1548964

Научно-исследовательский институт точного машиностроения
Акционерное общество открытого типа

На правах рукописи

ОДИНОКОВ Вадим Васильевич

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МНОГОКАМЕРНОГО ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С МАГНЕТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СБИС

Специальности: 05.13.07 - Автоматизация технологических процессов и производств
05.27.07 - Оборудование производства электронной техники

Д И С С Е Р Т А Ц И Я
в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук

Москва - 1995

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ковалев Л.К.
доктор технических наук,
профессор Деулин Е.А.
доктор технических наук
Гревцев Н.В.

Ведущая организация – Государственный НИИ вакуумной техники им. С.А.Векшинского

Защита состоится "21" июня 1995г. в 14 30 на заседании диссертационного совета Д 053.15.04 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией в виде научного доклада можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Телефон для справок 267-09-63.

Диссертация разослана "19" мая 1995г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
К.Т.Н., ДОЦЕНТ

1548964

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Прогресс во многих областях техники в значительной степени зависит от совершенства и уровня технических решений в микроэлектронике. Тенденция развития электронной аппаратуры такова, что уже сейчас решение ряда ее технических задач по экономическим (стоимость, энергопотребление) и техническим (быстродействие, надежность, объем) характеристикам становится невозможно без широкого применения микросхем по[illegible]енной степени интеграции – сверхбольших интегральных схем (СБИС). С повышением интеграции микросхем значительно возросли требования к технологическим процессам их производства, в первую очередь по производительности, точности и воспроизводимости параметров, выходу годных изделий. Зачастую ранее применяемые установки и технологические узлы по своим физико-техническим характеристикам становятся непригодными для новой технологии. По этой причине в ведущих промышленных странах (США, Япония, Германия, Англия, Франция) настойчиво ведется разработка более совершенной технологии и оборудования для промышленного выпуска СБИС.

В технологии производства СБИС одним из базовых технологических процессов является получение в вакууме качественных и воспроизводимых по электрофизическим характеристикам тонкопленочных элементов (проводящие и сверхпроводящие пленки; изоляционные, барьерные и полупроводниковые пленочные слои и т.д.). Совершенство этой технологии и вакуумного оборудования для нанесения тонких слоев пленок металлов и диэлектриков является определяющим, так как значительная доля операции нанесения этих материалов падает на финишные стадии изготовления СБИС, когда микросхема почти готова и "вобрала" в себя основную стоимость изготовления и брак экономически недопустим.

На начало 80-х годов отечественное промышленное вакуумное оборудование для нанесения пленок было только периодического (дискретного) действия с постоянно изменяющимся составом газовой среды в рабочей камере при загрузке изделий и выходе на режим источников обработки изделий и т.д., т.е. это оборудование было непригодно для выполнения требований технологии производства СБИС емкостью 64Кбит–16Мбит, в том числе и по производительности.

Более детально эти причины состоят в следующем:

– низкая производительность установок (менее 40 пл/ч) была из-за больших потерь времени на загрузку, выгрузку, транспортирование пластин, откачку рабочей камеры, подготовку источников нанесения пленок и пластин с изделиями к процессам (нагрев, очистка

1548964
НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1548964
Одиноков В.В. Основы расче

поверхности, тренировка источника и т.д.) Суммарное рабочее время составляло 30-60% времени цикла. Основные и вспомогательные рабочие операции обработки проводились последовательно в одной вакуумной камере. Производительность ограничивалась небольшим запасом материала (менее I ч) и низким коэффициентом использования потока материала из источника нанесения пленок (менее 20%);

- низкий выход годных изделий (менее 20%) определялся во-первых, невоспроизводимостью по составу и нестабильностью во времени газовой среды рабочих камер в результате частого сообщения их объемов с атмосферным воздухом при загрузке-выгрузке изделий и выходе на режим источника нанесения пленки. Во-вторых, оборудование не соответствовало требованиям по привносимой дефектности из-за осаждения из вакуумного объема на поверхность изделий значительного количества мелкодисперсных частиц в процессе загрузки, транспортирования и обработки. Загрузка пластин осуществлялась вручную. В третьих, устройства нанесения пленок имели ограниченные технологические возможности из-за неэффективности и зачастую невозможности нанесения в промышленных условиях тонких пленок многокомпонентного состава и сплавов, не нарушая при этом структуры СБИС высокоэнергичными частицами;

- управление механизмами установок, технологическим процессом и их контроль осуществлялся без использования ЭВМ, а зачастую оператором с использованием отдельных автоматических узлов и систем, что невозможно для поддержания точных и воспроизводимых во времени технологических параметров процесса металлизации СБИС.

Поэтому при проектировании вакуумного оборудования для металлизации СБИС необходимо было применять принципиально новые подходы и технические решения как по отдельным технологическим узлам, так и по структурно-компоновочному построению установок.

В связи с этим разработка и освоение выпуска высокопроизводительного промышленного вакуумного оборудования непрерывного действия со стабильно чистой вакуумной средой и эффективными устройствами нанесения пленок, что определяет качество и воспроизводимость электрофизических характеристик пленок, производительность и выход годных СБИС является актуальной для электронной техники проблемой.

Для решения этих проблем под руководством и непосредственным участием автора в НИИ точного машиностроения были проведены за период с 1975 по 1994 г.г. более 20-и НИР и ОКР.

Цель и задачи работы. Диссертационная работа ставит своей целью создание научных основ проектирования высокопроизводительного многокамерного вакуумного оборудования непрерывного действия со стабильно чистой вакуумной средой и эффективными устройствами нанесения пленок, включая методы расчета и выбора параметров транспортно-шлюзовых систем и магнетронных устройств распыления материалов, внедрение его в серийное производство для освоения на его базе новых многооперационных технологических процессов изготовления тонкопленочных элементов СВИС, что является решением важной народнохозяйственной проблемы.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи теоретического, экспериментального и промышленного характера:

- создание научных принципов расчета и выбора структурно-компоновочных решений высокопроизводительного многокамерного оборудования непрерывного действия для нанесения тонких пленок в стабильно чистой вакуумной среде;

- разработка основ расчета и конструирования транспортно-шлюзовых и загрузочных систем многокамерных установок с противоречивыми условиями по повышению выхода годных изделий, надежности функционирования и быстродействия механизмов загрузки;

- разработка теории расчета и выбора параметров высокопроизводительных магнетронных распылительных устройств с эффективным использованием материала и широкими технологическими возможностями для оборудования непрерывного действия;

- создание и промышленное внедрение нескольких типов высокопроизводительных вакуумных установок непрерывного действия с микропроцессорными системами управления для производства СВИС различного уровня сложности.

Методы исследований: Теоретической базой диссертации было: теория производительности машин и труда Г.А.Шаумяна; теория надежности машин и автоматических линий А.С.Проникова и Л.И.Волчкевича; молекулярно-кинематическая теория газов Д.Маковела, М.Кнудсена, С.Дэшмана и др.; математический аппарат интегральных и интегро-дифференциальных уравнений.

Применялись методы математического моделирования и машинного эксперимента, оптимизации, кластерного анализа и численного решения с применением ЭВМ.

Проводились экспериментальные исследования на специальных вакуумных стендах НИИ точного машиностроения и опытно-промышленном оборудовании на технологических предприятиях г.Зеленограда. Обработка результатов осуществлялась методами теории вероятности и математической статистики.

Научная новизна работы.

I. Развита теория производительности машин в области создания многокамерного вакуумного оборудования непрерывного действия с дифференциацией и концентрацией операций при существенных ограничениях по длительности, условиям проведения операций обработки, загрузки и непрерывного транспортирования изделий через герметизированные рабочие камеры при возросших требованиях по стабильности, чистоте вакуумной среды, равномерности и воспроизводимости пленок по толщине.

2. Разработаны физические и выведены математические модели распределения газовых потоков в многокамерном вакуумном оборудовании и шлюзовых системах при стационарном и нестационарном режимах течения газов; получены аналитические выражения, позволяющие определять рациональные конструктивные размеры межкамерных каналов, выбирать откачные средства для шлюзовых систем (ШС) и проводить расчеты вакуумно-технических характеристик установок с учетом режимов откачки и напуска газа, обеспечивающих минимальную пылегенерацию.

3. Создана теоретическая модель формирования заданной толщины пленки на поверхность конденсации при магнетронном методе распыления материалов при определенной траектории перемещения пластин (непрерывное или периодическое перемещение) с учетом эффективности использования материала мишени; получены аналитические выражения, позволяющие определять основные конструктивные размеры магнетронных распылительных устройств с минимизацией размеров их мишеней.

4. Разработан ряд принципиально новых схем магнетронных распылительных устройств для нанесения пленок и очистки пластин, структурно-компоновочных решений, конструкций шлюзовых систем и вакуумных установок.

Новизна работы подтверждена 45-ю авторскими свидетельствами на изобретения.

Практическая значимость.

I. На основе теоретических и экспериментальных исследований, а также ряда НИР и ОКР, проведенных под научным руководством и при непосредственном участии автора, в НИИ точного машиностроения создан ряд принципиально новых моделей магнетронных распылительных

устройств с широкими технологическими возможностями, систем ионной очистки пластин и четыре транспортно-загрузочные системы вакуумных установок, в том числе с загрузкой из кассеты в кассету, непрерывного действия оснащенных микропроцессорными системами управления, безмасляными средствами откачки для металлизации СБИС на пластинах диаметром 75, 100, 150 и 200 мм.

2. Разработаны научно-обоснованные методики расчета геометрических параметров конструкций магнетронных распылительных устройств при индивидуальной обработке неподвижных и непрерывно перемещающихся пластин, методики расчета основных вакуумно-технических и конструктивных параметров шлюзовых систем, а также на их основе рекомендации по проектированию вакуумных установок.

3. Получены пригодные для инженерных расчетов формулы по определению основных геометрических размеров межкамерных каналов и вакуумных характеристик установок, а также режимов их откачки с целью уменьшения привносимой дефектности на пластинах, на основе которых разработаны программы для расчета основных элементов конструкций шлюзовых систем на ПЭВМ типа IBM, а также научно обоснованные рекомендации по структурно-компоновочному построению и конструированию многокамерных установок с учетом минимальной привносимой дефектности на пластинах.

4. За период с 1977 по 1994г.г. было разработано более 9 модификаций вакуумных установок для металлизации СБИС различного технологического назначения. В настоящее время серийно выпускаются на Калининградском машиностроительном заводе три установки "ОПИ-7-015", "Электроника ТМ-1201" и "Электроника ТМ-1202", а также на опытном заводе "Элион" г.Зеленограда отдельные партии установок "Оратория-22" "Электроника ТМ-1203 и ТМ-1204" и др. Несколько партий установок экспортировано в зарубежные страны (ГДР, ВНР, КНР). На конец 1994г. всего выпущено около 300 установок. Указанное вакуумное оборудование в основном используется для выпуска СБИС с уровнем интеграции (емкостью) 64-256К, а установки "Электроника ТМ-1203 и ТМ-1204" - -для организации выпуска СБИС (1-16)М.

Средний реальный экономический эффект за период 1980-1994г.г. от внедрения оборудования составляет более 60 млн.руб. (в ценах 1991г.).

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на пяти Всесоюзных научно-технических конференциях и двенадцати отраслевых конференциях и семинарах.

Работа периодически обсуждалась на НТС НИИ точного машиностроения, научно-технических семинарах кафедры "Электронное машиностроение" МГТУ им.Н.Э.Баумана и кафедры "Автоматизированные комплексы микроэлектроники" МИЭТ г.Зеленоград (1992-1995г.г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы более чем в 60 работах, в том числе 22 статьях научно-технических журналов и сборников, в одной книге и 3 обзорах, 12 тезисах докладов на Всесоюзных и отраслевых конференциях, 45 авторских свидетельствах на изобретение. Кандидатская диссертация на тему "Разработка и исследование вакуумных установок со шлюзовыми системами для нанесения тонкопленочных элементов интегральных схем" защищена автором в 1981г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Высокие темпы разработки новых поколений микросхем-СБИС и соответственно более прогрессивных технологий ставят очень жесткие требования к разработке нового вакуумного оборудования. Для того, чтобы это оборудование отвечало современным технологическим и производственным требованиям металлизации СБИС 64К-16М, оно должно соответствовать следующим основным характеристикам:

- обеспечивать производительность 50-120 пл/ч при выходе годных изделий не менее 90%;
- в едином вакуумном цикле (без выноса на атмосферный воздух) выполнять технологические операции: предварительного нагрева до T_0=400°С, ионной очистки поверхности пластин на глубину 50-400 А, нанесение пленок толщиной h =0,2-1,3 мкм в инертной и активной газовой среде, термообработку до Т=600-800°С, охлаждение пластин до Т=80-150°С. Каждая операция должна выполняться при "своем" рабочем давлении, в чистой (безмасляной) вакуумной среде с воспроизводимым уровнем давления и состава остаточных газов (в пределах ±2-5%), с минимальным временем пролеживания между операциями (30-80с), в условиях минимальной привносимой дефектности (количество пылинок (частиц) 0,05-0,5 шт/см^2 при их диаметре d_4=0,1-0,2 мкм);
- основная технологическая операция - нанесение пленок должна выполняться источником, обеспечивающим скорость нанесения 100-200А°/с с неравномерностью пленок по толщине Δ =±2-5%, в том числе равномерное покрытие ступенчатого рельефа структур ИС. Источник должен иметь большой ресурс (запас материала)-более чем на 50ч, обеспечивать нанесение одно и многокомпонентных пленок, в т.ч. из сплавов не нарушая и не нагревая выше 150°С структуры СБИС. Дополнительная операция - ионная очистка должна выполняться низкоэнергетичным по-

током ионов с энергией не более 600 эВ;

- управление установкой, технологическими и другими узлами должно осуществляться от ЭВМ с обеспечением стабилизации режимов технологических процессов, диагностикой отказов и неисправностей;

- установки должны встраиваться панелью со шлюзами загрузки-выгрузки пластин и пультом управления в "чистую зону" обеспыленных помещений, а узлы и системы обеспечивать надежную работу.

С этих позиций и осуществлялась постановка задач исследований и разработок прогрессивного промышленного оборудования для металлизации СВИС. Создание и постоянное совершенствование технологических и других систем установок, их базовых схем, структуры и компоновки проводилась поэтапно по мере разработки и освоения более сложных СВИС, что требовало решения на каждом этапе комплекса взаимосвязанных проблем. Решение основных (определяющих) проблем излагается в данной работе в отдельных разделах.

В первом разделе работы решаются принципиальные задачи повышения производительности, стабильности и чистоты вакуумной среды, выбора структурно-компоновочных решений транспортно-шлюзовых и загрузочных систем вакуумного оборудования. Анализ принципиальных схем, решений и конструкций вакуумного технологического оборудования созданного в период 1970-80г.г. как в ведущих зарубежных странах (США, Германия, Япония и др.) так и отечественной электронной промышленности показал, что только принципиально новые подходы в части структурно-компоновочных решений, методов транспортирования и обработки пластин могут принести основной эффект в повышении производительности оборудования, стабильности газовой среды и обеспечении требований технологии СВИС.

Проблемами повышения производительности и выхода годных изделий в вакуумном технологическом оборудовании занималось большое число ученых: Блинов И.Г., Минайчев В.Е., Ковалев Л.К., Деулин Е.А., Александрова А.Т., Ивановский Г.Ф., Панфилов Ю.В., Денисов А.Г. и др. Однако в их работах, как правила, решались вопросы повышения производительности, расчета и конструирования установок периодического действия путем совершенствования их структурно-компоновочных вариантов, а также отдельных технологических и кинематических узлов (устройств нанесения пленок, механизмов вращения пластин, средств откачки, создание элементной базы и т.д.), но не исследовались многокамерные вакуумные установки непрерывного действия, обеспечивающие постоянство состава и чистоту газовой среды.

Анализ вакуумного оборудования для нанесения пленок с точки зрения теории производительности машин и труда, а также особенностей технологии металлизации СВИС позволил установить, что производительность установок можно значительно поднять:

- увеличением технологической производительности (скорости осаждения пленки на пластины) $Q_{тех}$, путем интенсификации процесса нанесения пленок, т.е. увеличением скорости испарения (распыления) материала из источника $\vartheta_{ист}$, повышением коэффициента использования потока испаренного материала $K_{исп}^{пот}$:

$$Q_{тех} = \vartheta_{ист} \cdot K_{исп}^{пот}; \qquad (1)$$

- увеличением цикловой производительности $Q_ц$, путем уменьшения длительности холостых ходов t_x и одновременным проведением основной (нанесение пленки) и дополнительных рабочих операций с полным совмещением во времени $t_р$ и t_x, т.е. обеспечением непрерывной и одновременной подачи (загрузки), многопозиционной обработки и выгрузки изделий, а также путем дифференцирования наиболее длительной (нанесение пленки) операции на нескольких позициях q;

$$Q_ц = \frac{\vartheta_{ист} \cdot K_{исп}^{пот} \cdot q}{\vartheta_{ист} \cdot K_{исп}^{пот} \cdot t_x + 1}; \qquad (2)$$

- повышением коэффициента использования установок $\eta_{ис}$ путем увеличения запаса материала источника нанесения пленок, уменьшения количества и времени планово-профилактических работ, использованием отработанных (надежных) узлов и механизмов и автоматизацией управления и контроля параметров установки с использованием ЭВМ;

- увеличением коэффициента выхода годных изделий $\eta_г$ путем уменьшения времени пролеживания $t_{пр}$ пластин между рабочими операциями, минимизацией уровня и состава активных газов, уменьшением потока мелкодисперсных частиц (МДЧ) на пластины

$$\eta_г' = e^{-\frac{t_{пр} + t_р}{t_{доп}^{газ} + t_{доп}^{МДЧ}}}; \qquad (3)$$

где: $t_{доп}^{газ} = \frac{C \cdot h}{\sum_{i=1}^{n} N_г^i}$ — допустимое время воздействия активных газов на пластину; C — допустимая концентрация газов по толщине пленки h; $N_г^i$ — количество молекул газа воздействующих на пластину;

$t_{доп}^{МДЧ} = \frac{D}{\int_{d_{min}}^{d_{max}} N_ч(d_ч)\,dd_ч}$ — допустимое время воздействия МДЧ на пластину; D — допустимая доза МДЧ на пластине; $N_ч$ — поток частиц на пластину.

В результате разработки и анализа различных вариантов компоновки вакуумных установок был определен принцип создания многокамерной структуры установки с вакуумной изоляцией рабочих камер между собой. Теоретический анализ систем межкамерного транспортирования пластин показал, что прямоточное перемещение отдельных пластин через камеры одним или несколькими однотипными механизмами обеспечивает минимальное время холостых ходов транспортирования и наиболее надежную работу. С учетом требований по уменьшению привносимой дефектности был определен принцип "несилового захвата" пластин, а поддержка их с нерабочей стороны или вдоль кромки без держателя пластин, перемещением пластин в горизонтальной или вертикальной плоскостях и расположением механизмов транспортной системы ниже уровня рабочей поверхности пластин. Проблема загрузки и выгрузки пластин без разгерметизации многокамерной установки может быть решена только с помощью шлюзовых систем (ШС) комбинированного типа (сочетание открытого и закрытого типов). Теоретическое исследование ШС с позиции быстродействия и надежности в работе показало, что предпочтительно вести загрузку пластин или поштучно через шлюз закрытого типа с использованием силы тяжести пластины или с магазинной (кассетной) загрузкой в шлюз и поштучной перегрузкой их на транспортную систему. При этом наиболее рационально использование не более двух шлюзов с двумя кассетами с достижением полного совмещения холостых ходов загрузки-выгрузки пластин в шлюзах с рабочими операциями.

Единственным решением проблемы устранения повторяющихся от цикла к циклу потерь времени выхода на режим устройств обработки пластин $t_к^и$ (например, тренировка испарителя-мишени) и времени стабилизации состава и давления газовой среды (вакуума) $t_х^{ста}$ может быть постоянное поддержание устройств обработки пластин в рабочем режиме (без выключения) при постоянном рабочем давлении и составе газовой среды и ограничиться одним холостым (суммарным) ходом $t_к^и + t_х^{ста}$ в момент первоначального запуска установки. Холостые ходы периодической загрузки источника нанесения пленок могут быть также вынесены из рабочего цикла обеспечением необходимого запаса материала в испарителе, а загрузку новой партии материала осуществлять в период планово-профилактических работ с установкой.

Второй раздел работы посвящен теоретическим и экспериментальным исследованиям вакуумных параметров многокамерных установок со шлюзовыми системами.

При загрузке-выгрузке и транспортировании пластин через камеры с различным давлением происходит перетекание газов между ними и изменение давлений.

Для изучения этих динамических процессов необходимо было создать и изучить физические и математические модели распределения газовых потоков в многокамерных ШС, а также разработать методики расчета ШС с целью их грамотного проектирования и обеспечения непрерывной подачи пластин в зоны обработки с сохранением стабильного состава газовых сред, уровня рабочих давлений и режимов откачки.

В основе расчета многоступенчатой (многокамерной) ШС, обеспечивающей непрерывную подачу пластин в рабочую камеру или между несколькими рабочими камерами (рис.I), лежит баланс газовых потоков, который может быть выражен в математической форме системой уравнений вида:

$$P_i S_i + U_{i,i+1}(P_i - P_{i+1}) = G_i + U_{i-1,i}(P_{i-1} - P_i), \qquad (4)$$

где: $i = 1,2 \ldots n$; P_i, S_i, G_i - соответственно давление, быстрота откачки, поток газовыделения и натекания в i- й шлюзовой камере;

$U_{i,i+1}$; $U_{i-1,i}$ - проводимость каналов на выходе и входе i-й шлюзовой камеры.

В результате совместного решения системы уравнений (4) было получено аналитическое выражение для определения рабочего давления в установках с открытыми, полуоткрытыми, закрытыми и комбинированными ШС:

$$P_n = \frac{G_n + \sum_{i=1}^{n-1} G_{n-i} \prod_{j=0}^{i-1} K_{n-(j+1),n-j} + U_{01} P_0 \prod_{j=0}^{n-2} K_{n-(j+1),n-j}}{S_n + \sum_{i=1}^{n-1} S_{n-i} \prod_{j=0}^{i-1} K_{n-(j+1),n-j} + U_{01} \prod_{j=0}^{n-2} K_{n-(j+1),n-j}}, \qquad (5)$$

где: $n = 2,3,4 \ldots$

$$K_{12} = \left(1 + \frac{S_1 + U_{01}}{U_{12}}\right)^{-1}; \quad K_{n-1,n} = \left(1 + \frac{S_{n-1} + \sum_{i=2}^{n-1} S_{n-i} \prod_{j=1}^{i-1} K_{n-(j+1),n-j} + U_{01} \prod_{j=1}^{n-2} K_{n-(j+1),n-j}}{U_{n-1,n}}\right)^{-1}$$

$$n = 3,4,5 \ldots$$

С помощью выражения (5) может быть выполнен расчет рабочего давления в вакуумной установке при стационарном (установившемся) течении газовых потоков ШС любого типа при известных параметрах: геометрических размерах межкамерных каналов, определяющие проводимость $U_{01} \ldots U_{n-1,n}$, быстроты действия откачных средств, величин потоков газовыделений и натеканий $S_1 \ldots S_n$, $G_1 \ldots G_n$. При этом учитываются все направления перераспределения газовых потоков между шлюзовыми камерами, что особенно важно для точности расчета ШС.

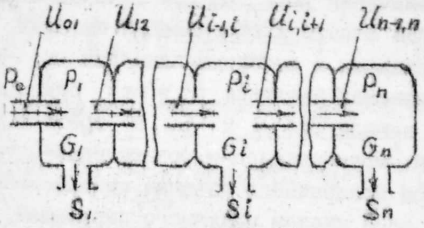


Рис.I. Расчетная схема газовых потоков в многокамерной ШС открытого типа.

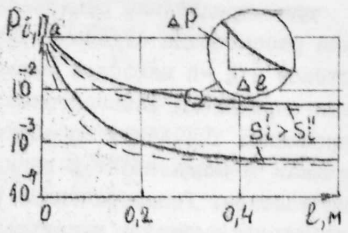


Рис.2. Анализ зависимости $P_i = f(\ell)$ для определения рационального значения длины ℓ каналов открытой ШС.

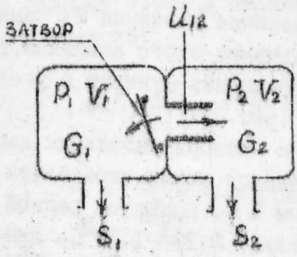


Рис.3. Расчетная схема газовых потоков в двухкамерной ШС закрытого типа при разгерметизации затвора.

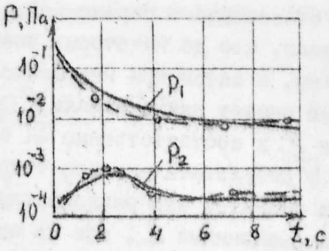


Рис.4. Изменение давлений в двухкамерной ШС при плавной разгерметизации затвора.

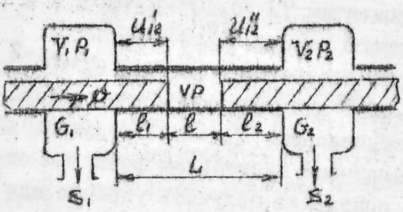


Рис.5. Расчетная схема газовых потоков в открытой ШС при перемещении пластин.

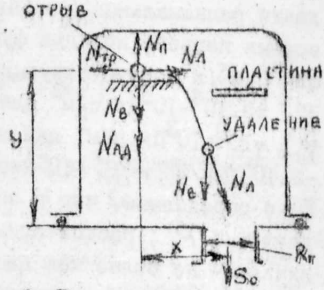


Рис.6. Расчетная схема взаимодействия МДЧ с поверхностью и газовым потоком.

для определения рациональных значений $U_{01} \dots U_{n-1,n}$ и $S_1 \dots S_n$ была рассмотрена отдельно физическая модель распределения газовых потоков в i -й шлюзовой камере с входным и выходным каналами и были определены закономерности изменения давления P_i в ней при переменных значениях проводимости канала $U_{i-1,i}$ и S_i в трех режимах течения газа: в вязкостном, молекулярном и молекулярно-вязкостном. Геометрические размеры поперечного сечения канала необходимо выбирать минимальными, но с учетом надежного перемещения транспортирующего устройства с пластинами. Поэтому переменным геометрическим параметром, определяющим значение $U_{i-1,i}$, является длина ℓ входного канала.

Было определено, что функции $P_i = f(\ell)$ и $P_i = \psi(S_i)$ могут быть записаны несколькими аналитическими выражениями, анализ которых относительно переменной ℓ в каждом режиме течения газа, показал, что до некоторых значений уменьшение давления P_i значительно, а затем при несущественном уменьшении этого давления интенсивно растет длина канала ℓ, при этом значении функций с увеличением ℓ и соответственно S_i сближаются (рис.2).

В результате анализа теоретических и экспериментальных данных было принято, что рациональные длины каналов можно определять такими значениями ℓ, где на единицу длины $\Delta\ell$, принятой равной 1.10^{-2}м, уменьшение давления ΔP_i составляет 5.10^{1}-1.10^{2}Па для вязкостного, $1\text{-}10^{-1}$Па для молекулярно-вязкостного и 10^{-4}-5.10^{-5}Па для молекулярного режимов воздуха. Для выбора рациональных откачных средств при тех же значениях ΔP_i на единицу быстроты откачки целесообразно значение $\Delta S = 10^{-3}$м^3/с. Это позволило определить области рациональных значений ℓ и S_i путем приравнивания производных первого порядка функций $P_i = f(\ell)$ и $P_i = \psi(S_i)$ по аргументам ℓ и S_i к соответствующим коэффициентам $\varphi_в^{\ell} = 5.10^{3}$-$10^{4}$Па/м и $\varphi_в^{S} = 5.10^{4}$-10^{5}Па.с/м^3 для вязкостного режима, $\varphi_{мв}^{\ell} = 10$-12^{2}Па/м и $\varphi_{мв}^{S} = 10^{2}$-$10^{3}$Па.с/м^3 для молекулярно-вязкостного режима, $\varphi_м^{\ell} = 10^{-2}$-$5.10^{-3}$Па/м и $\varphi_м^{S} = 10^{-1}$-5.10^{-2}Па.с/м^3 для молекулярного режима. Было определено, что в области рациональных ℓ и S_i значений давлений P_i, рассчитанные по выведенным нескольким формулам отличаются не более чем на 2%. Это позволило получить удобные для практического применения формулы, определяющие рациональные значения ℓ, $U_{i-1,i}$: для вязкостного режима

$$\ell_в = P_{i-1}\sqrt{\frac{A_в}{2 S_i \varphi_в^{\ell}}}\,; \qquad U_{i-1,i\,в} = \sqrt{\frac{A_в S_i \varphi_в^{\ell}}{2}}\,; \qquad (6)$$

для молекулярного режима

$$l_м = \sqrt{\frac{A_м P_{i-1}}{S_i \varphi_м^s}}; \qquad U_{i-1,i\,м} = \sqrt{\frac{A_м S_i \varphi_м^s}{P_{i-1}}};$$

Для молекулярно-вязкостного режима

$$l_{мв} = \sqrt{\frac{P_{i-1}}{S_i \varphi_{мв}^s}\left(\frac{1}{2} A_в P_{i-1} + Z A_м\right)}; \quad U_{i-1,i\,мв} = \sqrt{\frac{S_i \varphi_{мв}^s}{P_{i-1}}\left(\frac{1}{2} A_в P_{i-1} + Z A_м\right)}$$

Были получены выражения, с помощью которых определяются рациональные значения S_i и P_i с использованием коэффициентов $\varphi_в^s$, $\varphi_{мв}^s$, $\varphi_м^s$.

При разгерметизации затвора проводимостью U_{12} между двумя вакуумными камерами с различным давлением $P_1 > P_2$ наблюдается нестационарное состояние перетекания газов (рис.3). В этом случае баланс газовых потоков выражается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} -V_1 \frac{dP_1}{dt} &= P_1 \cdot S_1 + U_{12}(P_1 - P_2) - G_1 \\ -V_2 \frac{dP_2}{dt} &= P_2 \cdot S_2 - U_{12}(P_1 - P_2) - G_2, \end{aligned} \qquad (7)$$

где V_1 и V_2 – объемы сообщающихся камер.

Если проводимость затвора U_{12} устанавливается постоянной практически мгновенно, то система (7) с помощью преобразования Лапласа приводится к виду, более удобному для расчетов:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= P_1^н \left(A_1 e^{\alpha t} + B_1 e^{\beta t} + K_1\right) \\ P_2(t) &= P_2^н \left(A_2 e^{\alpha t} + B_2 e^{\beta t} + K_2\right), \end{aligned} \qquad (8)$$

где A_1, A_2, B_1, B_2, α, β, K_1, K_2 – постоянные коэффициенты, определяемые величинами $V_1, V_2, S_1, S_2, G_1, G_2, U_{12}$; $P_1^н$, $P_2^н$ – начальные давления в камерах.

Теоретический анализ выражения (8) показывает, что уменьшение величины U_{12} в значительной степени снижает величину колебания давления P_2. Поэтому в установках при форвакуумной откачке шлюзовой камеры, с целью уменьшения изменения давления в последующей камере после разгерметизации затвора рекомендуется встраивание между этими камерами затвора ограниченной проводимости.

Если U_{I2} является величиной переменной, что соответствует условиям постепенной разгерметизации затвора между двумя вакуумными камерами, то система уравнений (7) решается в общем виде методом последовательных приближений (например, методом Рунге-Кутта). Аналитическое исследование системы уравлений (7) при $U_{I2}=var$ показывает, что плавная разгерметизация затвора между форвакуумной и высоковакуумной камерами способствует уменьшению изменения более низкого давления (рис.4). Использование затвора ограниченной проводимости совместно с плавной его разгерметизацией дает еще больший эффект снижения влияния потока газа из шлюзовой камеры на давление в высоковакуумной камере.

При перемещении загрузочного объема или полости объемом V между пластинами со скоростью ϑ из одной камеры в другую через канал проводимостью U_{I2} происходит перенос порции воздуха в другую камеру (рис.5). Газовый баланс в этом случае может быть выражен следующей системой дифференциальных уравнений:

$$
\begin{aligned}
-V\frac{dP_1}{dt} &= S_1P_1 + U_{12}^{I}(P_1-p) - G_1 \\
v\frac{dp}{dt} &= U_{12}^{II}(p-P_2) - U_{12}^{I}(P_1-p) \\
-V\frac{dP_2}{dt} &= S_2P_2 - U_{12}^{II}(p-P_2) - G_2 ,
\end{aligned}
\tag{9}
$$

где U_{I2}^{I} является функцией $\ell_I=\vartheta t$, а U_{I2}^{II} - функцией $\ell_2=L-\ell-\vartheta t$. Учитывая режимы течения газа, начальные давления P_I^H и P_2^H, постоянные величины $V_1, V_2, v, G_1, G_2, S_1, S_2$ и задавая значения скорости ϑ, аналитическим путем определяется допустимый уровень изменения давления P_2.

Аналитические исследования системы уравнения (9) показывают, что задержка в перемещении загрузочной полости на выходе из канала в последующую камеру является эффективным средством уменьшения колебания давления в этой камере.

Результаты экспериментальных данных подтвердили наличие рациональных значений ℓ и Si для всех режимов течения воздуха и показали хорошее количественное совпадение.

Теоретические и экспериментальные данные показали, что с уменьшением давления в высоковакуумных (блокировочных) шлюзовых камерах и с увеличением длины каналов ℓ между этими камерами и рабочей практически устраняются колебания давления в рабочей камере и значительно снижается поток активных газов в рабочую камеру.

Этот поток обусловлен диффузией газов при разных уровнях их парциальных давлений в сообщающихся камерах. При этом было отмечено, что уменьшение проводимости каналов до области рациональных значений давало основной эффект по устранению колебания давления и уменьшению загрязнений, что объясняется небольшой откачкой рабочей камеры через каналы в высоковакуумные камеры и созданием значительного сопротивления встречному потоку активных газов.

При первоначальной откачке шлюзовых камер от атмосферного давления наблюдается нестационарное состояние газовых потоков с турбулентным режимом их течения. Этот процесс сопровождается отрывом с внутренней поверхности камер мелкодисперсных частиц (МДЧ) и переносом их к откачному патрубку. В результате на рабочей поверхности пластин осаждаются МДЧ, что значительно снижает выход годных СБИС.

Результаты многочисленных экспериментальных данных эксплуатации опытного образца установки ОИИ-7-015 позволили установить долевое участие в привносимых дефектах на изделия от работы механизмов (транспортных устройств, вводов движения в вакуум и т.д.) и процессов откачки и напуска воздуха в две шлюзовые камеры. Проведенные с помощью анализатора частиц "Surfscan -4500" исследования по количеству и размеру МДЧ на поверхности пластин на этапе транспортирования пластин через установку и на этапе откачки и напуска воздуха в шлюзовые камеры показали, что в первом случае средний результат был - 5,5 шт/см^2, а во втором -10,8 шт/см^2 с диаметром МДЧ $d_ч = 0{,}2 \div 2$ мкм.

Таким образом процессы откачки и напуска воздуха в шлюзовых камерах вносят около 70% привносимой дефектности на изделия.

В результате теоретического и экспериментального анализа физической сущности взаимодействия МДЧ с поверхностью и газовым потоком, условий отрыва и уноса частиц было предложено разделить процесс откачки воздуха на два режима. Первый-режим"жесткой" откачки определяется скоростью откачки S_1, обеспечивающей движение потока воздуха с отрывом и уносом МДЧ с поверхности шлюзовой камеры:

$$S_1 \geq \sqrt{\frac{f N_{AA} X_ч^{0,14} R \cdot T}{19{,}8 (\rho M)^{0,54} d_ч^{1,44}}} \left[\frac{4\pi R_r^2 + \pi^2 (x^2 + y^2)}{4} \right], \qquad (10)$$

где: f - коэффициент трения осевших мелкодисперсных частиц с поверхностью; N_{AA} - сила адгезионного взаимодействия мелкодисперсных частиц с поверхностью; $X_ч$ - расстояние от начала зоны контакта газового потока с поверхностью до того места, где находятся мелкодисперсные частицы;

R_o - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура газа; μ - молекулярная масса газа; ν - кинематическая вязкость газа; R_r - гидравлический радиус отверстия, через которое осуществляется откачка или напуск газа в камеру; X, Y - координаты наиболее удаленной точки поверхности камеры относительно центра отверстия откачного или напускного патрубка (рис.6).

Сразу по достижении давления, являющегося границей смены режимов течения воздуха с турбулентного на вязкостный, откачка прекращается, т.к. при дальнейшем уменьшении давления фактически вероятность отрыва и удаления МДЧ разреженным газом прекращается.

Второй - режим "мягкой" откачки определяется скоростью откачки S_2 обеспечивающей движение потока воздуха без отрыва МДЧ от поверхностей камеры и внутрикамерной оснастки:

$$S_2 = \sqrt{\frac{f\left(\frac{2\pi B}{H^3} + \frac{\rho_4 g \pi d^2}{6}\right) X_L^{0,14} R_o T}{19,8\, p \mu \nu^{0,54} d^{0,44}}} \left[\frac{4\pi R_r^2 + \pi^2 (X^2 + Y^2)}{4}\right] \qquad (II)$$

где B - константа молекулярного взаимодействия /константа Ван-дер-Ваальса/; H - зазор между осевшей МДЧ и поверхностью; ρ_4 - плотность МДЧ; g - ускорение свободного падения.

Режим "жесткой" откачки необходимо использовать для очистки внутрикамерных поверхностей от МДЧ. Очистка проводится с еще большей производительностью, если совместить во времени процесс напуска газа и процесс откачки со скоростью S_1. Рекомендуется давление в камере поддерживать на уровне не более $5{,}2 \cdot 10^4$ Па - это граничное давление, выше которого скорость натекания газа значительно уменьшается, становясь меньше скорости звука, что снижает вероятность отрыва частиц от поверхности. Режим "жесткой" откачки с напуском газа целесообразно повторять несколько раз в период запуска установки или ее профилактических работ. Эффективность очистки камер возрастает если одновременно с откачкой и напуском газа корпус камеры нагревают горячей водой до температуры 80-90°С, что значительно уменьшает адгезионные силы МДЧ к поверхности камеры, а также напускают газ с молекулярной массой превышающей массу воздуха, например, кислород, углекислый газ, аргон и др.

Режим "мягкой" откачки необходим при наличии в камере пластин с изделиями. В этом случае привносимая дефектность определяется в основном работой внутрикамерных механизмов.

При режиме "мягкой" откачки привносимая дефектность еще более уменьшается, если корпус камеры охлаждать холодной водой до температуры 10-15°С и использовать для напуска газа с молекулярной массой меньшей молекулярной массы воздуха, например: азот, гелий и др.

В результате использования данных теоретических исследований и разработанных рекомендаций удалось снизить привносимую дефектность на промышленных установках непрерывного действия ОНИ-7--015 до уровня 1-1,3 шт/см^2 при $d_ч > 0{,}28$ мкм т.е. в 10 раз. На основании теоретических и экспериментальных данных были разработаны методики расчета и рекомендации по конструированию многокамерных установок со ШС с учетом минимальной привносимой дефектности на пластинах.

Третий раздел посвящен теоретическим и экспериментальным исследованиям магнетронных распылительных систем для нанесения пленок в оборудовании непрерывного действия.

В отличии от известных методов расчета магнетронных распылительных устройств (МРУ), которые разработали ученые: Минайчев В.Е., Ковалев Л.К., Сырчин В.К., Данилин Б.С. и др., в основу разработки предлагаемой модели расчета МРУ положено условие получения заданной равномерности пленки по толщине при определенной траектории движения пластин с учетом эффективности использования материала мишени и минимизации размеров мишени. Использовались методы "фокусировки" потока распыленного материала на пластины и увеличения интенсивности распыления материала к периферийной части мишени.

1548 964

При нанесении пленки с помощью МРУ, как в любой системе распыления, одновременно существуют три основных процесса: распыление материала мишени, перенос частиц материала в газовой среде от мишени к пластине и конденсация (осаждение) частиц в виде тонкого слоя материала на поверхность пластины. На толщину пленки $h(x_i, \alpha_к)$ в текущей точке X_i на поверхности пластин за время нанесения $(t_2 - t_1)$ определяющее влияние оказывают три фактора: функция формы $f(y_i)$ распыляемой поверхности $F_м$ мишени, функция распределения плотности ионного тока $\psi(y_i)$ на мишени и закон перемещения центра пластины $X(x_i, t)$. Остальные факторы определяются постоянными параметрами и конкретными аналитическими выражениями. Теоретическая модель взаимосвязи между этими факторами и толщиной пленки была определена следующим выражением:

$$H(x_i \alpha_к) = K_1 \int_S \int_{t_1}^{t_2} \Psi\left[f(y_i), X(x_i, t) \frac{\partial f(y_i)}{\partial (y_i)}, x_i, y_i, \alpha_\beta\right] \psi(y_i) dF(y_i) dt \quad (12)$$

где: K_1 - размерный коэффициент; $H(x_i,\alpha_k) = \frac{h(x_i\alpha_k)}{h_{max}}$ - отношение толщины пленки к ее максимальной толщине в текущей точке; Ψ - оператор определяющий механизм переноса распыленных частиц.

Выражение (I2)относится к интегральным уравнениям применяемым для решения задач синтеза: по данному результату (следствие) определяются обеспечивающие его причины (условия) описывающиеся функциями $f(y_i)$, $\psi(y_i)$ и $\chi(x_i,t)$. Это выражение является базовой теоретической моделью нанесения заданной толщины пленки не только магнетронным распылением мишени, а может быть использовано для расчета большинства систем ионноплазменного распыления материалов в вакууме.

Уравнение (I2)значительно упрощается при решении задач частного порядка, т.к. в этом случае вводятся дополнительные условия определяющие конкретное значение функций $f(y_i)$, $\chi(x_i,t)$ и $\psi(y_i)$. В результате такого анализа были определены три типа систем нанесения пленок, описываемые соответствующими уравнениями:

- при заданных функциях $f(y_i)$ и $\chi(x_i,t)$ функция $\psi(y_i)$ определяется из линейного интегрального уравнения Фредгольма I рода $H(x_i,\alpha_k) = \int_S \Psi(x_i, y_i, \alpha_p)\,\psi(y_i)\,dF(y_i)$ (I3)

- при заданных функциях $\chi(x_i,t)$ и $\psi(y_i)$ функция $f(y_i)$ определяется из интегро-дифференциального уравнения:

$$H(x_i,\alpha_k) = \int_S \Psi_2\left(f(y_i), \frac{df(y_i)}{dy_i}, \chi_i, y_i, \alpha_k\right) dF(y_i) \qquad (I4)$$

- при заданных функциях $f(y_i)$ и $\psi(y_i)$ функция $\chi(x_i,t)$ определяется из интегрального уравнения Урысона

$$H(x_i,\alpha_k) = \int_{t_1}^{t_2} \Psi_3\left(\chi(x_i,t), x_i, t\right) dt \qquad (I5)$$

Определение параметров МРУ при непрерывном и прерывистом перемещении пластин в зоне обработки проводилось с использованием выражения (I4).

В случае с неподвижной пластиной рассматривается распыляемая поверхность $f(y_i)$ дисковой мишени (в том числе конической), которая определяется функцией $Z(R)$, плотность ионного тока $\psi(y_i)$ функцией $\psi(R)$, а распределение толщины пленки $H(x_i\alpha_k)$ функцией $H(r)$ (рис.7). В этом случае общая теоретическая модель (I4) принимает вид:

$$H(r,\alpha_k) = K \int_{R_0}^{R_1} \left[a - Z(R)\right] \frac{R\,\frac{dZ(R)}{dR}\left(\rho^2 - 2r^2\right) + \left[a - Z(R)\right]\rho^2}{\left(\rho^4 - 4R^2r^2\right)^{3/2}}\,\psi(R)\cdot R\cdot dR \qquad (I6)$$

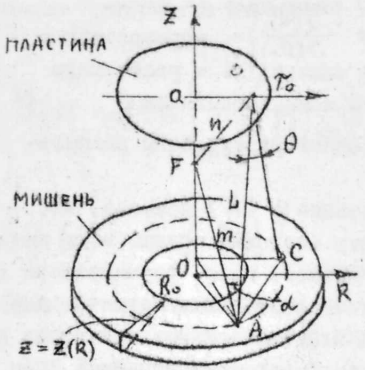


Рис.7. Расчетная схема нанесения пленки на неподвижную пластину.

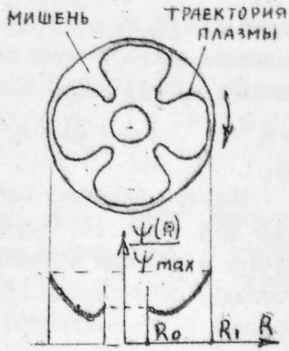


Рис.8. Распределение ионного тока на мишени при вращении магнитного блока.

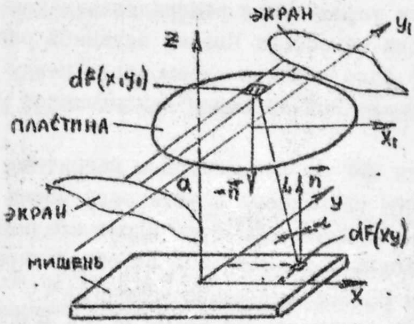


Рис.9. Расчетная схема нанесения пленки на линейно перемещающуюся пластину.



Рис.10. МРУ с мишенью расположенной в углублении катода.

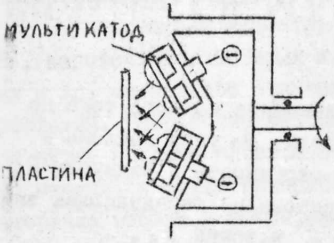


Рис.11. Схема мультикатодного МРУ.

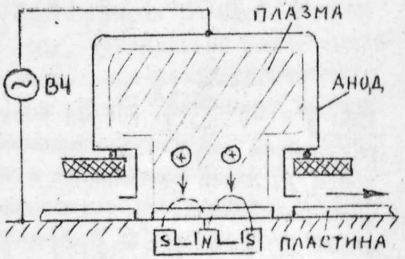


Рис.12. Схема ВЧ МРУ для очистки заземленной пластины.

где: $\alpha_к \in [R_0, R_1, a, c]$, c-const, $\psi(R) = \frac{J(R)}{J(R_0)}$ – нормированное отношение ионного тока по поверхности мишени; a – расстояние мишень-подложка; R_1 – внешний радиус зоны распыления; $\rho^2 = R^2 + r^2 + [a - z(R)]^2$; R_0 – внутренний радиус зоны распыления.

Анализ возможных вариантов реализации $\psi(R)$ показал, что в МРУ для обработки неподвижных пластин возможно практически выполнить с помощью перемещающегося магнитного поля, формируемого с помощью механически вращающегося блока постоянных магнитов или системой электромагнитов. Вращающийся блок постоянных магнитов содержит полюсные наконечники специальной неосесимметричной конфигурации (рис.8). При вращении распыляется только та поверхность мишени, над которой находится локализованная в магнитной ловушке плазма газового разряда, при этом использование материала мишени возрастет в несколько раз. За время, кратное нескольким оборотам, на поверхности мишени формируется усредненное распределение ионного тока $\psi(R)$. Таким образом для нанесения пленки заданной равномерности по толщине необходимо было выявить взаимосвязь между функцией $\psi(R)$ и геометрией вращающихся полюсных наконечников неосесимметричной формы.

Предварительные исследования МРУ со стационарным магнитным блоком установили, что ширина зоны распыления практически равна расстоянию между полюсными наконечниками, при этом вдоль средней линии межполюсного зазора на небольшой ширине (25% от общей ширины зоны распыления) распыляется 80-90% материала мишени.

Было получено выражение (17), определяющее форму $\psi(R, \gamma, C)$ средней линии между полюсными наконечниками:

$$\psi(R, \gamma, C) = \pm \int \sqrt{\left\{1 + \left[\frac{dz(R)}{dR}\right]^2\right\} \left[\gamma \psi^2(R) - R^{-2}\right]^{-1}} \cdot dR + C_0 \qquad (17)$$

где: $\gamma = \left(2\pi \frac{\nu}{J_0}\right)^2$; $J_0 = J(R_0)$ – значение ионного тока на внутреннем радиусе распыляемой поверхности, γ – угол наклона в точке X_0 линии распыления к внутренней окружности с радиусом R_0 зоны распыления. C – постоянная интегрирования определяющая значение функций $\psi(R, \gamma, C)$ и $y(x, \gamma, C)$ в точке X_0.

При непрерывном и равномерном движении пластин через зону обработки количество материала dm, осаждаемого на нее в условном элементе ее поверхности $dF = dx\,dy$, определяется как сумма количеств материала осаждаемая в каждой точке траектории перемещения этого

элемента (рис.9), а выражение (I4) принимает вид:

$$H(x_i,\alpha_i)=K\int_{f_1(x_i)}^{f_2(x_i)}\int_{s}\frac{a^2}{\left[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+a^2\right]^2}\,\psi(x,y)\cdot dF(x,y)dy, \quad (18)$$

где: $f_1(x_i)$ и $f_2(x_i)$ - функции, описывающие форму выступов экранов, F - площадь распыляемой поверхности, α - расстояние между плоскостями мишени и подложки; y - координаты средней линии зоны распыления определяемой из функции:

$$y(x,\gamma,c)=\pm\int\sqrt{\gamma\cdot\psi(x,\alpha_i)-1}\cdot dx+c \quad (19)$$

где: $\gamma=\frac{\psi(o,\alpha_i)}{\psi_{max}\cdot y_o}$; c - постоянная интегрирования.

Коэффициент эффективности использования материала мишени $K_{исп}$ определялся из формулы:

$$K_{исп}=K_{исп}^{пог}\cdot K_{исп}^{м}=\left(\frac{1}{K_3^{\Delta}}+\frac{F_{\Delta}h^{ср}}{F_{\phi}h^{\Delta}\cdot n}\right)^{-1}\cdot\frac{M_{расс}}{M_{расс}+M_{ост}+M_{тр}},$$

где: $K_{исп}^{м}$ - коэффициент использования материала мишени, $K_3^{\Delta}=\frac{F_{\phi}n}{F_{\Delta}}$; F_{Δ} и F_{ϕ} - площади зон равномерного и неравномерного осаждения пленки, соответственно; F_{ϕ} - площадь пластины; $h^{ср}$ и h^{Δ} - толщина пленки в зонах неравномерного и равномерного осаждения пленки, соответственно; n - количество пластин; $M_{расс}$ и $M_{тр}$ - материал распыленный при нанесении пленок и тренировке мишени, соответственно; $M_{ост}$ - остаток нераспыленного материала мишени.

С увеличением диаметра пластин увеличиваются размеры мишеней МРУ, изготовление которых из особо чистых, тугоплавких редкоземельных и др. материалов становится сложной технико-металлургической проблемой. Разработка метода фокусировки потока распыления материала путем наклона плоскости мишени к поверхности пластины и вращение мишени, а также принципа увеличения интенсивности распыления материала мишени и ее периферийной части позволил наносить пленки равномерной толщины ($\Delta=\pm$ 2-3%) из мишеней диаметром равным и и даже меньшим диаметра пластин ($d_м$ =I00-200 мм). $K_{исп}^{пог}$ увеличился от 0,3 до 0,8, а $K_{исп}^{м}$ с 0,3 до 0,5.

Исследование неравномерности пленок по толщине и адекватности разработанных математических моделей проводилось с использованием макетов МРУ, а также с помощью моделирования на ЭВМ процессов нанесения пленок заданной равномерности. Измерение толщины пленок проводилось измерительной системой ALFASTEP -250 с погрешностью ± 100 Å в области толщин 0,1-2,0 мкм. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных данных составляло не более 9%. На основании полученных теоретических и экспериментальных данных была разработана методика расчета и рекомендаций по проектированию МРУ.

В четвертом разделе приводятся результаты исследования по повышению производительности, ресурса и расширению технологических возможностей магнетронных распылительных устройств.

Технологическая производительность $Q_{тех}$ МРУ пропорциональна скорости распыления источника (мишени) $\vartheta_{ист}$ и $K_{исп}^{пот}$. Увеличение $\vartheta_{ист}$ за счет подачи большей мощности в разряд ограничивается теплоотводом нагреваемой в процессе распыления мишени. Исследования по увеличению эффективности и надежности теплоотвода проводились с использованием теплопроводящей пасты КПТ и жидкого металлического магнитного сплава с температурой плавления 10,7°С (состав: галлий 62,5%, олово 16%, индий 21,5% и порошок окиси железа с $d_ч \approx$ 1 мкм). В результате улучшения контакта мишени с охлаждаемой поверхностью катода МРУ было достигнуто увеличение $\vartheta_{ист}$ (мишени из Ti) с пастой в 1,8 раза, с сплавом в 1,9 раза, при этом магнитный сплав надежно удерживался на поверхности катода в вертикальной плоскости и повышал равномерность распыления мишени. Саморегулирование охлаждения мишени было достигнуто путем использования эффекта "термозажима" материала мишени в углублении охлаждаемого катода (рис.10). Это углубление выполнялось в зоне максимального распыления мишени, что увеличивало ресурс ее эксплуатации до 60ч непрерывного распыления при мощности 6 кВт. За счет эффективного охлаждения мишени снизился нагрев пластин с 260°С до 185°С. Дальнейшее снижение нагрева пластин до 115°С было достигнуто путем устранения электронной бомбардировки пластин из плазмы разряда МРУ. Для этого были разработаны и исследованы два метода: экранирование полюсных наконечников магнитной системы МРУ анодами и созданием дополнительного магнитного поля встречного магнитному полю МРУ. Экспериментально было доказано, что это на 98% устраняет нарушение тонких слоев структур СБИС.

Исследования принципиально нового мультикатодного МРУ с несколькими электроизолированными катодами с мишенями наклоненными к плоскости пластины и вращающиеся вокруг ее показали, что увеличение угла наклона мишеней до 40^0 увеличивает $K_{исп}^{пот}$ с 30% до 77% (рис.II). Устройство обеспечивает заполнение ступенчатого рельефа СБИС до 0,5-0,6 и скорость нанесения пленки Cu до 190 A^0/c, что увеличивает выход годных СБИС до 98%. Устройство позволяет наносить двух и трехкомпонентные пленки с регулированием состава, а также остродефицитные и особочистые материалы на пластины диаметром 100-200 мм из небольшой мишени диаметром 100 мм. На базе данного устройства был разработан ряд других МРУ.

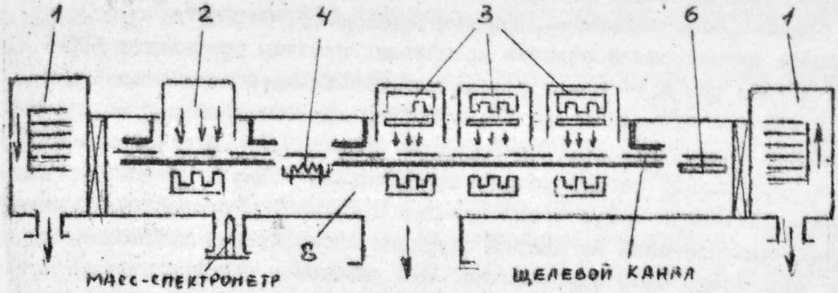
Для распыления магнитных материалов в МРУ впервые был предложен и исследован метод распыления намагниченных и гофрированных мишеней с сохранением температуры мишени ниже температуры Кюри материала мишени.

Выход годных СБИС на операции нанесения пленок значительно зависит от адгезионных и контактных свойств пленок с электродами микросхем, что в первую очередь определяется отсутствием окислов и загрязнений на поверхности пластин в зоне контакта. В результате изучения физических процессов в МРУ с высокочастотным (ВЧ) питанием применительно для очистки пластин путем ионного распыления их поверхности впервые удалось распылять заземленные, т.е. расположенные на не электроизолированных от корпуса установки транспортных механизмах пластин. Теоретически было обосновано наличие отрицательного смещения на заземленной пластине при наличии развитого электроизолированного анода вокруг пластины (рис.12). Исследованные ВЧ МРУ для очистки неподвижных и непрерывно перемещающихся пластин обеспечивали скорость распыления до 500 A^0/мин слоя SiO_2 при мощности разряда 0,8 кВт и ускоряющем напряжении менее 600 В, что полностью отвечало требованиям технологии СБИС.

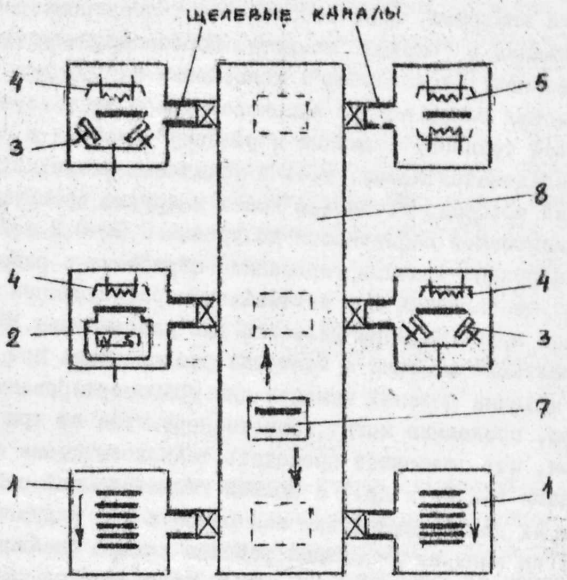
Раздел пятый посвящен разработке и внедрению в серийное производство высокопроизводительного вакуумного оборудования непрерывного действия с микропроцессорными системами управления. Расчет и выбор параметров вакуумных установок, их основных технологических и других узлов проводился по результатам теоретических и экспериментальных исследований, с учетом разработанных методик расчета ШС и МРУ, рекомендаций по уменьшению привносимой дефектности и повышению надежности в работе.

В конце 70-х годов для производства СБИС 16К-64К была разработана первая установка непрерывного действия ОНИ-7-005 "Магна". Непрерывная загрузка и выгрузка пластин Ø 76 и 100 мм обеспечивалась ШЗУ поштучно с использованием силы тяжести пластин на непрерывно движущийся через четыре рабочих позиции ленточным транспортером. Для нанесения пленок использовалось МРУ с четырехсекционной зоной распыления мощностью 15 кВт.

Для производства СБИС 64К-256К в период с 1981-88 г.г. были разработаны четыре установки непрерывного действия: ОНИ-7-015 ("Магна 2М"), "Электроника ТМ-1201", "Электроника ТМ-1202" и "Электроника ТМ-1204". Последние три модели установок были снабжены безмасляными средствами откачки (крионасосы), масс-спектрометрами анализа состава газовой среды, панелями для встраивания в "чистые" комнаты технологических производств микросхем (рис.13а). Все эти четыре установки выполнены с использованием однотипной и надежной в работе транспортно-загрузочной системы, имеют линейное структурно-компоновочное расположение рабочих и шлюзовых камер с "жестким" циклом транспортирования и обработки в рабочих позициях. Установки объединены общими принципами: - непрерывное транспортирование пластин обеспечивается одним конвейером через четыре рабочих позиции (магнетронная ионная очистка, предварительный нагрев, магнетронное нанесение пленок, отжиг (в установке "Электроника ТМ-1202"), охлаждение пластин); - разделение рабочих камер с различным давлением обеспечивается щелевыми каналами (открытая ШС) расположенными между общим вакуумным объемом транспортной камеры с давлением в 100 раз меньшим, чем давление в рабочих камерах магнетронной ионной очистки и нанесения пленок; - для загрузки-выгрузки пластин используются две шлюзовые камеры (закрытая ШС) и магазинная (кассетная) загрузка пластин; - для повышения производительности процесса нанесения пленок использован принцип дифференциации этой рабочей операции с размещением в рабочей камере последовательно нескольких МРУ; - загрузка пластин осуществляется после включения и выхода на заданный рабочий режим всех технологических узлов обработки; - для ограничения попаданиям на пластины МДЧ шлюзовые камеры снабжены средствами "мягкой" откачки воздуха, а механизмы, привода и конвейер транспортной системы расположены ниже уровня перемещения пластин и экранированы; - для управления механизмами, контроля технологических параметров и диагностики отказов используется микропроцессорная система управления (МПСУ) на базе ЭВМ;



а)



б)

Рис.I3. Принципиальные схемы транспортно-загрузочных систем установок ОПИ-7-015,"Электроника ТМ-I20I", "Электроника ТМ-I202 (а)" и установки "Электроника ТМ-I203(б)". I - ШЗУ; 2 - ВЧ очистка; 3 - МРУ; 4 - нагрев; 5 - отжиг; 6 - охлаждение; 7 - каретка; 8 - транспортная камера.

Установки обеспечивают нанесение пленок Al, Al+Si, Al+Si+Cu, Ti, Pt и др. материалов на пластины Ø 75, 100, 150 мм с производительностью не менее 100 пл/ч из мишеней с запасом материала более 60ч при скорости нанесения, например, пленок Al 70-120А°/с с Δ=2-5%. Скорость магнетронной очистки кремниевых пластин составляет 100--500 А°/мин при Δ =± 8%. В результате стабильного поддержания давления и состава газовой среды и скорости распыления мишеней воспроизводимость толщины и электрофизических свойств пленок в течении 16 часов непрерывной работы установок составили ± 3%, а уровень привносимой дефектности 1-1,3 ч/см^2 при $d_ч > 0,28$ мкм, что обеспечило выход годных межсоединений на данной операции металлизации микросхем более 95%. Всего было изготовлено 280 установок данного типа.

В начале 90-х годов была разработана принципиально новая модель установки непрерывного действия "Электроника ТМ-1203" для металлизации более сложных СБИС 1-16М (рис.13б). Установка также была оснащена двумя шлюзовыми камерами, крионасосами, масс-спектрометрами, панелями для встраивания в "чистые" комнаты. Особенностью установки является: разветвленная ("кластерная") компоновка однотипных (модульных) рабочих и шлюзовых камер вокруг высоковакуумной транспортной камеры, что обеспечивает транспортирование и "раздачу" пластин в рабочие камеры в любой последовательности, т.е. в установке реализуется гибкий технологический процесс. Установка имеет и другие преимущества: -для уменьшения привносимой дефектности до уровня 0,08-0,2 шт/см^2 при $d_ч > 0,1$ мкм загрузка, транспортирование, обработка в рабочих камерах и выгрузка осуществляется при вертикальном расположении пластин, а шлюзовые камеры кроме наличия фильтров для улавливания МДЧ, снабжены средствами "жесткой" откачки и контроля расхода газа при "мягкой" откачке; - при наличии щелевых каналов для транспортирования пластин в рабочие камеры, последние могут герметизироваться от транспортной камеры затворами, что позволяет проводить технологические процессы с активными газами (N_2, O_2 и др.) с полной герметизацией рабочих камер, или вскрывать их для профилактики или ремонта без нарушения рабочего вакуума в других камерах; - каждая рабочая камера снабжена индивидуальной МПСУ, работу которых объединяет и координирует общая МПСУ установки на базе компьютера IBM PC ; - однотипность конструкций рабочих камер, индивидуальность их систем управления, возможность наращивания или сокращения длины транспортной камеры дают возможность собирать на одном транспортно-загрузочном конструктиве установки с различным количеством рабочих камер (от 2-х до 6-ти), что значительно расширяет технологические возможности выбранного структурно-компоновочного построения оборудования.

Рабочие камеры установки снабжены ВЧ магнетронным устройством очистки и мультикатодным МРУ для металлизации пластин Ø 100, 150 и 200 мм. В процессе металлизации предусмотрено поддержание и регулирование температуры нагрева пластин и подача на них отрицательного или ВЧ смещения.

Для освоения технологических устройств многослойной металлизации СБИС частного применения на пластинах GaAs и нанесения магнитных пленок были разработаны две модели установок непрерывного действия с групповой обработкой "Оратория-22" и "Электроника ТМ-1205". Установки снабжены безмасляными средствами откачки, ШС закрытого типа, обеспечивают одновременное осуществление 3-5 рабочих операций в том числе обработку пластин в вертикальной плоскости и управляются от МПСУ. Установки снабжены принципиально новой системой транспортирования пластин, выполненной в виде периодически вращающейся плиты с размещенными на ее двух плоскостях групповыми держателями пластин. Плита одновременно является затвором герметично разделяющим рабочую и шлюзовую камеру, что значительно упрощает конструкцию установок и повышает надежность их в работе. Было изготовлено 8 установок данного типа.

В период с 1977 по 1994 г.г. было разработано более 9 модификаций промышленных установок непрерывного действия с общим выпуском около 300 шт., что позволило практически обеспечить электронную промышленность отечественным вакуумным оборудованием для производства БИС и СБИС на операции металлизации. Разработанное оборудование серийно выпускается на Калининградском машиностроительном заводе "Кварц" и опытном заводе "Элион" г. Зеленограда. Экономический эффект от внедрения оборудования за период 1980-1994 г.г. составил более 60,0 млн.руб. (в ценах 1991г.).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Постоянное изменение состава газов вакуумной среды рабочих камер при загрузке и выгрузке изделий является основной причиной непригодности вакуумного оборудования периодического действия для промышленного выпуска сверхбольших интегральных микросхем (СБИС). Необходим принципиально новый подход к проектированию вакуумного технологического оборудования.

2. Научные принципы создания вакуумного оборудования для производства СБИС предусматривают построение установок непрерывного действия с новой нетрадиционной структурой и компоновкой, с другими принципиально новыми методами загрузки и транспортирование пластин, с изменением схемных решений технологических устройств обработки изделий и режимов их работы.

Эти принципы заключаются в следующем:

- постоянное поддержание стабильного давления и состава газовой среды в рабочих камерах и технологических устройств обработки пластин в рабочем режиме;

- осуществление непрерывного технологического процесса обработки изделий путем совмещения синхронной загрузки, непрерывного транспортирования, одновременной многопозиционной обработки и выгрузки пластин;

- создание многокамерной структуры установок с вакуумной изоляцией рабочих камер между собой на основе шлюзовых систем;

- нанесение пленок сфокусированным потоком распыленного материала на базе магнетронного разряда применительно к индивидуальному и непрерывному транспортированию пластин.

3. Разработанная теория расчета газовых потоков в многоступенчатых шлюзовых системах закрытого и открытого типов при стационарном и нестационарном режимах течения газа и полученные формулы позволяют рассчитывать конструктивные размеры межкамерных каналов шлюзовых систем, выбирать скорости разгерметизации затворов шлюзовых камер и транспортирования пластин, режимы откачки ШЗУ с достижением стабильного рабочего давления и состава газовой среды, минимальной привносимой дефектности на пластинах.

4. Для расчета конструктивных размеров и конфигураций магнитных систем, наклона мишеней к пластинам для фокусирования распыленного материала на пластины и создания магнетронных распылительных устройств (МРУ), обеспечивающих нанесение пленок сложного состава на непрерывно перемещающиеся и неподвижные пластины с неравномерностью по толщине $\Delta = \pm 2\text{-}5\%$ разработана теория расчета МРУ и получены соответствующие формулы.

5. Экспериментальные исследования по повышению производительности, ресурса мишеней и расширению технологических возможностей МРУ показали следующие результаты:

- для увеличения скорости нанесения пленок необходимо подача большей мощности в разряд одновременно с улучшением охлаждения мишеней. Теплопроводная паста КПТ увеличивает скорость нанесения пленок, например, титана в 1,3 раза, а жидкий металлический магнитный сплав - в 1,9 раза;

- для увеличения запаса материала мишеней необходимо выполнить мишени с утолщением в зоне максимального ее распыления, а полученный выступ разместить в углублении катода, что повысит одновременно надежность работы МРУ за счет "термозажима" мишени при ее разогреве;

- для нанесения двух, трехкомпонентных пленок с регулированием состава, остродефицитных и особочистых материалов необходимо применять мультикатодное МРУ с диаметром мишеней 100 мм. Устройство обеспечивает скорость нанесения пленок Cu до 190 А°/с, $K_{исп}^{пог}$ = =0,77 и заполнение пленкой рельефа микросхем до 0,5-0,6;

- для уменьшения нагрева изделий до Т=115°С и устранения нарушения структур микросхем необходимо экранирование полюсных наконечников МРУ анодами и создание дополнительных магнитных полей встречных по направлению основным полям МРУ;

- для нанесения магнитных пленок необходимо мишени намагничивать или выполнять гофрированными.

6. Для обеспечения высокой скорости очистки до 500А°/мин при энергии ионов не более 600 эВ можно рекомендовать высокочастотное магнетронное устройство очистки заземленных пластин - перспективное технологическое устройство, которое упрощает конструкцию и повышает надежность средств внутрикамерного транспортирования пластин.

7. Цикловая производительность созданных вакуумных установок (по изделиям-микросхемам) увеличилась в десять раз за счет полного совмещения во времени основной (нанесение пленки), дополнительных рабочих и холостых операций загрузки, транспортирования и выгрузки пластин, а также путем дифференцирования наиболее длительной основной рабочей операции по трем позициям:

- достигнуто увеличение технологической производительности магнетронных систем нанесения пленок почти в три раза за счет повышения $K_{исп}^{пог}$, $K_з^{\Delta}$, скорости распыления материала мишени и использования пластин большого диаметра (100, 150 мм).

- достигнут выход годных изделий с пластин на операции металлизации на установке "Электроника ТМ-1201" более 95%, за счет стабильности давления, состава газовой среды, исключения нарушения структур и уменьшения привносимой дефектности до1-1,3 ч/см^2 при $d_ч > 0,28$ мкм;

- надежность работы установок ОНИ-7-015, "Электроника ТМ--1201" и "Электроника ТМ-1202" составила $\eta_{ср}$=0,94, за счет применения метода базового конструирования, а именно использование для этих установок отработанных транспортно-шлюзовых систем.

8. Разработано три базовые конструкции транспортно-шлюзовых систем и создано 9 модификаций установок непрерывного действия для производства СБИС. Серийно выпускаются на Калининградском (обл.) машиностроительном заводе "Кварц" установки ОНИ-7-015 и "Электроника ТМ-1201, а также на заводе "Элион"г.Зеленограда партии установок Сратория-22", "Электроника ТМ-1202, ТМ-1203, ТМ-1204".

Несколько партий установок поставлено в зарубежные страны. Всего выпущено около 300 установок. Средний реальный экономический эффект за период 1980-1994 г.г. от внедрения оборудования составляет более 60,0 млн.руб. (в ценах 1991г.).

По теме диссертации опубликованы следующие основные работы:

1. Одиноков В.В. Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании. -М.: Высшая школа, 1981. - 55 с.

2. Одиноков В.В. Многокамерное оборудование для металлизации СБИС в вакууме. // Электронная промышленность.-1991.Вып.5.-С.3-4.

3. Одиноков В.В.,Минайчев В.Е. Разработка оборудования для формирования пленочных структур в производстве перспективных СБИС. //Разработка и исследование технологического оборудования микроэлектроники: Сб.науч.трудов. -М.: МИЭТ, 1991. - С.5-15.

4. Оборудование полунепрерывного и непрерывного действия для вакуумного нанесения тонкопленочных элементов интегральных схем /Б.С.Данилин,В.В.Одиноков,В.А.Пупко и др.// Зарубежная электронная техника: Науч.-техн.сб./ ЦНИИЭ. - М., 1975. Вып.2. -С.35-55, вып.8. - 52 с.

5. Многокамерная установка непрерывного действия "Электроника ТМ-1203" для нанесения пленок в вакууме / Е.В.Дмитриев, П.В.Махрин, В.В.Одиноков и др.// Электронная промышленность. - 1992. Вып.6. - С.33-34.

6. Климанов С.А., Одиноков В.В., Панфилов Ю.В. Выбор структурно-компоновочных вариантов оборудования для нанесения пленок в вакууме по критерию "цикловой производительности"// Электронная техника: Научн.-техн.сб./ ЦНИИЭ, - М, 1991. -С.64-71.-(Сер.ТОПО; Вып.5).

7. Климанов С.А., Одиноков В.В., Оболонский Л.В. Выбор принципиальной конструктивной схемы шлюзового загрузочного устройства вакуумного оборудования по критерию "надежность"// Электронная техника: Научн.-техн.сб./ЦНИИЭ. -М.,1989.-С.35-39. -(Сер.Микроэлектроника ; Вып.5).

8. Вакуумная установка непрерывного действия для нанесения пленок магнетронным распылением /Ю.Я.Малехин, В.Е.Минайчев, В.В. Одиноков и др.// Электронная промышленность. - 1985. Вып.2.-С.51--52.

9. Минайчев В.Е., Одиноков В.В., Михневич В.А. Установка непрерывного действия для нанесения тонкопленочных элементов ИС// Электронная промышленность, - 1976. Вып.9. - С.71-73.

10. Корсаков В.А., Минайчев В.Е., Одиноков В.В. Вакуумная установка непрерывного действия с магнетронной системой распыления //Электронная промышленность , - 1981. Вып.9. - С.44-45.

11. Мелехин Ю.Я., Минайчев В.Е., Одиноков В.В. Развитие вакуумного оборудования для нанесения пленочных структур ИС // Электронная техника: Научн.-техн.сб./ЦНИИЭ.-М.,1987.-С.151-161. -(Сер. Микроэлектроника; Вып.4).

12. Беденко В.В., Беляков А.И., Одиноков В.В. Вакуумная установка со шлюзовой загрузкой и криогенной откачкой //Электронная промышленность. - 1991. Вып.5. - С.5-6.

13. Данилин Б.С., Минайчев В.Е., Одиноков В.В. Исследование газовой среды при нанесении пленок в установке со шлюзовыми системами // Электронная техника: Научн.-техн.сб./ЦНИИЭ.-М.,1976.-С.83-89.- (Сер.Микроэлектроника; Вып.3).

14. Климанов С.А., Мотузенко В.П., Одиноков В.В. Анализ надежности установок вакуумного нанесения тонких пленок // Электронная техника: Науч.-техн.сб./ЦНИИЭ. -М, 1991. - С.72-77.-(Сер.ТОПО;Вып.5).

15. Минайчев В.Е., Одиноков В.В., Савин В.В. Вакуумные шлюзовые загрузочные устройства // Приборы и техника эксперимента. - 1976. -Т.2, - С.215-217.

16. Минайчев В.Е., Одиноков В.В., Тюфаева Г.П. Магнетронные распылительные устройства (магратроны)// Электронная техника: Науч.--техн.сб./ЦНИИЭ. - М., 1979. - 56с.-(Сер.ТОПО; Вып.8).

17. Минайчев В.Е., Одиноков В.В., Спиваков Д.Д. Магнетронное распыление магнитных материалов // Электронная техника:Науч.-техн. сб./ЦНИИЭ. - М., 1985. - 32 с. -(Сер. ТОПО; Вып.14).

18. Ивахненко В.Н., Климович Б.В., Одиноков В.В. Формирование заданного распределения толщины тонкопленочных покрытий при магнетронном распылении материалов/ ЦНИИЭ.-М.-1988. - 5с.- Деп.в ВИНИТИ, № 4620-Р.

19. Минайчев В.Е., Одиноков В.В., Терехов А.А. Магнетронное распылительное устройство с подвижной магнитной системой // Электронная техника: Науч.-техн.сб./ЦНИИЭ.-М.,1984.-С.40-41.-(Сер.ТОПО; Вып.4).

20. Ивахненко В.Н., Климович Б.В., Одиноков В.В. Нанесение равномерных пленок на неподвижные подложки магнетронным распылительным устройством /ЦНИИЭ.-М.,1988.-6с. -Деп.в ВИНИТИ, № 4621-Р.

21. Одиноков В.В., Наталочка С.В., Шанов Н.А. Магнетронная распылительная система с вращающимися катодными узлами // Электронная техника: Науч.-техн.сб./ЦНИИЭ.-М.,1991.-С.3-5.-(Сер.ТОПО ; Вып.5).

22. Наталочка С.В., Одиноков В.В. Магнетронная распылительная система для индивидуальной обработки пластин с плоской мишенью и вращающимся блоком//Электронная промышленность.-1990.Вып.11.-С.3-4.

23. Какурин М.В., Минайчев В.Е., Одиноков В.В. О нагреве подложек в планарных магнетронных распылительных устройствах // Электронная техника:Науч.-техн.сб./ЦНИИЭ.-М.,1980.-С.105-106. - (Сер. Микроэлектроника; Вып.6).

24. Одиноков В.В., Сырчин В.К., Чепахин В.Г. Разработка магнетронных распылительных устройств с эффективным использованием материала мишени // Микроэлектроника-94: Тез.докл.Российской конференции. -Звенигород. 1994. - ч.2. - С.301-302.

25. Одиноков В.В., Панфилов Ю.В., Соколов Д.Б. Устройство контроля и анализа потоков мелкодисперсных частиц на поверхности внутри вакуумной камеры // Датчики и преобразователи информации систем измерения контроля и управления: Тез.докл.Всесоюзной научно-технической конференции. - Гурзуф. 1994. - ч.1. - С.232-233.

26. Панфилов Ю.В., Гусаров В.В., Одиноков В.В. Уменьшение привносимой дефектности в вакуумном технологическом оборудовании // Чистота и микроклимат-88: Тез.докл.Второй научно-технической конференции. - М.,1988. - С.99-101.

27. А.с. 788831 СССР, МКИ[3] С23С 13/08. Установка для нанесения покрытий в вакууме / В.Е.Минайчев, В.В.Одиноков, В.В.Савин и др. (СССР).- № 2420065/18-21; Заявл.15.11.76;

28. А.с. 1121319 СССР, МКИ[3] С23С 13/08. Устройство для нанесения покрытий в вакууме / Н.С.Балакин, В.В.Одиноков, А.И.Беляков и др.(СССР). - № 3614097/24-21; Заявл.01.07.83; Опубл.30.10.84, Бюл. № 40. - 3 с.

29. А.с. 1566567 СССР, МКИ[3] С23С 14/32. Устройство для ионной обработки подложек /В.В.Одиноков, С.В.Наталочка, В.П.Гуськов и др. (СССР).-№4330148/24-21; Заявл.19.10.87;

30. А.с. 1609190 СССР, МКИ[3] С23С 14/35. Катодный узел магнетронного распылительного устройства / С.В.Наталочка, В.В.Одиноков (СССР).- № 4680036/24-21; Заявл.14.04.89;

31. А.с. 1383843 СССР, МКИ[3] С23С 14/34. Устройство для нанесения покрытий в вакууме / А.А.Терехов, В.В.Одиноков (СССР). - № 3878321/24-21; Заявл.01.04.85;

32. А.с. 1292382 СССР, МКИ[3] С23С 14/34. Устройство для нанесения покрытий в вакууме ионно-плазменным распылением/В.В.Одиноков, С.В.Наталочка, В.Е.Минайчев (СССР).- № 3803990/24-21; Заявл. 24.10.84;

33. А.с. 1141787 СССР, МКИ[3] С23С 14/24. Способ нанесения ферромагнитных материалов в вакууме/ Н.С.Балакин, С.В.Наталочка, В.В.Одиноков (СССР).- № 3471150/24-21; Заявл.20.07.82;

Заказ 3. Тираж 100 экз. Отпечатано в типографии АО "НИИТМ".