

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.793.79

Пивоварчик
Сергей Сергеевич

**Система контроля параметров потоков нейтральных и
заряженных частиц ионно-плазменных систем**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-39 80 03
Электронные системы и технологии

Научный руководитель
Завадский С. М.
канд. техн. наук, доцент
начальник Центра 9.1 НИЧ БГУИР

Минск, 2021

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин, сдерживающей внедрение технологического процесса обработки материалов пучками ионов, является отсутствие в ряде ионно-лучевых установок средств контроля важных параметров. В результате этого не обеспечивается технологическая воспроизводимость процессов ионно-лучевой обработки материалов. Одним из параметров, определяющих процесс обработки, является энергия ионов и плотность ионного тока и соответственно их контроль является важной и актуальной задачей.

В современном технологическом оборудовании нанесения покрытий и ионно-плазменной обработки, при проведении научных исследований широко используются ионные источники. В силу особенностей организации рабочего процесса таких устройств характеристики ионного пучка могут существенно изменяться даже при незначительных изменениях технологических факторов или в процессе эксплуатации.

Для оперативного контроля параметров ионного пучка в технологических процессах поточного производства, а также для юстировки и проверки таких характеристик ионных ускорителей, как энергия ионов и распределение плотности ионного тока, требуется специальное оборудование.

Для обеспечения требуемого качества пучка производится коррекция параметров ускорителя по конечному эффекту — изменению измеряемых параметров пучка в нужную сторону. Такая коррекция может производиться как вручную, оператором, так и в автоматическом режиме с помощью различных систем обратной связи.

Ниже приведен далеко не полный список типичных задач ускорительной физики, так или иначе связанных с измерениями параметров пучка, достаточно условно разбитый на три этапа.

1. Ввод в эксплуатацию нового или модернизированного ускорителя:

- проводка пучка по каналам транспортировки;
- измерение и согласование эмиттанса пучка и акцептанса ускорителя;
- наблюдение и коррекция траектории пучка на первом обороте;
- контроль пучка в процессе настройки инжекции и захвата ускоряющим ВЧ-полем.

2. Оперативное управление установкой в процессе регулярной работы.

На данном этапе необходимо рутинное измерение и коррекция следующих параметров:

- равновесная орбита пучка;

- бетатронные и синхротронная частоты;
- хроматизм;
- поперечные и продольный размеры пучка;
- связь бетатронных колебаний;
- средняя энергия и энергетический разброс частиц пучка;
- светимость (в коллайдерах).

3. Задачи ускорительной физики, необходимые для оптимизации работы установки:

- измерение и коррекция структурных функций;
- изучение нелинейной динамики пучка;
- исследование коллективных эффектов и подавление неустойчивостей;
- анализ внешних возмущений движения пучка.

Как отдельная немаловажная задача может рассматриваться контроль работоспособности и калибровка самих систем диагностики пучка, а также их исследование в процессе работы с целью улучшения точности, долговременной стабильности, надежности и т. д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Электронной техники и технологии» в рамках следующей научной программы:

1. ГБЦ № 19-3146 «Разработка методов контроля и алгоритмов диагностики параметров ионных пучков в технологических процессах ионно-плазменной обработки и нанесения покрытий».

2. ГБЦ № 19-3147 «Разработка физико-технических основ создания ионных источников на основе торцевых холловских ускорителей с интегрированным плазменным нейтрализатором».

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка конструкции системы для измерения энергии ионов, плотности ионного тока, скорости нанесения.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

– провести анализ современных способов измерения характеристик заряженных частиц (ионов) и скорости нанесения при ионно-плазменном нанесении;

– разработать конструкцию шестиэлектродного электростатического зонда для измерения характеристик и диагностики ионных потоков, формирующихся при работе магнетронных распылительных систем и ионных источников;

- разработать конструкцию кварцевого датчика для измерения скорости нанесения, способного работать в условиях ионной бомбардировки при магнетронном распылении;

– провести исследования энергетических характеристик ионных потоков в процессах ионно-плазменного нанесения покрытий.

Объект исследования: потоки ионов и нейтральных частиц, формируемые при ионно-плазменных процессах нанесения тонкопленочных слоев.

Предмет исследования: энергетические характеристики ионов при формировании многокомпонентных тонкопленочных покрытий, распределение скорости нанесения при магнетронном распылении.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составил 77.12%. Заимствования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в списке «Литература».

Положения, выносимые на защиту

1. Методика увеличения равномерности обработки ионным пучком диэлектрической подложки при проведении операций ионной очистки и активации поверхности подложек. Позволяет увеличить равномерность плотности ионного тока на поверхности подложки на 50% по сравнению с исходной при плотности ионного тока 0,1 мА/см².

2. С использованием измерительной системы установлено, что максимум энергии ионного пучка в торцевых холловских ускорителях находится в диапазоне от 0,6 до 0,85 от напряжения разряда ионного источника. Степень моноэнергетичности ионов, которая оценивалась как отношение полосы энергетического спектра по уровню 0,3 от максимума энергии ионов, находилась в диапазоне от 0,25 до 0,65 и уменьшалась при увеличении напряжения разряда.

3. Методика in-situ измерения параметров потоков нейтральных и заряженных частиц (ионов) в процессе работы магнетронных несбалансированных распылительных систем, отличающаяся использованием для измерения скорости нанесения кварцевого датчика с дополнительной магнитной системой, позволяющей измерять скорость нанесения в присутствии потока заряженных частиц в зоне конденсации.

Апробация результатов диссертации

По теме диссертации сделаны доклады на:

- Международной юбилейной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня образования Гомельского государственного университета им. Франциска Скорины, ГГУ, 19–20 ноября 2020 г. г. Гомель.
- Республиканской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. БНТУ, 24 декабря 2020 г. Минск, 2020;
- 57-й СНТК научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, БГУИР, 26 апреля 2021 г. Минск, 2021.

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 3 доклада в материалах научных конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырёх глав с выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации составляет: 98 страниц, 54 иллюстраций, 42 наименования в библиографическом списке, 3 публикации.

Библиотека БГУИР

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы работы.

В главе 1 проведен анализ методов диагностики и исследования параметров ионных потоков при работе ионно-плазменных систем. Проведен обзор вакуумных методов нанесения многокомпонентных тонких плёнок.

В главе 2 разработана конструкция системы для измерения энергетических характеристик ионных потоков. Работа системы основана на получении тормозных характеристик многосеточного зонда с последующим их дифференцированием. Система работает с ионами с энергией до 1500 эВ и плотности ионного тока до 10 мА/см^2 . Для автоматизированной регистрации распределений скорости нанесения и плотности тока и энергии заряженных частиц при ионно-лучевом и ионно-плазменном распылении и диагностике ионно-плазменных устройств разработана система перемещения датчиков с комплексом автоматизированного сбора и обработки информации

В главе 3 проведены исследования энергетических характеристик ионного потока ионно-лучевых источников.

Получены профили распределения плотности ионного тока в области конденсации для проводящих и диэлектрических подложек, установлены зависимости энергии ионов от режимов работы ионного источника с максимумом 0,7 от ускоряющего напряжения для ускорителей с анодным слоем и 0,25 от ускоряющего напряжения для торцевых ионных источников. Плотность ионного тока составляла от десятых долей мА/см^2 для источников с анодным слоем до единиц мА/см^2 для торцевых источников.

В главе 4 исследовано распределение распыленного потока при ионно-плазменном формировании тонкопленочных слоев. Исследование проводилось методом кварцевого датчика. В качестве зонда использовалась модифицированная измерительная головка, отличающаяся наличием дополнительного магнитного поля в зоне кварцевого датчика, блокирующего воздействие заряженных частиц на кварцевую пластину. Были получены профили распределения для таких материалов как металлы (медь, титан, оксидные материалы)

В ходе работы было исследовано изменение плотности ионного тока при магнетронном распылении с и без использования диэлектрической подложки (рисунок 1).

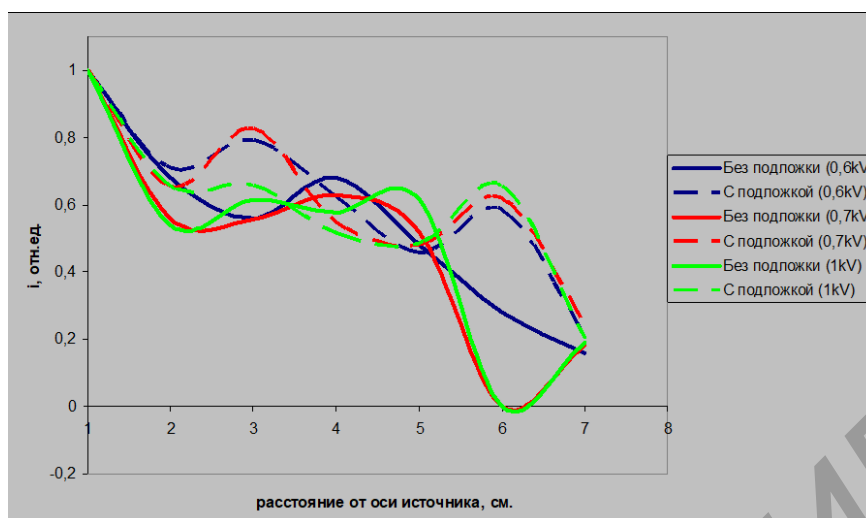


Рисунок 1 – Изменение плотности ионного тока с и без диэлектрической подложки в зоне обработки

В результате было установлено, что при накоплении заряда на поверхности диэлектрика, поток ионов начинает отклоняться от заданной траектории, увеличивая площадь обрабатываемой поверхности.

Исследовано распределение энергии ионов при магнетронном распылении. График распределения энергии ионов представлен на рисунке 2.

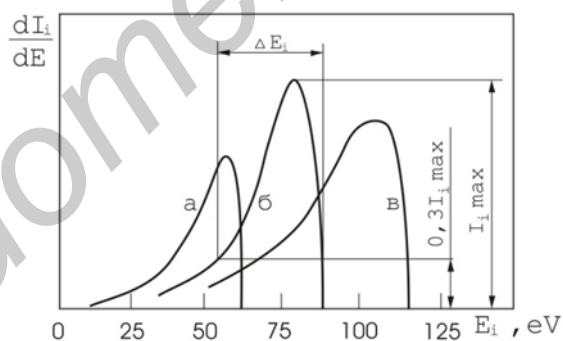


Рисунок 2 – Энергетические спектры ионов, при различном напряжении разряда ионного источника: а – 85 В, б – 100 В, в – 125 В

Было обнаружено, что напряжению разряда ионного источника соответствует свой уровень максимума плотности энергии ионов, а так же с увеличением напряжения разряда растёт значение максимума энергии потока ионов.

Исследована скорость нанесения плёнок в магнетронно-распылительных системах (МРС). Зависимость скорости нанесения от материала мишени представлена на рисунке 3.

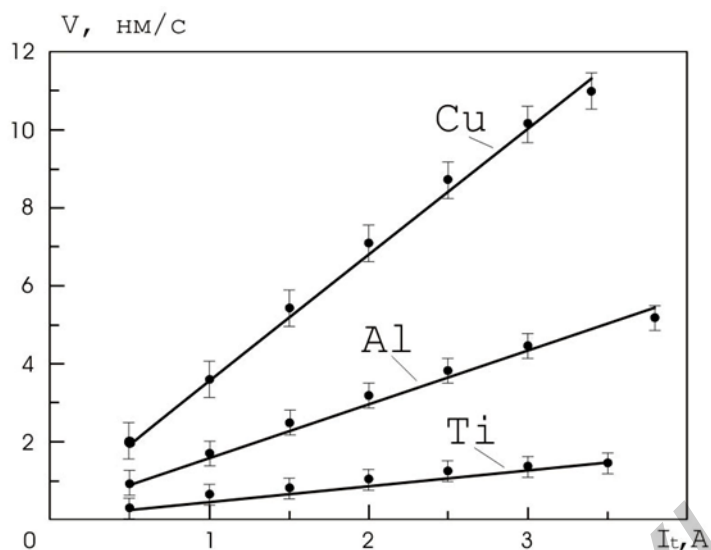


Рисунок 3 – Зависимость скорости нанесения на оси магнетрона от тока разряда для различных материалов мишени

Скорость нанесения плёнок в магнетронных системах зависит от материала мишени. Различие материалов различается в скорости их распыления, которая зависит от свойств материала, в том числе и его проводимости.

Нормированные профили скорости напыления мишени из Al в зависимости от тока разряда МРС представлено на рисунке 4.

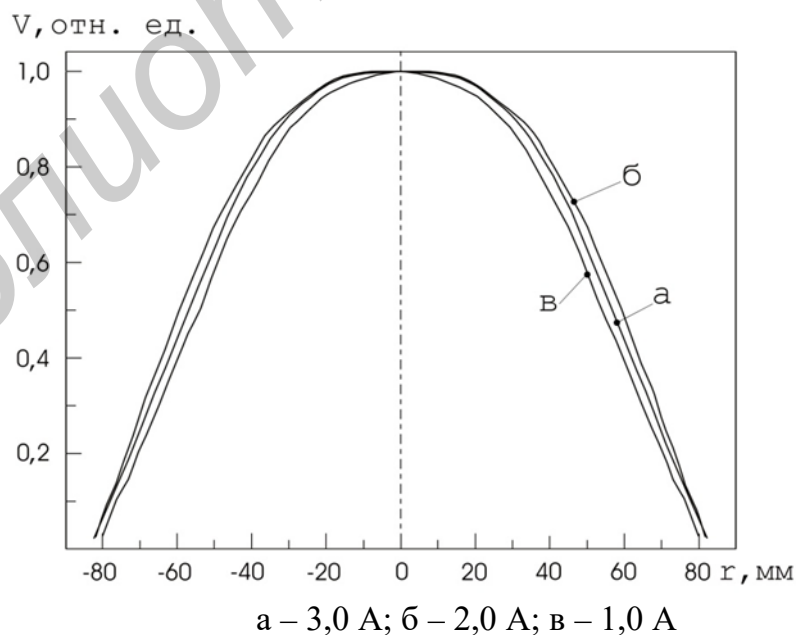


Рисунок 4 – Нормированные профили скорости нанесения при распылении Al мишени при различном токе разряда МРС

Ток разряда МРС не значительно влияет на скорость напыления.

Для несбалансированной МРС нормированные профили скорости нанесения при распылении Al мишени при различном токе разряда представлены на рисунке 5.

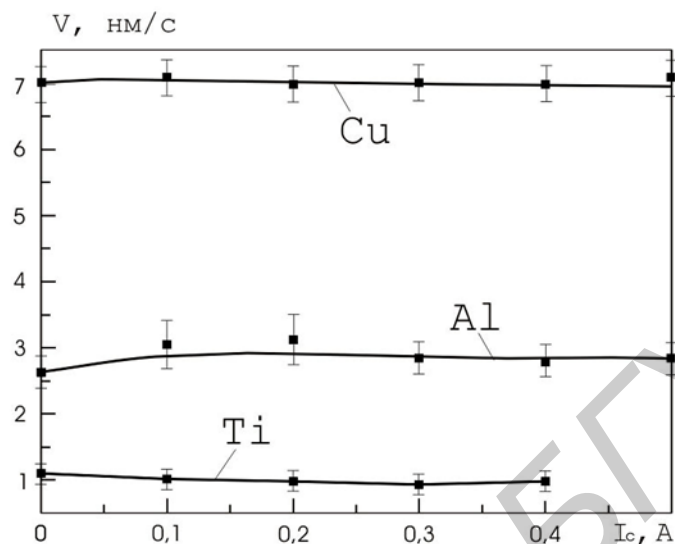


Рисунок 5 – Нормированные профили скорости нанесения при распылении Al мишени в несбалансированной МРС

Ток разряда несбалансированной МРС не значительно влияет на скорость напыления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения работы был проведен анализ методов контроля энергетических характеристик ионных пучков и скорости нанесения. Установлено, что наиболее предпочтительным для контроля плотности ионного тока являются датчики на основе цилиндра Фарадея, которые имеют высокую точность и низкую технологическую стоимость, с возможностью расширения границ измерения. Для контроля энергетических характеристик предложено использовать многосеточный зонд, а контроль скорости нанесения производить с помощью метода модифицированного кварцевого датчика с дополнительной магнитной ловушкой в активной зоне.

Разработана конструкция системы для снятия энергетических характеристик ионно-плазменных систем. Максимальная энергия ионов - 1500 эВ, максимальный измеряемый ток 10 мА/см².

Исследованы энергетические спектры ионных потоков ионных источников, определен профиль распределения скорости нанесения при распылении металлов магнетронным распылением.

Разработанная система оборудована шестисеточным зондом, устанавливаемым на подвижном основании непосредственно перед ионным источником и модифицированным кварцевым датчиком. Данные о токе коллектора зонда, напряжениях на сетках и частоте кварца передаются в блок управления, откуда после предобработки передаются на персональный компьютер, выполняющим анализ и вывод результатов на экран в виде графика распределения энергии ионов и плотности ионного тока, скорости нанесения.

Используя вакуумную установку ионно-плазменного распыления, были собраны и апробированы результаты по распределению ионного тока и энергии ионов для различных условий проведения эксперимента: при напряжении 0,6 кВ, 0,7 кВ; с диэлектрической подложкой и без диэлектрической подложки; с компенсатором и без компенсатора. С использованием компенсатора удалось понизить напряжение потребления на 100 В. Диэлектрическая подложка увеличила область распыления мишени на 50 %, уменьшив стабильность потока ионов.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Лам, Н.Н. Формирование защитных покрытий на титане методом импульсного реактивного магнетронного распыления / Н.Н. Лам и др. // Материалы Международной юбилейной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня образования Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины, 19–20 ноября 2020 г.: в 3 ч. Ч. 3 / Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – С. 134–138.

2. Доан, Х.Т. Формирование пленок оксида гафния-циркония методом реактивного магнетронного распыления комбинированной мишени / Доан Х.Т. и др. // Материалы Республиканской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. 24 декабря 2020 г. Минск, БНТУ 2020, в публикации

3. Пивоварчик, С.С. Измерение параметров пучков заряженных частиц в ионно-плазменных системах с использованием метода измерения тормозных характеристик / С.С. Пивоварчик // Материалы 57-й СНТК научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, БГУИР, 26 апреля 2021 г. Минск, 2021. – С. 292–295.