

04; 11; 12

© 1990 г.

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ ПО СОСТАВУ ПОТОКОВ ИОНОВ

А. И. Рябчиков, Н. М. Арзубов, Р. А. Насыров

Проведен анализ возможности формирования управляемых по составу многокомпонентных потоков ионов на основе частотно-импульсных вакуумно-дуговых источников с холодным катодом. Исследованы режимы формирования сложных и регулируемых по составу потоков ионов с использованием многокомпонентного катода, набора одноэлементных катодов и в условиях попеременного инициирования катодного пятна на поверхности поджигающего электрода и катода. Определена зависимость тока ускоренных ионов вакуумно-дугового источника от материала катода.

Введение

В последние годы проводятся интенсивные исследования в области модификации поверхности различных материалов пучками заряженных частиц [1, 2]. Среди этих методов особая роль принадлежит методу ионной имплантации, основанной на введении в приповерхностный слой материала легирующей примеси в виде ускоренных ионов [2-4].

На первых этапах развития ионной имплантации в различного рода конструкционные материалы широко применялись ускорители ионов газов. Побудительным мотивом подобных исследований служили первые научные результаты по улучшению трибологических характеристик ряда металлов и сплавов после облучения ускоренными пучками ионов азота. Последующее изучение процессов модификации материалов привело к необходимости разработки простых и надежных конструкций ускорителей, обеспечивающих формирование высокоинтенсивных потоков ионов различных металлов с большим поперечным сечением пучка [5, 6].

Прогресс в создании высокоинтенсивных ускорителей ионов проводящих материалов достигнут благодаря применению плазменного эмиттера на основе импульсной вакуумной дуги. В настоящее время частотно-импульсные источники обеспечивают возможность формирования потоков ионов в широкой области энергий, токов, длительностей и частот следования импульсов [7-9]. Подобные установки обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными системами. Традиционные имплантационные установки типа «Везувий» [2] разрабатывались в основном для легирования полупроводников и обладали низкой интенсивностью пучка. Для набора доз облучения образцов площадью $\sim 300 \text{ см}^2$ на данных установках требуется время от десяти часов до нескольких суток. Кроме того, подобные установки рассчитаны на одноэлементную имплантацию. Двухэлементная имплантация реализуется только путем последовательного облучения с переналадкой установки по сорту ионов. В импульсных установках появляется возможность применения высоких ускоряющих полей и интенсивных источников ионов, которые не могут быть использованы при непрерывной генерации пучка. Кроме того, возможность формирования импульсной плазмы с высоким содержанием многозарядных ионов обеспечивает ускорение ионов до высоких энергий ($\sim 500 \text{ кэВ}$) при относительно небольших ускоряющих напряжениях ($\sim 100 \text{ кВ}$).

Возрастающий в последнее время интерес к модификации непроводящих материалов за счет введения нескольких сортов примесей ставит задачу исследования возможности получения сложных и регулируемых по составу потоков ионов. Уникальные возможности разработки универсального источника с управляемым по составу ионным потоком связаны с применением для этих целей частотно-импульсной вакуумной дуги. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований генерации многокомпонентных потоков ионов с импульсным формированием плазмы вакуумной дугой.

Экспериментальная установка

Работа проводилась на высокоинтенсивном частотно-импульсном ускорителе «Радуга» [9]. Принцип работы ускорителя основан на формировании плазмы импульсным дуговым разрядом в вакууме с последующим ускорением ионов в электрическом поле диода. Для инициирования вакуумно-дугового разряда между поджигающим электродом и катодом подается высоковольтный импульс напряжения амплитудой 2—10 кВ и длительностью 1—10 мкс. В результате пробоя по поверхности керамического изолятора толщиной ~0.5 мм формируется дуга, являющаяся первоначальным поставщиком плазмы. В процессе расширения плазмы происходит переброс дугового разряда с поджигающего электрода на полый анод диаметром 10—20 см. Разряд на аноде распределен диффузно по его поверхности, и этот электрод не эродирует. Поставщиком плазмы служит катод, эродирующий благодаря микропятнам на его интегрально холодной поверхности. Ток дугового разряда поддерживается за счет энергии, предварительно накопленной в *LC*-цепи с сосредоточенными параметрами. В процессе ускорения ионов из плазмы широкоапертурного источника граница ионного токоотбора изменяется в зависимости от ускоряющего напряжения, тока дуги (концентрации плазмы). Для фиксации плазменной границы и соответственно стабилизации угловой расходимости формируемого пучка ускоренных ионов торцевая поверхность анода закрыта мелкоструктурной вольфрамовой сеткой с прозрачностью 0.95. Ускоряющее напряжение изменяется от 0 до 50 кВ, длительность импульса тока ионов 10—10³ мкс, частота следования импульсов до 3·10² Гц.

Измерения характеристик ионного пучка в процессе исследования проводились с помощью цилиндра Фарадея диаметром 20 см и коллимированным цилиндром Фарадея с отрицательными смещениями до 2 кВ и поперечным магнитным полем напряженностью до 1 кЭ. Для анализа амплитудных характеристик пучка применялся амплитудный анализатор импульсов АИ-256. Каждой точке экспериментальной кривой соответствует статистический набор 10⁴ импульсов.

Формирование сложных по составу пучков ионов на основе многокомпонентных катодов

Наиболее простой метод формирования многокомпонентного потока ускоренных ионов заключается в использовании в качестве катода многокомпонентной проводящей мишени. В процессе дугового разряда при этом формируется плазма, содержащая ионизированные атомы отдельных компонент катода. При этом наряду с формированием пучка ионов различных металлов могут быть получены потоки ионов непроводящих материалов, которые входят в состав проводящего композита. Так, в работе [10] для получения двухэлементного потока ионов применен гексаборидлантановый катод (LaB₆). Изучение спектрального состава показало наличие в пучке двух- и трехзарядных ионов лантана, а также одно- и двухзарядных ионов бора. В работе [11] двухкомпонентный пучок ионов получен на основе катода из карбида титана (TiC) со следующим содержанием отдельных компонент (6 % Ti⁺, 45 % Ti²⁺, 7 % Ti³⁺, 33 % C⁺ и 9 % C²⁺). Получение потоков ионов непроводящих материалов, в частности ионов газов на основе проводящих композитных мишеней, существенно расширяет возможности частотно-импульсных источников ионов на основе вакуумной дуги.

В то же время применение сложных по составу катодов по составу катодов для формирования плазмы обладает рядом недостатков. Во-первых, каждому конкретному использованию катода должны предшествовать тщательные исследования состава формируемого пучка ионов, который в принципе может со временем изменяться (например, в случае газосодержащих катодов). Проблематичным выглядит и возможность варьирования энергией отдельных видов ионов в процессе имплантации, которая необходима для получения примерно совпадающих профилей распределения различных примесей в обрабатываемом материале. Использование при этом влияния тока дугового разряда на величину средней зарядности ионов различных сортов далеко от универсальности.

Формирование сложных по составу потоков ионов на основе одноэлементных катодов

Для получения регулируемого двухкомпонентного ионного потока на ускорителе «Радуга» была разработана система инициирования и питания дугового разряда, обеспечивающая возможность использования в качестве расходного электрода для формирования плазмы как материала катода, так и материала поджигающего электрода.

В экспериментах использовались две различные геометрии катодов и поджигающих электродов. В первом случае оба электрода выполнялись в виде разделенных диэлектриком пластин. Во втором случае исследовалась коаксиальная геометрия, когда катод и поджигающий электрод были выполнены в виде стержня \varnothing 7 мм и охватывающего его цилиндра диаметром 20 мм. В качестве изолятора в обоих случаях применялась керамика толщиной 0.5 мм.

Исследования показали, что управлением системой инициирования катодного пятна на соответствующем электроде достигается регулируемое формирование плазмы как из материала катода, так и из поджигающего электрода. В случае плоских электродов следы эрозии материалов указывают на одинаковый характер процессов. В коаксиальной геометрии отмечено различие в характере эрозии электродов. Наибольшей по площади эрозии подвергается внешний электрод. Например, при использовании в качестве поджигающего электрода и катода меди при длительности импульса разряда 200 мкс область эрозии внутреннего электрода не превышала 2 мм, в то время как на внешнем электроде характерные следы эрозии меди отчетливо видны на расстоянии 5 мм от диэлектрика, разделяющего электроды. Различие процессов эрозии связано с импульсным характером дугового разряда и влиянием магнитного поля поверхностного тока катода на процесс движения катодного пятна. В случае, когда в качестве поджигающего электрода используется внутренний электрод, возрастает ресурс работы источника и повышается стабильность амплитуды импульса пучка ускоренных ионов.

Исследование мишеней, облученных ионным пучком в режиме генерации плазмы катодным пятном на поверхности только катода или поджигающего электрода, а также при периодически последовательном инициировании катодного пятна на каждом из электродов, показало, что состав ионного потока соответствует эродирующему материалу.

Состав мишени при периодически-последовательной имплантации различных видов ионов в пределах погрешности эксперимента соответствовал средним амплитудным значениям тока каждого сорта ионов.

Вторая возможность получения сложного по составу ионного пучка в частотно-импульсном источнике на основе вакуумной дуги определяется условиями формирования пучков с большим поперечным сечением. Из локального катодного пятна в аноде-экспандере за счет расширения формируется плазменная граница значительных размеров. Исследования, проведенные на ускорителе «Радуга» с диаметром анода 20 см, показали, что увеличение размера катода от 10 до 20 мм не оказывает существенного влияния на распределение примесей в облучаемом образце. Поэтому для реализации возможности формирования различных видов ионов в источнике были установлены четыре катода с различным элементным составом. Катоды выполнены в виде цилиндров диаметром 10 мм. Внутри каждого из катодов установлены поджигающий электрод и кера-

мическая вставка, по поверхности которой осуществляется иницирование дугового разряда. Все катоды электрически соединены с одним катододержателем, а поджигающий электрод имеет индивидуальную систему иницирования. Управление режимом периодического формирования катодного пятна на рабочих поверхностях различных катодов в сочетании с управлением процессов ускорения ионов обеспечивает реализацию нескольких режимов обработки материалов: 1) четыре варианта однокомпонентной имплантации, 2) многоэлементная имплантация (от двух до четырех элементов с варьируемой последовательностью), 3) нанесение покрытий со сложным многоэлементным составом, 4) сочетание процессов напыления и имплантации.

Многоэлементный режим работы источника позволил провести исследования влияния материала катода на величину тока ускоренных ионов. Учитывая многопараметрическую зависимость тока ионов от геометрических параметров системы ускорения, газовых условий, состояния поверхности катода и т. д. [9], в четырехэлементном ускорителе при проведении исследований один из катодов всегда был выполнен из меди. По работе ускорителя с медным катодом контролировалась идентичность экспериментальных условий. В целом эксперимент выполнен при следующих параметрах: ток дугового разряда 30 А, длительность разряда 200 мкс, частота следования импульсов 10—100 Гц, ускоряющее напряжение 40 кВ. Давление остаточного газа $1.33 \cdot 10^{-3}$ Па. Диаметр анода-экспандера и цилиндра Фарадея 20 см.

Измерения проводились либо последовательно на каждом из четырех материалов катода, либо одновременно на нескольких катодах (от 2 до 4). В условиях попеременного генерирования плазмы из различных материалов катодов были определены условия, при которых перенапыление катодов не наблюдается и соответственно не влияет на измерения тока пучка ионов каждого сорта.

На рис. 1 представлены результаты измерения амплитуды тока ионов в зависимости от материала катодов. Экспериментальные данные указывают на ряд особенностей генерации ионного пучка на основе катодного пятна импульсной вакуумной дуги. В целом наблюдается уменьшение тока ускоренных ионов с увеличением атомной массы материала. В то же время внутри отдельных подгрупп выявляется более тонкая структура, которая связана с теплофизическими характеристиками материала катода.

В работе [12] на основании анализа экспериментальных данных, полученных в [13, 14] для нескольких материалов катодов, показано, что максимальный ток ионной компоненты, извлекаемый из вакуумно-дугового разряда, достигает 7—10 % от тока дуги и может быть оценен из выражения

$$I^+ = \frac{e \cdot f \cdot I \cdot \mu}{m_a} \quad (1)$$

где I^+ — ток ионов, I — ток дуги, e — заряд электрона, f — степень ионизации паров материала катода, μI — скорость эрозии катода, m_a — атомная масса материала катода.

Выражение (1) обычно используется для качественной оценки величины тока ионов, поскольку в него входят параметры, трудно поддающиеся расчетам, такие как степень ионизации паров материала катода с учетом средней зарядности ионов, скорость эрозии катода. Сравнение данных рис. 1 с результатами измерения тока ионов для катодов из Fe, Zn, Mo, W, полученными различными авторами [12—14], показывает удовлетворительное согласие с разбросом 10—15 %.

Аномальное поведение источника наблюдается в случае катода из Cu. Величина тока при этом оказывается существенно меньше, чем для других близ-

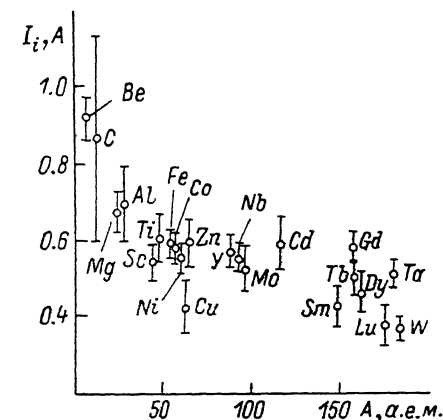


Рис. 1. Зависимость амплитуды тока ускоренных ионов от материала катода.

лежащих элементов. Пока этот результат не получил достаточного полного объяснения. Следует отметить, что в случае применения данных, представленных на рис. 1 для определения потока заряженных частиц при одно- или многоэлементном облучении, необходимо учитывать среднюю зарядность ионов. Для этого могут быть использованы данные, полученные в [15].

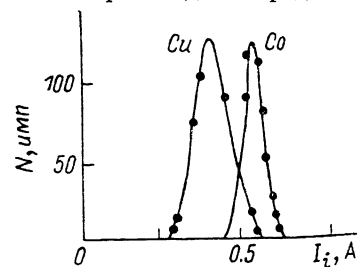


Рис. 2. Амплитудно-спектральная характеристика источника ионов при работе с катодами из Cu и Co.

Стабильность амплитудных характеристик источника, как видно из указанного на рис. 1 разброса, также зависит от материала катода. На рис. 2 приведены результаты измерения амплитудного спектра при работе источника с катодами из Cu и Co. Наибольшая нестабильность наблюдается на углероде. Такая нестабильность на углероде может быть связана с особым поведением катодного пятна на его поверхности, которая вызывает значительную локальную эрозию.

Такая нестабильность на углероде может быть связана с особым поведением катодного пятна на его поверхности, которая вызывает значительную локальную эрозию.

Формирование сложных по составу потоков ионов с помощью направленного перемещения катодного пятна

Данный вариант формирования сложных и регулируемых по составу потоков ионов связан с возможностью управления перемещением катодного пятна по рабочей поверхности катода. Для управления движением катодного пятна используется или внешнее магнитное поле, или собственное магнитное поле, образованное током дугового разряда, текущего по поверхности катода. В последнем варианте направленное перемещение катодного пятна по рабочей поверхности катода, сформированного из различных элементов, достигается за счет управления местом иницирования разряда и местом токоподвода к катоду. Регулирование соотношения различных компонент в ионном пучке в этом случае достигается изменением соотношения геометрических размеров отдельных элементов катода или регулированием длительности импульса дугового разряда.

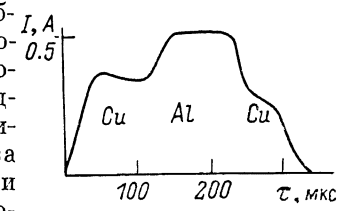


Рис. 3. Осциллограмма тока ионов с катодом, выполненным из чередующихся материалов.

На рис. 3 приведена осциллограмма тока ионов с катодом, выполненным из чередующихся материалов Cu—Al—Cu. Осциллограмма хорошо показывает возможность контроля за составом ионного потока по амплитудным характеристикам импульса. Применение внешнего магнитного поля для управления динамикой перемещения катодного пятна выглядит менее предпочтительным, поскольку будет приводить к уменьшению углового разлета формируемой в широкоапертурных источниках плазмы.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали перспективность использования импульсной вакуумной дуги для формирования управляемых по составу потоков ускоренных ионов для целей многоэлементной имплантации. Исследованные варианты генерации пучка на основе одноэлементных катодов позволяют формировать высокоинтенсивные пучки ионов металлов с током 0.4—1 А в частном режиме с длительностью импульсов до 1 мс. Двухэлементная имплантация реализуется в случае использования наряду с катодом поджигающего электрода для генерации плазмы. Для многоэлементной имплантации целесообразно использовать многокатодный вариант с несколькими поджигающими электродами или систему, обеспечивающую перемещение катодного пятна по рабочей поверхности катода, представляющего набор различных элементов. Во всех указанных вариантах можно осуществлять регулировку токовыми и энергетическими характеристиками потока ионов, его состава за счет управляемого иницирования разряда, тока дуги, ускоряющего напряжения, длительности импульса разряда.

Список литературы

- [1] Коваленко В. С., Верхотуров А. Д., Головки Л. Ф. и др. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М.: Наука, 1986. 280 с.
- [2] Диденко А. Н., Лигачев А. Е., Куракин И. Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 184 с.
- [3] Гусева М. И. // Поверхность. 1982. № 4. С. 27—50.
- [4] Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. 360 с.
- [5] Баженов Г. П., Бугаев С. П., Ерохин Г. П. и др. // Тез. докл. V Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1984. Ч. 2. С. 93—95.
- [6] Арзубов Н. М., Исаев Г. П., Рябчиков А. И. // Тез. докл. VI Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск. 1986. Ч. 3. С. 184—186.
- [7] Диденко А. Н., Волков С. Н., Красик Я. Е. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 816—819.
- [8] Эдлер Р., Пикро С. // Атомная техника за рубежом. 1985. № 10. С. 25—29.
- [9] Арзубов Н. М., Исаев Г. П., Рябчиков А. И. // ПТЭ. 1988. № 5. С. 28—31.
- [10] Brown I. G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. Vol. NS-32. N 5. P. 1723—1727.
- [11] Brown I. G. // Light Metal Age. 1986. Vol. 44. N 9-10. P. 5—9.
- [12] Kimblin C. W. // J Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 7. P. 3074—3081.
- [13] Плютто А. А., Рыжков В. Н., Каплин А. Т. // ЖЭТФ. 1965. Т. 20. Вып. 6. С. 328—337.
- [14] Davis W. D., Miller H. C. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. N 3. P. 2212—2221.
- [15] Brown L. G., Galvin J. E., Gavin B. F. et all. // Rev. Sci. Instrum. 1986. Vol. 57. N 6. P. 1069—1084.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики
при Томском политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
17 июня 1988 г.

В окончательной редакции
2 января 1989 г.