

## Разработка и производство современной установки для высокопроизводительного нанесения многослойной металлизации методом магнетронного распыления

*А.Х. Хисамов, Р.Л. Рябцев, А.Г. Новиков, \*М.В.Назаренко, \*\*В.В. Одинок*  
*ООО “Стратнанотек Инвест”, г. Минск, Беларусь*  
*\*ООО “РМТ”, г. Москва, Российская Федерация*  
*\*\* ОАО НИИТМ, г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация*  
*e-mail: khissamov@stratnanotech.com, m.v.makarova@list.ru, vodinokov@niitm.ru*

*Описан проект по созданию установки, реализующей технологию магнетронного распыления для нанесения многослойных покрытий со скоростью напыления до 400 нм/мин и производительностью 160 подложек в смену для двухсторонней металлизации толщиной более 20 мкм. Показаны особенности разработки и производства современного технологического оборудования в короткие сроки.*

*Design of state-of-the art equipment for high-throughput deposition of multilayer metallization using magnetron sputtering. A.Kh.Khissamov, R.L.Ryabtsev, A.G.Novikov, M.V.Nazarenko, V.V.Odinokov. A project to create an equipment that implements magnetron sputtering technology for deposition of multilayer coatings with a rate of up to 400 nm / min and a capacity of 160 substrates per shift for two-sided metallization with a thickness of more than 20 microns is described. The details of the development and production of modern technological equipment in a short time are shown.*

### **Введение.**

При современных темпах развития технологий и бизнеса часто требуется разработка нового технологического оборудования в короткие сроки с обеспечением надежности, производительности и качества конечной продукции на уровне серийно выпускаемого оборудования. Это особенно актуально для отечественных разработчиков и производителей оборудования, которые в последние десятилетия не имели возможности сформировать линейки современного оборудования ввиду отсутствия емкого рынка и недостаточности инвестиций.

Сроки выполнения заказа важны, так как они определяют как инвестиционную эффективность проектов, так и скорость, с которой заказчик может отреагировать на изменения требований рынка. Не менее актуальна необходимость соблюдения сроков выполнения госпрограмм, в рамках которых производится закупка большей части технологического оборудования в РФ.

В то же время, сжатые графики поставок не должны отрицательно сказываться на уровне технических решений и качестве оборудования, т.к. они также в значительной степени определяют эффективность инвестиций и конкурентоспособность заказчика. Более совершенные технические решения обеспечивают экономическую эффективность производства с использованием такого оборудования благодаря таким факторам как:

- снижение себестоимости за счет уменьшения расходов на материалы и электроэнергию;
- уменьшение трудоемкости при производстве и обслуживании;
- увеличение доступного производственного времени за счет большего интервала между остановками на профилактическое обслуживание;
- увеличение выхода годных изделий.

Более совершенные технические решения способны дать лучшие технические показатели продукции, что также способствует повышению конкурентоспособности предприятия-заказчика.

Качество оборудования проявляется в таких характеристиках как среднее время наработки между отказами и уровень выхода годных изделий. Их залогом является достаточная зрелость применяемых технических решений, наличие системы управления качеством, опыт и компетентность сотрудников компании-изготовителя оборудования.

Решение указанных задач требует правильного планирования и организации работ, поставленных процессов разработки и производства, слаженной команды специалистов с высоким уровнем подготовки. Не менее важным для таких проектов является компетентность и мотивированность предприятия-заказчика. Опыт показал, что успех проекта определяется не только возможностями предприятия-исполнителя, но скорее суммой и взаимной поддержкой компетенций заказчика и исполнителя.

При наличии этих факторов, предприятие-разработчик и изготовитель оборудования получает возможность выполнять большее количество заказов, а также постепенно развивать и совершенствовать свой продуктовый портфель за счет внедрения инноваций в каждом новом проекте. Для предприятия-заказчика, риски новой разработки минимизируются и окупаются возможностью получать оборудование современного уровня, максимально адаптированного под его технологические и производственные задачи, в достаточно короткие сроки и по приемлемой стоимости.

Далее будет представлена установка магнетронного распыления, разработанная и изготовленная по заказу ООО «РМТ» - ведущего производителя миниатюрных термоэлектрических преобразователей для телекоммуникационных, медицинских, промышленных и аэрокосмических применений. Будут также затронуты особенности планирования и организации разработки и производства адаптированного под задачи заказчика вакуумного технологического оборудования в короткие сроки.

### **Исходные требования проекта**

Проект выполнялся с целью расширения производственных возможностей заказчика в условиях предполагаемого роста его продаж. При этом, заказчик уже эксплуатировал несколько единиц оборудования, имел соответствующий опыт и представления о требуемом результате.

Назначением установки являлось нанесение на керамические подложки проводниковых слоев в структуре термоэлектрического элемента. Основные первичные требования приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

<b>Наименование</b>	<b>Требование</b>
Подложки	Керамика, ситалл Размер 60x48 Толщина от 0,15 до 1,5 мм
Покрытие	Двухстороннее, до 3-х материалов
Толщина покрытия (с каждой стороны)	Основного слоя –20..25 мкм Маскирующего слоя - до 2 мкм Адгезионного слоя - до 0,5 мкм
Объем загрузки	80 подложек
Производительность	160 подложек в смену
Равномерность	±5 % по загрузке
Предельная температура подложек	не более 220 °С в процессе напыления
Срок выполнения проекта	7месяцев

Данная техническая задача может решаться с использованием различных технологий, таких как термическое или электронно-лучевое испарение, катодное или магнетронное распыление. Предлагается также решение на базе жидкофазного магнетронного распыления. Каждая из перечисленных технологий обладает своими достоинствами и недостатками, связанными с производительностью, качеством покрытий, равномерностью, ограничениями по применяемым материалам.

По результатам анализа первичных требований и расчетов, была предложена реализация установки по образцу успешной и хорошо зарекомендовавшей себя компоновки установки УВН-70, с увеличением объема загрузки и применением цилиндрических

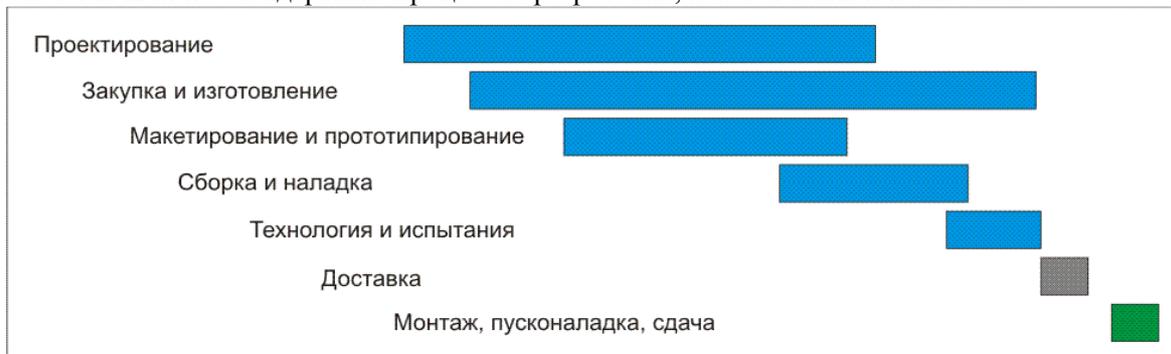
магнетронов. Магнетронное распыление обеспечивает хорошую плотность и однородность пленок, адгезию, возможность применения широкого спектра материалов включая сплавы. Цилиндрические магнетроны обеспечивают большой запас материала, высокий коэффициент его использования (75-85% против типичных 20-40% у планарных магнетронов), эффективное охлаждение мишени, и давно зарекомендовали себя в условиях массовых производств за рубежом.

Расчет показал, что для обеспечения нужной производительности, с учетом требований по предварительной обработке подложек, необходимо вести напыление с мощностью 18-25 кВт. При таких параметрах, одной из основных задач стало обеспечение температурного режима подложек, теплоотвод от которых затруднен ввиду необходимости обеспечить двухстороннюю обработку.

### **Организация выполнения проекта**

Для сокращения сроков выполнения проектов при обеспечении высокого качества разработки и изготовления, в компании Стратнанотек применяется организация работ с наложением этапов (рис. 1). С самого начала проекта совместную работу ведет выделенная команда проекта, включающая конструктора, автоматизатора, электрика, закупщика, наладчика, технолога и клиент-менеджера. Это позволяет сократить потери от ошибок и нестыковок за счет их раннего выявления, повысить общее качество разработки за счет комплексного подхода.

На старте проекта, были проведены уточняющие расчеты по откачке, равномерности и скорости нанесения, нагреву и т.п. По результатам анализа и обсуждения принятой к реализации концепции (технического проекта) были, в числе прочих, приняты решения о необходимости проведения упреждающего изготовления и испытания системы вращения и переворота подложек (в 2-х вариантах) и держателя подложек (в 2-х вариантах). По защите от запыления, наряду с «основным» вариантом с косвенным охлаждением, было принято решение предусмотреть возможность перехода на вариант с непосредственным охлаждением, с принятием решения о его разработке и реализации по результатам испытаний. Остальные узлы и системы шли по стандартным процессам разработки, изготовления и испытаний.



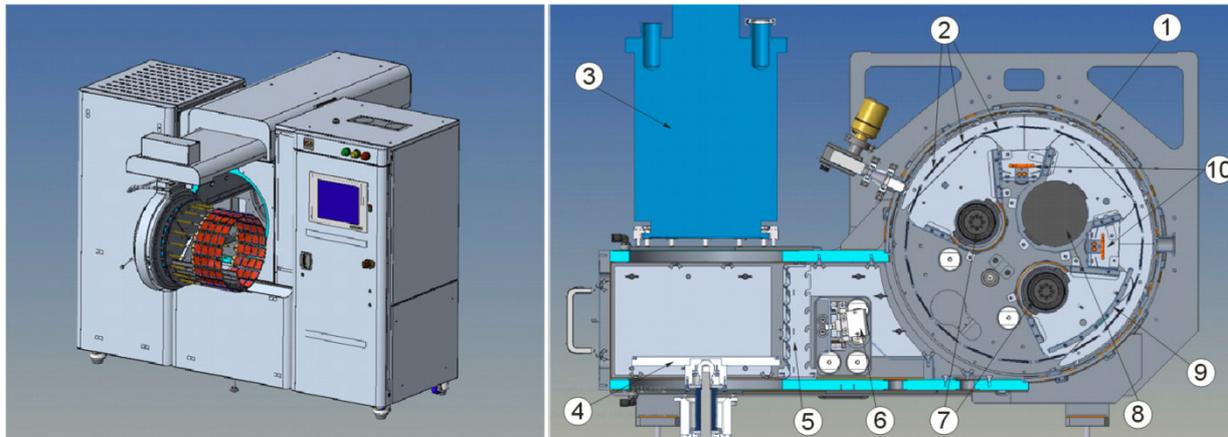
*Рис.1 Этапы выполнения проекта.*

Укрупненный план проекта был составлен на основе условий договора и типовых сроков разработки, изготовления, сборки и наладки, с последующим внесением в него приемлемых дат по упреждающим работам. Далее была проведена итерационная детализация и корректировка плана с согласованием графика сборки, сроков поставки и графика разработки. В дальнейшем по ходу проекта, этот план дополнялся и корректировался исходя из выявленных или возникших обстоятельств для обеспечения его основной цели – своевременной передаче заказчику установки, полностью соответствующей требованиям.

### **Описание разработанной установки**

Общая вид установки и компоновка камеры приведены на рис. 2. Установка представляет собой однокамерное оборудование с технологической камерой в виде горизонтального цилиндра с отростком порта откачки. Оба торца камеры открываются на откатном механизме, и могут поворачиваться вокруг вертикальной оси для удобства обслуживания. На фронтальной двери размещен механизм вращения и переворота держателей

подложек и заслонка, на задней – три цилиндрических магнетрона и нагреватели. В проеме порта откачки размещен ионный источник очистки и дроссельная заслонка. Откачка построена на базе криогенного насоса и безмасляного механического насоса. Управление установкой полностью автоматизировано, с возможностью гибкого составления рецептов, протоколирования истории проведенных технологических процессов, аварийных ситуаций и действий оператора.



*Рис. 2. Внешний вид установки и компоновка камеры.*

*1 – камера; 2 – подложки; 3 – крионасос; 4 – затвор; 5 – дроссельная заслонка; 6 – ионный источник очистки; 7 – магнетроны адгезионного и защитного слоев; 8 – магнетрон меди; 9 – поворотная заслонка; 10 – нагреватели.*

Подложки, закрепленные в держателях, располагаются по цилиндрической поверхности вдоль стенок камеры, вокруг технологических устройств. Механизм вращения и переворота держателей обеспечивает перемещение держателей по кругу, с переворотом на их на 180 градусов один раз за оборот, для обеспечения двухстороннего нанесения покрытий. Держатели подложек – съемные, что дает возможность производить установку-снятие подложек на них на отдельном рабочем месте, параллельно с проведением технологического процесса либо обслуживания установки. Конструкция держателя, сделанная по опыту предыдущих разработок оборудования для массовых производств, обеспечивает мягкое и надежное крепление подложек различной толщины (от 0,15 до 1,5 и более миллиметров) с минимальным затенением, без переналадки и применения резьбовых соединений.

Существенной частью разработки стал механизм вращения и переворота держателей подложек. Желанием было создать простую, компактный механизм, обеспечивающий плавный переворот на минимальной дистанции поворота, и надежно работающий в большом диапазоне скоростей вращения. Итоговая конструкция воплощает оригинальную идею, позволившую реализовать заданную динамику переворота с минимизацией возникающих усилий и безударным взаимодействием элементов конструкции. Проведенное в ходе проекта прототипирование и испытания позволили довести конструкцию в части выбора подшипниковых элементов и других нюансов. Итоговый вариант был подвергнут длительным (~ 650 ч) испытаниям при повышенных оборотах (23 об/мин, при целевых 20 об/мин по ТЗ), и показал надежную работу при скоростях вращения до 40 оборотов/минуту.

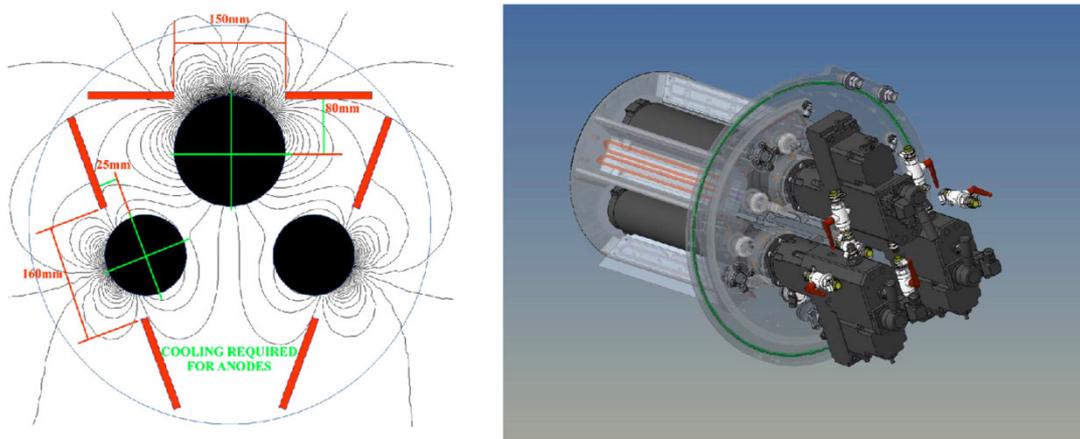
Главным вызовом с технической точки зрения было обеспечение теплового режима подложек при требуемых для производительности уровнях мощности. Для решения этой задачи, были реализованы технические решения:

1. Применение цилиндрических магнетронов;
2. Формирование общей конфигурации магнитного поля для минимизации воздействия плазмы магнетронов на подложки;
3. Применение водоохлаждаемых анодов и экранов от запыления с косвенным охлаждением от стенок камеры, а также водоохлаждаемой заслонки.

Цилиндрические магнетроны, помимо ранее указанных эксплуатационных преимуществ, могут иметь усиленное магнитное поле без ущерба для коэффициента

использования мишеней. Высокая эффективность охлаждения мишени обеспечивает отсутствие ее перегрева даже при значительных мощностях распыления. В совокупности, указанные факторы обеспечивают снижение теплового воздействия на подложки по сравнению с планарными магнетронами.

Общая конфигурация магнитного поля в системе – часто упускаемый при проектировании технологического оборудования момент. Между тем, она может существенным образом влиять на интенсивность воздействия плазмы на подложки. В ряде применений (например, реактивное магнетронное распыление при нанесении упрочняющих или оптических покрытий), необходимо максимально увеличить его. В рассматриваемом проекте стояла противоположная задача. Один из этапов моделирования компоновки и расчета магнитных полей приведен на рис. 3. Вместе с конечным результатом проектирования.



*Рис.3. Моделирование магнитных полей и результат проектирования системы магнетронов.*

### **Результаты**

Результаты прямо-сдаточных испытаний и последующей эксплуатации показали достижение требуемых параметров качества покрытий и производительности, а также надежную работу созданного оборудования.

Итоговые параметры оборудования приведены в Таблице 2. Фотография установки в цеху заказчика – на рис. 4.



*Рис.4 Установка в цеху заказчика.*

Таблица 2.

<b>Показатель</b>	<b>Значение</b>
Объем загрузки	80/160 подложек 60x48x(0,15..1,5) мм (двухсторонняя/односторонняя обработка)
Производительность	2 процесса в смену (двухстороннее трехслойное покрытие с толщиной медного слоя 20...25 мкм)
Равномерность	±2 % по загрузке
Максимальная скорость нанесения	400 нм/мин(по меди, без перегрева подложек)
Скорость вращения подложек	1..40 об/мин (с переворотом)
Интервал замены мишеней	1700 мкм в покрытии/36 процессов (медь)
Средняя потребляемая мощность	20 кВт
Занимаемая площадь	3,5x3,8 м <sup>2</sup> (без криокомпрессора)
Срок выполнения проекта	7 месяцев

### **Заключение**

Была разработана и изготовлена современная высокопроизводительная установка магнетронного распыления на цилиндрических катодах, обеспечивающая нанесение металлических слоев высокого качества на керамические подложки. Благодаря примененным техническим решениям установка имеет высокие технико-экономические показатели. Эффективное проектное управление и поставленные процессы разработки и производства, слаженной команды специалистов с высоким уровнем подготовки позволили выполнить проект в короткие сроки. Заказчик получил современное оборудование, применение которого позволило упростить некоторые производственные процессы и повысить технические характеристики продукции.