

Магнетронный источник ускоренного плазменного потока

© Л.П. Вересов, О.Л. Вересов

Сухумский физико-технический институт,
384900 Сухуми, Абхазия
e-mail: ol_veres@mail.ru

(Поступило в Редакцию 16 февраля 2015 г. В окончательной редакции 15 июня 2015 г.)

Представлен новый источник ускоренного плазменного потока, предназначенный для нанесения качественных покрытий. В нем зажигается комбинация магнетронного разряда для распыления катодной мишени и высоковольтного разряда с продольной осцилляцией электронов для ионизации наработанного пара, плотность плазмы которого распределяется равномерно благодаря применению трехфазного ионизатора.

Введение

В Сухумском физико-техническом институте авторы долгое время занимались разработкой новых источников ионов как для инжекторов ускорителей, так и для технологических установок. Ими был создан ионный источник, формирующий многокомпонентные пучки ионов газа и металла, в котором возбуждается комбинированный разряд, представляющий собой одновременное горение магнетронного и высоковольтного отражательного разрядов [1,2]. Применение такого разряда в ионном источнике позволило получить в нем уникальные эксплуатационные характеристики и применить его в технологической установке, разработанной для нанесения покрытий ионно-лучевым методом [3]. Комбинация магнетронного и высоковольтного разряда с продольной осцилляцией электронов была применена авторами при создании аппарата для нанесения покрытий плазменными методами на элементы термоэлектрических и термоэмиссионных приборов, а также элементы солнечных батарей [4]. В нем катодная область является магнетроном с вращающимся постоянным магнитным полем, а разрядная — реактором, помещенным в область разряда с продольной осцилляцией электронов. Дальнейшие работы по развитию этого аппарата и новый подход к построению его физической модели и конструкции привели авторов к созданию оригинального магнетронного источника ускоренного плазменного потока, который может заменить классические методы нанесения пленочных покрытий, такие как термическое, катодное, магнетронное, дуговое, каждый из которых имеет ряд своих характерных недостатков.

1. Конструкция магнетронного источника ускоренного плазменного потока и физические процессы в нем

Аппарат помещается в вакуумную камеру установки вертикально (рис. 1, фото 9) и собирается по блокам вверх, не требуя герметичного соединения. Все блоки и

элементы конструкции помещаются в керамические цилиндры, а последние складываются в единую газоразрядную камеру (ГРК) аппарата, выполняя роль изоляторов и стенок общего вакуумного объема.

Важно отметить, что керамические кольца, образующие стенку ГРК, покрыты экранами из нержавеющей стали толщиной 0.2–0.5 мм. Они защищают стенки керамических колец от запыления (рис. 1, фото 5).

В этом аппарате для равномерного и стопроцентного распыления поверхности мишени-катода, обязательно изготовленной из проводящего материала, применены скрещенные магнитное поле на постоянных возбудителях из SaCo и электрическое поле на постоянном токе.

Над катодом-мишенью располагается плоская из немагнитного материала многокольцевая осесимметричная сетка, являющаяся анодом с 80% -ной прозрачностью. Она формирует в катодной области аппарата электрическое поле (рис. 1, фото 6).

1.1. Магнитное поле, формирующее магнетронный разряд

В магнетронном разряде главным определяющим условием его горения является правильное построение структуры магнитного поля, при котором создается равномерное распыление мишени-катода при его вращении, позволяющее использовать более 95% массы мишени. Для этого магнитные возбудители из SaCo должны располагаться на магнитомягком стальном диске (магнитопроводе) (рис. 1, фото 1) в определенной позиции и с определенным чередованием полярностей. Поиск оптимального расположения магнитных возбудителей оказался довольно трудоемким процессом и занял много исследовательского времени.

При различном расположении магнитных возбудителей формируемая ими структура поля моделировалась с помощью железных опилок, измерялась величина поля на поверхности мишени, и исследовались следы распыления медной фольги (рис. 2). В зависимости от позиции магнитов на магнитомягком стальном диске и их полярности величина поля на поверхности мишени-катода была выбрана в диапазоне 100–500 Gs.

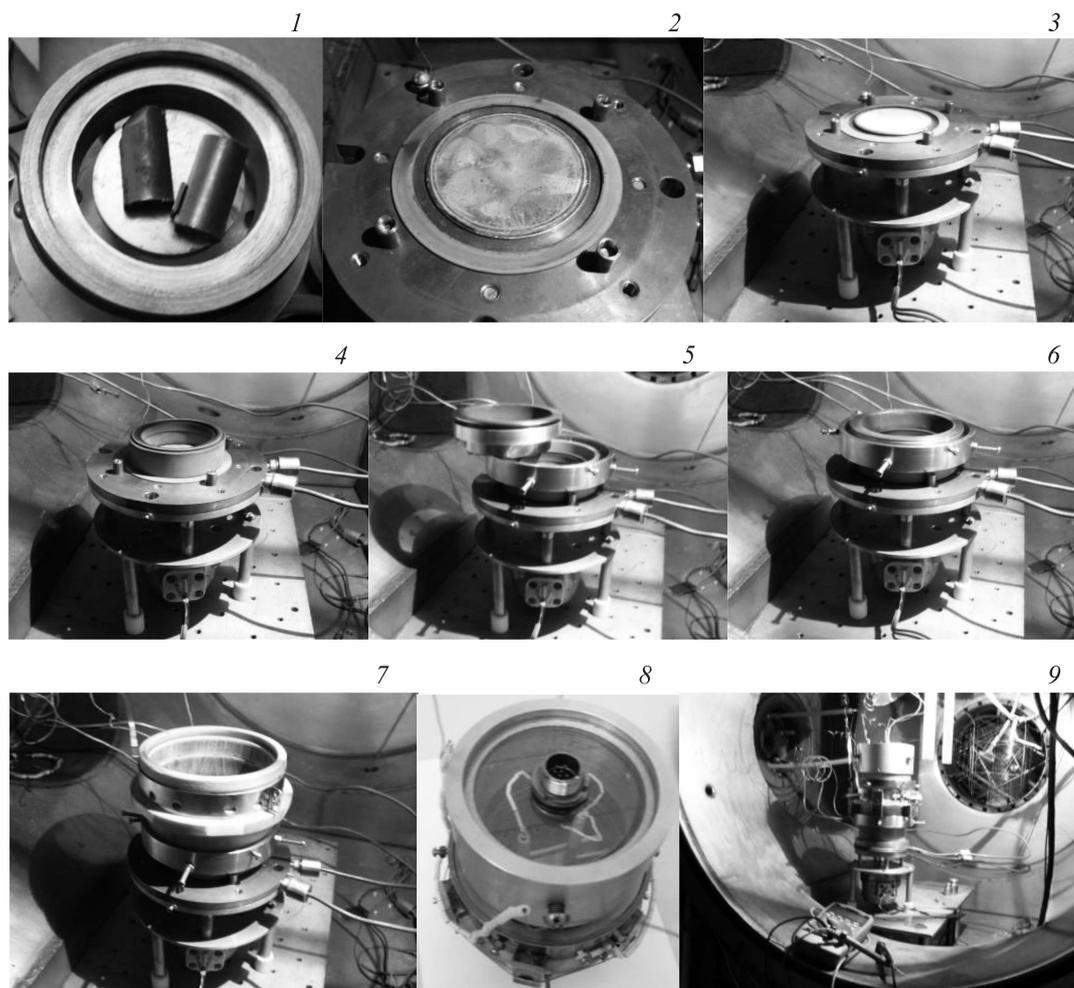


Рис. 1. Процесс почленной сборки (разборки) аппарата, который производится за несколько десятков минут. 1 — магнитная система, 2 — катод-мишень, 3 — катодный блок, 4 — катодный блок с керамическим изолятором соплом, 5 — установка анодного экрана, 6 — магнетронная часть аппарата (катодный блок с кольцевым анодом), 7 — установка ГРК осциллирующего разряда — реактора, 8 — область установки подложки и откачки аппарата, 9 — собранный аппарат, установленный в вакуумную камеру установки.

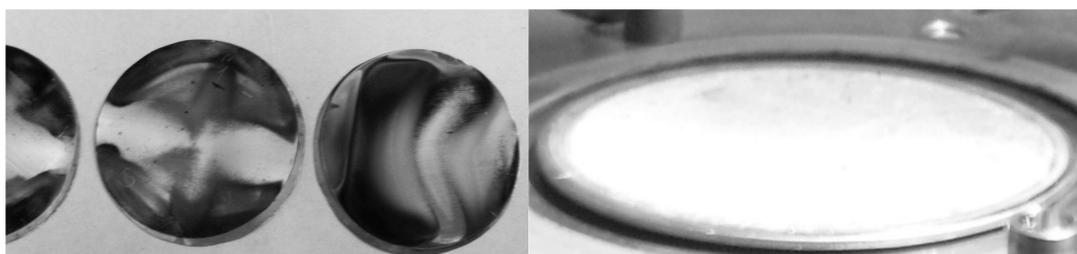


Рис. 2. Слева — следы распыления на медной фольге различных комбинаций расположения магнитных возбуждателей при остановленном вращении. Справа — вид равномерно распыленной мишени катода после работы при правильном подборе комбинации расположения магнитных возбуждателей.

Корректировка и проверка равномерности распыления окончательно проводилась на образцах мишени в ходе эксперимента (рис. 2). Это важная операция, от тщательности которой зависит равномерное и продолжительное распыление мишени до 97% ее массы, т.е. до разрушения задней поверхности мишени.

Магнетронный разряд в аппарате является разрядом на постоянном токе, горящим на поверхности мишени-катода в атмосфере какого-либо газа и пара. Он характеризуется яркой полосой излучающей плазмы как бы прилипшей к поверхности мишени (рис. 3). В районе скрещивания магнитного и электрического

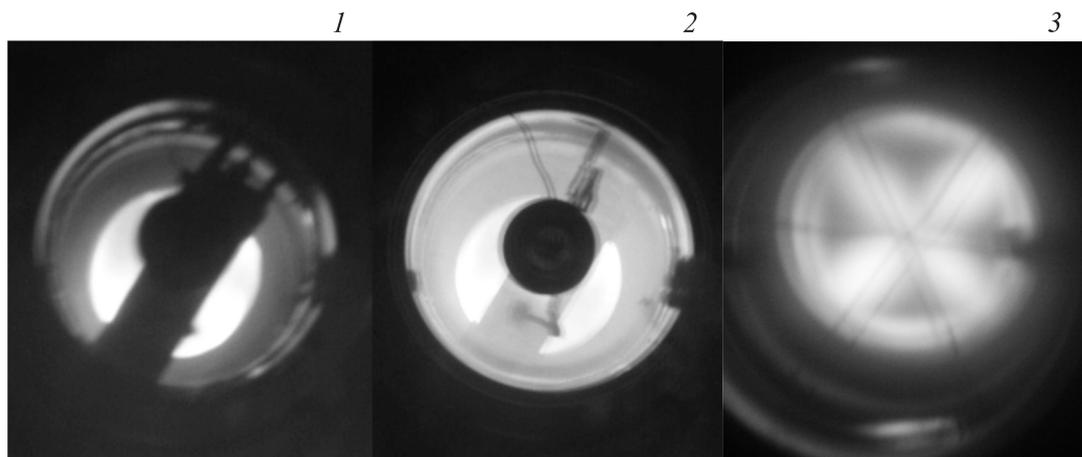


Рис. 3. Слева — в ГРК горит только магнетронный разряд, наблюдаемый в глубине камеры у катода. В центре — в ГРК горит комбинация магнетронного и высоковольтного осциллирующего разряда. Справа — к комбинации магнетронного и осциллирующего разряда, горящему в ГРК, добавляется разряд ионизатора с переменной полярностью в скрещенных магнитных и переменных электрических полях. На фото 1 и фото 2 видна подложка, расположенная в реакторе. В первом случае она находится над магнетронным разрядом, а во втором охватывается плазмой осциллирующего разряда, который заполняет всю ГРК.

полей происходят гамма-процессы, в которых сила Лоренца заставляет электроны закручиваться в спираль и дрейфовать в сторону анода, производя энергичную ионизацию плазмообразующего газа и пара.

Образующиеся в разряде положительные ионы под действием той же силы направляются в противоположную движению электронов сторону и, слегка меняя свою траекторию из-за значительно большего радиуса Лармора (почти по прямой), устремляются на мишень-катод, бомбардируя ее и сильно распыляя.

Распыленные частицы в значительной степени нейтральны и образуют паровую фракцию. Последняя, будучи нейтральной, через сопло в катоде и анодную сетку устремляется в зону с меньшим давлением, т. е. в полость реактора (см. конструктивную схему на рис. 4).

1.2. Разряд с продольной осцилляцией электронов

Через плазмообразующий газ паровая фракция распыляемой мишени и немагнитные электроны из разряда попадают в широкую полость плазмообразующего реактора. В предыдущем аппарате [4] авторы помещали подложку в ту область газоразрядной камеры, где горит осциллирующий разряд, и назвали эту часть ГРК-реактором, поскольку в ней происходил процесс напыления объекта, закрепленного на подложке. Это название области ГРК было сохранено и в описываемом аппарате.

Выше над реактором размещается широкий кольцевой электрод, находящийся под потенциалом катода, являющийся антикатодом (см. конструктивную схему на рис. 4). Он вместе с анодом и катодом аппарата создает электрическое поле, позволяющее возбуждать

в ГРК аппарата высоковольтный разряд с продольной осцилляцией электронов.

При соответствующем давлении внутри аппарата ($10^{-1} - 10^{-4}$ Torr) и его распределении (спадает от катода к антикатоде) зажигается высоковольтный разряд, в котором между катодом, анодом и антикатодом осциллируют электроны вдоль оси ГРК. Его зажигание заполняет плазмой всю внутреннюю полость аппарата и тем самым эффективно ионизирует паровую фракцию, наработанную в магнетронной области аппарата (рис. 3). В итоге в ГРК зажигается комбинация магнетронного и высоковольтного осциллирующего разрядов, создающая многокомпонентную плазму, состоящую из плазмообразующего газа и распыленного материала катода-мишени.

1.3. Трехфазный ионизатор

Измерение распределения плотности паровой фракции показало ее значительную неравномерность. Она сразу начинает спадать к стенкам по диаметру и вверх вдоль оси аппарата по параболическому закону. Поэтому требуются хорошее перемешивание поступающего материала в полость реактора и его высокая степень ионизации, т. е. образование плазменного сгустка, по форме похожего на хоккейную шайбу.

Выравнивание распределения плотности плазмы в реакторе с помощью перемешивания и его полная ионизация осуществлены разработанной авторами плазменной системой (ионизатором), представляющей собой комбинацию скрещенных магнитных полей на постоянных магнитах и трехфазного переменного электрического поля частотой 50 Hz.

В этой системе — плазмообразующем реакторе — зажигается сложный комбинированный разряд магнетронного типа в скрещенных полях, приводящий почти

к полной ионизации всего материала и образованию вращающегося плазменного сгустка, который является отличным эмиттером для отбора и ускорения из него плазменного потока на подложку (рис. 3).

Такое построение аппарата образует в нем источник плазмы с высоковольтным осциллирующим разрядом, который следует точнее называть плазменным ускорителем (ПУ).

Далее плазменный поток направляется на подложку, одновременно напыляя ее и разогревая до требуемой температуры.

1.4. Эксплуатация и конструкция ПУ

Эксплуатация ПУ для нанесения разных покрытий происходит в вакууме в трех технологических режимах: очистки и активации, распыления–напыления и отжига.

Технологический процесс необходимо проводить при непрерывной откачке вакуумного объема ПУ, а рабочий газ должен поступать в катодную область со стороны анода. Подача плазмообразующего газа со стороны катода приведет к „паразитным“ пробоям внутри аппарата и локальным распылениям элементов конструкции.

Вращение магнитной системы катодного блока лучше реализовывать при вертикальном расположении конструкции ПУ. При этом легко осыпаемые чешуйки напыляемого материала мишени с анода и с других элементов конструкции при блистеринге, который обычно сопутствует высокому темпу напыления, отслаиваются и падают на катод, а затем вновь включаются в процесс распыления. Другой довод в пользу вертикального размещения аппарата в вакуумной камере установки, откачивающейся до разряда 10^{-5} – 10^{-6} Торг, был отмечен выше: это поблочная сборка ПУ из керамических колец без герметичного уплотнения. При таком конструктивном решении сборка и разборка аппарата происходят за несколько десятков минут.

Поблочная сборка аппарата, показанная на рис. 1, начинается с закрепления электродвигателя вакуумного исполнения на дне катодного блока. Стальной диск магнитной системы соединен валом с электродвигателем через изолирующую муфту. Диски используются двух размеров: 60 и 100 мм в диаметре и толщиной 8–10 мм. На них устанавливаются магнитные возбуждители из SaCo в определенном порядке расположения и полярности.

Охлаждаемый водой катодный блок представляет собой медное кольцо, к которому крепится электродвигатель вращения магнитной системы (рис. 1, фото 3). В блоке имеются кольцевой паз для установки в него керамического цилиндра и кольцевая ступенька для укладки на ней медной пластины толщиной 1–1.5 мм, являющейся дном аппарата. На медную пластину кладется распыляемая мишень (рис. 1, фото 2) и ограничивающий ее керамический цилиндр высотой примерно 20 мм. Он образует катодную полость — сопло для выхода пара (рис. 1, фото 4). Мишени могут быть изготовлены из разных материалов, но они обязательно должны быть

электропроводящими. Применялись мишени от фольги толщиной в десятки μm до толщины материала в 5 мм.

Важно, чтобы магнитный поток присутствовал над поверхностью мишени, охватывая при своем вращении всю ее площадь.

За катодным блоком на расстоянии 5–10 мм располагается сеточный плоский кольцевой анод, назначение которого — создать жесткую границу положительного потенциала в осциллирующем разряде аппарата.

Далее по высоте располагается реактор. Магнитное поле в реакторе формируется шестью одинаковыми сборками из SaCo возбуждителей. Каждая сборка выполнена из магнитомягкой стальной планки (ярма) и расположенных по краям планки с определенным зазором магнитных возбуждителей с разной полярностью. Таким образом, в сборке создается магнитное поле с индукцией в максимуме порядка 1 kGs.

Все шестьборок располагаются снаружи на керамическом цилиндре реактора вертикально с одинаково направленной полярностью. Поле каждой сборки проникает вовнутрь аппарата, и эти поля образуют там сложную конфигурацию объединенного магнитного поля, похожего на „беличье колесо“ и ориентированного вертикально (приближение к соленоиду).

Электрические поля создаются с помощью трех горизонтально направленных сквозных стержневых электродов (антенн), выполненных из миллиметровой нержавеющей проволоки (см. конструктивную схему на рис. 4).

На стержневые электроды подается трехфазное регулируемое сетевое напряжение частотой 50 Hz.

Таким образом, в объеме реактора создаются скрещенные магнитные и электрические переменные поля в шести секторах полости реактора.

При работе аппарата в каждом секторе реактора горит магнетронный разряд. Движение заряженных частиц в нем поступательно-возвратное и направлено радиально от стенки камеры к ее оси и обратно из-за смены полярности в электропитании.

В то же время заряженные немагнитные частицы попадают в переменное электрическое поле с чередующейся полярностью в соседних секторах. Это электрическое поле заставляет заряженные немагнитные частицы двигаться по круговым траекториям, вращая ионы в одну сторону, а электроны в противоположную сторону. Таким образом, в ионизаторе возбуждается и горит сложный разряд с переменной полярностью в скрещенных магнитных и переменных электрических полях (рис. 3). Выравнивание плотности плазмы по всему объему шайбы главным образом объясняется действием центробежной силы на заряженные частицы в ней при их вращении со скоростью, близкой к синхронной скорости (3000 rpm), как у асинхронных двигателей.

Этот разряд в реакторе к тому же помещен в осциллирующий разряд аппарата, но не связан с ним электрически по цепям, а только по плазме.

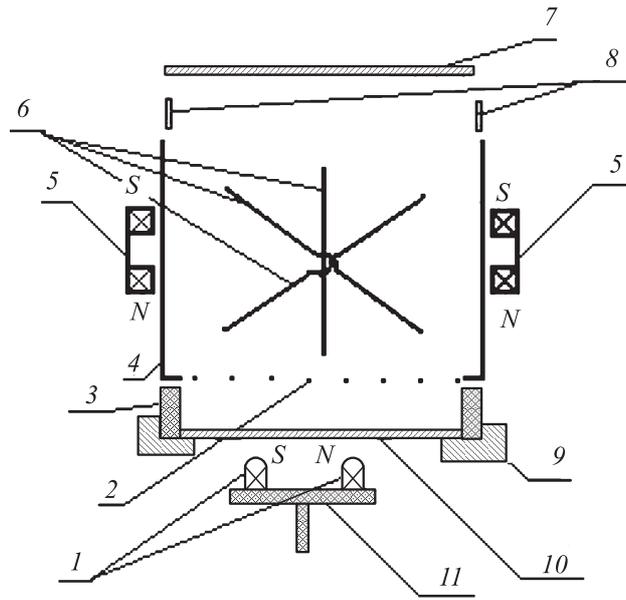


Рис. 4. Слева — вид плазменного ускорителя. Справа — конструктивная схема плазменного ускорителя: 1 — самарий кобальтовые постоянные магниты, 2 — кольцевой анод, 3 — керамическое сопло, 4 — анодный экран, 5 — магнитные сборки, формирующие поле в ионизаторе, 6 — горизонтальные проволочные стержни-электроды (антенны) ионизатора, 7 — подложка, 8 — кольцевой антикатод, 9 — медное анодное кольцо, 10 — плоская катодная мишень, 11 — диск-магнитопрод.

Из плазмы такого мощного разряда извлекается и ускоряется плазменный поток с регулировкой энергии частиц обеих полярностей и направляется на подложку.

За реактором расположен широкий кольцевой антикатод, примыкающий к керамической стенке. Поскольку возможно очень незначительное распыление кольца антикатада, его желателно изготавливать из материала мишени.

Для отбора и ускорения положительных ионов из плазмы реактора необходимо нулевой провод трехфазного электропитания соединить с подложкой, находящейся за антикатодом. При этом на подложку одновременно из разных плазменных секторов в реакторе будут отбираться и ускоряться ионы и электроны, т.е. скомпенсированный плазменный поток с энергией частиц, соответствующей ускоряющему переменному напряжению от источника электропитания. При этом ионы напыляют подложку, а электроны ее греют.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Электрическая схема подключения

Схема подключения плазменного ускорителя показана на рис. 5. Высоковольтный источник постоянного тока клеммой положительного потенциала подключен к аноду. Клемма его отрицательного потенциала через балластные резисторы соединена с катодом и антикатодом. Такое подключение высоковольтного источника постоянного тока позволяет сформировать электрическое поле, необходимое для возбуждения магнетронного разряда

в промежутке катод–анод и осциллирующего разряда в промежутке катод–анод–антикатод. Высоковольтным источником постоянного тока служит блок питания магниторазрядного насоса БП-100, управляемый ЛАТРОм.

Для подачи переменного электропитания на электроды ионизатора, служащего для выравнивания плотности плазмы в реакторе аппарата, применен плавно регу-

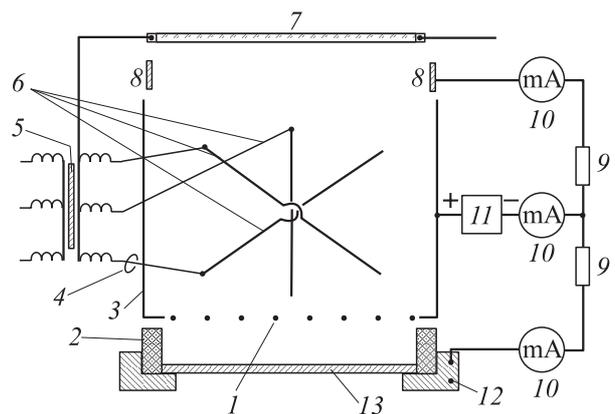


Рис. 5. Схема подключения плазменного ускорителя: 1 — кольцевой анод, 2 — керамическое сопло, 3 — анодный экран, 4 — индукционный датчик тока, 5 — трехфазный высоковольтный трансформатор частотой 50 Hz, 6 — горизонтальные проволочные стержни электроды (антенны) ионизатора, 7 — подложка, 8 — кольцевой антикатод, 9 — балластные сменные резисторы, 10 — миллиамперметры, 11 — высоковольтный источник постоянного тока, 12 — медное анодное кольцо, 13 — плоская катодная мишень.

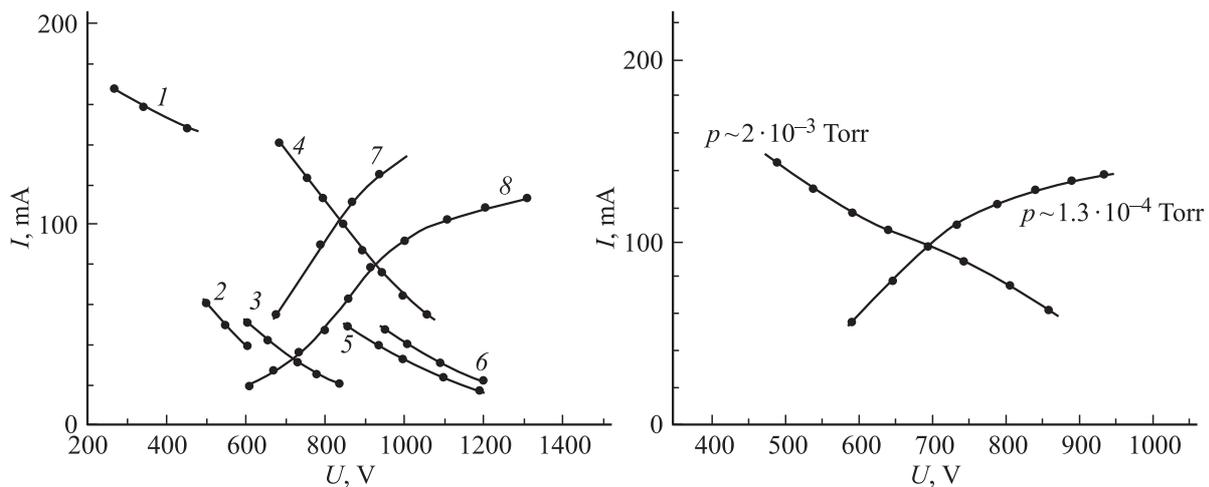


Рис. 6. Слева — ВАХ магнетронного и высоковольтного осциллирующего разрядов. Справа — ВАХ комбинации магнетронного и высоковольтного осциллирующего разряда при различном разрежении ГРК.

лируемый трехфазный высоковольтный трансформатор сетевого напряжения с частотой 50 Hz. Измерение токов и напряжений постоянного тока проводилось миллиамперметрами и киловольтметрами, а переменный ток измерялся осциллографом с помощью индукционного датчика (пояса Роговского).

2.2. Режимы работы комбинации магнетронного и высоковольтного осциллирующего разрядов

Откачка ПУ осуществляется насосами вакуумной системы установки через отверстия, находящиеся в его верхней части, в области расположения подложки. В эти отверстия вкручены винты, один из которых хорошо виден на рис. 4, фото 8. Регулировка откачки из аппарата осуществляется выкручиванием винтов из отверстий. Чем больше отверстий свободно от винтов, тем производительнее откачка ПУ. Причем она должна происходить непрерывно, поэтому минимум одно отверстие должно быть свободно. Разрежение в ГРК при работе аппарата распределяется следующим образом: у катода в области горения магнетронного разряда оно порядка 10^{-1} – 10^{-2} Torr, а у антикатада в области горения осциллирующего разряда оно порядка 10^{-3} – 10^{-4} Torr. При этом разрежение в вакуумной камере установки находится на уровне $5 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-6}$ Torr. Значительный перепад давлений между областями горения магнетронного и осциллирующего разрядов связан с тем, что откачка из ПУ происходит также через щели керамических колец, образующих его ГРК.

В зависимости от условий в ГРК ПУ, таких как градиент распределения давления плазмообразующего газа и величина вносимой мощности, в ней могут возбуждаться как комбинация магнетронного и высоковольтного осциллирующего разрядов, так и только магнетронный или только высоковольтный осциллирующий разряд. Причем

для горения магнетронного разряда требуется более высокое давление плазмообразующего газа (пара), чем для горения высоковольтного осциллирующего разряда. Для горения комбинации магнетронного и высоковольтного осциллирующего разрядов должен быть создан необходимый перепад давлений между областями горения указанных разрядов, о чем было сказано выше.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) магнетронного и осциллирующего разрядов показаны в левой части рис. 6. Все кривые, спадающие вправо, относятся к магнетронному разряду, а все кривые, возрастающие вправо, принадлежат высоковольтному отражательному разряду. Кривая 1 снята при разрежении в катодной области порядка 10^{-1} Torr. Кривые 2, 3 сняты при разрежении в катодной области порядка $5 \cdot 10^{-2}$ Torr. Кривые 4–6 сняты при разрежении в катодной области порядка 10^{-2} Torr. Кривая 7 снята при разрежении в области реактора порядка 10^{-3} Torr, а кривая 8 при разрежении в области реактора порядка 10^{-4} Torr.

Вольт-амперные характеристики комбинации магнетронного и высоковольтного осциллирующего разрядов при различных давлениях в ГРК ПУ показаны в правой части рис. 6. На них видно, что при более высоком давлении в ГРК превалирует горение магнетронного разряда, а при понижении давления в ГРК акцент сдвигается в сторону осциллирующего разряда.

2.3. Работа ПУ с формирователем биполярных импульсов и трехфазным ионизатором

Формирователь биполярных импульсов впервые был применен авторами при подключении электропитания подложки и распыляемой пластины в реакторе установки ионно-лучевого напыления, описанной в работе [3]. Он обеспечивал регулируемое переменное напряжение амплитудой до 1.5 kV с частотой 50 Hz, причем его отрицательный полупериод обрезался группой стабилитронов, подключенных последовательно, которые позволяли

дискретно регулировать амплитуду напряжения обрезанного импульса от 50 до 300 В. С его помощью электроны ускорялись до энергии более килоэлектронвольта и, бомбардируя подложку, грели ее. В то же время он не позволял ионам набирать энергию более 300 эВ и тем самым давал возможность проводить эффективный процесс напыления подложки, подавляя процесс ее распыления, который с ростом энергии ионов превалирует над процессом напыления.

В описываемом ПУ ионы в области горения осциллирующего разряда набирают энергию, близкую к одному килоэлектронвольту. Поэтому формирователь биполярных импульсов был применен в схеме питания ПУ, положительный потенциал которого подключается к аноду, а отрицательный — к подложке. Он позволяет ускорять электроны из плазмы разряда на подложку до энергий свыше одного килоэлектронвольта, а ионы до энергий не более 300 эВ и тем самым проводить эффективные процессы нагрева и напыления подложки. В то же время с его помощью значительно эффективнее происходит ионизация пара в ГРК ПУ. Осциллограмма импульсов тока, выдаваемых биполярным формирователем, показана на рис. 7. На ней виден синусоидальный ток обеих полярностей, измеренный с помощью индукционного датчика (пояс Роговского).

Применение в осциллирующем разряде формирователя биполярных импульсов на переменном токе позволило значительно увеличить адгезию напыляемых пленок. Но совершенно неудовлетворительная разнотолщинность покрытий порядка 30% заставила авторов вести поиск для устранения этого неблагоприятного фактора. Стандартное решение увеличивать в разы распыляемую катодную мишень в нашем случае оказалось неприемлемым. Проблему неудовлетворительной разнотолщинности покрытий авторы решили введением в область осциллирующего разряда вместо формирователя биполярных импульсов, трехфазного ионизатора на сетевом переменном токе. Он позволил улучшить

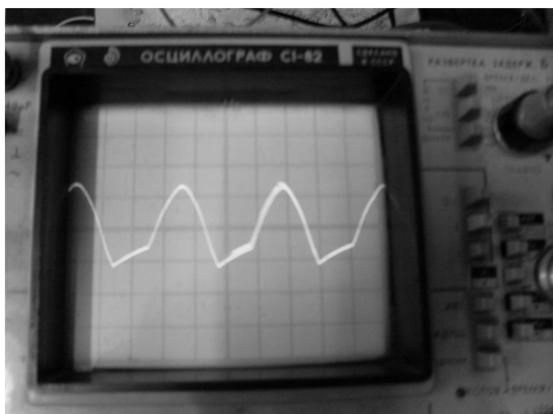


Рис. 7. Осциллограмма импульсов тока, генерируемых биполярным формирователем. Положительный импульс — ток электронов на подложку, отрицательный импульс — ток ионов на подложку, клетка соответствует 100 мА.

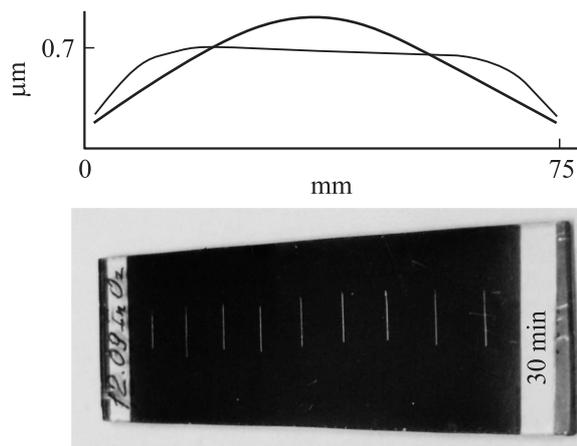


Рис. 8. Графики распределения толщины покрытий стеклянных пластинок, снятые интерферометром МИИ-4М, и стеклянная пластинка, на которой проводилось измерение разнотолщинности напыленного слоя.

распределение толщины покрытия, которая оказалась в пределах 2–5%, что видно на рис. 8. На этом же рисунке показана напыленная стеклянная пластинка, на которой проводились измерения разнотолщинности покрытия интерферометром МИИ-4М.

Конструкция трехфазного ионизатора и физические процессы, происходящие при его работе, описаны выше в разд. „Конструкция плазменного ускорителя и физические процессы в нем“.

Заканчивая описание работы плазменного ускорителя, надо отметить следующее.

1. В аппарате создаются области горения разных разрядов.
2. Магнетронный разряд, горящий в катодной области, создает паровую фракцию распыляемого вещества с катода-мишени.
3. Высоковольтный осциллирующий разряд, горящий в области реактора, ионизирует паровую фракцию и заполняет плазмой весь объем аппарата.
4. Формирователь биполярных импульсов на переменном однофазном токе увеличивает степень ионизации плазмы осциллирующего разряда и позволяет использовать ее электроны для нагрева подложки, а также ограничивает энергию ионов, ускоряемых из плазмы на подложку, до 50–300 эВ. Из-за неудовлетворительной разнотолщинности покрытий, получаемых при использовании формирователя биполярных импульсов, последний был заменен трехфазным ионизатором переменного сетевого тока.

5. Трехфазный ионизатор переменного сетевого тока полностью ионизирует плазму в скрещенных магнитных и электрических переменных полях в области реактора и создает вращающиеся локальные секторные области плазмы, из которых отбираются и ускоряются на подложку ионные и электронные скомпенсированные потоки частиц. Первые ее напыляют, а вторые греют. В то же время за счет вращения заряженных немагнитных

Режим работы ПУ при проведении технологического процесса

τ	ch/min	17.04	17.15	18.00	18.15	18.25	18.40	19.00	Примечание
p	Torr	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	Пересчет по кривой
U_r	V	1700	800	800	1200	900	900	900	
I_k	mA	—	35	30	45	40	40	40	Амплитуда на входе
I_{osci}	ma	—	30	25	45	95	85	83	
I_{pod}	mA	—	74	88	—	—	—	—	
$U_{3faz.toka}$	V	—	—	—	500	500	500	500	
t_{podl}	mV	—	—	8.0	9.8	11.4	12.8	12.8	
t_{podl}	°C	—	—	180	210	270	315	341	

частиц в локальных секторах областей плазмы формируется плазменный сгусток, по форме напоминающий хоккейную шайбу, выровненную по плотности. Формирование трехфазным ионизатором такого плазменного сгустка позволяет снизить разнотолщинность покрытий с 30 до 2%.

2.4. Работа ПУ с трехфазным ионизатором при проведении технологических экспериментов

Характеризуя работу ПУ при проведении технологических процессов, надо отметить следующее. Использовались катодные мишени разных металлов и сплавов. Причем помимо традиционных металлов, таких как медь, молибден, титан, проводились работы с довольно экзотическими для магнетронных распылителей материалами, такими как никель, легкоплавкие индий и олово. В первом случае мишень изготавливается из никелевого листа толщиной 1 mm. Магнитное поле хоть и ослабляется, но позволяет возбуждать магнетронный разряд. Из-за того что токи магнетронного разряда не превышают 50 mA, удается проводить десятки напылений до разрушения никелевой мишени. Благодаря слабому магнетронному разряду не вызывает проблем распыление мишеней-катодов легкоплавких металлов.

Проведение работ с катодными мишенями, состоящими из таких соединений как никель–сурьма, медь–цинк, медь–олово, индий–олово, свинец–олово, показало, что наблюдается сохранение стехиометрии при переносе вещества с мишени-катода на подложку.

Хотя ток магнетронного разряда невелик, скорость нанесения покрытия на подложку довольно высока — порядка 2 μm в час, что связано с возбуждением высоковольтного осциллирующего разряда, в котором токи достигают порядка сотни миллиампер. Ионизованный пар большей частью попадает на подложку, почти не оседая на элементах конструкции плазменного ускорителя.

Благодаря нагреву подложки электронами и ускорению ионов до 300–500 eV адгезия покрытий довольно высока. Напыленные пленки не удавалось оторвать от стеклянной подложки липкой лентой „скотч“.

Режимы работы ПУ при проведении одного из технологических процессов сведены в таблицу. Причем материалом мишени-катода являлось соединение индия

с оловом, плазмообразующим газом был аргон плюс кислород, напылялась подложка из стеклянной пластинки (рис. 8). Величина балластного резистора в цепи анод–катод равнялась 10 k Ω , а в цепи анод–антикатод 15 k Ω . Разряжение в камере установки в начале технологического процесса было $3.8 \cdot 10^{-5}$ Torr, а в его конце $1.6 \cdot 10^{-5}$ Torr. Газовый сброс из ПУ осуществляется через два открытых отверстия, находящихся в верхней его части, где помещается подложка (рис. 4, фото 8).

В 17.04 включается электропитание для зажигания разряда.

В 17.15 и 18.00 устанавливаются режимы горения разряда, при которых максимальный ток распределен на подложку. В этих режимах происходит процесс очистки и активации ее поверхности.

В 18.15 в работу ПУ включается трехфазный ионизатор. Начинается процесс напыления подложки индий–оловом.

В 18.25 в верхнюю часть аппарата в область нахождения подложки, через третье отверстие и через регулируемый игольчатый натекагель подается кислород. Начинается процесс напыления подложки и образование оксида индия–олова.

В 19.00 процесс напыления подложки оксидом индия–олова завершается.

Заключение

Представленный в работе аппарат для нанесения покрытий плазменным методом имеет преимущества над наиболее распространенными плазменными системами для нанесения пленочных покрытий.

Он позволяет в едином технологическом цикле проводить процесс очистки и активации поверхности, процесс напыления покрытий и процесс нагрева подложки потоками ускоренных электронов.

Ускоренный плазменный поток, генерируемый этим прибором, лишен капельной фракции в отличие от плазменного потока, формируемого дугowymi испарителями, капельная фракция которого не позволяет наносить качественные покрытия. Конечно, с капельной фракцией в плазменном потоке дугowych испарителей борются, делают различные фильтры, но полностью они не решают этой проблемы.

В магнетронных распылительных системах нанесение покрытий осуществляется в основном паровой фракцией, которой почти невозможно управлять. В таких системах сложно наносить синтезированные соединения нитридов, оксидов и т.д. с заданной стехиометрией. Описанный в работе плазменный ускоритель благодаря ионизации паровой фракции позволяет наносить сложные синтезированные покрытия с заданной стехиометрией.

Ускоренный плазменный поток, генерируемый представленным в работе технологическим аппаратом, состоит из вращающихся секторов ускоренных ионов и ускоренных электронов, компенсирующих друг друга. Поэтому во время технологического процесса одновременно происходит напыление подложки ионами и ее нагрев электронами, что позволяет получать пленочные покрытия не только аморфного состояния, но и кристаллического.

Поскольку покрытия производятся потоками частиц с энергией порядка 300 eV, и во время процесса напыления происходит нагрев подложки, то адгезия покрытий получается высокой, более 40 kg/cm², без предварительной подготовки поверхности перед напылением.

ПУ работает при довольно низких токах разряда, порядка сотни миллиампер, что позволяет распылять легкоплавкие металлы, такие как индий или олово.

Также важно отметить, что благодаря применению трехфазного ионизатора переменного сетевого тока прибор позволяет наносить покрытия с разнотолщиной, не превышающей 2–5%.

Благодаря определенной конфигурации магнитного поля и его вращения происходит равномерное распыление мишени-катода, позволяющее использовать более 95% ее массы.

Поскольку напыление подложки происходит внутри плазменного ускорителя и она изолирована стенкой ПУ от вакуумной камеры установки, различные загрязнения, которые летят со стенок вакуумной камеры установки, и пары масла откачных средств не попадают на подложку и тем самым не загрязняют ее.

Список литературы

- [1] Вересов Л.П., Вересов О.Л., Литвинов П.А. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 111–117.
- [2] Barchenko V.T., Veresov L.P., Veresov O.L., Grigorenko S.V. // 5th Int. Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 2000. P. 220–223.
- [3] Вересов Л.П., Вересов О.Л., Кушакевич Ю.П., Петров Г.Ф., Чачаков А.Ф., Цеквава И.А. // Вакуумная техника и технология, 2008. Т. 18, № 4. С. 249–259.
- [4] Вересов Л.П., Вересов О.Л., Кушакевич Ю.П., Хупория А.Л., Чачаков А.Ф. // Труды 10^й Международной конференции „Пленки и покрытия 2011“. СПб., 2011. С. 217–219.