на одном оборудовании обеих схем формирования ионного потока. Это позволяет концентрировать операции технологического процесса и сокращать время на подготовительные операции. Еще одним результатом является возможность обработки протяженных подложек диаметром порядка 400 мм, что соответствует требованиям современной промышленности.

Разработанные в работах [5, 6] теоретические приложения устанавливают аналитическую связь между физическими параметрами обрабатываемого ионного потока и технологическими параметрами. Таким образом, с точки зрения практического приложения результатов диссертационной работы, ее основным результатом являются функции трансформации физических параметров ионных и плазменных потоков в технологические параметры, которые можно получить аналитическим путем для использования в алгоритме выбора рациональных параметров. В качестве основных физических параметров обрабатываемого ионного потока рассматриваются распределение плотности ионного потока и энергия ионов. Технологическими параметрами являются давление рабочего или реактивного газа, потенциал подложки, время обработки и параметры магнитного поля, которые для известной конструкции электромагнитов задаются их размещением и схемой включения (фактически, технологическими параметрами являются токи в цепях электромагнитов и их направления). Схема использования разработанного метода формирования ионных потоков в технологиях плазменно-ионной обработки (ПИО) представлена на рис. 5. После выбора объекта для плазменно-ионной обработки, определяются требования к производительности и качественным характеристикам с целью формирования поверхностного слоя с заданными эксплуатационными свойствами, выбирается технологический процесс (травление, низковольтная ионная имплантация, модификация и легирование, осаждение покрытий) и выполняется расчет необходимых параметров потока при плазменно-ионной обработке, согласно ранее изложенной методике. Затем необходимо определить схемы генерации плазмы и электрического питания подложки, согласно допустимым ограничениям на ток и энергию ионов.

Определяющим фактором при выборе способа управления распределением плотности ионного тока и энергией ионов является функция, которую выполняет подложка в процессе генерации плазмы. Схему, где подложка с обрабатываемыми деталями является частью процесса генерации плазмы, целесообразно использовать при необходимости обработки деталей ионами газа. Такая схема соответствует обработке в установках с магнетронными и ВЧ магнетронными источниками плазмы, которые представляют группу источников, где силовые линии магнитного поля замыкаются на катод. В этом случае управлять как распределением плотности ионного тока, так и энергией ионов необходимо с помощью магнитного поля. Места установки электромагнитов и их конструкция определяются исходя из вида обрабатываемой детали. Конфигурация магнитного поля должна формировать магнитную ловушку электронов плазмы, ограничивая их движение со стороны анода силовыми линиями магнитного поля, а с другой стороны – поверхностью подложки, на которую подается отрицательный потенциал смещения от источника питания.

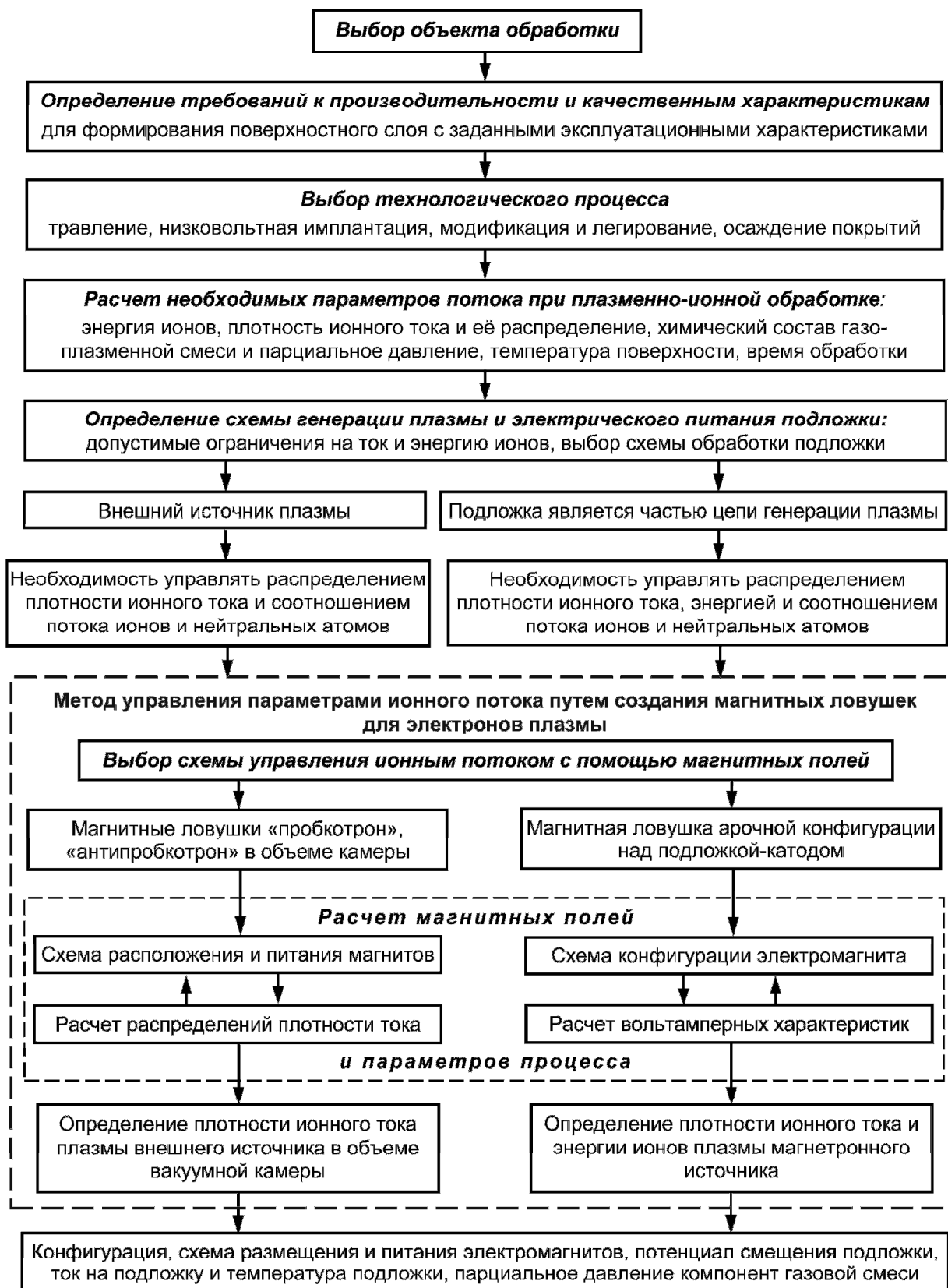


Рис. 5. Схема использования разработанного метода формирования ионных потоков в технологиях плазменно-ионной обработки

При этом конфигурация магнитного поля должна образовывать систему скрещенных полей с электрическим полем, созданным при подаче отрицательного потенциала на подложку с деталями, обеспечивая замкнутый дрейф электронов. Фактически, такая обработка соответствует схеме обработки ионами плазмы магнетронного источника при использовании катода магнетронного распылительного устройства в качестве подложки для деталей. При обработке в импульсном режиме определяющим является процесс электрического пробоя разрядного промежутка и поджига разряда, который описан в работе [2]. Для прогнозирования работы устройства в стационарном режиме следует использовать теорию, развитую в работе [3]. Управление шириной распределения плотности ионного тока необходимо осуществлять, изменяя радиус кривизны силовых линий магнитного поля над поверхностью подложки в области горения разряда.

Схему, где подложка с обрабатываемыми деталями не является электродом в цепи генерации плазмы, целесообразно использовать при необходимости обработки поверхности ионами металла или газа, используя плазму внешнего источника. Такая схема соответствует обработке в установках с геликонным, ЭЦР-индукционным или вакуумно-дуговым источниками плазмы, которые представляют группу источников, где силовые линии магнитного поля соединяют источник плазмы и подложку. Управление энергией ионов плазмы внешнего источника необходимо осуществлять путем подачи отрицательного смещения на подложку по методу КИБ [7, 8]. Для управления толщиной катодного слоя (обеспечения анизотропии обработки) необходимо использовать импульсное напряжение [9]. Для эффективной обработки поверхности потоками ионов металлов и газов от внешнего источника плазмы необходимо, в дополнение к подаче потенциала на подложку (метод КИБ), использовать систему дополнительных формирующих магнитных полей для транспортировки плазмы от источника и создания требуемого профиля распределения плотности ионного потока вдоль обрабатываемой поверхности. Систему управляющих электромагнитов необходимо разбивать на две части. Одна часть устанавливается между источником плазмы и входом в вакуумную камеру, и работает фактически в режиме плазмоведа и фильтра микрочастиц (при необходимости). Вторая часть устанавливается под подложкой, причем конфигурация полюсов магнитного поля определяется конкретным технологическим назначением и служит для транспортировки плазмы от выхода плазмоведа к подложке. Конфигурация магнитного поля должна формировать магнитную ловушку электронов плазмы, ограничивая их движение силовыми линиями магнитного поля. Целесообразно использовать сочетания конфигураций пробкотрона (с двумя магнитными зеркалами) и конфигурации с каспом (с тремя магнитными зеркалами). При использовании произвольного источника плазмы можно использовать теорию [5], для расчета траекторий движения ионов и получения результирующего распределения плотности ионного тока. В результате расчета определяются конфигурация, схема размещения и питания электромагнитов, потенциал зажигания разряда и смещения подложки, ток на подложку и температура подложки. Примером реализации метода является технологическое устройство для обработки деталей и осаждения равнотолщинных покрытий на подложке диаметром до 400 мм. Скорость ионной очистки и скорость нагрева увеличиваются до 20 раз, скорость осаждения покрытий – в 2–5 раз, размер партии обработки – до 2,6 раза [10].

Выводы

Разработан метод, суть которого заключается в комбинировании различных распределений ионного потока, получаемых при воздействии на плазму магнитного поля. Это позволяет решить важную научно-техническую проблему повышения эффективности плазменно-ионной обработки путем формирования распределения ионных потоков вдоль обрабатываемых поверхностей и создания магнитных ловушек электронов плазмы.

Для операций ионной обработки, где подложка с деталями используется для генерации плазмы, рационально применение магнитных полей арочной конфигурации. Предложено управлять шириной распределения плотности ионного тока путем изменения радиуса кривизны силовых линий магнитного поля в области поддержания разряда, для управления величиной плотности ионного тока и их энергией необходимо изменять индукцию магнитного поля и давление рабочего газа. Для операций, где подложка обрабатывается плазмой внешнего источника, рационально формирование ионных потоков с помощью магнитных ловушек, которые создаются на пути следования потока плазмы с помощью магнитных полей с конфигурацией пробкотрона. Ловушки создаются системой электромагнитов, один из которых устанавливается между источником плазмы и вакуумной камерой и служит плазмодомом, а другие размещаются под обрабатываемой подложкой с деталями. Формирование распределения ионных потоков осуществляется путем управления схемой питания электромагнитов.

Список литературы

1. Баранов, О. О. Проблема управления ионным потоком в технологических установках плазменно-ионной обработки [Текст] / О. О. Баранов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С. 52–66.
2. Magnetic control of breakdown: Toward energy-efficient hollow-cathode magnetron discharges [Текст] / O. Baranov, M. Romanov, S. Kumar, X. Zhong, K. Ostrikov // Journal of applied physics. – 2011. – V. 109, № 6. – P. 063304-1–063304-8.
3. Баранов, О. О. Эффективная ионная очистка в разряде планарного магнетрона со структурой полого катода [Текст] / О. О. Баранов, М. С. Романов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении». – Вып. 3 (63). – Х., 2010. – С. 50–57.
4. Баранов, О. О. Управление плотностью ионного тока от вакуумно-дугового источника в объеме вакуумной камеры при размещении управляющих электромагнитов под подложкой [Текст] / О. О. Баранов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 68. – Х., 2015. – С. 37–47.
5. Baranov, O. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: from narrow beams to highly uniform fluxes [Текст] / O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov // Physics of plasmas. – 2009. – № 16. – P. 053505-1-053505-5.
6. Баранов, О. О. Теоретическая модель разряда магнетронного распылительного устройства [Текст] / О. О. Баранов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та

им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 64. – Х., 2014. – С. 102–119.

7. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.

8. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.

9. Lieberman, M.A. Principles of plasma discharges for materials processing [Text] / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. – New York : Wiley Interscience, 1994. – 572 p.

10. Баранов, О. О. Осаждение качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий [Текст] / О. О. Баранов, Г. И. Костюк // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. тр. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Вып. 40 (1149). – Х., 2015. – С. 85–89.

Поступила в редакцию 17.06.2016

Метод формування розподілу іонних потоків для операцій плазмові-іонної обробки

В роботі наведено метод вирішення важливої науково-практичної проблеми підвищення ефективності плазмово-іонної обробки шляхом формування розподілу іонних потоків вздовж поверхонь, що обробляються, шляхом утворення магнітних пасток електронів плазми. Для операцій іонної обробки, де поверхня з деталями використовується для генерації плазми, раціональним є застосування магнітних полів аркової конфігурації. Вплив на ширину розподілу густини іонного струму здійснюється шляхом змінення кривини магнітного поля; густина іонного струму і енергія іонів змінюється індукцією магнітного поля та тиском робочого газу. Для операції оброблення поверхні плазмою зовнішнього джерела раціональним є застосування магнітних пасток, що утворюються на шляху транспортування плазми за допомогою магнітних полів з конфігурацією пробкотрона.

Ключові слова: плазмово-іонна обробка; формування іонних потоків.

Method of Formation of Distribution of Ion Fluxes for Operations of Plasma Ion Processing

An important scientific-technical issue of increasing the effectiveness of plasma-ion treatment by formation of the distribution of the ion fluxes along the substrate surface by use of magnetic traps for plasma electrons was solved. When the substrate with the work pieces is used to generate plasma, the use of the arc configuration of the magnetic field is rational. The influence to the distribution of the ion current density is obtained by changing the curvature of the magnetic field; the control of the ion current and energy is provided by changing the induction of the magnetic field and the gas pressure. When the substrate interacts with an external plasma source, the use of the bottle-like magnetic traps generated on a trajectory of the plasma expansion from the source to the substrate is rational.

Keywords: plasma-ion treatment; control of ion fluxes.

Сведения об авторах:

Олег Олегович Баранов – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. 202 «Теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина.