

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ

Том 3

*П.С. Кузнецов Е.Н. Ивашов
В.А. Васин А.М. Баранов*



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

КУЗНЕЦОВ Павел Сергеевич, к.т.н.
Начальник сектора ОАО «ГосНИИП»

ИВАШОВ Евгений Николаевич, д.т.н., профессор.
Профессор кафедры «Электроника и наноэлектроника»
НИУ ВШЭ

ВАСИН Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент.
Доцент кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» «МАТИ» – Российского государственного технологического университета имени К.Э. Циолковского

БАРАНОВ Александр Михайлович, д.т.н., доцент.
Профессор кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» «МАТИ» – Российского государственного технологического университета имени К.Э. Циолковского

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Том 3

П.С. КУЗНЕЦОВ Е.Н. ИВАШОВ
В.А. ВАСИН А.М. БАРАНОВ

ISBN 978-5-905872-21-1



ИЗДАТЕЛЬСТВО НИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .
2014

УДК 621.01/.03 + 621.315 + 621.37/.39

ББК 34.44

И 1

Рецензенты: **Глазунов В.А.**, доктор технических наук и доктор философских наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН,

Шалумов А.С., доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «CALS-технологии»

И 1 Информационные технологии проектирования в микро- и наноинженерии: Учебное пособие. В 3^{-х} томах. Том 3. **П.С. Кузнецов, Е.Н. Ивашов, В.А. Васин, А.М. Баранов** – Ивантеевка М.о.: Издательство НИИ предельных технологий, 2014. – 234 с.

ISBN 978-5-905872-21-1

Рассмотрены некоторые вопросы информационных технологий проектирования в микро- и наноинженерии, в частности, создание устройств прецизионных перемещений на основе эффекта магнитострикции, устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, методы оптимизации технологического процесса выращивания монокристаллического кремния, особенности автоматизированного проектирования накопителей на жестких магнитных дисках.

Учебное пособие рекомендовано студентам бакалавриата и магистратуры, обучающимся по направлениям 210100 – «Электроника и нанoeлектроника», 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 211000 – «Конструирование и технология электронных средств».

ISBN 978-5-905872-21-1 УДК 621.01/.03 + 621.315 + 621.37/.39

© **В.А. Васин, Е.Н. Ивашов,**

П.С. Кузнецов, 2014

© Издательство НИИ предельных технологий, 2014

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ:

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Том 3

КУЗНЕЦОВ Павел Сергеевич

ИВАШОВ Евгений Николаевич

ВАСИН Владимир Анатольевич

БАРАНОВ Александр Михайлович

Редактор **И. С. Кравчук**

Технический редактор **П. С. Костомаров**

Рисунок на обложке выполнен художником **Н.Г. Фатьяновой**

Подписано в печать 05.03.2014. Формат 60х84/16.

Бумага типографская. Печать – ризография.

Усл. печ. л. 12,4. Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 300 экз.

Заказ 5 Изд. № 6

Издательство НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.

Отпечатано в НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.

ВВЕДЕНИЕ

Особенности электронного производства, в основе которого лежит использование физико-химических свойств вещества и процессов, протекающих на молекулярном и атомарном уровне, необходимость проведения большинства процессов в условиях высокого и сверхвысокого вакуума с контролируемыми уровнем привносимых загрязнений и составом остаточной газовой среды, требуют особого подхода к процессу конструирования объектов современного электронного машиностроения, для создания которых непригодны традиционные принципы конструирования, принятые в общем машиностроении.

В большинстве случаев высокие технологии, используемые в электронном производстве, основываются на осуществлении сложных комплексных процессов, выполняемых последовательно в едином технологическом цикле на автоматических линиях и установках кластерного типа. В них предусматривается межоперационная транспортировка изделий и полуфабрикатов в герметичных условиях, а также то или иное силовое воздействие на объекты обработки.

К числу таких процессов относится выращивание монокристаллов, многослойное нанесение тонкоплёночных структур, ионное легирование, молекулярно-лучевая, ионно-лучевая и лазерная эпитаксия, сборка различных типов СВЧ приборов и многие другие процессы.

Проведение вышеупомянутых процессов в автоматическом режиме представляет собой технически сложную задачу.

Получение тонких плёнок и покрытий в вакууме, формирование остаточной газовой среды при откачке электронных приборов – всё это случаи, когда технологический процесс обработки построен не только на выполнении определенного комплекса физико-химических процессов, но, кроме того, требует выполнения некоторых механических или силовых воздействий на обрабатываемые изделия, а также относительного переме-

щения последних внутри вакуумных технологических объёмов. Также вакуумное технологическое оборудование должно быть оснащено рядом исполнительных органов, осуществляющих указанные взаимодействия с изделием в определенной, заранее заданной, последовательности.

Для большинства технологических процессов не должна нарушаться чистота рабочего объёма и состав остаточной газовой среды.

Оптимизация конструирования вакуумного оборудования и его функциональных элементов могли бы решить все эти проблемы. Доскональное исследование многочисленных конструкций автоматизированного вакуумного оборудования радиоэлектронной промышленности и проведённые расчёты показывают, что механические устройства и системы, которые находятся в вакуумных технологических объёмах, генерируют до 50% от суммарного количества привносимых загрязнений микрочастицами и создают дополнительные газовые нагрузки, составляющие от 20% до 40% газового потока, создаваемого во время обработки изделий.

Проблемы трения, изнашивания, герметичности и снижения факторов дестабилизации среды являются основными для оценки работоспособности внутрикамерных устройств по критериям, установленным в соответствии с конкретными условиями их эксплуатации.

Другим немаловажным фактором работоспособности является способность вакуумного технологического оборудования сохранять герметичность рабочего объёма.

Одним из решений, обеспечивающих минимальное влияние на вакуумную технологическую среду по критериям привносимой дефектности, газовыделения и надёжности, является значительное сокращение пар трения во внутрикамерных механических системах, при использовании устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием (УБМВ).

Отличительной особенностью современного этапа развития электронного машиностроения является решение вопросов нахождения рациональных соотношений между возрастающими требованиями к производи-

тельности оборудования производства электронной техники и качеству выпускаемой продукции, которые во многом зависят от используемых в оборудовании агрегатов и модулей.

Ростовое оборудование для выращивания монокристаллического кремния в этом отношении является наиболее уязвимым.

По методу Чохральского монокристалл вытягивается верхним штоком с закрепленной на нем затравкой кристалла из расплава, помещенного в тигель, соединенный с помощью подставки с нижним штоком. Отсутствие контакта растущего кристалла со стенкой контейнера позволяет получать методом Чохральского ориентированные в требуемом кристаллографическом направлении большие, равномерно легированные совершенные монокристаллы.

Наиболее мощным средством исследования и проектирования сложных технических систем является моделирование. Современные системы автоматизированного проектирования широко используют методы математического моделирования, позволяющие проводить исследования различных процессов формирования пластин плотной записи информации для накопителей на жёстких магнитных дисках, а также их полный расчёт и оптимизацию на основе точных физико-математических моделей. Использование моделирования, начиная с ранних стадий проектирования, приводит к сбору информации за счёт уточнения и детализации моделей. Результатом такого сбора информации является разработка проекта накопителей на жёстких магнитных дисках с заданными потребительскими свойствами.

Наблюдающееся замедление в развитии современных технологий проектирования пластин плотной записи информации для накопителей на жёстких магнитных дисках связано, в основном, не с отсутствием достижений науки, инвенций и инженерных идей, а с большими сроками и неудовлетворительным качеством реализации конструкторско-технологических разработок. Преодолеть это препятствие можно с помощью разработки и

развития автоматизированной системы проектирования процесса формирования пластин плотной записи информации на каждом этапе проекта.

Автоматизированная система проектирования процесса формирования пластин плотной записи информации для накопителей на жёстких магнитных дисках может играть роль мощного средства для создания перспективных магнитных носителей информации, а её эффективное применение требует разработки комплекса методических разработок, инструкций и баз знаний, используемых на каждом этапе и регламентирующих их последовательность.

Учебное пособие рекомендовано студентам бакалавриата и магистратуры, обучающимся по направлениям 210100 – «Электроника и наноэлектроника», 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

ГЛАВА 13. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНИТОСТРИКЦИИ

Магнитострикция (от лат. натяжение, сжатие) – изменение формы и размеров тела при его намагничивании. Это явление свойственно как ферромагнитным (сильно магнитным), так и парамагнитным и диамагнитным веществам. Магнитострикция – результат проявления взаимодействий в магнитных телах. Магнитострикция неизменно привлекает внимание не только физиков, но также и инженеров с точки зрения конструирования новых приборов и технических устройств.

Магнитострикция оценивается безразмерной величиной – относительным изменением размеров магнетика

$$\lambda = \frac{dl}{l}.$$

Здесь dl – удлинение (или укорочение) при включении магнитного поля H , а l – длина образца.

В экспериментах обычно измеряется $\lambda_{\parallel}$ – продольная магнитострикция, когда напряженность поля H совпадает с направлением измерения, $\lambda_{\perp}$ – поперечная магнитострикция, когда указанные направления взаимно перпендикулярны. Величины $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ малы (даже для ферромагнетиков), и для их измерения применяются специальные методы и установки.

Различают два вида магнитострикции: изотропную (обменную) и анизотропную (магнитодипольную и одноионную). Ниже в упрощенной и качественной форме объясняются механизмы их возникновения.

13.1. Обменная магнитострикция

Этот вид магнитострикции возникает в результате изменения обменного взаимодействия между магнитными моментами атомов M_{am} в кристаллической решётке. Магнетизм атома обусловлен электронами (ядро атома дает очень малый вклад в магнетизм атома, и им обычно пренебрегают). Электроны атома участвуют в создании M_{am} двояко. Во-первых, каждый электрон, вращаясь вокруг ядра, образует микроскопический замкнутый ток, величина его равна произведению микроскопического тока на площадь орбиты электрона. Этот магнитный момент называется орбитальным M_{orb} и изображается в виде вектора, направленного перпендикулярно площади орбиты. Во-вторых, каждый электрон обладает своеобразным «собственным» магнитным моментом (согласно выводам квантовой механики). Его называют спиновым M_{cn} (от англ. spin — вращение).

Векторное сложение M_{orb} и M_{cn} дает M_{am} . Следует отметить, что внутри атома M_{orb} и M_{cn} связаны магнитными силами (спин-орбитальным взаимодействием).

В кристаллах ферромагнетиков, как было показано в 30-е годы русским теоретиком Я.И. Френкелем и немецким теоретиком В. Гейзенбергом, между электронами соседних магнитных атомов возникает особый вид взаимодействия, который они назвали обменным. Это электростатическое взаимодействие, однако, оно не простое (кулоновское), а квантовое. В механизме обменного взаимодействия электронов важная роль отводится направлению спинов соседних атомов. Обменным его называли потому, что в процессе данного взаимодействия электроны соседних магнитных атомов как бы обмениваются своими местами. Результатом обменного взаимодействия электронов является то, что моменты M_{cn} электронов устанавливаются параллельно друг другу, возникает спонтанная или самопроизвольная намагниченность (то есть без участия внешнего поля H). Поскольку M_{cn} и M_{orb} взаимосвязаны, то можно говорить, что спон-

танная намагниченность I_s создается упорядочиванием магнитных моментов M_{am} (намагниченность I_s – это число однонаправленных M_{am} в 1 см^3 ферромагнетика).

Спонтанная намагниченность обращается в нуль при температуре T_C , называемой точкой Кюри. Величину обменного взаимодействия можно оценить по величине T_C . При этой температуре тепловое движение разрушает упорядоченное расположение моментов M_{am} , созданное обменным взаимодействием. Отсюда следует, что чем больше обменное взаимодействие в ферромагнетике, тем выше должна быть температура T_C для разрушения магнитного порядка.

Возникновение обменной магнитострикции можно наглядно пояснить следующим образом. Представим себе, что имеется цепочка магнитных атомов при температурах, близких к T_C . В области T_C большинство моментов M_{am} находятся в разупорядоченном состоянии, так как действие теплового движения на атомы больше, чем обменное взаимодействие. Пусть r_0 – равновесное расстояние между атомами, соответствующее этому состоянию ферромагнетика (рис. 13.1.1, а). Включим, теперь поле H . Моменты M_{am} повернутся по полю (рис. 13.1.1, б), но это приведёт к изменению обменной энергии (поскольку, согласно теории, данная энергия зависит от направления спинов взаимодействующих электронов, принадлежащих соседним атомам).

Состоянию ферромагнетика, представленного на рис. 13.1.1, б, будет соответствовать другое равновесное расстояние между атомами: $r_0 + \Delta r$, где Δr есть не что иное, как обменная магнитострикция. В ферромагнетиках, обладающих кубической симметрией, величина Δr не зависит от направления в кристалле, следовательно, обменная магнитострикция будет изотропной. Это означает, что в кубическом кристалле величина Δr будет одной и той же во всех направлениях последнего. Эта магнитострикция будет проявляться в изменении объёма кристалла $\frac{\Delta V}{V}$, при этом в боль-

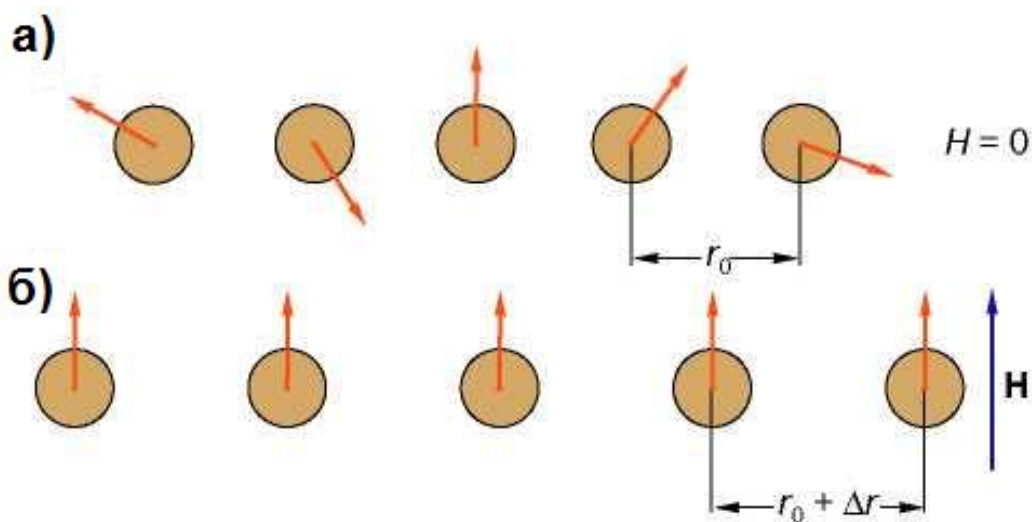


Рис. 13.1.1. Явление обменной магнитострикции

шинстве ферромагнетиков она положительна, то есть при включении внешнего поля H объём образца увеличивается.

Подобного рода магнитострикция сопутствует процессу намагничивания ферромагнетика, при котором под влиянием H происходит ориентация моментов M_{am} . Процесс напоминает намагничивание парамагнетиков, поэтому он получил название парапроцесса. Парапроцесс особенно интенсивен в области точки Кюри, и обменная магнитострикция здесь достигает наибольшей величины.

В ферромагнетиках, обладающих гексагональной структурой, например, в редкоземельном металле гадолинии Gd, парапроцесс и обменная магнитострикция обладают анизотропией.

13.2. Спонтанная магнитострикция и инвар-эффект

Магнитострикция, обусловленная изменением обменного взаимодействия, проявляется не только при приложении магнитного поля H , но

также при изменении температуры ферромагнетика (при отсутствии H). Это тепловая магнитострикция (иногда называемая термострикцией) особенно велика в области точки Кюри. В самом деле, из вида температурной зависимости спонтанной намагниченности I_s , представленной на рис. 13.2.1, а, следует, что число разупорядоченных моментов M_{am} особенно бурно возрастает при приближении к T_C . Это приводит к некоторому изменению обменной энергии, что, в свою очередь, вызывает обменную магнитострикцию $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)T$, однако в противоположность действию парaproцесса отрицательную, так как она сопутствует разупорядочиванию моментов M_{am} .

У некоторых ферромагнетиков эффект спонтанной магнитострикции оказывает существенное влияние на тепловое расширение, так как приводит к частичной компенсации последнего. На рис. 13.2.1, б штриховой линией схематически показан температурный ход коэффициента теплового

расширения $\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}$ ферромагнитного сплава 36%Ni + 64%Fe при от-

сутствии компенсирующего действия обменной магнитострикции, сплошная кривая – зависимость $\alpha(T)$, экспериментально наблюдаемая.

Видно, что в определённом интервале температур α может приобретать очень низкие значения.

Указанный выше сплав носит название инвара (не изменяющего свои размеры при нагреве). В настоящее время существует большое число сплавов типа инвар; природа их малого коэффициента теплового расширения – магнитная. Явление компенсации коэффициента теплового расширения спонтанной магнитострикцией получило название инвар-эффекта. В гадолинии инвар-эффект анизотропен, то есть различен по разным осям гексагонального кристалла.

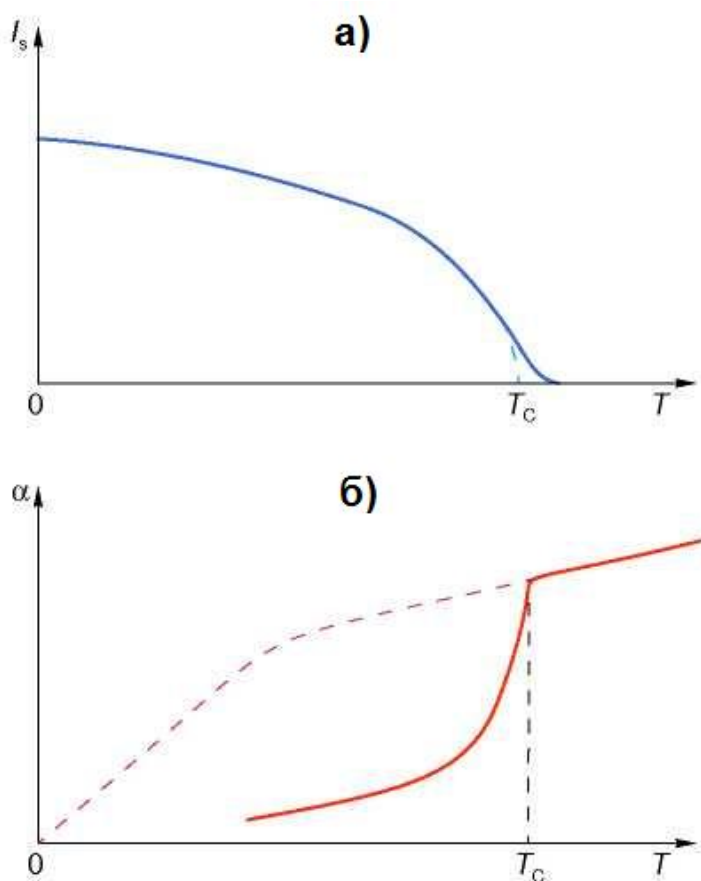


Рис. 13.2.1. Инвар-эффект:

а – температурная зависимость спонтанной намагниченности инварного сплава (схематически);

б – температурная зависимость коэффициента теплового расширения инварного сплава (штриховая линия – температурный ход при отсутствии влияния спонтанной магнитострикции)

13.3. Анизотропная магнитострикция (магнитодипольная и одноионная)

Кроме рассмотренной выше обменной магнитострикции в ферромагнетиках при приложении поля H возникает анизотропная магнитострикция. Она сопутствует процессам намагничивания в полях более слабых,

чем те, в которых проявляется парапроцесс. Анизотропия её состоит в том, что λ по различным осям кристалла имеют разные величины и знаки. Характерная черта анизотропной магнитострикции состоит в том, что при ней меняется форма образца (при ничтожно малом изменении объёма).

В теории рассматриваются два механизма анизотропной магнитострикции: 1) магнитодипольный и 2) одноионный. В первом из них рассчитывается магнитное взаимодействие магнитных моментов M_{am} , расположенных в узлах кристаллической решетки. При этом, магнитные моменты M_{am} уподобляются магнитным диполям (то есть маленьким магнетикам с северным и южным полюсами).

Магнитодипольное взаимодействие в кристаллах кубической симметрии вдоль ребра и диагоналей куба будет различным, следовательно, равновесные расстояния между магнитными атомами, в этих направлениях, будут также различными, то есть магнитострикции будут разными по величине в этих направлениях. Однако данный механизм даёт малый вклад в анизотропию магнитострикции ферромагнетиков.

Как показали исследования, главным для анизотропной магнитострикции является одноионный механизм. Определяющую роль в нём играет наличие у магнитного атома или иона (то есть заряженного атома) орбитального магнитного момента M_{orb} . Согласно теории, в этом случае, электронное орбитальное облако приобретает несферическую (анизотропную) конфигурацию (на рис. 13.3.1,а оно условно изображено в виде эллипсоида).

Механизм возникновения анизотропной магнитострикции можно представить следующим образом. Пусть анизотропный магнитный ион находится в кристаллической решетке в окружении других ионов, создающих электростатическое поле (оно обычно называется кристаллическим). На рис. 5.3 условно показаны, тонкими линиями, кристаллические поля создаваемые окружающими ионами, отражающими локальную симметрию кристалла.

При приложении поля H магнитный момент иона $M_{am} = M_{cn} + M_{orb}$

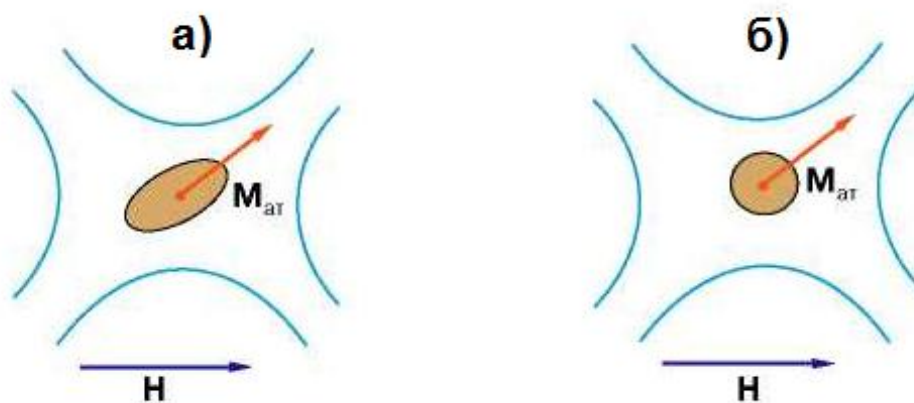


Рис. 13.3.1. Одноионный механизм возникновения анизотропной магнитострикции:

а – случай Tb и Dy;

б – случай Gd

ориентируется в направлении H и одновременно с ним поворачивает анизотропное электронное облако иона, которое возмущает электростатическое поле окружающих ионов. В результате кристаллическая решетка испытывает анизотропные деформации в соответствии с симметрией кристалла. Эти деформации – анизотропная магнитострикция.

Подобного вида анизотропная магнитострикция очень велика в редкоземельных металлах (не всех), так как их ионы обладают большими величинами орбитальных моментов M_{orb} .

Редкоземельный металл гадолиний не имеет орбитального момента ($M_{orb} = 0$) и его атомный момент M_{am} содержит только спиновую составляющую ($M_{am} = M_{cn}$). Вследствие этого электронное облако его иона имеет сферическую форму. Как следует из рис. 13.3.1, б, при приложении поля H поворот электронного облака не приводит к возмущению кристаллического поля окружающих ионов, следовательно, здесь не работает механизм одноионной магнитострикции. В Gd и его соединениях наблюдаемая анизотропная магнитострикция, по-видимому, обязана магнитодипольному механизму.

Ситуация с анизотропной магнитострикцией в металлах Fe, Ni, их сплавах и ферритах близка к случаю Gd. Намагничивание в них происходит, в основном, за счёт спиновых моментов и в небольшой степени за счёт орбитальных моментов. В этих магнетиках кристаллическое поле так сильно воздействует на M_{orb} , что они как бы закрепляются в решетке и теряют способность вращаться в направлении магнитного поля. Это явление принято называть замораживанием орбитального момента. Однако в некоторых из этих соединений замораживание M_{orb} происходит не полностью. Поэтому в данных веществах возникает анизотропная магнитострикция одноионной природы, но много меньшая по величине, чем в редкоземельных магнетиках.

13.4. Гигантская анизотропная магнитострикция

Было установлено, что анизотропная магнитострикция редкоземельных металлов тербия Tb, диспрозия Dy, их сплавов и ферритов-гранатов, при низких температурах, превышает анизотропную магнитострикцию железа, кобальта, никеля и их сплавов в десятки, сотни и даже тысячи раз (в монокристаллах). Несколько позднее, такая гигантская магнитострикция была обнаружена в так называемых интерметаллических соединениях TbFe₂ и DyFe₂. В них эта магнитострикция реализуется не только при низких температурах, но и выше комнатных температур.

В табл. 13.4.1 приведены результаты измерений продольной магнитострикции насыщения $(\lambda_s)_{\parallel}$ (то есть в полях $H = H_s$) при температуре жидкого азота 78K в поликристаллах Tb и Dy (для сравнения даны соответствующие значения $(\lambda_s)_{\parallel}$ для поликристаллов Fe, Co и Ni).

Огромных величин достигает λ_s в гексагональных кристаллах Tb и Dy (табл. 13.4.2). При этом она особенно велика вдоль гексагональной оси c и несколько меньше вдоль a . (На рис. 13.4.1,а показаны направления этих осей).

Таблица 13.4.1

Результаты измерений продольной магнитострикции насыщения $(\lambda_s)_\parallel$

Металл	$(\lambda_s)_\parallel \cdot 10^6$
Tb	1230
Dy	1400
Fe	–15
Co	–85
Ni	–40

Таблица 13.4.2

Магнитострикция в кристаллах Tb, Dy, Gd и Ni

Металл	T, K	$(\lambda_s)_\parallel \cdot 10^6$	Кристаллическая ось
Tb	4,2	5460	$H \parallel a$
	4,2	22000	$H \parallel c$
Dy	4,2	8500	$H \parallel a$
	4,2	21000	$H \parallel c$
Gd	78 /	–80	$H \parallel a$
	78 /	–16	$H \parallel c$
Ni	78 /	–60	$H \parallel [111]$

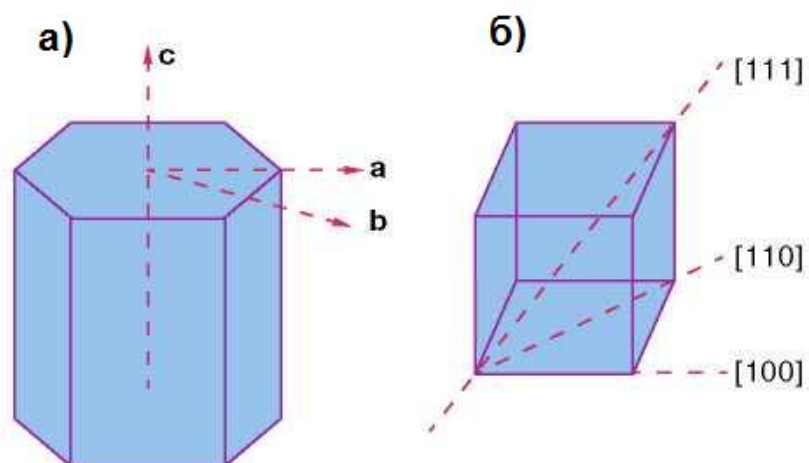


Рис. 13.4.1. Направления осей:

a – в гексагональном кристалле;

b – в кубическом кристалле

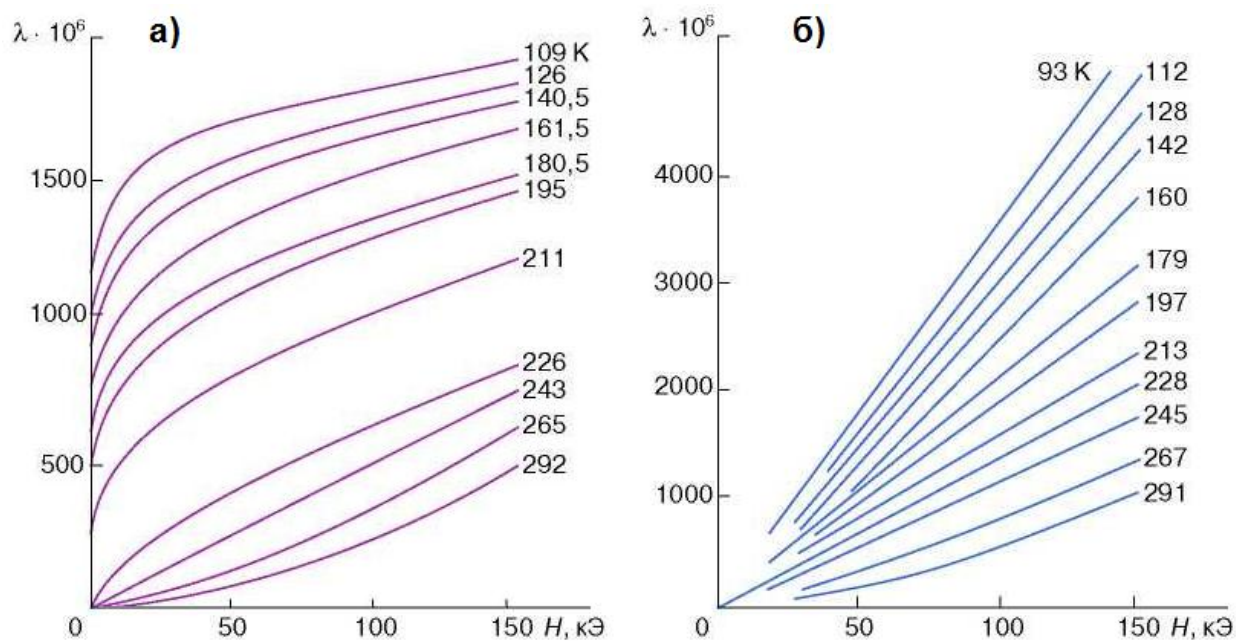


Рис. 13.4.2. Зависимость магнитострикции в кристалле тербия от напряженности магнитного поля H :

a – базисная плоскость ($H \perp c$);

b – гексагональная ось ($H \parallel c$)

Видно, что эти значения в сотни раз больше, чем в кристалле Ni. На рис. 13.4.1, б показаны направления осей кубического кристалла Ni символами $[111]$, $[100]$ и $[110]$.

На рис. 13.4.2 представлены кривые магнитострикции $\lambda(H)$ гексагонального монокристалла Tb вдоль его оси c и b базисной плоскости при разных температурах.

В поле, приложенном в базисной плоскости, магнитострикция сравнительно быстро стремится к насыщению (рис. 13.4.2,а), тогда как в направлении гексагональной оси c тенденция к насыщению не обнаруживается даже в очень сильном поле ($H = 150$ кЭ).

Анализ приведённых результатов измерений показал, что за гигантскую магнитострикцию в Tb и Dy ответственны два механизма: одноионная магнитострикция и обменная магнитострикция (возникающая вдоль оси c , так как в этом направлении обменное взаимодействие сильно зависит от межатомного расстояния).

Было обнаружено, что ряд ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Tb, Dy, Ho$) в области гелиевых и азотных температур обладает гигантской магнитострикцией.

Таблица 13.4.3

Результаты измерений гигантской магнитострикции в кристаллах ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Tb, Dy, Ho$)

Феррит-гранат	$\lambda_{[100]} \cdot 10^5$		$\lambda_{[111]} \cdot 10^5$	
	4,2 К	78 К	4,2 К	78 К
$Tb_3Fe_5O_{12}$	1270	67	2460	560
$Dy_3Fe_5O_{12}$	-1400	-254	-550	-145
$Ho_3Fe_5O_{12}$	-665	-82	-632	-56

стрикцией (порядка 10^{-3}). В табл.13.4.3 приведены результаты измерений её в кристаллах этих веществ. Видно, что гигантская магнитострикция носит также анизотропный характер в направлениях [100] и [111] и возникает, как и в металлах Tb и Dy, за счёт механизма одноионной анизотропии. Дело в том, что в ионах Tb, Dy (и других редкоземельных ионах), ответственная за магнетизм $4f$ -электронная оболочка находится в "глубине" иона. Выше располагаются другие оболочки, которые экранируют её от действия внутрикристаллического поля, в результате чего орбитальный момент M_{orb} не замораживается этим полем.

Необычайно высокая анизотропная магнитострикция наблюдалась в актинидных магнетиках (урановых, нептуниевых и др.). Так, в соединениях US при $T = 4,2$ К величина $\lambda_{[111]} = 7000 \cdot 10^{-6}$, а в $NpFe_2$ $\lambda_{[111]} = -8000 \cdot 10^{-6}$. В этих соединениях, так же как и в редкоземельных магнетиках, орбитальные магнитные моменты $5f$ -оболочек ответственны за возникновение гигантской анизотропной магнитострикции.

13.5. Материалы с гигантской магнитострикцией

Магнитострикция в кристалле создает магнитоупругую (добавочную) анизотропию, которая оказывает сильное влияние на ход кривой намагничивания. Металлы Tb, Dy, Ho, Er и ферриты-гранаты этих металлов (например, $Tb_3Fe_5O_{12}$) при низких температурах имеют необычайно высокие эффекты магнитострикции, на два-три порядка больше, чем магнитострикция в металлах, сплавах и ферритах группы Fe (при 100К для Tb $\lambda = 5,3 \cdot 10^{-3}$, для Dy $\lambda = 8,0 \cdot 10^{-3}$, для Ni при той же температуре $\lambda = 4,0 \cdot 10^{-5}$). Установлено, что такие гигантские магнитострикции могут быть получены и при комнатных температурах путём использования ферромагнитных соединений: $DyFe_2$, $HoFe_2$, $DyFe_3$ и др. Точки Кюри этих соединений выше комнатной температуры, поскольку в них входят атомы Fe. При этом здесь, как и в случае редкоземельных материалов высокого магнитного насыщения,

необходимо принять меры к снижению "вредного" влияния огромной магнитной анизотропии, то есть уменьшить величину поля насыщения H_s .

Редкоземельные магнитные материалы обладают уникальными свойствами, которые нельзя получить в материалах, синтезируемых на основе группы Fe. Использование огромных величин магнитной анизотропии и магнитострикции в редкоземельных веществах и нахождение путей управления ими, бесспорно, будут иметь большое значение для получения магнитных материалов с заданными свойствами.

13.6. Влияние спонтанной магнитострикции на тепловое расширение ферромагнетиков

В ферромагнетиках ситуация становится иной при температурах ниже температуры магнитного упорядочения T_C . Здесь возникает корреляция в ориентации спинов на дальних расстояниях, вследствие чего появляется кооперативный эффект – деформация образца вследствие спонтанной магнитострикции, в которой суммируются локальные деформации вблизи атомов за счёт ориентации их спинов. Благодаря этому кооперативному эффекту сумма энергий взаимодействий отдельных атомов – внутренняя энергия образца будет несколько по-другому зависеть от средних межатомных расстояний при $T < T_C$, чем при $T > T_C$. Этот эффект можно учесть рассматривая энергетические вклады в полную энергию твёрдого тела. В первую очередь необходимо учитывать энергию обменного взаимодействия, которая при охлаждении ниже T_C возрастает пропорционально квадрату спонтанной намагниченности.

Согласно теории молекулярного поля эта зависимость может быть описана формулой

$$E_0 = -AI_s^2, \quad (13.6.1)$$

где A – интеграл обменного взаимодействия; I_s – спонтанная намагниченность.

Так как A зависит от межатомных расстояний и атомного объёма, то следует учесть эту зависимость. Наиболее просто сделать это для атомного объёма. В этом случае магнитоупругая обменная энергия имеет вид

$$E_{0y} = -\gamma I_s^2 \omega, \quad (13.6.2)$$

где $\omega = \frac{\Delta V}{V_0}$ – относительное изменение объёма тела;

$\gamma = \frac{\Delta A}{\Delta \omega}$ – крутизна обменного интеграла, которая показывает,

как резко A изменяется с атомным объёмом.

При отклонении от положения равновесия атомов изменяется также и упругая энергия:

$$E_y = +\frac{k\omega^2}{2}, \quad (13.6.3)$$

где k – объёмный упругий модуль, характеризующий жёсткость кристаллической решетки.

Легко показать, что минимальное значение полной энергии достигается при относительном изменении объёма ω_s :

$$\omega_s = -\frac{\gamma I_s^2}{k}. \quad (13.6.4)$$

Величина ω_s называется спонтанной объёмной магнитострикцией.

Она налагается на обычное тепловое расширение $\frac{\Delta V}{V}(T)$ при $T < T_C$ (рис. 13.6.1, кривая 2). В результате кривая теплового расширения существенно трансформируется (рис. 13.6.1, кривая 3). Для $\gamma > 0$ получим $\omega_s < 0$ и $\omega_s > 0$ для $\gamma < 0$. Отклонения кривой теплового расширения возможны как в сторону увеличения коэффициента теплового расширения,

так и его уменьшения.

Коэффициент объемного теплового расширения может быть рассчитан по кривой 3 (см. рис. 13.6.1) по формуле:

$$\alpha_V = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{V}{\Delta T} . \quad (13.6.5)$$

Из кривой 3 (см. рис. 13.6.1) и формулы (13.6.5) следует, что α может принимать в ферромагнетике не только положительное значение, но может быть отрицательным, а также иметь нулевые значения.

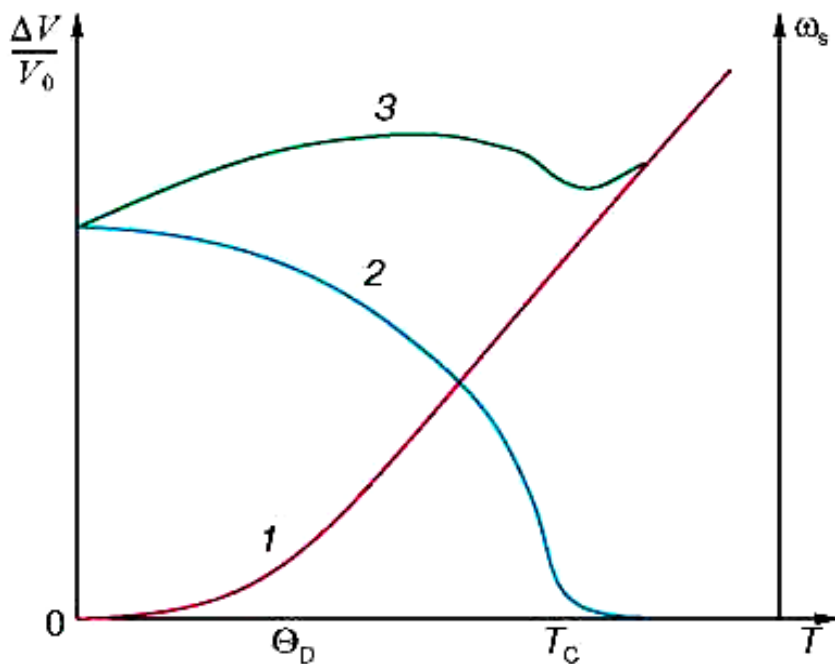


Рис. 13.6.1. Тепловое расширение ферромагнетика: Температурные зависимости изменения относительного объема $\Delta V/V_0$ парамагнетика (1), спонтанной объемной магнитострикции ω_s ферромагнетика (2) и относительного изменения объема $\Delta V/V_0$ ферромагнетика (3) выше и ниже температуры Кюри T_C

Из соотношений (13.6.2) и (13.6.4) следует, что величина спонтанной магнитострикции содержит важную информацию о величине и знаке крутизны обменного интеграла γ . В анизотропных магнетиках изменение A при изменении межатомных расстояний вдоль различных кристаллографических направлений сильно отличается как по величине, так и по знаку. В этом случае аномалии теплового расширения при $T < T_C$ вдоль различных кристаллографических осей неодинаковы, а спонтанная магнитострикция λ_c неодинакова вдоль различных кристаллографических направлений, то есть анизотропна. В ряде ферромагнетиков при $T < T_C$ существует температурная область с нулевым тепловым расширением ($\alpha = 0$). Такие температурные интервалы можно выделить на кривой 3 (см. рис. 13.6.1). Описанные выше аномалии теплового расширения наблюдаются не только в ферромагнетиках, но и в других магнитоупорядоченных веществах, как в кристаллических, так и в аморфных. Они получили название инварных эффектов по названию инварных Fe–Ni-сплавов, где впервые наблюдалось нулевое тепловое расширение при $T < T_C$.

Спонтанная магнитострикция и инварные эффекты наблюдаются не только в ферромагнетиках, но также и в других магнитоупорядоченных веществах (ферримагнетиках, антиферромагнетиках, спиральных магнетиках и др.). В последние годы были обнаружены гигантские аномалии теплового расширения при $T < T_C$ с относительным изменением линейных размеров за счёт спонтанной магнитострикции $\frac{\Delta l}{l} = 10^{-2} \div 10^{-3}$ в урановых и редкоземельных магнетиках, сплавах Fe–Rh и некоторых аморфных магнетиках.

Спонтанная магнитострикция налагается на тепловое расширение, обусловленное тепловыми колебаниями атомов. Это проявляется в аномальном изменении размеров магнитоупорядоченного вещества (ферромагнетика, антиферромагнетика и других магнетиков) при нагреве и охлаждении по сравнению с неупорядоченными магнитными средами. Суще-

вует и другой родственный магнитоупругий эффект – изменение размеров магнитоупорядоченного вещества при действии магнитного поля. Этот эффект называется индуцированной полем магнитострикцией или просто магнитострикцией. Она является следствием спонтанной магнитострикции, однако на её величину влияют и другие факторы.

Рассмотрим их более подробно. Спонтанная магнитострикция является результатом локальных деформаций, обусловленных магнитоупругим взаимодействием магнитных электронов с окружающими атомами. Его величина определяется зависимостью от межатомных расстояний обменных взаимодействий и взаимодействий электронных магнитных слоёв ионов с локальными электрическими полями.

Рассмотрим более детально магнитострикцию в ферро- и антиферромагнетиках на основе редкоземельных элементов. В них магнетизм связан с магнитным моментом $4f$ -подоболочки иона редкой земли (РЗ). Если она имеет орбитальный момент $L \neq 0$ и соответственно асимметричное распределение электронной плотности, то локальная магнитострикционная деформация (вокруг РЗ-иона) будет велика (из-за анизотропного магнитоупругого взаимодействия $4f$ -подоболочки с окружающими атомами). Суммирование этих деформаций при $T < T_C$ дает результирующую спонтанную магнитострикцию образца. Следовательно, чем больше ионов редких земель с $L \neq 0$ в магнетике, тем она больше. В общем случае она анизотропна и неодинакова при изменении угла, который образует направление магнитострикционного растяжения с намагниченностью домена I_s . Домен – это область однородного намагничивания. Известно, что реальные ферро- и антиферромагнетики имеют многодоменную структуру. Следовательно, внутри каждого домена будет существовать анизотропная магнитострикционная деформация – спонтанная магнитострикция.

При включении поля происходит рост тех доменов, у которых векторы спонтанной намагниченности I_s ориентированы наиболее энергетически выгодно по отношению к магнитному полю H . Поскольку магнитная

энергия $E_m = -IH\cos\alpha$, то это означает рост доменов с векторами I_s , образующими наименьший угол α с полем H .

Величина спонтанной магнитострикции не изменяется, если направление вектора I_s изменить на обратное. В ферромагнетике, где существует одна ось легкого намагничивания (ОЛН), имеются только два типа доменов с векторами I_s , направленными вдоль ОЛН. В одном домене $I_s \uparrow\uparrow$ ОЛН, в другом $I_s \uparrow\downarrow$ ОЛН. Поэтому в поле $H \uparrow\uparrow$ ОЛН процессы смещения не приводят к заметной, индуцированной полем, магнитострикции.

Иная ситуация возникает в ферромагнетике с несколькими ОЛН, ориентированными под определенными углами (например, 90° в кубической или 60° в гексагональной кристаллической решётке). В этом случае при включении поля H вдоль одной из ОЛН процессы смещения доменов с анизотропной магнитострикцией приводят к индуцированной магнитострикции, сравнимой по величине со спонтанной магнитострикцией.

Весьма существенным для величины магнитострикции является также высокая степень ориентации магнитных моментов ионов внутри доменов. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы энергия взаимодействия магнитных моментов ионов μ эффективным обменным полем H , превышала тепловую энергию:

$$\mu_0 H > k_B T \quad (13.6.6)$$

где μ_0 – величина магнитного момента иона;

k_B – постоянная Больцмана.

Итак, для наблюдения высоких значений магнитострикции в 4f-магнетиках необходимы:

- высокая концентрация РЗ-ионов с $L \neq 0$;
- наличие многих ОЛН;
- большие обменные поля, действующие на ионы РЗ.

Всем перечисленным условиям удовлетворяют в области температур $T < 200\text{K}$ редкоземельные ферро- и антиферромагнитные металлы (тербий,

диспрозий и др.). В них наблюдаются гигантские значения спонтанной и индуцированной магнитострикции ($\Delta l/l \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$). Однако в области комнатных температур величина H_c в них недостаточно велика, чтобы преодолеть дезориентирующее действие теплового движения (температуры Кюри и Нееля не превышают $T = 300\text{K}$).

Величина эффективного обменного поля, действующего на РЗ-ионы, достигает более высоких значений в интерметаллических соединениях, содержащих кроме РЗ ионы 3d-металлов (Fe, Co). В этом случае "подмагниченные" 3d-электроны (коллективизированные 3d-электроны) "переносят" обменное взаимодействие от 3d-ионов к 4f-ионам. Такое косвенное обменное взаимодействие между 3d- и 4f- ионами приводит к сильному эффективному полю, действующему на РЗ-ионы, $H_c \sim 3 \cdot 10^6$ Э. Это поле достаточно, чтобы ориентировать магнитные моменты РЗ-ионов даже при комнатной температуре, в результате чего, в некоторых из этих соединений с кубической кристаллической решеткой, спонтанная магнитострикция $\lambda_c \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ существует вплоть до комнатных температур. В магнитном поле в этих материалах также индуцируется гигантская магнитострикция $\lambda \sim 10^{-3}$ при $T \sim 300\text{K}$. К таким соединениям относится ферримагнетик TbFe_2 . Для снижения величины внешнего магнитного поля, необходимого для получения максимального эффекта, разработаны композиции типа $(\text{Tb}, \text{Dy})\text{Fe}_2$, где за счёт сплавления РЗ с разными знаками констант магнитной анизотропии гигантская магнитострикция достигается в сравнительно небольших магнитных полях ($\sim 10^2$ Э).

13.7. Влияние всестороннего сжатия на температуру магнитного упорядочения

К числу магнитоупругих эффектов следует также отнести смещение температур магнитного упорядочения при действии давления. Согласно

теории молекулярного поля, температура Кюри ферромагнетика с делокализованными атомными магнитными моментами $3d$ -ионов определяется соотношением

$$T_c = \frac{2}{3} zS(S+1) \frac{A}{k_B}, \quad (13.7.1)$$

где A – интеграл обменного взаимодействия между локализованными спинами S ,

z – число ближайших атомов.

Из формулы (13.7.1) следует, что изменение T_c с давлением:

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta P} = \frac{2}{3k_B} zS(s+1) \frac{\Delta A}{\Delta P}. \quad (13.7.2)$$

Поскольку изменение относительного объёма тела

$$\Delta \omega = -\frac{k}{P},$$

где k – сжимаемость, то, определив смещение T_c с давлением, можно вычислить и крутизну обменных интегралов $\frac{\Delta A}{\Delta \omega}$.

Для температурного перехода парамагнетизм-ферромагнетизм при T_c в редкоземельных ферромагнитных металлах, где обменное взаимодействие между локализованными моментами $4f$ -ионов осуществляется через электроны проводимости, выполняется соотношение

$$T_c = \frac{2}{3k_B} G A_{\text{косв}}. \quad (13.7.3)$$

Здесь $G = (g_j - 1)^2 J(J + 1)$ – фактор де Жана;

$A_{\text{косв}}$ – интеграл косвенного обменного взаимодействия между ионами редких земель,

g_j – фактор Ланде, определяется квантовыми числами, характеризующими основные состояния иона редкой земли,

J – квантовое число полного механического момента этого иона.

Изменение T_c с давлением в этом случае:

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta P} = \frac{2}{3k_B} G \frac{\Delta A}{\Delta P} . \quad (13.7.4)$$

Давление приводит к изменению атомного объёма и межатомных расстояний. Из формул (13.7.2) и (13.7.4) следует, что смещение температуры Кюри при всестороннем сжатии содержит информацию о зависимости обменных интегралов от давления и средних межатомных расстояний.

Проведённые исследования смещения температур T_c с давлением показали, что давление смещает T_c в кристаллических и аморфных $3d$ - и $4f$ -магнетиках со скоростью примерно $0,1 \div 10 \text{ К}$ на 1 кбар. В настоящее время во многих лабораториях существуют установки, которые позволяют создавать давление более 300 кбар. У большинства магнетиков T_c понижается с давлением, поэтому под действием столь больших давлений ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Зависимость обменных интегралов в кристаллических магнетиках от межатомных расстояний в кристаллах с некубической решеткой, как правило, резко анизотропна, то есть значение $\frac{\Delta A}{\Delta a}$ и $\frac{\Delta A}{\Delta c}$ (a и c – параметры кристаллической решётки) могут различаться как по величине, так и по знаку. Это связано с тем, что при всестороннем сжатии изменение перекрытия электронной плотности магнитных электронов вдоль разных осей неодинаково. Заметный вклад в эффект смещения температур Кюри с давлением вносит изменение энергетического спектра электронов проводимости, а также изменение обменного взаимодействия между локализованными магнитными электронами и электронами проводимости. Для зонных магнетиков необходимо учитывать влияние атомного объёма на параметры зонной структуры (ширина зоны и плотность состояний на уровне Ферми).

Проведённые в последнее время исследования влияния всестороннего сжатия на температуры магнитных фазовых превращений редкоземельных магнетиков установили, что сжатие вызывает главным образом усиление антиферромагнитных взаимодействий, как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Это явление объясняется возрастанием при сжатии перекрытия электронных плотностей $5d$ - и $3d$ -электронов, которые являются "переносчиками" антиферромагнитных обменных взаимодействий. В кристаллических материалах действие высоких давлений в ряде случаев приводит к превращению ферромагнетиков в антиферромагнетики с угловым расположением магнитных моментов, а в аморфных материалах – к превращению ферромагнетиков в сперомагнетики и спиновые стёкла.

Таким образом, влияние магнитного упорядочения на упругие свойства проявляется в магнитоупругих эффектах, которые содержат важную информацию о магнитоупругих взаимодействиях в твёрдых телах, о зависимости от межатомных расстояний электронной структуры, обменных и магнитокристаллических взаимодействий. Многие магнитоупругие эффекты весьма перспективны для использования в технике, а некоторые (магнитострикция) уже нашли значительное применение.

13.8. Устройства прецизионного перемещения на основе эффекта магнитострикции

Устройство перемещения для нанотехнологии

В основу разработки положена задача обеспечения возможности использования магнитного поля для оперативного управления величиной перемещения зонда при выполнении различных нанотехнологических операций.

Устройство перемещения (рис. 13.8.1) содержит привод 2, связанный с неподвижным основанием 1 и зондом 3, подложку 5, установленную на

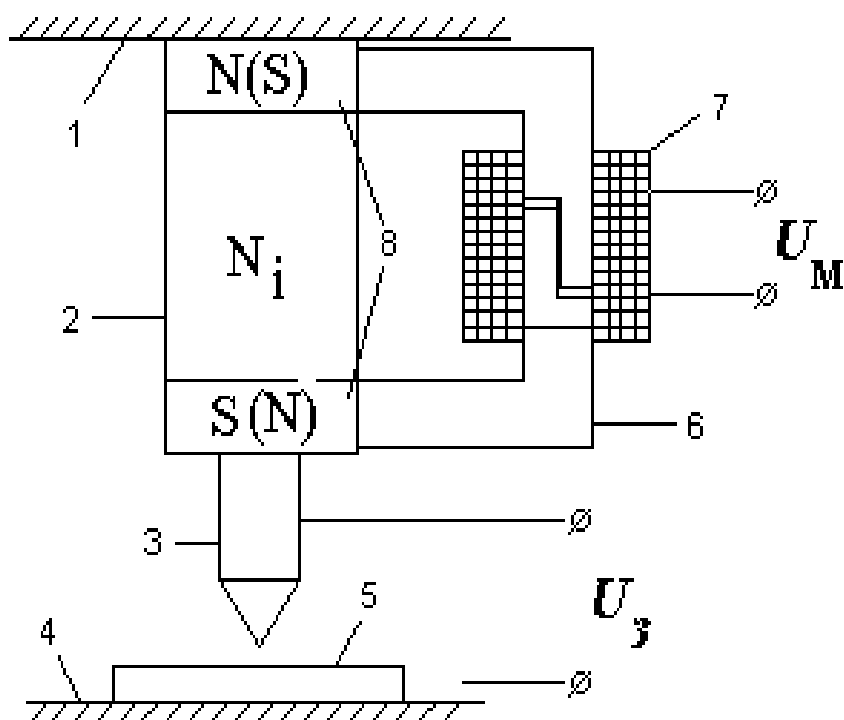


Рис. 13.8.1. Устройство перемещения для нанотехнологии

подложкодержателе 4. Привод выполнен в виде цилиндра из магнитострикционного материала, торцы которого связаны с полюсами электромагнита 8, жестко связанными с его сердечником 6, выполненным составным, с возможностью осевого перемещения составных частей относительно друг друга внутри катушки индуктивности 7. Один полюс электромагнита жестко зафиксирован на неподвижном основании, а другой присоединён к зонду.

При подаче напряжения на катушку индуктивности 7 происходит перемещение привода 2, а вместе с ним и зонда 3, что достаточно для реализации нанотехнологического процесса.

Применение устройства позволяет повысить точность перемещения за счёт использования магнитного поля вместо электрического, что актуально для различных нанотехнологических процессов.

Привод для нанотехнологии

В основу представленной разработки (рис. 13.8.2) также положена задача обеспечения возможности использования магнитного поля для оперативного управления величиной перемещения подложкодержателя.

Привод содержит основание 1, выходное звено 2, шесть стержней 3, шарнирно связанных одним концом 4 с основанием, а другим 5 – с выходным звеном. Приводы перемещения 6 выходного звена, кинематически связаны с соответствующими стержнями 3. Шарнирные связи 7 выполнены упругими, стержни 3 изготовлены из магнитострикционного материала и установлены в катушку индуктивности 8, связанную с источником питания.

При подаче напряжения на катушку индуктивности 8 происходит перемещение привода 6, а вместе с ним и выходного звена 2.

Применение устройства так же позволяет повысить точность перемещения, посредством использования магнитного поля, вместо электрического.

Устройство наноперемещения зонда

Устройство наноперемещения зонда (рис. 13.8.3), содержит привод 1, связанный с неподвижным основанием 2 и зондом 3, подложку 4, установленную на подложкодержателе 5. Привод 1 выполнен в виде магнитострикционного биморфа в виде двух, жестко связанных между собой, пластин, одна из которых выполнена из магнитострикционного материала 6, а другая – из немагнитного, диэлектрического 7. На консольной части привода 1 закреплен зонд 3, а другая часть выполнена немагнитной. Диэлектрическая пластина 7 жестко связана с сердечником электромагнита 8, между полюсами которого 9 расположен магнитострикционный биморф.

При подаче напряжения на электромагнит 8 происходит перемещение пластины из магнитострикционного материала 6, а вместе с ним и привода 1.

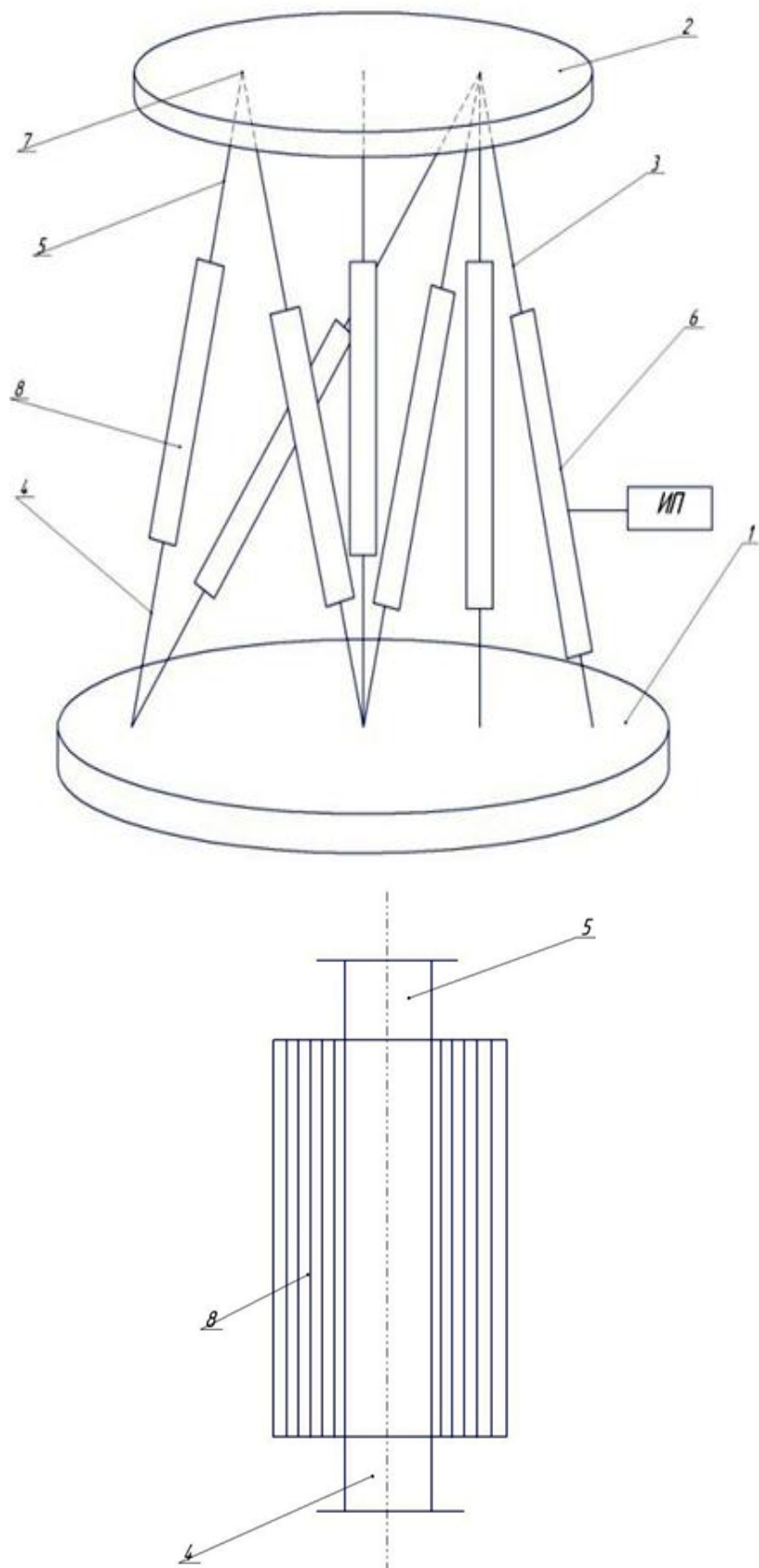


Рис. 13.8.2.

Привод для нанотехнологии

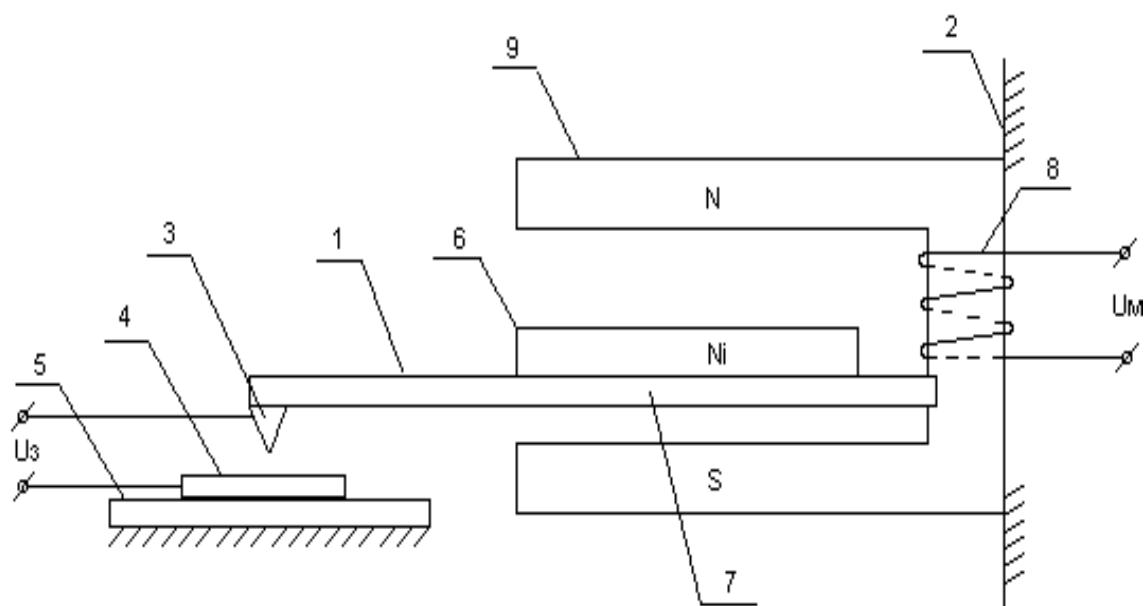


Рис. 13.8.3. Устройство наноперемещения зонда

На основании результатов, полученных при тестировании уже существующих магнитострикционных приводов, можно говорить о повышении точности позиционирования в десятки раз по сравнению с пьезоэлектрическими приводами.

Представленные в настоящем разделе технические решения защищены Патентами Российской Федерации [1-4].

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 13

1. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство перемещения для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №37580. Оpubл. 27.04.2004, Бюл. №12.
2. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство для получения нанодорожек. Патент РФ на ПМ №42696. Оpubл. 10.12.2004, Бюл. №34.
3. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Измерительное устройство для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №42697. Оpubл. 10.12.2004, Бюл. №34.
4. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство для регистрации химического состава. Патент РФ на ПМ №43104. Оpubл. 27.12.2004, Бюл. №36.

ГЛАВА 14. УСТРОЙСТВА С БЕСКОНТАКТНЫМ МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

14.1. Создание сверхчистой вакуумной среды в оборудовании производства изделий электронной техники

Анализ тенденций развития современного электронного производства в отечественной и зарубежной практике свидетельствует о непрерывном расширении масштабов применения высоких технологий и специального вакуумного технологического и аналитического оборудования для их реализации.

Одним из важнейших факторов, определяющих уровень и надежность оборудования этого класса, является снижение загрязнений привносимых при транспортировке изделий между функциональными устройствами оборудования, проводящими разные операции технологического процесса [1].

Решение этой проблемы имеет следующие наиболее распространенные варианты.

- Создание "чистых комнат". Этот вариант при достигнутой величине топологических размеров наиболее современных микросхем и сложности технологического цикла перестает себя оправдывать в связи с постоянным ростом чистых объемов и повышением класса чистоты.
- Выполнение технологического цикла без выхода изделий на атмосферу, достигаемое тремя разными способами [2].

1. Создание вакуумной линии с интегрированными в нее установками технологического процесса. Сейчас в линии и кластерные системы

обычно объединены по несколько установок. Многие ведущие производители заявляют о создании проекта линий полного технологического цикла без выхода на атмосферу [3] (с устройствами транспортирования и хранения изделий).

2. Создание линии с контролируемой газовой средой, соединяющей установки технологического процесса. В линии создается давление газовой среды, незначительно превышающее атмосферное. Данное решение нашло широкое применение и является одним из перспективных.

3. Создание стандартных механических интерфейсов (герметизированных контейнеров с поддерживаемым или неподдерживаемым вакуумом или контролируемой газовой средой для транспортирования и хранения изделий). Данное решение нашло широкое применение и является одним из перспективных с учетом возможности модернизации под него устаревшего оборудования и невысокой по сравнению с другими стоимостью реализации.

Эти решения обычно комбинируются в разных вариантах кроме линий с контролируемой газовой средой, не представлены нигде в чистом виде.

Другим важнейшим фактором является не только способность оборудования формировать необходимые для соответствующих технологических процессов вакуумные условия, но и сохранять их стабильными в течение технологического цикла.

Сохранение сверхчистой вакуумной технологической среды в процессе работы высоковакуумного автоматического оборудования с размещением в рабочих объемах вакуумных камер различных функциональных систем и устройств для ориентации и перемещения изделий относительно источников технологического воздействия, их транспортирования и межкамерного шлюзования в многомодульных системах и т. д., является достаточно сложной комплексной задачей (рис.14.1.1).

Рабочая камера служит основным рабочим пространством в котором проводятся процессы вакуумных технологий. В ней создаются условия,

необходимые для протекания технологического процесса по возможности с оптимальными режимами.

Узлы источника материала распыляемых частиц и крепления подложек с системами их нагрева являются важнейшими узлами, во многом определяющими эффективность технологического процесса. Они могут иметь различные конструктивные решения в зависимости от тех задач, которые выполняет данная установка.

Откачная и газораспределительная системы состоят из насосов, натекаелей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, а также средств измерения разрежения или скоростей газовых потоков. Эти устройства должны обеспечивать высокую производительность откачки при высокой герметичности систем, не допускающей "натекание" при отключении средств откачки.

Системы электропитания и блокировки обеспечивают надежное и стабильное электропитание всех энергетических устройств аппарата и активную блокировку всех рабочих узлов.

Система контроля и управления состоит из набора датчиков, связанных через управляющий компьютер с исполнительными устройствами и информационными системами. Как правило, измеряются и регулируются следующие технологические параметры: скорость осаждения и толщина пленок, температура осаждения и отжига, физические свойства пленок, состав остаточных газов и др.

Системы вспомогательных устройств и технологической оснастки состоят из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и пневмоприводов, устройств очистки газов (см. рис.14.1.1).

Транспортирующие устройства состоят из устройств ввода и вывода подложек из рабочей камеры, шлюзовых устройств, механизмов совмещения и др.

В то же время автоматизация сложных технологических процессов требует размещения в рабочих объемах высоковакуумных камер ряда механических устройств, которые во многих случаях являются источниками гене-

рации "загрязнений", так называемой привносимой дефектности вакуумной среды, в том числе наиболее опасным их видом – микрочастицами износа, при наличии в составе функциональных устройств узлов внешнего трения скольжения или качения [4].

Одним из направлений уменьшения привносимой дефектности в вакуумной технологической среде является применение устройств с минимальным количеством узлов трения, построенных на принципе бесконтактного магнитного взаимодействия.

Современное автоматизированное оборудование высоких вакуумных технологий требует особого подхода к созданию функциональных устройств различного назначения.

Несмотря на общность задач, связанных с автоматизацией производственных процессов, в различных отраслях промышленности возникают технические трудности при решении проблем создания специального автоматизированного вакуумного технологического и аналитического оборудования.

Очевидно, что дальнейшее развитие высоких технологий потребует, в числе прочих задач, ещё более высокой чистоты технологических вакуумных сред с исключением, в том числе наиболее опасного вида загрязнения – микрочастицами износа, распространяющимися из пар трения функциональных устройств.

Количество микрочастиц износа, образующихся при формировании i -го слоя от j -го узла трения в единицу времени, определяется [4]:

$$N_{ij} = \frac{J_{nij} v_{ск.ij} S_{nij}}{W_{ij}},$$

где J_{nij} , $v_{ск.ij}$, S_{nij} , W_{ij} – интенсивность изнашивания, скорость скольжения, номинальная площадь трения и средний объем микрочастицы соответственно при формировании i -го слоя от j -го узла трения.

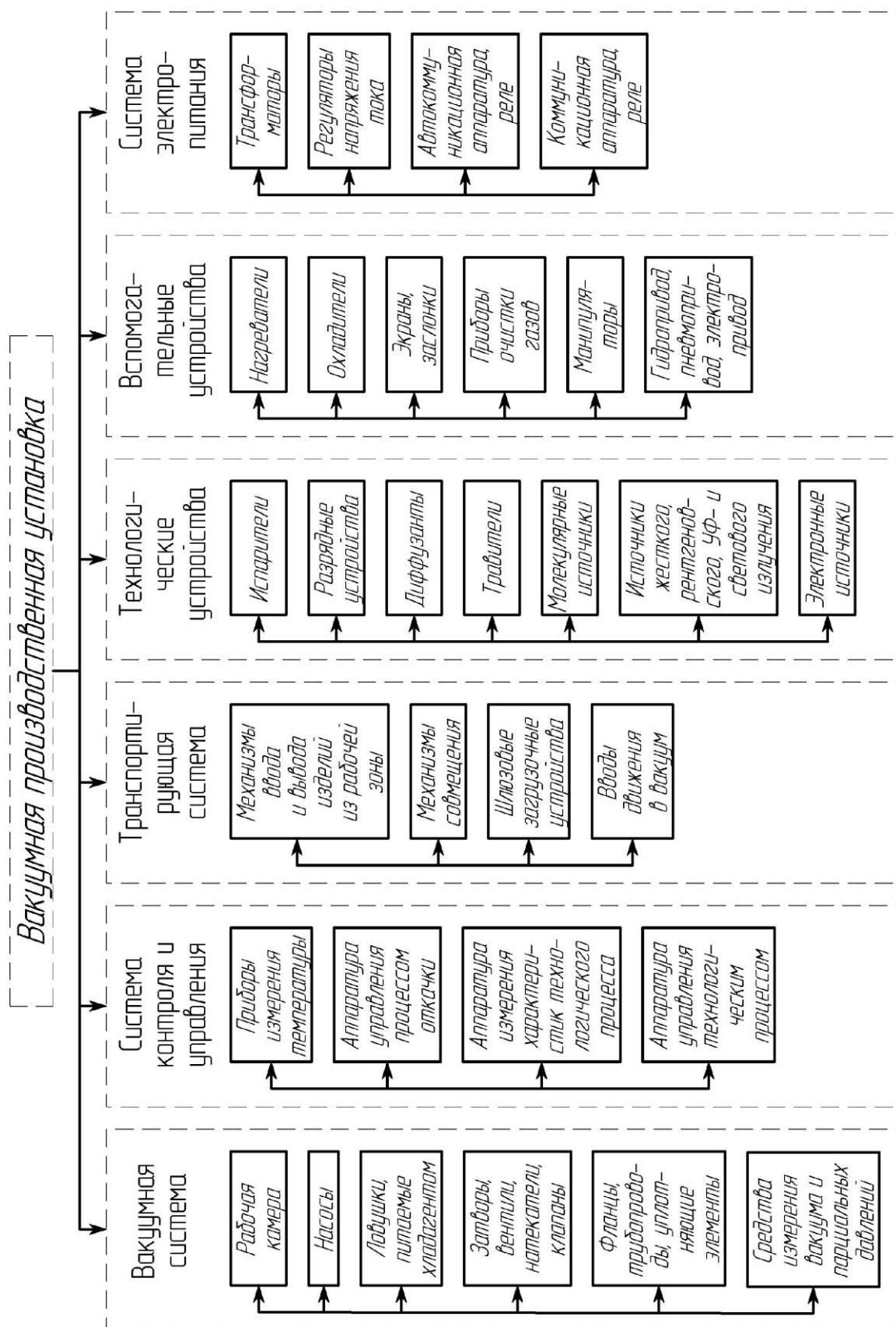


Рис.14.1.1.1. Состав современной вакуумной производственной установки

В свою очередь, вероятность появления привносимой дефектности имеет вид

$$P_{ij} = P_{1ij} P_{2ij} P_{3ij}.$$

Вероятность вылета микрочастиц из зоны трения определяется

$$P_{1ij} = S_{zij} / S_{nij},$$

где S_{zij} – площадь зазора в j -й паре при формировании i -го слоя.

Вероятность попадания на поверхность подложки микрочастиц из зоны трения имеет вид

$$P_{2ij} = \frac{S_{nij}}{S_{kij} K},$$

где S_{nij} – площадь подложки;

S_{kij} – площадь днища вакуумной камеры;

K – количество кристаллов на подложке.

Вероятность того, что частица удержится на поверхности подложки, определяется

$$P_{3ij} = \cos \alpha_{ij} \cos \beta_{ij},$$

где α_{ij} – угол между нормалью к поверхности подложки и направлением движения частицы;

β_{ij} – угол наклона подложки к горизонтали.

В табл.14.1.1 приведены данные по минимальным размерам топологии тонкопленочных структур и соответствующим критическим размерам микрочастиц загрязнений, достигнутых рядом ведущих мировых фирм.

Следует отметить, что вакуумное технологическое оборудование, имеющееся в распоряжении отечественных предприятий радиоэлектронного комплекса (КМОП процесс топологических норм составляет $0,8 \div 1,5$ мкм) может быть успешно использовано в производстве микро- и наномеханических систем [5].

Известно, что при наличии в составе функциональных устройств пар трения, образовавшиеся микрочастицы износа в большинстве случаев при-

обращают электрический заряд, благодаря которому могут мигрировать в вакуумных объемах и осажаться на обрабатываемых полупроводниковых пластинах, снижая коэффициент выхода годных микросхем, который по параметру η "привносимой дефектности" выражается следующей зависимостью [6]:

$$\eta_r = \exp[-DA\nu P(d_{\text{ч}} - d_{\text{кр}})],$$

где D – доза привносимой дефектности;

A – площадь кристалла;

ν – доля площади кристалла, занятая микроструктурами;

$P(d_{\text{ч}} - d_{\text{кр}})$ – доля попавших на кристалл микрочастиц с размером $d_{\text{ч}}$, большим $d_{\text{кр}}$;

$d_{\text{ч}}$ и $d_{\text{кр}}$ – средний и критический размеры микрочастиц.

Отсюда выражение для дозы привносимой дефектности имеет вид

$$[D] = \frac{\ln(1/\eta_r)}{A\nu \cdot \exp(d_{\text{кр}} / d_{\text{ч}})}.$$

Так как в вакуумных камерах технологического и аналитического оборудования работают механические устройства, генерирующие привносимые загрязнения в виде микрочастиц, то, очевидно, и надежность оборудования должна оцениваться с учетом этого фактора. Если обозначить вероятность безотказной работы оборудования $P(t)$, то:

$$P(t) = \prod_{i=1}^K P_i(t) \cdot U[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}],$$

где K – количество механических устройств;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го механического устройства в составе оборудования, размещенного в вакуумной камере;

$\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}$ — текущее и допустимое значение уровня привносимой дефектности;

$U[\Phi(t) - \Phi_{\text{доп}}]$ — функция при $\Phi(t) = \Phi_{\text{доп}}$ принимает нулевое значение, и соответственно $P(t) = 0$.

Таким образом, в случае превышения уровня (дозы) привносимой дефектности D по отношению к допустимому значению при достижении некоторого времени вероятность безотказной работы оборудования принимает нулевое значение и его дальнейшая эксплуатация становится бессмысленной, то есть наибольший эффект повышения надежности вакуумного оборудования может быть достигнут в случае полного исключения привносимой дефектности со стороны действующих функциональных устройств и систем или сведения её к минимуму, при использовании устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Анализ и обобщение работ отечественных и зарубежных специалистов и ученых [6, 7, 8], а также изучение современного состояния высоких вакуумных технологий позволили регламентировать требования, предъявляемые к спектральному составу остаточной газовой среды, и парциальным давлениям составляющих компонент при проведении ответственных вакуумных технологических процессов (рис.14.1.2).

В соответствии с этим, допустимые значения парциальных давлений кислородосодержащих газов при осаждении резистивных и диэлектрических плёнок должно быть не более $(5 \div 10) \cdot 10^{-4}$ Па; при осаждении проводящих плёнок криогенных запоминающих устройств – не более $5 \cdot 10^{-6}$ Па; при формировании плёнок полупроводниковых соединений – не более $5 \cdot 10^{-7}$ Па; при откачке большинства СВЧ-приборов – $10^{-7} \div 10^{-5}$ Па.

Допустимые значения газов, содержащих углеводородные соединения при осаждении упомянутых выше структур, составляют $5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-5}$ Па.

Высокая степень заполнения рабочих объёмов вакуумных технологических камер функциональными устройствами, наличие герметичных вводов движения в технологических объём, периодическое соприкосновение всех внутренних поверхностей и т.д., создают условия возникновения существенных и нестабильных во времени газовых потоков.

Повышение качества вакуумной среды, путем обеспечения минимальных газовых потоков и минимальной привносимой дефектности от

Таблица 14.1.1

Минимальные размеры топологии тонкоплёночных структур и соответствующие им критические размеры микрочастиц загрязнения (указаны в мкм)

Фирма	Разрешение (по поверхности/эффективное), мкм		Критический размер микрочастиц, мкм	
	2000 г.	2015 г.	2000 г.	2015 г.
FUJITSU	0,25/0,18; 0,35/0,28; 0,5/0,45	0,060	0,022; 0,032; 0,048	0,007
HITACHI	0,18/0,16; 0,2/0,18; 0,35/0,28; 0,4/0,35	0,065	0,016; 0,019; 0,032; 0,038	0,006
LG SEMICON	0,4/0,3	0,12	0,038	0,010
National Semiconductor	0,22/0,18	0,1	0,02	0,010
SIEMENS	0,25/0,22; 0,35/0,25; 0,5/0,3	0,1	0,023; 0,036; 0,05	0,009
Taiwan Semiconductor Manufacturing (TSMC)		0,080; 0,065		0,010; 0,008
Texas Instrument	0,23/0,18; 0,32/0,22; 0,42/0,35	0,080	0,02	0,008
® INTELL		0,045		0,005



Рис.14.1.2. Контролируемые вакуумные среды

микрочастиц, может быть достигнуто рациональным проектированием рабочих камер и внутрикамерных вакуумных устройств, в том числе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием, обзор, анализ и конструктивные особенности которых представлен ниже.

14.2. Вакуумное технологическое и аналитическое оборудования с функциональными устройствами бесконтактного магнитного взаимодействия

В разделе рассмотрено современное вакуумное технологическое и аналитическое оборудование в котором применяются УБМВ.

Разработанная в ЗАО «Научное и технологическое оборудование» (г. Санкт-Петербург) установка STE EB71 [9], представляющая собой полностью автоматизированную станцию электронно-лучевого нанесения высококачественных тонкоплёночных композиций в сверхвысоком вакууме, показана на рис.14.2.1.

Станция разработана в идеологии "lab to fab" и ориентирована как на интенсивные исследования и разработки (R&D), так и на мелкосерийный выпуск продукции в составе пилотной производственно-технологической линии.

В конструкцию установки заложена возможность комплексования и встраивания в состав роботизированных вакуумно-технологических кластерных систем.

Особенности конструкции установки:

- Безмаслянная система откачки на основе производительного ионного насоса 500 л/с со встроенной азотной криопанелью/титановым испарителем либо крионасос.
- Рабочая камера из нержавеющей стали с уплотнениями типа ConFlat с интегрированным водяным охлаждением стенок.
- Три пространственно разнесённых двухпозиционных кварцевых толщинометра, позволяющих в реальном времени оценивать несимметричность диаграммы распыления либо проводить индивидуальную калибровку датчиков на выделенные материалы.

- Водяной экран для предотвращения запыления камеры распыляемыми материалами, а также сбора и утилизации продуктов распыления.
- Манипулятор для установки держателей подложек с вращением, а также возможностью изменения расстояния подложка-испаритель в пределах 250÷400 мм.
- Автоматизированный передающий манипулятор с минимальным количеством образующихся микрочастиц износа.
- Автоматизированный процесс откачки установки и проведения процесса нанесения тонкоплёночных композиций.

Автоматизированный передающий манипулятор установки выполнен на основе устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием.

На рис.14.2.2 представлена сверхвысоковакуумная установка для реализации метода спектроскопии обратнорассеянных ионов низких энергий [10]. Метод основан на регистрации потерь энергии первичных ионов, упругоотражённых от атомов исследуемой поверхности. Величина потерь энергии однозначно связана с массой атомов поверхности.

Для загрузки исследуемых образцов и их замены на держателе, в конструкции установки использован сверхвысоковакуумный манипулятор, выполненный на основе устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием и имеющий ход перемещения 600 мм.

На основании Соглашения о содружестве, группой российских приборостроительных компаний, реализуется проект (Программа «НаноФаб»). Благодаря кооперации в рамках проекта, силами отечественного приборостроения, разработан нанотехнологический комплекс объединяющий в единую сверхвысоковакуумную систему набор технологических модулей для групповых (молекулярно-пучковая эпитаксия) и локальных (методы фокусированных ионных пучков, сканирующей зондовой микроскопии и др.) воздействий с возможностью прецизионного транспортирования и позиционирования образцов [11]. Макет нанотехнологического комплекса представлен на рис.14.2.3.

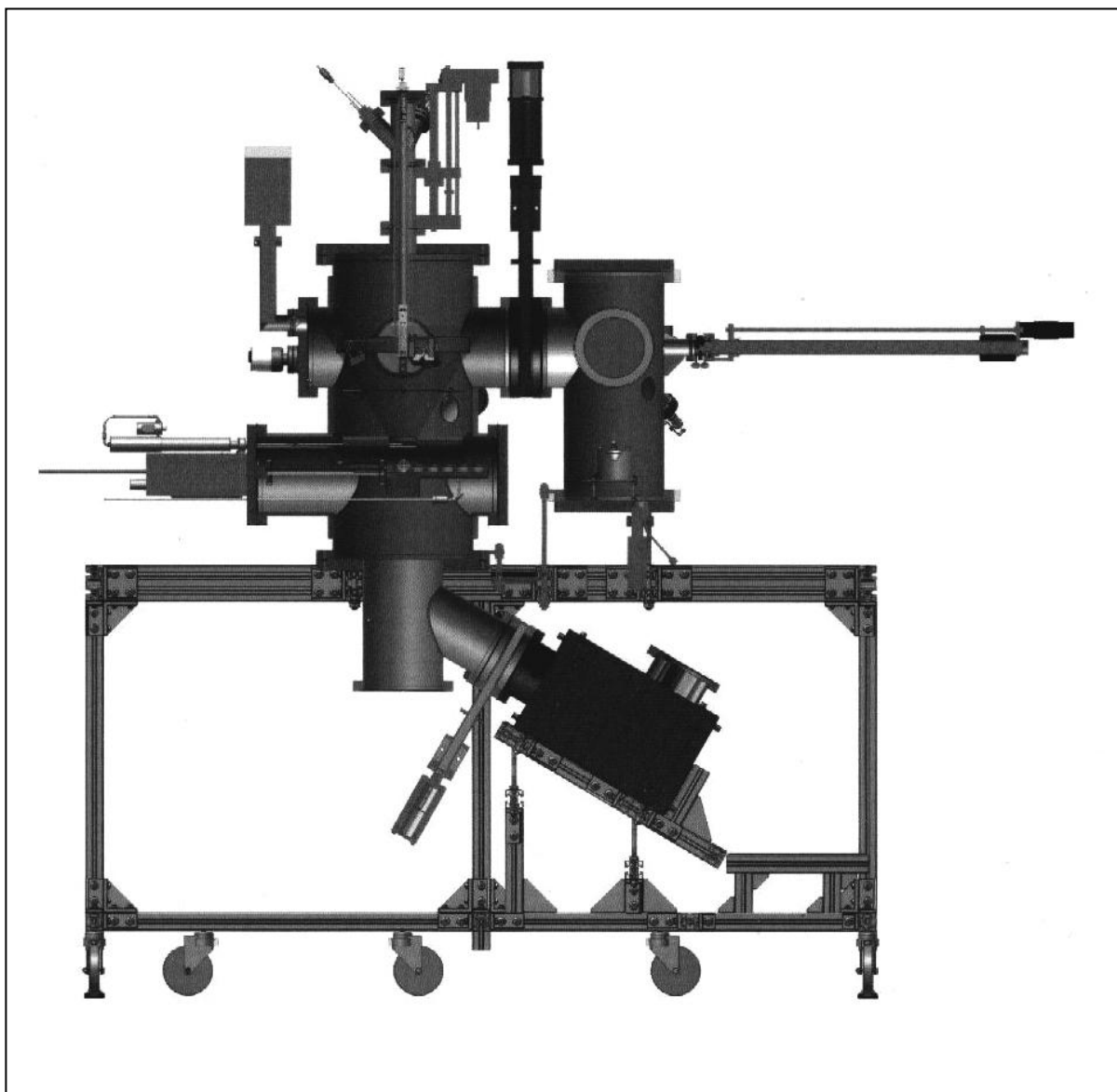


Рис.14.2.1. Автоматизированная станция электронно-лучевого нанесения высококачественных тонкопленочных композиций в сверхвысоком вакууме, предназначенная для встраивания в состав роботизированных вакуумно-технологических кластерных систем

Как видно из рисунка, в комплексе используется вакуумно-транспортная система с внутрикамерными роботом и передающими манипуляторами, которые целесообразно выполнять на основе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

ФГУП СКБ ИРЭ РАН (г. Фрязино, Московская обл.) разработана сверхвысоковакуумная установка финишной сборки электронно оптических преобразователей (ЭОП), используемых в приборах ночного видения [12].

Установка состоит из модулей загрузки, активации, герметизации, стоек питания и управления. Разработка может быть укомплектована беспылевым азотным боксом для обработки фотокатодного устройства (ФКУ) и загрузки его в контейнер с последующей установкой контейнера в камеру загрузки.

Особенности конструкции установки:

- Одновременная загрузка четырех ФКУ, в герметичном контейнере, в загрузочную камеру.
- Термическое обезгаживание ФКУ в камере активации.
- Последовательное активирование фотокатода в камере активации.
- Визуальный контроль однородности фотоэлектронной эмиссии фотокатода.
- Загрузка и термическое обезгаживание двенадцати корпусов с микроканальными пластинами (МКП) и экранами в камере герметизации.
- Одновременное электронное обезгаживание четырех МКП.
- Цезирование корпусов ЭОП.
- Перенос фотокатодного узла из камеры загрузки в камеру активации и из камеры активации в камеру герметизации.
- Перенос ЭОП с позиции на карусели в позицию герметизации.
- Одновременная герметизация двух ЭОП независимо от процесса электронного обезгаживания МКП.

Для загрузки объектов сборки, в сверхвысоковакуумном оборудовании для сборки ЭОП, использованы передающие манипуляторы на основе УБМВ.

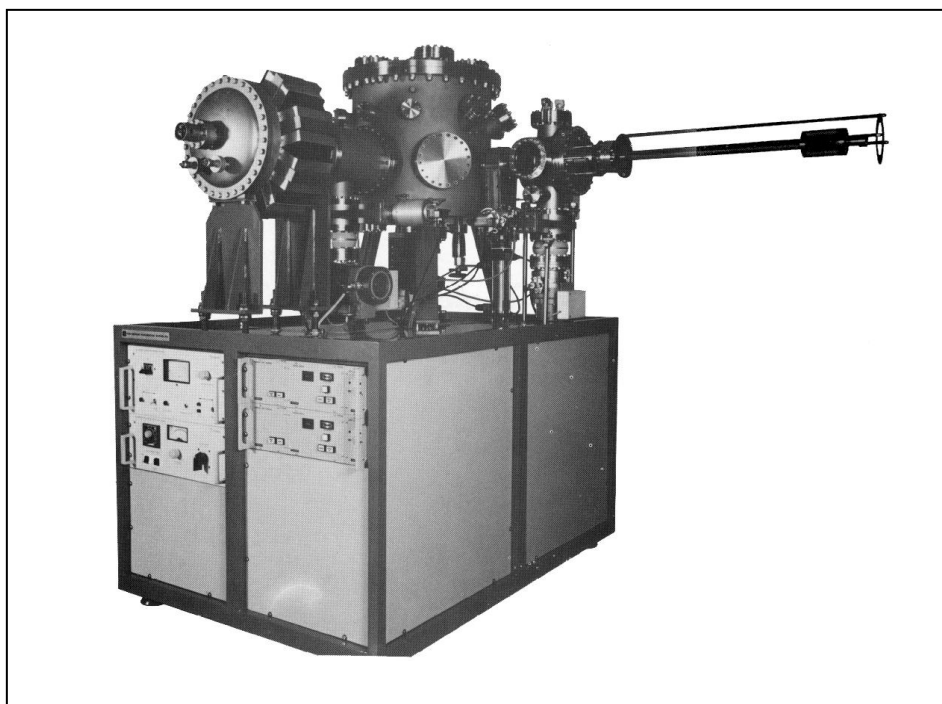


Рис.14.2.2. Сверхвысоковакуумная установка спектроскопии обратнорассеянных ионов

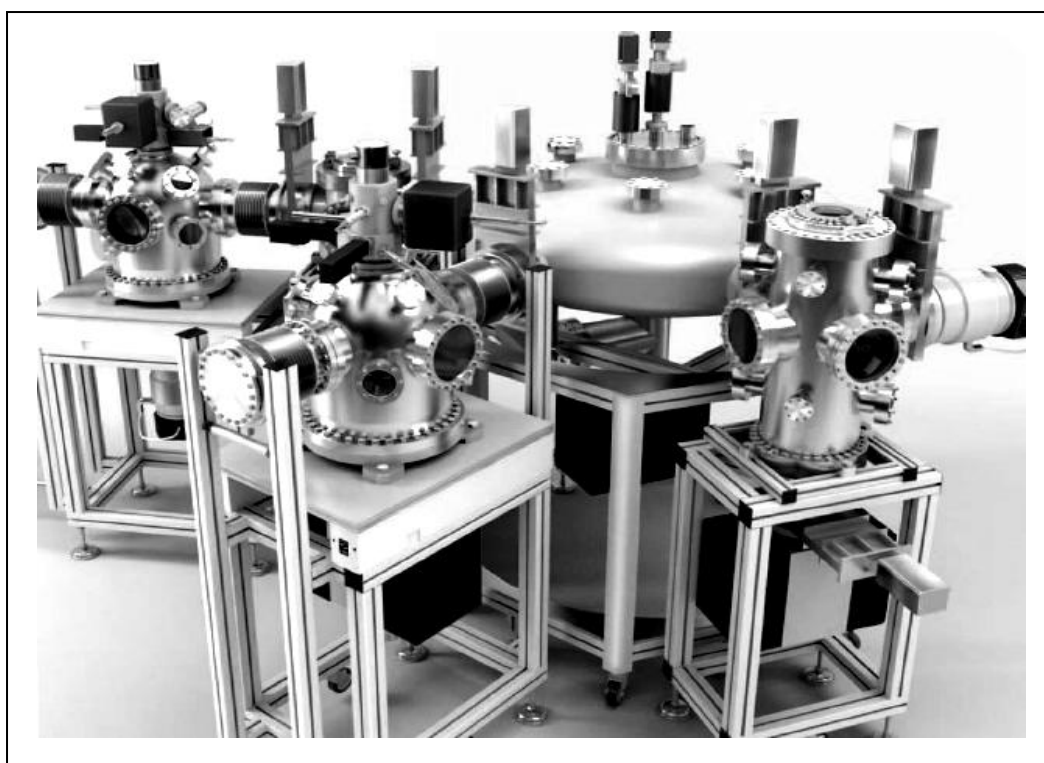


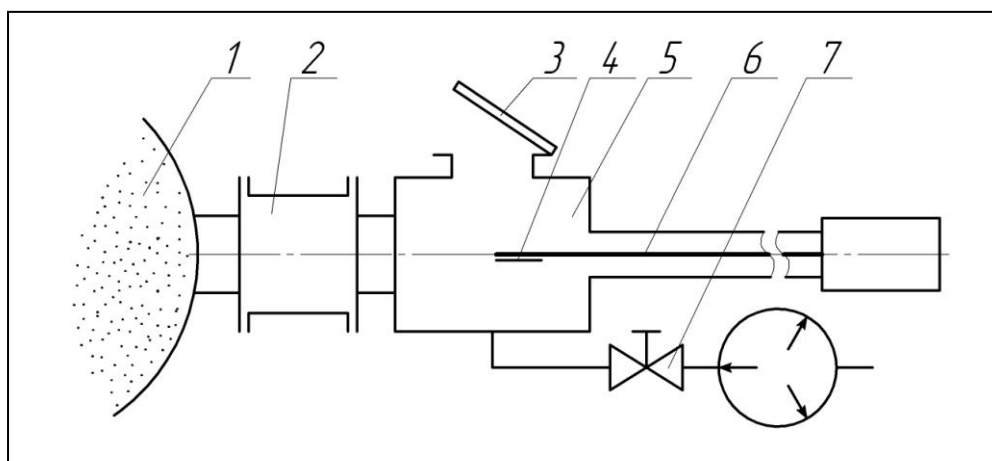
Рис.14.2.3. Нанотехнологический комплекс на базе платформы «НаноФаб-100» (макетный образец)

На рис.14.2.4 представлены схемы работы загрузочного шлюзового устройства [13], предназначенного для аналитико-технологических и технологических модулей сверхвысоковакуумных комплексов молекулярно-лучевой эпитаксии.

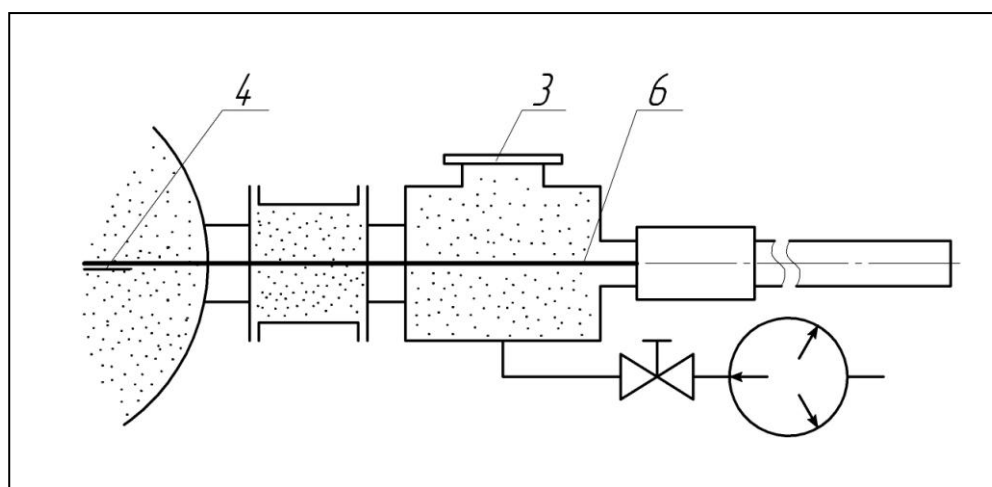
Загрузочное шлюзовое устройство содержит рабочую камеру 1, шиберные затворы 2, крышку люка 3, подложку 4, камеру загрузки 5, передающий манипулятор 6, вакуумный вентиль 7. Передающий манипулятор 6 выполнен на основе УБМВ и шариковой направляющей. Магнитная часть передающего манипулятора 6 выполнена с возможностью её отсоединения во время обезгаживающего высокотемпературного прогрева.

Лазерное вакуумное технологическое оборудование [14] пока ещё не нашло широкого применения в промышленности, но целый ряд преимуществ импульсного лазерного формирования тонких плёнок позволяет рассматривать его как перспективное. По сравнению с молекулярно-лучевой эпитаксией, метод лазерного испарения характеризуется более высокими плотностью пара в импульсе и энергией частиц, что делает возможным получение сплошных эпитаксиальных плёнок сверхмалых (до 2 нм) толщин при сохранении состава пленки близким к исходному материалу. Схема вакуумной технологической камеры установки лазерной эпитаксии, разработанной в НИИ «Полус» (г. Москва) представлена на рис.14.2.5. В конструкции использованы функциональные элементы на основе УБМВ.

Установка полунепрерывного действия для нанесения тонких пленок в вакууме [15], представленная на рис.14.2.6 состоит из трех частей: двух шлюзовых камер для загрузки 12 и выгрузки 3, кассет 4 и рабочей камеры 8. Каждая камера имеет свои индивидуальные форвакуумную и высоковакуумную системы, состоящие из форвакуумного насоса 1 с сорбционной ловушкой 2 и высоковакуумного паромасляного насоса 13 с азотной ловушкой, размещенной между насосом и затвором. Измерение вакуума в камерах осуществляется с помощью термодатных и ионизационных дат-



а)



б)

Рис.14.2.4. Схемы работы загрузочного шлюзового устройства для аналитико-технологических и технологических модулей: а – подача подложки в камеру загрузки; б – передача подложки в рабочую камеру

чиков 10 и соответствующей регулирующей системы 6.

Принцип работы установки заключается в следующем. Вначале откачивается остаточный газ из всей установки, а затем при закрытых затворе 1 и шибере 2 напускается воздух через магнитный натекаль в камеру 12. После её развакуумирования кассета помещается на направляющие планки. При достижении высокого вакуума кассета с помощью магнитной

катушки 5 переводится в рабочую камеру 8. Транспортное устройство 7, обеспечивая равномерное передвижение кассеты, проводит ее над нагревателем 11, состоящим из ИК-ламп, для увеличения адгезии наносимых пленок, а затем вводит в камеру с двумя узкими щелями для нанесения пленки. Осаждение пленок осуществляется с помощью электронно-лучевого испарителя с медным водоохлаждаемым тиглем 9 в который непрерывно по мере распыления подается вещество в технологическую зону. После нанесения пленки на подложку кассета с помощью магнитных катушек извлекается из рабочей камеры в камеру выгрузки 3.

В работающей установке все время поддерживается высокий вакуум, чтобы исключить попадание атмосферного воздуха из камер загрузки и выгрузки в рабочую камеру. Для этих целей все камеры разделены между собой высоковакуумными шиберами, а от форвакуумной и высоковакуумной линий отделены затворами, клапанами магнитными (КМ), вентилями с электроприводом (ВЭП) и с ручным приводом (ВРП). Напуск воздуха в камеры и механические насосы осуществляется натекателями электромагнитными (Н) и ручными (НР).

При создании сверхвысокого вакуума важное значение имеет первоначальный прогрев установки. Последующие прогревы при работе в диапазоне давлений $10^{-7} \div 10^{-8}$ Па не обязательны, за счет чего время полного цикла сокращается до 3...2 ч, включая прогрев и получение предельного разрежения. На рис.14.2.7. представлен типовой сверхвысоковакуумный растровый электронный оже-спектрометр с послойным анализом [16].

Установка имеет в своем составе манипулятор для загрузки образцов на основе УБМВ поступательного движения и юстировочный манипулятор с вводом вращательного движения на основе УБМВ.

Производительность установки рентгенолитографии [17], вакуумно-кинематическая схема которой приведена на рис.14.2.8, зависит, в основном, от мощности источника и чувствительности рентгенорезистов.

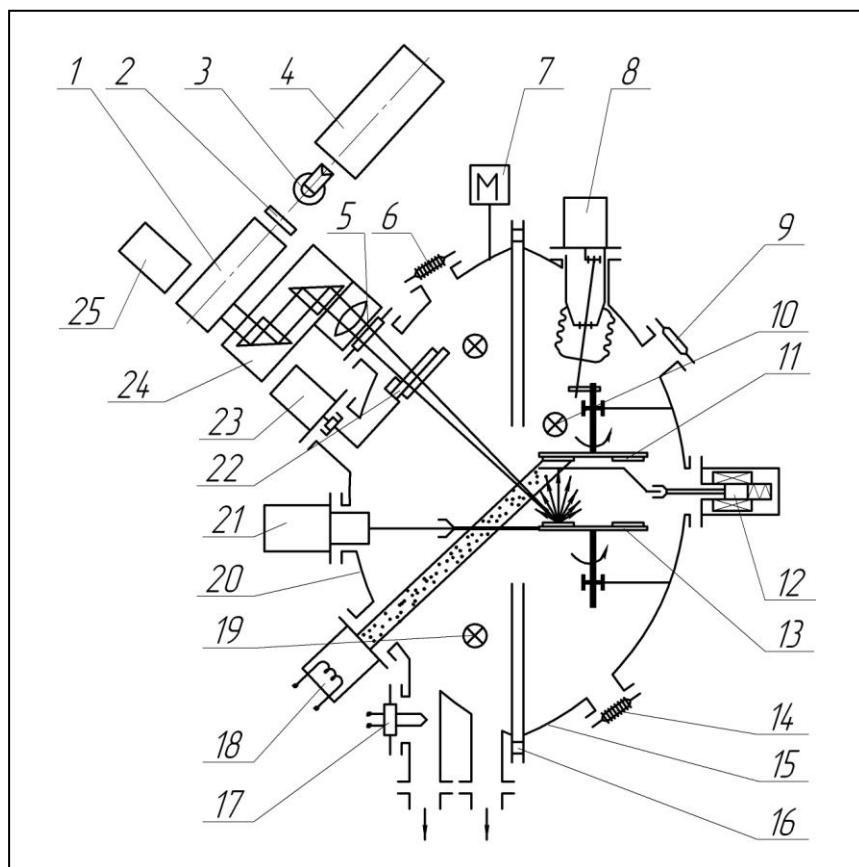


Рис. 14.2.5. Вакуумная технологическая камера установки лазерной эпитаксии: 1 – телескопическая труба; 2 – пластина; 3 – привод шторки; 4 – лазерный излучатель; 5 – оптический ввод; 6,14 – электрические вводы; 7 – манометрический датчик; 8- ввод вращения карусели подложек; 9 – смотровое окно; 10 – нагреватель подложек; 11 – карусель подложек; 12 – магнитный привод заслонки; 13 – карусель мишеней; 15 – крышка камеры; 16 – уплотнительная прокладка; 17 – термопара; 18 – ионная пушка; 19 – лампа нагревателя технологической камеры; 20 – технологическая камера; 21 – привод смены мишеней; 22 – прозрачный экран; 23 – привод вращения экрана; 24 – привод сканирования; 25 – монокулярная насадка

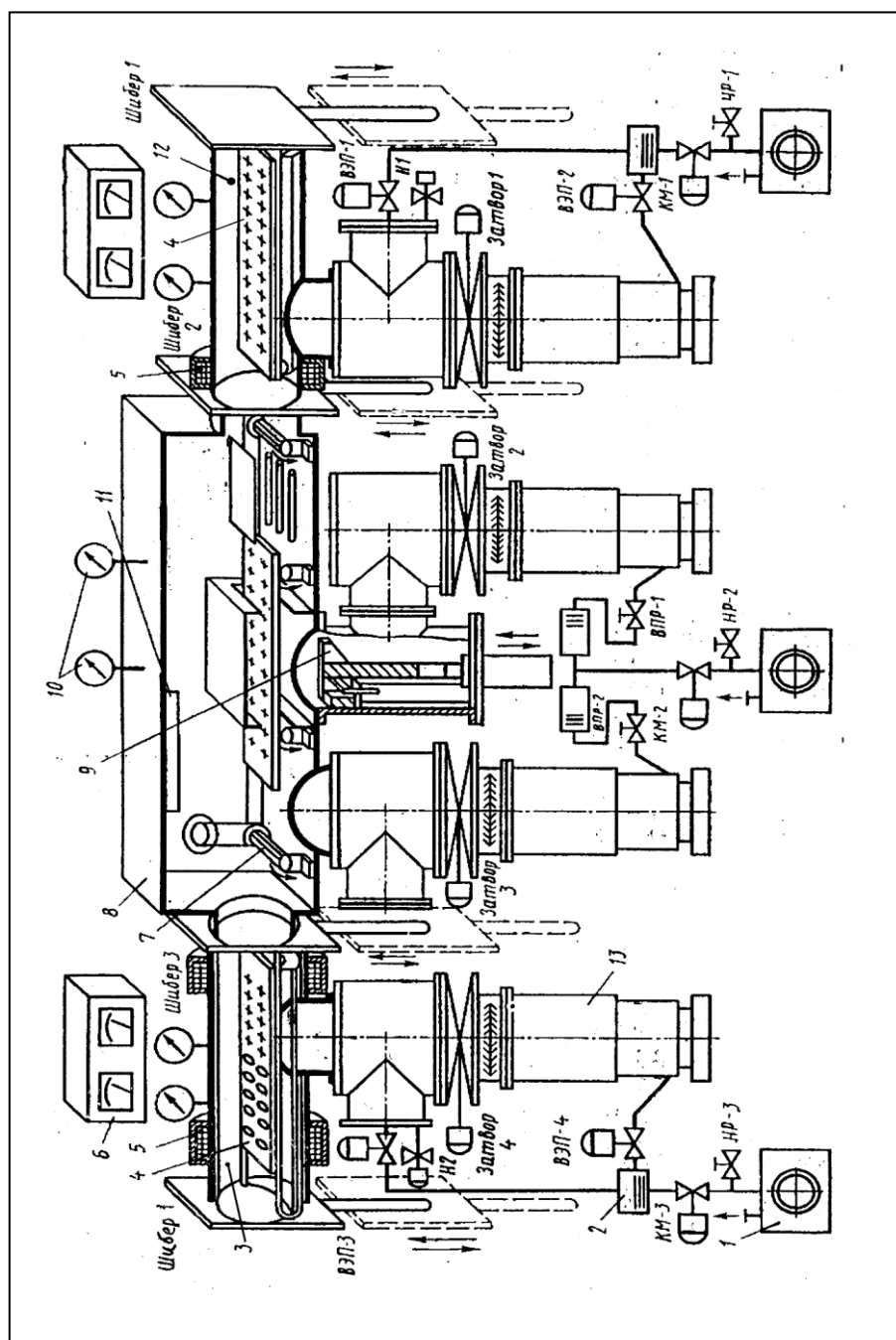


Рис.14.2.6. Схема установки полунепрерывного действия для нанесения пленок: 1 – форвакуумный насос; 2 – ловушка; 3, 12 – шлюзовые камеры; 4 – плоская кассета с подложками; 5 – магнитные катушки передвигающие кассету; 6 – вакуумметр; 7 – транспортное устройство; 8 – рабочая камера; 9 – тигель; 10 – датчик; 11 – нагреватель ИК-нагрева; 13 – высоковакуумный насос

Расчет максимальной входной мощности вращающейся мишени производится по формуле

$$W_{\max} = \frac{\pi}{2} \frac{T_m}{\sqrt{\frac{2r_{из}}{F_{из} \cdot n_{из} \cdot k_{и} \cdot C_p \cdot \gamma} \left(1 + \frac{d_{и}}{a} \sqrt{\frac{r_{из} \cdot n_{из}}{2F_{из}}} \right)}},$$

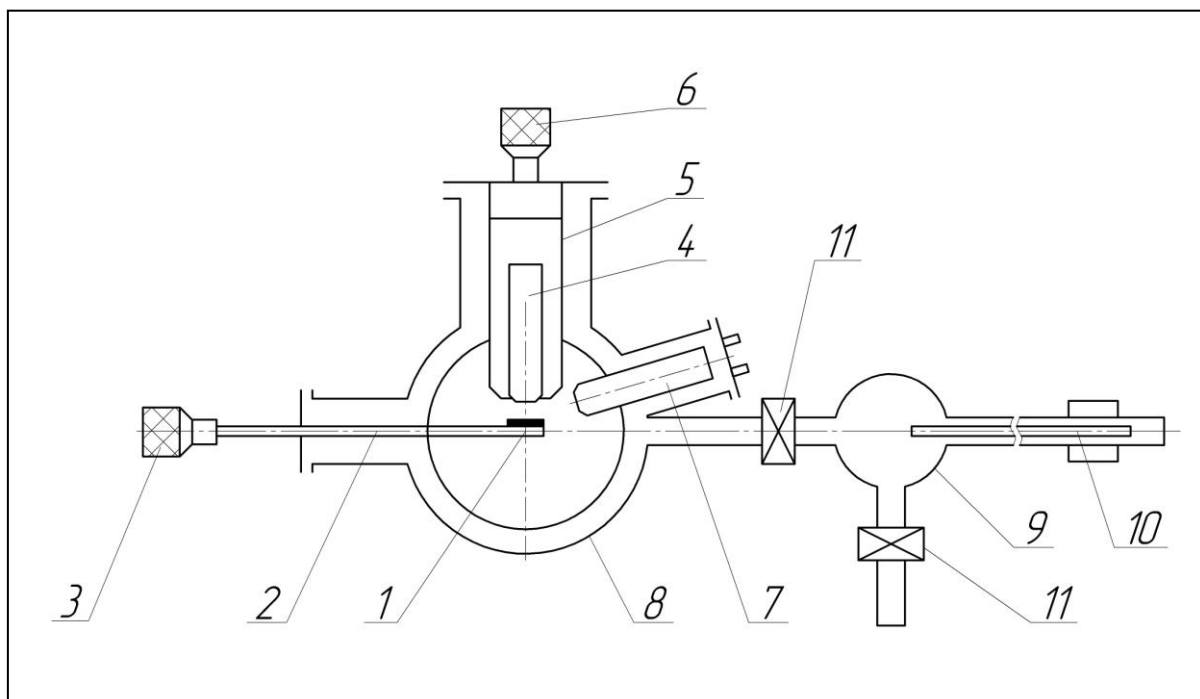


Рис.14.2.7. Сверхвысоковакуумный растровый электронный оже-спектрометр с послойным анализом: 1 – исследуемый образец; 2 – шток манипулятора юстировки образца; 3 – юстировочный манипулятор; 4 – электронная пушка; 5 – энергетический анализатор; 6 – манипулятор регулировки относительного энергетического разрешения анализатора; 7 – ионная пушка; 8 – аналитическая камера; 9 – камера загрузки; 10 – манипулятор загрузки образцов; 11 – шиберные затворы

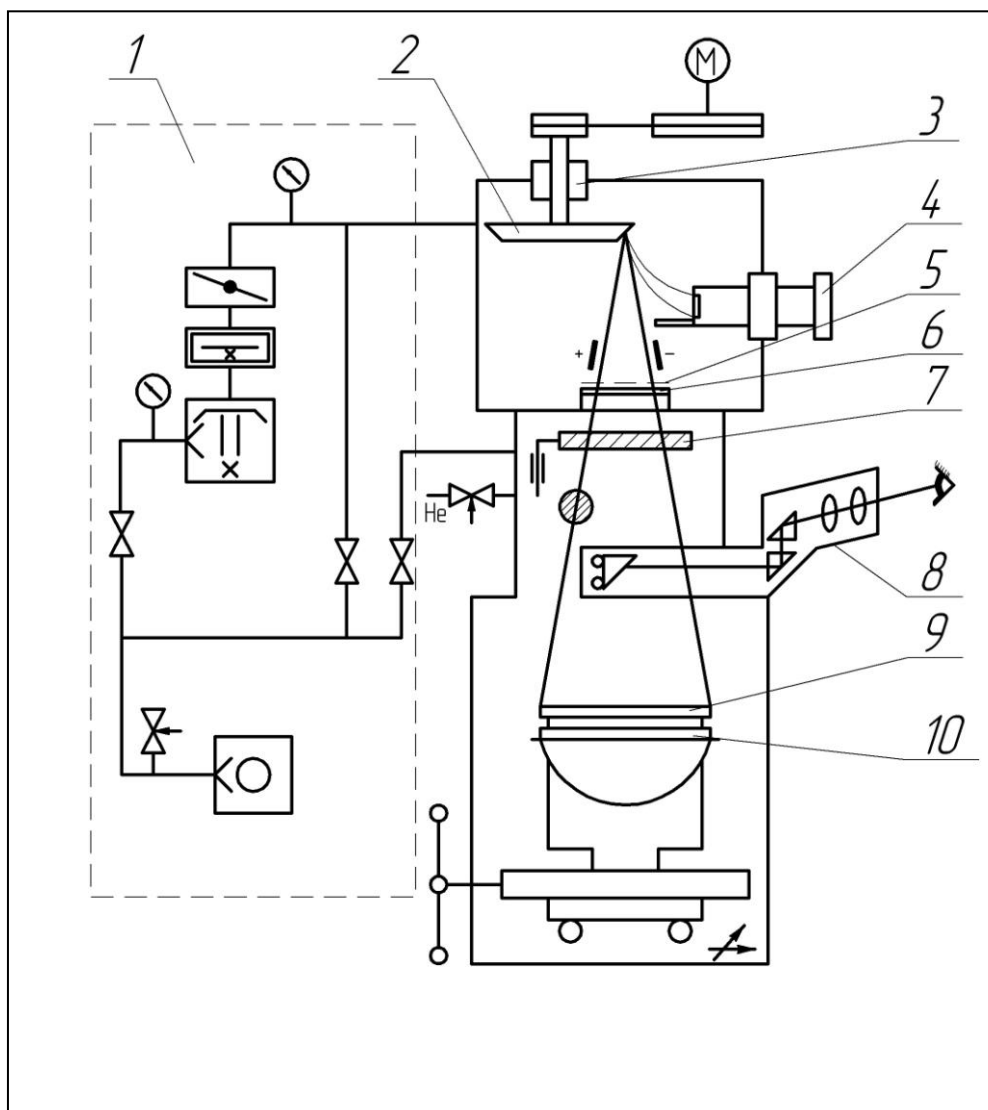


Рис.14.2.8. Вакуумно-кинематическая схема рентгено-литографической установки совмещения и экспонирования: 1 – вакуумная система; 2 – анод; 3 – магнито-жидкостной ввод вращения; 4 – электронно-оптической система; 5 – сетка; 6 – мембрана; 7 – заслонка; 8 – микроскоп; 9 – рентгеношаблон; 10 – пластина

где: T_m – максимальная рабочая температура поверхности излучателя; $d_{из}$ – толщина излучателя в зоне воздействия электронного пучка; $F_{из}$ – диаметр излучателя; $n_{из}$ – частота вращения излучателя; $r_{из}$ – радиус источника излучения; a^2 – температуропро-

водимость излучателя; C_p – удельная теплоемкость излучателя;
 $k_{\text{и}}$ – теплопроводность излучателя; γ – плотность материала излучателя.

Из приведенной зависимости следует, что увеличить мощность на аноде можно, лишь увеличивая его диаметр и число оборотов вращения. При разработке конструкции привода анода за основу было принято увеличение числа оборотов до 6000...10000 в минуту и диаметра излучающей дорожки в рабочей камере с давлением не хуже $6,65 \cdot 10^{-4}$ Па. Привод вращения должен давать минимальные вибрации и не загрязнять объем камеры.

Уплотнение высокооборотного вала вращающегося анода установки рентгенолитографии является наиболее ответственным узлом камеры излучения, так как от его конструкции зависит поддержание требуемой атмосферы в рабочем объеме и сохранение работоспособности электронной пушки.

Конструкция вращающегося анода установки может быть выполнена как с магнитожидкостным вводом вращения, так и вводом на основе УБМВ.

На рис.14.2.9. представлена разработанная ООО «Изовак» (Республика Беларусь, г. Минск) технологическая линия горизонтального типа IzoLine Н 1000 применяемая для нанесения ИТО-покрытия на стеклянные подложки методом магнетронного распыления [18].

Особенности линии:

- Отсутствие ионной очистки перед нанесением покрытий.
- Транспортная система организована на днище камеры с отсутствием трущихся частей в зоне напыления.
- Тип оборудования: in-line, т.е. движение подложек по конвейеру.
- Обработка по нескольку подложек на кассете.
- Горизонтальное расположение подложек во время обработки.
- Одноступенчатое шлюзование.
- Применение газовых затворов между технологическими станциями.

- Движение поддонов сплошной лентой.
- Модульное построение оборудования.
- Применение криогенных и турбомолекулярных насосов.
- «Чистая» транспортная система.

Технические характеристики:

- Занимаемая площадь – 21,6×3,9 м.
- Размер подложкодержателя – 625×1000 мм.
- Минимальное время цикла – 32 с.
- Распылительная система – 1 АС магнетрон 1000×100 мм, 35% использования мишени.
- Рабочее давление – $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Время достижения рабочего давления – 40 мин. (в осушенном воздухе или азоте).
- Предельный вакуум – $5 \cdot 10^{-4}$ Па (время достижения – 4 ч).

В конструкции технологической линии, среди прочих, использованы функциональные элементы с магнитным взаимодействием.

Наряду с разработкой наиболее перспективных направлений в производстве изделий высоких технологий в последнее время получили развитие направления космического производства [19].

Одним из основных направлений в области космического производства является получение высококачественных полупроводниковых материалов и полуфабрикатов изделий из них для приборов электронной техники, производство которых в космосе может оказаться наиболее рентабельно.

Также перспективным направлением является получение оптических материалов в космосе. Оптические элементы высокого качества, полученные в космических условиях, могут быть использованы для создания гибких зеркал для адаптивной оптики, элементной базы интегральной оптики, оптических элементов с однородным содержанием мелкодисперсных частиц, крупногабаритных астрономических зеркал для телескопов внеатмосферных условий эксплуатации и т.д.

Проект установки «Зона-02» [20] разработан для проведения экспериментов по зонной перекристаллизации материалов, имеющих температуру плавления до 1800°C. Установка работает в полуавтоматическом режиме. Загрузка и выгрузка образцов материалов производится космонавтом-исследователем.

Технологический блок установки разделен на два герметичных отсека (рис.14.2.10). Один отсек, в котором размещены три перемещающиеся с заданной скоростью нагреватели, вакуумируются для обеспечения лучшей теплоизоляции. Температура нагрева контролируется с помощью вольфрамрениевых термопар, встроенных в каждый нагревательный узел. Второй отсек, в который входит загрузочная камера и три рабочие, может либо вакуумироваться, либо заполняться инертным газом.

Образцы материалов имеют металлические наконечники, с помощью которых они закрепляются в рабочей камере. Стенки рабочей камеры изготовлены из прозрачных лейкосапфировых труб. Нагревательные узлы могут перемещаться вдоль рабочих камер с заданной скоростью, посредством приводов на основе устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Основные технические характеристики установки «Зона-02»:

- Количество нагревательных узлов – 3 шт.
- Максимальная температура на нагревателе – 2000 °C.
- Потребляемая мощность – 1500 Вт.
- Диаметр обрабатываемого образца материала – до 30 мм.
- Скорость перемещения нагревателей – 0,5 ÷ 50 мм/ч.
- Ход привода перемещения – 190 мм.
- Газовая среда рабочей полости – вакуум, аргон.
- Масса – 130 кг.

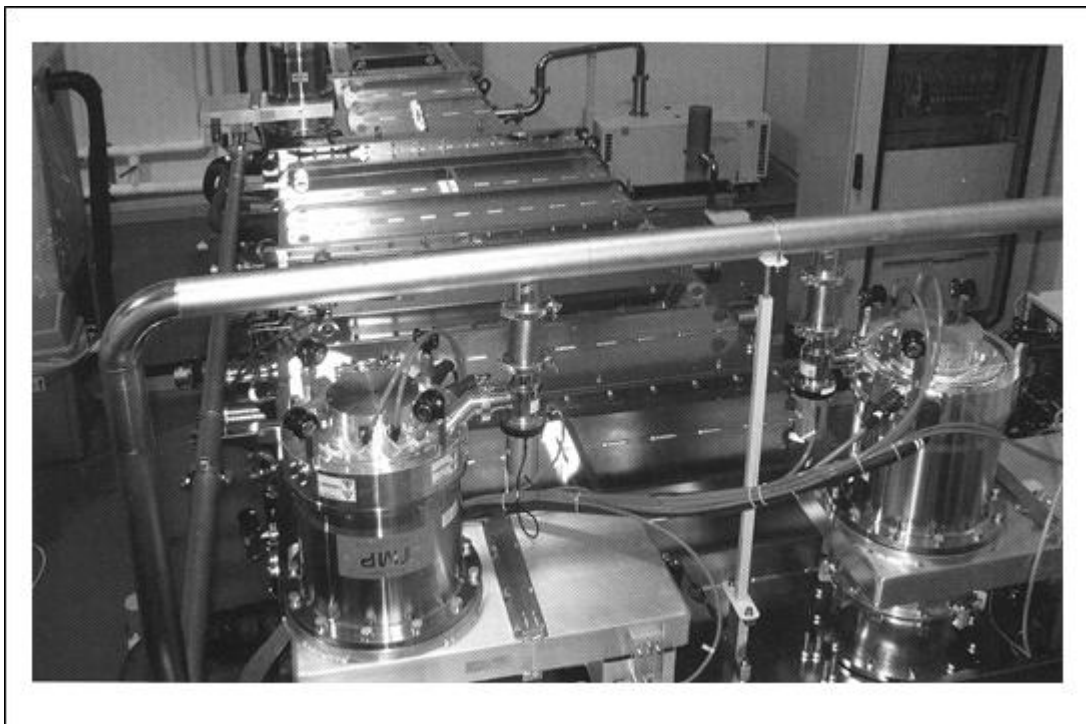


Рис.14.2.9. Технологическая линия горизонтального типа для нанесения ITO-покрытия на стеклянные подложки методом магнетронного распыления

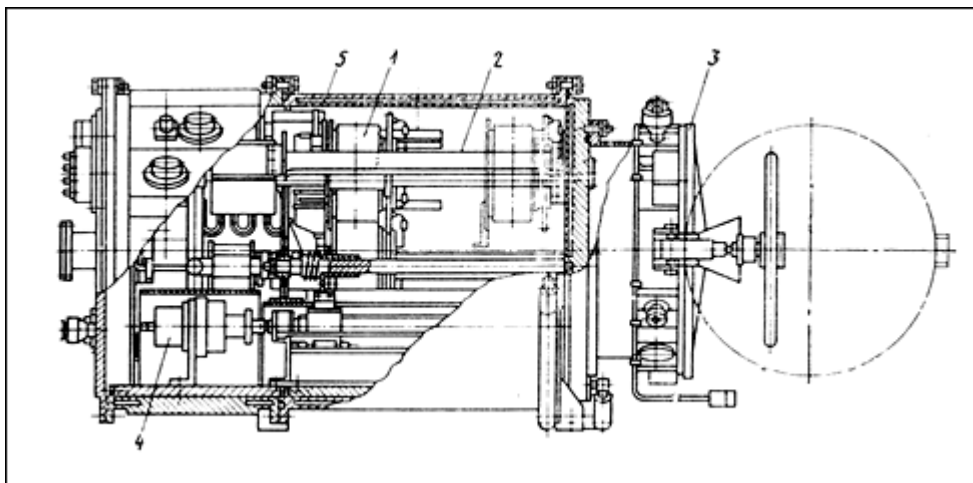


Рис.14.2.10. Схема установки «Зона-02»:
 1 – нагреватель; 2 – сапфировый контейнер;
 3 – загрузочный люк; 4 – привод перемещения нагревательных узлов; 5 – рубашка водяного охлаждения

Анализ современного вакуумного технологического и аналитического оборудования высоких технологий показал, что для повышения его производительности и выхода годных выпускаемых изделий необходимо создание высоконадежных, долговечных и высокоэкологических функциональных внутрикамерных устройств, обеспечивающих: критический размер образующихся микрочастиц от 0,005 до 1 мкм, газовыделение не более $10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$, частоту вращения от 0 до 10^4 об/мин; осевую нагрузку от 0,1 до 50 кН; наработку на отказ не менее 400 часов и выдержку обезгаживающего высокотемпературного прогрева. Рациональными, с этой точки зрения, являются функциональные устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием.

Основными источниками привносимых загрязнений микрочастицами и газовыми потоками в УБМВ являются шарикоподшипники опорных узлов и тонкостенная разделительная оболочка.

Ниже, в разделе 14.3, рассмотрены конструктивные особенности внутрикамерных вакуумных устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием.

14.3. Конструктивные особенности устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Проведенные патентно-лицензионные исследования позволили установить, что первым патентом, полученным на герметичное устройство с бесконтактным магнитным взаимодействием, является Патент США №3092763 (МПК H01d) с приоритетом от 04.06.1963 г.

В патенте предлагается устройство для передачи вращательного движения через плоскую стенку при помощи 2-х П-образных магнитов и двух соответственно расположенных магнитопроводов (рис.14.3.1).

Магнитная связь обеспечивается с помощью двух идентичных устройств, которые расположены по обе стороны стенки и состоят из П-образных магнитов и прямоугольных пластин из мягкого железа, жёстко связанных с магнитом. Пластины расположены перпендикулярно осям, соединяющим полюсы соответствующих магнитов.

Магнитный поток каждого магнита проходит через стенку и замыкается через пластину, относящуюся к другому магниту.

Вакуумный ввод вращательного движения с бесконтактным магнитным взаимодействием, представленный на рис.14.3.2 включает в себя следующие основные части [21]. Во втулке 10 на подшипниках качения установлен ведомый вал 1 с закрепленным на нём якорем 4. В качестве герметизирующего элемента использован стакан 3 из коррозионно-стойкой стали. Толщина стенки стакана, расположенного в магнитном промежутке составляет 0,5 мм. Вакуумная полость стакана герметизирована прокладкой 2. На ведущем валу 6 закреплены башмаки постоянного магнита 5.

Ведомый вал 1 соединен упругой муфтой 7 с валом электродвигателя 8. Корпус ввода вращательного движения прикреплен к стенке 11 вакуумной камеры гайкой 12.

На рис.14.3.3 представлена магнитная муфта-редуктор, предназначенная для передачи вращения в герметизированный объем [22].

Магнитный поток постоянного магнита ротора 1 замыкается через постоянные магниты 5 и 6, установленные на герметизирующем стакане 4 и на зубцах обоймы 3. При этом обойма занимает положение, соответствующее максимальной магнитной проводимости, имеющей место при расположении двух постоянных магнитов 6 обоймы 3 против двух постоянных магнитов 5 стакана 4. При повороте ротора 1 на угол $\varphi_{\text{вх.}}$, равный шагу магнитов, расположенных на стакане 4, обойма 3 поворачивается на угол $\varphi_{\text{вых}}$ соответствующий разности шагов магнитов обоймы и герметизирующего стакана:

$$\varphi_{\text{вх}} = \frac{2\pi}{Z_0}; \quad \varphi_{\text{вых}} = 2\pi\left(\frac{1}{Z_c} - \frac{1}{Z_0}\right),$$

где Z_0 – число магнитов на зубцах обоймы;

Z_c – число магнитов на герметизирующем стакане.

Передаточное число муфты-редуктора:

$$i = \frac{\varphi_{\text{вх}}}{\varphi_{\text{вых}}} = \frac{Z_0}{Z_0 - Z_c}.$$

Применение предлагаемой магнитной муфты-редуктора позволяет с высокой надежностью передавать вращение в герметизированный объем.

Вводы с постоянными магнитами могут иметь множество модификаций. Самая распространенная из них – магнитная муфта. Её статор, собранный из кольцевых постоянных магнитов, находится в атмосфере, а

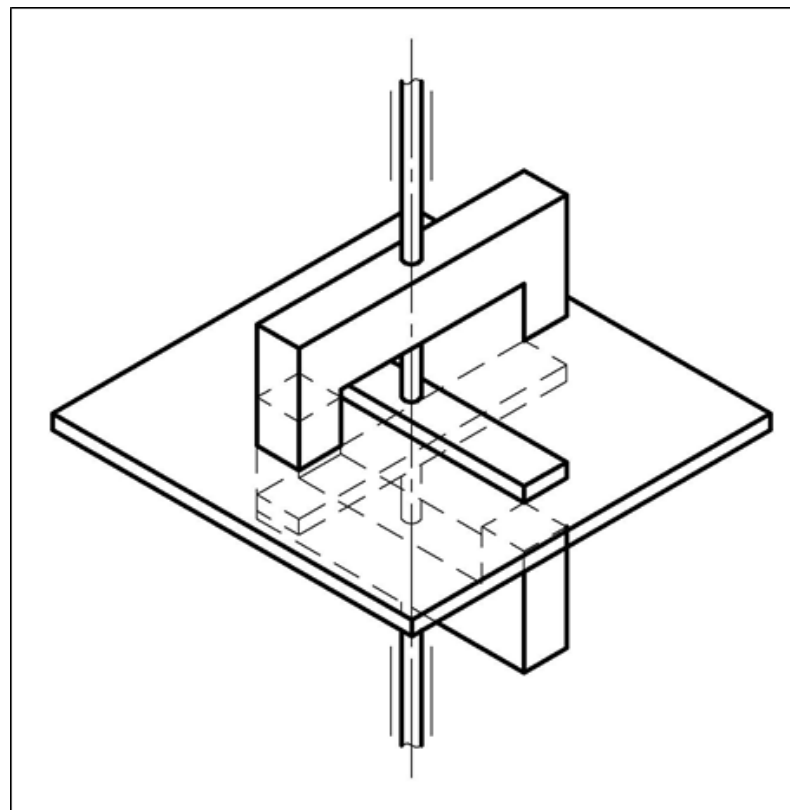


Рис.14.3.1. Устройство для передачи вращательного движения через плоскую стенку при помощи 2-х П-образных магнитов и двух магнитопроводов

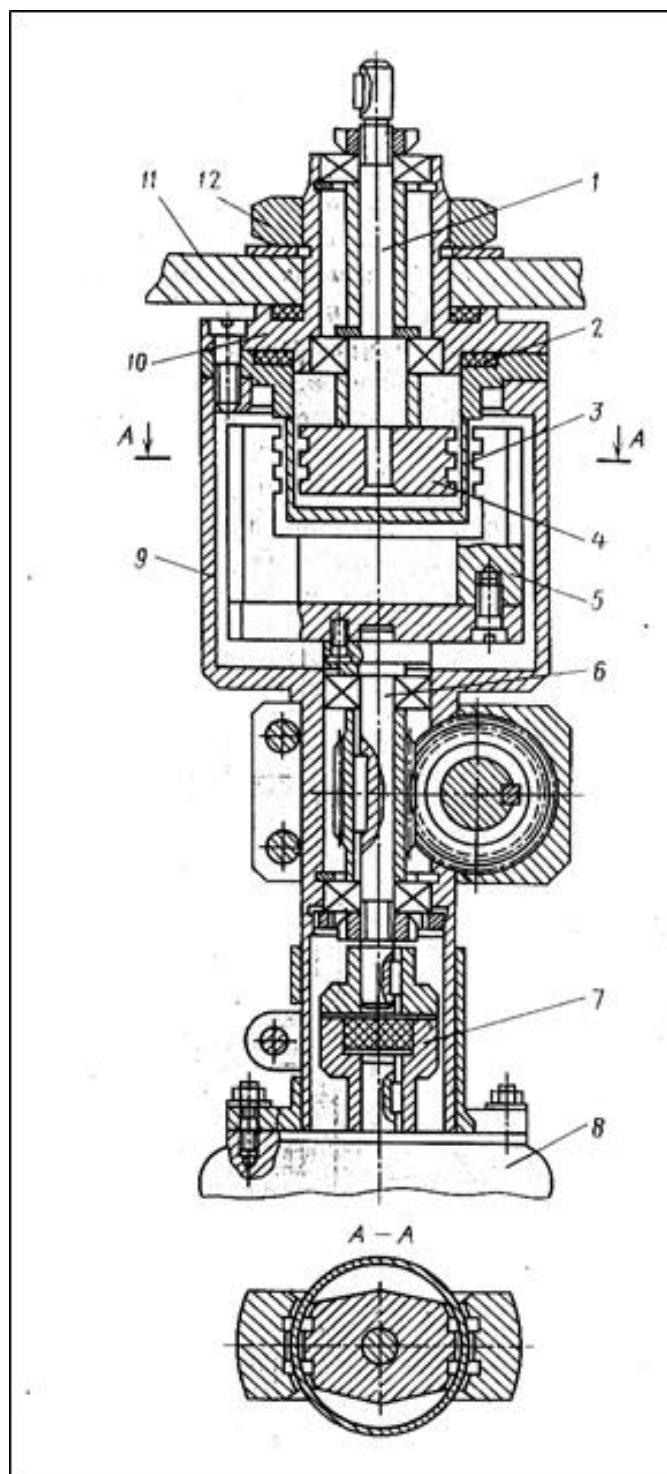


Рис.14.3.2. Вакуумный ввод вращательного движения с бесконтактным магнитным взаимодействием: 1 – ведомый вал; 2 – прокладка; 3 – стакан; 4 – ярмо; 5 – магнит; 6 – ведущий вал; 7 – упругая муфта; 8 – электродвигатель; 9 – корпус; 10 – втулка; 11 – стенка вакуумной камеры; 12 – гайка

ротор – в вакууме. Они также разделены тонкостенной перегородкой. Для передачи движения в вакуум статор приводят во вращение. Движение ротора не синхронно статору.

Модификация ввода с постоянным магнитом для осуществления комбинированного (вращательного и поступательного) движения показана на рис. 14.3.4. Вращение или вертикальное перемещение кольцевого постоянного магнита заставляет вращаться или перемещаться шток находящийся в вакууме.

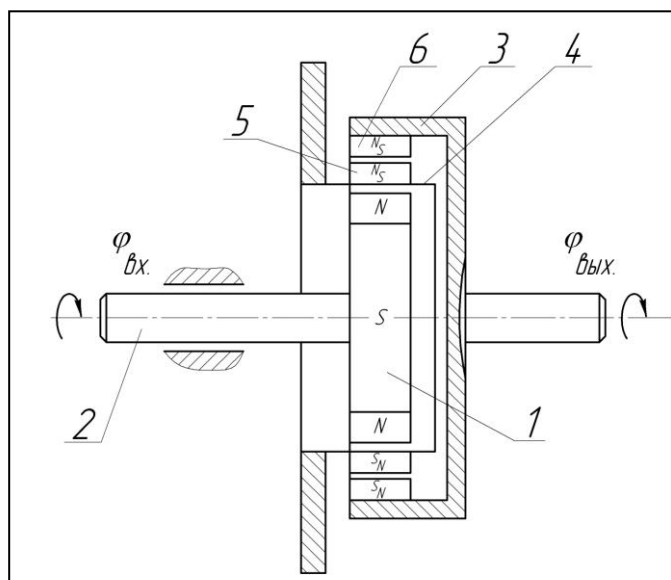
Пример конструкции ввода с электромагнитом представлен на рис. 14.3.5. Якорь, находящийся в атмосфере, при перемещении сообщает качательное движение заслонке, расположенной в вакууме. Модификации магнитных вводов движения в вакуум описаны в работе [23].

Для установок электронной и ионной спектроскопии и молекулярно-лучевой эпитаксии разработан ряд передающих манипуляторов в состав которого входят, в том числе, два типоразмера вакуумных магнитных передающих манипуляторов (рис.14.3.6) [24].

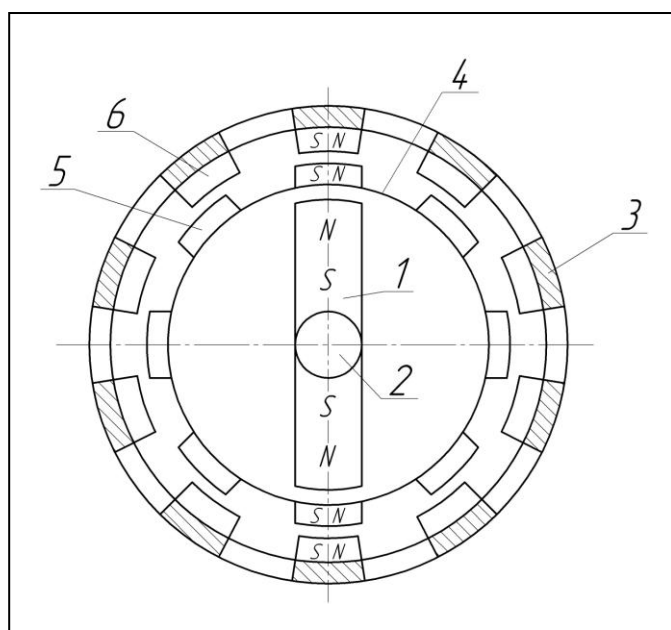
Планетарный резьбовой ввод с магнитной муфтой в качестве источника движения [25] представлен на рис.14.3.7.

Магнитная пара 6 и 5 установлена на герметичный корпус 1 механизма. В отверстии внутреннего магнита 5 размещается охватывающая гайка 4 с кольцевыми канавками. Преобразование вращательного движения магнитов 6 и 5 и гайки 4 в поступательное перемещение винта 2 по направляющей 10 осуществляется за счет промежуточных роликов 3 с нулевой заходностью резьбы. Винт 2 фиксируется от проворота ползуном 9 и шпонкой 8.

Наличие многоточечного контакта в роликовой паре позволяет значительно повысить нагрузочную способность передачи и увеличить точность перемещения. На рис.14.3.8. показан электромагнитный ввод вращения в вакуум, представляющий собой короткозамкнутый асинхронный двигатель,



а)



б)

Рис.14.3.3. Магнитная муфта-редуктор: а – продольный разрез; б – поперечное сечение: 1 – ведущий ротор; 2 – ведущий вал; 3 – обойма; 4 – герметизирующий стакан; 5, 6 – постоянные магниты

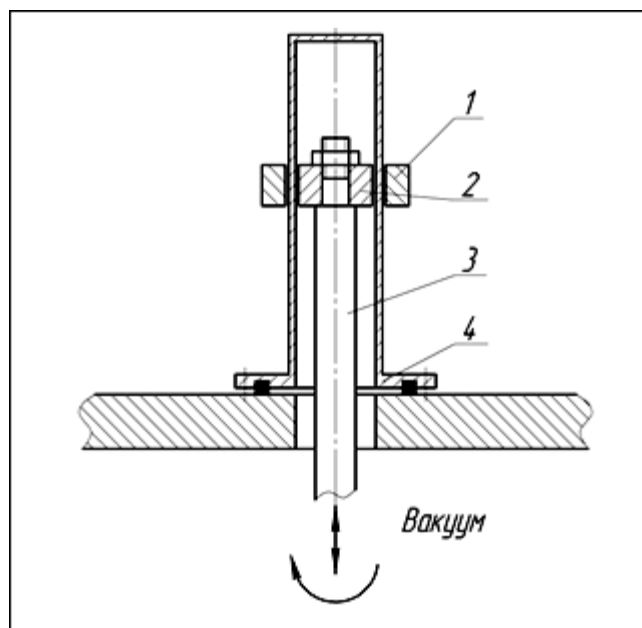


Рис.14.3.4. Бесконтактный ввод движения в вакуум с постоянными магнитами радиального типа: 1 – наружный магнит; 2 – внутренний магнит; 3 – ведомый вал; 4 – герметичная перегородка

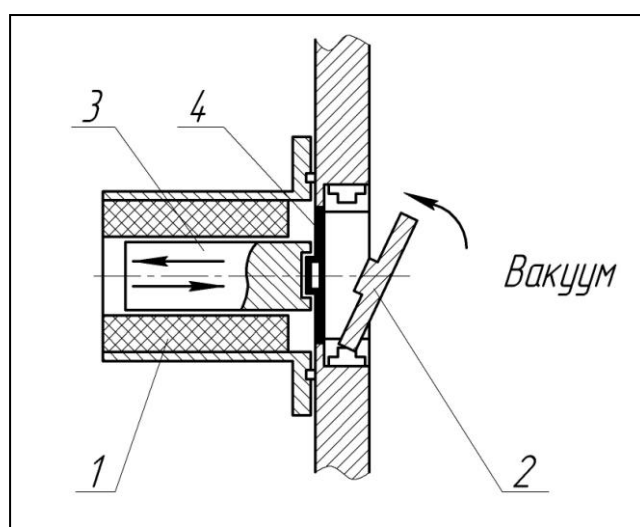


Рис.14.3.5. Бесконтактный ввод движения в вакуум соленоидного типа с якорем в атмосфере: 1 – электромагнитная катушка соленоида; 2 – исполнительное звено; 3 – якорь; 4 – тонкая немагнитная диафрагма

у которого ротор с валом отделены от статора и атмосферы герметичной стенкой (экраном) с глухой втулкой, изготовленных из стали 12X18H10T, внутри расположены подшипники [26]. Охлаждение статора осуществляется водой, протекающей по трубке вмонтированной в корпус статора.

Герметизация экрана в месте соединения с вакуумной камерой достигается резиновым уплотнением. Замена резинового уплотнения металлическим позволит прогревать ввод для обезгаживания, что сделает его пригодным для использования в сверхвысоковакуумных системах. Толщина герметизирующей стенки a должна быть значительно меньше глубины проникновения магнитного поля Δ в материале стенки (т.е. $a/\Delta \ll 1$), так как от соотношения этих величин зависит относительное количество энергии, теряемой на образование вредных вихревых токов.

Конструкция типового ввода вращения на основе магнитной композиции [27] показана на рис. 14.3.9. Ввод состоит из корпуса 1 с расположенным в нем на опорах валом 2, передающим крутящий момент. Герметизация вращающегося вала осуществляется магнитной композицией 3, удерживаемой в зазоре между валом и неподвижными полюсными наконечниками 4 магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом 5. Неподвижные стыки герметизируются прокладками 6 из вакуумной резины.

В качестве жидкости-носителя служит вакуумное масло ВМ-1, ВМ-5 ПФМС-2/5л, ПФМС-13, ФМ-1, 5Ф4Э или М-5Ф4М, а магнитные частицы игольчатой формы вводятся в жидкость в виде порошка Fe_2O_3 или CrO_2 . Поток газа через ввод вращения состоит из паров жидкости-носителя и потока газопроницаемости через магнитную композицию. Давление пара, например масла ФМ-1, при температуре 293 К составляет $1,3 \cdot 10^{-8}$ Па, а масла 5Ф4Э – $1,3 \cdot 10^{-9}$ Па. Поток газонатекания через подвижный контакт практически отсутствует.

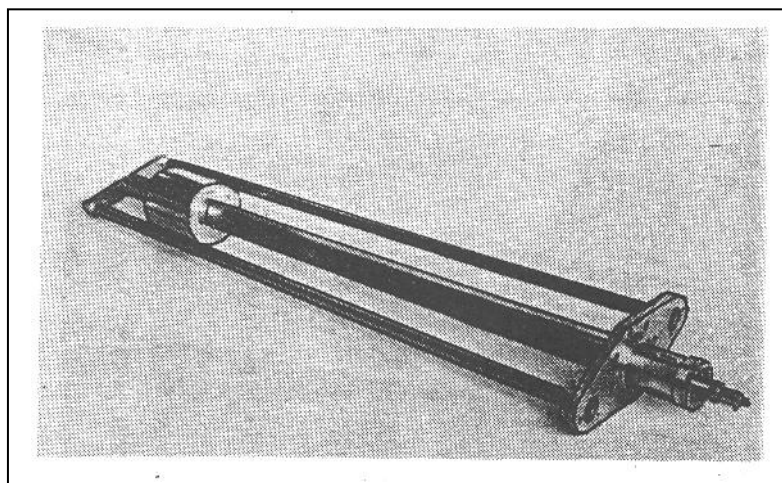


Рис.14.3.6. Вакуумный передающий манипулятор: способ передачи движения в вакуум – магнитный; количество степеней подвижности – 2; ход штока манипулятора – 600 и 1000 мм; вращение вокруг оси – 360°; осевое усилие – не менее 20 Н

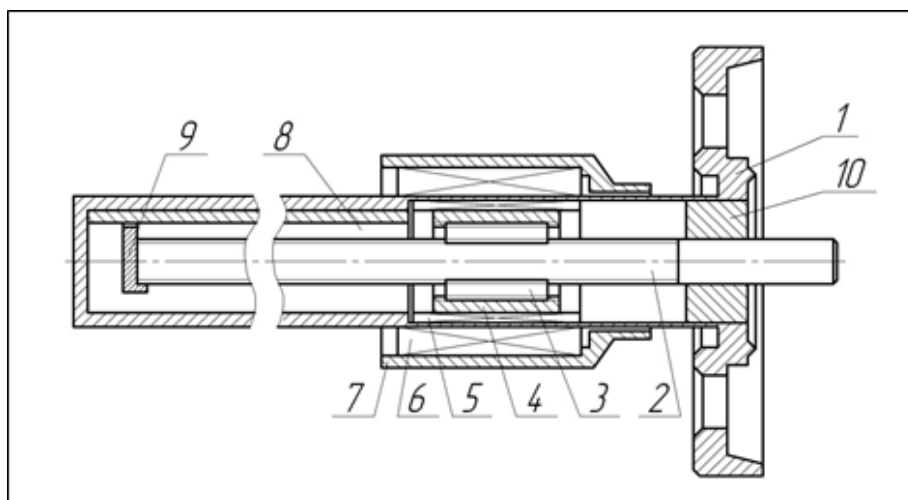


Рис.14.3.7. Планетарный резьбовой ввод движения в вакуум с магнитной муфтой: 1 – герметичный корпус; 2 – винт; 3 – ролики; 4 – охватывающая гайка с кольцевыми канавками; 5 – внутренний магнит; 6 – наружный магнит; 7 – входное звено вращательного движения; 8 – шпонка; 9 – ползун; 10 – направляющая

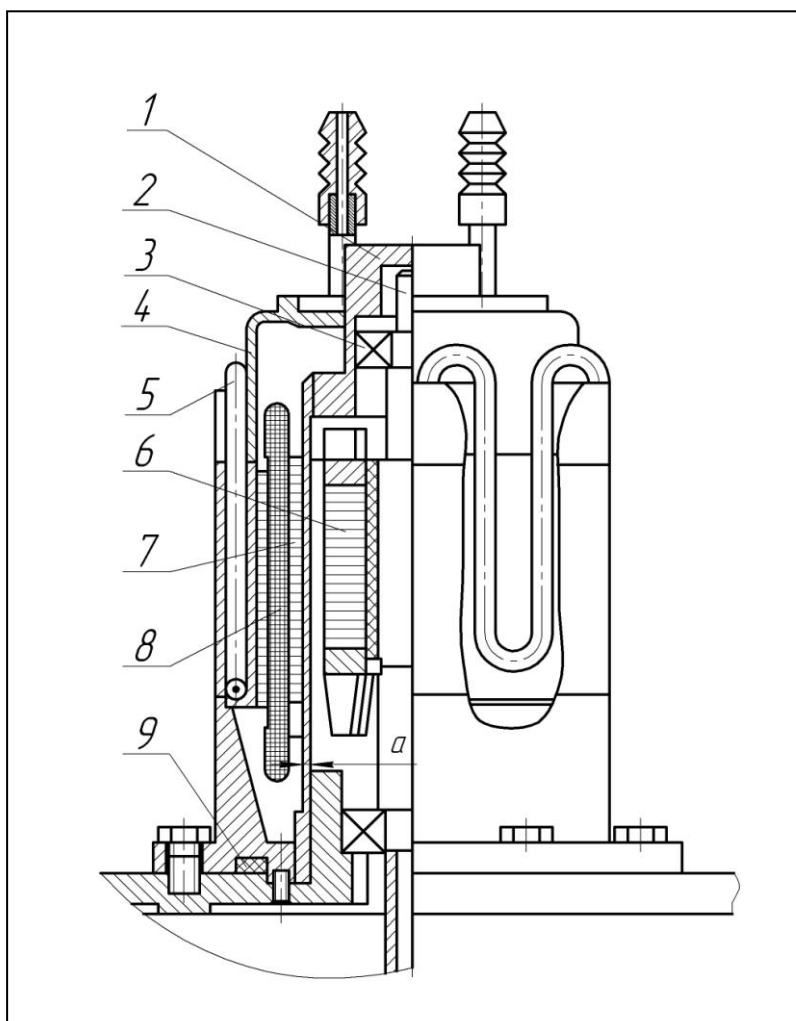


Рис.14.3.8. Электромагнитный ввод вращения в вакуум на базе асинхронного двигателя: 1 – глухой герметичный стакан; 2 – вал двигателя; 3 – шарикоподшипник; 4 – корпус статора; 5 – трубка принудительного охлаждения; 6 – ротор; 7 – тонкая герметичная немагнитная стенка; 8 – обмотка статора; 9 – присоединительное уплотнение

Такие вводы могут работать при скоростях скольжения вала до 15 м/с. При этом практически отсутствует износ уплотняемых поверхностей, а момент сопротивления вращению в $7 \div 10$ раз меньше по сравнению с вводами вращения, имеющими контактное уплотнение. Эффект бесконтактного магнитного взаимодействия может быть также использован в

магнитных опорах.

Фирмой «LEYBOLD AG» (Германия) разработан промышленный образец турбомолекулярного вакуумного насоса «Turbovac – 550М» с магнитными опорами ротора (рис.14.3.10.) [28].

Ротор турбомолекулярного насоса подвешен на одной осевой и двух радиальных магнитных опорах.

Внутри полого ротора 5 расположен опорный стержень 3. Между двумя радиальными магнитными подшипниками 6 размещен электродвигатель 7. В верхней части ротора расположен осевой магнитный подшипник 4. В нижней 1 и верхней 2 частях стержня установлены шарикоподшипники с трением без смазочного материала, на которые ротор садится при остановке вакуумного насоса и аварийном отключении электропитания.

При работе турбомолекулярного вакуумного насоса, то есть при вращении ротора, между наружными кольцами шарикоподшипников и ротором устанавливается зазор примерно 0,1 мм и шарикоподшипники не работают. При остановке насоса зазор выбирается и ротор тормозится на шарикоподшипниках.

Применение магнитных подшипников в конструкции насоса сводит к минимуму трение в опорах ротора и образование загрязняющих микрочастиц износа, снижает уровень вибраций.

К недостаткам турбомолекулярного вакуумного насоса можно отнести сложность системы управления и системы балансировки ротора, недостаточную жесткость магнитных опор, исключаящую произвольное размещение насоса в пространстве (допустимое отклонение от вертикали составляет не более 15°).

Ниже, в работе, приведены сведения о материалах используемых в вакуумных функциональных устройствах с бесконтактным магнитным взаимодействием.

,

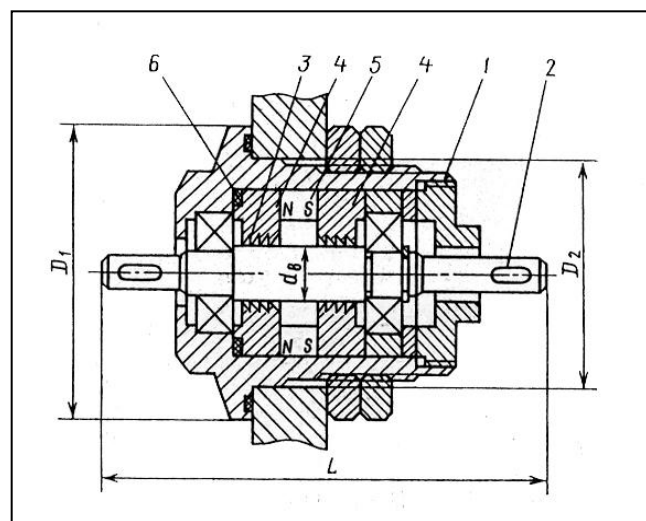


Рис.14.3.9. Конструкция типового ввода вращения на основе магнитной композиции

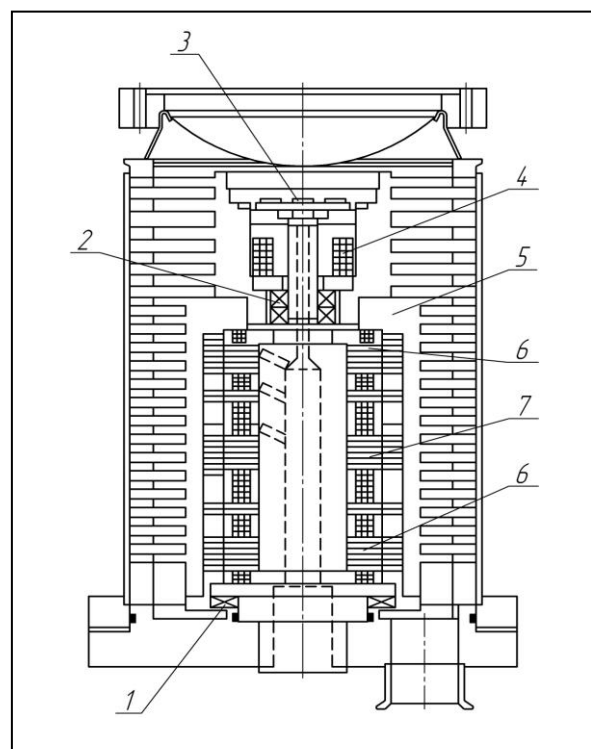


Рис.14.3.10. Конструктивная схема турбомолекулярного вакуумного насоса «Turbovac – 550M» с магнитной подвеской ротора: 1 – нижняя часть стержня; 2 – верхняя часть стержня; 3 – опорный стержень; 4 – осевой магнитный подшипник; 5 – полый ротор; 6 – радиальный магнитный подшипник; 7 – электродвигатель

14.4. Материалы устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием

Вакуумные УБМВ должны удовлетворять ряду условий, определяемых спецификой высокотехнологичного производства, а именно:

- возможностью прогрева до температуры обезгаживания;
- устойчивостью к вибрации и другим механическим воздействиям;
- устойчивостью, в ряде случаев, к излучению и радиации;
- высокими магнитными свойствами;
- высокой стабильностью магнитных свойств при наличии внешних переменных магнитных полей.

По технологическому признаку, с учётом химического состава, постоянные магниты можно разделить на следующие группы [29]:

- Ковкие, закаливаемые на мартенсит стали.
- Ковкие безуглеродистые стали на основе α -железа; железокобальтомолибденовые сплавы, имеющие коэрцитивную силу по индукции $H_{CB}=12\div 28$ кА/м и максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}=10$ Тл·кА/м. Здесь B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность магнитного поля, кА/м.
- Литые сплавы на основе систем железо-никель-алюминий и железо-никель-алюминий-кобальт. Эти магниты имеют максимальное энергетическое произведение до 96 Тл·кА/м.
- Сплавы с драгоценными металлами. В сплавах на основе железа и кобальта с платиной максимальное энергетическое произведение достигает 76 Тл·кА/м.
- Прессованные постоянные магниты из порошков системы железо-никель-алюминий-кобальт. Эти магниты просты в изготовлении и не требуют механической обработки, но имеют более низкие магнитные

свойства, чем литые магниты.

- Металлокерамические постоянные магниты из сплава системы железо-никель-алюминий-кобальт. Эти магниты изготавливаются методом порошковой металлургии, и магнитные свойства их несколько хуже, чем у литых магнитов.
- Постоянные магниты на основе интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами. Эти постоянные магниты имеют высокую коэрцитивную силу по индукции и по намагниченности, и максимальное энергетическое произведение до 240 Тл·кА/м.
- Магнитопласты и магнитоэласты. Они имеют низкие магнитные свойства, однако эти магниты весьма технологичны.

Все постоянные магниты, применяемые в различных УБМВ, могут быть разделены по своим магнитным свойствам на два больших класса: магниты у которых коэрцитивная сила по индукции значительно меньше

(в 4÷20) отношения $\frac{B_r}{\mu_0}$, и постоянные магниты, у которых коэрцитивная

сила по индукции приближается к отношению $\frac{B_r}{\mu_0}$.

До настоящего времени в различных магнитных системах в основном находили применение постоянные магниты первого класса, к которому можно отнести литые магниты ЮНДК25БА, ЮНДК35Т5, ЮНДК38Т7И. Эти магниты, за исключением ЮНДК38Т7И, который занимает промежуточное положение, характеризуются следующими свойствами:

- магниты имеют высокое значение остаточной индукции $B_r = 0,9 \div 1,4$ Тл;
- коэрцитивная сила по индукции $H_{CB} \leq 150$ кА/м;
- коэрцитивная сила по намагниченности значительно меньше отношения

$$\frac{B_r}{\mu_0} \text{ (табл.14.4.1).}$$

Таблица 14.4.1

Значение коэрцитивной силы по индукции и намагниченности
постоянных магнитов первого класса

Марка магнита	ЮНДК25БА	ЮНДК35Т5БА	ЮНДК38Т7И
$\frac{B_r}{\mu_0}$, кА/м	1070	890	540
$H_{св}$, кА/м	56	125	147

- максимальное энергетическое произведение не превышает 100 Тл·кА/м;
- значение намагниченности магнита существенно зависит от напряженности магнитного поля.

Зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля приводит к тому, что после снятия внешнего размагничивающего поля рабочая точка перемещается по кривой возврата. Это является одним из наиболее существенных недостатков постоянных магнитов первого класса, который приводит к неполному использованию объема магнита, так как точка отхода кривой возврата рассчитывается исходя из нестационарных режимов, например срыва магнитной муфты, при котором магниты одной из полумуфт попадают в размагничивающее поле магнитов второй полумуфты. Поэтому, при номинальной мощности, когда рабочая точка находится на кривой возврата, энергия магнита оказывается существенно ниже своего максимального значения [30].

Кардинальное решение вопроса увеличения магнитной энергии постоянных магнитов было получено при исследовании интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами, получивших название редкоземельных магнитов [31,32].

Для магнитных сплавов, достаточно широко применяемых в радиоэлектронной аппаратуре и энергомашиностроении характерны все основ-

ные особенности высококоэрцитивных редкоземельных магнитов [29].

Так для марки КС37А значения коэрцитивных сил по индукции и намагниченности: $H_{CB}=560$ кА/м, $H_{CM}=1000$ кА/м; коэрцитивная сила по индукции приближается к своему максимально возможному значению, равному $\frac{B_r}{\mu_0}=650$ кА/м; намагниченность постоянного магнита при изменении напряженности магнитного поля от 0 до H_{CB} практически постоянна; магнитная проницаемость на большей части кривой размагничивания незначительно отличается от магнитной проницаемости воздуха; магнит имеет высокое максимальное энергетическое произведение: $(B \cdot H)=130$ Тл·кА/м; кривые возврата практически совпадают с кривой размагничивания, что при проектировании магнитных устройств позволяет не принимать во внимание кратковременные увеличения размагничивающего магнитного поля.

Несмотря на высокое значение максимального энергетического произведения (B_H) отдельных магнитов первого класса (у магнитов ЮНДК35Т5БА $B_H=96$ Тл·кА/м), не представляется возможным спроектировать УБМВ по своим массогабаритным показателям превосходящее устройства с магнитной связью и электромагнитным возбуждением.

Достоинством редкоземельных постоянных магнитов является их высокая температурная стабильность [33,34].

Из сказанного выше очевидно, что магниты второго класса имеют наиболее обоснованные предпосылки для применения в УБМВ.

В ГОСТе 21559-76 содержится информация о следующих марках интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами: КС37, КС37А, КСП37, КСП37А.

Дальнейшее совершенствование материалов постоянных магнитов связано с редкоземельными магнитами класса $R_2(Co,Fe)_n$, значение максимального энергетического произведения которых $(B \cdot H)_{max}$ может достигать 500 Тл·кА/м. Что касается сплавов альнико, имеющих теоретический пре-

дел энергетического производства выше, чем у сплава $SmCo_5$, то ожидать значительного прогресса в улучшении их характеристик не приходится. Это обусловлено наличием немагнитной матрицы: при малой концентрации одноименных частиц в композиции остаточная индукция получается малой, а с ростом концентрации уменьшается коэрцитивная сила.

Стабильность постоянных магнитов зависит от воздействия окружающей среды, а именно от механических нагрузок, радиации, наличия внешних магнитных полей или ферромагнитных масс, температуры.

Весьма незначительное влияние на свойства высококоэрцитивных магнитов оказывают вибрации и удары. Размагничивание этих материалов за счёт механических воздействий не превышает 1%, причем чувствительность магнитов к ударам и вибрациям тем меньше, чем выше их коэрцитивная сила [35]. При необходимости увеличения механической стабильности магниты подвергают предварительным механическим воздействиям, не превышающим максимально возможные нагрузки при эксплуатации [30].

В работах [29,25,36] показано, что облучение нейтронами с плотностью $3 \cdot 10^{17}$ нейтр./см²·с в течение 12 суток не вызывает фиксирующих изменений в структуре.

Магниты из соединений $P-Co$ обладают высокой температурной стабильностью остаточной намагниченности при воздействии внешних размагничивающих полей, которая тем выше, чем больше значения таких параметров магнитов, как H_{CB} и H_{CM} . С приближением технической кривой размагничивания магнитов $B(H)$ к предельной ($H_{CB}=B_r$, $\mu_B = 1$ где μ_B – коэффициент возврата) внешнее магнитное поле вызывает лишь обратимое снижение индукции в момент приложения поля. Такие магниты не нуждаются в стабилизации для защиты от влияния размагничивающего поля и могут намагничиваться вне магнитной системы, так как рабочая точка такого магнита при установке его в систему поднимается по основной петле гистерезиса $B(H)$.

При кратковременных выдержках магнитов, уплотнённых спекани-

ем, при повышенных температурах необратимые потери их индукции не превышают 2% при температуре до 500°C и резко возрастают (до 15÷20%) с повышением температуры до 600÷650°C [37]. Выдержки магнитов при повышенных температурах длительностью порядка 10000 часов и более допустимы при температуре, не превышающей 200°C.

Необратимые магнитные изменения индукции магнитов, вызванные изменением их магнитной структуры (то есть частичным размагничиванием во внутреннем магнитном поле), не восстанавливаются после возвращения температуры магнитов к исходному значению, но устраняются после повторного намагничивания магнитов при исходной температуре [34].

Необратимое изменение $H_{см}$ магнитов в процессе нагрева на воздухе можно быть следствием как поверхностного окисления магнитов, так и начала эвтектидного распада соединения $SmCo_5$ при нагреве до температуры около 600÷650°C [37].

Необратимые магнитные потери индукции магнитов наблюдаются после первого цикла повышения температуры и, как правило, не наблюдаются при последующих циклах. Поэтому предварительный нагрев магнитов – стабилизирующая обработка – приводит к значительному улучшению как долговременной стабильности при комнатной температуре, так и стабильности при повышенной температуре при выдержках в пределах нескольких часов.

Для стабилизации магнитов, предназначенных для использования при повышенных температурах, применяют отжиг магнитов после намагничивания до насыщения при температуре, на 50°C превышающих рабочую температуру, в течении 1÷2 часов. Например, необратимые магнитные потери индукции при их использовании при температуре 150°C в течении 3000 ч для стабилизированных магнитов в 5÷8 раз меньше, чем для нестабилизированных, при этом потери индукции при стабилизации составляют 3÷8 % (табл. 14.4.2) [38]. В перспективе [39] имеется возможность на базе PCo_5 создавать постоянные магниты с рабочей температурой до 500°C и при кратковременном нагреве – значительно выше.

Таблица 14.4.2

Температурная стабильность постоянных магнитов
из редкоземельных материалов

Материал магнита	$SmCo_5$	$Sm_{0,5}Pr_{0,5}Co_5$
Температурный коэффициент обратимых изменений индукции в интервале температур от 20 до 300°С	-0,047÷-0,051	-0,055÷-0,065

Для магнитов значения температурных коэффициентов обратно пропорционально значению точки Кюри и практически не зависят от проницаемости.

Коэрцитивная сила порошков и магнитов $SmCo_5$ обнаруживает сильную температурную зависимость, монотонно уменьшаясь при нагреве и приближаясь к нулевому значению при температуре вблизи 730°К (примерно 460°С) (рис.14.4.1).

Из вышесказанного следует, что наиболее неблагоприятными являются такие условия работы постоянных магнитов, при которых внешнее магнитное поле действует на них одновременно с повышенной температурой, так как необратимые потери индукции магнита дополнительно возрастают по сравнению с потерями при комнатной температуре из-за уменьшения его $H_{см}$. При этом с точки зрения обеспечения устойчивости магнитов при воздействии размагничивающего поля при повышенной температуре оптимальными являются такие их свойства, при которых сочетаются высокие значения коэрцитивной силы $H_{св}$ и отношения $H_{св} / B_r$, характеризующего наклон $B(H)$ во втором квадранте (рис.14.4.2).

Наиболее перспективными для вакуумного технологического и аналитического оборудования являются магниты на базе интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами (КС37, КС37А, КСП37, КСП37А), как обладающих высокотемпературной стабильностью и уникальными магнитными свойствами.

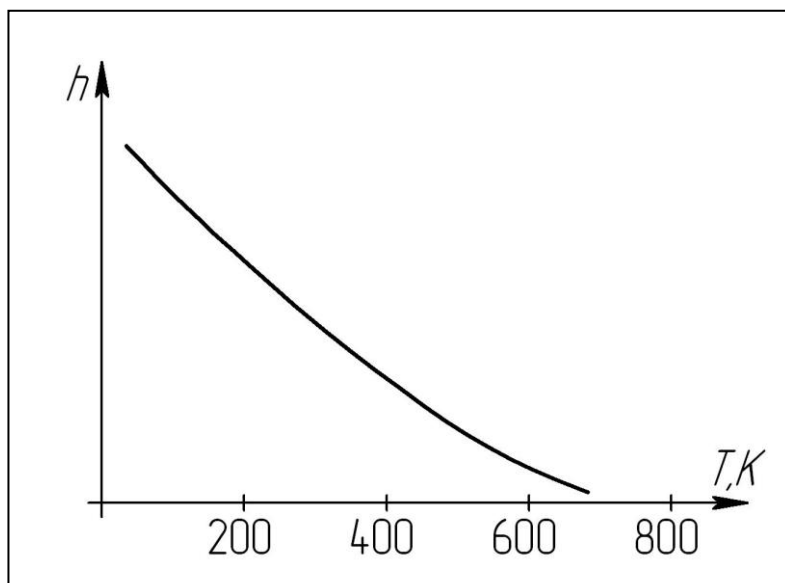


Рис.14.4.1. Температурная зависимость относительного значения $H_{\text{сМ}}$ магнитов из SmCo_5 :

$$h = \frac{H_{\text{сМ}}(T)}{H_{\text{сМ}}(77\text{K})}$$

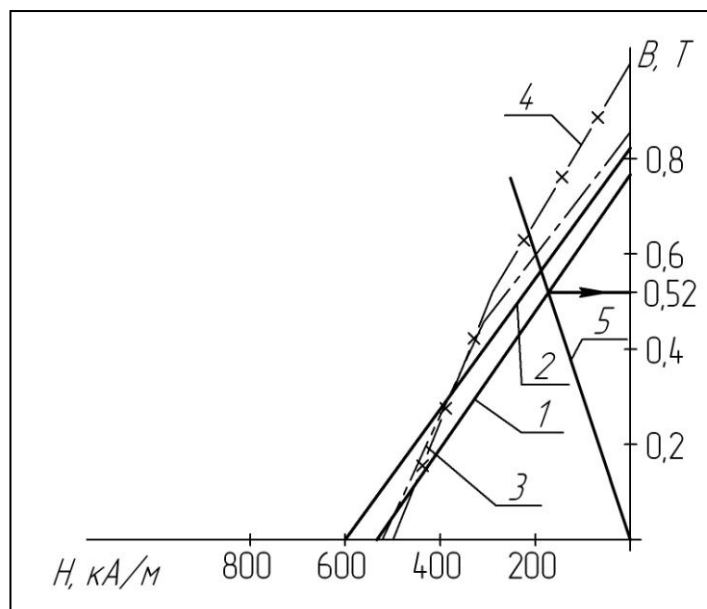


Рис.14.4.2. Характеристики размагничивания редкоземельных материалов: 1 – КС37; 2 – КС37А; 3 – КСП37; 4 – КСП37А

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 14

1. Александрова, А.Т. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т.2 / А.Т. Александрова, Л.К. Ковалев, С.В. Степанчиков и др. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – 427 с.
2. Васин, В.А. Создание сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // XXI Международная науч.-тех. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тезисы докладов. – М.: ФГУП НПО «Орион», 2010. – С.225-226.
3. Васин, В.А. Создание сверхчистой вакуумной технологической среды в электронном производстве / В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, С.В. Степанчиков // Прикладная физика. – 2010. – № 5. – С.122-126.
4. Александрова, А.Т. Вакуумная механика в электронном машиностроении: Монография / А.Т. Александрова, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – М.: МИЭМ, 2009. – 145 с.
5. <http://www.analog.com>
6. Александрова, А.Т. Теоретические основы расчета и конструирования функциональных устройств и систем оборудования высоких вакуумных технологий на основе приводов управляемой упругой деформации: Учебное пособие. – М.: МИЭМ, 2003. – 48 с.
7. Nevshupa, R.A. Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms / R.A. Nevshupa etc. – Dordrecht: Springer, 2009. – 234 p.
8. Розанов, Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов по спец. «Вакуумная техника». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.

9. <http://www.semiteq.ru>
10. <http://www.highvolteng.com>
11. Быков, В.А. Разработка и освоение производства приборов и оборудования для нанотехнологии // Российские нанотехнологии. – 2007. – № 1-2. Т. 2. – С.32-36.
12. <http://www.sdbireras.ru>
13. Моряков, О.С. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 кн. Кн.7. Элионная обработка: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1990. – С.88-89.
14. Ковалев, Л.К. Вакуумное оборудование тонкоплёночной технологии производства изделий электронной техники: Учебник для студентов спец. «Электронное машиностроение» в 2-х томах. Т.2 / Л.К. Ковалев, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. – Красноярск: Краснояр. книж. изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1996. – 416 с.
15. Черняев, В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1987. – С.295-298.
16. Панфилов, Ю.В. Машиностроение. Энциклопедия / Ред.совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.III – 8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под. общ. ред. Ю.В. Панфилова, 2000. – С.401-402.
17. Фролов, А.И. Повышение герметичности и надежности вводов движения на основе магнитной жидкости для высоковакуумного технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.07 / Фролов Александр Иванович. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1986. – С.12-14.
18. <http://www.izovac.com>
19. Степанчиков, С.В. Вакуумно-космическое оборудование для производства материалов и элементов изделий электронной тех-

- ники. – М.: МИЭМ, 2008. – С.24-25.
20. Бармин, И.В. Оборудование космического производства / И.В. Бармин, Е.И. Горюнов, А.В. Егоров и др.; Под. общ. ред. В.П. Бармина. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
 21. Демихов, К.Е. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – С.226.
 22. А.с. 1113869 СССР. Магнитная муфта-редуктор / Г.К. Антонова, Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов // Оpubл. 15.09.84, Бюл. №34.
 23. Медников, М.И. Вводы движения в вакуум. – М.: Машиностроение, 1974. – С.20-25.
 24. Физико-аналитическое и спецтехнологическое оборудование: Каталог / Под научн. ред. докт. физ.-мат. наук О.Д. Протопопова. – М.: Издательство ЦНИИ «Электроника», 1988. – 80 с.
 25. Синодеев, И.В. Разработка и исследование механизмов поступательного движения на базе планетарных винтовых передач с внешним сопряжением для вакуумного технологического оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.12 / Синодеев Игорь Вячеславович. – Владимир: ВПИ, 1984. – С.189-192.
 26. Панфилов, Ю.В. Машиностроение. Энциклопедия / Ред.совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.III – 8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под. общ. ред. Ю.В. Панфилова, 2000. – С.290-291.
 27. Демихов, К.Е. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – С.222-223.
 28. Фролов, Е.С. Механические вакуумные насосы / Е.С. Фролов, И.В.

- Автономова, В.И. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1989. – С.273.
29. Альтман, А.Б. Постоянные магниты: Справочник/ А.Б. Альтман, А.Г. Герберг, А.П. Гладышев и др.; Под. общ. ред. Ю.М. Пятина. – М.: «Энергия», 1980. – 488с.
30. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
31. Балагуров, В.А. Перспективы применения постоянных магнитов в электрических машинах // Труды МЭИ. – М.: МЭИ, 1980. – №483. – С.3-8.
32. Магниты из сплавов редкоземельных металлов с кобальтом. – М.: Металлургия, 1978. – 342 с.
33. Линецкий, Я.Л. Перспективы развития материалов для постоянных магнитов /Я.Л. Линецкий, В.В. Сергеев // Электротехника. – 1985. – №2. – С.27-30.
34. Сергеев, В.В. Магнитотвердые материалы / В.В. Сергеев, Т.И. Булыгина – М.: «Энергия», 1980. – 224 с.
35. Безрученко, В.А. Электрические машины с постоянными магнитами / В.А. Безрученко, Ф.Ф. Галтеев // Итоги науки и техники: Серия «Электрические машины и трансформаторы». – М., 1982, Том 5. – 114 с.
36. Дерягин, А.В. Редкоземельные магниты // Успехи физических наук. – М., 1976. Том 120, вып.3. – С.393-437.
37. Ганзбург, Л.Б. Проектирование магнитных и электромагнитных механизмов: Справочник / Л.Б. Ганзбург, А.И. Федотов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 364 с.
38. Вейц, В.Л. Электромеханические приводы с бесконтактными магнитными механизмами / В.Л. Вейц, П.Ф. Вербовой, Л.Б. Ганзбург, Б.Н. Куценко. – Киев: Ин-т электродинамики АН УССР (Препр.), 1991. – 56 с.

ГЛАВА 15. ВЫРАЩИВАНИЕ

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

15.1. Кристаллизационные процессы выращивания монокристаллического кремния и их механическое обеспечение

Классификацию кристаллизационных процессов выращивания монокристаллов полупроводников можно проиллюстрировать с помощью рис. 15.1.1.

Кристаллизацию расплава, при которой тепло отводится от фронта кристаллизации преимущественно в одном направлении, называют направленной [1]. К методам направленной кристаллизации, характеризующимся наличием в системе одной фазовой границы (фронта кристаллизации) и постоянным убыванием объема расплава в ходе процесса, относят методы Бриджмена и Чохральского (рис. 15.1.1, а÷г). Направленную кристаллизацию, характеризующую наличием в системе двух фазовых границ (фронта плавления и фронта кристаллизации) и постоянным объемом расплава в ходе процесса, называют зонной плавкой или зонной перекристаллизацией (рис. 15.1.1, д÷ж).

Вертикальный процесс направленной кристаллизации по методу Бриджмена проводят в трубчатых контейнерах (тиглях), а горизонтальный – в лодочках [1].

По методу Чохральского монокристалл вытягивается верхним штоком с закрепленной на нем затравкой кристалла из расплава, помещенного в тигель, соединенный с помощью подставки с нижним штоком. Отсутствие контакта растущего кристалла со стенкой контейнера позволяет получать

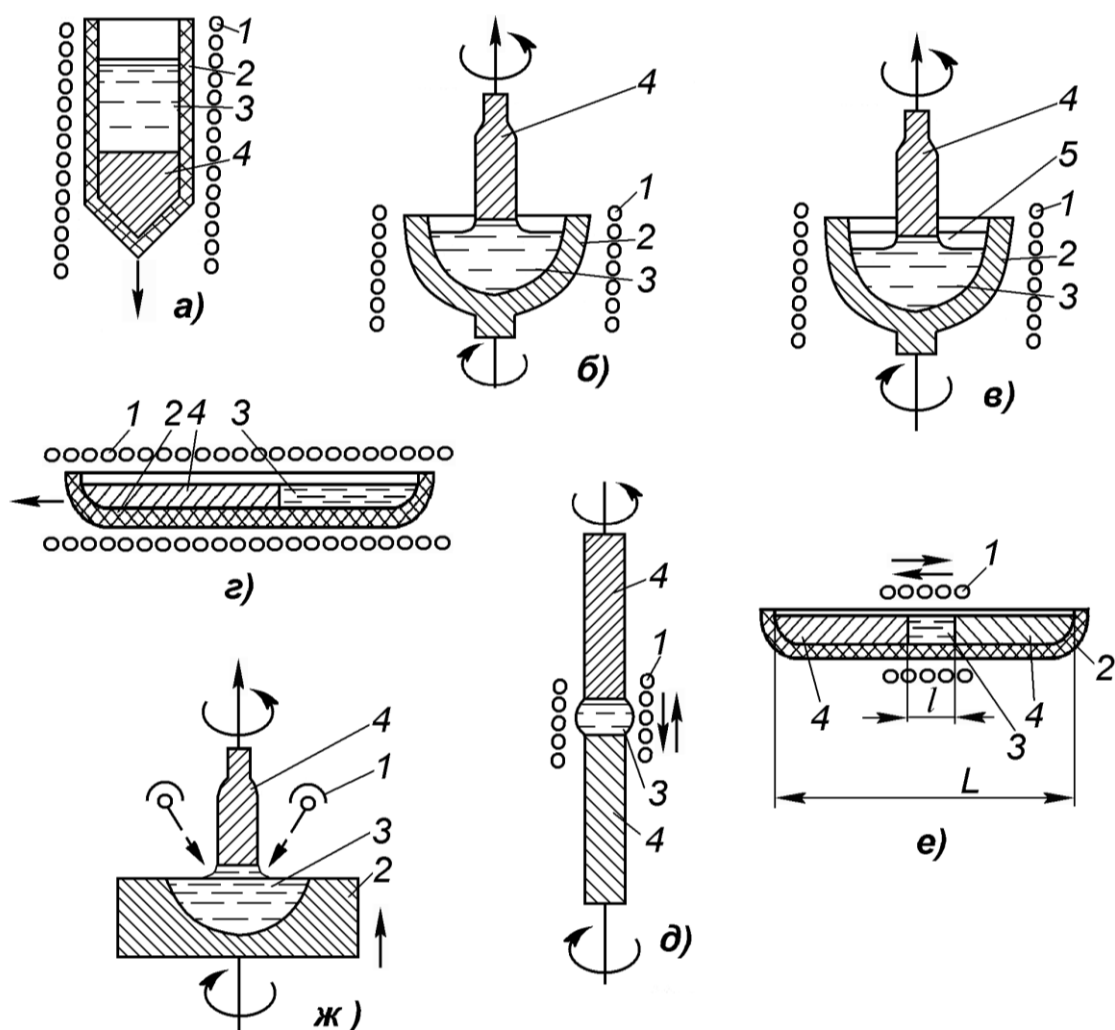


Рис. 15.1.1. Схемы процессов направленной кристаллизации расплавов: а, г – вертикальный и горизонтальный методы Бриджмена; б – обычный метод Чохральского (из простого тигля); в – метод Чохральского герметизацией расплава флюсом; д – метод зонной плавки вертикальный бестигельный; е – горизонтальный контейнерный метод зонной плавки; ж – гарниссажный метод Чохральского (с электронно-лучевым нагревом); 1 – нагреватель; 2 – контейнер; 3 – расплав; 4 – кристалл; 5 – герметизирующая жидкость (флюс); L – длина слитка; l – длина расплавленной зоны.

Таблица 15.1.1**Требования к параметрам монокристаллов кремния**

	1970 – 1980гг.	1985 –1990гг.	2000 –2005гг.	2007г. –н.в.
Диаметр монокристалла кремния, мм	60-100	150-200	до 300	до 450
Радиальный разброс удельного сопротивления, %	15	5	3	2
Масса слитка, кг	45	90	> 200	>400

методом Чохральского ориентированные в требуемом кристаллографическом направлении большие, равномерно легированные совершенные монокристаллы.

Процесс направленной кристаллизации без перегрузки слитка может быть осуществлен однократно, а зонной плавкой – многократно. Для получения особо чистых полупроводников наиболее часто используют зонную плавку, так как переход от одного процесса к другому связан с загрязнением конечного продукта [1].

Требования к параметрам монокристаллов полупроводников постоянно повышаются и тенденцию их изменения можно проследить на примере кремния (Таблица 15.1.1).

Рассмотрим оборудование для выращивания монокристаллов полупроводников на примере Чохральского.

Современное оборудование для выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского должна обеспечить:

— поддержание в камере остаточного давления менее $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па для случая проведения процесса выращивания в вакууме;

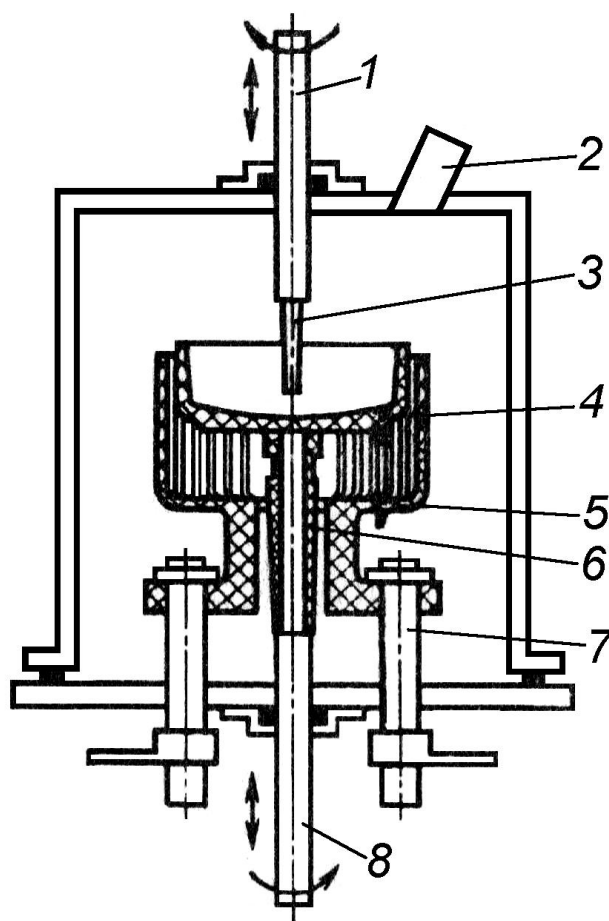


Рис. 15.1.2. Схема для выращивания монокристаллов

методом Чохральского: 1 – верхний шток; 2 – смотровое окно; 3 – монокристаллическая затравка; 4 – кварцевый тигель; 5 – графитовый нагреватель; 6 – графитовая подставка тигля; 7 – водоохлаждаемый токоввод; 8 – нижний шток.

- отсутствие загрязнений расплава и выращиваемого монокристалла;
- стабильность тепловых условий выращивания монокристаллов (колебания температуры на фронте кристаллизации допускаются $0,1 \div 0,2$ °С, точность контроля температуры нагревателя $\pm 0,1$ °С;
- высокую точность поддержания выбранных скоростей перемещения деталей установки (точность подъема тигля и затравки $\pm 0,5\%$, скорости

- вращения штоков $\pm 0,5\%$);
- отсутствие вибраций;
- возможность изменения основных параметров процесса.

Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского изображена на рис. 15.1.2.

Процесс проводится в герметичной камере в атмосфере инертного газа или в вакууме. Стенки камеры имеют водяное охлаждение. Камера снабжена смотровым окном 2 для визуального наблюдения за ходом процесса. Исполнительные механизмы расположены вне камеры. Исходный материал для выращивания монокристалла помещают в тигель 4, закрепленный на графитовой подставке 6, соединенной с водоохлаждаемым штоком 8. Нагрев тигля с исходной загрузкой осуществляется разрезным графитовым нагревателем сопротивления 5, установленным на токоотводах 7, смонтированных в нижней крышке камеры. Снаружи нагреватель окружен системой графитовых экранов (на рис. 15.1.2 они не показаны), обеспечивающих заданное распределение температуры по объему расплава в тигле, а также по длине и сечению выращиваемого монокристалла. Шток 8 выведен из камеры через магнитожидкостные уплотнения (МЖУ). При помощи электропривода, расположенного вне камеры, шток вращается с постоянной частотой. При этом он может перемещаться с постоянной скоростью вверх или вниз для обеспечения оптимального положения тигля с расплавом по отношению к нагревательному элементу. Через МЖУ, расположенные на верхнем конце камеры соосно с нижним штоком, в камеру вводится водоохлаждаемый шток 1. На нижнем конце штока при помощи цангового крепления фиксируется монокристаллическая затравка 3 кристаллизуемого материала. Шток 1 может также перемещаться вверх и вниз с заданной скоростью и вращаться с постоянной частотой. В процессе роста кристалл и тигель с расплавом вращаются в противоположных направлениях [1].

Установка имеет вакуумную систему для создания остаточного дав-

ления в камере менее $6,9 \cdot 10^{-3}$ Па, а также систему подачи инертного газа. Максимальное избыточное давление инертного газа в камере может достигать до $0,2 \cdot 10^5$ Па. Рабочая скорость перемещения затравки изменяется в пределах $0,5 \div 5,0$ мм/мин. Осевое перемещение затравки позволяет выращивать монокристаллы до 2000 мм. Частота вращения затравки $0,3 \div 50$ об/мин, а тигля $0,2 \div 30$ об/мин. Осевое перемещение тигля на расстояние около 450 мм осуществляется от автоматического привода.

Процесс проводится следующим образом: тщательно протравленный, промытый и высушенный материал загружают в тигель, камеру, предварительно очищенную, герметизируют и откачивают до получения вакуума и продувают чистым инертным газом.

Тигель устанавливают на нужной высоте по отношению к нагревателю и приводят во вращение. При постепенном повышении мощности, подаваемой на нагреватель, материал доводят до плавления и выдерживают некоторое время в перегретом состоянии. Для обеспечения предварительного прогрева затравки её подводят к зеркалу расплава в горячую зону. Когда зеркало расплава очистится, включают систему автоматического регулирования температур, которая доводит температуру расплава до значения, немного превышающего температуру плавления материала. Затравку медленно подводят к зеркалу расплава, конец затравки опускают в расплав на $2 \div 3$ мм, а шток 1 останавливают. После прогрева затравки в течение $3 \div 5$ мин приступают к выращиванию монокристалла, вытягивая шток с затравкой [1].

В качестве примера можно привести следующие допуски на механические и температурные режимы выращивания монокристаллов представлены в таблице 15.1.2.

Колебания скорости потока инертного газа, продуваемого через рабочую камеру, не должны вызывать изменений температуры, превышающих указанную точность стабилизации.

Таблица 15.1.2

Пример допусков на механические
и температурные режимы выращивания монокристаллов

Частота вращения нижнего штока, об/мин	0,2–30±0,5%
Точность фиксации высоты тигля по отношению к нагревателю при постоянной массе материала, мм	±0,1
Частота вращения верхнего штока, об/мин	0,3–50±0,5%
Рабочая скорость вытягивания штока, мм/мин:	
затравки	0,5–8
тигля	0,01–0,7
Соосность штоков, мм	0,8
Точность поддержания температуры в тигле с материалом, С ⁰	±0,1

На рис. 15.1.3 представлена вакуумно-кинематическая схема промышленной ростовой установки [18].

Перемещение затравки 1 осуществляется шариковой винтовой передачей 2 через волновой редуктор ($i = 155$) и мотор-редуктор 8. Вращение штоку передается от моторредуктора через ременную зубчатую передачу 3 и зубчатую передачу 10.

Температура в вакуумной камере 6 достигает 2500 °С. Рабочее давление $P_{\text{раб}} = 10^{-5}$ Па обеспечивается диффузным насосом 5. Герметизация вакуумной камеры относительно штока осуществляется сальниковым уплотнением 4. В зависимости от материала выращенного кристалла процесс роста происходит в вакууме или защитной атмосфере, цикл выращивания достигает 400 часов.

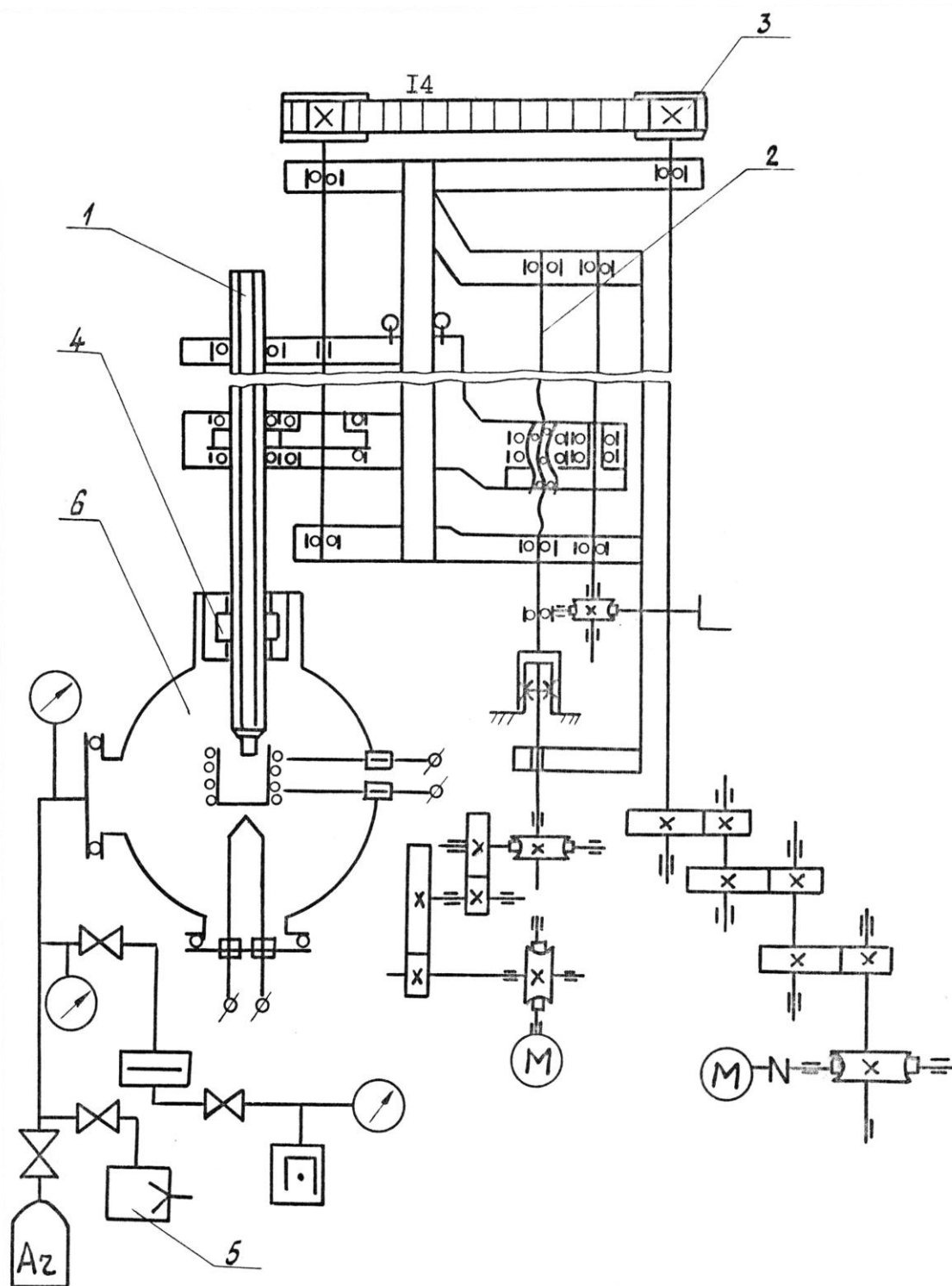


Рис. 15.1.3. Вакуумно-кинематическая схема установки выращивания монокристаллов НИИ «Полюс»

Основными недостатками данной установки являются сложность управления процессом перемещения штока, трудность в обеспечении плавности перемещения на малых скоростях выращивания, высокая стоимость привода. Анализ конструкции механизма привода установки, имеющего сложную кинематическую цепь, позволил сделать вывод о том, что данный механизм имеет значительную кинематическую погрешность, а применяющиеся сальниковые уплотнения не обеспечивают надежной герметизации вакуумной камеры.

Кинематическая особенность передаточных механизмов этих установок требует синхронного вращения штока и его поступательного перемещения при условии обеспечения стабильной скорости и минимального газовыделения в рабочей камере, что заставляет искать пути создания новых устройств.

15.2. Агрегаты и модули оборудования для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского

Рассмотрим несколько вариантов оборудования для получения монокристаллического кремния.

Способ получения монокристаллического кремния [2]

Устройство для реализации предложенного способа вытягивания монокристаллов кремния методом Чохральского, изображено на рис. 15.2.1 и 15.2.2, где на рис. 15.2.1 изображена верхняя камера установки; на рис. 15.2.2 – поперечный разрез верхней камеры.

Установка содержит нижнюю плавильную камеру (на чертеже не показана), верхнюю камеру 1 для вытягивания, устройство 2 для отсоединения выращенного монокристалла от затравки, устройство 3 для хранения

выращенного монокристалла 4 с верхними и нижними захватами, привод 5 этого устройства, устройство 6 для хранения подпиточных стержней.

Способ реализуется следующим образом. Расплавляют первоначальную загрузку в тигле, затравкой 8 производят затравливание монокристалла, вытягивают монокристалл, вытягивая не более $\frac{2}{3}$ расплава, содержащегося в тигле. Не открывая камеры, приводом 5 перемещают верхний и нижний рычаги устройства 3 для хранения монокристалла 4, устройством 2 отделяют выращенный монокристалл 4 от затравки 8 и перемещают его в сторону от оси выращивания. Затем доплавляют расплав подпиточными стержнями 7, перемещая их к центру и опуская в тигель с помощью устройства 6, после доплавления расплава до исходного уровня подпиточные стержни поднимают и отводят в сторону. Той же затравкой 8 производят затравливание следующего монокристалла. Количество выращенных монокристаллов может быть на один больше, чем устройств для хранения, так как последний монокристалл может оставаться на затравке, при его выращивании вытягивается весь расплав из тигля.

Таким образом, экономический эффект от использования предложенного способа достигается за счет экономии и электроэнергии и тиглей, так как, не открывая камеры, выращивают несколько монокристаллов из одного тигля со строго заданной кристаллографической ориентацией, также за счет увеличения товарной части увеличивается выход годного.

Технический эффект в получении воспроизводимых бездислокационных кристаллов, так как для их выращивания используется одна и та же затравка, отсутствует механизм смены затравок.

Установка для получения стержней поликристаллического кремния [3]

(Рис.15.2.3÷15.2.7)

Установка для получения стержней поликристаллического кремния включает в себя разъемный реактор 1, вертикальную стойку 2, контейнер 3, подъемник 4, систему подачи компонентов 5, транспортировочную тележку

6. Верхняя часть 7 реактора 1 закреплена неподвижно на вертикальной стойке 2, нижняя часть 8 реактора 1 выполнена подвижной. Подъемник 4 установлен на направляющих 9 стойки 2 и замковым устройством 10 сцепляется с нижней частью реактора 8 или с контейнером 3. В верхней части 7 реактора размещены токоотводы 11 с узлом крепления основ 12. Контейнер 3 имеет гнезда 13 с донными амортизаторами 14, размещенными в соответствии с размещением токоотводов 11. К нижней части реактора 8 подведены магистрали подачи компонентов от блока подачи компонентов 5 и магистрали удаления газообразных и жидких продуктов реакции. Установка имеет площадку обслуживания 15.

Установка работает следующим образом. Перед началом процесса в положении загрузки контейнер 3 с установленными в гнезда 13 основами 16 подвозится на тележке 6 к реактору 1, от которого отстыковывается нижняя часть 8, ориентируется и при помощи подъемника 4 поднимается вверх в положение загрузки. Аппаратчик, находящийся на площадке обслуживания 15, производит установку основ 16 в узлы крепления 12 на токоотводы 11. После чего контейнер 3 подъемником 4 опускается на тележку 6 и увозится. Нижняя часть 8 подвозится под реактор 1, подъемником 4 поднимается и стыкуется с верхней частью 7. Производится процесс выращивания стержней поликристаллического кремния методом водородного восстановления хлорсиланов, после завершения, которого отстыковывается нижняя часть реактора 8, подъемником 4 опускается на тележку 6 и отвозится в сторону. Контейнер 3 на тележке 6 подвозится под реактор 1 и подъемником 4 поднимается в положение разгрузки до контакта нижних концов выращенных стержней 17 с донными амортизаторами 14 гнезд 13 контейнера 3. Аппаратчик, обходя реактор 1 по площадке обслуживания 15, поочередно отделяет от токоотводов 11 стержни поликристаллов кремния 17, которые остаются зафиксированными в гнездах 13 контейнера 3. Затем контейнер 3 со стержнями поликристаллов кремния 17 опускается подъемником 4 вниз на тележку 6 и убирается из погрузочно-

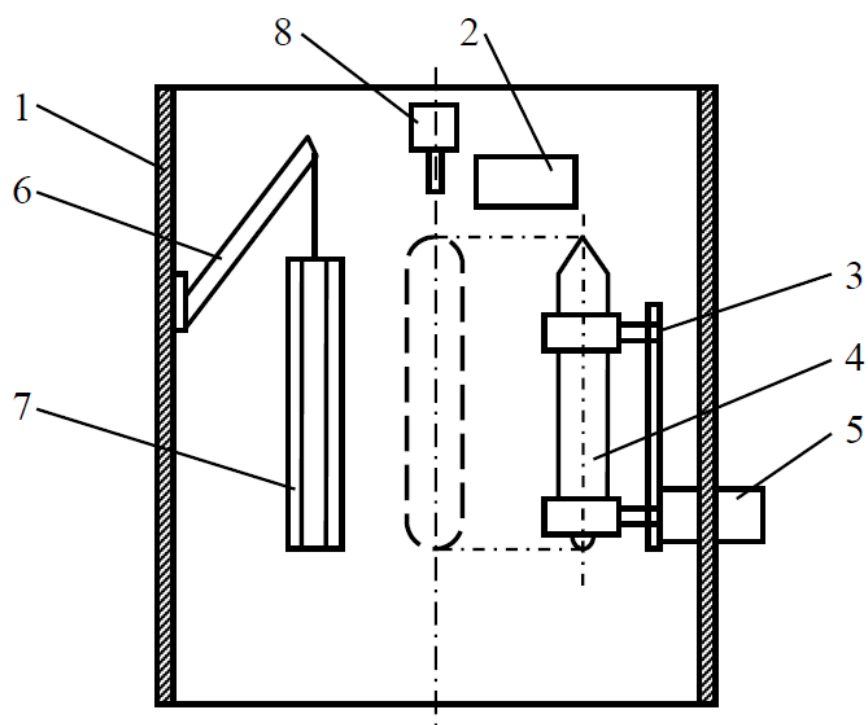


Рис. 15.2.1. Верхняя камера установки

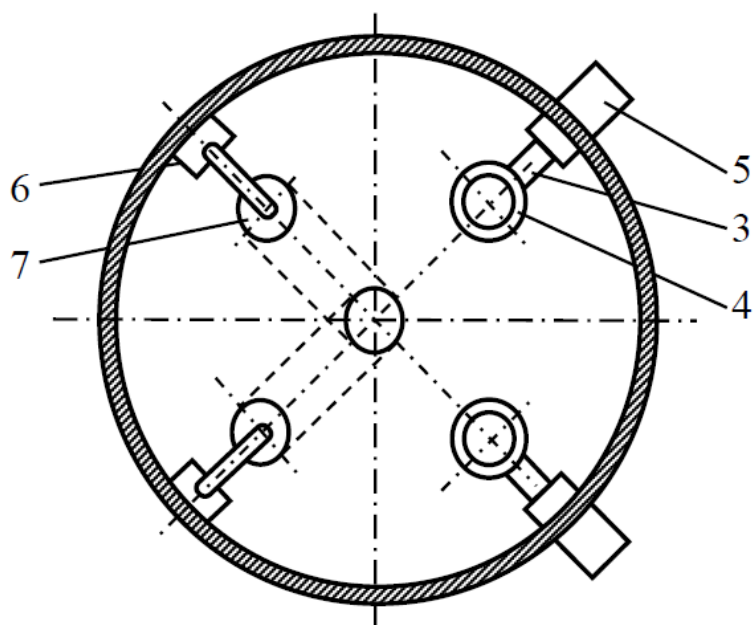


Рис. 15.2.2. Поперечный разрез верхней камеры

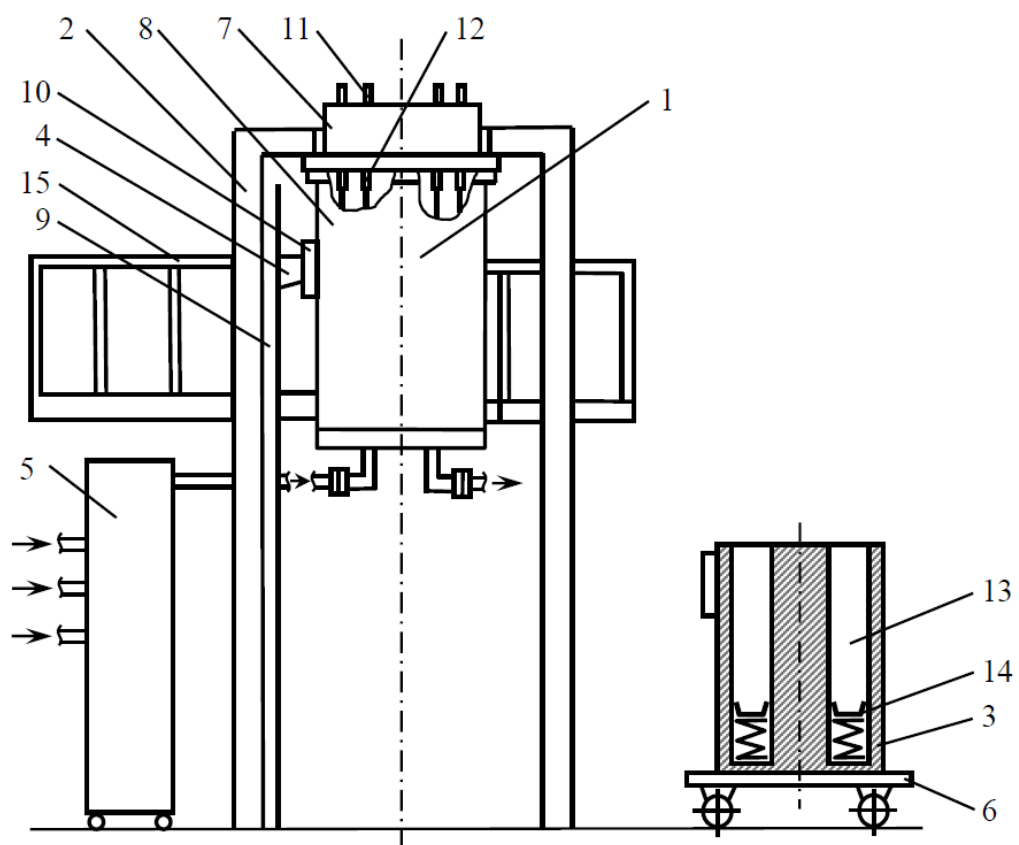


Рис. 15.2.3. Общий вид установки

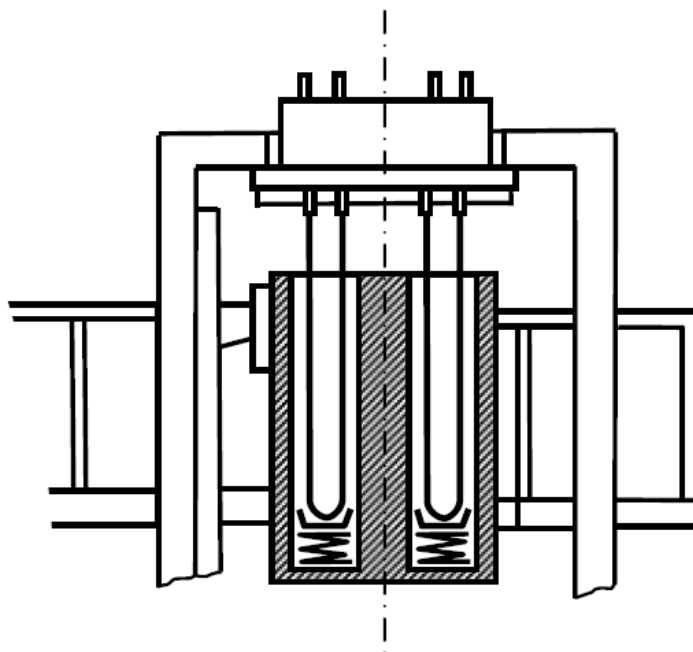


Рис. 15.2.4. Контейнер с основами в положении загрузки

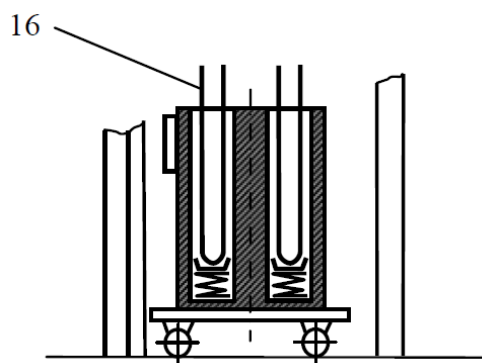


Рис. 15.2.5. Контейнер с основами перед загрузкой

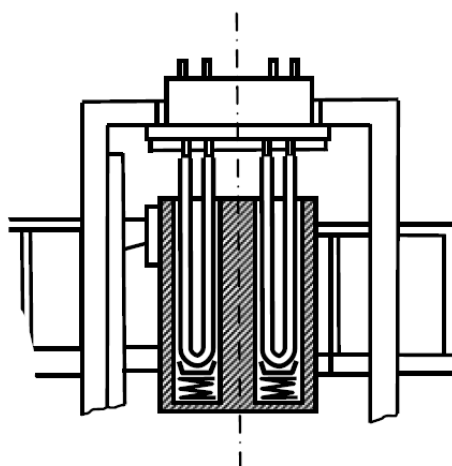


Рис. 15.2.6. Контейнер на подъемнике в момент разгрузки

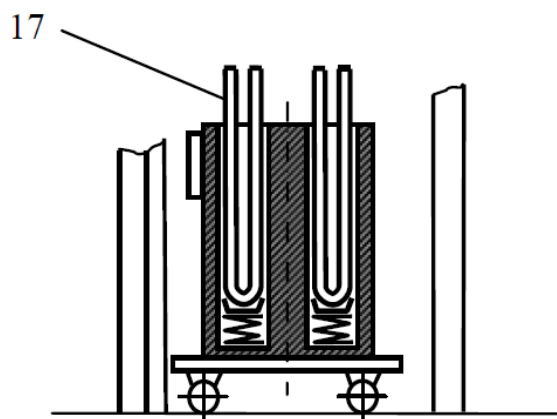


Рис. 15.2.7. Контейнер на тележке со стержнями после разгрузки

разгрузочной зоны. На рис. 15.2.3 изображена установка для получения стержней поликристаллического кремния, общий вид; на рис. 15.2.4 – контейнер с основами в положении загрузки; на рис. 15.2.5 – контейнер с основами перед загрузкой; на рис. 15.2.6 – контейнер на подъемнике в момент разгрузки; на рис. 15.2.7 – контейнер на тележке со стержнями после разгрузки.

Установка для получения стержней поликристаллического кремния [4]

Установка для получения стержней поликристаллического кремния содержит разъемный реактор 1 (рис. 15.2.8), вертикальную стойку 2, контейнер 3, подъемник 4, системы электропитания (на эскизе показана) и подачи компонентов 5. Верхняя часть 6 реактора 1 закреплена неподвижно на вертикальной стойке 2 с образованием погрузочно-разгрузочной зоны и отделена от нижней подвижной части герметическим горизонтальным разъемом 7. Нижняя часть реактора разделена дополнительным горизонтальным разъемом 8 на обечайку 9 и донную часть 10. Подъемник 4 установлен на направляющих 11 стойки 2 и замковым устройством 12 сцеплен с обечайкой 9. Возможно, как и в ближайшем аналоге, выполнить сцепление подъемника с донной частью и с контейнером, но это усложнит конструкцию, т.к. тогда необходимо конструктивно обеспечить удержание обечайки реактора на определенной высоте в момент замены донной части на контейнер. На верхней стенке неподвижной части реактора размещены токоотводы 13 с узлами крепления 14 основ 15. Контейнер 3 с гнездами 16, выполненными в соответствии с размещением токоотводов 13, снабжен защитной обечайкой 17, охватывающей гнезда и выполненной с возможностью вхождения в обечайку 9 реактора 1. Обечайка 9 реактора снабжена средствами для сцепления с контейнером 3 (на чертеже не показаны).

К донной части 10 подведены магистрали подачи компонентов от системы подачи 5 и магистрали удаления продуктов реакции.

Для обслуживания установка имеет рабочую площадку 18.

Установка работает следующим образом. Перед началом процесса в положении загрузки донная часть 10 отстыкована, обечайка 9 поднята в верхнее положение. Контейнер 3 с установленными в гнездах 16 основаниями 15 подкатывается под реактор 1 (рис. 15.2.9), ориентируется, обечайка 9 реактора 1 подъемником 4 опускается до соприкосновения с фланцем контейнера 3, при этом защитная обечайка 17 контейнера 3 входит соосно в обечайку 9, соединяется с ним и поднимается в положение загрузки. Через зазор «А» аппаратчик, находящийся на площадке 18 (рис. 15.2.10), поочередно устанавливает основания 15 на узлы крепления 14. Подъемником 4 оболочка 9 вместе с контейнером 3 опускается, контейнер 3 отсоединяется от оболочки 9 и увозится, а оболочка 9 соединяется с донной частью 10 и поднимается до соединения с неподвижной верхней частью 6.

Начинается процесс выращивания стержней поликристаллического кремния, по завершении которого разъединяются обечайка 9 и верхняя часть 6 по горизонтальному разъему 7. Обечайка 9 и донная часть 10 подъемником 4 опускаются вниз, донная часть 10 отстыковывается и увозится.

До момента подвоза контейнера 3 выращенные стержни 19 не имеют снизу страховки от падения, но боковая защита обечайкой 9 не дает стержням падать вбок, а в случае падения стержней или растрескивания осколки кучкой остаются внутри обечайки, при этом верхние осколки остаются чистыми. Подводится контейнер 3 (рис. 15.2.11), обечайка 9 опускается до стыковки с фланцем контейнера, после стыковки контейнер 3 вместе с обечайкой 9 подъемником 4 поднимается в положение разгрузки. Через зазор «А» аппаратчик, обходя реактор по площадке обслуживания (рис. 15.2.12) поочередно отделяет от узлов крепления 14 выращенные стержни 19, которые размещаются в гнездах 16 контейнера 3. В случае растрескивания или самопроизвольного облома выращенных стержней осколки падают в зону, охваченную защитной обечайкой 17 контейнера 3 и обечайкой 9 реактора. Затем обечайка 9 с контейнером 3 со стержнями 19 опуска-

ется вниз. Контейнер 3 отстыковывается, при этом защитная обечайка 17 контейнера 3 предохраняет стержни от падения и увозится из погрузочно-разгрузочной зоны.

Устройство для выращивания монокристаллического кремния [5] (рис. 15.2.13÷15.2.15)

Устройство содержит плавильную камеру 1, между колпаком 2 и поддоном 3 которой установлена средняя часть 4. Средняя часть 4 выполнена ступенчатой, на наружной поверхности рубашки охлаждения средней части меньшего диаметра выполнены направляющие элементы 5, между этими элементами расположена обмотка магнитной системы 6.

Верхняя консоль средней части поддерживает распорное устройство 7 в виде регулируемых упоров 8, расположенных равномерно по периметру камеры. В плавильной камере размещен нагреватель 9 и тигель 10. Устройство комплектуется несколькими средними частями с различными диаметрами меньшей ступени и одинаковыми диаметрами большой.

Устройство работает следующим образом. При выращивании монокристаллов различного диаметра из тиглей различного диаметра выбирается та средняя часть, которая обеспечивает минимальное расстояние между магнитной системой и стенкой тигля. Производят загрузку тигля, расплавление шихты, затравливание и выращивание монокристалла. В процессе выращивания на расплав воздействуют магнитным полем, создаваемым магнитной системой 6. Так как зазор между магнитной системой и стенками тигля выбран минимальным, то энергопотребление магнитной системы, необходимое для создания требуемого магнитного поля, будет минимальным. В процессе выращивания система охлаждения охлаждает корпус плавильной камеры и магнитной системы.

Поскольку обмотка магнитной системы выполнена на охлаждаемой рубашке средней части между направляющими элементами 5, то рубашка и направляющие элементы, являясь элементами системы охлаждения,

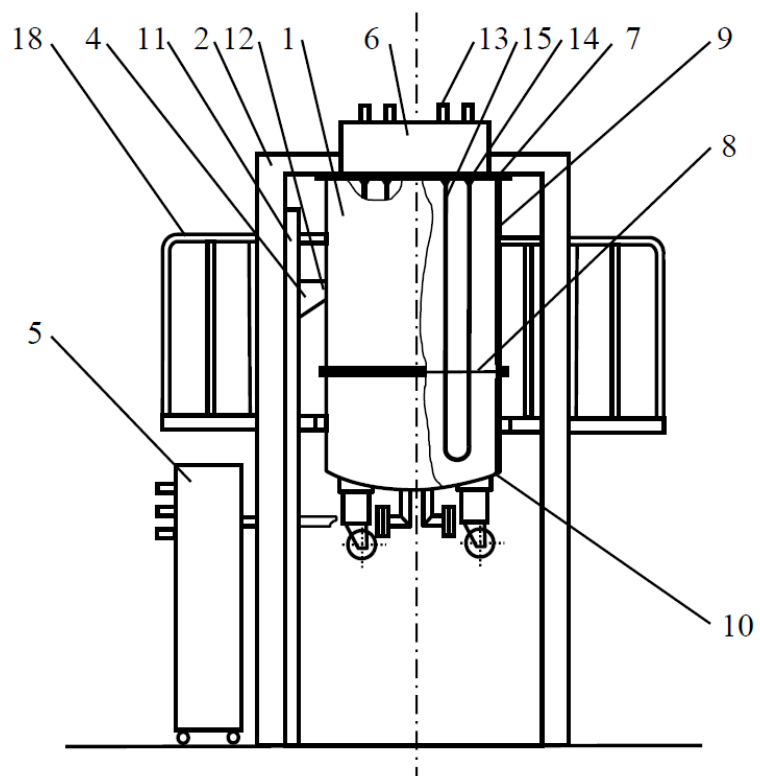


Рис. 15.2.8. Общий вид установки

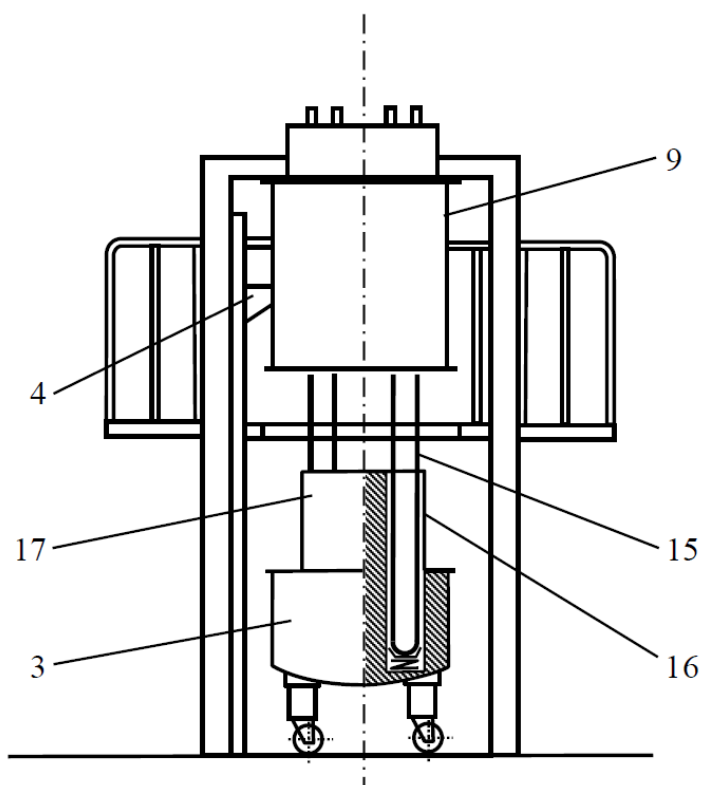


Рис. 15.2.9. Контейнер с основами, установленный после снятия нижнего днища реактора, перед загрузкой

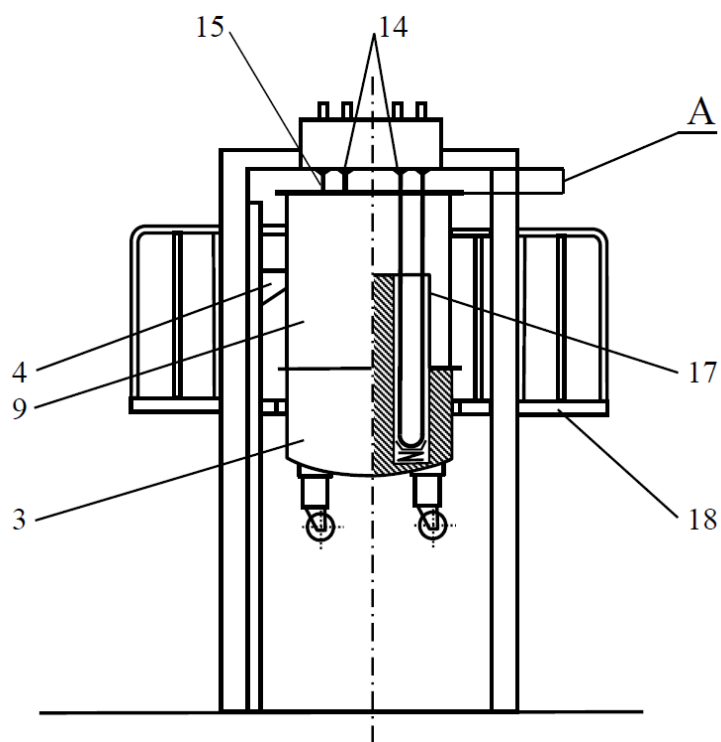


Рис. 15.2.10. Контейнер с основами в положении загрузки

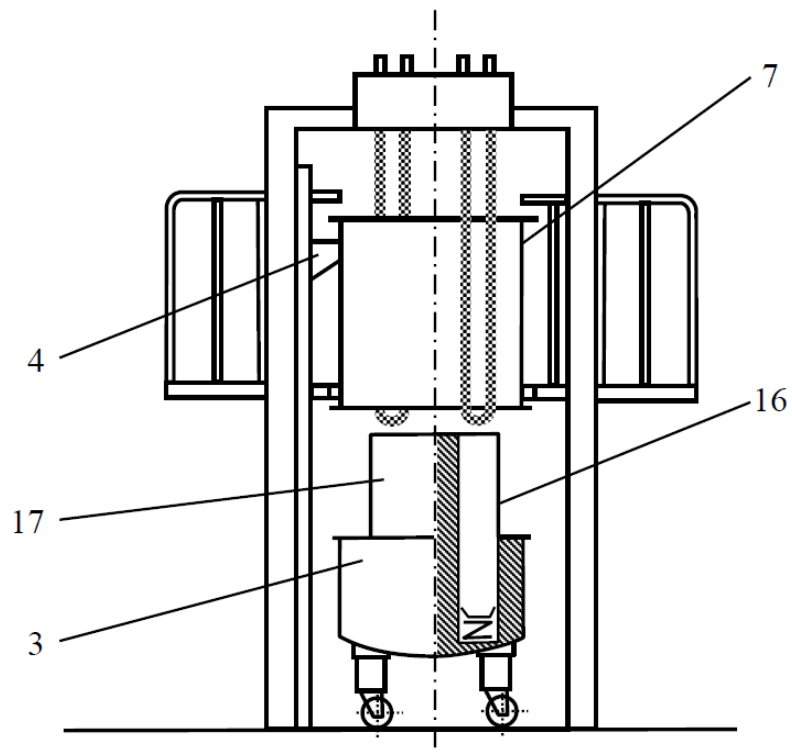


Рис. 15.2.11. Контейнер, установленный после снятия донной части реактора, перед загрузкой стержней

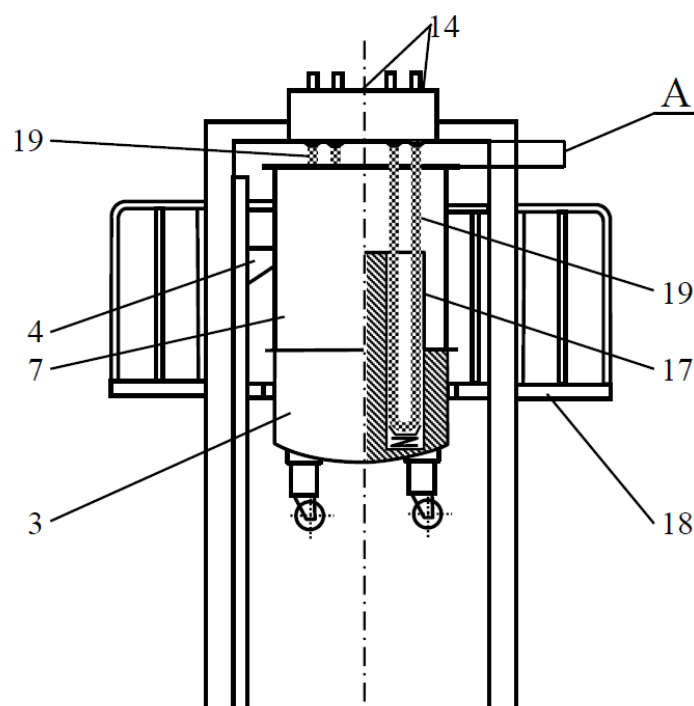


Рис. 15.2.12. Контейнер в положении разгрузки стержней

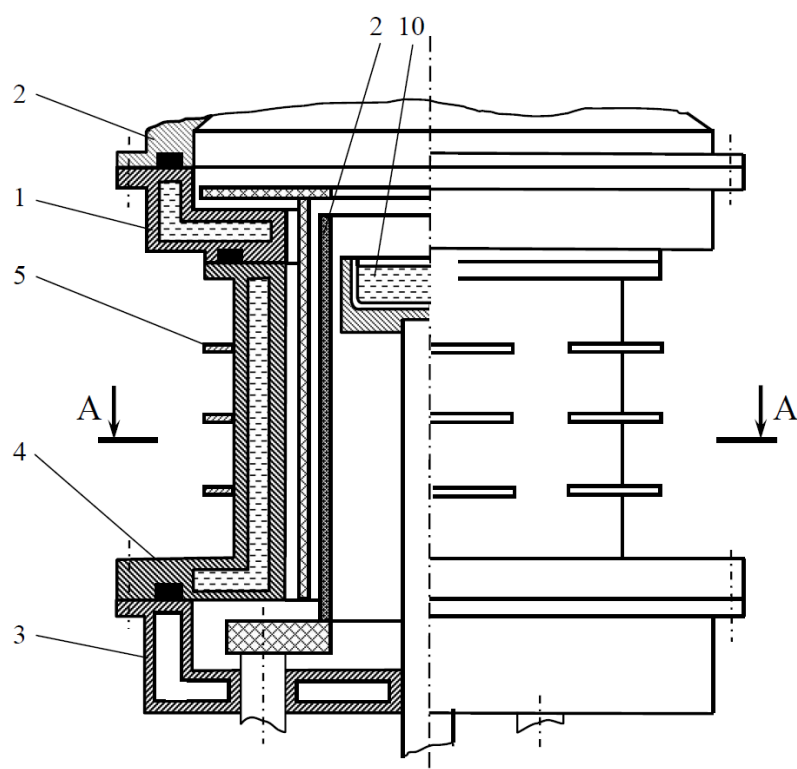


Рис. 15.2.13. Поперечный разрез А-А плавильной камеры в зоне размещения направляющих элементов

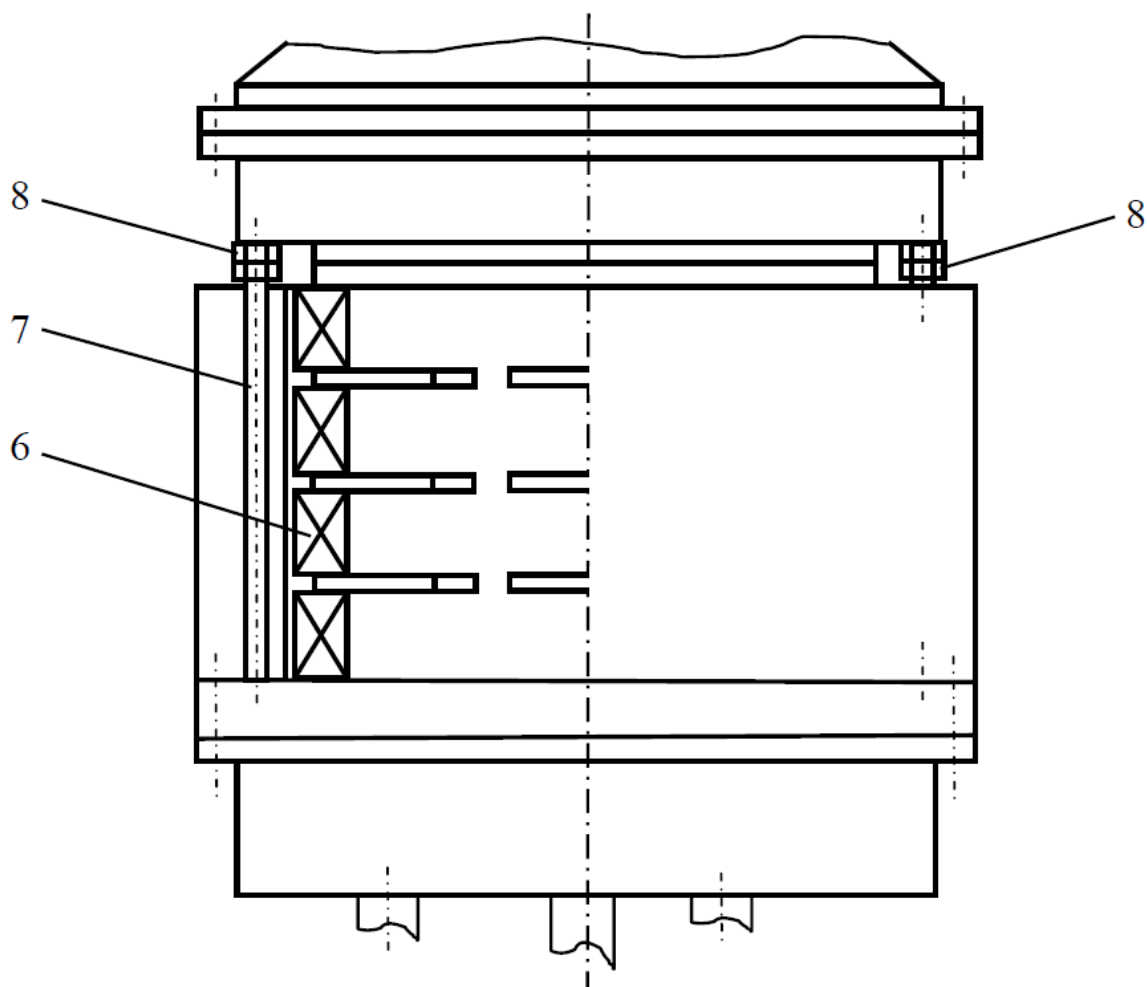


Рис. 15.2.14. Плавильная камера с магнитной системой и распорным устройством

увеличивают площадь охлаждения, упрощая конструкцию системы охлаждения и уменьшая расход воды.

Устройство для выращивания кристаллов из расплава [6]

(рис. 15.2.15)

Устройство содержит камеру роста 1 с тиглем 2 и тепловым узлом (не показан), разделенную горизонтальной перегородкой 3 с центральным отверстием 4 на нижнюю 5 и верхнюю 6 части, затравкодержатель 7, средство накопления выращенных кристаллов – кассета 8 с осью 9 и гнездами 10. Каждое гнездо имеет фиксатор 11 в верхней части, опору 12 с дополни-

тельным фиксатором 13 в верхней части, опора 12 закреплена на ползуне 14, установленном в прорези 15 полой оси 9, выполняющей роль направляющей. Ползун 14 имеет опорные поверхности 16. Имеется привод вертикального перемещения 17, с которым связан толкатель 18, установленный в полости оси 9. Кассета 8 снабжена приводом поворота 19, верхней опорой 20. Толкатель 18 и ось кассеты 9 связаны сцепным устройством, состоящим из зуба 21 в нижней части толкателя 18 и нижнего фиксатора 22 с пазом. Имеется привод перемещения затравки 23.

Устройство работает следующим образом. (Рис. 15.2.15÷15.2.22) Перед выращиванием кристалла в затравкодержатель 7 в верхней части камеры 6 устанавливают затравку, кассету 8 устанавливают в верхнюю часть камеры 6 приводом 17 до сцепления с приводом поворота 19 и фиксируют верхней опорой 20. Толкатель 18 в нижнем положении фиксируется зубом 21 сцепного устройства, входящим в паз нижнего фиксатора 22, фиксируя исходное положение кассеты. Приводом поворота 19 кассета 8 поворачивается в положение выращивания первого кристалла, при этом опорная поверхность 16 одного из ползунов устанавливается напротив зуба 21 толкателя 18. Производится затравливание и выращивание первого кристалла. Выращенный кристалл приводом 23 поднимается в верхнее положение. Приводом 17 поднимается толкатель 18, который зубом 21 продвигает ползун и связанное с ним гнездо 10 до уровня нижнего торца кристалла, после чего механизм поворота 19 поворачивает кассету 8, располагая опору 12 под кристаллом, при этом фиксаторы 11 и 13 захватывают и удерживают кристалл. При дальнейшем поворота происходит разрушение шейки, связывающей затравку с кристаллом. Кристалл фиксируется в гнезде 10.

Таким образом, каждое гнездо 10 настраивается по длине соответствующего выращенного кристалла. Механизмом поворота 19 кассета 8 устанавливается в исходное положение. Приводом 17 толкатель 18 с гнездом 10 и кристаллом опускается в нижнее положение, при этом зуб 21 сцепного устройства выходит из зацепления с опорной поверхностью ползуна 16 и

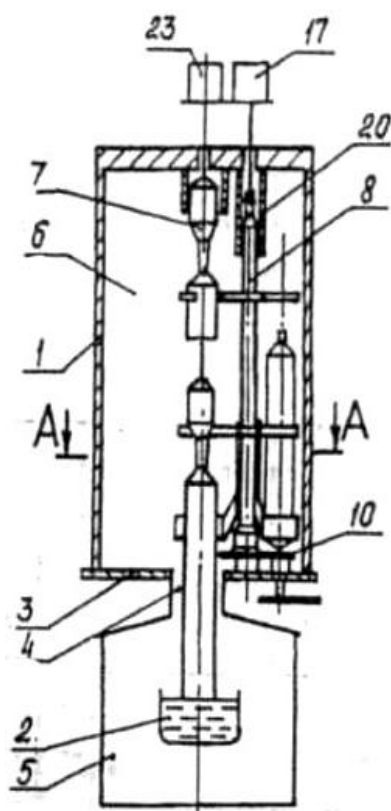


Рис. 15.2.15. Устройство (продольный разрез)

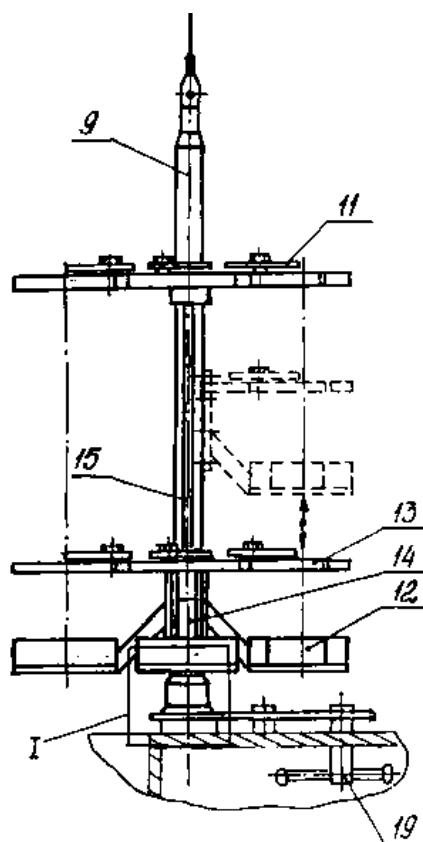


Рис. 15.2.16. Вид на кассету с приводом поворота

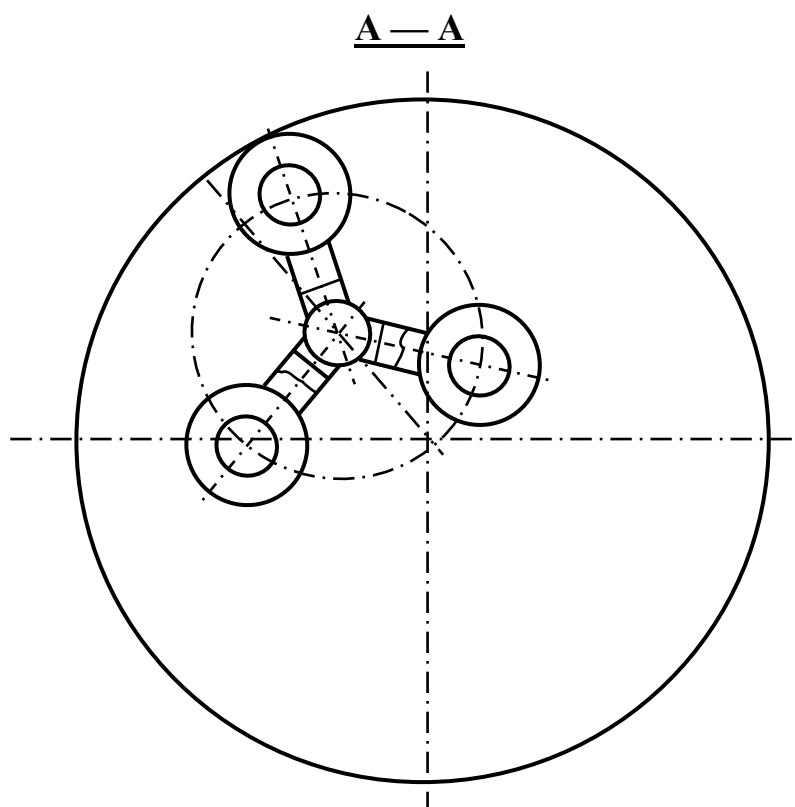


Рис. 15.2.17. Исходное положение установки кассеты
(сечение А-А на рис. 15.2.15)

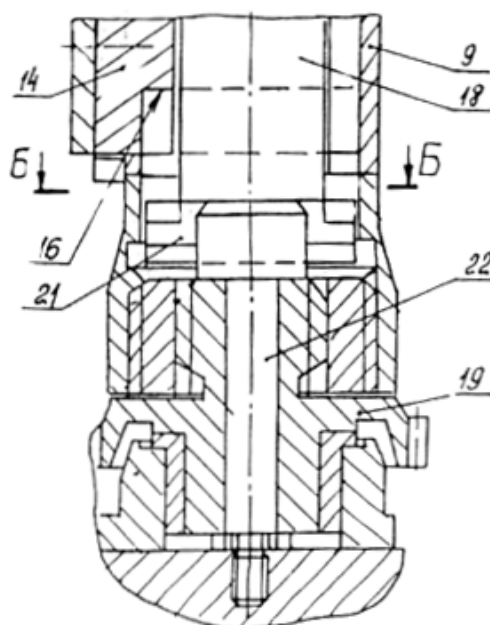


Рис. 15.2.18. Узел 1 на рис. 15.2.16

Б — Б

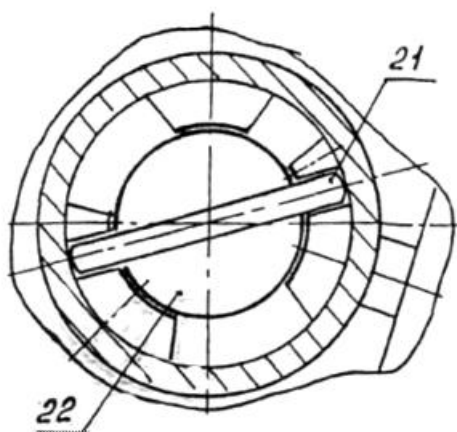


Рис. 15.2.19. Сечение Б-Б на рис. 15.2.18 (исходное положение)

А — А

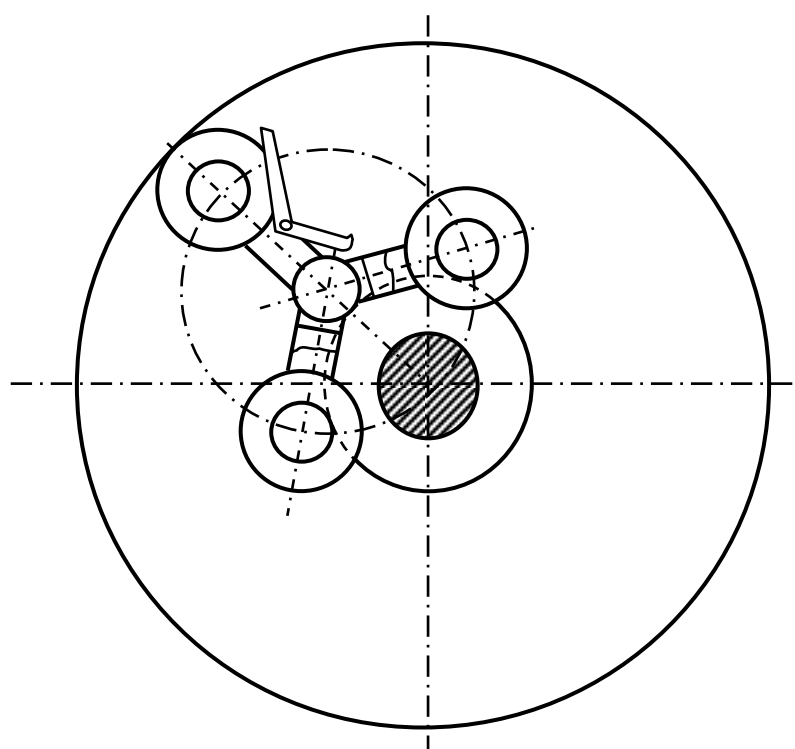


Рис. 15.2.20. Сечение А-А на рис. 15.2.15 (положение выраживания)

Б — Б

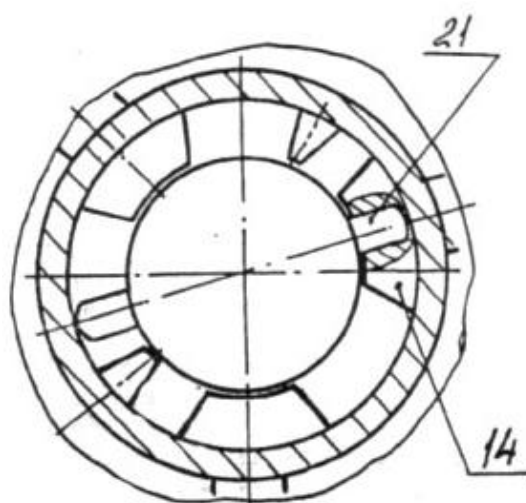


Рис. 15.2.21. Сечение Б-Б на рис. 15.2.18 (положение выращивания)

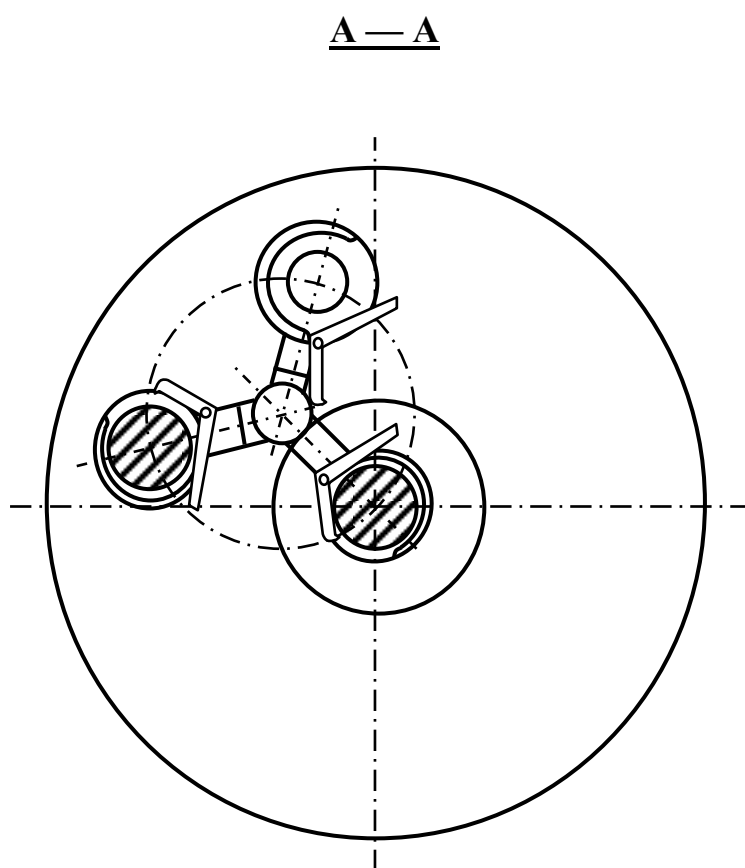


Рис. 15.2.22. Сечение А-А на рис. 15.2.18 (положение отделения кристалла)

опять входит в паз нижнего фиксатора 22, механизмом поворота 19 кассета 8 поворачивается в положение выращивания следующего кристалла и цикл выращивания повторяется.

После заполнения всех гнезд 10 кассеты 8 и охлаждения верхняя часть камеры 6 отстыковывается, отводится в сторону и при помощи привода 17 кассета 8 с кристаллами опускается на транспортировочную тележку.

15.3. Сравнительные исследования волновых резьбовых передач модулей оборудования для выращивания монокристаллического кремния

Рассмотрим отличительные особенности винтовых механизмов, способные передавать поступательное движение в герметизированный объем [14, 16, 147, 148, 164]. Это следующие механизмы, выполненные по схемам транспортирующих манипуляторов:

- винтовой механизм скольжения (ВМС) — см. рис. 15.3.1, а;
- планетарный винтовой механизм (ПВМ) — см. рис. 15.3.1, б;
- винтовой механизм с промежуточными резьбовыми роликами
- шарико-винтовой механизм (ШВМ) — см. рис. 15.3.1;
- несоосный резьбовой механизм (НРМ) — см. рис. 15.3.2,а;
- волновой резьбовой механизм (ВРМ) — см. рис. 15.3.2,б, в.

Рассматривая возможность надежной герметизации каждого механизма, отмечаем, что все механизмы, кроме ВРМ [47, 50] могут передавать поступательное движение в герметизированный объем только с сильфонной герметизацией в комплексе с другими видами уплотнений.

Наличие герметизирующего сильфона так же ограничивает конст-

руктивные решения для передачи нескольких видов движения от одного ввода в герметизированный объем, что делает не возможным их применение в многопозиционных манипуляторах.

Кинематическая точность и коэффициент полезного действия в этих механизмах зависят от дополнительных устройств, которые увеличивают число звеньев и площадь поверхности, вносимую в герметизированный объем, что значительно ухудшает технологический вакуум. Из всех рассмотренных винтовых механизмов, используемых в качестве вводов транспортирующих манипуляторов, наиболее перспективными являются волновые резьбовые вводы, у которых в качестве звеньев передачи движения и герметизации служит гибкий элемент. Сравнительные механические и эксплуатационные характеристики винтовых механизмов приведены в табл. 15.3.1.

По данным, полученным в процессе эксплуатации описанной выше установки ЖФЭ, установлено, что суммарный коэффициент выхода годной продукции не превышает 0,5.

Одной из причин такого малого коэффициента выхода годной продукции являются следующие недостатки передаточных механизмов: низкое качество поверхности штоков, сложность ступенчатой передачи движения, натекание газов через уплотнения, погрешность линейного перемещения штоков до 0,1 мм.

Одним из важных параметров, влияющих на коэффициент выхода годных изделий, является кинематическая погрешность передаточных механизмов, которая, в конечном счете, приводит к появлению брака.

Произведем оценку выхода годных изделий на примере расчета кинематической погрешности передаточных механизмов установки выращивания монокристаллов для твердотельных лазеров.

По методике, регламентированной ГОСТ 21098-75, кинематическая погрешность положения равна:

$$\Delta S = \sqrt{\delta \sum^2 \varphi + \delta \sum^2 BП + \delta \sum^2 ШП} \quad (15.3.1)$$

где $\delta \sum \varphi$ – суммарная кинематическая погрешность зубчатых передач;

$\delta \sum BП$ – суммарная кинематическая погрешность волновых передач;

$\delta \sum ШП$ – суммарная кинематическая погрешность шариковых передач.

Расчет кинематической погрешности показал, что при существующих параметрах передач погрешность линейного перемещения составила до 0,5 мм. Для оценки влияния погрешности положения на коэффициент выхода годных изделий рассмотрим зависимость диаметра получаемого монокристалла от скорости выращивания [11]:

$$d = D \sqrt{\frac{\gamma_{ж} V_2}{\gamma_{кр} V_1}} \quad (15.3.2)$$

где d и D – соответственно диаметры кристалла и тигля;

V_1 и V_2 – соответственно скорости подъема кристалла и тигля, м/с;

$\gamma_{ж}$ – удельный вес жидкого расплава;

$\gamma_{кр}$ – удельный вес кристалла.

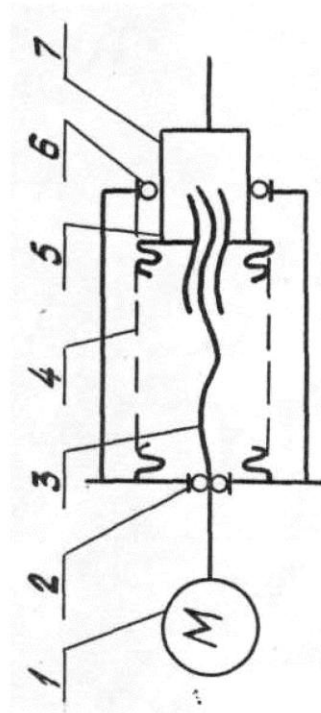
Определим скорость перемещения штока с учетом погрешности его линейного положения (диаметр монокристалла $d = 80 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, длина до 300 мм), по формуле

$$V = \frac{S + \Delta S}{T} \quad (15.3.3)$$

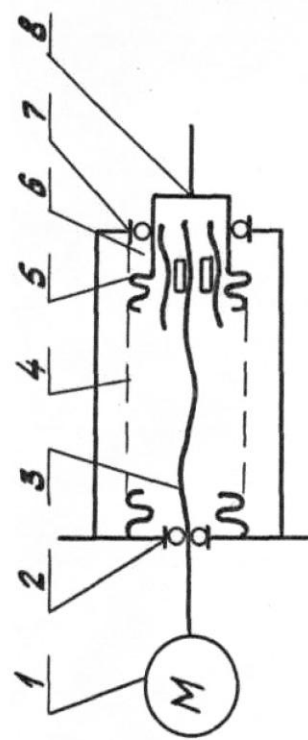
где $S + \Delta S$ – путь, пройденный штоком, и его кинематическая погрешность;

T – время перемещения штока.

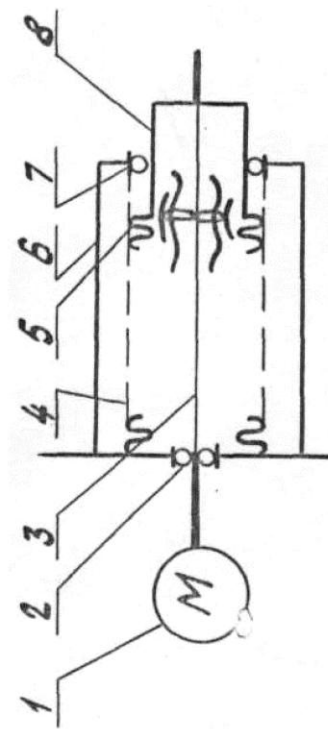
Расчет показал, что при скорости перемещения 0,5 мм/ч, погрешность скорости ΔV составляет $\pm 0,05 \text{ мм/ч.}$, а диаметр монокристалла при полученной погрешности скорости штока равен:



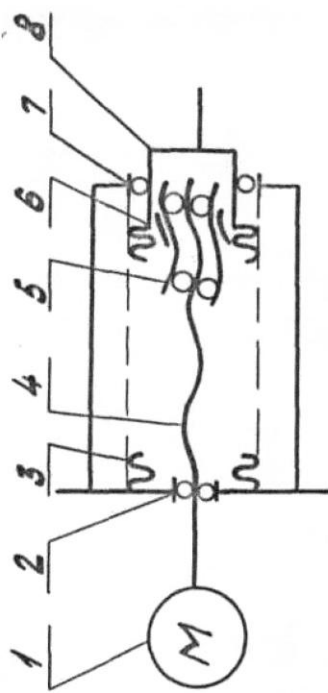
а) 1 – электродвигатель; 2 – опора; 3 – ведущий вал;
4 – сильфон; 5 – уплотнение; 6 – опора;
7 – ведомый элемент



б) 1 – электродвигатель; 2 – опора;
3 – ведущий вал; 4 – сильфон; 5 – ролики;
6 – уплотнение; 7 – опора;
8 – ведомый элемент

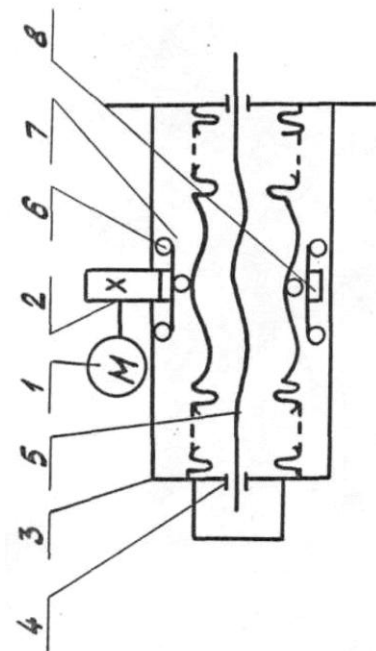


г) 1 – электродвигатель; 2 – опора; 3 – сильфон;
4 – ведущий вал; 5 – шарики; 6 – уплотнение;
7 – ведомый элемент; 8 – опора

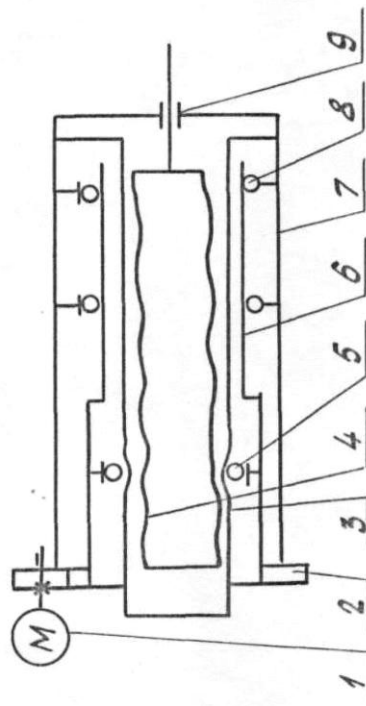


б) 1 – электродвигатель; 2 – опора;
3 – ведущий вал; 4 – сильфон; 5 – уплотнение;
6 – опора; 7 – ролики; 8 – ведомый элемент

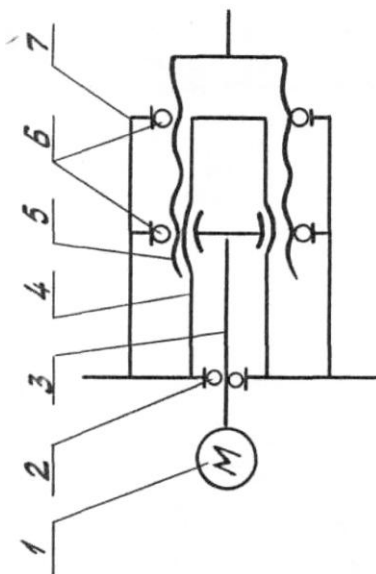
Рис. 15.3.1. Винтовые механизмы с сильфонной герметизацией



- а) 1 – электродвигатель; 2 – ведущее зубчатое колесо;
3 – корпус; 4 – винт; 5 – сильфон; 6 – шарики;
7 – ведомое зубчатое колесо; 8 – гайка



- ← в) 1 – электродвигатель; 2 – ведущее зубчатое колесо;
3 – гибкая гайка; 4 – жесткий винт;
5 – генератор волн; 6 – опора; 7 – опора;
8 – подшипники; 9 – уплотнение



- б) 1 – электродвигатель; 2 – опора; 3 – ведущий вал;
4 – гибкий винт; 5 – жесткая гайка 6 – шарики;
7 – опора

Рис. 15.3.2. Винтовые механизмы с сильфонной герметизацией и герметизацией при помощи гибких элементов

Таблица 15.3.1
Сравнительные механические и эксплуатационные характеристики винтовых механизмов

Виды механизмов	КПД, %	Кинематическая погрешность на длине 25 мм Δ , мкм	p , Па	Число звеньев	t^0	Скорость пе- ремещения V , м/с
Винтовые механизмы скольжения (ВМС)	0,57	35	10^{-9}	8	450	-0,02
Планетарный винтовой механизм (ПВМ)	0,95	$8 \div 12$	10^{-9}	10	450	-0,2
Винтовой механизм с промежуточными резбовыми роликами (ВМСППР)	0,93	$10 \div 15$	10^{-9}	I	450	-0,2
Шарико-винтовой механизм (ШВМ)	0,97	$10 \div 15$	10^{-9}	2	450	-0,1
Планетарно-резьбовой механизм (ПРМ)	0,70	32	10^{-9}	27	350	-0,2
Волновой резьбовой механизм (ВРМ)	0,7	$5 \div 8$	$2 \cdot 10^{-9}$	22	450	-0,1
Волновой резьбовой механизм (ВРМ)	0,7	$5 \div 8$	$2 \cdot 10^{-9}$	9	450	-0,1

$$d_1 = 140 \sqrt{\frac{0.11 \cdot 0.3}{0.2(0.5 - 0.05)}} = 84.77 \text{ (мм)} \quad (15.3.4)$$

$$d_2 = 140 \sqrt{\frac{0.11 \cdot 0.3}{0.2(0.5 + 0.05)}} = 76.68 \text{ (мм)}$$

Учитывая недостатки, присущие передаточным механизмам в рассматриваемой установке (сложные кинематические цепи, большую погрешность кинематическую), можно сделать вывод о том, что примененные в ней ВРП позволят создать цельнометаллический герметичный механизм поступательного движения, обладающий более высокой кинематической точностью, что позволяет повысить коэффициент выхода годных изделий сверхвысоковакуумного автоматизированного технологического оборудования.

В настоящее время имеется некоторый опыт использования волновых резбовых передач в промышленности [22, 51, 52, 53, 54, 55, 56], а также применения ВРП в транспортирующих манипуляторах [14, 19, 20] вакуумного технологического оборудования.

Исследования, проведенные ранее М.И. Медниковым [35], Н.В. Василенко [19, 22, 64], показали, что ВРП могут быть использованы в качестве вводов в герметизированное пространство.

Отметим, что теоретические и экспериментальные исследования по геометрическим, кинематическим и прочностным характеристикам волновой резбовой передачи ВРП, выполненные Н.И. Цейтлиным [62, 66, 67], Н.В.Борисенко [57, 58, 59], Н.В. Василенко [13, 14, 22] и В.М. Соловьевом [65, 91], показывают, что ВРП могут найти применение в качестве прецизионных механизмов, а в ряде случаев приводы с волновыми герметичными резбовыми вводами будут иметь значительные технико-экономические преимущества перед другими резбовыми передачами. Однако, учитывая, что электронная промышленность предъявляет повышенные требования к

точности и скорости позиционирования исполнительных органов передаточных механизмов, целесообразно проводить дальнейший анализ факторов, влияющих на точностные и динамические характеристики ВРП.

Приведем краткий обзор имеющихся работ по геометрическим, кинематическим, силовым характеристикам, а также конструктивным разработкам ВРП.

В настоящее время имеется достаточное количество теоретических и экспериментальных работ по исследованию геометрии зацепления и кинематических характеристик поступательного движения ВРП [57, 75, 77]. Так, Г.А. Борисенко получила зависимость поступательного движения ВРП малых подач [57]; предложила в первом приближении методику расчета геометрических параметров ВРП трения $M70 \times 3$ с наружным двухволновым регулируемым роликовым генератором волн. Гибкая гайка с толщиной стенки 1 мм была выполнена в виде негерметичного стакана с резьбовым участком шириной 20 мм на краю. При величине радиальной деформации $W = 0,328$ мм передача обеспечивала осевую нагрузку до 300 кН. Была получена зависимость определения передаточного отношения [58, 59], но применение ее ограничено, так как разность чисел заходов винта и гайки равна нулю.

Лазарев А.И. [64] приводит зависимость расчета геометрических параметров гибкого звена и гайки по определенным соотношениям высоты витка резьбы H_p и диаметра срединной окружности $D_{с.о.}$ недеформированной гайки или соотношению максимальной радиальной деформации $W_{\max}$ и посадочного диаметра недеформированного гибкого элемента $D_{нед}$ гибкой гайки.

Однако силовое взаимодействие звеньев ВРП им так же, так как и в работах [60, 66] учитывается приближенно.

При оценке величины осевого перемещения ведомого звена автор принимает её равной произведению числа волн деформации, не учитывая при этом дополнительное винтовое движение.

Оценка влияния дополнительного винтового движения, влияющего

на точность позиционирования ведомого звена ВРП, приводится в работах [53÷58].

Зависимость передаточного отношения приводит М.И.Медников [56], но при этом он предполагает предварительно уточнять коэффициент проскальзывания, что вызывает серьезные затруднения расчета при заданных конструктивных параметрах передачи.

Более точно рассматриваются кинематические характеристики поступательного и винтового движения ВРП в работах [24] и [22]. Авторы выводят зависимости с учетом угла поворота ведомого звена, а также зависимость передаточного отношения с учетом изменения величины радиальной деформации.

В [58] рассматриваются геометрические параметры зацепления ВРП, выводится зависимость упругих перемещений гибкого звена и положения точки контакта, однако предложенная методика не отражает зависимость потерь в зацеплении от величины деформации гибкого элемента.

Наличие гибкого элемента в ВРП затрудняет выбор геометрических параметров, поэтому многие авторы геометрические параметры определяют графоаналитическим методом [57] .

Наиболее точно выбор геометрических размеров волновой резьбовой передачи «винт-гайка» в зависимости от винтовых параметров и реальных зазоров в зацеплении рассматривается в работах [70, 106, 107] .

В работах [22÷24] предложен расчет напряженно-деформированного состояния гибкого элемента ВРП, однако приведенные уравнения очень сложны и применение их затруднительно.

Далее проанализируем имеющиеся работы по конструктивным разработкам ВРП, применяемых в вакууме.

В [86, 88] показан ряд опытно-промышленных образцов волновых передач «винт-гайка» в обычном и герметичном исполнении, приведены кинематический анализ передач, и испытания образцов в вакууме, показывающие удовлетворительные результаты.

Авторы [99] рассматривают промышленный образец скиппера с применением волновой резьбовой передачи, при этом КПД привода увеличился с 25 до 60 %, уменьшились весогабаритные показатели.

Сравнительные испытания в вакууме четырех опытно-промышленных образцов волновых вводов для установок жидкофазной эпитаксии [14] показали удовлетворительные результаты.

В работах [80, 81, 88, 89÷101] отмечено, что при разработке герметичных волновых передач «винт-гайка» большое значение имеет создание регулируемых генераторов волн, здесь же исследованы ВРП с разработанными регулируемыми генераторами волн, которые показали их удовлетворительную работоспособность.

В работе [102] дан анализ герметичных волновых передач, применяемых в вакуумной технике, оценено влияние расположения генератора волн (внутреннее и наружное) на весогабаритные показатели, оборудования.

Следует отметить работы [91, 95], в которых рассмотрены конструктивные разработки волновых передач с гибкими элементами, способными передавать два и более движение в герметизированное пространство.

В работе [90] приведены исследования влияния конструктивно-технологических факторов на газопроницаемость гибких герметизирующих элементов ВРП, предложены технологические методы повышения герметичности гибких элементов, связанные с пескоструйной обработкой.

В [92, 93, 94] даны конструкции волновых резьбовых передач, применяемых в электроприводах, однако сведения об эксплуатационных показателях не приводятся.

Авторы [95, 96] предлагают конструктивные решения, повышающие долговечность гибких элементов волновых резьбовых передач, однако использование предложения [82], по нашему мнению, уменьшит, а не увеличит долговечность гибкого элемента.

Следует отметить некоторые типы механизмов поступательного движения, работающих на основе волнового принципа. В частности, в ра-

ботах [104, 105] показана конструктивная схема волнового реечного механизма ВРМ для приводов линейных подач оборудования с ЧПУ, рассмотрены его геометрические характеристики, показаны преимущества ВРМ по сравнению с существующими типами реечных механизмов. По нашему мнению, такие передачи обладают трудоемкостью изготовления, хотя и могут получить дальнейшее развитие.

Таким образом, имеющиеся работы по геометрии зацепления ВРП, кинематическим характеристикам, конструктивным решениям не дают полной картины влияния названных факторов на точностные и динамические характеристики ВРП. В частности, в [102] оценено влияние технологических и кинематических погрешностей элементов ВРП на точность положения ведомого звена, однако сведений об экспериментальных исследованиях не приведено. Авторы [14] рассматривают кинематику поступательного движения ВРП, выводят зависимость для ее расчета с учетом угла поворота жесткого элемента для волновых передач «винт–гайка» ВПВГТиЗ и ВПВГТ.

Зависимости кинематической погрешности поступательного и вращательного движений волновой резьбовой передачи в [108] по существу повторяют решения [13, 14].

В настоящее время накоплен большой опыт исследования кинематической погрешности волновых зубчатых передач (ВЗП), а также динамических явлений в ней, результаты которых в некоторых случаях с определенной степенью достоверности могут быть перенесены на создание методики расчета и проектирования высокочастотных волновых резьбовых передач.

Наиболее близкими к волновым резьбовым передачам являются исследования у ВЗП таких факторов, как определение зазоров в зацеплении, мертвого хода, технологических и кинематических погрешностей.

С. Массер в своих работах [109÷114] по разработке волновых передач указывает, что волновые передачи могут обладать высокой точностью

за счет многопарности зацепления и возможностью выбора радиального зазора. Однако автор не обосновывает этот вывод ни теоретически, ни экспериментально.

Ряд публикаций о применении волновых редукторов в точных механизмах и космической технике подтверждает утверждения С. Массера [111]. Применение волновых передач в прецизионном оборудовании [114, 115], анализ погрешностей гибкого и жесткого колес, проведенный авторами после их изготовления, а также исследование погрешности передачи в сборе, показали, что последняя составляет в среднем 40 % суммарной погрешности колес, погрешности биения диаметров эксцентриситетов, изменения межцентрового расстояния и т.д. Такие погрешности в ВЗП проявляются в меньшей мере, чем в обычной зубчатой передаче, так как гибкое колесо имеет возможность самоустанавливаться. Рассматривая многопарность зацепления и его влияние на кинематическую погрешность, авторы [116] показывают, что погрешность изготовления зубчатых колес усредняется, тем самым способствует повышению точности передачи.

В работах [78 и 118] рассматривается кинематическая погрешность ВЗП. Авторы отмечают пригодность генераторов волн свободной деформации в точных механизмах. В то же время они показывают, что точность ВЗП с однопарным зацеплением выше, чем обычной передачи, в два раза.

Авторы [119] оценивают влияние различных типов генераторов волн на точность ВЗП и отмечают, что основной составляющей кинематической погрешности является циклическая погрешность, вызываемая погрешностями изготовления, а также показывают, что исследованные типы генераторов волн не дают многопарности зацепления из-за несовершенства формы деформации.

Влияние погрешностей окружного шага на кинематическую погрешность волновых передач рассматривают авторы [121] .

На основе теории вероятностей, определяют накопленные погрешности окружного шага зубчатых колес при одинаковом зацеплении. По мне-

нию авторов [121] наибольшую кинематическую погрешность в каждой зоне зацепления имеют два зуба, поэтому повышение кинематической точности можно осуществить за счет увеличения числа волн деформации.

С положениями работы [121] перекликаются основные исходные предпосылки работы [122]. В этой работе рассматриваются технологические пути повышения точности волновых: передач. Зависимости для оценки кинематической погрешности волновой передачи в этой работе аналогичны формулам, приведенным в [118].

Автор [122] отмечает, что наличие двух зон зацепления повышает точность двухволновой передачи вдвое по сравнению с обычной передачей, а эффект многопарности, даже при 40 % зубьев в одновременном зацеплении уменьшает кинематическую погрешность на 15 % по сравнению с зубчатой передачей, в зацеплении которой контактирует только одна пара зубьев.

Следовательно, авторами работ [120 и 122] при выводе аналитических зависимостей для определения кинематической погрешности принята условная схема ВЗП, в которой в зацеплении участвует только одна пара зубьев, имеющих наибольшую погрешность. Следует отметить, что это предположение не подтверждено экспериментальными исследованиями распределения нагрузки по зубьям [125, 126].

Дальнейшее развитие предположений работы [121] нашло отражение в работе [127], где отмечается влияние погрешностей изготовления деталей на кинематическую погрешность передачи. Авторы [127] рассматривают влияние на кинематическую погрешность передачи эксцентриситета генератора волн, монтажных эксцентриситетов жесткого колеса и узлов крепления гибкого колеса. Они считают, что наличие эксцентриситета волн вызывает некоторый установочный поворот гибкого колеса при сборке механизма. При передаче вращательного движения в одном направлении эксцентриситет установки генератора отклонений в углах поворота ведомого и ведущего звеньев от расчетных значений не вызывает.

Анализируя работу [124], авторы [123] не соглашаются с рядом ее выводов. Они считают, что упругие деформации элементов — основная особенность волновой передачи. Несмотря на усложнение требований к конструкции передачи, именно эта особенность позволяет достигнуть высокой многопарности зацепления, в значительной степени компенсируя погрешности изготовления элементов передачи. По их мнению [123], рассмотрение гибкого элемента передачи с некоторой постоянной «застывшей» формой деформации справедливо только для ненагруженных кинематических передач с достаточно большими боковыми зазорами в зацеплении и абсолютно жестким генератором волн.

Следует отметить работу Л.С. Черновой [128], в которой графоаналитическим путем установлено, что различная форма профиля кулачка (кривая Резаля, эллипс и эвольвента) не оказывают существенного влияния на геометрию приближенного волнового зацепления, что подтверждено исследованиями [19]. Л.С. Чернова [129] отмечает, что практически не влияют на точность передачи погрешности профиля и основного шага зубьев.

В МВТУ им. Н.Э. Баумана проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований точностных характеристик ВЗП. Основным критерием, влияющим на точность ВЗП, в работе [130] принимается число контактирующих зубьев.

При оценке кинематической погрешности ВЗП погрешности зубьев приняты случайными величинами и сложены по среднеквадратичному закону. При этом отмечено, что увеличение точности должно составить только 1,4 и 1,73 раза соответственно для двухволновой и трехволновой передач. Однако исследования, проведенные Л.С. Черновой [129], Р.И. Шамирян-Пахлеваняном [131] и отмеченные ранее в работе [122], показали, что точность двухволновой передачи, имеющей однопарное зацепление, выше точности обычной передачи, собранной из тех же колес, в два, а трехволновой — в четыре раза.

Перейдем к работам, связанным с определением «мертвого хода»

крутильной жесткой передачи. С. Массер [111] указывает, что в процессе работы все зубья ВЗП работают поочередно обеими сторонами. Mansfield D.L. и Benford R. L. [116] отмечают: «Рабочие и нерабочие профили зубьев перемещаются почти параллельно самим себе, при этом уменьшение боковых зазоров не приводит к увеличению трения контактирующих поверхностей. В передачах, имеющих очень малые боковые зазоры, в целях увеличения долговечности колес, рекомендуется, чтобы жесткие колеса имели возможность сравнительно небольшом радиальной деформации, которая уменьшает перегрузки на гибком колесе и генераторе. При нулевом боковом зазоре не происходит изменения кинематики передачи, что особенно важно в точных сервомеханизмах».

Из иностранных публикаций интересна работа [117], в которой приведены технические характеристики передач с уменьшенным люфтом. В СССР в 1969г. была опубликована статья [133] об экспериментальном исследовании «мертвого хода» двухволновой зубчатой передачи. Полный «мертвый ход» складывается из зазоров в узле генератора волн и «упругого мертвого хода», проявляющегося под нагрузкой из-за деформации гибкого колеса и других элементов передачи. Экспериментальное исследование проведено на волновом зубчатом редукторе с двухдисковым генератором волн. Реверсивная нагрузка до 2 кН создавалась на тихоходном валу гидравлическим силовиком через рычаг. В процессе нагружения передачи крутящим моментом измерялись углы закручивания гибкого и жесткого колес. Из приведенного рисунка в работе [132] следует, что с увеличением нагрузки ветвь гибкого колеса отклоняется от своего первоначального положения. Анализ графика показал, что основными составляющими полного «мертвого хода» волнового зубчатого редуктора являются зазоры, закрутка гибкого элемента и радиальные деформации гибкого и жесткого колес. Авторами [133] экспериментально обнаружено искажение под нагрузкой первоначальной формы гибкого колеса. В результате этого обращается внимание на то, что посадка гибкого колеса на генератор с боль-

шим зазором может привести к закаливанию зацепления. Значительная доля зазоров в «мертвом ходе» объясняется принятой геометрией зацепления, когда без нагрузки в зацеплении находится по одному зубу в каждой волне деформации. Коэффициент крутильной жесткости не подсчитывался. Малое число зубьев в зацеплении не обеспечивает гистерезисного характера жесткости и делает ее качественно подобной кривой жесткости для обычных зубчатых передач.

Л.С. Чернова и Е.Г. Гинзбург [134] рассмотрели влияние нескольких зон зацепления в ВЗП на величину бокового зазора между пассивными профилями зубьев. Они считают, что боковой зазор в волновом зацеплении уменьшается из-за наличия у колес накопленной погрешности окружных шагов.

Т.Н. Комарова и В.И. Крашениников [135] приводят экспериментальные зависимости изменения величины «мертвого хода» ВЗП от нагрузки и величины боковых зазоров в зацеплении, а также результаты испытаний статистического момента трогания от величины боковых зазоров в зацеплении и величины «мертвого хода». В этой работе отмечено, что с увеличением боковых зазоров «мертвый ход» возрастает, как и при увеличении нагрузки.

И.И. Васильевой [136, 137] установлена аналитическая зависимость «мертвого хода» ВЗП от боковых зазоров в зацеплении, возникающих в результате технологических погрешностей изготовления зубчатых колес и кулачка-генератора. Показано, что эксцентриситеты колес и несоосность ведущего и ведомого звеньев способствуют уменьшению «мертвого хода».

П.К. Попов [123], исследуя крутильную жесткость ВЗП, пришел к выводу, что упругий «мертвый ход», возникающий из-за скручивания упругих элементов передачи, играет существенную роль при его работе под нагрузкой.

Таким образом, повышение кинематической точности ВЗП объясняется наличием симметричной многопарности зацепления и приработкой.

Однако единая инженерная методика расчета отсутствует, также нет единой методики по расчету точных волновых резьбовых передач, как в обычном, так и герметичном исполнении, что сдерживает их использование в различных областях машиностроения. В частности, следует отметить, что использование ВРП в герметичном исполнении в механизмах, работающих в высоком и сверхвысоком вакууме, затруднено не только из-за отсутствия методики расчета, но и из-за сложности обеспечения требуемой работоспособности силовой пары в условиях сухого трения в вакууме, так как фрикционное взаимодействие чистых металлических поверхностей рабочих элементов приводит к разрушению оксидной пленки и их схватыванию. Одним из путей, повышающих работоспособность резьбовой пары в вакууме, является покрытие рабочих поверхностей.

Всестороннему анализу материалов кинематических пар, смазке и покрытиям посвящена работа [100], в которой приведен полный анализ твердых смазочных материалов на основе MoS_2 . Приводятся также характеристики трения материала в зависимости от материала контртела, результаты фрикционных испытаний материалов на основе стали Н18К9М31 в зависимости от наполнителя в вакууме, а также анализ исследований покрытий ВНИИНП 220, ВНИИНП 230, ВНИИНП 260. Исследования влияния твердых покрытий и смазок на работоспособность передач выполнены в работах [135÷144]. Учитывая кинематические особенности зацепления ВРП, в которой происходит перекатывание витков резьбы со скольжением, а также склонность витков кинематических пар к схватыванию в условиях высокого вакуума и, анализируя работы [100, 135÷144], можно сделать вывод, что в качестве покрытий кинематических пар высокоточной волновой передачи в высоком вакууме следует рекомендовать материалы на основе MoS_2 .

Таким образом, оценивая многие положительные результаты исследований геометрических, точностных характеристик ВРП и ВЗП, а также материалы для покрытий пар зацепления, можно отметить, что эти иссле-

дования могут использоваться для создания методики расчета и проектирования высокоточных герметичных волновых резбовых передач ВРП.

15.4. Особенности тепловых модулей оборудования для выращивания монокристаллического кремния

Конструкция теплового узла определяет распределение температур (тепловые поля) в расплаве и растущем монокристалле. Тепловой узел состоит из подставки, тигля, нагревателя и системы экранов.

Для выращивания однородных по свойствам монокристаллов методом Чохральского необходимо выполнение следующих условий: самая холодная точка должна быть расположена в месте касания затравки с расплавом; тепловое поле должно быть симметрично относительно оси; расплав вне области границы раздела фаз должен быть перегрет с целью исключения спонтанной кристаллизации.

Тепловые условия процесса определяют осевые и радиальные градиенты температуры в кристалле и расплаве, от которых зависят форма фронта кристаллизации и термические напряжения в монокристалле, а также размеры переохлажденной области расплава вблизи фронта кристаллизации.

Схема тепловых потоков и изотерм в системе расплав-кристалл показана на рис. 15.4.1. Поток тепла Q_n , поступающий к тиглю от нагревателя, равен сумме потоков тепла, отводимых излучением от расплава $Q_{ир}$ теплопроводностью $Q_{тк}$ и излучением $Q_{ик}$ от кристалла. Соотношение этих потоков определяет характер градиентов температуры, а следовательно, и изотерм в выращиваемом монокристалле. Радиальный градиент температуры G_r определяется разностью температур в сечении кристалла на его поверхности T_n и в центре $T_{ц}$:

$$G_r = \Delta T_r / r = (T_u - T_n) / r, \quad (15.4.1)$$

где r – радиус кристалла, а осевой градиент температуры в кристалле G_x – разностью температур по его длине:

$$G_x = \Delta T_x / x = (T_1 - T_2) / x, \quad (15.4.2)$$

где x – расстояние по длине кристалла.

Для получения совершенных кристаллов нужно на протяжении всего процесса выращивания сохранять плоской границу раздела кристалл-расплав. Для этого необходимо, чтобы изотермы были практически перпендикулярными направлению роста, а также обеспечивался тщательный контроль тепловых потоков, как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Теплота кристаллизации поступает в растущий кристалл снизу через фронт кристаллизации в направлении от расплава к кристаллу и рассеивается за счет теплопередачи теплопроводностью через кристалл к подъемному механизму и излучения. Создав в установке для выращивания с помощью экранов или дополнительных нагревателей для подогрева растущего кристалла тепловые условия, при которых радиальный тепловой градиент незначителен, можно получить изотермы в расплаве, перпендикулярные направлению роста.

Осевой градиент определяется следующими факторами:

1. Расположением нагревателей. При индукционном нагреве – формой индуктора и расположением в нем тигля, материалом и размерами тигля и приемника индукционных токов, при использовании нагревателей сопротивления – геометрией нагревателя и положением тигля относительно нагревателей.
2. Теплоотводом в окружающее пространство. Теплоотвод определяется близостью тигля к краю индуктора или к краю печи; температурой помещения; размерами и теплопроводностью кристалла; температурой держателя кристалла; излучательной способностью поверхности расплава и отражательной способностью стенок печи.

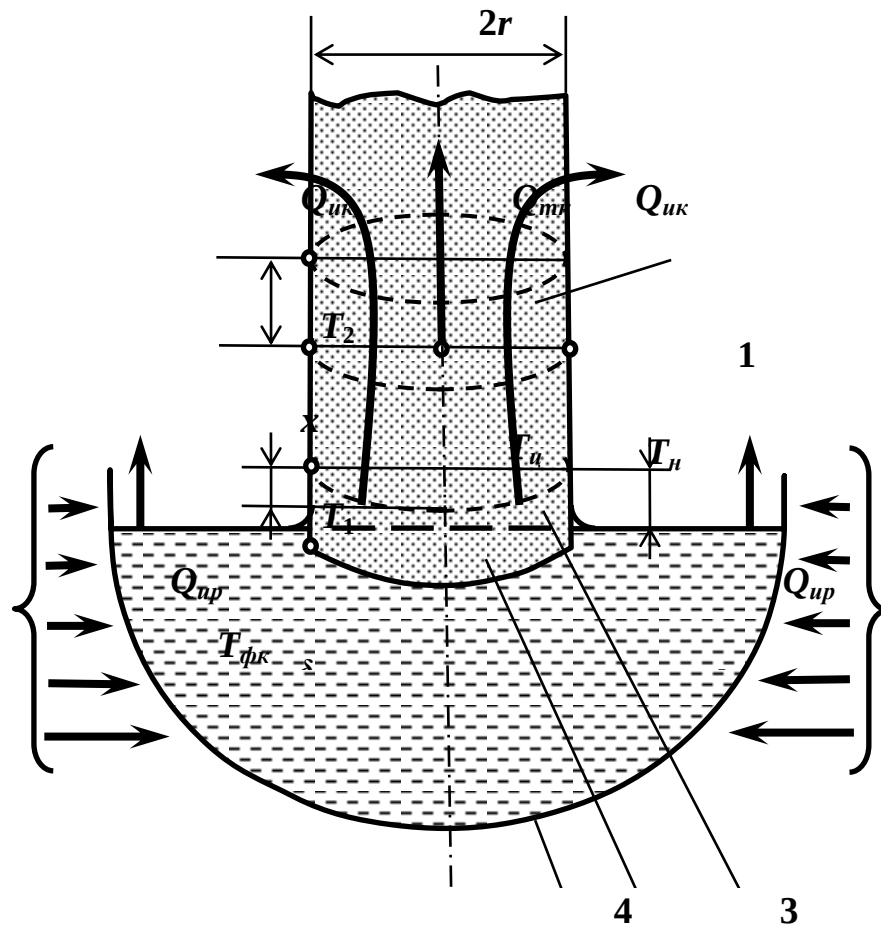


Рис. 15.4.1.. Схема тепловых потоков и изотерм в системе расплав-кристалл при выращивании монокристалла методом Чохральского: 1 — кристалл; 2 — столбик расплава; 3— переохлажденная область расплава; 4 — тигель; δ — стрела прогиба фронта кристаллизации; h_0 — высота столбика расплава; $T_{фк}$ — температура на фронте кристаллизации; T_p — температура изотермы, ограничивающей переохлажденную область расплава.

3. Глубиной расплава в тигле.
4. Скоростью вытягивания и скрытой теплотой плавления. Для уменьшения радиальной асимметрии теплового поля и перемешивания расплава кристалл и тигель с расплавом вращают в противоположных направлениях. При увеличении скорости кристаллизации выделяется повышенное количество тепла (за счет скрытой теплоты плавления) на фронте кристаллизации и осевой градиент уменьшается.

Тепловой узел является средством управления тепловыми условиями процесса выращивания монокристалла полупроводника. От его конструкции зависят устойчивость роста, стабильность диаметра требует поддержания постоянных в ходе процесса градиентов температуры в расплаве, а условием получения совершенной структуры монокристалла является создание и поддержание в течение всего процесса плоского фронта кристаллизации. Схемы наиболее распространенных тепловых узлов, применяемых в установках для выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского, приведены на рис. 15.4.2.

Т и г е л ь. Форма дна тигля (плоская или сферическая) оказывает влияние на распределение температуры в расплаве. В тиглях с плоским дном вследствие наличия «углов» конвекция в расплаве по всему объему не обеспечивает равномерного перемешивания расплава по всему объему. В этом отношении лучшие результаты получаются при использовании тиглей со сферическим дном. Сферическая форма тигля, обеспечивая постоянное отношение поверхности расплава к его высоте и равномерное размешивание расплава по всему объему конвективными потоками, позволяет получать меньшие линейные осевые градиенты температуры по расплаву, чем в случае плоской формы дна тигля.

Оптимальное соотношение внутреннего диаметра тигля D и высоты расплава H находится в пределах $1,0 \div 2,5$.

Оптимальное соотношение диаметра тигля D и диаметра выращи-

ваемого из него монокристалла кремния и германия d составляет $2,0 \div 3,5$.

Материал тигля должен удовлетворять следующим требованиям:

- быть инертным по отношению к содержащемуся в нем расплавленному металлу или полупроводнику, а также к атмосфере, в которой производится выращивание;
- не смачиваться расплавом;
- иметь теплопроводность более низкую, чем загрузка, что необходимо в связи с проблемами оптимального теплопереноса в процессе роста кристалла;
- не загрязнять расплав примесями при соприкосновении его со стенками контейнера.

Одним из основных контейнерных материалов для выращивания монокристаллов кремния является высокочистый синтетический кварц.

Кварц имеет очень низкий коэффициент теплового расширения ($5,8 \cdot 10^{-7}$) и поэтому способен выдерживать без разрушения большие температурные градиенты и термические удары. Температура размягчения кварца выше 1300°C . Из кварца в получаемый кристалл переходит в основном кислород.

Перспективными материалами для контейнеров являются стеклоуглерод, нитриды кремния, алюминия и бора.

П о д с т а в к а т и г л я . Она представляет собой полую внутри графитовую трубку. Конструкция поставки оказывает влияние на градиенты температуры в расплаве и монокристалле. Так, например, если дно поставки намного толще боковых стенок, то отвод тепла от расплава в осевом направлении, а, следовательно, и градиент температуры в данном направлении уменьшаются. Увеличение толщины стенок подставки влечет за собой повышение температуры нагревателя и в случае, если тепловой узел аналогичен показанному на рис. 15.4.2, *а*, в окружающее монокристалл пространство над тиглем поступает большее количество тепла, что

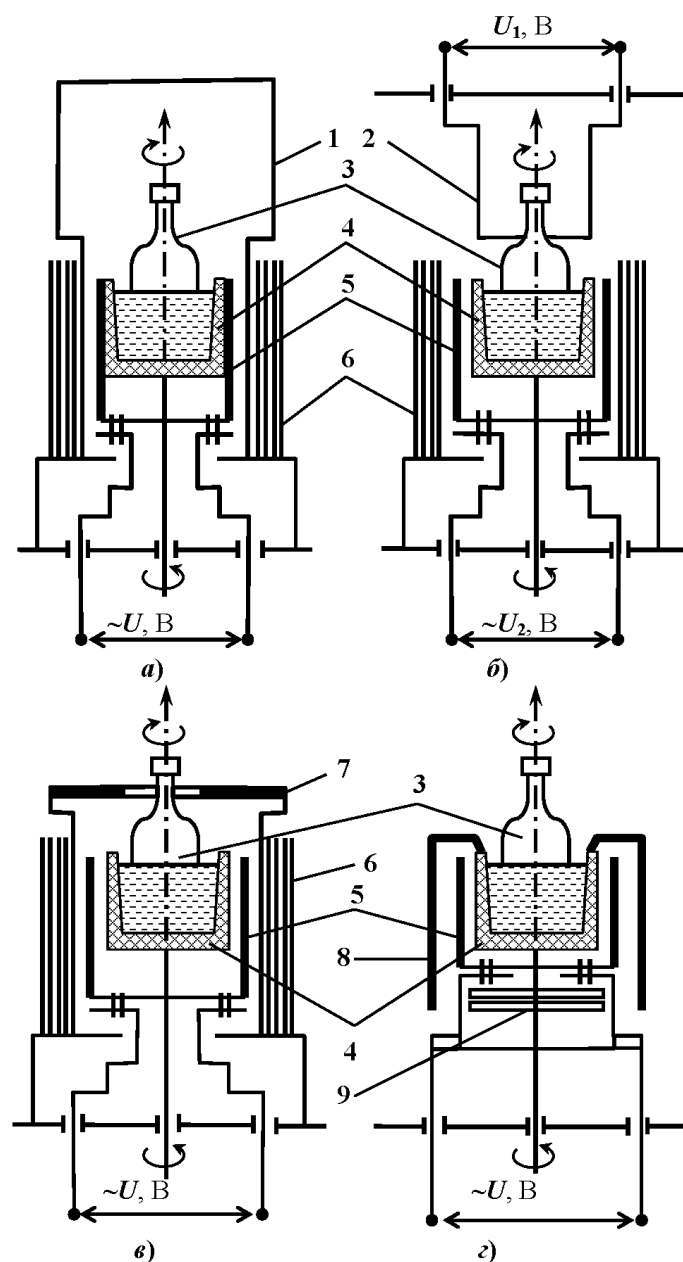


Рис. 15.4.2. Схемы тепловых узлов с различными видами экранировок: а, в – пассивные (полузакрытая и закрытая); б – активная; г – открытая (подвижная); 1 – верхний боковой экран; 2 – нагреватель; 3 – кристалл; 4 – графитовая подставка с кварцевым тиглем, содержащем расплав; 5 – нагреватель тигля; 6 – боковые экраны; 7 – потолочный экран; 8 – вращающийся боковой экран; 9 – донные экраны.

влечет за собой изменение осевых и радиальных градиентов температуры в растущем монокристалле.

С и с т е м а э к р а н и р о в к и. Существующие системы экранировки тигля с расплавом можно разделить на закрытые (рис. 15.4.2, в) и открытые (рис. 15.4.2, з). Закрытые системы экранировки обеспечивают малые осевые и радиальные градиенты температуры по расплаву в тигле. В область над тиглем, ограниченную потолочным экраном, поступает дополнительное количество тепла, вследствие чего градиенты температуры в выращиваемом монокристалле уменьшаются. В случае использования открытой системы экранировки вследствие повышенных потерь тепла с открытой поверхности расплава осевые градиенты по расплаву значительно больше.

Система экранировки позволяет управлять осевыми и радиальными градиентами температуры в расплаве и в выращиваемом монокристалле.

Чем меньше градиент температуры в растущем кристалле, тем совершеннее его структура, но уменьшение осевого градиента снижает скорость вытягивания последнего. Экранировка выращиваемого монокристалла может быть пассивной (экраны) или активной (нагреватель, сопротивление, (рис. 15.4.2, б).

Достоинством активной экранировки является создание требуемого градиента температуры в монокристалле и возможность управлять температурным полем в кристалле после окончания процесса выращивания с целью улучшения структуры монокристалла и уменьшения в нем напряжений.

Показанный на рис. 15.4.2, з вариант теплового узла с вращающейся экранировкой благодаря строгой соосности ее с тиглем, обеспечивает высокую симметрию теплового поля в расплаве, сводя к минимуму знакопеременные напряжения в кристалле.

Выбор материала экранов зависит от характера атмосферы, в которой работает тепловой узел. В вакууме, где теплоотдача происходит в основном излучением, экраны целесообразно применять из полированных

листов жаропрочного металла, например молибдена.

В газовой среде увеличивается вклад в перенос тепла от элементов теплового узла стенкам камеры установки за счет конвекции газа. Потери тепла конвекцией возрастают с увеличением давления газа и его теплоемкости.

При работе в газовой среде, особенно находящейся под высоким давлением, применяют экраны из графита или непрозрачного (спеченного) кварца. Возможно изготовление одних экранов из графита, а других из молибдена.

Требуемые по технологии тепловые условия процесса выращивания монокристаллов создают путем подбора соответствующих конструкций подставки, нагревателя и экранировки. Воздействие отдельных элементов теплового узла на градиенты температуры в расплавке и монокристалле носит комплексный характер. Изменение одного элемента, как правило, требует соответствующего изменения других с целью сохранения первоначальных тепловых условий.

15.5. Модули управления процессом выращивания монокристаллического кремния

При проведении процесса выращивания монокристалла по методу Чохральского оператор должен контролировать параметры процесса вытягивания кристаллов. Контролируемые параметры процесса выращивания монокристаллов и методы их измерения приведены в табл. 15.5.1.

Для оперативного управления всеми контролируемыми параметрами процесса выращивания монокристаллов необходимо использовать ЭВМ.

Сигналы от датчиков, размещенных на установке выращивания монокристаллов, считываются и подаются на ЭВМ, которая анализирует полученную информацию и сравнивает с заданными значениями этих параметров. Отклонение параметра от заданного значения используется для ав-

томатической корректировки выбранного параметра. Программирование процесса выращивания монокристалла позволяет выращивать кристаллы с минимальным значением плотности дефектов и контролируемым диаметром слитка.

Анализ себестоимости монокристаллов полупроводников, выращенных методом Чохральского, показывает, что затраты на сырье составляют от 40 до 60% в зависимости от вида выращиваемого монокристалла, на содержание и эксплуатацию оборудования – от 12 до 16%, на тигли – от 14 до 25%, на заработную плату – около 5%.

Снижение себестоимости монокристаллов полупроводников возможно за счет рационального использования сырья, основных и вспомогательных материалов и увеличения выхода готовой продукции в результате внедрения в производство принципиально новых технологических процессов и установок, рассчитанных на повышенную загрузку исходного материала в тигель.

Совершенствование оборудования для выращивания монокристаллов электронной техники идет в направлении создания высокопроизводительных установок, управляемых ЭВМ. На рис. 15.5.1 и рис. 15.5.2 изображены блок-схемы управления процессом вытягивания слитка и процессом вакуумной откачки соответственно.

15.6. Методы оптимизации технологического процесса выращивания монокристаллического кремния

Комплексные САПР охватывают все этапы разработки технических объектов, в том числе и этап технологической подготовки производства. Автоматизация проектирования технологических процессов включает в себя разработку принципиальных схем технологических процессов,

Таблица 15.5.1

Контролируемые параметры процесса выращивания
монокристаллов и методы их измерения

Наименование параметра	Условное обозначение	Метод измерения
Температура тигля (нагревателя)	T_1	Пирометр или термопара
Температура поверхности расплава (раздела расплав-кристалл)	T_2	Пирометр
Температура водяного охлаждения печи на входе	T_3	Резистивный детектор температуры
Температура водяного охлаждения на выходе	T_4	
Скорость вытягивания кристалла	V_1	Тахометр постоянного тока
Скорость подъема тигля (или нагревателя)	V_2	
Частота вращения кристалла	R_1	
Частота вращения тигля	R_2	
Подводимая мощность на нагреватель	P_1	Преобразователь мощности
Перемещение кристалла в вертикальном направлении	Π	Потенциометр
Вибрации (на этапе отработки)	B	Акселерометр

маршрутной технологии, операционной технологии и получение управляющей информации на машинных носителях для программно-управляемого технологического оборудования [7].

Любой технологический процесс независимо от его физической природы всегда можно представить в виде некоторой системы, а следовательно, для его организации следует применять системный подход, сущность которого заключается в комплексном, едином рассмотрении всех частей систем технологического проектирования и в гармоническом их сочетании.

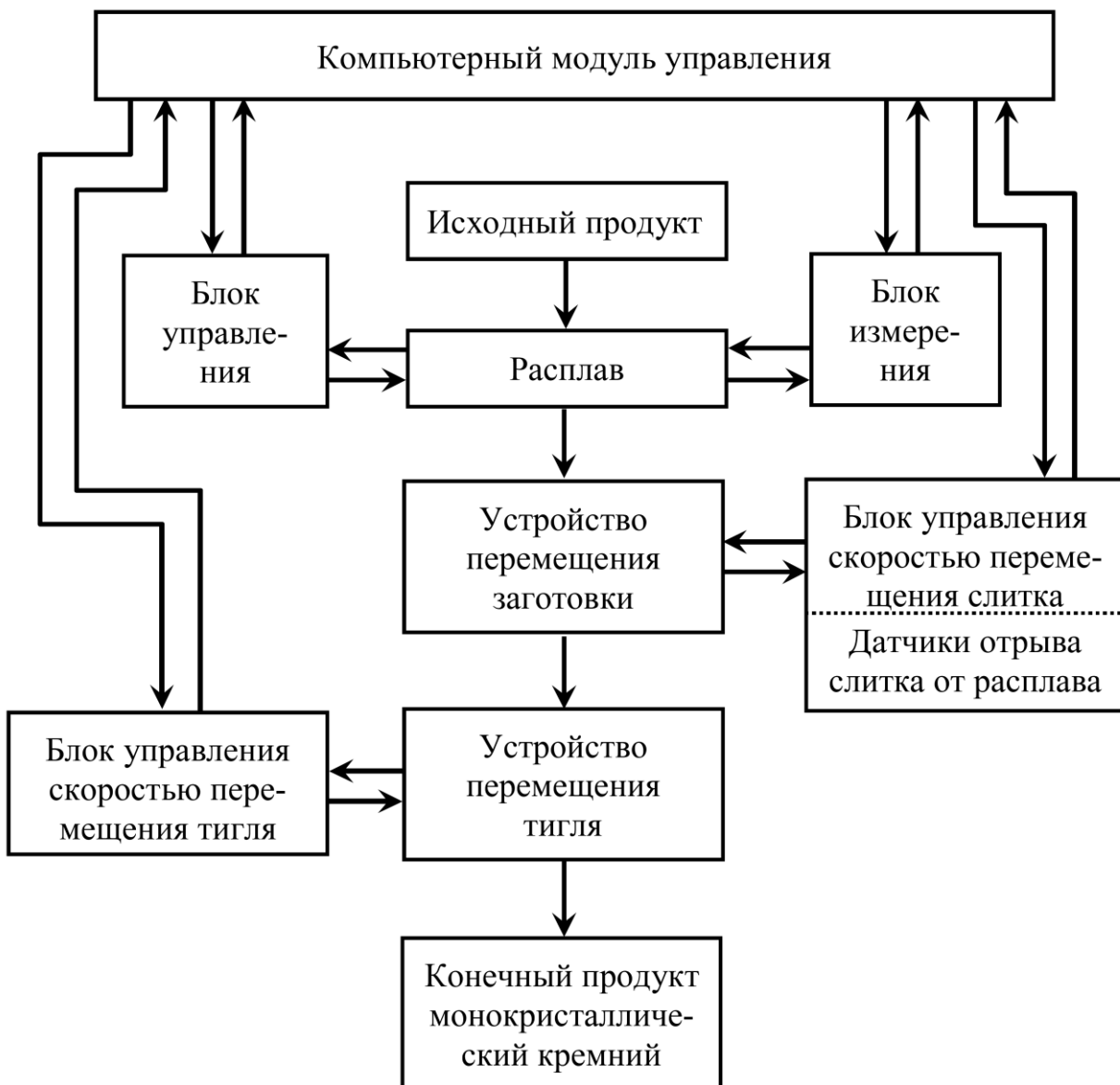


Рис. 15.5.1. Схема управления процессом вытягивания слитка

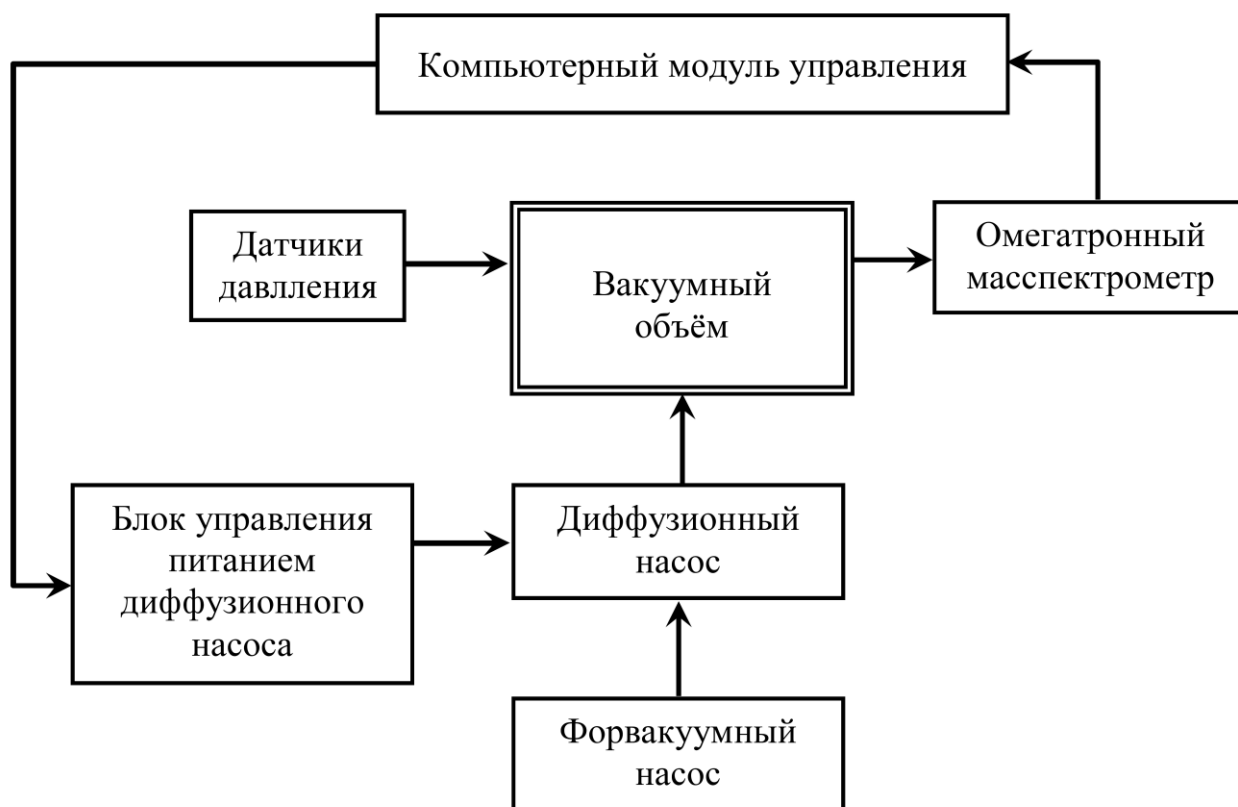


Рис. 15.5.2. Схема управления процессом вакуумной откачки

Постановку задачи оптимизации технологического процесса можно представить следующим образом (рис. 15.6.1). Технологический процесс рассматривается как объект проектирования, на вход которого поступает вектор $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ входных переменных, а скалярный выход F характеризует качество технологического процесса. Требуется сформировать такой вектор управляющих воздействий $R^*(t) = (R_1^*(t), \dots, R_l^{(*)}(t))$, который минимизировал бы значение показателя F , т.е.

$$F(X(t), R^*(t)) = \min_{R(t)} \{F_k(X(t), R(t))\}. \quad (15.6.1)$$

Выходы $h_1(t), \dots, h_m(t)$ характеризуют состояние технологического процесса и индицируют нежелательные режимы работы оборудования или выход контролируемых параметров технологического процесса за установленные пределы:

$$h_j(t) \leq b_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (15.6.2)$$

где b_j – требуемые или допустимые значения соответствующих параметров.

Таким образом, оптимизация технологического процесса при проектировании рассматривается как задача определения оптимального вектора управления $\mathbf{R}^*(t)$, минимизирующего целевую функцию $F(\mathbf{X}(t), \mathbf{R}(t))$ при условии выполнения заданных ограничений.[7].

Подобные задачи оптимизации решают в два этапа. На первом этапе определяют идеальный вектор управления $\mathbf{R}^*_{ид}(t)$, обеспечивающий оптимизацию технологического процесса. Практически реализовать это не представляется возможным, и вектор $\mathbf{R}^*_{ид}(t)$ является эталоном, к которому надо стремиться. Зная $\mathbf{R}^*_{ид}(t)$, на втором этапе выбирают реализуемый квазиоптимальный вектор управления, с помощью которого стараются получить решение, отличающееся от идеального и в то же время реализуемое наиболее просто.

Следует отметить, что в большинстве практических случаев оптимизированные технологические процессы дополнительно подвергаются наладке и корректировке, поскольку при построении математических моделей процессов невозможно учесть все влияющие на процесс факторы.

На любой технологический процесс оказывает влияние множество случайных факторов (неточность оборудования, неточности режущего инструмента и приспособлений, внутренние напряжения обрабатываемой детали, разброс параметров у электрорадиоэлементов при монтаже электронных схем и т.д.). Поэтому параметры изготавливаемых изделий являются случайными величинами, причем влияние действующих случайных факторов на изменение параметров изделий можно, как правило, определить исходя из статистического анализа. В подобных случаях очень важно учитывать характер взаимосвязи между случайными величинами. Для количественного выражения этой взаимосвязи служат регрессия и корреляция.

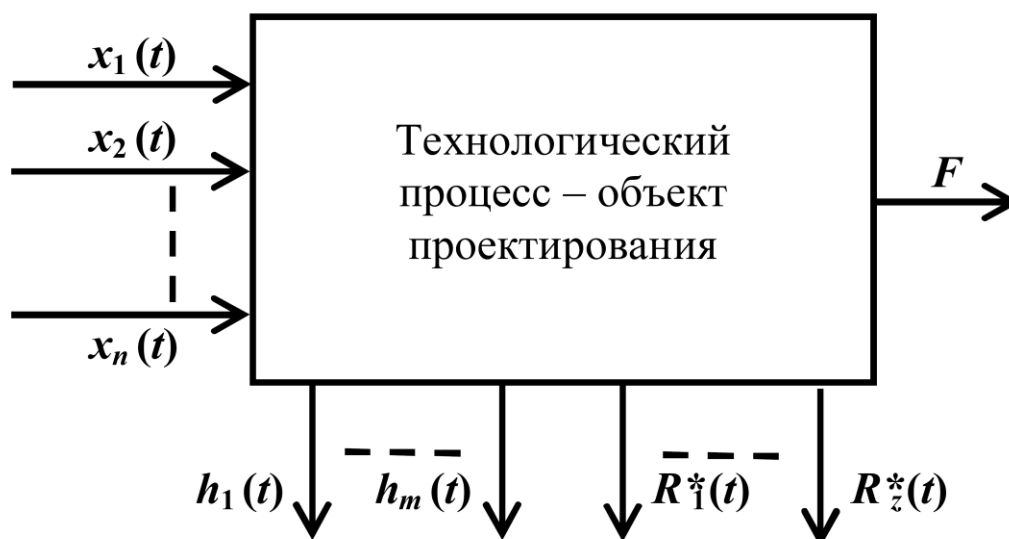


Рис. 15.6.1. Постановка задачи оптимизации технологического процесса

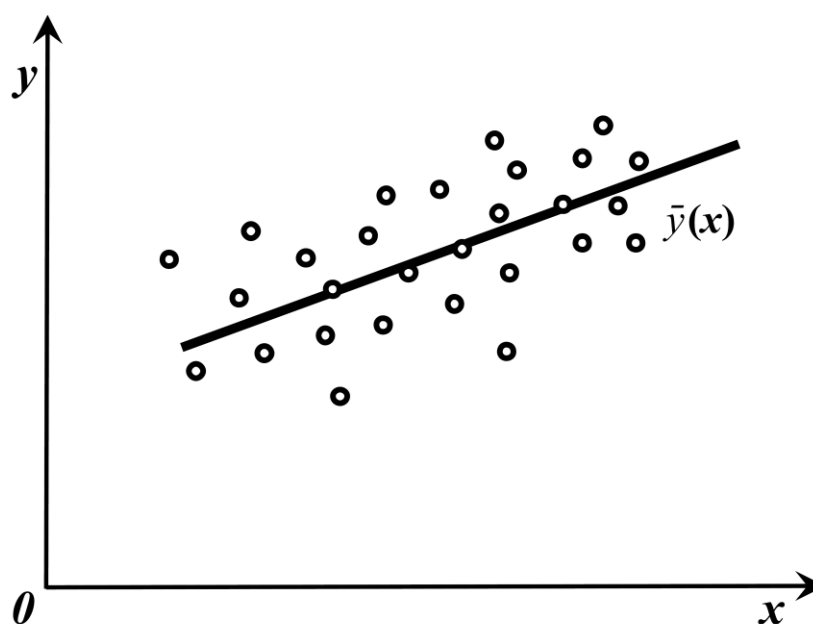


Рис. 15.6.2. Линия регрессии

Остановимся более подробно на этих понятиях.

Пусть x и y – случайные величины, характеризующие параметры некоторого изделия, причем упорядоченная пара (x, y) характеризует параметры одного варианта изделия и может быть изображена точкой на плос-

кости. Полная совокупность вариатов изображается множеством точек, показанных на рис. 15.6.2. Математические ожидания случайных величин x и y равны соответственно $M_{(x)}$ и $M_{(y)}$ и среднеквадратические отклонения σ_x и σ_y характеризуют рассеивание величин x и y относительно их математических ожиданий.

Рассмотрим зависимость $\bar{y}(x)$, являющуюся условным математическим ожиданием $M_{(y|x)}$. Используя выражение для условного математического ожидания и обозначая через $p(x, y)$ совместную вероятность данных значений x и y , находим

$$\bar{y}(x) = M_{(y|x)} \frac{\sum_y yp(x, y)}{\sum_y p(x, y)}. \quad (15.6.3)$$

Определяя $\bar{y}(x)$ при различных x , можно построить линию, графически выражающую эту зависимость и называемую линией регрессии y по x (рис. 15.6.2). Аналогично может быть получена зависимость $\bar{x}(y)$, называемая регрессией x по y .

На практике наиболее часто встречается случай линейной регрессии, уравнение которой записывается в виде

$$\bar{y}(x) = a + b(x - M_{(x)}). \quad (15.6.4)$$

Коэффициенты a и b выбирают такими, чтобы получить наибольшую концентрацию точек (x, y) вблизи прямой $\bar{y}(x)$, что выражается условием

$$\varphi(a, b) = M \left\{ [y - \bar{y}(x)]^2 \right\} = \min. \quad (15.6.5)$$

Выражение (15.6.4) с учетом (15.6.5) дает следующую систему уравнений для определения коэффициентов a и b :

$$M_{(y)} - a = 0; \quad M[y(x - M_{(x)})] - b\sigma_x^2 = 0. \quad (15.6.6)$$

Величину $\mu_{xy} = M[y(x - M_{(x)})]$ называют ковариацией между x и y . Она служит мерой взаимной связи между случайными величинами a и b .

Из (15.6.6) находят значения $a = M_{(y)}$ и $b = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x^2}$, определяющие линию регрессии.

Ковариация μ_{xy} зависит от дисперсий самих случайных величин, поэтому для оценки взаимосвязи между случайными величинами более удобен коэффициент корреляции $r_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{(\sigma_x \sigma_y)}$, который может меняться от нуля для независимых случайных величин до единицы, если случайные величины связаны линейной функциональной зависимостью.

При технологическом проектировании в качестве критериев оптимальности могут рассматриваться такие показатели эффективности, как себестоимость производства изделий, производительность технологических процессов, основное технологическое время и т.д.

Задача оптимизации может быть решена последовательной максимизацией критериев в сужающихся подмножествах $A_i \subset X$ допустимого множества:

первое подмножество:

$$\max_{x \in X} f_1(X) = f_1^*, \quad A_1 = \{X : X \in X, f_1(X) = f_1^*\}, \quad (15.6.7)$$

второе подмножество:

$$\max_{X \in A_1} f_2(X) = f_2^*, \quad A_2 = \{X : X \in A_1, f_2(X) = f_2^*\}, \quad (15.6.8)$$

m -е подмножество:

$$\max_{X \in A_{m-1}} f_m(X) = f_m^*, \quad A_m = \{X : X \in A_{m-1}, f_m(X) = f_m^*\}. \quad (15.6.9)$$

Максимальная точка m -го шага является решением исходной задачи. Если к некоторому шагу множество A_i состоит только из одной точки, то эта точка является решением лексикографической задачи. Наиболее естественно лексикографические задачи решаются в случае, когда допустимое и критериальное множества дискретны. Однако если X и $F(X)$ непрерывны, то построение подмножеств A_i — довольно сложная задача.

Рассмотренный метод решения лексикографической задачи состоит из m стадий, на каждой из которых следует определить максимум функций $f_i(X)$ на множестве A_i , т.е. задача оптимизации с ограничением в виде равенства решается на каждой стадии. Нельзя ли эту задачу заменить одной оптимизационной задачей? Возможность этого легко доказать, если критериальное множество F конечно. Однако составленные функции полезности включают максимальное значение критерия f_i . Поэтому, хотя функция полезности и может быть построена, но прежде нужно решить m задач на максимум.

Имея выбранным в качестве главного критерия, скажем, $f_1(X)$ и рассматривая остальные критерии как ограничения, мы получим традиционную задачу математического программирования:

$$\max_{X \in A} f_1(X), \quad A = \{X : X \in X, f_i(X) \geq a_i, i = 2, 3, \dots, m\}, \quad (15.6.10)$$

где уровни ограничений a_i могут определяться целями проектирования, известными параметрами прототипа и т.д.

Если, по крайней мере, один из ограничивающих уровней будет слишком высок:

$$a_i > \max_{X \in X} f_i(X), \quad (15.6.11)$$

Мы получим пустое множество A . С другой стороны, a_i не может быть ниже допустимого уровня i -го критерия. Выбор a_i особенно труден, когда критерии противоречивы, например, цена и надежность. Для того, чтобы выбрать уровни a_i , мы должны найти как максимум всех критериев, так и их средние значения. При использовании этого подхода часто необ-

ходимо повторно решать задачи оптимизации, отличающиеся только правыми частями неравенств в ограничениях.

Для ряда практических задач критерии могут быть проранжированы (хотя не так строго, как в лексикографическом случае). Предположим, что наиболее значительным является критерий с наименьшим номером и каждому критерию приписан порог d_i . Этот порог указывает допустимое отклонение от максимального значения критерия $f_i(\cdot)$ при улучшении значений менее значимых критериев. Тогда вычисленное максимальное значение наиболее важного критерия определяет допустимую область для максимизации критериев более низкого ранга. Для того, чтобы взяться за многокритериальную проблему таким путем, необходимо решить следующие оптимизационные задачи:

$$\begin{aligned} a_1 &= \max_{X \in X} f_1(X), A_1 = \{X : X \in X, f_1(X) \geq a_1 - d_1\}, \\ a_2 &= \max_{X \in A_1} f_2(X), A_2 = \{X : X \in A_1, f_2(X) \geq a_2 - d_2\}, \quad (15.6.12) \\ a_m &= \max_{X \in A_{m-1}} f_m(X). \end{aligned}$$

Решением многокритериальной задачи является точка максимума m -й задачи на максимум, представленной выше. До решения задачи сложно определить значения порогов. Если все $d_i = 0$, тогда мы имеем решение лексикографической проблемы. Если d_i так велики ($d_i > d_{i\max}$), что дополнительные ограничения не сужают допустимого множества ($\{X : f_i(X) \geq a_i - d_i\} \subseteq X$), то полученное решение совпадает с точкой максимума критерия низшего ранга. Таким образом, используя этот метод, необходимо экспериментировать с различными d_i , постоянно консультируясь с экспертами в проблемной области.

В общем случае точка максимума может принадлежать множеству эффективных точек, однако можно доказать, что если X – ограниченное

замкнутое множество и все функции $f_i(X)$ непрерывны, то решающее множество последовательных d_i -х содержит по крайней мере одну эффективную точку. Данный метод может быть рекомендован для задач, критерии которых естественно ранжируются по важности.

Единственным свойством решений, непосредственно следующим из формулировки многокритериальной задачи, является принадлежность множеству Парето. Хорошо бы было иметь некоторую добавочную информацию о критериях – это позволило бы выделить ту или иную часть множества Парето или даже найти некоторую единственную точку этого множества. Например, имея приписанные критериям веса и находя максимум их взвешенной суммы, мы получаем одну из точек множества Парето. Конструкторы часто соглашались, что веса могут быть рационально приписаны критериям, однако при решении практических задач они делают это с большими предосторожностями. Подобные трудности возникают и при использовании других методов.

Первое, в чем нуждается проектировщик, это в возможно большем количестве информации о критериальном множестве F . Только обладая такой информацией, он способен рационально подобрать параметры используемого метода соответственно требованиям проектирования.

* * *

Для реализации Государственной программы «Полупроводниковый кремний» по выращиванию особо чистого монокристаллического кремния по своим параметрам соответствующего международным стандартам SEMI и ASTM и конкурентоспособного на мировом рынке необходимо создания высокопроизводительного автоматизированного оборудования построенного на принципе агрегатно-модульного проектирования. Для решения поставленной проблемы следует создать и исследовать технологический агрегат, метрологические модули и систему управления ростовой установки (рис. 15.6.3).

Для выполнения поставленных задач необходимо провести исследование по основным модулям ростовой установки: технологическому, мет-

рологическому, модулю управления.

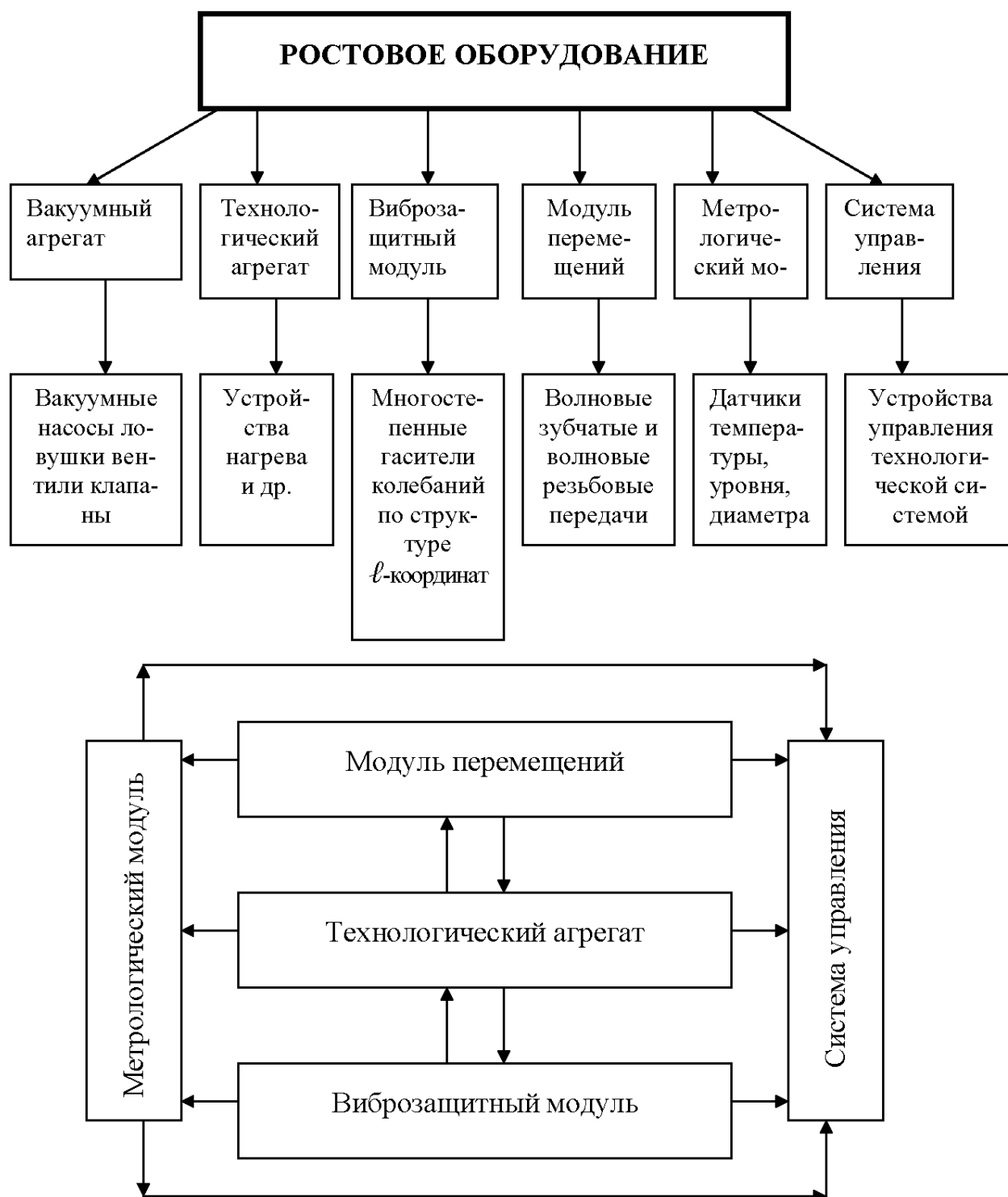


Рис. 15.6.3. Агрегатно-модульная схема ростовой установки

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 16

1. Блинов И.Г. Кожитов Л.В. Оборудование полупроводникового производства – М.: Машиностроение, 1986 – 264 с., ил.
2. Бузунов А.И., Калугин А.Я. и др. АС СССР № 1773955 «Способ получения монокристаллов кремния». Оpubл. 07.11.92. // Б.И. ; № 41.
3. Качергина Л.Ф., Колмаков В.А. и др. Патент РФ № 2095494 «Установка для получения стержней поликристаллического кремния». Оpubл. 10.11.97 // Б.И. № 31.
4. Гупалов В.К. и др. Патент РФ № 2205905 «Установка для получения стержней поликристаллического кремния». Оpubл. 10.06.03 // Б.И. № 16.
5. Бузунов А.И. и др. Патент РФ № 2052547 «Устройство для выращивания монокристаллического кремния». Оpubл. 20.01.96. // Б.И. № 2.
6. Кочергина Л.Ф., Куценогий Л.К., Петров С.И. Патент РФ №2088702 «Устройство для выращивания кристаллов из расплава». Оpubл. 27.08.97. // Б.И. № 24.
7. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. – М.: Высшая школа, 1986.
8. Антамошкин А.Н. и др. Системный анализ: Проектирование, оптимизация и приложения: Учебное пособие. В 2-х томах. Том 1. – Красноярск: Сибирская Аэрокосмическая академия, 1996. – 206 с.
9. Антамошкин А.Н. и др. Системный анализ: Проектирование, оптимизация и приложения: Учебное пособие. В 2-х томах. Том 2. – Красноярск: Сибирская Аэрокосмическая академия, 1996. – 290 с.
10. Вейник А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. – Москва 1965 г.: Металлургия.
11. Салли И.В., Фалькевич Э.С. Производство полупроводникового кремния. Издательство «Металлургия», 1970, с 152.
12. А.Г. Денисов, Н.А.Кузнецов, В.А.Макаренко. Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии. – М. 1981. – 52с. Сер.7. Технология,

организация производства и оборудования: Обзор по электронной технике; Вып. 17 (828).

13. Василенко Н.В., Ковалев Л.К. Механические системы вакуумного технологического оборудования для производства изделий квантовой электроники. Ч. 2. Расчет и конструирование цельнометаллических вводов движения // Обзоры по электронной технике. Сер. II, Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1984. – Вып. 1 (1015). – 48 с.
14. Создание волновых вводов возвратно-поступательного движения для установок жидкофазной эпитаксии: Отчет о НИР (заключ.) / Краснояр. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – Шифр темы ДМ 120; № ГР 80030722; инв. №60012. – Красноярск, 1983. – 250с.
15. Вакуумные системы и их элементы А.С. Фролов, Ф. А. Русак и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 189с.
16. Марусов В. А. Создание и исследование герметичных механизмов поступательного движения для сверхвысоковакуумного автоматизированного технологического оборудования: Дисс. канд. техн. наук / МВТУ им. Н. Э. Баумана). – 1981. – 200с.
17. Кисельман Л. А., Томашевский А. Г. Элементно-конструктивная база установок электронной и ионной спектроскопии и молекулярно-лучевой эпитаксии // Электронная промышленность. – 1978. - №11 – с.102.
18. Ковалев Л. К. Вакуумное оборудование для производства тонкопленочных структур квантовой электроники. Сер. 11. Лазерная техника и электроника: Обзоры по электронной технике; Вып. 2. (886).
19. Создание волновых передач для манипуляторов, работающих в сверхвысоком вакууме: Отчет о НИР (заключ.) / Красн. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – шифр темы 120; № ГР 79045890; инв. № 53451. – Красноярск, 1982. – 278с.
20. Разработка установки с лазерным испарителем для контроля ОЖЕ – спектрометром состояния поверхности получаемых пленок: Отчет о

- НИР (заключ.) / Краснояр. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – Шифр темы 220; № ГР Ф 11129; инв. № 60028. – Красноярск, 1981. – 101с.
21. Александрова А. Т. Исследование процессов дестабилизации параметров системы механизм – контролируемая среда и разработка теоретических основ проектирования оптимальных механизмов: Автореф. дис. докт. техн. наук./ МИЭМ – М., 1976, 46с., ДСП.
 22. Василенко Н. В. Исследование кинематических и прочностных характеристик волновой передачи винт- гайка для вводов движения в вакуум оборудования электронной техники. Дис. канд. техн. наук. / МИЭМ – М., 1978. – 220с., ДСП.
 23. Деулин Е. А. Исследование вводов вращения высоковакуумного напылительного оборудования с целью создания унифицированных конструкций. Автореф. дис. канд. техн. наук. / МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1971, 17с., ДСП.
 24. Медников М. И. Вводы движения в вакуум. – М.: Машиностроение, 1974. – 184с.
 25. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении.-Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1989.-225с.,ил.
 26. Усольцев М. В. Исследование кинематики и КПД вакуумных муфт для приводов электровакуумного и полупроводникового оборудования. Автореф. дис. канд. техн. наук. / МИЭМ. – М., 1974. – 16с. ДСП.
 27. Александрова А. Т. Новые способы передачи и формирования движения в вакууме. – М.: Высшая школа, 1979. – 69с.
 28. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники / Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 715с.
 29. Кульбачный О. И. Механизмы для передачи вращения из герметизированного объема и их сравнительный анализ // Проектирование зубчатых механизмов. – М.: Машиностроение. – 1971. – С. 107-132.
 30. Рот А. Вакуумные уплотнения / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1971. – 464 с.

31. Турышев В. А., Василенко Н. В. Волновые герметичные передачи винт-гайка. Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении // Тех. Докл. (МВТУ им. Н. Э. Баумана). – МВТУ, 1979. – С. 53-56.
32. А. с. № 634046 СССР, М. Кл.⁴ F16 Н 57/00 Волновая герметичная муфта Турышев В. А., Василенко Н. В., Нестеренко В. В., / Оpubл. в Б. И. 25.11.78.
33. Корячко В.П. и др. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов/ В.П.Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М.:Энергоатомиздат, 1987.- 400с., ил.
34. Разберн Ф. Справочник по вакуумной технологии / Пер. с англ.; Под ред. Проф. Р. А. Никлондра. – М.: Энергия, 1972. – 441с.
35. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР: Учеб. Для втузов.- М.: Высш. Шк. 1990. -335с., ил.
36. Данилин Б. С., Минайчев В. Е., Пупко В. А. Сверхвысоковакуумная напылительная установка // Обмен опытом в электронной промышленности. – 1968. - № I. – С. 12-13.
37. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: МИР., 1973. – 344с., ил
38. Минский М. Фреймы для представления знаний.-М.: Энергия, 1979. – 151с., ил.
39. Анализ путей развития оборудования для нанесения тонких пленок в вакууме / С. А. Ашинов, И. Г. Блинов, Е. А. Деулин и др. – М.: ЦНИИЭлектроника, 1978. – 69с.
40. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Некоторые вопросы вакуумной техники при напылении тонких пленок // Физика металлических пленок. – Киев, 1969. – С. 77-87.
41. Морозов В. В. Исследование автоматизированных электровакуумных установок выращивания монокристаллов из сплавов для постоянных

- магнитов с целью повышения их производительности. – Дис. канд. техн. наук. / ВПИ. – Владимир, 1979. – 190 с.
42. Гридиев А. И. Исследование и разработка систем автоматического регулирования температуры в установках для выращивания монокристаллов из сплавов для постоянных магнитов. – Дис. канд. техн. наук. / НПИ. – Новочеркасск, 1971. – 184 с.
43. Фомин В. М., Шевцов М. А. Электромеханическое оборудование за рубежом. По материалам второй Международной выставки Электро-77// Электротермия, - 1977. – Вып. 10 (182). – С. 15.
44. Преснов В. И., Жданов Ю. Ф. Установка безмасляной бесштенчельной откачки // Тез. 7-й Всесоюзной науч. техн. конф. По диффузионной сварке. – М., 1972. – С. 93-97.
45. Установка бесштенчельной откачки электровакуумных приборов. Г. В. Конюшков, В. И. Ерекин, М. И. Федоров и др. // Обмен опытом в электронной промышленности. – 1967. - № 7. – С. 34-38.
46. Павлов Б. И. Механизмы приборов и систем управления. – Л.: Машиностроение, 1972. – 205 с.
47. Василенко Н. В., Турышев В.А. Волновой резьбовой герметичный ввод // Машиностроение; Вып. 7 – Красноярск, 1973. – С. 42-46.
48. Хруничев Ю. А. Унификация и агрегатирование при разработке оборудования электронной техники // Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении: докл. (МВТУ им. Н. Э. Баумана). – МВТУ, 1979. – С. 14-16.
49. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1982. -203 с.
50. Волновые герметичные передачи-муфты / Сост. В. А. Турышев, Н. В. Василенко, В. В. Нестеренко; КрПИ Красноярск, 1982. – 20с.
51. Смирнов С.А. Оценка интеллектуальной собственности. – М.: Финансы и статистика. 2003.- 352с., ил.

52. Иванов М. Н., Шувалов С. А., Амосова Э. П. Экспериментальные исследования волнового редуктора для передачи вращения в герметизированное пространство // Изв. высш. учебн. заведений. Машиностроение. – 1970. - №12. – С. 42-52.
53. Тарас Ф. С. Некоторые результаты испытаний герметичной волновой передачи // Волновые передачи. – М., 1970. – С. 49-53.
54. Турышев В. А., Василенко Н. В. Испытание волновой резьбовой передачи в вакууме // Машиностроение; Вып. 9- Красноярск, 1975.- Вып. 9 – С. 58-63.
55. Медников М. И. Преимущества применения волновых вводов движения в вакуумном машиностроении // Тр.МИЭМ. Полупроводниковое электровакуумное машиностроение; Вып. 9. – М., 1970. – С.28-42.
56. Медников М. И. Вводы движения в вакуум. – М.: Машиностроение, 1974. – 98с.
57. Борисенко Г. А. Определение сопряженного осевого профиля гибкой гайки в волновой резьбовой передаче // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 6. – 1971. - №6. – С.
58. Борисенко Г. А., Лагутин С. А. Применение резьбовой волновой передачи малых перемещений в точных механизмах // Тез. докл. республ. конф. – Ереван, 1976. – С.
59. Семенкин Е.Н., Семенкина О.Э., Терскев В.А. Методы оптимизации в управлении сложными системами.: Учебное пособие.- Красноярск.:Сибирский юридический институт МВД России., 2000г.-254с.
60. Борисенко Г. А. Исследование передач винт-гайка малых подач. – Дис. канд. техн. наук. / Мостанкин. – М., 1973, 155с.
61. Рябов В.Т. Взаимодействие материальных, энергетических и информационных потоков при функционировании технологического оборудования. Функции систем автоматического управления –В кн. Машиностроение. Энциклопедия (ред./совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы

- управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред Ю.В. Панфилова – 2000. – 744с., ил.
62. Ермаков Е.С. Этапы автоматизации электронного машиностроения. - В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред./совет : К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
63. Кузнецов М.Н. Системы автоматического управления дискретными технологическими установками и гибкими производственными линиями. – В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред/. совет : К.В. Фролов (пред.) и др. – М. : Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
64. Карцев Е.А. Датчики в системах управления технологическими процессами. – В кн. Машиностроение. Энциклопедия (ред/. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
65. Корнилов Р.В. Взаимосвязь Этапов развития технологий электронного машиностроения и систем автоматического управления технологическим оборудованием. – В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред/. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.

66. КУЗНЕЦОВ м.н. Технические средства микропроцессорного управления. – В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред/. совет : К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
67. Александрова А.Т. Новые способы передачи и формирования движения в вакууме. – М.: Высшая школа, 1979. – 79с., ил.
68. Ермаков Е.С. Роботы манипуляторы электронной техники. – М. Высшая школа, 1983. – 96 с., ил.
69. Юревич В.И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1975. – 416 с., ил.
70. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978.- 592 с., ил.
71. Александрова А.Т. Исследование процессов дестабилизации параметров системы «механизм – контролируемая вакуумная среда» и разработка теоретических основ проектирования оптимальных механизмов. – Дисс., на сосиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МИЭМ, 1978 -483 с.
72. Андреева Л.В. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981. 392 с., ил.
73. Кобринский А.А. Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов : Основы устройств, элементы теории. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985, - 344 с., ил.
74. Юревич В.И. Основы робототехники: Учебник для втузов. – Л.: Машиностроение, ленингр. Отд-е, 1985. – 271 с., ил.
75. А.с. № 175795 СССР, М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая передача винт-гайка / Цейтлин Н.И., Косов М.Г., Руденко В.Н. – Оpubл. В Б. И. 22.01.1966.
76. Chironis N., Product Engineering. 31, № 6 (1960). См. также Вопросы ракетной техники, № 8, 1965.

77. Турышев В.А., Василенко Н.В. О некоторых областях использования волновой передачи винт-гайка // Тезисы докладов республиканской конференции. Новые достижения в области приборостроения. – Ереван, 1975. – С. 48.
78. Цейтлин Н. И., Цукерман Э.М. Новые тенденции проектирования волновых передач для применения в механизмах привода ракет и спутников // Вопр. ракетной техники. – 1965. № 2 – С. 51-63.
79. А. с. № 1147853 СССР, М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Регулируемый дисковый генератор волновой передачи./ Ю.П. Колесников, Н.В. Василенко, Б.К. Прокопенко. – Оpubл. в Б. И. 1985, № 12..
80. А. с. № 696226 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Регулируемый дисковый генератор волновой передачи. / В. А. Турышев, Н. В. Василенко, Я. Г. Елисеев, Ю. П. Колесников. – Оpubл. в Б. И. Открытия. Изобретения. Промышленные образцы, Товарные знаки. 1980, № 40.
81. А. с. № 756112 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Регулируемый дисковый генератор волновой передачи. / В. А. Турышев, Ю. П. Колесников, Н. В. Василенко, Я. Г. Елисеев. – Оpubл. в Б. И. Открытия, Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1981, № 30.
82. А. с. № 229143 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая передача винт-гайка. / Синкевич Ю. Б., Тарас Ф. С. – Оpubл. в Б. И. 17.10.1968.
83. Цейтлин Н. И. Классификация волновых передач // Волновые передачи. – М., 1970. – С.3-12.
84. Masser C. W. Strain ware gcaring linlor motion Пат. США, № 2543508 от 05.07.60, см. также Э.И.Д.М. № 21, реф. 175, 1961.
85. Цейтлин Н. И., Цукерман Э. М. Волновые передачи // Машиностроительные материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. – Том 4 (ВИНИТИ. Итоги науки и техники). – М., 1972. – 145с.
86. Турышев В. А., Василенко Н. В. Опытнo-промышленные волновые резьбовые вводы // Машиностроение; Вып. 9. – Красноярск, 1975. С.71-86.

87. Люкшин А. И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1982. – 223с.
88. Василенко Н. В., Колесников Ю. П., Елисеев Я. Г. Исследование регулируемых генераторов волновой герметичной передачи винт-гайка // Управление надежностью машин: Тез. докл. – Кировоград, 1978. – с.162.
89. Василенко Н. В., Колесников Ю. П., Турышев В. А. Разработка и исследование бесступенчатых регулируемых генераторов волновых герметичных передач // Сб. докл. НТК. Шестая всесоюзная научно-техническая конференция по управляемым и автоматическим приводам и передачам гибкой связью: Тез. докл. – Одесса, 1980. – 280.
90. Василенко Н. В., Колесников Ю. П., Усаков В. И. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на газопроницаемость гибких герметизирующих элементов волновых вводов высоковакуумных манипуляторов // Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов механической обработки на предприятиях Сибири и Дальнего Востока: Тез. докл. Всесоюзной НТК. – Иркутск, 1983. – С.24.
91. А. с. № 1163074 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая передача. / В. А. Турышев, Н. В. Василенко, Ю. П. Колесников, Я. Г. Елисеев, Н. А. Ковалев, М. И. Мединцев, В. А. Соколенко. – Оpubл. в Б. И. 1985, № 23.
92. А. с. № 664263 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Электропривод, /Василенко Н. В., Курилин А. П. – Оpubл. в Б. И. 1979, № 19.
93. А. с. № 843108 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Электропривод линейного и вращательного движения. / Н. В. Василенко, А. П. Курилин. – Оpubл. в Б. И. 1981, № 24.
94. Василенко Н. В., Курилин А. П. Комбинированные электроприводы с волновыми передачами – перспективное направление в области создания средств комплексной механизации и автоматизации производства // Перспективы развития ПТМ, средств комплексной меха-

- низации и автоматизации погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ: Тез. докл. НТК. – Красноярск, 1980. – С.121-122.
95. А. с. № 727917 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая герметичная передача - муфта. / Турышев В. А., Василенко Н. В., Нестеренко В. В. – Оpubл. в Б. И. 1980, № 14.
96. А. с. № 787753 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновой линейный привод. /В. А. Турышев, Соловьев В. М., Цейтлин Н. И., Василенко Н. В.– Оpubл. в Б. И. 1980, № 46.
97. Создание и исследование запорной арматуры и герметичного привода штанги захвата с использованием волновой передачи: Отчет о научно-исследовательской работе / Краснояр. Политехн. ин-т; Н. В. Василенко, В. М. Соловьев, Ю. Н. Зубков, В. И. Усаков, В. В. Смелый, Ю. П. Колесников и др. Красноярск, 1983, № ГР. 80059986 ст. инв. № 0285.0004737 ДСП.
98. А. с. № 3502514 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Штанговый манипулятор. / А. А. Никитин, Н. В. Василенко. – Оpubл. в Б. И. 1983, № 20.
99. Василенко Н. В., Сильченко П. Н., Шаферштейн Э. И., Краузе Н. Э. Механизм выталкивания крана для разделывания слитков с волновой передачей. Перспективы развития подъемно-транспортного машиностроения, средств комплексной механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ // Тез. науч.-техн.конф. – Красноярск, 1980. – 25с.
100. Малогабаритный вакуумный манипулятор карусельного типа: Отчет о НИР (заключ.) / Краснояр. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – Шифр темы №1 – Красноярск, 1983, № ГР 81037980, инв. № 70125, 220с. ДСП.
101. А. с. № 696224 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Дисковый кулачок. / Турышев В. А., Колесников Ю. П., Василенко Н. В. – Оpubл. в Б. И. 1980, № 41.
102. Волновые передачи в линейном приводе и приводе повышенной

точности для работы в специальных условиях (вакууме): Отчет / Краснояр. политехн. ин-т. НИР (заключ.); руководитель Турышев В. А. № ГР 76077336. Красноярск, 1981, с. 152- В сб. НИР и ОКР от 19.02.81, БИ 917228.

103. Турышев В. А., Василенко Н. В., Колесников Ю. П. Волновой ввод «винт-гайка» М 60х0,75: Информационный листок № 157-80. – Красноярск: Красноярский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1980.
104. Лимаренко Г. Н., Василенко Н. В. Исследование некоторых характеристик волнового реечного механизма // Вестник машиностроения. – 1984. – 13. – С. 29-31.
105. А. с. № 1043392 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая реечная передача с промежуточными звеньями в виде клиньев. / Г. Н. Лимаренко, В. А. Турышев, В. И. Сенькин, Н. В. Василенко, Е. В. Артюхов. – Оpubл. в Б. И. 16.05.80.
106. Василенко Н. В., Ковалев Л. К. Механические системы вакуумного технологического оборудования для производства изделий квантовой электроники. Ч.2. Расчет и конструирование цельнометаллических вводов движения. – М., 1984. (сер. II. Лазерная техника и оптоэлектроника: Обзор по электронной технике).
107. Василенко Н.В., Соловьев В.М. Волновые резьбовые передачи-приводы автоматизированных систем //Управляемые и автоматические приводы и передачи гибкой связью: Тезисы докл. VI Всесоюзной НТК. – Одесса, 1980.
108. Истомин С. Н., Борисов С. Г. Кинематическая погрешность резьбовой волновой передачи // Вестник машиностроения. – 1983. - № 12. – С. 20-23.
109. Masser C. W. The harmonic drive Enging materials and desing., № 4, 1964, p. 24.
110. Masser C. W. Патент США, № 2906143 от 29.09.1959. См. также Э. И.

- серия Детали машин, 1961, № 11, реферат 96.
111. Masser C. W. Патент США, № 2931248 от 05.04.1960. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 7, реферат 68.
112. Masser C. W. The harmonic drive. Mach Desing № 8, 1960. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 9, реферат 82.
113. Masser C. W., Carlsoon I. Патент США, № 2930254 от 29.03.60. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 13, реферат 117.
114. Masser C. W. Патент США, № 2983162 от 09.05.1961. См. также Э. И. серия Детали машин, 1962, № 11, реферат 75.
115. Цейтлин Н. И., Цукерман Э. М. Волновые передачи. Машиностроительные материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. – М.: ВИНТИ, 1969. – 127с.
116. Mansfield D. L., Benford D.L. Harmonic Drive a Tarton in the Great Industrj, Semi-Annual Meeting of the American Gear Manufacturers Assosiation. Oktober, 1962, p.p.12-46.
117. Harmonic Drive. Mechanical Power Iransmission Sjstems. Internal Div. United Shol. Mach. Corp. Boston.
118. Павлов Б. И., Чернова Л. С. Волновые мелко модульные зубчатые передачи и результаты их проверки на кинематическую тонкость. – Л., 1968.- С.45.
119. Чернова Л. С., Кашеев В. М., Чернов А. П. Исследование кинематической точности волновых редукторов при различных типах генераторов // Расчет, проектирование и контроль малогабаритных редукторов. – Л., 1968. – С. 110-115.
120. Шувалов С. А. Графоаналитический метод анализа геометрии зацепления в волновой зубчатой передаче // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1965. - № 2. – С. 21-28.
121. Чернова Л. С., Гинзбург Е. Г. О влиянии накопленных погрешностей окружного шага зубчатых колес на кинематическую точность двухволновой передачи при наличии многопарного зацепления. – Л.,

1968. – 150 С.

122. Шамирян-Пахлеваниян Р. И. Повышение точности зубчатого зацепления волновой передачи // Проектирование и технология изготовления деталей в точном приборостроении. – М., 1970. – С. 78-85.
123. Попов П. К. Исследование ошибок углового положения выходного вала волновой зубчатой передачи. – Дис. канд. техн. наук, / (МВТУ им. Н. Э. Баумана). – М., - 190 с.
124. Попов П. К., Шувалов С. А. и др. Частотный спектр кинематических ошибок зубчатых передач // Изв. ВУЗов Сер. Машиностроение. – 1972. - № 1. – С. 51-68.
125. Иванов М. Н. и др. Экспериментальное определение количества одновременно зацепляющихся зубьев в волновой зубчатой передаче. // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1968. - № 9. С.31-42.
126. Турышев В. А. Исследование волновых зубчатых передач с дисковым и кулачковым генераторами волн. – Дис. канд. техн. наук, / МИСИ. – М., 180 с.
127. Гинзбург Е. Г., Чернова Л. С. О влиянии погрешностей изготовления на кинематическую точность волновой передачи // Расчёт проектирование и контроль малогабаритных редукторов. – Л., 1970. – С.58-68.
128. Чернова Л. С. О влиянии формы кулачка генератора на многопарность зацепления в двухволновой передаче // Материалы 2-й научной технической конференции по волновым передачам. – Л., 1969. – С.59-67.
129. Чернова Л. С. Некоторые вопросы геометрии и кинематической точности одноступенчатых передач приборного назначения. – Дис. канд.техн.наук. КЛПИ – Л., 1969, 186 с., ДСП.
130. Шувалов С. А., Попов П. К., Финогенов В. А. Соотношение точности и жесткости волновых зубчатых передач // Волновые зубчатые передачи: Тез.докл. – Л., 1969. – С. 75-95.
131. Шамирян-Пахлеваниян Р. И. Кинематическая точность волновых зуб-

- чатых передач. – Дис. канд. техн. наук, М., 1971, - 172 с.
132. Волков Д. П., Крайнев А. Ф. Планетарные и комбинированные передачи строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 328 с.
 133. Скворцова Г. А., Семин Ю. И., Комаров В. А. и Евдокимов А. П. Экспериментальное исследование мертвого хода волновой зубчатой передачи / Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1969. - № 10. – С.62-72.
 134. Чернова Л. С., Гинзбург Е. Г. О мертвом ходе волновой зубчатой передачи // Волновые зубчатые передачи. – Л., 1969. – С. 108.
 135. Комарова Т. Н., Крашенников В. И. Экспериментальное исследование мертвого хода и статистических моментов трогания волновой зубчатой передачи // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1971. № 2. – С.85-95.
 136. Васильева И. И. Теоретическое и экспериментальное исследование точности приборных волновых зубчатых передач. – Дис. канд. техн. наук. / СЗПИ – Л., 1972. – 173 с.
 137. Васильева И. И. О влиянии технологических погрешностей на мертвый ход волновых зубчатых передач // Труды СЗПИ. – Л., 1971. – С.58-68.
 138. Нажесткин Б. П., Варламова Л. П., Морин И. С., Смирнов Н. И., Сабойнов А. А., Ходдзян К. А. Стенд для испытания технических передач в вакууме при низких и повышенных температурах // Вестник машиностроения. – 1978. - № 3. – С. 25-27.
 139. Смирнов Н. И. Изнашивание зубчатых передач в вакууме // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1978. - № 8. – С. 51-54.
 140. Нажесткин Б. П., Варламова Л. П., Смирнов Н. И. Исследование работоспособности зубчатых передач на воздухе и в вакууме // Изв. ВУЗов. Сер. – 1978. - № 2. – С. 38-41.
 141. Нажесткин Б. П., Варламова Л. П., Макаров Ю. В., Смирнов Н. И. Особенности изнашивания зубьев цилиндрических зубчатых передач

в вакууме // Вест. машиностроения. – 1978. - № 9. – С. 26-28.

142. Нажесткин Б. П., Леликов О. П., Смирнов Н. И. Исследование долговечности зубчатых передач в вакууме // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана. – 1980. - № 333. – С. 73-93.
143. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г. Трение и КПД зубчатых передач в вакууме // Вест. машиностроения. – 1970. - № 2. – С. 7-9.
144. Деримьян Г. П. Экспериментальное исследование КПД мелкокомодульных зубчатых электромеханизмов в вакууме // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1969. - № 11. – С. 71-74.
145. Амосова Э. П., Чижов В. Ф., Деулин Е. А., Попов Е. Н. Анализ исследования нагрузки на диски генератора волновой передачи в зависимости от параметров гибкого колеса и формы упругой линии // Машиностроение; Вып. 8. – Красноярск, 1975. – С. 21-28.
146. Усаков В. И., Василенко Н. В., Ковалев Л. К., Стадник В. Е., Колесников Ю. П. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на газоотделение и упрочнение поверхностных слоев гибких элементов герметичных волновых передач // Электронная техника. Сер. П. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1981. – Вып. 3 (17). – С.
147. Басу С. К. Шариковые винтовые пары // Станкоинструментальная промышленность. – 1960. - № 3. – С. 66-74.
148. Турпаев А. И. Сравнительный анализ шариковинтовых механизмов // Динамика машин и синтез механизмов. – М., 1974. – С. 187-204.
149. Левит Г. А., Борисенко Г. А. Расчет и конструирование передач винта гайка качения: Руководящие материалы ЭНИМС. – М., 1964. – 81с.
150. Носатов С. П. Способы устранения люфтов // Резьбовой электромеханический привод. – Владимир, 1975. – С. 10-12.
151. Новоселов Б. В., Бушенин Д. В., Потапов Л. Д. Механическая передача в следящем приводе // Резьбовые несоосные и планетарные передачи в машиностроении и приборостроении. – Владимир, 1973. –

С. 16-20.

152. Левина З. М., Решетов Д. М. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 210с.
153. Чижов В. Ф. Совместное деформирование растяжимого кольца и цилиндрической оболочки // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение – 1969. - № 11. – С. 48-56.
154. Коротков В. П. Допуски на резьбовые соединения. Контроль резьбы. Приборостроение и средства автоматики: Справочник. – Т.І. – М., 1963. – 260с.
155. Ионак В. Ф. Приборы кинематического контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 128с.
156. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах / Ред.совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – т. 6 Защита от вибраций и ударов / Под ред. К. В. Фролова. 1981. – 456 с., ил.
157. Ливитин Ф. Л. Справочник конструктора точного приборостроения. – М.: Машиностроение, 1964. – С.896.
158. Ливитин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584с.
159. Крагельский И. В., Любарский И. М., Гусяков А. А. и др. Трение и износ в вакууме. – М.: Машиностроение, 1973. – 216с.
160. Куцоконь В. А., Малошевский С. Г., Тимофеев Б. П. Применение теории вероятностей при проектировании механизмов приборов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 144с.
161. Спришевский А. И. Подшипники качения. – М.: Машиностроение. 1968. – 48с.
162. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576с.
163. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. - М.: Машиностроение, 1979. – 341с.
164. Турпаев А. И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1982. – 222с.
165. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и прибо-

- ростроении: Справочник. Т2. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 310с.
166. Вагин Н. С. Разработка герметичных волновых зубчатых передач для сверхвысоковакуумного технологического оборудования и повышения их надежности. – Дис. канд. техн. наук. / МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1984. – 227с.
167. Данечев М. Д. Фрикционные свойства тонких пленок дисульфида молибдена, полученных методом электровакуумного напыления. – М., 1972. – С. 49-55. (Экспресс-информация. Детали машин; Вып.29).
168. Иосилевич Г. Б. Концентрация напряжений и деформаций машин. – М.: Машиностроение, 1981, 223с.
169. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник, том 2. М.: Машиностроение, 1968. С.59.
170. Механизмы и устройства радиоэлектронной техники: Учебное пособие / Н.В. Василенко., И.Ю. Григорьев, Е.Н. Ивашов и др. – М.: МГИЭМ, 1994 – 250 с.

ГЛАВА 16. ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАСТИН НАКОПИТЕЛЕЙ НА ЖЕСТКИХ МАГНИТНЫХ ДИСКАХ

16.1. Пластины накопителей на жестких магнитных дисках

Современные пластины винчестеров

Данные в магнитных запоминающих устройствах записываются на диск, покрытый магнитным записывающим слоем. При этом подложечный материал, из которого изготовлена пластина НЖМД, образует основу, на которой будут храниться данные.

Современные пластины винчестеров представляют собой очень плоскую бездефектную, чаще всего стеклянную, подложку с высококачественным тонкопленочным ферромагнитным слоем, состоящим из множества металлических пленок покрытых тонким защитным слоем углерода и смазки. Слой, хранящим данные, является сверхтонкое покрытие на поверхности пластины, состоящее из магнитного материала. Толщина данного слоя – несколько миллионных сантиметра.

При изготовлении пластин НЖМД используются специальные производственные технологии нанесения магнитного слоя из сплава кобальта, платины, хрома и бора. Одна из технологий – это гальванопокрытие. Другая технология – напыление. Пластины, произведенные по технологии на-

пыления, имеют лучшую однородность, чем пластины, произведенные с помощью гальванопокрытия. В силу возросших требований к качеству пластин современных жестких дисков используются пластины, произведенные по технологии напыления магнитного материала. Существует несколько разновидностей нанесения тонких пленок в вакууме: вакуум-термический, термоионный, электронно-лучевой, ионно-плазменный, с помощью автономных ионных источников, а так же с помощью магнетронных распылительных систем.

Сегодня в основном используются две технологии магнитной записи: продольная и перпендикулярная.

1. Продольная технология магнитной записи (the longitudinal recording) используется уже более 50 лет. Первое коммерческое устройство хранения данных с произвольным доступом, позднее названное жестким диском или винчестером, использующее продольную технологию, было выпущено компанией IBM в 1956 году. Устройство имело емкость всего 5 Мбайт, а данные записывались на 50 дисков диаметром 24 дюйма с плотностью записи порядка 2 Кбит/дюйм².

Современные системы хранения информации сплошь и рядом используют продольную магнитную технологию, применяемую как в дисковых, так и в ленточных накопителях. В ней запись данных осуществляется за счет того, что отдельные металлические ферромагнитные зерна, составляющие этот слой, имеют определенную продольную магнитную ориентацию (рис. 16.1.1).

Поскольку, северный и южный полюса магнитного домена располагаются вдоль поверхности диска, то есть рабочий слой перемагничивается вдоль движения диска, то необходимо, чтобы магнитное поле, создаваемое между полюсами сердечника головки записи, было параллельно поверхности диска (рис. 16.1.2).

Информация хранится не на одном домене, а на областях (частицах), состоящих минимум из 70–100 «зерен», каждое из которых теоретически

можно рассматривать как однодоменную частицу. При перемагничивании носителя вектор намагниченности каждой такой частицы изменяет свое направление только за счет вращения.

Таким образом, магнитная информация на диске состоит из большого количества очень маленьких магнитов. Как известно, магнит имеет два полюса, северный и южный, и магнитный поток течет от северного полюса к южному (рис. 16.1.3). Информация сохраняется на жесткий диск методом кодирования в набор магнитных полей, различая «0» и «1» как N-S и S-N соответственно.

Информация записывается и считывается на магнитный носитель

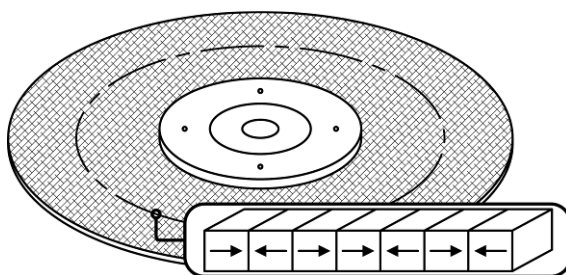


Рис. 16.1.1. Ориентация магнитных доменов в продольной технологии магнитной записи

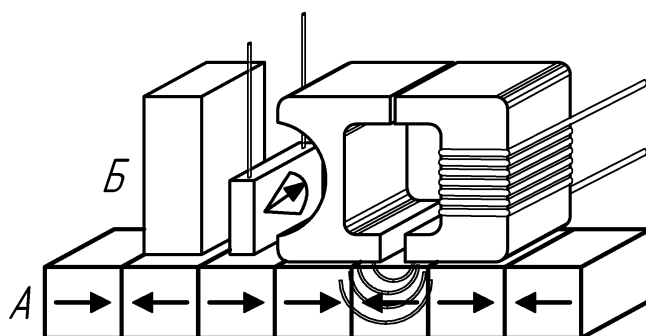


Рис. 16.1.2. Схема продольной технологии магнитной записи: *A* – магнитный слой; *B* – блок головок записи и чтения

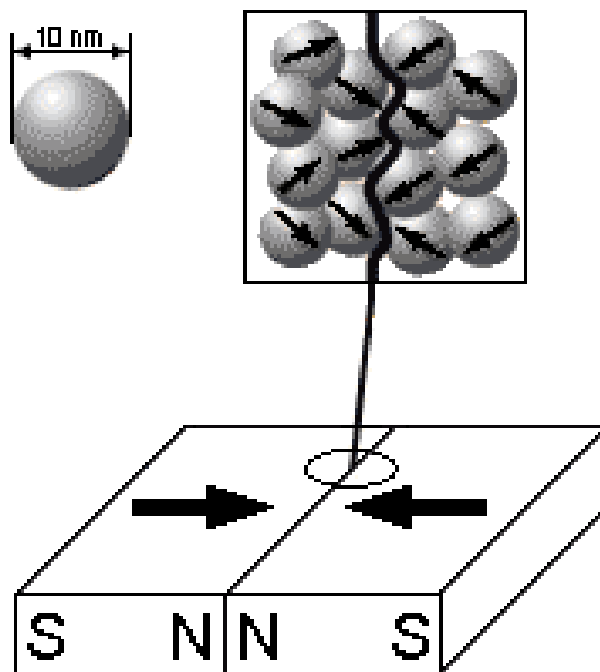


Рис. 16.1.3. Граница двух битовых ячеек с противоположной магнитной ориентацией

следующим образом. Головка чтения-записи представляет собой катушку индуктивности. Во время записи по ней протекает в определенном направлении электрический ток, и «домен» под головкой принимает соответствующую магнитную ориентацию – намагничивается в направлении поля. Чтение же информации производится путем измерения токов, индуцируемых магнитным полем «доменов» в катушке. Таким образом, если магнитный момент битовой ячейки совпадает с направлением движения диска, то считывающая головка регистрирует «0», если противоположен – «1».

2. Перпендикулярная технология записи (the perpendicular recording). Идея использования перпендикулярной записи последовала практически сразу за созданием НЖМД с продольной записью. В перпендикулярной технологии магнитные домены ориентированы под прямым углом к поверхности диска (рис. 16.1.4).

Технология перпендикулярной записи позволяет реализовать намагничивание ячейки данных по нормали к плоскости носителя, а не парал-

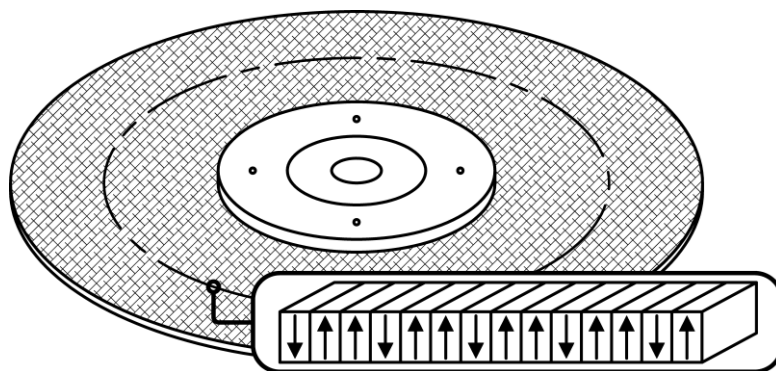


Рис. 16.1.4. Ориентация магнитных доменов в перпендикулярной технологии магнитной записи

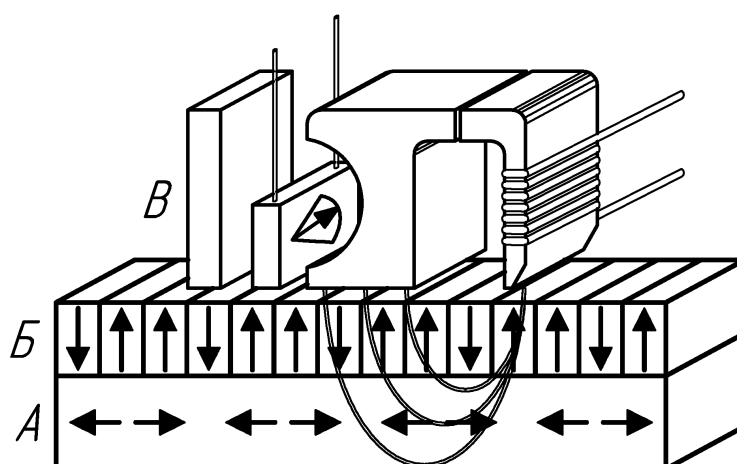


Рис. 16.1.5. Схема перпендикулярной технологии магнитной записи: A – магнитно-мягкий подслой; B – магнитный слой; B – блок головок записи и чтения

лельно, как в случае с традиционной продольной записью. Этого можно добиться с помощью записывающей головки G-образной формы и специальной пластины, которая создает магнитный образ записывающей головки (рис. 16.1.5).

Основной полюс сердечника G-образной головки создает магнитное поле. Силовые линии этого поля выходят из сердечника перпендикулярно магнитной поверхности диска и замыкаются через нижний магнитно-мягкий подслой диска на вспомогательном полюсе сердечника. При этом

частицы записывающего слоя намагничиваются вертикально, а частицы подслоя – горизонтально. Таким образом, магнитно-мягкий подслей является своего рода зеркальным отображением головки записи, что увеличивает проникновение магнитного поля (рис. 16.1.6).

Эта технология позволяет практически на порядок увеличить плотность записи информации и уменьшает проблемы с магнитным влиянием – интерференцией. При этом соседние и различающиеся домены уже не «глядят» друг на друга одноименными полюсами, которые, как известно, отталкиваются. Это позволяет уменьшить размер междоменного пространства, по сравнению с классической технологией записи, что так же увеличивает емкость жестких дисков. Идея перпендикулярной записи появилась еще 20 лет назад, но в отличие от традиционной продольной записи, новая технология пока не может похвастать надежностью построенных с ее применением накопителей. К тому же стоимость винчестеров нового поколения выше из-за затрат по переводу производственных линий носителей и головок чтения/записи на новую технологию. Предполагается, что плотность записи этой технологии достигнет 1 Тбит/дюйм².

Независимо от используемой технологии, когда НЖМД вращается с постоянной скоростью, магнитная головка парит на заранее установленной высоте над поверхностью пластины. Современные потребности в большей плотности записи, приводят к необходимости снижения этой высоты. Это обусловлено тем, что напряженность магнитного поля записывающей головки должна оказывать воздействие только на небольшую область слоя ферромагнитной пленки на пластине НЖМД, что напрямую связано с увеличением плотности записи информации. Таким образом, чем меньше расстояние между поверхностью магнитного диска и головкой, тем выше точность записи и считывания, и тем выше может быть плотность записи информации.

При уменьшении высоты подъема плавающей головки, т.е. уменьшении плавающего зазора, первостепенное значение имеет плоскостность

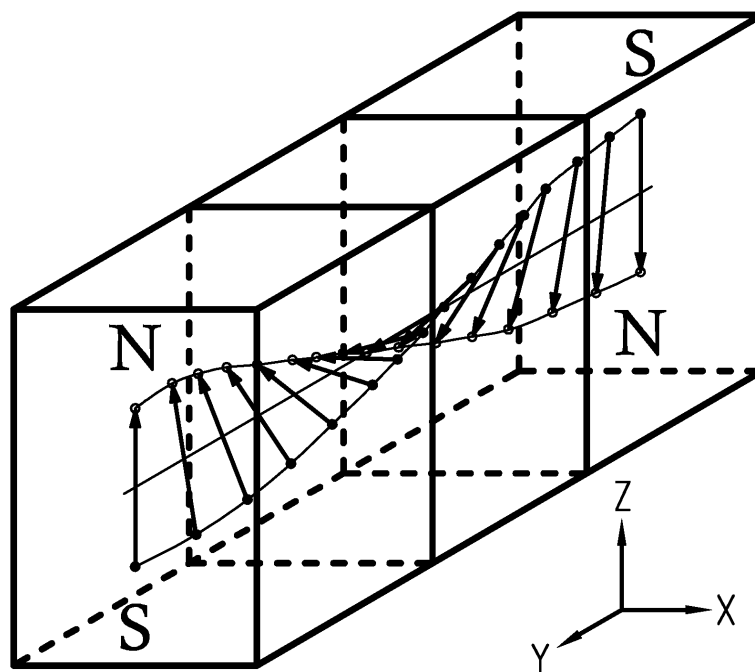


Рис. 16.1.6. Модель Блоховской стенки между двумя битовыми ячейками с противоположной намагниченностью

по поверхности магнитного диска. Использование алюминиевой подложки хоть и обеспечивает диску достаточную стабильность магнитных характеристик, но алюминий, являясь довольно мягким металлом, испытывает недопустимые пластические деформации в процессе механической обработки, такой как полировка. Именно поэтому, алюминиевый тип подложек, все реже используется в качестве основы магнитного диска. Сегодня более широкое применение получили стеклянные и керамические подложки. Они обладают высокой стойкостью к ударным нагрузкам и их значительно легче сделать плоскими, так как поверхностная твердость стекла практически исключает вышеописанную пластическую деформацию.

Процесс производства пластин

На первом этапе производят отливку стеклянных дисков. Форма для отливки предусматривает получение дисков с концентрическим отверстием, которое необходимо для последующей их установки на шпиндель электродвигателя НЖМД. Как правило, толщину такой стеклянной подложки выбирают из диапазона от 0,1 до 2 мм. Для отливки обычно применяют натрово-известные, алюмосиликатные, силикат литиевые, алюмосиликат литиевые, алюмоборосиликатные и другие стекла. Конкретными примерами являются $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$; $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Li}_2\text{O}$.

Как правило, в качестве стеклянной подложки чаще используют не аморфные, а химически закаленные или кристаллизованные стекла.

Для получения химически закаленных стекол аморфное стекло подвергают взаимодействию с расплавом солей при высокой температуре. Результатом такого взаимодействия является ионный обмен щелочных ионов стекла, с различными сортами щелочных ионов расплава солей. Закалку производят путем приложения напряжений сжатия.

Для получения кристаллизованных стекол аморфное стекло подвергают повторяющемуся нагреву и охлаждению с тем, чтобы в его массе образовалось большое количество кристаллов. Дальнейший процесс роста кристаллов тщательно контролируется, так как существует необходимость выращивания достаточно мелких кристаллов.

Современная технология производства основ пластин для магнитных дисков базируется на эффективном проведении двухсторонней полировки отлитых из стекла дисков.

В качестве предварительной обработки выступает шлифовка стеклянных подложек с тем, чтобы их степень плоскостности или значение полного замеренного биения достигла порядка 3-5 мкм. Для этого используют притирочные пластины, точность которых составляет 180 мкм и меньше. Причем шлифовку проводят путем постепенного увеличения ве-

личины точности притирочных пластин, сначала 180 мкм, далее 150 мкм, потом 80 мкм, затем 50 мкм и т.д.

Аморфные и химически закаленные стекла, как правило, шлифуют путем стирания поверхности стеклянной подложки, посредством свободного абразива, рассредоточенного в воде. Примерами абразивов являются окись алюминия, диоксид циркония, карбид кремния и т.п., однако окись алюминия наиболее применима с точки зрения скорости полировки. Кристаллизованные стекла шлифуют с использованием закрепленного абразива – обычно это алмазные гранулы.

Результатом вышеописанной шлифовки является также и то, что торцы внутреннего и внешнего диаметра стеклянной подложки становятся соответствующим образом скругленными, приводя к получению фаски.

Далее производится полировка до зеркальной поверхности внутреннего и внешнего торцов, а так же основной части поверхности стеклянной подложки с обеих сторон.

После этого, стеклянная подложка промывается и сушится.

Затем производится контроль микроволнистости полученной подложки. Величина амплитуды микроволнистости стеклянной подложки должна составлять порядка 0,5-0,3 нм, а ее период должен быть в пределах 0,1-5 мм.

Далее, на обеих поверхностях стеклянной подложки, например, с помощью лазера производится формирование фактурного прореза в направлении движения магнитной головки, тем самым, образуя концентрические дорожки.

На следующем этапе на обе поверхности посредством напыления наносится несущая пленка из кремниевого сплава, например CrNi.

Далее на этой несущей пленке формируется множественный магнитный записывающий слой из сплава кобальта, платины, хрома и бора толщиной 10-100 нм.

Затем для улучшения сопротивления коррозии и сопротивления скольжению на этом магнитном записывающем слое формируется защитная пленка из углерода, или схожего материала. В качестве примера это может быть гидрированный углерод, нанесенный напылением, или алмазоподобный углерод, химически осажденный из паровой или газовой среды. Таким образом, формируется углеродная пленка толщиной 1-50 нм.

На следующей стадии перфторполиэфир или продукт его эстерифицирования или аминирования, разбавляется растворителем и наносится путем распыления, окунания или центрифугирования в виде слоя смазки толщиной 0,5-5 нм на поверхности углеродной защитной пленки. Благодаря такому слою смазки удастся улучшить износоустойчивость, прочность и т.д.

На следующей стадии производят контроль полученной подложки. В частности, контроль механических параметров проводят с использованием тестера плавающего зазора, его величина должна составлять порядка 3-5,5 нм.¹

Материалы для рабочего слоя накопителей на жестких магнитных дисках

Слоем, хранящим данные, является очень тонкий множественный слой высококачественного ферромагнитного материала на поверхности пластины. В современных НЖМД в качестве ферромагнитного слоя используют сплав на основе кобальта, платины, хрома и бора. Такой сплав, по сравнению с оксидным материалом (оксид железа), более однороден, гладок и намного более устойчив к физическим воздействиям. Он также имеет намного лучшие магнитные свойства, позволяющие хранить гораздо больше дан-

¹ Пат. US20070264531 (A1) Соединенные Штаты Америки, МПК⁷ G 11 B 5/62; B 08 B 3/04; G 11 B 5/62; B 08 B 3/04. Magnetic Disk Substrate and Production Method of Magnetic Disk / Machida H., Aida K.; заявитель и патентообладатель Токио. Showa Denko K. K. – № US20050660741 20050826; заявл. 22.02.2007; опубл. 15.11.2007, United States Patent Application Publication § 371(c). (1), (2), (4).

ных на единице поверхности.

Сложные сплавы на основе кобальта синтезируют таким образом, чтобы они отвечали следующим требованиям:

1) высокая остаточная магнитная индукция B_r для повышения уровня считываемого сигнала;

2) максимально высокое значение коэрцитивной силы H_C для уменьшения эффекта саморазмагничивания, приводящего к потере записанной информации;

3) малая величина коэрцитивной силы H_C для облегчения процесса перезаписи (противоречит предыдущему требованию);

4) большие значения коэффициента выпуклости $K_{\text{вып}} = \frac{(BH)_{\text{max}}}{B_r H_C}$ (удовлетворяет требованию высокой остаточной магнитной индукции B_r и минимальной чувствительности к саморазмагничиванию);

5) высокая температурная и временная стабильность магнитных свойств;

6) минимальные размеры магнитных кластеров (конкурирует с предыдущим требованием ввиду эффекта суперпарамагнетизма).

Любой ферромагнитный материал состоит из доменов – областей, внутри которых магнитные моменты всех атомов направлены в одну сторону. Каждый домен имеет большой суммарный момент, который в исходном состоянии может быть направлен произвольно. Под действием внешнего магнитного поля домены могут менять направление магнитного момента. Именно этот эффект используется при записи.

Принцип магнитной записи электрических сигналов на движущийся магнитный носитель основан на явлении остаточного намагничивания. Запись и хранение информации на магнитном носителе производится путем преобразования электрических сигналов в соответствующие им изменения магнитного поля, воздействия его на магнитный носитель и

сохранения следов этих воздействий в магнитном материале длительное время, благодаря явлению остаточного магнетизма. Воспроизведение электрических сигналов производится путем обратного преобразования.

Влияние диффузии примесных веществ на свойства рабочего слоя накопителей на жестких магнитных дисках

При производстве пластин НМЖД широко применяются слоистые композиционные структуры, позволяющие получать ферромагнитные системы с улучшенными магнитными свойствами, необходимыми для увеличения плотности записи информации при использовании как продольной, так и перпендикулярной технологий магнитной записи информации [2].

Конструктивно пластина НМЖД представляет собой композиционный материал в виде плоской пластины-подложки с рядом слоистых структур с активными слоями (не менее 6) [3].

На рис. 16.1.7 показан характерные примеры слоистой композиционной структуры пластин НЖМД.

Использование слоистых композитов позволяет одновременно повысить и плотность и надежность записи информации, так как намагниченность рабочего слоя остается стабильной при меньших размерах магнитных частиц благодаря увеличению общей толщины структуры.

Плотность записи информации, составляющая в настоящее время 150 Гбит/дюйм², не является пределом для жестких дисков. Предпринимаются различные инженерные решения для повышения этого значения, что, однако, требует значительных временных затрат. Сложившаяся ситуация заставляет разработчиков злоупотреблять простым способом увеличения емкости НМЖД – уменьшением толщины ферромагнитного рабочего слоя

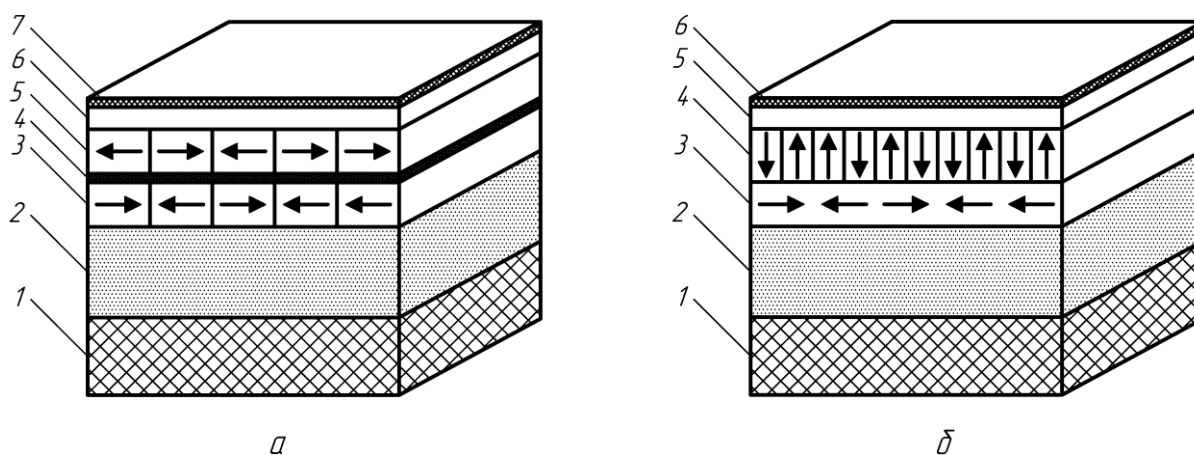


Рис. 16.1.7. Схема пластин НЖМД:

а) с продольной намагниченностью: 1 – подложка; 2 – несущий подслой; 3 – первый АФС слой; 4 – слой рутения;

5 – второй АФС слой; 6 – защитный слой; 7 – слой смазки;

б) с перпендикулярной намагниченностью: 1 – подложка; 2 – несущий подслой; 3 – магнитомягкий под-
слой;

4 – ферромагнитный слой с перпендикулярной МКА;

5 – защитный слой; 6 – слой смазки

$\delta_{\text{раб}}$, что приводит к появлению неявно выраженных границ $\Delta_{\text{гр1}}$ и $\Delta_{\text{гр2}}$ между соседними слоями (рис. 16.1.8). Тенденция к уменьшению толщины рабочего слоя $\delta_{\text{раб}}$ может существенно повлиять на качество его записывающей части $\delta_{\text{зап}} = \delta_{\text{раб}} - (\Delta_{\text{гр1}} + \Delta_{\text{гр2}})/2$ которая, в результате чрезмерной размытости границ, окажется меньше критической величины. Таким образом, главная причина увеличения вероятности возникновения ошибок записи-чтения информации в такой конструкции пластин НЖМД – возникновение нечетких границ между слоями.

Нечеткие границы между слоями структуры, возникающие при формировании данных слоистых композиционных структур вакуумными ме-

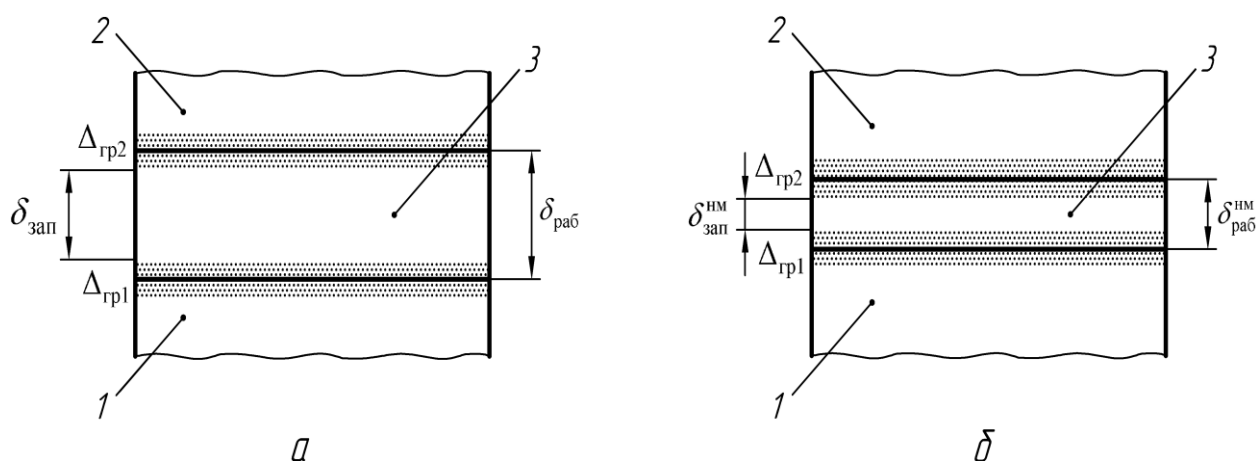


Рис. 16.1.8. Схематическое изображение нечетких границ рабочего слоя пластины НЖМД при

а) $\Delta_{гр1} \ll \delta_{раб}$, $\Delta_{гр2} \ll \delta_{раб}$; б) $\Delta_{гр1} \approx \delta_{раб}^{нм}$, $\Delta_{гр2} \approx \delta_{раб}^{нм}$,

где 1 – несущий подслой; 2 – защитный слой;

3 – ферромагнитный рабочий слой

тодами, вызваны диффузией примесных веществ. Чрезмерная размытость диффузионных границ между слоями, достигающая величины, меньше критической, обусловлена не столько газами, присутствующими в объеме вакуумной камеры, сколько технологическим процессом формирования тонкопленочных слоев пластин НЖМД. Такая технология проводится, как правило, в условиях резко неоднородного распределения концентрации веществ и при высоких температурах, возникающих практически при любом способе формирования слоистой системы [4-5].

При рассмотрении несущего подслоя, на который одним из способов формирования наносится ферромагнитный рабочий слой, можно видеть, что массообмен происходит лишь на периферийных частях смежных слоев, общая толщина которых $\Delta_{гр1}$ значительно меньше толщины формируемого рабочего слоя $\Delta_{гр1} \ll \delta_{раб}$ (см. рис. 16.1.8, а). Однако при переходе от микрометровой к нанометровой технологии производства пластин НМЖД

общая толщина периферийных частей $\Delta_{\text{гр1}}$ рабочего слоя становится соизмеримой с его общей толщиной (см. рис. 16.1.8, б)

$$\Delta_{\text{гр1}} \approx \delta_{\text{раб}}^{\text{HM}}. \quad (16.1.1)$$

Аналогичная ситуация наблюдается и при нанесении защитного слоя на сформированный рабочий слой

$$\Delta_{\text{гр2}} \approx \delta_{\text{раб}}^{\text{HM}}. \quad (16.1.2)$$

При внедрении примесей в кристаллическую решетку или границы зерен магнитные характеристики периферийных частей рабочего слоя существенно ухудшаются и, исходя из (16.1.1) и (16.1.2), можно видеть, что записывающая часть рабочего слоя стремится к нулю:

$$\delta_{\text{зап}}^{\text{HM}} = \delta_{\text{раб}}^{\text{HM}} - (\Delta_{\text{гр1}} + \Delta_{\text{гр2}}) / 2 \rightarrow 0. \quad (16.1.3)$$

Таким образом, при производстве пластин НЖМД требования, предъявляемые к процессам диффузии весьма жесткие: толщина диффузионного слоя должна выдерживаться в пределах долей микрона, необходимо также с высокой точностью задавать поверхностную концентрацию примесей. Для того чтобы данные требования выполнялись, необходимо очень точно регулировать время и температуру диффузионных процессов. Только при этом условии можно получить распределение примесей в диффузионных слоях, необходимое для данного этапа развития технологии магнитной записи информации.

Физическая модель диффузии

Рассмотрим физическую модель диффузии, используя два основных параметра диффузии: поверхностную концентрацию примеси и коэффициент диффузии.

Обычно распределение примесей в диффузионном слое для случая полубесконечного проводника хорошо совпадает с практическими данными только в том случае, если глубина диффузии превышает несколько микрон или поверхностная концентрация примеси ниже $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Для тонких диффузионных слоев и высоких поверхностных концентраций характерны серьезные расхождения между теорией и экспериментом. Причины этих расхождений качественно исследованы. Они связаны в первую очередь с тем, что коэффициент диффузии зависит от концентрации примесей, взаимодействия между атомами примеси и (или) поверхностных нарушений; кроме того, принятые в модели граничные условия не слишком строго выполняются в реальных диффузионных процессах. Подобные расхождения можно оценить эмпирически, из данных эксперимента, и отсутствие точного количественного решения свидетельствует лишь о том, что для этого не приложено достаточно усилий.

Уменьшение доли эмпиризма в описании современных диффузионных процессов в первую очередь связано с получением реальных данных о коэффициенте диффузии и влиянии на него различных факторов. Сейчас накоплено большое количество данных о температурной зависимости коэффициента диффузии примесей, и этот вопрос изучало множество исследователей самыми разнообразными методами, но в условиях, как правило, весьма далеких от реальных режимов диффузии в потоке газа-носителя – основного метода технологии изготовления пластин НЖМД. Поэтому, крайне желательно создать физическую модель диффузии, действительно отвечающую практическим условиям.

Теория диффузии

Процессы изотропной диффузии описываются с помощью понятия коэффициента диффузии, который определяется уравнением

$$\mathbf{J} = -D\nabla N, \quad (16.1.4)$$

где D – коэффициент диффузии, $\mathbf{J}$ – плотность потока диффундирующих атомов, N – концентрация диффундирующих атомов, ∇ – оператор градиента.

Смысл уравнения (16.1.4), которое обычно называют первым законом диффузии Фика, состоит в следующем: для того чтобы имела место диффузия, необходимо наличие градиента концентрации. Минус в правой части указывает на то, что диффузия происходит в направлении убывания концентрации.

В общем случае диффузия анизотропна, и коэффициент диффузии представляет собой тензор второго ранга, т.е

$$J_i = \sum_j D_{ij} \frac{\partial N}{\partial x^j}. \quad (16.1.5)$$

В случае если диффузия изотропна, и D является скалярной величиной, рассмотрение процессов диффузии в таких веществах упрощается.

В производстве пластин НЖМД наиболее важными являются плоскопараллельные структуры, поэтому при теоретическом анализе можно ограничиться простейшим одномерным случаем. Кроме того, здесь можно не рассматривать осложнения, вносимые неоднородностями структуры (например, границы зерен). Концентрация диффундирующих примесей достаточно мала, и поэтому можно пренебречь изменениями в размерах образца, происходящими в процессе диффузии. Таким образом, в качестве системы отсчета может быть использована кристаллическая решетка.

Для одномерной диффузии уравнение (16.1.4) принимает вид

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x}. \quad (16.1.6)$$

Применяя к уравнению (16.1.4) принцип непрерывности потока, можно получить уравнение для второго закона диффузии Фика

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla(D \nabla N), \quad (16.1.7)$$

или для одномерного случая

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right). \quad (16.1.8)$$

Введем частную производную $\frac{\partial D}{\partial x}$, которая означает, что x и t изменяются независимо и что t постоянно для различных x . Тем самым предполагается, что в любой момент времени D определяется однозначно. Любыми изменениями, вызванными температурными градиентами или различиями в концентрациях от точки к точке внутри кристалла можно пренебречь. Если $\frac{\partial D}{\partial x} = 0$ то уравнение (16.1.8) упрощается:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (16.1.9)$$

где N во всех точках имеет конечное значение.

Процессы диффузии, происходящие при производстве пластин НЖМД, обычно анализируются с помощью решений уравнения (16.1.9). Многие такие решения можно получить в аналитическом виде, тогда как решение уравнения (16.1.8) требует применения численных методов.

В задачах диффузии связанных с технологией производства пластин НЖМД требуется определять различные диффузионные характеристики, зная соответствующие коэффициенты диффузии и граничные условия. Таковыми характеристиками являются концентрации диффундирующих веществ, поток вещества через произвольно выбранную поверхность и количество вещества, которое вводится в образец или удаляется из него в течение заданного промежутка времени. Для определения этих характеристик необходимо знать характер распределения примеси в образце. Граничные условия задают пространственную зависимость концентрации примеси в

момент времени $t = 0$ и значения концентрации или потока примеси в определенных плоскостях. Граничные условия могут зависеть от времени. При обычных условиях, когда примеси диффундируют в слое НЖМД, ни одна из них не достигает противоположной границы, т.е. диффузия происходит только с одной поверхности ($x = 0$). Поэтому мы выбираем модель полубесконечного твердого тела, ограниченного плоскостью $x = 0$.

Предполагается, что диффузия каждой примеси происходит независимо от концентраций всех остальных примесей. Это находит отражение в том, что уравнение диффузии с постоянным D не содержит членов, учитывающих взаимодействие примесей. Поэтому можно получать решения для диффузии каждой примеси в отдельности, как если бы никаких других примесей не существовало вовсе. В реальных процессах диффузии эффектами взаимодействия примесей не всегда можно пренебречь [6].

Диффузия внутрь с поверхности постоянной концентрации

Диффундирующие примеси поступают в полубесконечное тело через плоскость $x = 0$ и поверхностная концентрация N_0 постоянна. Граничные условия можно представить в виде

$$N(x > 0, 0) = 0; N(0, t \geq 0) = N_0 \quad (16.1.10)$$

и решением уравнения (16.1.9) является выражение

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (16.1.11)$$

Уравнение (16.1.11) хорошо описывает распределение примеси в слое при диффузии из газовой или паровой фазы. На рис. 16.1.9 показаны распределения примеси для двух различных значений времени диффузии. Если N_0 превышает предельную растворимость диффундирующих ве-

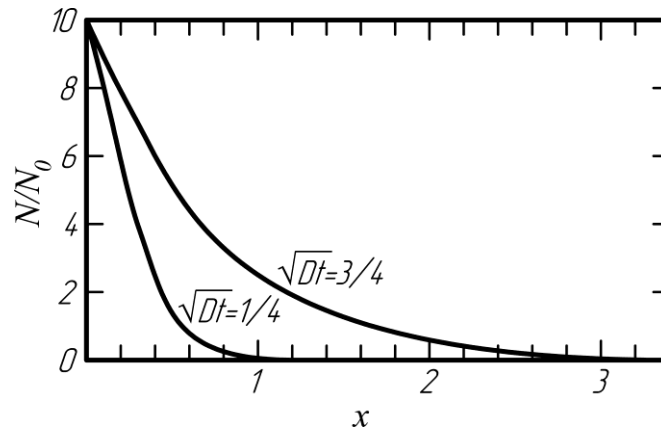


Рис. 16.1.9. Диффузия с поверхности постоянной концентрации

ществ в твердом теле, то, помимо диффузии, имеют место другие процессы, в этом случае описанная модель, по-видимому, не будет соответствовать действительности.

Скорость потока примеси через поверхность ($x = 0$) определяется выражением

$$J(t) = -D \frac{\partial N}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{DN_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \Big|_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (16.1.12)$$

Количество вещества, поступившее в твердое тело за время t , равно

$$Q = \int_0^t J(t) dt = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}. \quad (16.1.13)$$

Уравнение (16.1.11) выполняется достаточно точно, если примесь проникает на глубину, превышающую несколько микрон, или концентрация примеси невелика. В противном случае это уравнение не выполняется, поскольку коэффициент диффузии может зависеть и от концентрации диффундирующей примеси и от неравномерных концентраций уже имеющихся примесей, а также в силу того, что для достижения равновесного значения поверхностной концентрации требуется конечное время [6].

Диффузия при формировании пластин накопителей на жестких магнитных дисках

Рассматривая формирование многослойной структуры на подложке НЖМД необходимо учитывать возникновение массообмена или, другими словами, диффузионных потоков между этими слоями. Таким образом, при рассмотрении какого-либо слоя на подложке НЖМД, примесными веществами являются не только газы из внутреннего объема вакуумной камеры, но также и вещества из соседнего слоя, диффундирующие, главным образом, во время нанесения тонкопленочных слоев.

Адсорбционный процесс растворения примесного вещества в тонких ферромагнитных пленках осуществляется за счет диффузии молекул примесей в кристаллическую решетку или по границам зерен. Диффузионный поток пропорционален градиенту концентрации. Так как для стационарного потока примесного вещества через стенку толщиной $2h$ градиент концентрации $\frac{dc}{dx} = \frac{(c_1 - c_2)}{2h}$, то

$$q = -D \frac{dc}{dx} = -D \frac{c_1 - c_2}{2h}, \quad (16.1.14)$$

где q – число молекул, проходящих в единицу времени через единицу площади поперечного сечения в направлении оси x ; D – коэффициент диффузии примеси; c_1 и c_2 – концентрация примесного вещества на границах стенки.

Коэффициент диффузии примеси D сильно возрастает при повышении температуры:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_D}{nRT}\right), \quad (16.1.15)$$

где Q_D – энергия активации при диффузии; n – число атомов в моле-

куле примесного вещества для металлов, для неметаллов $n = 1$;
 D_0 – коэффициент пропорциональности, независимый от температуры.

Значение D_0 и Q_D при диффузии примесного вещества в материалах пластин НЖМД нужно рассматривать как приближенные в связи с тем, что на них влияют внутренние напряжения в материале. В тех случаях, когда диффузия происходит в основном по границам зерен и дефектам упаковки, необходимо дополнительно учитывать способ нанесения тонкопленочных слоев, размеры и ориентацию кристаллов.

При нанесении тонкопленочных слоев, градиент концентрации примеси D изменяется во времени, а в единице объема слоя происходит изменение концентрации вещества, описываемое дифференциальным уравнением нестационарной диффузии:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2}. \quad (16.1.16)$$

Рассмотрим процесс нестационарной диффузии примесного вещества, сопровождающийся поглощением и выделением примесей на разделе двух соседних слоев. Ограничим наше рассмотрение случаем, когда массообмен происходит лишь в поверхностном слое, толщина которого значительно меньше общей толщины рассматриваемого слоя. При этом слой НЖМД можно рассматривать как полубесконечное тело, у которого длина существенно больше толщины, что позволяет считать задачу одномерной.

В вакуумной камере, при нанесении на данный слой следующего, начальная концентрация примесей в слое постоянна и равна c_0 . Давление над поверхностью слоя также будем считать постоянным, а равновесную концентрацию примесей в слое, соответствующую этому давлению, обозначим через c_m . Независимость c_0 и c_m от времени соответствует граничным условиям первого рода.

На практике такое часто встречается, когда нанесение слоя происходит при постоянных температуре и давлении, а коэффициент диффузии достаточно мал $D < 0,1 \frac{h^2}{t_{\max}}$, где h – половина толщины слоя; $t_{\max}$ – максимальная длительность процесса массообмена.

Начальные и граничные условия для уравнения (16.1.16) при этом можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} t = 0; \quad c(x, 0) = c_0; \quad x = 0; \quad c(0, t) = c_m; \\ t = \infty; \quad c(x, \infty) = c_m; \quad x = \infty; \quad \frac{\partial c(\infty, t)}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (16.1.17)$$

Решение (16.1.16) при указанных граничных условиях (16.1.17) можно представить в виде функции безразмерного времени $\tau = \frac{Dt}{h^2}$:

$$c\left(\frac{x}{h}, \tau\right) = c_m + (c_0 - c_m) \operatorname{erf}\left(\frac{x/h}{2\sqrt{\tau}}\right), \quad (16.1.18)$$

где $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) dU$ – функция ошибок Гаусса.

Результаты расчетов по формуле (16.1.18) для различных отношений x/h при поглощении примесного вещества, когда $c_m > c_0$, показаны на рис. 16.1.10, а, а при выделении примесного вещества, когда $c_0 > c_m$, – на рис. 16.1.10, б.

Так как удельный диффузионный поток через единицу поверхности, обращенную в вакуум составляет

$$q = -D \left. \frac{dc}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{(c_0 - c_m)D}{h} \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}}, \quad (16.1.19)$$

то удельное количество примесного вещества, участвующего в массообмене равно

$$a = \int_0^t q dt = -2(c_0 - c_m)h\sqrt{\tau/\pi}. \quad (16.1.20)$$

При этом средняя концентрация примесного вещества в пленке составит

$$c_{cp} = c_0 - 2(c_0 - c_m)\sqrt{\tau/\pi}, \quad (16.1.21)$$

а степень массообмена, т.е. отношение количества примесного вещества, участвующего в массообмене, к полному количеству примесного вещества, находящемуся в твердом теле до начала массообмена, можно определить как

$$\sigma = \frac{|a|}{c_0 h} = 2\left(1 - \frac{c_m}{c_0}\right)\sqrt{\tau/\pi}. \quad (16.1.22)$$

Степень массообмена определяет абсолютную степень примесной насыщенности пленки и может являться расчетным критерием для выбора типового технологического процесса нанесения тонкопленочного слоя в вакууме.

Критерием для выбора времени, необходимого для осуществления технологического процесса, связанного с выделением или поглощением примесного вещества, может служить эффективность массообмена

$$\mathcal{G} = \frac{\sigma}{(c_0 - c_m)/c_0} = 2\sqrt{\tau/\pi}, \quad (16.1.23)$$

которая представляет собой отношение достигнутой степени массообмена к максимально возможной при данных условиях.

На рис. 16.1.11 показаны графики зависимости удельного безразмерного потока 1 и эффективности массообмена 2 от безразмерного времени τ .

Пользоваться приведенными выше формулами можно для пленок любой формы при $\tau \leq 0,1$, откуда следует приведенное выше ограничение по величине коэффициента диффузии. При этом тело еще может считаться бесконечным в направлении оси x .

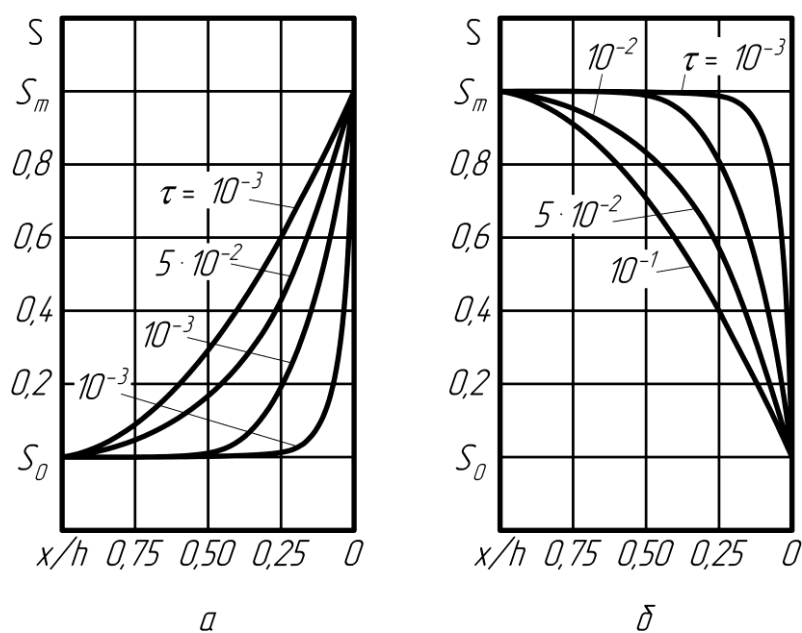


Рис. 16.1.10. Распределение концентрации в полубесконечном теле для различных значений безразмерного времени τ : а – газопоглощение; б – газовыделение

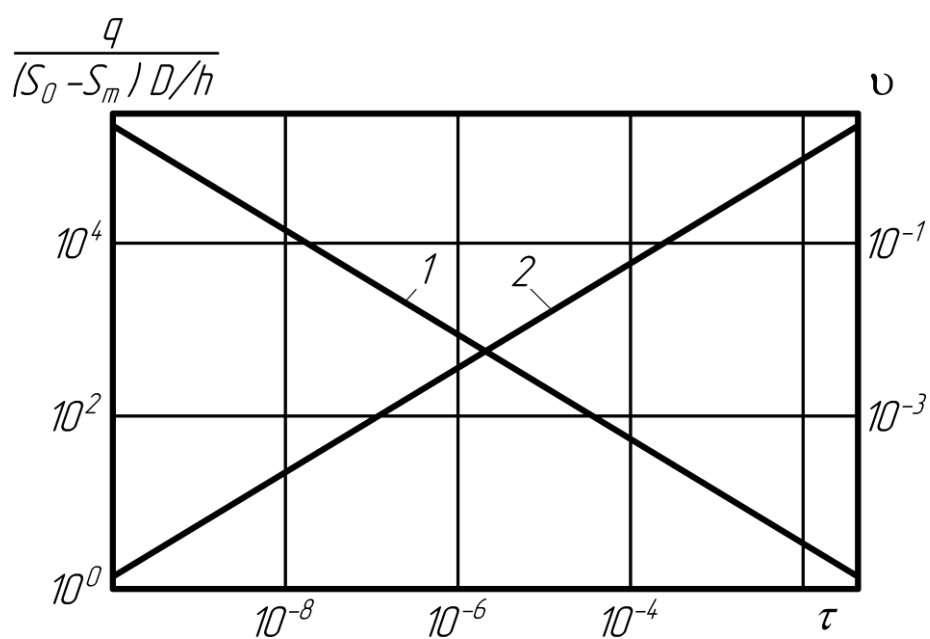


Рис. 16.1.11. Зависимость безразмерного потока (1) на границе пленки и эффективности массообмена (2) от безразмерного времени

Ранее была сделана оговорка, что массообмен происходит лишь в поверхностном слое, толщина которого значительно меньше общей толщины рассматриваемого слоя. Однако при переходе от микрометровой к нанометровой технологии производства пластин НЖМД рассматриваемый выше поверхностный слой становится соизмеримым с общей толщиной рассматриваемого слоя, что влечет к серьезному ухудшению его характеристик.

Такое ухудшение особенно нежелательно для ферромагнитного запоминающего рабочего слоя, современная технология производства которого направлена на уменьшение его толщины. В связи с этим, вопрос моделирования диффузии примесей в слоях пластин НЖМД получает все большую актуальность из-за потребности в оптимизации процесса их формирования, т.к. именно ферромагнитный запоминающий слой, в конечном итоге, и будет являться рабочим слоем НЖМД, хранящим информацию.

16.2. Основные понятия и представления о проектировании пластин накопителей на жестких магнитных дисках

Блочно-иерархический подход к проектированию накопителей на жестких магнитных дисках

Современные НЖМД – сложные системы, с иерархической структурой, состоящие из большого количества взаимосвязанных блоков. В свою очередь, блоки состоят из некоторого набора узлов и имеют сложную иерархическую структуру. И так до нижнего уровня иерархии НЖМД, элементами которого служат неделимые компоненты. Назовем последние базовыми элементами (БЭ).

На рис. 16.2.1 приведена иерархия структуры НЖМД. На каждом иерархическом уровне имеется свое представление о системе и элементах. То, что на i -м уровне называлось элементом, становится системой на $i + 1$ уровне [7].

По ЕСКД различают следующую иерархию изделий машиностроения: детали – сборочные единицы – комплексы – комплекты. В соответствии с ЕСТД установлена такая иерархия уровней технологии: маршрутная – операционная – технологические переходы. Для технологии базовыми элементами служат технологическое оборудование, инструмент, оснастка, технологические среды, приспособления и т.п. Как элементы они образуют систему первого иерархического уровня – технологический переход. В свою очередь, технологический переход как элемент входит в систему следующего иерархического уровня – технологическую операцию. Наконец, технологическая операция как элемент входит в систему следующего уровня иерархии – маршрутную технологию.

Проектирование всего НЖМД в комплексе представляет собой сложную научно-техническую задачу большой размерности. Решение такой задачи не под силу даже самой мощной современной ЭВМ. Поэтому

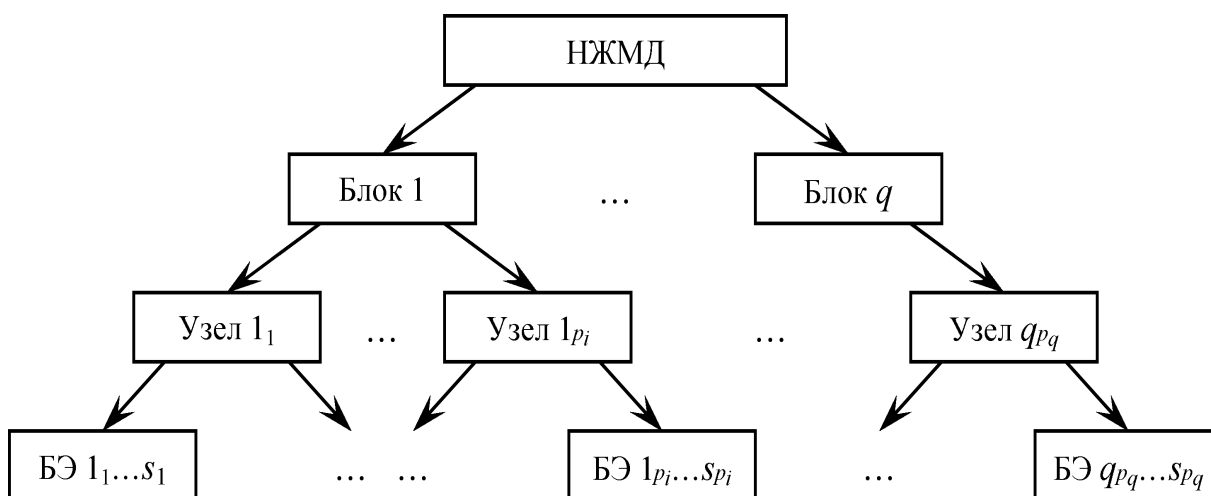


Рис. 16.2.1. Иерархия структуры НЖМД

для ее решения целесообразно использовать блочно-иерархичный подход, в основу которого положена идея, аналогичная идее метода динамического программирования Беллмана [8]. Проектирование при блочно-иерархическом подходе ведется последовательно сверху вниз. На каждом иерархическом уровне ставится и решается задача проектирования систем этого иерархического уровня. Так, на верхнем уровне рассматривается весь НЖМД в целом. Для его описания используется наименее детализированное представление, отражающее самые общие черты и особенности проектируемого НЖМД. На каждом следующем уровне последовательной разработки степень детализации описания возрастает. При этом НЖМД уже рассматривается не в целом, а отдельными блоками. Такой подход к проектированию позволяет, во-первых, свести решение задачи большой размерности к решению последовательности задач меньшей размерности; во-вторых, усекавать пространство допустимых проектных решений, при переходе с уровня на уровень; в-третьих, за счет оптимизации каждого шага проектирования получать оптимальные или квазиоптимальные проектные решения [7].

На самом верхнем иерархическом уровне исходными данными на проектирование является техническое задание (ТЗ) на НЖМД. Поскольку элементами этого уровня являются блоки, которые еще не разработаны, то значениями их параметров необходимо задаться. Как правило, стремятся выбрать такие значения параметров, которые обеспечивают оптимум критерию функционирования. На следующем иерархическом уровне выбранные значения параметров блоков используются в качестве ТЗ на их разработку. Цель проектирования – создание блоков с требуемыми параметрами. В случае удачного завершения процесса разработки блоков проблема оптимальности НЖМД является решенной и можно переходить на следующий уровень. И так до уровня проектирования неделимых элементов.

Поскольку значениями параметров элементов на каждом уровне задаются исходя из условий оптимизации систем при отсутствии полной информации об НЖМД, возможны ошибки в выборе значений их параметров.

Например, выбраны нереализуемые по экономическим, технологическим, конструктивным или другим соображениям параметры. Ошибки выявляются при переходе на следующий уровень проектирования, а их исправление происходит возвратом на верхний уровень и повторным выполнением предыдущих этапов проектирования. Отсюда вытекает важная особенность процесса проектирования – итерационный характер проектирования.

Этапы проектирования пластин

Проектирование систем каждого иерархического уровня пластин НЖМД проводится в несколько этапов и включает в себя разработку схем, конструкций и технологии. Этап разработки схем пластин НЖМД можно назвать концептуальным этапом проектирования.

По ЕСКД схемы делятся на структурные, функциональные и принципиальные.

Структурная схема дает наиболее общее представление о проектируемых пластинах НЖМД. Она определяет состав функциональных элементов, входящих в него и устанавливает связи между ними.

Со структурной схемой неразрывно связано понятие структуры пластин НЖМД. Под структурой понимается функциональный состав элементов системы и их взаимосвязь.

Функциональная схема дает представление о физических принципах работы пластин НЖМД с учетом только тех функциональных элементов, которые вошли в состав структурной схемы пластин НЖМД.

Разработка принципиальной схемы пластин НЖМД завершает этап проектирования схем. Она создается на нижних уровнях иерархии, когда формируется окончательное представление о проектируемых пластинах НЖМД. Принципиальная схема определяет полный набор базовых элементов и позволяет получить полное детальное описание пластин НЖМД и их функционирования [7].

Частью процесса проектирования, непосредственно связанной с разработкой конструкции и получением технической документации на пластины НЖМД является конструирование.

Различают прямую и косвенную конструкторскую деятельность. Действия, результатом которых является непосредственно разработка конструкции пластин НЖМД, называются прямой конструкторской деятельностью. К ним относятся разработка концепции пластин НЖМД, определение типа, числа материалов, размеров и взаимное расположение элементов – слоев, составление общей конфигурации пластин НЖМД, проведение расчетов, вычерчивание сборочного чертежа, детализовка, составление спецификаций, внесение изменений [9].

В зависимости от того, на что направлено проектирование, различают пионерское, доводочное и вариантное конструирование, также может быть использовано конструирование без изменения принципов конструкции.

Основной особенностью пионерского конструирования пластин НЖМД является новое расположение известных или новых элементов. Большинство конструкторских разработок, называемых новыми, создаются на основе не использовавшегося ранее сочетания элементов, давно известных как по принципу функционирования, так и по исполнению. Использование новых элементов предполагает, как правило, открытие новых физических принципов или изобретение новых рабочих принципов.

Доводочным конструированием пластин НЖМД называется такое конструирование, когда при заданном базовом сочетании элементов изменяются функции отдельных элементов или их конфигурация. Первоначальная основная функция изменяется и дополняется только в несущественных деталях. Это часто имеет место при конструктивном изменении стандартных решений, осуществляемом по требованию заказчика. В данном случае процесс конструирования охватывает этапы разработки концепции, конструкции и проработки отдельных частей конструкции пластин НЖМД.

Конструирование пластин НЖМД называется вариантным, когда при заданной функционально-зависимой структуре и неизменном расположении всех элементов изменяются конфигурация или (и) размеры самих элементов.

При конструировании пластин НЖМД без изменения принципа конструкции остаются неизменными функциональная структура, расположение и конфигурация элементов. В проектирование входит только этап детализовки, так как разработка проекта не требуется.

Разработка технологии включает в себя проектирование маршрутной и операционной технологий, а так же создание специального технологического оборудования, оснастки, приспособлений, инструментов и т.д.

Проектные процедуры

На каждом иерархическом уровне пластин НЖМД типовым алгоритмом проектирования является следующая итерационная последовательность проектных процедур, представленная на рис. 16.2.2.

Исходными данными на проектирование систем любого иерархического уровня НЖМД служит ТЗ, а результатом проектирования является документация на систему данного уровня и ТЗ на разработку систем следующего иерархического уровня. На каждом уровне используется своя логика проектирования. Однако типовыми проектными процедурами, определяющими разработку и отбор проектных вариантов пластин НЖМД, являются процедуры синтеза, анализа и принятия решений.

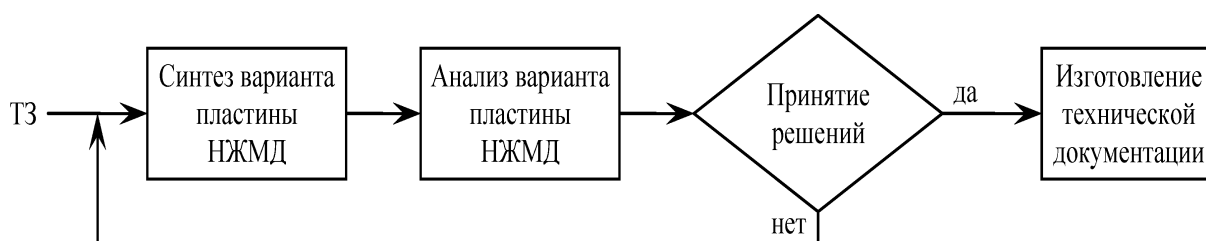


Рис. 16.2.2. Типовой алгоритм проектирования НЖМД

Под синтезом пластин НЖМД будем понимать совокупность действий, нацеленных на разработку нового проектного варианта.

Процедура анализа пластин НЖМД связана с определением характеристик синтезированного варианта. Результаты анализа служат основанием для отбора наиболее подходящих проектных вариантов.

Различают одновариантный и многовариантный анализы. Одновариантный анализ предназначен для определения выходных параметров системы при заданном варианте структуры и сочетании значений внутренних параметров. Многовариантный анализ позволяет судить о поведении объекта в некоторой области пространства допустимых значений внутренних параметров.

Выделяют два вида многовариантного анализа: анализ чувствительности и статистический анализ. Анализ чувствительности используется при ответе на вопрос: «Какова чувствительность выходных параметров системы к действию дестабилизирующих факторов?». Статистический анализ используется для оценки серийнопригодности пластин НЖМД, т.е. показывает, какой характер и величина разброса выходных параметров пластин НЖМД, при известном законе разброса параметров элементов.

Независимо от логики проектирования каждый иерархический уровень заканчивается проверкой пригодности результатов проектирования. За оценку результатов проектирования отвечает процедура принятия решений. В общем случае, цель отбора – выбор работоспособного, а в некотором смысле, наилучшего проектного варианта пластин НЖМД.

Если в процессе проектирования отбирается наилучшая, в каком-то смысле, структура пластин НЖМД, то говорят, что проводится структурная оптимизация. Выбор значений внутренних параметров, обеспечивающих экстремум некоторого критерия эффективности $F(X)$, называется параметрической оптимизацией, а $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – точка пространства допустимых значений внутренних параметров.

При разработке САПР всю совокупность процедур синтеза систем различного иерархического уровня можно объединить в подсистему синтеза, всю совокупность процедур анализа – в подсистему анализа, а вся совокупность процедур принятия решений – в подсистему принятия решений.

Подсистема синтеза

Типовой алгоритм синтеза пластин НЖМД приведен на рис. 16.2.3. Алгоритм является автоматизированным, другими словами, человеко-машинным. В его реализации участвуют разработчик и ЭВМ.

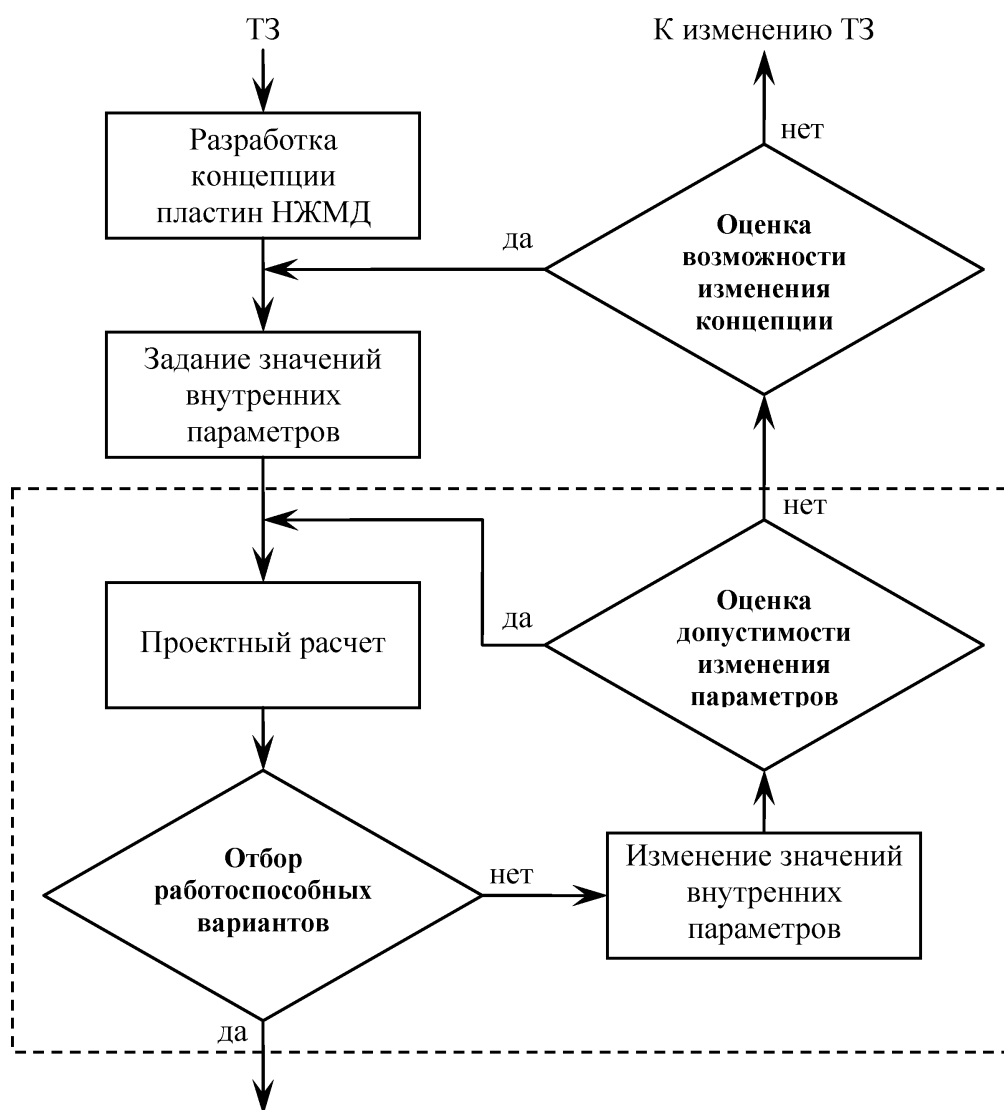


Рис. 16.2.3. Подсистема синтеза

На первом шаге алгоритма в соответствии с ТЗ разрабатывается концепция будущих пластин НЖМД, т.е. определяются их принципы построения и функционирования. Разработка концепции – эвристический процесс, который базируется на идеях, опыте, интуиции и изобретательности разработчика и выполняется им вручную. Результатом выполнения шага является структурная и функциональная схемы пластин НЖМД.

На втором шаге при выбранном варианте структуры задаются значениями внутренних параметров, входящих в систему. Поскольку элементы системы еще не разработаны и будут разрабатываться на следующем иерархическом уровне, значениями параметров следует задаться исходя из аналогов, опыта предшествующих разработок или интуиции разработчика. Этот шаг также выполняется разработчиком.

Если в результате выполнения концептуального шага функционирование пластин НЖМД удастся формализовать, т.е. описать математически (или алгоритмически) на основе физических, конструктивных, технологических закономерностей или логических связей между различными высказываниями, то дальнейшие шаги выполняются ЭВМ автоматически.

Для определения свойств синтезированных пластин НЖМД используется проектный расчет. Основу проектного расчета составляет одновариантный анализ, который выполняется с помощью адекватной, но упрощенной математической модели. Проектный расчет в процедуре синтеза используется многократно для оценки основных интересующих разработчика свойств пластин НЖМД. Чем точнее, а, следовательно, сложнее модель, тем больше по объему расчеты. Поэтому стремятся упростить модель, чтобы получить результаты проектирования за приемлемое время. С увеличением уровня абстрагирования увеличивается простота модели и упрощается алгоритм расчетов. В то же время модель не должна искажать действительность и адекватно описывать пластину НЖМД.

Если рассчитанные в ходе одновариантного анализа значения выходных параметров удовлетворяют требованиям ТЗ, то процедуру синтеза

пластин НЖМД можно считать завершенной и следует переходить к следующей проектной процедуре. Однако глобальной целью проектирования является получение наилучшего проектного варианта. С этой целью проводится параметрическая оптимизация, в ходе которой отыскиваются такие значения внутренних параметров, которые обеспечивают оптимум выбранного критерия эффективности. На каждом шаге параметрической оптимизации значения внутренних параметров изменяют таким образом, чтобы эти изменения улучшали критерий оптимизации. При этом проводится проверка допустимости произведенных изменений. Если изменения внутренних параметров не приводят к выходу за допустимые ограничения, налагаемые на эти параметры, то переходят к выполнению параметрического расчета, и так до тех пор, пока либо получают работоспособный оптимальный вариант, либо не будет установлено, что при заданном концептуальном варианте пластин НЖМД, не может быть получен ни один работоспособный вариант. В последнем случае проверяется возможность разработки новой концепции пластин НЖМД. При получении положительного результата вышеизложенная процедура синтеза повторяется. В противном случае убеждаются в получении нереализуемого ТЗ и изменяют его. После корректировки ТЗ процедура синтеза может быть повторена до получения работоспособного наилучшего проектного варианта. Вследствие неформулируемости задач концептуального шага, структурная оптимизация, как правило, не проводится. При этом под оптимизацией понимается параметрическая оптимизация. На рис. 16.2.3 в оптимизационный расчет включены блоки, выделенные пунктирной линией [7].

Подсистема анализа

Синтез пластин НЖМД носит итерационный характер. Проектный расчет при синтезе используется многократно в циклах оценки вариантов структуры пластин НЖМД и параметрической оптимизации. Количество

циклов синтеза может быть очень большим.

Цель проектного расчета в процедуре синтеза – определение основных характеристик пластин НЖМД, по которым идет оценка и сравнение вариантов.

Основой расчета является математическая модель, призванная отображать наиболее существенные для пластин НЖМД свойства, по которым происходит дискриминация вариантов. Основной особенностью модели является то, что она должна обеспечить компромисс между точностью описания и затратами на проведение анализа в процедуре синтеза.

Наконец, в проектном расчете используется одновариантный анализ, который не позволяет оценить надежность и серийнопригодность проектного варианта. Естественно, что точность и всесторонность анализа являются ограниченными, что влияет на достоверность результатов проектирования. При этом всегда существует вероятность отобрать не лучший, и даже неработоспособный вариант в качестве окончательного решения.

Для уменьшения степени риска при окончательном выборе проектных вариантов в подсистеме синтеза проводится детальная проработка отобранных вариантов. Анализ выполняется по развернутым методикам проектирования с использованием точных математических моделей. Для обозначения различия анализа, выполняемого в подсистеме анализа, будем называть его поверочным расчетом. Поверочный расчет проводится для ограниченного числа проектных вариантов, поэтому затраты на проведение анализа могут быть увеличены. Требования к точности и всесторонности очень высокие. Для расчетов используются полные и точные математические модели. Расчет включает проведение одновариантного и многовариантного анализов. В целом проектный расчет позволяет ответить на вопросы, какими будут значения основных или всех выходных параметров и какими ожидаются показатели надежности, серийнопригодности, стабильности и т.д.

Следует отметить, что проектный и поверочный расчеты, в основ-

ном, служат для оценки уже разработанных пластин НЖМД. Их цель – определить основные или все характеристики объекта с различной степенью достоверности и проверить, лежат ли их величины в допустимых пределах.

Цель оптимизационных расчетов – найти такие значения параметров элементов, которые приближают решение к функциональному оптимуму.

Процесс оптимизационных расчетов итеративен, выполняется путем возвратов и повторов с использованием проектного расчета, и служит параметрическому синтезу пластин НЖМД.

Подсистема принятия решений

Элементы принятия решений в проектировании играют роль звена обратной связи при выборе наилучшего, в некотором смысле, варианта решения. В подсистеме синтеза существует такой элемент. Он осуществляет выбор варианта, удовлетворяющего условиям работоспособности.

Целью подсистемы принятия решений по информации, получаемой в подсистеме анализа, отобрать наиболее эффективные варианты решений. При этом возникают следующие трудности.

Показатели эффективности при блочно-иерархичном подходе используются на верхних иерархических уровнях, когда рассматривают и решают задачи проектирования системы в целом или наиболее крупные ее подсистемы. Однако из-за отсутствия полной информации о проектируемых пластинах НЖМД (еще не разработаны системы нижних уровней проектирования) трудно принять решение о направлении поиска «эффективного варианта». Возникает дилемма: с одной стороны, прежде чем принять решение и действовать, следует лучше понять ситуацию, т.е. спуститься на возможно более низкий уровень иерархии, а с другой – не дожидаясь результатов проектирования на нижних уровнях, оценивать и отбирать лучшие решения на верхних уровнях. Решение дилеммы состоит в иерархическом подходе к принятию решений [7].

1. На верхнем иерархическом уровне проводится декомпозиция проблемы отбора эффективного варианта на совокупность соподчиненных подпроблем, решаемых последовательно.

2. Каждая подпроблема нижестоящего уровня считается полностью определенной и ее можно решать, если для нее определен вектор или схема решения, являющиеся решением проблемы вышестоящего уровня.

Структурная схема подсистемы принятия решений представлена на рис. 16.2.4.

В соответствии с предложенным подходом, проблему отбора наиболее эффективного проектного варианта можно разбить на совокупность подпроблем D_i , $i = \overline{1, n}$ (где n – число иерархических уровней проектирования), решаемых последовательно. Вектор $\bar{z}_i$ является результатом решения подпроблемы D_{i-1} вышестоящего $(i-1)$ иерархического уровня, ко-

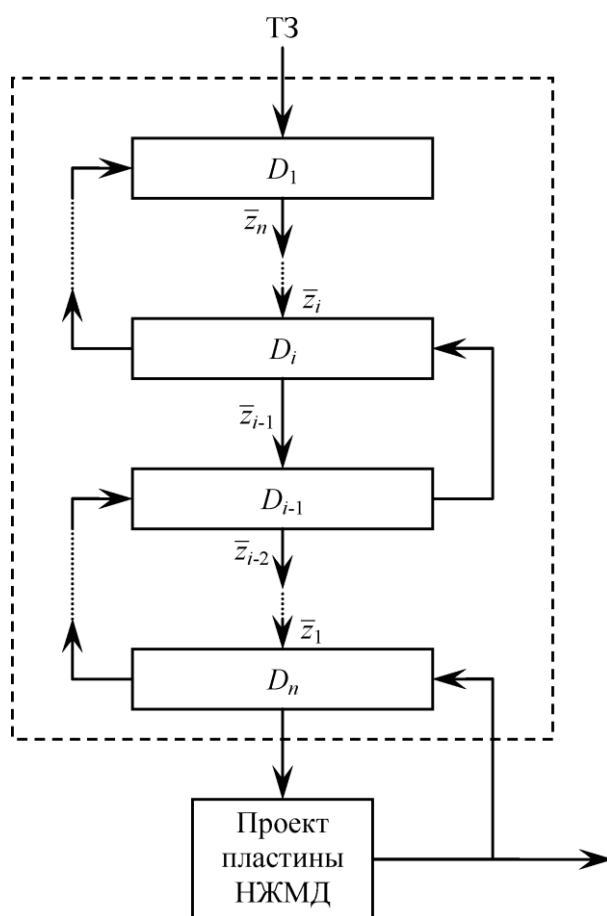


Рис. 16.2.4. Подсистема принятия решений

торый делает подпроблему D_i определенной, и ее можно решать. С этой целью в вектор $\bar{z}_i$ включено ТЗ на разработку систем i -го иерархического уровня. Техническое задание, которое делает проблему проектирования систем i -го уровня решаемой, является результатом проектирования систем вышестоящего уровня.

Исходными данными на проектирование служит вектор $\bar{z}_i$, содержащий технические требования TT_i на выходные параметры Y_i систем этого уровня. Цель проектирования, выбор таких значений внутренних параметров x_i и структуры системы, которые обеспечивают оптимум критерия эффективности $F_i(X)$ функционирования системы i -го иерархического уровня, во всем диапазоне изменения внешних параметров Q_i .

16.3. Процедурная модель проектирования пластин накопителей на жестких магнитных дисках

Логическая схема проектирования представлена процедурной моделью. Она реализует системный подход к этому процессу и является результатом обобщения целого ряда работ [10-16]. Модель дает наглядное представление об основных процедурах и операциях проектирования, задачах и методах их решения, указывает на источники информации. Модель (рис. 16.3.1) согласуется со стадиями разработки согласно ЕСКД, а выпуск тех или иных видов технической документация представлен как результат соответствующих проектных процедур.

Проектирование пластин НЖМД начинается с определения потребности в создании нового изделия. Потребность в нем диктуется состоянием общественного производства и стремлением к повышению производительности. В таком сложном техническом объекте как пластина НЖМД сложно

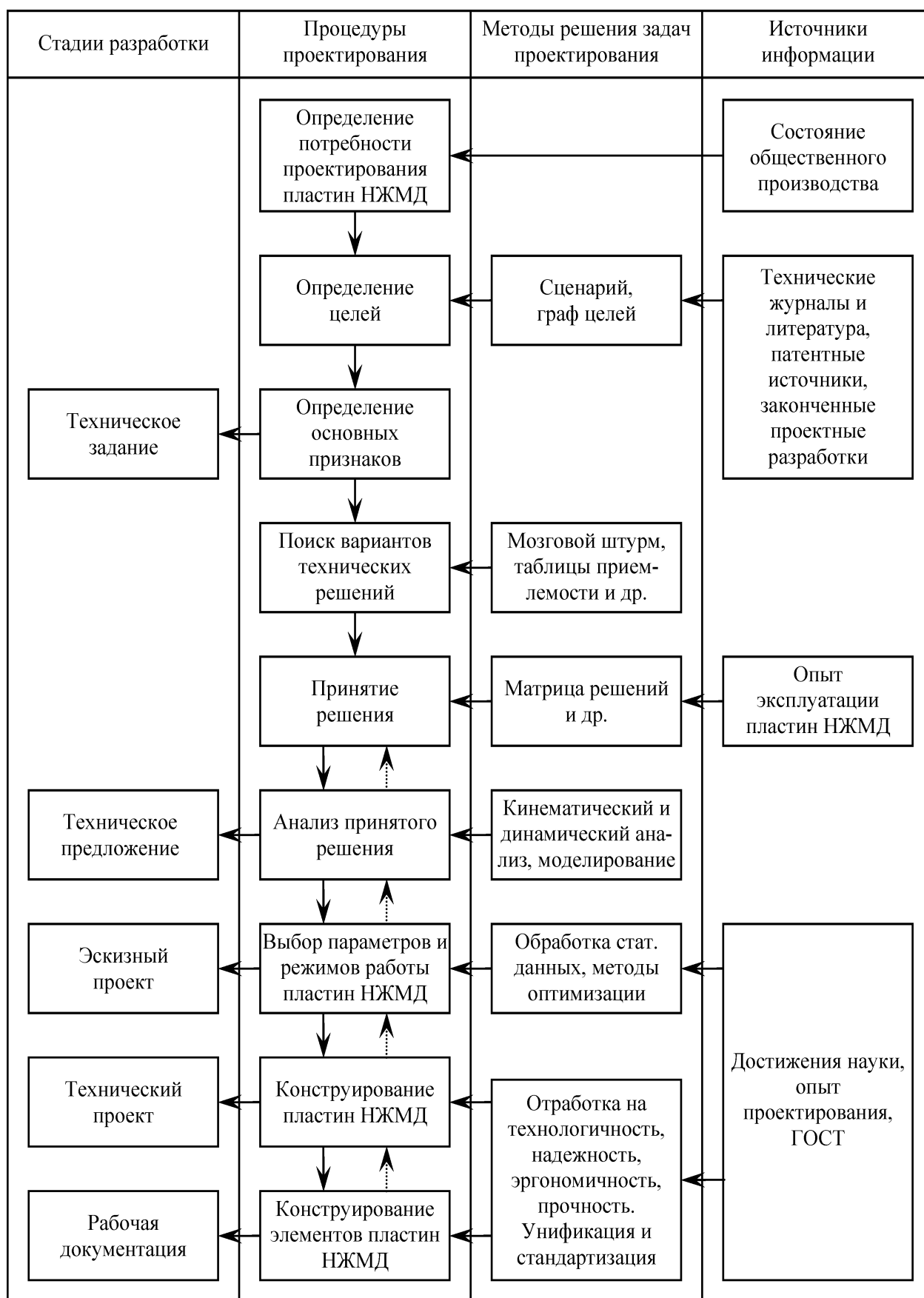


Рис. 16.3.1. Процедурная модель проектирования пластин НЖМД

найти решение, лучшим образом удовлетворяющее возникшим потребностям. В этом случае прибегают к развернутому во времени сложному информационному процессу, т.е. проектированию.

Поиск может быть тогда удачным, когда имеется ясное представление о его цели. Определение целей проектирования – весьма ответственная процедура. Во многих случаях результат разработки новых пластин НЖМД оказывается неудовлетворительным из-за неправильной или неточной формулировки целей.

Основная задача процедуры выбора целей – распознать в общих чертах пластины плотной записи информации для НЖМД и их окружение. Какой-либо четкой методики решения ее нет. Определенным образом организует решение задачи составление сценария и построение графа целей. Источником информации для выполнения процедуры являются прогнозы развития самих пластин НЖМД и их окружения. Весьма удобный аппарат для анализа и синтеза информации представляет инженерное прогнозирование. Оно способно ответить на следующие вопросы: какие инженерные направления займут лидирующее положение в технике, каковы возможные пропорции внедрения в практику конкурирующих направлений, какова вероятность использования в будущем тех или иных направлений, какова предполагаемая эффективность реализации технических направлений и, кроме того, когда можно ожидать внедрения в производство отдельных технических и технологических решений и целых направлений.

Прогнозирование сейчас, в эпоху бурного развития науки и техники, становится особенно важным. Конструктор должен помнить, что на проектирование и внедрение в производство его разработки уйдет не менее 3 – 5 лет (речь идет о серийном изготовлении). За этот срок могут произойти существенные изменения в науке и технике, может оказаться, что выбранное направление перестанет отвечать научно-техническому прогрессу и созданный НЖМД с первых дней своей жизни может оказаться морально устаревшим. Чтобы этого избежать, нужно предвидеть развитие тех или иных технических

направлений. На стадии определения целей уже может возникнуть то или иное решение, однако чаще всего это решение далеко не единственное.

После выбора целей проектирования можно приступать к процедуре определения основных признаков пластин НЖМД. Согласно основной концепции методологии, она состоит в построении среза бинарных отношений между элементами множества целей и множества признаков по выбранному подмножеству целей. Подмножество целей и подмножество признаков включаются в ТЗ.

Процедура поиска возможных решений пластин НЖМД напоминает формирование оперативных моделей в сознании человека. Она в наибольшей степени опирается на творческие начала и выполняется чаще неформальными методами, однако сейчас имеются попытки разрабатывать варианты технического решения с помощью ЭВМ. Основные источники информации – это техническая литература, журналы, патенты и т.д.

На следующем этапе проектирования пластин НЖМД выполняется процедура принятия решения. Из множества вариантов необходимо выбрать оптимальный по показателю или показателям, устанавливающим соответствие технического решения ранее определенным целям. Принятие решения уже сейчас формализовано в значительно большей степени, чем предыдущие процедуры, хотя и содержит ряд задач, решаемых эвристическим методом. Для сравнения вариантов, не содержащих параметрическую информацию, можно применять матрицу решений [15] и генеральную определительную таблицу [17]. На окончательном этапе принятия решения используется экономический расчет.

Основным источником информации для сравнения вариантов служит опыт использования существующих пластин НЖМД. Весьма полезную информацию для выполнения процедуры несет развивающаяся теория принятия решений.

Отобрав из всех возможных вариантов пластин НЖМД один, конструктор должен тщательно проверить его на работоспособность и возмож-

ность технического воплощения. Эта процедура может быть названа анализом принятого решения. Методами решения задач на данном этапе проектирования выступают: моделирование, кинематический и динамический анализ. Может оказаться, что выбранный вариант не удовлетворяет условиям работоспособности или не сможет найти в современных условиях технического воплощения. В таком случае нужно вновь вернуться к этапу принятия решения, отобрать другой вариант и произвести его анализ. На схеме процедурной модели (см. рис. 16.3.1) это отражено штриховой стрелкой. Окончательным оформлением принятого решения является техническое предложение.

Любое, даже самое передовое техническое решение, окажется бесплодным, если не получит удачного технического воплощения. Прогресс в области хранения информации направлен на повышение плотности записи, поэтому каждый новый вид пластин НЖМД отличается, как правило, большей емкостью хранения информации, но не всякий новый НЖМД на их основе оказывается более надежным или экономичным (вызывается это неудачным конструированием, неправильным выбором параметров). Современная пластина НЖМД выступает как единый комплекс, отдельные элементы которого при их формировании находятся во взаимодействии. Стремление к полному устранению вредного воздействия на все элементы может привести к существенному удорожанию пластин НЖМД. Удачная конструкция представляет собой оптимальное сочетание параметров всех его элементов. Выбор параметров можно отнести к классу задач, которые носят название экстремальных. Тот или иной критерий качества, улучшение которого составляет цель проектирования, представляется в виде функции, подлежащей максимизации или минимизации. Аргументами ее служат параметры машины, допустимые значения которых ограничены некоторой областью. Решить поставленную задачу, значит найти такие значения аргументов из заданной области, при которых целевая функция получает экстремальное значение. По результатам процедуры выбора па-

раметров может быть составлен эскизный проект. Он представляет собой совокупность конструкторских документов, дающих представление в общих чертах о принципе устройства пластин НЖМД.

Получив данные о принципе устройства и параметрах НЖМД, приступают к его конструированию. Успешное выполнение этого этапа зависит как от опыта конструктора, так и от его умения использовать знания, достигнутые целым рядом наук:

- «Материаловедение», на основе которой производится многокритериальный выбор материалов слоев пластин НЖМД в системе;

- «Детали машин», на основе которой производятся прочностные расчеты подложки и пластин в целом;

- «Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения», определяющая требования к характеру и точности типовых соединений на основе эксплуатационного назначения, методы расчетно-опытного обоснования прочности, физико-технические и экономические предпосылки систем допусков и посадок, построение и применение этих систем в комплексе с техническими измерениями, метрологические обоснования качества продукции;

- «Надежность машин», дающая возможность оценить такие свойства проектируемых НЖМД, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость;

- «Квалиметрия», определяющая теоретические основы количественной оценки качества продукции;

- «Эргономика», характеризующая систему «человек-машина-среда» с учетом антропометрических, гигиенических, физиологических и психофизических свойств человека;

- «Техническая эстетика», формирующая методы достижения выразительности, оригинальности, гармоничности и целостности форм НЖМД;

- «Охрана труда», определяющая систему мероприятий по

обеспечению безопасных для жизни и здоровья условий труда обслуживающего персонала.

Завершенная проектная разработка пластин НЖМД оформляется в виде технического проекта и рабочей документации, состав и содержание которых предусмотрены ЕСКД. При выполнении всех этих работ необходимо контролировать результативность исполнения принятого решения. В отличие от физической работы, когда человек имеет непосредственный контакт с предметом труда, при проектировании пластин НЖМД конструктор соприкасается лишь с описанием. В процессе своей работы он может допускать ошибки, смысл которых нередко оказывается скрытым до окончания технического воплощения проектируемых пластин НЖМД при его испытании, а иногда и значительно позже анализа моделей и чертежей. Чем более широк этот анализ, т.е. чем больше ситуаций может «пережить» конструктор и устранить обнаруженные ошибки, тем в большей степени можно рассчитывать на успех при эксплуатации проектируемых пластин НЖМД. Сегодня в целях контроля результативности исполнения принятого решения активно используют сложные модели, соответствующие текущему прогрессу развития ЭВМ.

16.4. Моделирование в автоматизированных системах проектирования пластин накопителей на жестких магнитных дисках

Функциональное моделирование

Управление проектом должно обеспечить координацию работы авторов-конструкторов, экспертов и должностных лиц, принимающих окончательную версию модели пластин НЖМД. Создание функциональной IDEF0-модели пластин НЖМД является процессом скоординированной коллективной работы, при которой авторы на основе собранной информации

о моделируемой системе создают первоначальные диаграммы и передают их экспертам для рассмотрения и формулирования замечаний. Каждый эксперт, у которого есть замечания к диаграммам, передает их в письменном виде соответствующим авторам для отработки. Этот цикл продолжается до принятия диаграммы и утверждения модели пластин НЖМД.

На рис. 16.4.1 представлена диаграмма процесса моделирования пластин НЖМД.

Диаграмма отражает тот факт, что моделирование пластин НЖМД является итеративной последовательностью шагов, приводящих к точному описанию системы.

Качество результатов моделирования пластин НЖМД определяется приемлемостью созданных моделей для экспертов и специалистов в предметной области (пользователей), для которой строится модель.

Приемлемость созданной модели пластин НЖМД достигается путем:

- систематического рецензирования экспертами развивающейся модели пластин НЖМД, что обеспечивает необходимый уровень соответствия модели конкретной моделируемой среде (если модель отражает состояние «КАК ЕСТЬ») или предполагаемой (состояние «КАК ДОЛЖНО БЫТЬ») в том понимании, которое соответствует мнению экспертов;

- периодического рецензирования диаграмм, элементов модели пластин НЖМД и модели в целом на техническом совете экспертов и специалистов, что обеспечивает корпоративное согласие относительно соответствия модели. Решение технического совета, оформленное в виде протокола, определяет действия автора по дальнейшему уточняющему моделированию или его завершению.

Если в процессе моделирования пластин НЖМД выявляется несогласованность деятельности различных подразделений или их оценок, то такая несогласованность должна быть преодолена руководством предприятия, чтобы получить модель представляющую предприятие или какую-то часть его деятельности адекватно и с максимальным уровнем согласия.



Рис. 16.4.1. Итеративная последовательность шагов в процессе моделирования пластин НЖМД

Записи обо всех решениях и альтернативных подходах по мере того, как они возникают должны сохраняться на протяжении всего проекта.

Копии диаграмм, разработанных автором, критически анализируются компетентными экспертами, которые заносят свои конструктивные замечания и предложения непосредственно на копии диаграмм. Авторы отвечают на каждое замечание письменно на тех же копиях.

Предложения принимаются или отвергаются письменно с указанием причин. После внесения изменений и исправлений старые варианты диаграмм остаются в архиве проекта.

Диаграммы должны обеспечивать полноту и однозначность их прочтения пользователями, для которых они разработаны. В процессе чтения диаграмм не должны делаться выводы, выходящие за пределы действия и утвержденного статуса модели.

Состав участников проекта и структура их взаимодействия

При проектировании пластин НЖМД, в коллективе, занимающемся моделированием, должны быть выделены следующие роли участников проекта:

- руководитель проекта;
- авторы (разработчики) модели;
- технический совет;
- эксперты;
- библиотекарь.

Дополнительный специфический участник проекта – «Источники информации».

Организационная структура участников проекта приведена на рис. 16.4.2.

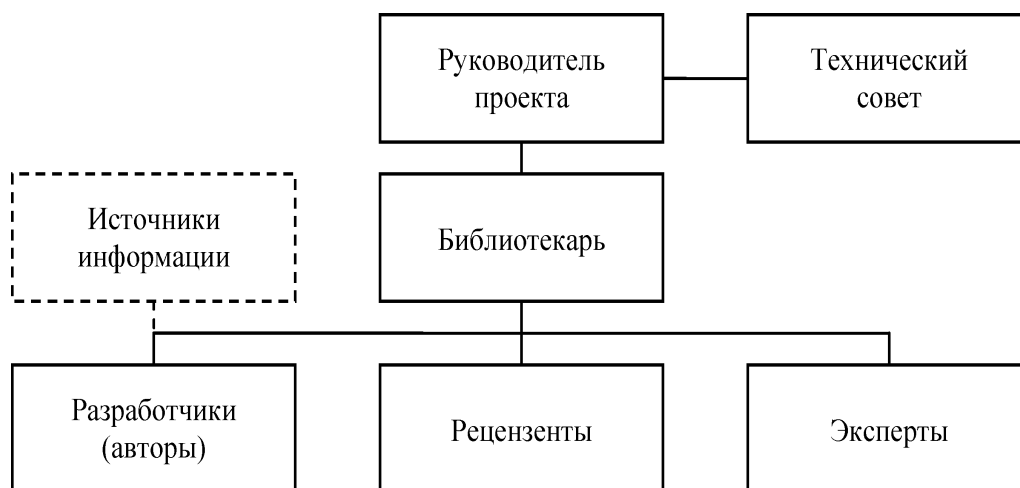


Рис. 16.4.2. Организационная структура участников проекта

Технический совет может создаваться при проведении работ с привлечением сторонних организаций для обеспечения взаимодействия всех участников проекта, работающих как в составе проектирующей организации, так и вне нее.

Выполняемая функция (роль участника проекта) не зависит от должности. Один и тот же человек может выполнять несколько функций. Однако роль каждого участника проекта индивидуальна, должна быть документально определена и зависит от рассматриваемой части проекта.

Принципы коллективной работы в IDEF-методологии гарантируют, что окончательная версия IDEF0-модели будет верной, так как в модель вносятся изменения с учетом корректив и принятых замечаний по результатам рецензирования частей модели, оформленной в виде папки.

Требуемая детализация достигается построением необходимого количества диаграмм. По новым элементам модели пластин НЖМД делаются новые замечания, вносятся новые изменения. Окончательная модель пластин НЖМД соответствует представлениям автора и экспертов о системе, смоделированной с данной точки зрения и для данной цели.

Руководитель проекта и разработчики (авторы) модели пластин НЖМД должны быть главными исполнителями. Хотя конечной целью раз-

работчика является получение одобрения модели техническим советом, разработчик предоставляет промежуточные результаты руководителю проекта, а не совету. Таким образом, обеспечивается согласованность различных интересов коллектива разработчиков, технического совета и руководителя проекта.

Руководитель проекта осуществляет общее руководство, а различные технические обсуждения с принятием соответствующих решений проводят квалифицированные участники проекта.

Каждый блок диаграммы соответствует этапу работы:

1. Управление проектом, которое состоит из следующих операций:

—Анализ уровня экономического развития предприятия, конкретных целей участников отношений «Поставщик-Предприятие-Заказчик». В соответствии с результатами анализа определяется перечень процессов, подлежащий описанию.

—Разработка программы и плана работ, которые должны учитывать объем, степень отрыва от основного производства участников проекта (членов рабочей группы проекта), их загрузку и итеративный характер процессов разработки функциональной модели. Для придания этим работам достаточно высокого статуса необходимо утверждение руководством предприятия.

—Анализ хода работ по проекту и выработка предупреждающих и корректирующих воздействий.

2. Проведение подготовительных работ, к которым относятся:

- создание рабочей группы,
- обучение рабочей группы,
- разработка стандарта предприятия по моделированию процессов и соглашения по ведению работ,
- издание приказа о наделении полномочиями членов рабочей группы,
- приобретение программных средств моделирования.

Рабочая группа создается из работников предприятия и специалистов консалтинговых фирм. Специалисты консалтинговых фирм являются носителями методологии моделирования пластин НЖМД и должны иметь соответствующую квалификацию и опыт работы в подобных проектах. Руководителем рабочей группы назначается лицо из числа руководителей предприятия. Работники предприятия, привлекаемые в рабочую группу, по уровню подготовки могут быть специалистами самого разного профиля. Основное требование к ним – способность к анализу и владение основами работы с компьютером. Включать в рабочую группу специалистов предприятия обязательно, так как:

- работники предприятия должны приобрести навыки использования технологии, применяемой при проведении проектных работ для последующего сопровождения проекта;

- работники предприятия – члены рабочей группы должны иметь доступ к сведениям конфиденциального характера (коммерческая тайна, служебная тайна). Для специалистов внешних организаций такой доступ ограничен.

Члены рабочей группы из числа работников предприятия должны пройти специализированное обучение методам функционального моделирования и овладеть навыками работы с программными средствами моделирования. Обучение должно осуществляться либо на предприятии силами консалтинговой фирмы, ведущей проект, либо в специализированных учебных центрах. Обучение на базе предприятия предпочтительнее, т.к. есть возможность заранее адаптировать курс обучения к нуждам предприятия.

После завершения обучения и проведения аттестации разрабатывают стандарт предприятия по функциональному моделированию процессов и соглашение по ведению проекта.

Для успешного выполнения проекта участники рабочей группы должны быть наделены полномочиями для получения информации, а со-

трудники предприятия должны предоставлять участникам рабочей группы всю информацию в пределах своей компетенции.

Для работы должны быть приобретены и установлены на рабочие места лицензионные программные средства, обеспечивающие процесс моделирования, анализа и подготовки документов.

3. Описание процессов в форме функциональных моделей.

При определении перечня процессов, подлежащих описанию и анализу, необходимо ответить на вопрос: определены ли все процессы предприятия, влияющие на качество пластин НЖМД, в том числе те процессы, недостатки в которых могут стать очевидными только после того, как пластины НЖМД находятся в использовании. После получения утвердительного ответа можно приступать непосредственно к моделированию пластин НЖМД.

Для описания процессов предприятия используется функциональная модель деятельности предприятия, построенная на основе жизненного цикла.

Работы по описанию процессов состоят из следующих операций:

- разработка функциональной модели процессов «КАК ЕСТЬ» на основе типовой модели деятельности предприятия, нормативной, справочной документации, знаний и опыта специалистов;
- проведение анализа процессов, в том числе с точки зрения требований ГОСТ и ИСО 9001;
- на основе анализа строят функциональную модель процессов «КАК ДОЛЖНО БЫТЬ».

Порядок выполнения работ по созданию функциональной модели процессов «КАК ДОЛЖНО БЫТЬ» представлен в виде IDEF0-диаграммы на рис. 16.4.3.

4. Описание процессов предприятия в форме функциональной модели IDEF0.

В качестве средства разработки функциональной модели используется типовая модель деятельности предприятия. Рабочая группа адаптирует модель под конкретные виды деятельности предприятия, удаляя, добавляя

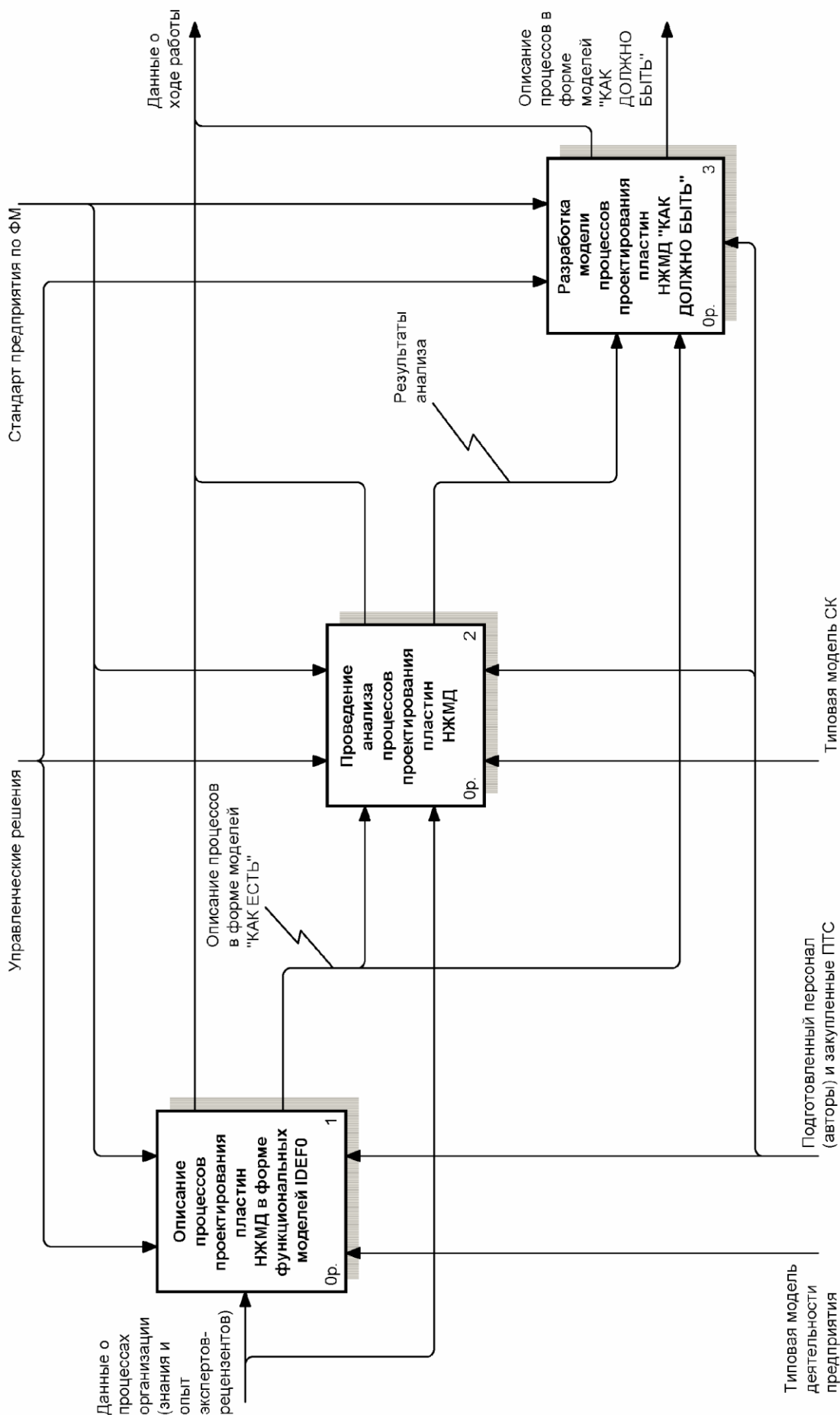


Рис. 16.4.3. Порядок выполнения работ по созданию функциональной модели процессов «КАК ДОЛЖНО БЫТЬ»

или развивая элементы типовой модели. Далее создаются функциональные модели процессов, а в дальнейшем – функциональные модели операций и действий в соответствии с разработанным стандартом предприятия по функциональному моделированию. Исходными данными для этой работы должна быть информация, получаемая из нормативных документов, описывающих процессы и операции предприятия, а также информация, получаемая от специалистов предметной области.

Глубина описания процессов определяется только целью моделирования. Разработанная функциональная модель должна включать:

- описание процессов, необходимых для обеспечения уверенности в соответствии пластин НЖМД установленным требованиям, а также их взаимодействие;
- описание операций в процессах производственной деятельности и их взаимодействие.

При разработке функциональных моделей необходимо учитывать особенности применяемых программных средств моделирования для дальнейшего использования в интересах разработки документации по процессам: либо в глоссариях блоков (для программных продуктов типа Workflow Modeler ver. 4.0 и выше, BPWin 2000 и им подобным) необходимо создавать дополнительные пользовательские поля описания: «Подразделение», «Кто контролирует», «Нормативный документ», «Данные о качестве» [18].

Математическое моделирование

Моделирование при проектировании таких сложных систем как пластины НЖМД – многоуровневый процесс. Он характеризуется последовательными этапами, предусмотренными процедурной моделью, на каждом из которых проектируемая система получает описание на языке признаков, образующих некоторое пространство. На каждом этапе область признако-

вого пространства сужается за счет конкретизации описания структуры элементов пластин НЖМД и их параметров. В этой связи описание пластин НЖМД, как объекта проектирования, можно назвать стратифицированным [19], развивающимся от сжатого на этапах верхнего уровня процедурной модели, до развернутого на нижних. Очевидно, что описание пластин НЖМД при использовании ЭВМ должно носить характер математических моделей. Для любой ситуации принятия решений [20] модели представляют собой множество соотношений, связывающих управляющие воздействия (переменные, значения которых выбираются лицом, принимающим решение) и параметры рассматриваемой задачи с выходными переменными (переменные, зависящие от выбора управляющих воздействий).

В содержательном смысле описание пластин НЖМД в форме математической модели должно включать следующие компоненты и правила [19]:

- 1) A – цель функционирования;
- 2) $E\{e_i\}$ – множество элементов пластин НЖМД, составляющих систему;
- 3) $T\{t_\tau\}$ – множество элементов времени;
- 4) $P_i\{p_i^j\}$ – множество признаков, характеризующих систему в целом на всех этапах жизненного цикла;
- 5) $P_\zeta\{p_\zeta^j\}$ – множество признаков, характеризующих элементы пластин НЖМД на всех этапах жизненного цикла;
- 6) $S^\tau\{s_i^\tau\}$ – множество состояний элементов пластин НЖМД в рассматриваемый промежуток времени;
- 7) $H = S^\tau \times T$ – правило упорядочения смены состояний;
- 8) $Q\{e_i, e_k\}$ – множество связей между всеми элементами системы;
- 9) $F : \{p_\zeta^j = f_i(p_i^j)\}$ – математические схемы, описывающие отношения между признаками элементов и признаками систем;

- 10) $P_c\{p_c\}$ – множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой.

Система будет определена, если определены все перечисленные множества и правила 7 и 9. Множество целей, признаков и элементов пластин НЖМД лучше всего представлять в виде графов. Множество состояний включает определенный набор значений признаков системы, подсистемы или элементов пластин НЖМД в момент времени t_τ процесса формирования.

Элемент e_i пластин НЖМД или вся система за рассматриваемое время t_0, t_k в процессе формирования переходит из одного состояния в другое определенное число раз. Единственный переход составляет элементарную операцию

$$Q_m = s_i^\tau \succ s_i^{\tau+1}, \quad (16.4.1)$$

где s_i^τ – состояние; Q_m – элементарная операция; $\succ$ – знак отношения порядка.

Считается, что операция определена, если для нее указаны: начальное состояние s^i , конечное состояние s^e , порядок смены состояний системы, который может быть описан дифференциальным уравнением, конечными автоматами, вероятностными автоматами, цепями Маркова, булевыми функциями, функциями предикат.

Взаимодействие элементов пластин НЖМД определяется связями, которые соединяют элементы и признаки в целое. Предполагается, что связи существуют между всеми элементами пластин НЖМД. В первую очередь рассматриваются те связи, которые по заданным правилам определяют процесс взаимодействия между элементами для достижения общей цели. Множество связей между элементами пластин НЖМД, существующих при выполнении конкретных операций, составляет структуру системы в данной операции. Воспользуемся аксиомами, приведенными в работе [19].

Аксиома 1. Взаимодействие между элементами или подсистемами происходит по отдельным признакам. Конкретная связь может быть осуществлена только по одноименным признакам.

Аксиома 2. Между средствами (системами, подсистемами, элементами) $\sum n$ и $\sum k$ существует связь, если они характеризуются хотя бы одним одинаковым признаком и если признаки имеют одинаковое значение (если изменение признака одного элемента приводит к изменению признака другого).

Таким образом, аналитически связь между средствами $\sum n$ и $\sum k$ по признаку может быть определена в виде:

$$g_i^{nk} = \begin{cases} 1, & \text{если связь существует;} \\ 0, & \text{в противном случае, либо с учетом знака } (-1, 0, +1). \end{cases} \quad (16.4.2)$$

Процесс проектирования пластин НЖМД как переход от одного описания объекта к другому может быть выражен как

$$O_0 = \tilde{O}П_1 \Rightarrow \tilde{O}П_2 \Rightarrow \dots \Rightarrow \tilde{O}П_l, \quad (16.4.3)$$

где O_0 – означает процесс проектирования; $\tilde{O}П_1, \tilde{O}П_2, \dots, \tilde{O}П_l$ – описание пластин НЖМД на разных этапах его разработки.

Описание пластин НЖМД, определяющее достигаемые с его созданием и использованием цели, называется целевым:

$$\tilde{O}П_1 = A_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}. \quad (16.4.4)$$

Описание пластин НЖМД, дающее представление об идее его технического решения, называется концептуальным. Математические модели процесса формирования пластин НЖМД при таком описании включают множество целей и множество признаков, характеризующих объект в целом на всех этапах его жизненного цикла:

$$\tilde{\text{ОП}}_2 = \{A_0, P_i\}. \quad (16.4.5)$$

Описание, дающее представление о функционировании пластин НЖМД, называется функциональным. Математические модели, относящиеся к этому описанию, содержат множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой P_c , и правило упорядочения смены состояний H :

$$\tilde{\text{ОП}}_3 = \{P_c, H\}. \quad (16.4.6)$$

Математические модели процесса формирования пластин НЖМД, относящиеся к структурному описанию системы, должны включать следующие множества: элементов, составляющих систему E ; признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла P_ζ ; связей между всеми элементами системы Q , т.е.

$$\tilde{\text{ОП}}_4 = \{E, P_\zeta, Q\}. \quad (16.4.7)$$

Динамическое описание пластин НЖМД включает математические модели, построенные на множестве признаков, определяющих взаимодействие системы со средой P_c , множестве элементов времени T и математических схемах, описывающих отношения между признаками элементов и признаками системы:

$$\tilde{\text{ОП}}_5 = \{P_c, T, F : (p_\zeta^j = f_m(p_i^j))\}. \quad (16.4.8)$$

Описание, определяющее параметры пластин НЖМД, называется параметрическим. В его состав входит множество параметров

$$\tilde{\text{ОП}}_6 = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}. \quad (16.3.9)$$

В автоматизированном проектировании пластин НЖМД специфика выполняемых процедур проявляется, прежде всего, в математических мо-

делях. Различают три уровня математических моделей: микро-, макро- и метауровень [21].

На микроуровне фазовые переменные распределены в пространстве (распределенные модели). Модель чаще всего представляется дифференциальными уравнениями в частных производных.

На макроуровне процесс формирования пластин НЖМД представляется в виде дискретных моделей, элементами которых выступают элементы, рассматриваемые на микроуровне как системы. Фазовые переменные на макроуровне – это скорости нанесения слоев, потоки веществ формирования слоев, давления, диффузионные потоки между слоями и т.д., а сами модели выражаются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

На метауровне процесс формирования пластин НЖМД рассматривается как сложная система, взаимодействующая с факторами окружения. Для построения математической модели в данном случае используются: теории автоматического управления и массового обслуживания, методы планирования эксперимента, математическая логика, теория множеств.

На любом уровне к моделям процесса формирования пластин НЖМД предъявляются требования точности, экономичности и универсальности. Под точностью понимают степень совпадения предсказанных на основе моделей значений параметров, с их истинными значениями. Проверить модель на точность возможно по тестовым ситуациям. Экономичность математической модели связана с затратами на ее использование. В САПР эти затраты связаны, в частности, со сложностью необходимой ЭВМ, машинным временем и необходимыми программными продуктами. Универсальность математической модели предполагает ее использование для целого класса объектов. По характеру отображаемых свойств пластин НЖМД модели делятся на структурные и функциональные, которые в неявном виде иногда отражают и структуру, позволяя анализировать выходные переменные в зависимости от структуры.

Наглядное представление о структуре пластин НЖМД и взаимосвязи

его элементов дает изображение в виде орграфа, на котором вершины обозначают элементы, а дуги – их взаимосвязи, характеризуемые фазовыми переменными (рис. 16.4.4). Контуром $A_{(s)}$ выделена некоторая пластина НЖМД, состоящая из подсистем $B_{i(s)}$, $i = \overline{1, 3}$ и элементов c_{ij} , $i = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, N_i}$ (N_i – число элементов в подсистеме i). Дуги w_i , $i = \overline{1, 4}$ означают независимые переменные, из них w_1 , w_2 , w_3 отображают входные переменные, а w_4 – входную переменную; дуги u_i , $i = \overline{1, 4}$ представляют переменные, характеризующие внешнее состояние подсистем или внутреннее состояние системы, а дуги v_i , $i = \overline{1, 9}$ – внутреннее состояние подсистем или внешнее состояние элементов пластин НЖМД.

Статически модель процесса формирования пластин НЖМД может быть выражена

$$\mathbf{W}_{\text{вых}} = \mathbf{F}_1(\mathbf{W}_{\text{вх}}, \mathbf{U}_{\text{вн}}), \quad (16.4.10)$$

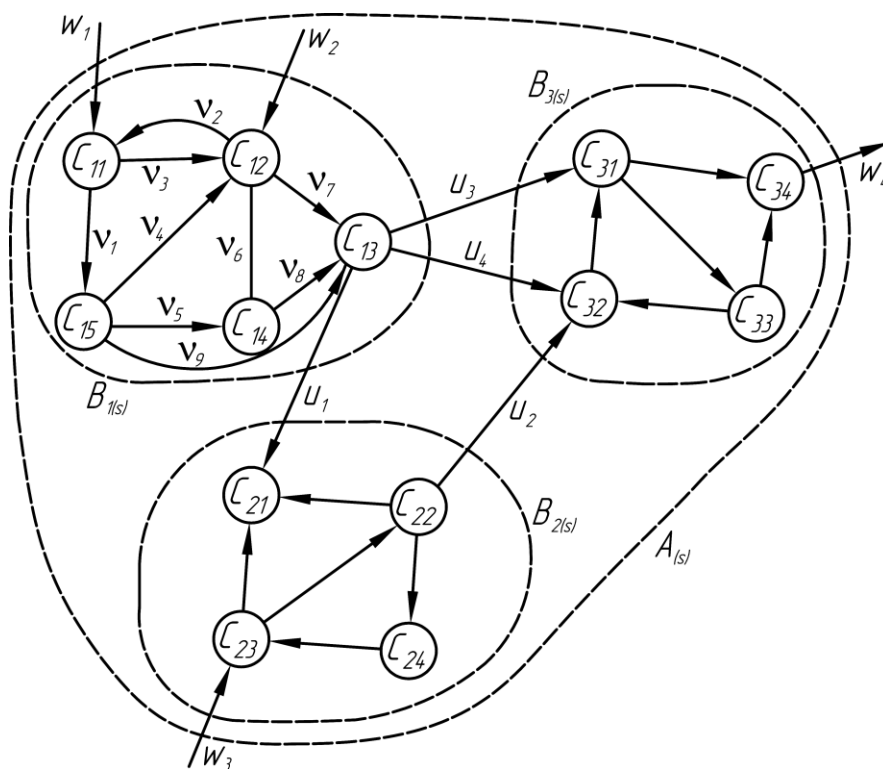


Рис. 16.4.4. Структурная схема объекта проектирования

где $\mathbf{W}_{\text{вых}}$ – вектор выходных переменных; $\mathbf{W}_{\text{вх}}$ – вектор входных переменных; $\mathbf{U}_{\text{вн}}$ – вектор внутренних переменных системы.

$$\text{Или} \quad \mathbf{F}_2(\mathbf{W}_{\text{вх}}, \mathbf{W}_{\text{вых}}, \mathbf{U}_{\text{вн}}) = 0. \quad (16.4.11)$$

Динамическая модель процесса формирования пластин НЖМД включает производные векторов переменных, т.е.

$$\mathbf{F}_3(\mathbf{W}, \dot{\mathbf{W}}, \mathbf{U}_{\text{вн}}, \dot{\mathbf{U}}_{\text{вн}}) = 0. \quad (16.4.12)$$

Если под полной моделью понимать общую дискретную модель процесса формирования пластин НЖМД, полученную объединением моделей его элементов, то математическая модель, аппроксимирующая полную модель при исключении внутренних переменных, составляет макро-модель объекта. Модель, в которой одни блоки отображаются полной моделью, а другие – макромоделью, называется многоуровневой. Если же в ней используются уравнения разного типа, то ее называют смешанной.

По характеру переменных различают фазовые и факторные модели. Первые из них используют фазовые переменные. Если же, кроме того, фазовые переменные рассматриваются в функции времени, то фазовые модели получают название имитационных. Факторные модели оперируют с векторами параметров. Если искомые переменные в модели явно выражены через известные величины, то она носит название аналитической; если же для выражения значений искомых переменных необходимо решать систему уравнений, то модель называют алгоритмической.

Математическая модель процесса формирования пластин НЖМД может быть представлена как математическими соотношениями, так и графически в виде графов или эквивалентных схем.

Можно выделить два метода построения модели процесса формирования пластин НЖМД. Первый из них представляет собой получение полной математической модели процесса формирования пластин НЖМД из заданных математических моделей его элементов. Этот метод инвариан-

тен, а создаваемые с помощью него модели обладают большой универсальностью и имеют междисциплинарную основу, включающую наиболее общие закономерности, что не всегда удобно.

Второй метод предназначен для построения моделей элементов и всего процесса формирования пластин НЖМД, он предполагает использование неформальных (эвристических) приемов для выбора вида математических соотношений. В этом случае возможны два подхода – теоретический и экспериментальный. Первый основан на использовании физических закономерностей, характеризующих процессы, связанные с процессом формирования пластин НЖМД. При построении модели вводят ряд допущений с учетом особенностей проектируемых пластин НЖМД и требуемой точности отображения зависимостей. Математические соотношения чаще всего представляются системами уравнений. Экспериментальный подход связан с проведением натурных испытаний на самих пластинах НЖМД или на их физических моделях. Сюда же можно отнести и вычислительный эксперимент на полных математических моделях. По экспериментальным данным методами аппроксимации, усреднения или статистической обработки строят макро модель процесса формирования пластин НЖМД [21].

16.5. Особенности автоматизированного проектирования накопителей на жестких магнитных дисках

Процесс проектирования пластин НЖМД имеет ряд характерных особенностей [22]:

1. Процесс имеет итерационный характер.
2. Решения принимаются на отдельных этапах в условиях неполной или недостаточной информации, которая в этих случаях поступает или из внешней среды, или вырабатывается проектировщиком в процессе творческой деятельности.

3. В процессе проектирования сочетаются процедуры алгоритмического и эвристического характера.

4. В проектной деятельности используются различные ресурсы, среди которых одним из наиболее важных являются знания проектировщика.

5. Цель проектирования устанавливается вне процесса проектирования и остается неизменной в течение этого процесса.

6. Процесс проектирования производит информацию, которая может быть использована в производстве.

Система поддержки принятия рациональных решений при проектировании пластин НЖМД играет роль мощного средства, эффективное применение которого невозможно без разработки комплекса методических указаний и инструкций, регламентирующих последовательность этапов и используемых на каждом этапе. Поскольку на каждом этапе автоматизированного проектирования пластин НЖМД осуществляются различные операции с материальными и нематериальными (информационными) объектами, а также возникает проблема наиболее эффективного распределения этих операций во времени и оптимального соотнесения в пространстве с целью экономии трудовых и материальных ресурсов, то представляется целесообразной необходимость разработки и отработки технологии автоматизированного проектирования пластин НЖМД.

Процесс проектирования пластин НЖМД начинается со сбора информации о спроектированных разновидностях пластин, результатах выполненных научно-исследовательских работ, сбора данных об испытаниях аналогов, условиях снабжения материалами и т.д. На основании анализа требований к техническим характеристикам, условий изготовления и эксплуатации, выявления тенденций развития пластин НЖМД составляется и корректируется исходное ТЗ на проектирование.

Реализация технологии автоматизированного проектирования пластин НЖМД предъявляет к разрабатываемой системе комплекс следующих требований [23]:

- наличие автоматизированного рабочего места проектировщика;
- наличие математической модели;
- возможность формулировать ТЗ на проектирования в понятной форме для проектировщика;
- обеспечение необходимой проектировщикам ясности и однозначности формулировок цели проектирования (лучше всего описать в терминах характеристик системы);
- наличие средств, для эффективной корректировки задания на проектирование;
- отсутствие жестких ограничений на структуру и объем входных данных и формы носителей информации, на которых они хранятся;
- возможность оперативного подключения к программному обеспечению системы новых модулей и исключение устаревших;
- представление возможностей проектировщику на основе промежуточных результатов принимать решение о выборе методов для продолжения проектной задачи, а также изменений значений отдельных параметров в используемом методе решения;
- возможность в ходе выполнения проектных операций проследить значения основных показателей процессов, свидетельствующих о его эффективности, и в зависимости от их значений корректировать вычислительный процесс;
- наличие актуальной базы знаний и базы материалов;
- допустимость включения обучающих программ для повышения квалификации проектировщика.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 16

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. 2000. – 744 с.
2. Карпенков С.Х. Тонкопленочные накопители информации. – М.: Радио и связь, 1993. – 504 с.
3. Вишневский А.С., Ивашов Е.Н. Формирование магнито-ориентированных нанообъектов для перспективных накопителей информации // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2007): Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23-27 окт. 2007 г. – М.: МИРЭА, 2007. – Ч. 1. – С. 74-80.
4. Вишневский А.С., Ивашов Е.Н., Лучников А.П. Алгоритмы выбора слоистых композиционных структур магнитных носителей информации // Конструкции из композиционных материалов: межотраслевой науч.-техн. журнал, 2008, № 2. – С. 32-39.
5. Боровский И.Б., Гуров К.П., Марчукова И.Д., Угасте П.Э. Процессы взаимной диффузии в сплавах. – М.: Наука, 1973. – 237с.
6. Дульнев Г.Н., Тихонов С.В. Теория теплопроводности и массообмена. Точные методы решения задач теплопроводности и диффузии. – Л.: [б. и.], 1981. – 80 с.
7. Чулков В.П. Комплексные автоматизированные производства. Методические указания по проведению курсовых и дипломных работ. – М.: МИЭМ, 2006. – 77 с.
8. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 118 с.
9. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 255 с.

10. Автоматизация поискового конструирования / Под ред. акад. А.И. Половинкина. – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.
11. Дворянkin А.М., Половинкин А.И., Соболев А.Н. Методы синтеза технических решений. – М.: Наука, 1977. – 104 с.
12. Джонс Дж.К. Методы проектирования. – М.: Мир, 1986. – 322 с.
13. Диксон Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений. – М.: Мир, 1969. – 400 с.
14. Ханзен Ф. Основы общей методики конструирования. – Л.: Машиностроение, 1969. – 164 с.
15. Хилл П. Наука и искусство проектирования. – М.: Мир, 1973. – 264 с.
16. Холл А. и др. Опыт методологии для системотехники. – М.: Сов. радио, 1978. – 488 с.
17. Гмошинский В.Г., Флиоренг Г.И. Теоретические основы инженерного прогнозирования. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973. – 304 с.
18. Чубухчиев Б.Х. Информационное моделирование функциональных систем. – Магадан: Кордис, 2007. – 197с.
19. Построение современных систем автоматизированного проектирования / Под ред. К.Д. Жука. – Киев: Наука. думка, 1983. – 230 с.
20. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
21. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. – М.: Высшая школа, 1986. – 304 с.
22. Алексеев О.В., Головков А.А., Пивоваров И.Ю. и др. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
23. Камшилов С.Г. Основы систем автоматизированного проектирования технических изделий. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 150 с.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 13. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНИТОСТРИКЦИИ	7
13.1. Обменная магнитострикция	8
13.2. Спонтанная магнитострикция и инвар-эффект	10
13.3. Анизотропная магнитострикция (магнитодипольная и одноионная)	12
13.4. Гигантская анизотропная магнитострикция	15
13.5. Материалы с гигантской магнитострикцией	19
13.6. Влияние спонтанной магнитострикции на тепловое расширение ферромагнетиков	20
13.7. Влияние всестороннего сжатия на температуру магнитной упорядоченности	26
13.8. Устройства прецизионного перемещения на основе эффекта магнитострикции	29
Литература к главе 13	34
Глава 14. УСТРОЙСТВА С БЕСКОНТАКТНЫМ МАГНИТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ	35
14.1. Создание сверхчистой вакуумной среды в оборудовании производства изделий электронной техники	35
14.2. Вакуумное технологическое и аналитическое оборудование с функциональными устройствами бесконтактного магнитного взаимодействия	45
14.3. Конструктивные особенности устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием	61
14.4. Материалы устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием	73
Литература к главе 14	81

Глава 15. ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	85
15.1. Кристаллизационные процессы выращивания монокристаллического кремния и их механическое обеспечение ...	85
15.2. Агрегаты и модули оборудования монокристаллического кремния методом Чохральского	93
15.3. Сравнительные исследования волновых резьбовых передач	111
15.4. Тепловые модули оборудования для выращивания монокристаллического кремния	128
15.5. Модули управления процессом выращивания монокристаллического кремния	135
15.6. Методы оптимизации технологического процесса выращивания монокристаллического кремния	136
Литература к главе 15	148
Глава 16. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАСТИН НАКОПИТЕЛЕЙ НА ЖЕСТКИХ МАГНИТНЫХ ДИСКАХ	166
16.1. Пластины накопителей на жестких магнитных дисках	166
16.2. Основные понятия и представления о проектировании накопителей на жестких магнитных дисках	191
16.3. Процедурная модель проектирования пластин накопителей на жестких магнитных дисках	204
16.4. Моделирование в автоматизированных системах проектирования пластин накопителей на жестких магнитных дисках	210
16.5. Особенности автоматизированного проектирования накопителей на жестких магнитных дисках	227
Литература к главе 16	230