

УДК 601.793.18

4.10 ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА СТЁКЛА БОЛЬШИХ ФОРМАТОВ

А. А. Бикташев, О. В. Желонкин,
ЗАО «Ферри Ватт», г. Казань

А. В. Бурмистров, В. А. Глинкин,
КГТУ, г. Казань

Обобщается опыт ЗАО «Ферри Ватт» по проектированию вакуумных установок для нанесения покрытий на стекла больших форматов. Проведен сравнительный анализ установок различного типа. Рассмотрены выпускаемые фирмой установки для нанесения покрытий на стеклянные полотна, возможные варианты комплектации установок.

Нанесение покрытий на стекла больших форматов по-прежнему остается одной из актуальных задач вакуумной напылительной техники и технологии. Повышаются требования к качеству и возрастает потребность в новых видах покрытий. Наряду с зеркальными, тонированными, цветными полотнами, все большим спросом пользуются стеклянные полотна с теплоотражающими и проводящими покрытиями, а недавно появились, так называемые, «самоочищающиеся» покрытия. Все более усложняются установки для нанесения покрытий и, как следствие, возникает потребность оптимизации их конструкции исходя из вида наносимого покрытия, необходимого объема производства и себестоимости продукции [1-3].

Различают проходные установки непрерывного действия и установки периодического действия, среди которых выделяются установки обеспечивающие одновременную загрузку – выгрузку большого числа стеклянных полотен, их иногда называют установками магазинного типа. Безусловно, установки непрерывного действия обеспечивают наибольшую производительность и минимальную себестоимость при наилучшей воспроизводимости и качестве продукции. Они обеспечивают производительность до 3 тыс. кв. м в час. Однако их применение эффективно только рядом с производством стекла и при наличии условий реализации готовой продукции. Следует учитывать трудности транспортировки стекол больших размеров, особенно с учетом невысокой стойкости к внешним воздействиям некоторых покрытий. Это и определяет высокий интерес к установкам периодического действия, способным к быстрому перестраиванию с одного покрытия на другое.

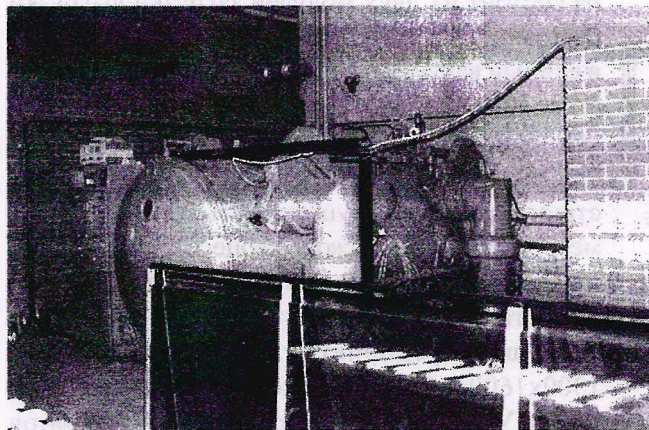


Рис. 1. Установка БАТТ 1600-3М

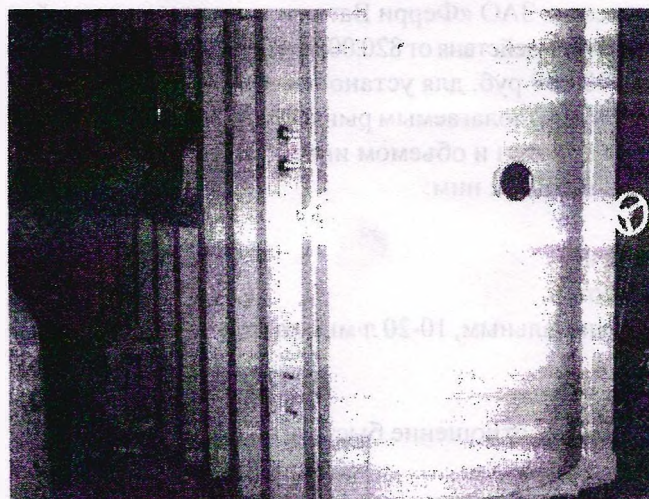


Рис. 2. Установка «БАТТ 2000-2М»

Установка периодического действия это вакуумная камера с откачной системой. внутри которой расположены стеклянные полотна, между которыми перемещаются устройство распыления, ионные источники и т.д., в зависимости от комплектации.

Типичные представители таких установок – это установки «БАТТ 1600-2М» [1] и «БАТТ 1600-3М» (Рис. 1) с цилиндрической камерой, и установки «БАТТ 2000-2М» (Рис. 2) и «БАТТ 2500-2М» с прямоугольной камерой. Типичная схема таких установок представлена на Рис. 3

Установка «Ватт 1600-М» в базовой комплектации включает два высоковакуумных агрегата АВДМ-400, форвакуумный насос АВЗ-180, три бипланарных магнетрона с блоками питания. За

цикл установка позволяет напылять шесть стекол размером до 1100x2750. Предпочтительный режим работы – круглосуточный, при этом в сутки при производстве зеркал получается до 14 циклов. Установка

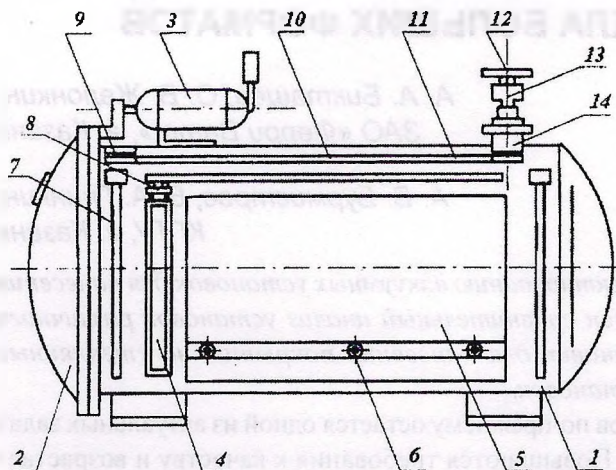


Рис. 3. Типичная схема установок периодического действия.

1-камера; 2-крышка камеры; 3-цилиндр прижима; 4-магнетронные распылители; 5-загрузочное устройство; 6-ролики; 7-электроды ионизатора; 8-каре́тка; 9-натяжное устройство; 10-цепь; 11-направляющие каретки; 12-концевые переключатели перемещения каретки; 13-привод перемещения каретки; 14-ввод вращательный.

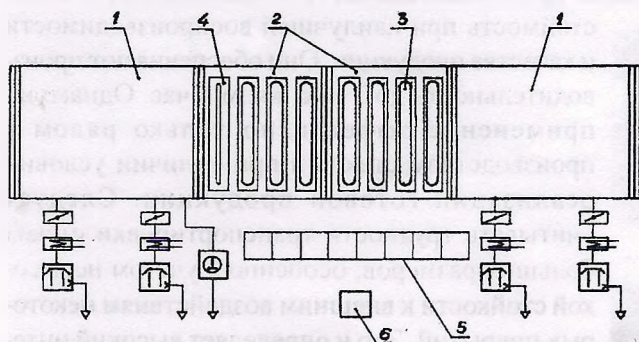


Рис. 4. Схема установки «ВАТТ 1300x1600».

1 - модули загрузки-выгрузки; 2 - модули напыления; 3 - магнетроны; 4 - Ионный источник; 5 - Блоки питания; 6 - Пульт управления

Технические характеристики установок выпускаемых ЗАО «Ферри Ватт» представлены на сайте <http://www.magnetron.ru>. Стоимость установок периодического действия от 820.000 руб. для установки «ВАТТ 1600-2М» в базовой комплектации, до 3.000.000-3.500.000 руб. для установки «ВАТТ 2500МДР».

Очевидно, что выбор типа установки, определяется предполагаемым рынком сбыта, типом наносимого покрытия, размером покрываемых стеклянных полотен и объемом инвестиций.

Основные узлы установки и требования предъявляемые к ним:

1. Вакуумная камера.

- Высокая эффективность использования объема.
- Удобство загрузки/выгрузки стеклянных полотен.

Поток натекания и газовой выделения должен быть минимальным, 10-20 л·мкм.рт.ст./сек в зависимости от объема установки.

2. Система откачки.

- Высокая динамичность, которая определяется как отношение быстроты действия к объему камеры.

- Способность адекватно реагировать на аварийные ситуации.

Установка может комплектоваться третьим высоковакуумным агрегатом АВДМ-400 и двухроторным насосом ДВН-150. Это позволяет повысить производительность до 16-18 циклов в сутки и увеличить длительность непрерывной работы до очередного тех. обслуживания. По требованию заказчика могут устанавливаться импульсные блоки питания магнетронов, что позволяет не только повысить качество покрытий, но и существенно сократить время цикла напыления.

Для нанесения цветных тонирующих или многослойных селективных покрытий установки могут комплектоваться дуальными магнетронными распылителями на базе двухсторонних магнетронов, дуальными импульсными блоками питания, ионным источником, контроллером расхода газов и спектрофотометром. Такая модификация, например установки «ВАТТ 2500-2М», называется «ВАТТ 2500МДР». За цикл установка позволяет напылять два стекла.

Установки магазинного типа более экономичны, технологичны и, разумеется, имеют большую производительность. Вакуумная камера состоит из двух модулей загрузки/выгрузки (магазинов) и модуля напыления соединенных в единый вакуумный объем. В таких установках стекло перемещается через модуль напыления, где происходит осаждение различных слоев покрытия. Здесь проще наносить многослойные структуры, легче осуществлять контроль параметров технологического процесса, значительно лучше воспроизводимость процесса.

Установка магазинного типа, разработанная на нашем предприятии, называется «ВАТТ 1300x1600». Схема установки представлена на Рис. 4. Установки под стекла больших форматов будут отличаться только габаритами.

3. Система распыления.

- Равномерность толщины покрытия по всей поверхности стекла.
- Высокая скорость распыления.
- Оптимальная энергия осаждаемых частиц исходя из вида наносимого покрытия.
- Высокий коэффициент использования материала мишени.
- Одинаковые условия распыления всех одновременно распыляемых мишеней.

4. Блоки питания магнетронных распылителей.

- Исключать дугообразование на магнетронах.
- Иметь стабилизацию выходной мощности.
- Обеспечивать плавную регулировку выходной мощности.

5. Система внутрикамерной обработки стекла перед напылением.

- Обработка в тлеющем разряде.
- Обработка потоком ионов из ионного источника.
- Нагрев.

6. Система контроля.

- Контроль давления.
- Спектральный контроль плазмы разряда.
- Контроль состава газовой среды.
- Контроль параметров наносимого покрытия.

Рассмотрим некоторые из указанных выше требований.

Камеры прямоугольного сечения обладают значительно большей эффективностью использования внутреннего объема, но и значительно более трудоёмки в изготовлении.

Требование высокой динамичности вакуумной системы связано не только со снижением времени на откачку но и с необходимостью эффективно удалять выделяющиеся газы в процессе напыления. Это особенно важно при реактивном напылении.

Особое значение имеет наличие на вакуумной магистрали клапанов отсекающих высоковакуумную часть при отключении электропитания. В этой ситуации наиболее эффективны клапаны и затворы с пневматическим приводом.

Среди систем распыления наиболее эффективными и широко применяемыми для нанесения покрытий на стеклянные полотна являются магнетронные системы распыления. Их можно разделить на классические односторонние и бипланарные, двухсторонние, с единой дорожкой распыления, и

дуальные, т.е. два классических магнетрона, собранных по дуальной схеме. Магнетроны могут быть планарные и цилиндрические. Последние обладают значительно более высоким коэффициентом использования материала мишени и зачастую более просты в изготовлении.

Бипланарные магнетроны сравнительно дешевы и позволяют наносить покрытие одновременно на два стекла, но для реактивного распыления они не подходят, т.к. невозможно обеспечить одинаковые условия распыления для обеих мишеней питающихся от одного блока.

Двухсторонние магнетроны с единой токовой дорожкой, развернутой в противоположные стороны, позволяют наносить покрытие одновременно на два стекла, как и в случае бипланарного магнетрона, но допускают реактивное распыление. Главное достоинство такого магнетрона это отсутствие краевых эффектов и большая эффективная высота покрываемого полотна. Существует также мнение, что отсутствие не распыляемой зоны между двух соседствующих токовых дорожек позволяет резко уменьшить ко-

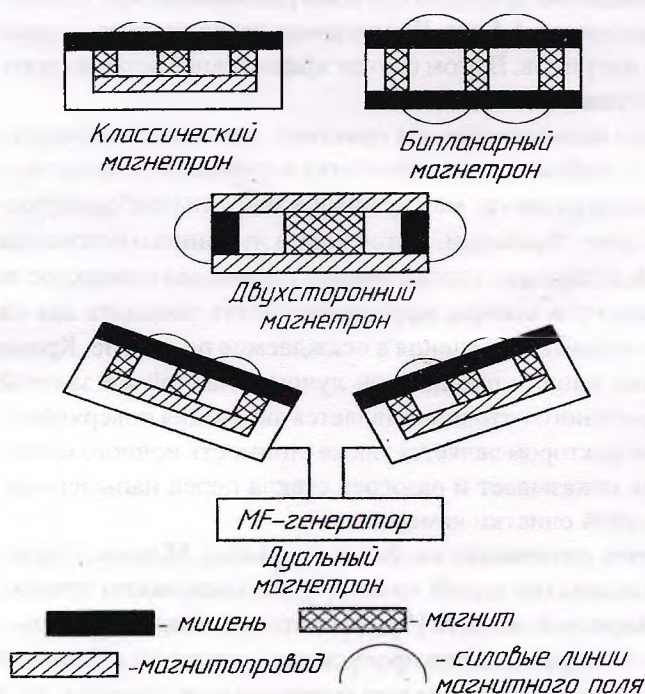


Рис. 5. Типы магнетронных распылительных систем.

личество точечных дефектов покрытия, возникающих вследствие пробоя пленки образующейся на не распыляемых поверхностях мишени. Этот вопрос нами практически не исследован, но можно предположить, что условия между двух дорожек более жесткие чем сбоку от них.

Двухсторонний магнетрон, также как и бипланарный, применяется только в установках периодического действия для нанесения покрытий на два стекла одновременно.

И, наконец, дуальная система, когда два классических магнетрона имеют общий разрядный промежуток, причем они попеременно, с частотой 20–70 кГц выполняют функции катода или анода. Таким образом, решаются две проблемы. Первая – это проблема «исчезающего анода» [4]. Суть в том, что при длительном распылении оксидов на всех поверхностях, окружающих магнетрон образуется непроводящая пленка, которая препятствует горению разряда. Вторая, часто не замечаемая проблема, – это постоянство «условий на аноде». Если стекло идет в режиме «сплошного листа», то проблемы нет. В других случаях, когда магнетрон выходит за пределы стекла или стекло перемещается мимо магнетрона с разрывами, происходит резкое изменение условий на аноде, даже при наличии дополнительных или отдельных анодов. Это изменение сказывается на режиме горения магнетрона и, как следствие, на работе контроллера расхода газов. В результате может получиться неоднородность покрытия на концах стекла. Немаловажным достоинством дуального магнетрона является также снижение вероятности возникновения микродуг, поскольку каждый из них половину периода работает анодом.

Блоки питания могут быть постоянного тока, импульсные и дуальные импульсные. Импульсные блоки имеют на выходе униполярные, биполярные асимметричные и биполярные симметричные импульсы с частотой 20-70 кГц, и позволяют решать проблему дугообразования на мишени, в том числе и для случаев реактивного распыления. Это особенно актуально для магнетронных систем большой мощности, применяемых при напылении стекол большого формата [5,6]. При выборе дуального импульсного блока нужно обязательно учитывать два момента. Первый – это форма выходного импульса, которая может быть прямоугольной (жесткая характеристика) и синусоидальной (мягкая характеристика). У блоков питания с жесткой характеристикой выше коэффициент заполнения импульса и, как следствие, выше стабильность работы магнетрона, хотя они и заметно дороже. Вторым моментом – это симметрия нагрузки, что особенно важно для реактивного распыления. Дело в том, что невозможно изготовить два абсолютно одинаковых магнетрона и обеспечить им одинаковые условия работы. Здесь напрашивается аналогия с бипланарным магнетроном, где две зоны распыления питаются от одного блока. Поэтому блок питания должен обеспечивать регулировку выходной мощности для каждого магнетрона, что для синусоидальных систем сделать трудно без ухудшения рабочих характеристик.

Нужно отметить высокую эффективность применения дуальной системы распыления при нанесении оксидных пленок, повышающей скорость нанесения в 4-5 раз. В тоже время такая система создает чрезмерные напряжения в пленке при нанесении нитридов. В этом случае эффективнее использовать разбалансированные магнетроны с питанием постоянным током.

Для подготовки стекла лучше использовать все возможности. На практике, приходится исходить из «достаточности» того или иного способа, но, в любом случае, обработка в тлеющем разряде или потоком ионов обязательны. Принципиально важное различие между ними в энергии бомбардирующих подложку частиц и в возможности выделять зону обработки. Поток ионов из ионного источника очищает в основном лицевую поверхность стекла, а тлеющий разряд очищает почти все поверхности в камере. При этом удаляемые с внутренних элементов камеры загрязнения могут попадать как на стекло, так и на мишени магнетронов, что может вносить нарушения в осаждаемое покрытие. Кроме того, энергия потока ионов из ионного источника выше и очищает он лучше. Главной же задачей обработки в тлеющем разряде и потоком ионов из ионного источника является активация поверхности для обеспечения хорошей адгезии. Немаловажным фактором является также стоимость ионного источника с блоком питания. Высокую эффективность показывает и разогрев стекла перед напылением. Нагреватели можно использовать для периодической очистки камеры.

Система контроля покрытия должна определять оптические свойства покрытия. Можно определять прозрачность стекла на выделенной длине волны (по одной точке) [3], по нескольким точкам, или по всему видимому спектру и ближней инфракрасной области [7]. Для теплоотражающих покрытий принципиальное значение имеет форма кривой коэффициентов пропускания в видимой и ближней инфракрасной области, поскольку важны не только максимальные или минимальные значения, но и интегральная величина коэффициента пропускания. Если на установке наносится один вид покрытия,

то, при строгом соблюдении технологического процесса, достаточно вести измерения по нескольким точкам, хотя при изменении каких-то факторов, не зависящих от оператора (например, погоды на улице) возможны отклонения от заданной кривой. Если же планируется наносить различные покрытия, то рекомендуется поставить спектрофотометр, который должен быстро и точно измерять коэффициенты отражения и пропускания во всем видимом диапазоне световых волн и ближней инфракрасной области, показывать полученные кривые на мониторе компьютера и сравнивать их с заданными по технологическому процессу.

Система подачи рабочих газов в самом простом случае представляет собой обычный игольчатый напекатель. Для напыления зеркал этого вполне достаточно. При реактивном распылении необходимо устанавливать контроллер расхода газов, который поддерживает поток реакционного газа в соответствии с потоком распыленного металла, т.е. поддерживает «полуотравленное» состояние мишени. Сходимость системы в случае случайных возмущений определяется типом регулятора и динамичностью вакуумной системы. Общее давление в вакуумной камере поддерживается напекателем подачи аргона по сигналу с вакуумметра. Возможен и другой вариант, когда напекателем подачи реакционного газа поддерживается определенный постоянный поток, а режим мишени поддерживается изменением мощности блока питания. В этом случае контрольной величиной является напряжение разряда магнетрона, которое изменяется в зависимости от изменения режима мишени. Некоторая неоднородность покрытия по толщине при возникновении случайных возмущений нивелируется наличием несколько магнетронных распылителей, но определенный разброс параметров неизбежен.

Все составляющие установки должны быть увязаны в единую систему и, чем сложнее покрытие, тем выше требования к комплектации и согласованию всех узлов. Например, низкоэмиссионное покрытие состоит из слоев металлов и оксидов или нитридов металлов. Напыление простых металлов не вызывает особых затруднений, хотя для полного исключения брака рекомендуется применять импульсные системы питания. Нанесение оксидов металлов с хорошей скоростью и повторяемостью требует применения дуальной распылительной системы, контроллера расхода газов и спектрофотометра. Устанавливать все эти дорогостоящие системы на малопроизводительные установки периодического действия имеет смысл только для больших форматов стекла, например, шириной 1600 мм или 2250 мм.

Исходя из вышеизложенного и учитывая возможности рынка, для нанесения селективных покрытий рекомендуется использовать установки периодического действия для стекол шириной от 1600 мм, и установки магазинного типа для любых форматов. Установки должны иметь хорошую динамику вакуума (не менее 1 сек⁻¹), импульсные системы распыления, в том числе дуальные для реактивного распыления, спектрофотометр и контроллер расхода газов. Для установок магазинного типа обязательным является применение ионного источника и двухуровневой системы управления на базе контроллера и ПЭВМ.

Литература

1. А. А. Бикташев, О. В. Желонкин, А. В. Бурмистров, В. А. Глинкин. *Оборудование для нанесения различных функциональных покрытий на стекло.* // Сборник докладов 4-го Международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование». Харьков, 2001, с.337-338.
2. Н. С. Сочугов, С. П. Бугаев, Н. Ф. Ковшаров, О. Б. Ладыженский. *Технологическая установка «ВНУК» для нанесения теплоотражающих покрытий на архитектурные стекла.* // Докл. VI конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками частиц и потоками плазмы». Томск, 23-29 сентября 2002 г., с. 43-46.
3. А. Н. Захаров, С. П. Бугаев, О. Б. Ладыженский, Н. Ф. Ковшаров, Р. М. Распутин, Н. С. Сочугов. *Технология нанесения многослойных спектрально-селективных покрытий на архитектурное стекло.* Докл. VI конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками частиц и потоками плазмы». Томск, 23-29 сентября 2002 г., с. 617-620.
4. В. И. Чайрев. *Влияние конструкционных особенностей анодного узла магнетрона на параметры разряда и на свойства получаемых диэлектрических пленок.* // Труды постоянно действующего семинара «Электровакуумная техника и технология» 1997/1998 гг., Под ред. Горина А. В., с. 62-76.

5. U. Heister, J. Krempel-Hesse, J. Szczyrbowski, G. Teschner, J. Bruch, G. Brauer. TwinMagTMII: attempts to improve an excellent sputter tool. // *Thin Solid Films*, 1999, p. 27-31.
6. А. И. Кузьмичев. Импульсные магнетронные распылительные системы. Лекция для молодых ученых и специалистов. // *Сборник докладов 14-го Международного симпозиума «Тонкие пленки в оптике и электронике»*. Харьков, 2002., с. 221-242.
7. А. В. Виленский, Б. Г. Лысой, О. Б. Чередниченко. Скоростной призмный спектрофотометр для контроля вакуумного напыления оптических покрытий. // *Труды постоянно действующего семинара «Электровакuumная техника и технология» 1997/1998 гг.*, Под ред. Горина А. В., с. 125-128.