

УДК 621.384.647; 621.793.14

**ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ УСТАНОВКА СО СТАЦИОНАРНЫМИ
И ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПЛАЗМЫ****А.Г. ДЕНИЖЕНКО, чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Э.И. ТОЧИЦКИЙ,
О.В. СЕЛИФАНОВ, Е.В. МОЧАЙЛО****(Научный инженерный центр «Плазмотег» Физико-технического института
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск),****В.В. ШЕЛЕГ****(Сморгонский завод оптического станкостроения)**

Представлена информация о новой технологической установке вакуумного плазменного нанесения многофункциональных тонкопленочных покрытий на основе металлов и алмазоподобного углерода на обрабатывающий и мерительный инструмент, а также на детали машин и механизмов.

Введение. С каждым годом все большее внимание ученых, конструкторов и технологов привлекают тонкие пленки и покрытия на основе металлов и углерода. Так, например, применение тонких пленок титана, углерода, алюминия, циркония и некоторых их соединений и композиций оказалось чрезвычайно эффективным в различных отраслях промышленности для получения износостойких [1, 2], защитных, антифрикционных, коррозионно-стойких и декоративных [3, 4] покрытий.

Сравнительно хорошо разработанными методами нанесения тонких пленок и покрытий, которые представляют, несомненно, практический интерес, являются такие методы, как магнетронное распыление [5 - 7, 9] и осаждение из потока ускоренной электроэрозионной плазмы, генерируемого вакуумно-дуговым плазменным ускорителем непрерывного (стационарного) действия [3, 8 - 10]. К настоящему времени эти методы достигли высокого уровня технической оснащенности и широко внедрены в производство [2, 7]. Тем не менее, они не лишены ряда существенных недостатков. Так, например, значения определяющих параметров технологического процесса при магнетронном распылении далеки от тех значений, при которых обеспечиваются оптимальные условия роста тонкопленочной структуры [6 - 9]. При этом трудно обеспечить требуемую стабильность процесса и получение заданных физических характеристик конденсатов с высокой воспроизводимостью [5, 6], кроме того, сформированные пленки содержат значительное количество газовых включений [5].

Генерация потоков ускоренной электроэрозионной плазмы сопровождается эмиссией макрочастиц [8 -- 10, 21, 22] - процессом, проявляющимся наиболее интенсивно в непрерывном режиме ее горения. Размеры макрочастиц могут достигать нескольких десятков микрометров [8 - 10]. В результате попадания частиц на поверхность конденсации снижается плотность покрытия, ухудшается его однородность, равномерность по толщине и адгезия [10].

Широкое распространение для нанесения подобных покрытий получили вакуумно-дуговые установки типа ВУ-2МБС, ВУ-700Д, ВУ-1100Д, выпускаемые Сморгонским заводом оптического станкостроения (РУП «СЗОС»). На предприятиях Казани, Харькова, Новосибирска выпускались установки ННВ6.6 («Булат»), в Москве - установки «Пуск». Аналогичные установки выпускаются некоторыми зарубежными фирмами, такими как «Balzers» - Люксембург, «Leibold» - Германия, «Ionbond» - США. Все они оснащены стационарными вакуумно-дуговыми источниками без сепарации плазмы.

Качественно новые возможности в технологии нанесения тонких пленок и покрытий на основе металлов и углерода открывает использование сепарированных стационарных и импульсных потоков эрозионной плазмы, полученных в вакууме с помощью вакуумно-дуговых электроэрозионных ускорителей [5, 7, 8 -21]. Использование сепараторов плазмы позволяет практически исключить один из главных недостатков вакуумно-дугового метода нанесения покрытий - наличие макрокапель или макроосколков материала катода в покрытиях.

Впервые сепарация плазменного потока стационарного вакуумно-дугового ускорителя была использована на установках, выпускавшихся на ПО «Кварц» (г. Калининград) - УВНИПА-1-001, УВНИПА-1-002. На установках ПО «Кварц» установлены стационарные вакуумно-дуговые источники сепарированной плазмы с катодами из металла, импульсные ускорители электроэрозионной плазмы с катодами из графита без сепарации потока плазмы.

Опыт эксплуатации установок УВНИПА-1-002 показал, что они по всем технологическим возможностям превосходят известные установки по нанесению покрытий вакуумно-дуговым методом. Что же касается нанесения алмазоподобных покрытий с помощью импульсных вакуумно-дуговых ускорителей с катодом из графита, то следует отметить недостаточную надежность и низкий ресурс используемых в этой установке ускорителей, а также малый диаметр (примерно 80 мм) зоны эффективного осаждения плазмы из углерода.

Необходимость решения проблем, описанных выше, а также потребность в высокопроизводительных вакуумно-дуговых установках промышленного назначения, с помощью которых можно было бы полу-

чать покрытия с заданными свойствами и хорошей воспроизводимостью, привела к разработке и изготовлению вакуумно-дуговой установки ВДУ-СИ. Указанная установка разработана совместно Научным инженерным центром «Плазмотег» Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и Республиканским унитарным предприятием «Сморгонский завод оптического станкостроения».

Описание вакуумно-дуговой установки ВДУ-СИ. Вакуумно-дуговая установка со стационарными и импульсными вакуумно-дуговыми плазменными ускорителями (ВДУ-СИ) с сепарацией плазмы предназначена для нанесения покрытий различного функционального назначения (в том числе алмазоподобных углеродных) на детали машин и механизмов, изделия инструментальной промышленности (мерительный, металло- и деревообрабатывающий инструмент), на оптические линзы и стекла (включая оптические элементы из полимерных материалов), химически инертные покрытия на хирургические инструменты и эндопротезы, на оптические и магнитные устройства хранения информации в качестве защитных покрытий, а также защитно-декоративные покрытия на изделиях из стекла, фарфора и стали.

Вакуумно-дуговые установки ВДУ-СИ конструктивно представляет собой устройство, состоящее из следующих функциональных блоков:

- вакуумный блок;
- агрегат форвакуумный;
- стойка управления откачкой;
- стойка управления стационарными плазменными ускорителями;
- шкаф блоков питания стационарных плазменных ускорителей;
- стойка питания и управления импульсными плазменными ускорителями.

Максимальная электрическая мощность, потребляемая установкой, не более 60 кВт.

Площадь, необходимая для размещения установки, не более 30 м².

Питание установки осуществляется от трехфазной 4-проводной с нулевым проводом сети переменного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

Нормы качества электроэнергии по ГОСТ 13109-82.

Вакуумный блок состоит из вакуумной камеры, имеющей внутренний диаметр 900 мм и высоту 900 мм (эффективный размер - диаметр 800 мм, высота 750 мм), системы водяного и газового снабжения, системы вакуумных насосов.

Вакуумная камера имеет криопанель, вакуумные магистрали снабжены ловушками для предотвращения попадания масла из диффузионного насоса в вакуумную камеру и из форвакуумного агрегата в вакуумные магистрали. Конструкция вакуумного блока с вакуумной камерой, а также отдельными стойками питания и управления позволяет перемещать их в условиях производственных помещений без использования подъемно-транспортных механизмов.

На вакуумной камере установлены следующие технологические средства:

- 3 стационарных вакуумно-дуговых плазменных ускорителя (СПУ) с катодами из металла с сепарацией плазменного потока;
- 4 импульсных вакуумно-дуговых плазменных ускорителя с катодами из графита (ИПУ-С) с сепарацией плазменного потока;
- протяженный газовый ионный источник с анодным слоем;
- система напуска технологических газов;
- датчики давления и температуры;
- карусель с приводом вращения на нижней плоскости вакуумной камеры;
- фланец на верхней плоскости вакуумной камеры для возможной установки второй карусели с приводом вращения;
- механизмы управления заслонками для технологических средств;
- смотровые окна на двери вакуумной камеры для визуального контроля плазмы и положения изделий в вакуумной камере;
- термоэлектрические нагревательные элементы (ТЭН);
- система водяного охлаждения и нагрева;
- пневмосистема;
- средства освещения внутреннего объема вакуумной камеры.

Вакуум обеспечивается двухступенчатым форвакуумным насосом НД/НВР16-Д и двумя параллельно включенными паромасляными диффузионными насосами НВДМ-400. Вакуумные насосы обеспечивают предельное остаточное давление в чистой, пустой и обезгаженной вакуумной камере при охлаждении ее холодной водой не более $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, а при охлаждении жидким азотом криопанели - $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. Время достижения предельного остаточного давления - 20 мин.

Три стационарных плазменных ускорителя коаксиального типа (диаметр катода 80 мм), расположенных по вертикали, обеспечивают полное перекрытие плазменным потоком всего рабочего пространства вакуумной камеры, гарантируя равномерное по толщине нанесение покрытия на длинномерные изделия.

В штатном положении стационарного вакуумно-дугового плазменного ускорения используется сепарация плазмы, генерируемой СПУ. Это достигается с помощью магнитных катушек, расположенных

на самом СПУ и на вакуумной камере. Использование сепарированной плазмы позволяет получать покрытия с минимальным количеством макродефектов, что значительно улучшает их эксплуатационные свойства. Эффективность сепарации плазмы по массопереносу составляет не менее 40 % от массопереноса СПУ без сепарации плазмы.

При нанесении покрытий, к которым не предъявляются высокие требованиями к количеству и размерам макродефектов, возможна установка СПУ на фланцы вакуумной камеры без сепарации плазменного потока. При таком расположении обеспечивается большая скорость роста толщины покрытия на изделиях.

Источники питания СПУ обеспечивают непрерывный и прерывистый режим работы (работа - 20...600 с, пауза - 60...300 с), возможность плавной регулировки тока нагрузки от 20 до 120 А с коэффициентом пульсаций при токе нагрузки 120 А не более 10 %. Источники питания электромагнитных катушек обеспечивают постоянный ток от 0,1 до 4 А с возможностью плавной регулировки в указанном диапазоне. Блок управления источниками питания обеспечивает их работу в автоматическом режиме.

Импульсные плазменные ускорители коаксиального типа с катодами из графита (ИПУ-С) с сепарацией плазменного потока имеют более узкую диаграмму направленности плазменного потока, поэтому для полного перекрытия рабочей зоны вакуумной камеры установлены четыре ускорителя, расположенные по вертикали. Диаметр катода не менее 29 мм, максимальная частота следования импульсов тока основного разряда - 10 Гц, средняя вероятность возбуждения (поджига) основного разряда при наработке 10^5 кулон - 95 %. Сепарация плазмы достигается использованием 90-градусного, изолированного от корпуса вакуумной камеры, плазмоведа, внутри которого установлена катушка. Сепаратор обеспечивает массоперенос на выходе плазмоведа не менее 25 % от массопереноса ИПУ-С без сепарации плазмы.

Источники питания для каждого ИПУ-С обеспечивают заряд конденсаторных батарей и последующий их разряд на электроды поджига, вспомогательного и основного разряда с частотой от 0,1 до 15 Гц. Заряд конденсаторной батареи основного разряда максимальной емкостью 4500 мкФ происходит постоянным током 30 А до напряжения от 200 до 400 В со ступенчатой регулировкой с дискретностью 50 В. Электрическая схема управления источниками питания обеспечивает счет импульсов основного разряда ускорителей, вычисление процента срабатывания (возбуждения основного разряда) каждого из четырех ускорителей относительно поджигающих импульсов, а также работу ускорителей в автоматическом режиме.

На двери вакуумной камеры установлен протяженный газовый ионный источник с анодным слоем. Вертикальное расположение источника позволяет перекрыть плазменным потоком весь рабочий объем камеры. Ионный ток источника составляет не менее 100 мА, энергия ионов Ag - 1500 эВ. Электрическая схема управления источником питания обеспечивает работу ионного источника в автоматическом режиме.

Система напуска технологических газов позволяет производить напуск трех газов в вакуумную камеру по 9 газовым каналам в диапазоне давлений от $1 \cdot 10^2$ до $4 \cdot 10^1$ Па. Установлены по два газовых ввода на анодных узлах СПУ, один газовый ввод на газовом ионном источнике и один - непосредственно на корпусе вакуумной камеры. Для дозированной подачи газов используются электромагнитные натекатели игольчатого типа с использованием ШИМ-регулирования и стабилизацией заданного давления. Контроль давления газа на каждом СПУ осуществляется с помощью датчиков на базе манометрических преобразователей ПМТ-6-3, установленных в демпферной камере сразу после натекатели, сигналы с датчиков поступают на контроллеры, которые выдают управляющие сигналы на натекатели. Связь демпферной камеры с газовыми вводами на СПУ, газовом ионном источнике и на вакуумной камере осуществляется через калиброванные протоки. Система автоматического управления натекателями обеспечивает ручную и автоматическую установку необходимого давления газов.

Контроль остаточного давления в вакуумной системе осуществляется с помощью многоканального блока контроля вакуума БК6-530, которым измеряют давление при помощи датчиков на базе манометрических преобразователей ПМТ-6-3, ПММ-32-1. Все узлы датчиков объединены в сеть по последовательному интерфейсу RS-485 для передачи информации об измеренном давлении и состоянии блокировочных каналов в АСУ ТП.

Многоканальный блок контроля вакуума БК6-530 обеспечивает измерение, индикацию давления и установку порогов срабатывания и отпускания исполнительных реле по цифровому табло пульта наладки и по каналу RS-485. На цифровом табло пульта одновременно могут отображаться два выбранных значения давления. Диапазон измерения и индикации давления по каждому каналу определяется типом узла преобразователя и соответствует следующим параметрам (таблица).

Диапазоны измерения и индикации давления

| Тип узла преобразователя в канале | Диапазон измерения, Па | Предел допустимого значения основной погрешности измерения, % | Диапазон индикации, Па |
|-----------------------------------|--|---|---|
| ПМТ-6-3 | $1,0 \cdot 10^0 \dots 4,0 \cdot 10^3$ | от -35 до +60 | $1,0 \cdot 10^{-1} \dots 1,0 \cdot 10^0$ $4,0 \cdot 10^3 \dots 1,0 \cdot 10^5$ |
| ПММ-32-1 | $5,0 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^0$ | от -35 до +60 | $1,5 \cdot 10^{-5} \dots 5,0 \cdot 10^{-5}$ |

Каждый низковакуумный канал БК6-530 имеет по две блокировки. Каждый высоковакуумный канал БК6-530 имеет одну блокировку; возможна установка независимых порогов срабатывания и отпускания исполнительных реле во всем диапазоне измерения соответствующего узла преобразователя. Предел допускаемого значения основной погрешности срабатывания и отпускания исполнительных реле блокировок соответствует пределу основной погрешности измерения.

Датчики давления низкого вакуума установлены на вакуумной камере, на выходе диффузионного насоса и в форвакуумной магистрали. Датчики давления высокого вакуума установлены на вакуумной камере и на входе диффузионного насоса.

Для контроля температуры поверхности изделий, обрабатываемых в вакуумной камере, используется пирометрический измеритель температуры «Смотрич-7», позволяющий проводить измерения температуры в диапазоне от 100 до 1000 °С. Контроль и автоматическая регулировка температуры термоэлектрических нагревателей осуществляется с помощью терморезистивного датчика, установленного рядом с нагревателями.

Температурный режим работы вакуумной системы контролируется с помощью термодатчиков, установленных на стоках охлаждающей воды вакуумной камеры, СПУ, ИПУ-С и газового ионного источника. На диффузионных вакуумных насосах установлены по два термодатчика, один из которых настроен на температуру срабатывания 60 °С (полное отключение установки при температуре диффузионного насоса ниже 60 °С), а второй настроен на температуру срабатывания 160 °С (отключение нагревателей диффузионного насоса при температуре выше 160 °С).

Подготовленные для нанесения покрытия изделия устанавливаются на карусель, расположенную на днище вакуумной камеры и электрически изолированную от камеры. Карусель имеет 60 планетарных и 180 двойных планетарных позиций вращения. Общий вес обрабатываемых изделий может достигать 80 кг. Планетарные и двойные планетарные позиции вращения легкоъемные. Это позволяет при необходимости использовать механизированную загрузку изделий в камеру, для чего предусмотрена возможность комплектации установок специальной оснасткой и двумя комплектами указанных позиций.

Привод карусели обеспечивает частоту вращения карусели 1,5...2,0 об/мин, а частоту вращения двойных планетарных позиций - 30...40 об/мин.

В большинстве случаев при нанесении покрытий на изделия из металлов на них необходимо подавать некоторый электрический потенциал смещения. Величина напряжения, подаваемого на карусель, зависит от технологических требований на конкретный этап обработки изделий и может изменяться в широких пределах. С этой целью установка ВДУ-СИ оборудована источником напряжения инверторного типа, имеющего два диапазона выходных напряжений. В диапазоне высокого напряжения источник обеспечивает подачу на карусель напряжения от 700 до 1250 В с плавной регулировкой. Максимальный ток при напряжении 1250 В может достигать 5 А. В диапазоне низких напряжений источник обеспечивает подачу на карусель напряжения от 50 до 200 В с плавной регулировкой. Максимальный ток при напряжении 200 В может достигать 10 А.

Конструкция карусели выполнена таким образом, что электрическая изоляция карусели выдерживает напряжение пробоя не менее 6000 В, а конструктивные элементы охлаждаемого ввода вращения обеспечивают протекание тока до 40 А.

При нанесении покрытий на длинномерные изделия необходимо исключить колебания верхнего конца. Для этого на верхней плоскости вакуумной камеры имеется конструктивный узел для установки оснастки крепления длинномерных изделий или для установки второй карусели с приводом вращения.

При нанесении покрытий на изделия из диэлектрических материалов во многих случаях необходим их предварительный нагрев. Для этого вакуумная камера оснащена термоэлектрическими нагревателями общей мощностью 12 кВт, распределенными по внутренней боковой поверхности камеры.

В состав электрооборудования установки входят стойки и шкафы питания и управления (4 шт.), электрооборудование откачного поста, форвакуумный агрегат и соединители, обеспечивающие подключение составных частей электрооборудования.

Стойка управления системой откачки представляет собой унифицированный шкаф, в котором расположен набор блоков, обеспечивающих контроль, защиту, управление и электропитание исполнительных устройств откачного поста установки, функционирование диффузионных насосов (2 шт.), форвакуумного агрегата и газового ионного источника.

Стойка управления системой откачки состоит из следующих блоков:

- измерительного - осуществляет контроль вакуума в различных точках вакуумной системы блоком контроля вакуума БК6-530 и контроль температуры в рабочей камере установки ИР «Сосна-003»;
- контроллера откачки - осуществляет управление откачными средствами по заранее записанному в память алгоритму, обеспечивающему безаварийную работу системы откачки;
- управления газовым ионным источником - обеспечивает вместе с расположенным на откачном посту высоковольтным блоком заданный режим работы;

- управления натекателями - обеспечивает с помощью ШИМ-управления поддержание необходимого давления газов в вакуумной камере;
- управления приводом карусели FR-E540 производства «Mitsubishi» (Japan), от пульта управления FR-PA02-02 из комплекта привода и комбинированное управление от органов управления блока («Пуск», «Стоп», аналоговая регулировка скорости);
- управления азотным питателем - обеспечивает подачу жидкого азота из сосудов Дьюара типа СК-16 в последовательно включенные ловушки диффузионных насосов и криопанель вакуумной камеры установки (управление осуществляется контроллером откачки при наличии соответствующих условий по терморезисторным датчикам температуры, кроме того, блок осуществляет управление прогревом криопанели);
- аварийного отключения - обеспечивает экстренное обесточивание всей установки в аварийной ситуации, используя независимые расцепители автоматических выключателей всех стоек установки;
- управления нагревом - обеспечивает управление нагревом ТЭНами (3 группы), по командам от измерителя-регулятора температуры ИР «Сосна-003»;
- силового выключателя - обеспечивает электропитание всех блоков стойки управления переменным трехфазным напряжением -380 В, 50 Гц.

Стойка управления стационарными плазменными ускорителями представляет собой унифицированный шкаф, в котором расположен набор блоков, обеспечивающих питание и управление работой источников СПУ.

Стойка состоит из следующих блоков:

- блока технологического контроллера - осуществляет включение ускорителей в заданной последовательности с обеспечением подачи и поддержания требуемого напуска технологических газов в каждый СПУ. Блок вырабатывает ШИМ-сигналы управления натекателями. В качестве сигналов обратной связи, пропорциональных расходу газа, используется аналоговый сигнал от выносных низковакуумных датчиков из комплекта блока контроля вакуума БК6-530, расположенных на входе натекателей газа. Питание выносных низковакуумных датчиков и технологического контроллера осуществляется от импульсного источника питания фирмы «ARTESYN»;
- питания катушек каждого СПУ (источники питания - импульсные преобразователи напряжения, выполненные по полумостовой схеме; напряжение питания - 220 В, выходной ток - до 5 А, мощность - 500 Вт;
- силового выключателя - обеспечивает электропитание всех блоков стойки управления переменным трехфазным напряжением -380 В, 50 Гц.

Унифицированный шкаф источников питания СПУ содержит блоки питания основного разряда и поджигающих электродов СПУ, а также источники напряжения смещения на карусели. Блоки питания выполнены на базе выпрямителей инверторного типа.

Стойка питания и управления ИПУ-С представляет собой унифицированный шкаф, в котором расположены 4 идентичных блока, обеспечивающих работу четырех ИПУ-С.

В состав каждого блока входят:

- источник заряда основной батареи конденсаторов;
- 2 источника заряда батареи конденсаторов подхвата;
- источник заряда батареи конденсаторов поджига;
- блок управления источниками заряда.

Источники заряда батарей конденсаторов, представляющие собой источники питания постоянного тока инверторного типа обеспечивают:

- заряд емкости до 4500 мкФ постоянным током 30 А до напряжения 400 В для основного разряда;
- заряд емкости до 200 мкФ постоянным током 2 А до напряжения 400 В для разряда подхвата;
- заряд емкости до 20 мкФ постоянным током 0,3 А до напряжения 730 В для разряда поджига.

Заряд всех перечисленных конденсаторных батарей происходит за 0,06 с.

Блок управления источниками заряда обеспечивает:

- управление зарядом и индикацию напряжений на конденсаторных батареях;
- установку, счет и индикацию количества импульсов основного разряда и разряда поджига частотой от 1 до 10 Гц до значения 10^7 ;
- вычисление и индикацию процента срабатываний (возбуждения основного разряда) ИПУ-С относительно количества импульсов поджига;
- питание и управление приводом подачи катода ИПУ-С;
- питание и управление приводом обкатки системы поджига ИПУ-С;
- отображение позиции катода;
- синхронную работу четырех источников питания четырех ИПУ-С.

Электропитание источника питания ИПУ-С осуществляется от четырехпроводной трехфазной сети переменного тока с напряжением $380 \text{ В} \pm 10 \%$ и частотой $50 \pm 0,5 \text{ Гц}$. Общая потребляемая мощность не должна превышать 15 кВт.

Заключение. Научным инженерным центром «Плазмотег» ФТИ НАНБ и РУП «Сморгонский завод оптического станкостроения» впервые в мире разработана и изготовлена опытно-промышленная высокопроизводительная вакуумно-дуговая установка, оснащенная стационарными и импульсными вакуумно-дуговыми плазменными ускорителями с сепарацией плазмы. Установка позволяет наносить тонкопленочные покрытия, в том числе алмазоподобные углеродные, на детали машин и механизмов, изделия инструментальной промышленности (мерительный, металло- и деревообрабатывающий инструмент), на оптические линзы и стекла, включая оптические элементы из полимерных материалов, химически инертные покрытия на хирургические инструменты и эндопротезы, на оптические и магнитные устройства хранения информации в качестве защитных покрытий, а также защитно-декоративные покрытия на изделиях из стекла, фарфора и стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишков В.Д. Современные методы улучшения режущего инструмента. - Л.: Ленинградский Дом науч.-техн. пропаганды, 1981. - 20 с.
2. О плазменном нанесении покрытий на упрочняемую сталь с низкой температурой отпуска / А. А. Андреев, В.Г. Брень, А.Т. Калинин и др. // Защита металлов. - 1978. -Т. 14, Вып. 5. - С. 551 - 557.
3. UK Patent Application № 2010919. Goldfish coating fabrication method. Interm, class. C23C 13/00 - 1979.
4. Мрочек Ж.А. Ионно-плазменные защитно-декоративные покрытия на нержавеющей стали, цветных металлах и сплавах // Опыт научно-исследовательских организаций, предприятий и строек по антикоррозионной защите материалов: Тез. докл. республ. науч.-техн. конф. - Мн., 1983, - С. 67 - 68.
5. Современные магнетронные распылительные устройства / В.А. Лабунов, Н.Н. Данилович, А.С. Укусов и др. // Зарубежная электронная техника. - 1982. - № 10. - С. 62.
6. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. - М.: Радио и связь, 1986. - 231 с.
7. Ковалев Л.К. Вакуумное оборудование для производства тонкопленочных структур квантовой электроники // Обзоры по электронной технике. Сер. II. Лазерная техника и оптоэлектроника / ЦНИИ Электроника. - М. 1982. - Вып. 2(886). - С. 83.
8. Блинов И.Г., Дороднов А.М., Минайчев В.Е. Вакуумные сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники. Ч. II // Плазменная технология высоких энергий. Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. - 1974. - Вып. 8(269). - С. 75.
9. Дороднов А.М., Петросов В.А. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств // Журнал технической физики. - 1981. - Т. 51, Вып. 3 - С. 504 - 524.
10. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. - М.: Машиностроение, 1983. - С. 231.
11. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. Получение пленок с использованием концентрированных источников энергии // Физика и химия обработки материалов. - 1979. - № 1. - С. 3 -11.
12. Осадин Б.А. Импульсное нанесение пленок // Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. - 1976. - Вып. 4(408). - С. 70 - 75.
13. Гапонов С.В. Лазерное напыление пленок // Вестник АН СССР. - 1984. - Вып. 12. - С. 3 - 10.
14. Гапонов С.В., Салащенко Н.Н. Вакуумное напыление пленок с помощью импульсных лазеров // Электронная промышленность. - 1976. - Вып. 1(49). - С. 11-20.
15. Заявка № 52-42 152 Япония МКС С23С 13/12.-1979. Устройство для напыления / Такено.
16. Егоров А.В., Летягин В.А. Нанесение пленок методом электрического взрыва материала // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. - Вып. 12(416). - 1976.-С. 75 - 96.
17. Черняев В.Н., Кондрашин А.А. Исследование процесса осаждения пленок различных материалов методом импульсного испарения // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. - 1980. - Вып. 5. - С. 116.
18. Металлизация диэлектрических материалов импульсным ускорителем плазмы / В.П. Колесник, Н.А. Маштылев, В.В. Соловьев и др. // Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам: Тез. докл. - М., 1978. - С. 403 - 404.
19. Александров В.В., Белан Н.В., Козлов Н.П. Импульсные плазменные ускорители. - Харьков: Харьковский авиац. ин-т, 1983. - 247 с.
20. Гришин С.Л. Основные закономерности импульсного плазменного метода нанесения проводящих пленок в вакууме // Физика и химия обработки материалов. - 1973. - № 3. - С. 57 - 64.
21. Блинов И.Г. Дороднов М.А., Минайчев В.Е. Вакуумные сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники // Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. -Ч. 1. Физические основы. - Вып. 7(268). - 1974. - С. 84.
22. Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги // Успехи физических наук. - 1978. - Т. 125, Вып. 4.-С. 665-706.