

На правах рукописи

Колесник Леонид Леонидович

**Повышение однородности состава и
равномерности толщины многослойных
тонкопленочных покрытий на поверхностях
большого размера**

Специальность: 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Панфилов Юрий Васильевич.
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Марахтанов Михаил Константинович;
кандидат технических наук,
Андросов Александр Васильевич.
Ведущая организация: ОАО ЦНИТИ «Техномаш».

Защита состоится «_____» _____ 2009 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана, по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Буманская, д. 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба высылать по адресу: 105007, г. Москва, ул. 2-я Буманская, д. 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Ученый секретарь
диссертационного совета:
доктор технических наук, профессор

Цветков Ю. Б.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Современные тенденции развития техники привели к тому, что при производстве самых различных изделий электронные технологии находят все более широкое применение. Значительную долю в этих технологиях составляет нанесение различных многофункциональных покрытий в вакууме, традиционно применявшееся при производстве изделий микроэлектроники, электровакуумных приборов, дисков памяти и т. п. Кроме того, такие покрытия используются в качестве упрочняющих, износостойких, оптических, теплозащитных, коррозионностойких и т. д. Большинство этих покрытий представляют собой многослойные композиции, состоящие из чередующихся слоев металлов и их соединений (оксидов, нитридов, карбидов и т. д.), что определяется типом и областью применения покрытия.

Одним из наиболее широко используемых вакуумных методов получения оксидов и нитридов металлов является реактивный метод нанесения. Внутри вакуумной камеры формируют поток атомов металла, движущийся по направлению к изделию, и напускают реактивный рабочий газ, который вступает в реакцию с атомами металла и образует требуемое соединение.

Технология нанесения тонкопленочных покрытий на поверхности большого размера по сравнению с технологиями, применяемыми в микроэлектронике, обладает следующими особенностями:

1. Максимальный размер изделия не ограничен размером полупроводниковой пластины и может достигать 6 метров и более, возможно использование рулонных материалов;
2. Для получения необходимых свойств покрытия необходимо наносить многослойные (до 20-ти и более слоев) покрытия, состоящие из слоев различных материалов;
3. Для обеспечения стабильности и качества покрытия необходимо наносить покрытия в едином цикле без разгерметизации оборудования.

Эти особенности технологического процесса приводят к возникновению конструктивных и технологических проблем, ранее нерешенных в рамках технологии классической микроэлектроники. Исследованиями процессов нанесения многослойных тонкопленочных покрытий в вакууме занимались Ковалев Л. К. (квантовая электроника), Одинокое В. В. (микроэлектроника), Марахтанов М. К. (функциональная электроника) и другие ученые. Однако в их работах не были решены проблемы, связанные с получением заданной однородности состава и равномерности толщины слоев многослойных тонкопленочных покрытий на поверхностях большого раз-

мера.

На сегодняшний день в области получения многослойных тонкопленочных покрытий на поверхностях большого размера остаются открытыми вопросы выбора компоновочного варианта оборудования, размещения устройств напуска и откачки газов для получения однородной технологической среды, позволяющей обеспечить заданную стехиометрию и равномерность толщины наносимых покрытий.

Цель работы

Создание научных основ обеспечения однородности состава и равномерности толщины многослойных тонкопленочных покрытий, получаемых реактивным методом на поверхностях большого размера в вакууме.

Задачи исследований

1. На основе анализа существующих решений и требований к оборудованию для нанесения многослойных тонкопленочных покрытий на изделия большого размера необходимо разработать методику выбора структурно-компоновочных вариантов установок проходного типа и вакуумных автоматических линий по критериям максимального быстродействия, минимальной неоднородности стехиометрического состава и неравномерности толщины наносимого покрытия.

2. Разработать методику расчета и проектирования рабочих камер установок проходного типа и вакуумных автоматических линий, позволяющую согласовывать режимы откачки и напуска смеси плазмообразующего и реактивного газов при нанесении многослойных тонкопленочных покрытий на изделия большого размера.

3. Провести экспериментальные исследования для проверки разработанной методики и выявления основных зависимостей между геометрическими параметрами рабочей камеры и однородностью состава вакуумной технологической среды.

4. Разработать рекомендации по размерам и форме рабочих камер, расположению патрубков откачки и напуска смеси рабочих газов при нанесении многослойных тонкопленочных покрытий на изделия большого размера, обеспечивающие заданный стехиометрический состав и неравномерность толщины покрытия.

Научная новизна работы

1. Для проведения анализа структурно-компоновочных вариантов установок для нанесения тонких пленок в вакууме проходного типа и вакуумных автоматических линий получены зависимости, позволяющие выбрать и согласовывать по критериям максимального быстродействия и минимальной неоднородности состава и неравномерности толщины покрытия количество рабочих камер, источников нанесения покрытия и скорость транспортирования обрабатываемых изделий.

2. Выявлены взаимосвязи между геометрическими характеристиками вакуумной камеры, расположением патрубков откачки и напуска рабочих газов и однородностью состава и равномерностью толщины наносимых покрытий на поверхности большого размера.

3. На основе метода статистических испытаний Монте-Карло предложена модель и разработана компьютерная программа расчета конструктивных параметров рабочей камеры, обеспечивающих заданные стехиометрический состав и равномерность толщины покрытия на изделиях большого размера.

Практическая ценность работы

1. Разработана инженерная методика выбора структурно-компоновочного варианта установок проходного типа и вакуумных автоматических линий по критериям максимального быстродействия, заданной стехиометрии, однородности состава и равномерности толщины покрытий, наносимых на изделия большого размера.

2. Разработана компьютерная программа для расчета параметров вакуумной технологической среды в оборудовании для нанесения реактивным методом многослойных покрытий, позволяющая выбирать конструкторские решения, обеспечивающие заданные неравномерность стехиометрического состава и толщины покрытий.

3. Разработаны рекомендации по расположению патрубков откачки и напуска смеси рабочих газов в камеры нанесения многослойных тонкопленочных покрытий на изделия большого размера для установок проходного типа и вакуумных автоматических линий.

На защиту выносятся

1. Методика выбора структурно-компоновочных вариантов установок проходного типа и вакуумных автоматических линий и согласования количества рабочих камер, источников нанесения покрытия и скорости транс-

портирования обрабатываемых изделий по критериям максимального быстрого действия и минимальной неоднородности состава и неравномерности толщины покрытия.

2. Математическая модель расчета параметров вакуумной технологической среды для нанесения однородных по составу и равномерных по толщине покрытий реактивным методом на поверхности большого размера на основе метода статистических испытаний Монте-Карло.

3. Результаты выбора геометрических параметров рабочих камер, количества и расположения патрубков откачки и напуска рабочих газов для обеспечения требуемой однородности состава и равномерности толщины наносимых тонкопленочных покрытий на поверхностях большого размера.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на III научно-технической конференции с участием международных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Гурзуф, 1996); научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Гурзуф, 1997, 1999); II, IV, V Российской конференции «Высокие технологии в промышленности России» (Москва, 1997-1999), на «2nd International Conference on Coatings on Glass» (Saarbrucken, Germany, 1998), на тематических заседаниях кафедры «Электронное машиностроение» МГТУ им. Н. Э. Баумана (1998-2009).

Внедрение результатов работы

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы:

1. В ОАО «НИИ Точного машиностроения» в виде методики расчета параметров технологической среды при реактивном нанесении тонких пленок.

2. При проведении экспертизы промышленной полуавтоматической линии по нанесению низкоэмиссионных энергосберегающих покрытий на стекло мощностью 500 тыс. кв. метров в год, проводившейся в МГТУ им. Н. Э. Баумана, тема Э4201 с.

3. В учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ в научных журналах, а также в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 77 наименований и 3 приложений. Работа содержит 129 страниц машинописного текста, в том числе 6 таблиц и 55 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность решаемых в диссертационной работе проблем, а также формируются ее цели и задачи. Определяется область распространения диссертационной работы.

В первой главе содержится обзор состояния технологии и оборудования для реактивного нанесения многослойных покрытий на поверхности большого размера. Определены области применения многослойных покрытий, а также требования, предъявляемые к таким покрытиям, на основании которых сформулированы требования к оборудованию для их формирования.

Анализ областей применения многослойных тонкопленочных покрытий показал, что они применяются как антибликовые покрытия на экранах электроннолучевых трубок и жидкокристаллических экранов компьютеров, телевизоров и мобильных приборов, в устройствах хранения информации, в источниках альтернативной энергетики, а также как энергосберегающие низкоэмиссионные покрытия на стеклах. Все эти изделия предъявляют высокие требования к производительности оборудования ввиду массового характера выпуска, а также однородности и воспроизводимости состава и толщины наносимых покрытий. Анализ вариантов оборудования показал, что наиболее перспективными для массового производства являются установки с неподвижными источниками нанесения и подвижным изделием.

Проблемы, возникающие при получении покрытия реактивным методом можно проследить на примере оксида металла. Схема процесса нанесения слоя MeO на изделие большого размера представлена на рисунке 1(а). Большие размеры изделия приводят к тому, что один из размеров области проведения процесса нанесения оказывается существенно меньше, чем два

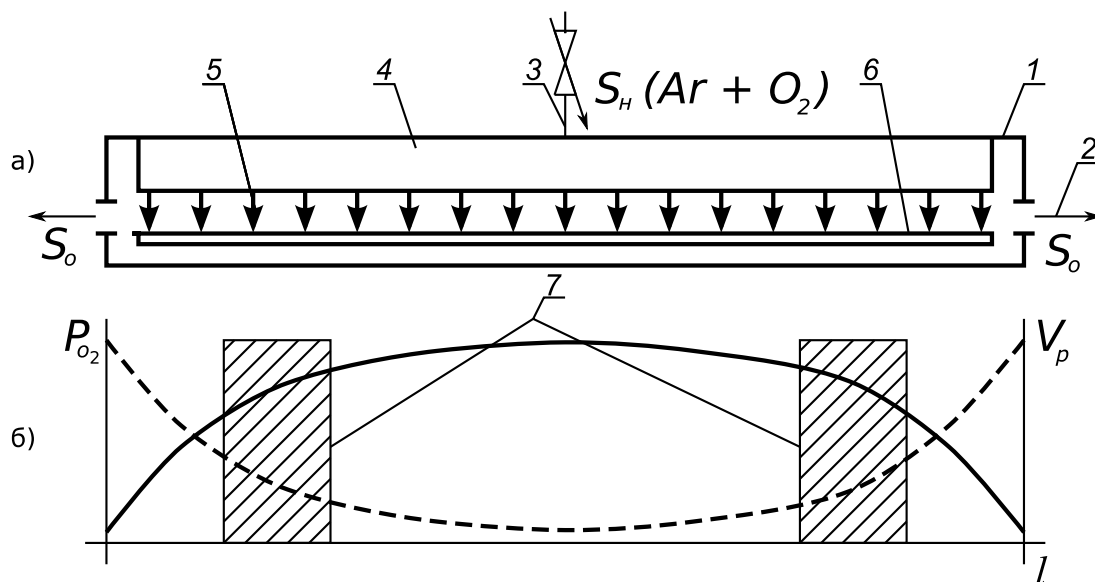


Рис. 1. Схема нанесения оксида металла на изделие большого размера (а) и вид зависимости (б) давления смеси аргона и кислорода (сплошная линия) и скорости осаждения металла (пунктирная линия) вдоль сечения камеры нанесения по координате l . 1 — рабочая камера, 2 — поток газа с быстротой откачки S_o , 3 — натекатель смеси рабочего и реактивного газов с быстротой напуска S_n , 4 — источник нанесения покрытия (магнетрон), 5 — поток осаждаемого металла, 6 — изделие, 7 — примерная зона получения покрытия с требуемой стехиометрией.

других. Это приводит к возникновению протяженных каналов, внутри которых может наблюдаться существенный разброс давлений как полного, так и парциальных давлений газов, формирующую технологическую среду для нанесения покрытия.

Если представить структуру слоя в виде Me_xO_y , где Me — металл, O — кислород, а x, y — коэффициенты, определяющие их соотношение в наносимом слое, то очевидно, что для получения заданной стехиометрии должно выполняться необходимое соотношение потоков атомов металла $N_{(Me)}$ и молекул кислорода $N_{(O_2)}$, которое составляет: $xN_{(Me)} = 0,5yN_{(O_2)}$.

Очевидно, что поток атомов металла $N_{(Me)}$ определяется скоростью осаждения V_o , а поток молекул кислорода $N_{(O_2)}$ его парциальным давлением $p_{(O_2)}$.

Известно, что скорость осаждения металла V_o зависит от скорости распыления V_p , площади источника, углов распыления и конденсации, расстояния от источника до изделия и коэффициента прилипания осаждаемого материала к подложке. Для изделия, расположенного параллельно поверхности источника на небольшом расстоянии, можно принять $V_o \approx V_p = j_u S_p / q_e$ атом/м² · с, где j_u — плотность ионного тока, А/м², S_p — коэф-

коэффициент распыления *атом/ион*, q_e — заряд электрона Кл.

Поток молекул кислорода, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени равен $N_{(O_2)} = p_{(O_2)} \sqrt{N_A} / \sqrt{2\pi M_{(O_2)} kT}$, где $p_{(O_2)}$ — давление кислорода, N_A — число Авогадро, $M_{(O_2)}$ — молекулярная масса кислорода, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

В итоге получим окончательное уравнение, обеспечивающее заданную стехиометрию покрытия:

$$x \frac{j_u S_p}{q_e} = \frac{1}{2} y \frac{p_{(O_2)} \sqrt{N_A}}{\sqrt{2\pi M_{(O_2)} kT}}. \quad (1)$$

Если параметры источника питания в процессе нанесения покрытия постоянны, то скорость распыления V_p зависит от парциальных давлений аргона и кислорода. Давление аргона определяет величину ионного тока j_u , а избыток молекул реактивного газа приводит к окислению мишени и, как следствие, к уменьшению коэффициента распыления. Например, при энергии ионов Ar 1,0 кэВ $S_p^{Al} = 1,4$, а $S_p^{Al_2O_3} = 0,4$. То есть скорость распыления, а, следовательно, и толщина пленки, может уменьшаться более чем в 3 раза.

Обобщенный вид зависимости парциального давления кислорода и скорости распыления материала показан на рисунке 1(б). Очевидно, что при рассмотренной конфигурации откачки и напуска зоны, в которых может быть получено покрытие с заданной стехиометрией, сильно ограничены. Эти особенности должны учитываться при проектировании оборудования для нанесения покрытий на изделия большого размера. Для этого должна быть решена задача обеспечения требуемого соотношения концентраций молекул рабочего и реактивного газов, а также распыляемого материала по всей поверхности изделия.

В конце главы на основе проведенного обзора определена цель работы и положения, выносимые на защиту.

Вторая глава посвящена теоретическим вопросам выбора компоновки оборудования и режимов его работы для нанесения многослойных покрытий на поверхности большого размера.

Первая ее часть затрагивает анализ вариантов компоновки оборудования с неподвижными источниками нанесения и подвижным изделием и посвящена разработке методики выбора оптимального варианта по критерию максимального быстродействия.

Особенностью оборудования нанесения многослойных покрытий на изделия большого размера является невозможность отделения друг от друга технологических сред для нанесения каждого слоя, так как размер изделия значительно больше каждой из камер нанесения.

Схема формирования многослойного покрытия на подвижном изделии с неподвижными источниками нанесения представлена на рисунке 2. Из рисунка видно, что при выборе компоновочного варианта оборудования необходимо принимать решение относительно количества и порядка расположения модулей нанесения. Проведенные исследования позволили разработать методику выбора структурно-компоновочного варианта. Предлагаемая методика рассмотрена на примере оборудования проходного типа, хотя может быть использована и для установок с возвратно-поступательным движением изделий. Состав, количество и порядок расположения модулей определяется на основании требуемой производительности, состава и количества слоев покрытия, допустимых режимов нанесения каждого слоя. Выбор компоновочного варианта производится по критерию максимальной фактической производительности оборудования.

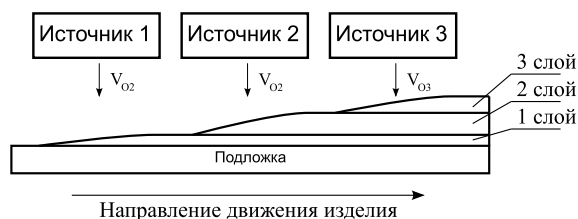


Рис. 2. Схема формирования многослойного покрытия на подвижном изделии с неподвижными источниками нанесения.

где V_{oi} — динамическая скорость осаждения i -го слоя, $нм \cdot м/с$; h_i — толщина i -го слоя, $нм$.

Из формулы видно, что увеличение скорости транспортирования V_{tr} при неизменных скоростях осаждения V_{oi} приводит к необходимости увеличения количества источников нанесения N_i для каждого слоя. Увеличение же количества источников (модулей нанесения слоев), в свою очередь, приводит к снижению надежности и, следовательно, к уменьшению фактической производительности оборудования. Скоростью осаждения отдельного слоя можно управлять путем изменения технологических режимов: для пленок металла — регулированием прикладываемой мощности, а для пленок соединений еще и изменением парциального давления реактивного газа.

Каждый слой покрытия характеризуется толщиной, минимальной и максимальной допустимыми скоростями нанесения. Минимальная скорость нанесения определяется исходя из требований, предъявляемых к пленке.

Поскольку нанесение покрытия производится на подвижное изделие, для расчетов удобно использовать динамическую скорость осаждения V_O , которая определяется как толщина пленки, формируемая в процессе движения подложки, $нм \cdot м/с$.

В этом случае количество источников для каждого слоя покрытия рассчитывается по формуле $N_i = h_i V_{tr} / V_{oi}$, где i — номер слоя; V_{tr} — скорость транспортирования изделия,

Известно, что от скорости нанесения пленки зависит ее структура и физические характеристики. Максимальная скорость нанесения определяется техническими характеристиками устройства, осуществляющего нанесение покрытия при обеспечении его качества.

Разработанная методика позволяет, используя набор диапазонов допустимых скоростей нанесения слоев покрытия и допустимую скорость транспортирования, выбрать компоновку линии по критерию максимальной фактической производительности.

Во второй части главы проводится анализ существующих методов расчета распределения давления внутри вакуумной камеры и производится выбор наиболее подходящей для решения поставленной задачи модели — метода статистических испытаний Монте-Карло. С использованием этого метода создана программа, позволяющая рассчитывать распределение абсолютного и парциальных давлений в процессе проведения технологического процесса нанесения оксидных, нитридных и т. п. покрытий и проводить выбор наилучших характеристик вакуумной и газовой систем по заданной неравномерности давления рабочих газов.

С целью подтверждения адекватности разработанной программы расчета проведено теоретическое исследование распределения давления в протяженной вакуумной камере прямоугольного сечения с отношением стороны сечения к длине камеры как 1 к 10. Откачка указанной тестовой камеры велась с одного торца, а напуск газа с противоположного торца.

Сравнение полученных значений парциального давления напускаемого газа в различных сечениях с данными, рассчитанными аналитическими методами с использованием классических методик расчета вакуумных систем, показало высокий уровень их соответствия. При этом относительная погрешность не превышала 10%, что позволяет говорить о правильно выбранной и реализованной методике расчета распределения давления.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию технологической среды нанесения нитридных покрытий, а также исследования полученных в процессе образцов.

Были проведены эксперименты по определению влияния соотношения потоков материала и реактивного газа в процессе нанесения покрытий нитрида титана на стеклянные образцы с использованием лабораторного откачного поста, используемого для отладки технологических процессов нанесения тонких пленок.

Внутри вакуумной камеры в разных точках были размещены контрольные образцы как показано на рисунке 3. Геометрия вакуумной камеры такова, что давление подаваемых газов будет равномерным по всему объему камеры. Соотношение потока газа и металла в этом случае является

функцией от координаты расположенных образцов.

Как и ожидалось, цвет покрытия зависел не только от состава газа, но и от удаленности образца от источника нанесения (магнетрона). Наиболее близко к источнику находились образцы 1, 2 и 9. Цвет их покрытия получился ровным, металлическим. Так как расстояние от этих образцов до источника было минимальным, поток атомов металла, падающий на поверхность образца был максимальным. Толщина покрытия на этих образцах оказалась слишком велика и при проведении тестов на адгезию разрушающим методом покрытие отслаивалось полностью. На остальных образцах цвет различен и зависит от соотношения потоков атомов металла и молекул реактивного газа в данной области пространства камеры.

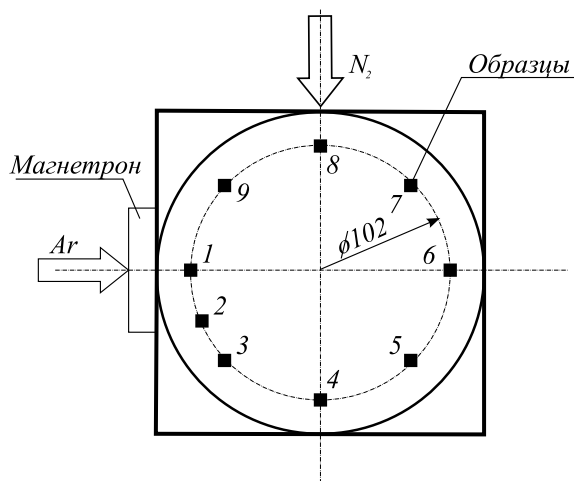


Рис. 3. Схема расположения образцов при проведении процесса нанесения покрытия.

Полученные образцы были исследованы на акустооптическом спектрофотометре. Были получены спектральные характеристики коэффициентов пропускания и прозрачности. Результаты проведенных измерений подтвердили, что соотношение потоков материала и реактивного газа оказывает сильное влияние не только на химические, но и спектральные характеристики покрытия.

Апробация полученных методик проводилась на установке нанесения покрытий на стекла периодического действия, которая представляет собой модернизированную установку УВН-4М.

Перед проведением экспериментов были составлены расчетные схемы камеры нанесения и произведен расчет распределения давления внутри нее с учетом количества напускаемой смеси рабочих газов при различных положениях источников нанесения и напуска газа соответственно. Расчет производился со следующими параметрами: шаг разбиения - 100 мм; количество прослеженных молекул: 10000 шт. Расчетная схема и результаты расчета распределения давления представлена на рисунке 4.

В четвертой главе представлены результаты использования разработанной методики анализа и выявления причин снижения качества тонкопленочных покрытий, получаемых на вакуумных установках проходного типа.

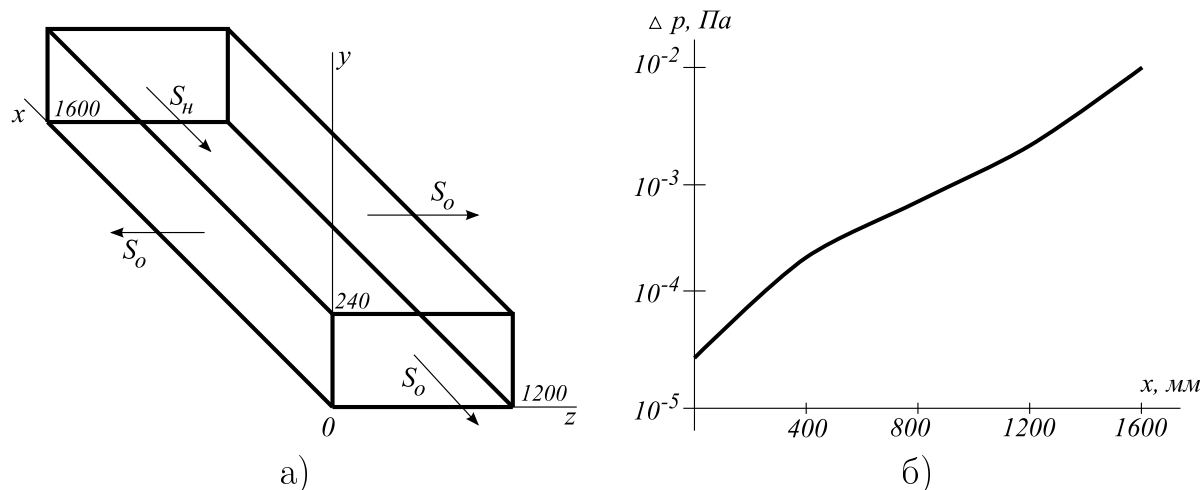


Рис. 4. Расчетная схема отсека камеры (а) и результаты расчета распределения давления (б) в установке УВН-4М.

Анализируемая установка представляет собой полуавтоматическую линию проходного типа с горизонтальным расположением изделия (рис. 5 а) — листового стекла размером 2250×3210 мм. В верхней части установки расположены 15 сдвоенных устройств нанесения покрытий, по два на каждый откачной пост. Вакуумная система установки состоит из чередующихся камер откачки и камер нанесения покрытий. В зону нанесения покрытия подается рабочий газ: по краям источников нанесения смесь кислорода и аргона, дополнительно с внутренней стороны камеры — аргон. Откачка камеры ведется четырьмя паромасляными диффузионными насосами НВДМ-400. Откачка рабочей камеры ведется через щелевой канал. Размер щелевого канала с учетом толщины подаваемого стекла составляет 10×2700 мм.

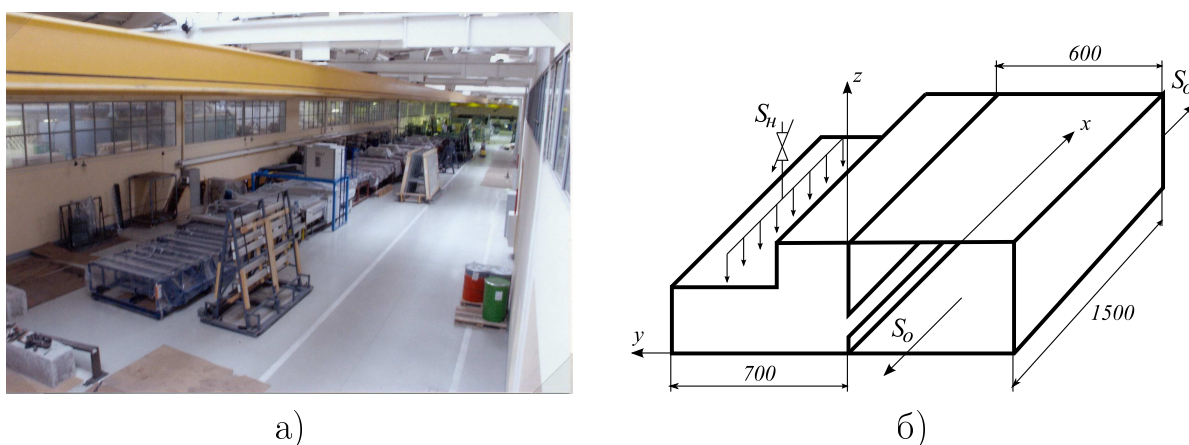


Рис. 5. Общий вид полуавтоматической линии нанесения покрытий на стекла (а) и расчетная модель для камеры откачки и нанесения (б).

С целью получения исходных данных для моделирования были про-

ведены предварительные расчеты потоков напуска рабочих газов в зону нанесения покрытия. Расчеты проводились с помощью разработанной программы. При составлении модели было учтено следующее:

1. Откачка рабочей камеры ведется через протяженную щель.
2. Лабиринты в откачной камере не влияют на процесс, так как расстояние между нижним краем лабиринта и стеклом много больше, чем размер щели. Так как откачка через щель ведется симметрично с обеих сторон, то распределение давления симметрично относительно оси, совпадающей с направлением движения стекла.

3. Поскольку газ в зону нанесения покрытия подается через бинарную газораспределительную систему, то можно считать, что газовая нагрузка по ширине стекла не зависит от координаты.

Расчеты показали, что перепад давления по ширине стекла соответствует перепаду давления в камере откачки и согласно расчетам составляет один порядок. Так как камера нанесения откачивается симметрично через щелевой канал, то наиболее неблагоприятным фактором является подача газа в зонах наиболее удаленных от мест откачки. Расчетная схема для камеры откачки и нанесения представлена на рисунке 5 б.

Проведенные по предложенной методике расчеты показывают, что перепад давления от места подсоединения насоса до центра стекла в случае равномерной газовой нагрузки составляет около одного порядка. Графики перепада давлений в поперечном сечении камеры откачки при равномерной газовой нагрузке со стороны рабочей камеры и перепада давлений в продольном сечении камеры нанесения представлены на рисунке 6.

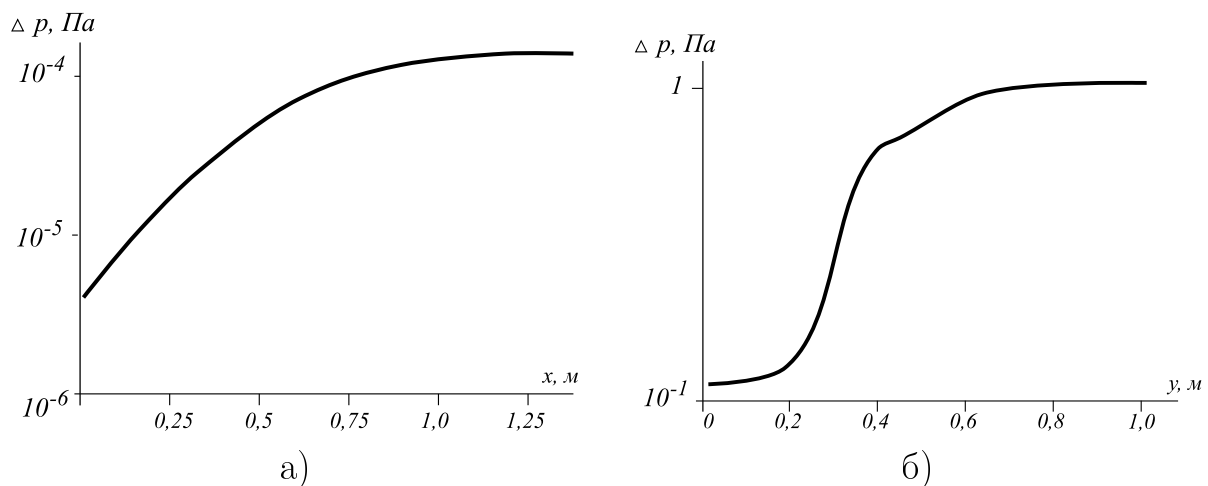


Рис. 6. График перепада давлений в поперечном сечении камеры откачки (а) и продольном сечении камеры нанесения (б).

Проведенные расчеты позволили установить причины снижения качества покрытий на исследуемой установке, к которым относятся:

1. Отсутствие возможности регулировать (диафрагмировать) поток откачиваемого из рабочих камер газа, что является общепринятой мерой управления стехиометрическим составом получаемого реактивным осаждением тонкопленочного покрытия;

2. Неравномерное распределение давления на участках вакуумных камер линии, связанное с тем, что один из размеров вакуумных камер много больше двух других размеров и потоки натекающего через неплотности и выделяющихся со стенок газов на удаленных от насоса участках вакуумной камеры достаточно велики.

С помощью методов, разработанных во второй и третьей главах, были проведены расчеты и выработаны рекомендации по внесению изменений в конструкцию линии.

Так как основными причинами большого перепада давления рабочих газов в зоне нанесения являются перепад давления в камере откачки и невозможность регулировать поток напуска газа в зависимости от координаты изделия, то были проведены следующие дополнительные расчеты и исследования.

Для камеры откачки были выполнены расчеты перепада давления по ширине стекла в зависимости от соотношения размеров сторон камеры откачки. Полученные результаты представлены на рисунке 7. Из результатов расчета следует, что для того, чтобы перепад давления был минимален, необходимо обеспечить соотношение сторон камеры откачки не более, чем 1/5. В этом случае перепад давления по ширине стекла составит не более 20%.

Вторым шагом по выравниванию давления в камере нанесения является установка системы напуска газа с отдельным регулированием потока по ширине стекла. Задачей является выбор необходимого и достаточного количества отдельно регулируемых секций напуска газа. Увеличение количества таких секций приводит к увеличению точности регулирования потока. Однако, чрезмерное количество таких секций усложняет систему управления.

Были проведены расчеты зависимости давления в камере нанесения

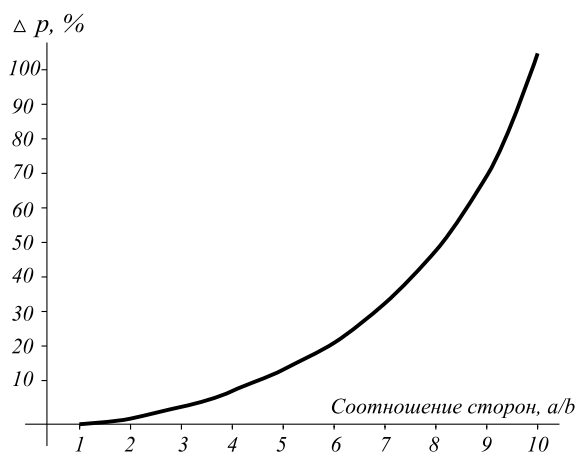


Рис. 7. Зависимость перепада давления в камере откачки от соотношения сторон камеры.

от количества отдельных секций напуска. Расчеты проводились для случаев использования 1 секции напуска (исходный вариант), бесконечного количества секций напуска (идеальный вариант), 3, 4 и 5 секций напуска. Для каждого случая была получена зависимость потока напуска от координаты. Эти зависимости представлены на рисунке 8. С этими исходными данными были проведены расчеты распределения давления в камере нанесения. Результаты расчета показали, что при количестве секций 3 и более, перепад давления в зоне нанесения покрытия находится в требуемых пределах. Следовательно, целесообразно выбрать количество секций равное трем.

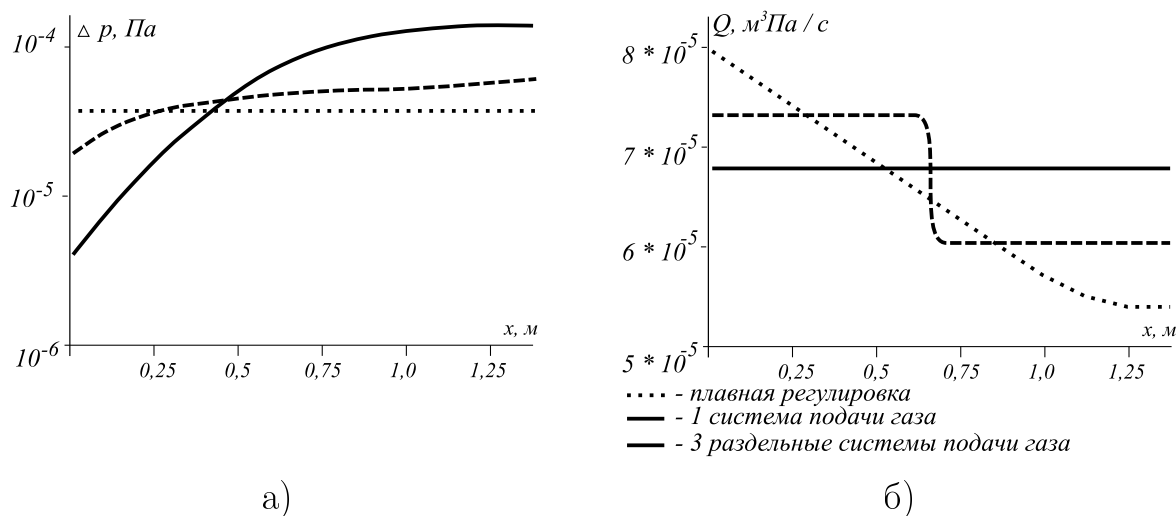


Рис. 8. Зависимость перепада давлений (а) и потока напуска реактивного газа (б) от координаты x в камере нанесения для различного количества отдельно регулируемых секций напуска.

По результатам проведенных расчетов и выявленным причинам низкого качества покрытий можно сделать следующие рекомендации по конструированию оборудования для нанесения многослойных тонкопленочных покрытий на изделия большого размера:

1. При проектировании откачной системы необходимо избегать протяженных каналов с соотношением сторон более 1/5.

2. Необходимо в системе откачки рабочей камеры предусматривать диафрагмирование потока откачиваемого газа.

3. Уменьшать неравномерность давления рабочих газов по ширине изделия большого размера внесением в систему подачи рабочих и реактивных газов регулирующих элементов, которые позволят изменять подаваемый поток в зависимости от координаты места подачи газовой смеси, причем количество таких секций должно быть не менее трех.

Предложенные методы являются универсальными и могут быть применены при проектировании и исследовании любого оборудования подобного типа.

Общие выводы

1. Для обеспечения максимального быстродействия оборудования проходного типа и вакуумных автоматических линий при нанесении многослойных тонкопленочных покрытий реактивным методом на изделия большого размера рекомендуется использовать разработанную методику выбора структурно-компоновочных вариантов оборудования, определяющую необходимое количество рабочих камер и источников нанесения покрытия, наиболее приемлемую скорость транспортирования обрабатываемых изделий.

2. Для формирования на изделиях большого размера многослойных тонкопленочных покрытий реактивным методом необходимо согласовывать режимы и откачки, и напуска смеси плазмообразующего и реактивного газов для обеспечения заданного стехиометрического состава, его однородности и равномерности толщины по всей площади изделия.

3. Для согласования режимов и откачки, и напуска смеси плазмообразующего и реактивного газов в узких, протяженных вакуумных камерах для нанесения оксидных, нитридных и т. п. тонкопленочных покрытий рекомендуется использовать предложенную методику и разработанную компьютерную программу, с помощью которых методом итераций можно добиться необходимых состава и однородности вакуумной технологической среды на всем протяжении камеры.

4. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили расчетные значения степени влияния геометрических размеров и формы рабочих камер, взаимного расположения патрубков откачки и напуска смеси рабочих газов на однородность состава и неравномерность толщины тонкопленочных покрытий, а также их эксплуатационные характеристики. Это связано с тем, что скорость осаждения покрытия, его толщина и стехиометрический состав в разных зонах рабочей камеры могут отличаться в 3 и более раз.

5. Для достижения однородности параметров технологической среды необходимо при проектировании оборудования учитывать следующие рекомендации:

- систему подачи смеси плазмообразующего и реактивного газов следует выполнять в виде отдельных секций напуска, причем состав и величину потока газовой смеси в каждой секции необходимо регулировать неза-

висимо, а количество таких секций нужно определять исходя из размеров изделия, расположения зон откачки, напуска и требуемого потока газовой смеси.

● зоны откачки необходимо проектировать таким образом, чтобы избегать протяженных каналов с соотношением сторон более 5/1, а если это невозможно, то необходимо делить протяженные каналы на секции и откачивать их параллельно.

Основные работы по теме диссертации

1. Колесник Л.Л. Математическое моделирование распределения давления в технологических вакуумных системах // Вакуумные технологии и оборудование : Сборник докладов 4-го международного симпозиума. Харьков. 2001. С. 60-61.

2. Колесник Л.Л. Использование метода Монте-Карло при анализе вариантов вакуумного оборудования для нанесения упрочняющих и энерго-сберегающих покрытий // Справочник. Инженерный журнал. 2008. №11. С. 61-63.

3. Панфилов Ю.В., Колесник Л.Л. Анализ вариантов оборудования для нанесения тонкопленочных тепловых фильтров // Высокие технологии в промышленности России (Техника средств связи) : Материалы 2-й российской конференции. Москва. 1997. С. 43-49.

4. Панфилов Ю.В., Колесник Л.Л., Барменкова С.В. Устройство контроля оптических характеристик теплоотражающих покрытий // Контроль и диагностика. 1998. №5. С. 45-49.

5. Колесник Л.Л., Соколова А.В. Измерение оптических характеристик тепловых фильтров в ближнем ИК-диапазоне // Высокие технологии в промышленности России : Материалы 5-й российской конференции. Москва. 1999. С. 107-109.

6. Panfilov Y., Kolesnik L., Bulygina E. Creation of the Equipment for Vacuum Deposition of Thin Film Heat Saving Coatings on Glass as a Complex Task // 2nd International Conference on Coatings on Glass : Abstracts of Presentations. Saarbrücken (Germany). 1998. P. 86.

7. Панфилов Ю.В., Чередниченко О.Б., Колесник Л.Л. Тонкопленочные энергосберегающие покрытия на полимерных пленках и стекле // Вакуумные наука и техника : Тезисы докладов научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Гурзуф. 1996. С. 64.

8. Панфилов Ю.В., Колесник Л.Л. Вакуумное нанесение тонкопленочных покрытий // Машиностроительные технологии : Тезисы докладов все-российской научно-технической конференции. Москва. 1998. С. 230-231.