

МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕРИЯ ИЗ 7-И МОНОГРАФИЙ

МОНОГРАФИЯ 7 ТОМ I

Н.Н. БАЛАН В.А. ВАСИН Е.Н. ИВАШОВ
С.В. СТЕПАНЧИКОВ

МИКРОИНЖЕНЕРИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

НИИТИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО НИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
2013

УДК 621.315 + 621.01/03

ББК 30.3

М 32

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

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

М 32 **Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении: Серия из 7-и монографий. Монография 7. Том I. Н.Н. Балан, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков** Микроинженерия монокристаллического кремния. – Ивантеевка М.о.: Издательство НИИ предельных технологий, 2012. – 195 с.

ISBN 978-5-905872-14-3

В монографии даётся обзор современного оборудования для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского. Показано состояние работ в области создания такого оборудования; обсуждаются методология проектирования надежных, экологически чистых и виброустойчивых механических модулей роторного оборудования, включающая методики оценки точности позиционирования ведомого звена волновой резьбовой и зубчатой передачи, методики расчета элементов модулей перемещения на привносимый уровень загрязнений в технологический агрегат, методики определения собственных частот и коэффициентов демпфирования виброзащитных модулей роторного оборудования.

Монография предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся микро- и наноинженерией в электронном машиностроении и может быть рекомендована аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и нанoeлектроника» профиля «Микро- и наноинженерия в электронике».

ISBN 978-5-905872-14-3

УДК 621.315 + 621.01/03

© Н.Н. Балан, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов,
С.В. Степанчиков, 2013

© Издательство НИИ предельных технологий, 2013

© МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013

ВВЕДЕНИЕ

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

Современное оборудование для выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского должно обеспечить:

- поддержание в камере остаточного давления менее $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па для случая проведения процесса выращивания в вакууме;
- 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 $0,10$ °С;
- высокую точность поддержания выбранных скоростей перемещения деталей установки (точность подъема тигля и заправки $0,5\%$, скорости вращения штоков $0,5\%$);
- отсутствие вибраций;
- возможность изменения основных параметров процесса.

Совершенствование оборудования для выращивания монокристаллического кремния идет в направлении создания высокопроизводительных установок, агрегаты и модули которых должны быть связаны между собой и управляться от ЭВМ. Поэтому современным подходом к созданию ростового оборудования для выращивания монокристаллического кремния является агрегатно-модульное построение промышленных установок.

Предлагаемая читателю монография посвящена перечисленным вопросам. В книге делается обзор современного оборудования для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского, а также современного состояния работ в области создания такого оборудования; обсуждаются методология проектирования надежных, экологически чистых и виброустойчивых механических модулей ростового оборудования, включающая методики оценки точности позиционирования ведомого звена волновой резьбовой и зубчатой передачи, методики расчета элементов модулей перемещения на привносимый уровень загрязнений в технологический агрегат, методики определения собственных частот и коэффициентов демпфирования виброзащитных модулей ростового оборудования.

Издание предназначено для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами электронного машиностроения.

Настоящая монография может быть также рекомендована аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и нанoeлектроника» профиля подготовки «Микро- и наноинженерия в электронике».

Коллектив авторов благодарит д.т.н., проф. Василенко Николая Васильевича, к.т.н. Терехина Николая Александровича, к.т.н. Панова Петра Иннокентьевича и к.т.н. Гупалова Виктора Кирилловича за помощь в подготовке монографии.

ГЛАВА 1. ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АГРЕГАТОВ И МОДУЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

1.1. Кристаллизационные процессы выращивания монокристаллического кремния и их механическое обеспечение

Классификацию кристаллизационных процессов выращивания монокристаллов полупроводников можно проиллюстрировать с помощью рис. 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 объёма расплава в ходе процесса, относят методы Бриджмена и Чохральского (рис. 1.1, а÷г). Направленную кристаллизацию, характеризующую наличием в системе двух фазовых границ (фронта плавления и фронта кристаллизации) и постоянным объёмом расплава в ходе процесса, называют зонной плавкой или зонной перекристаллизацией (рис. 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 методом Чо-

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

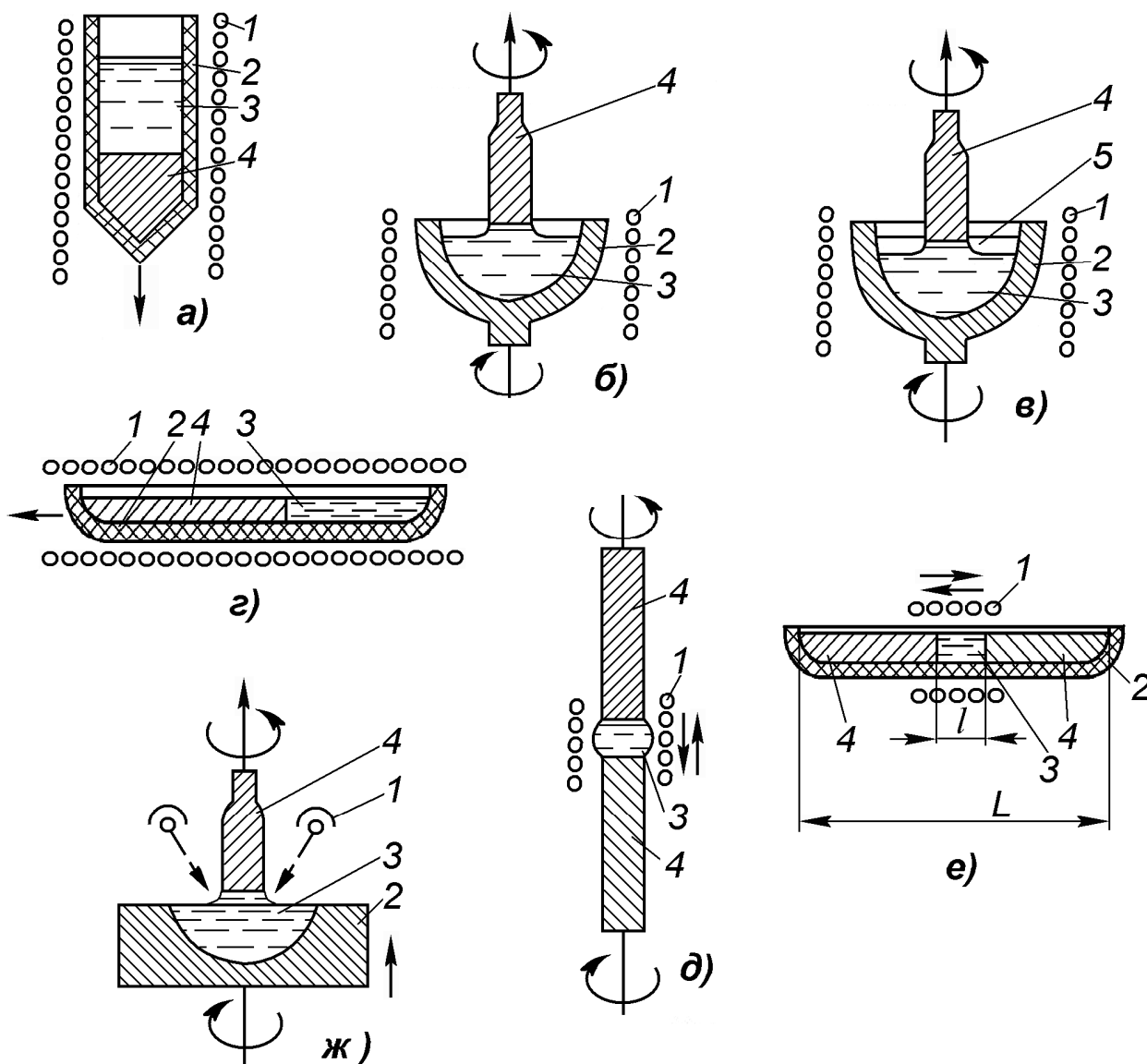


Рис. 1.1. Схемы процессов направленной кристаллизации расплавов:

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 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

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 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;
- 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 $\pm 0,5\%$);

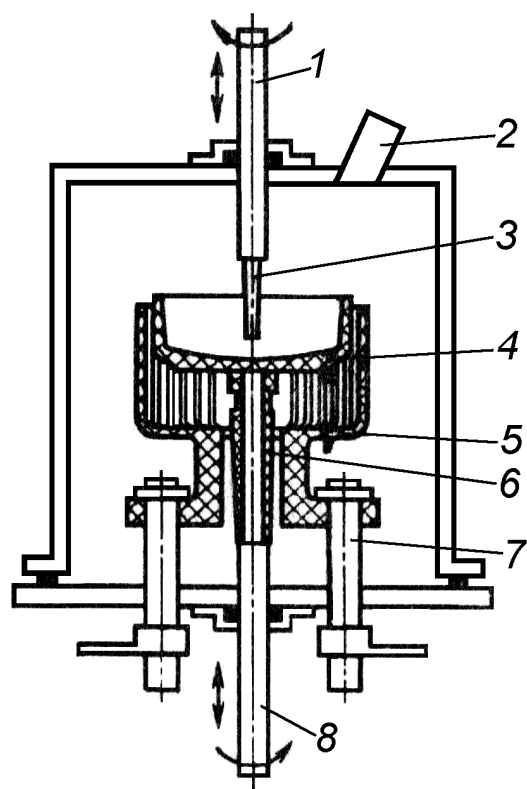


Рис. 1.2. Схема для выращивания монокристаллов методом Чохральского: 1 – верхний шток; 2 – смотровое окно; 3 – монокристаллическая затравка; 4 – кварцевый тигель; 5 – графитовый нагреватель; 6 – графитовая подставка тигля; 7 – водоохлаждаемый токоввод; 8 – нижний шток.

— отсутствие вибраций;

— возможность изменения основных параметров процесса.

Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского изображена на рис. 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 сопротив-

ления 5, установленным на токоотводах 7, смонтированных в нижней крышке камеры. Снаружи нагреватель окружен системой графитовых экранов (на рис. 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 давления 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÷3 мм, а шток 1 останавливают. После прогрева затравки в течение 3÷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 1.2.

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

Таблица 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

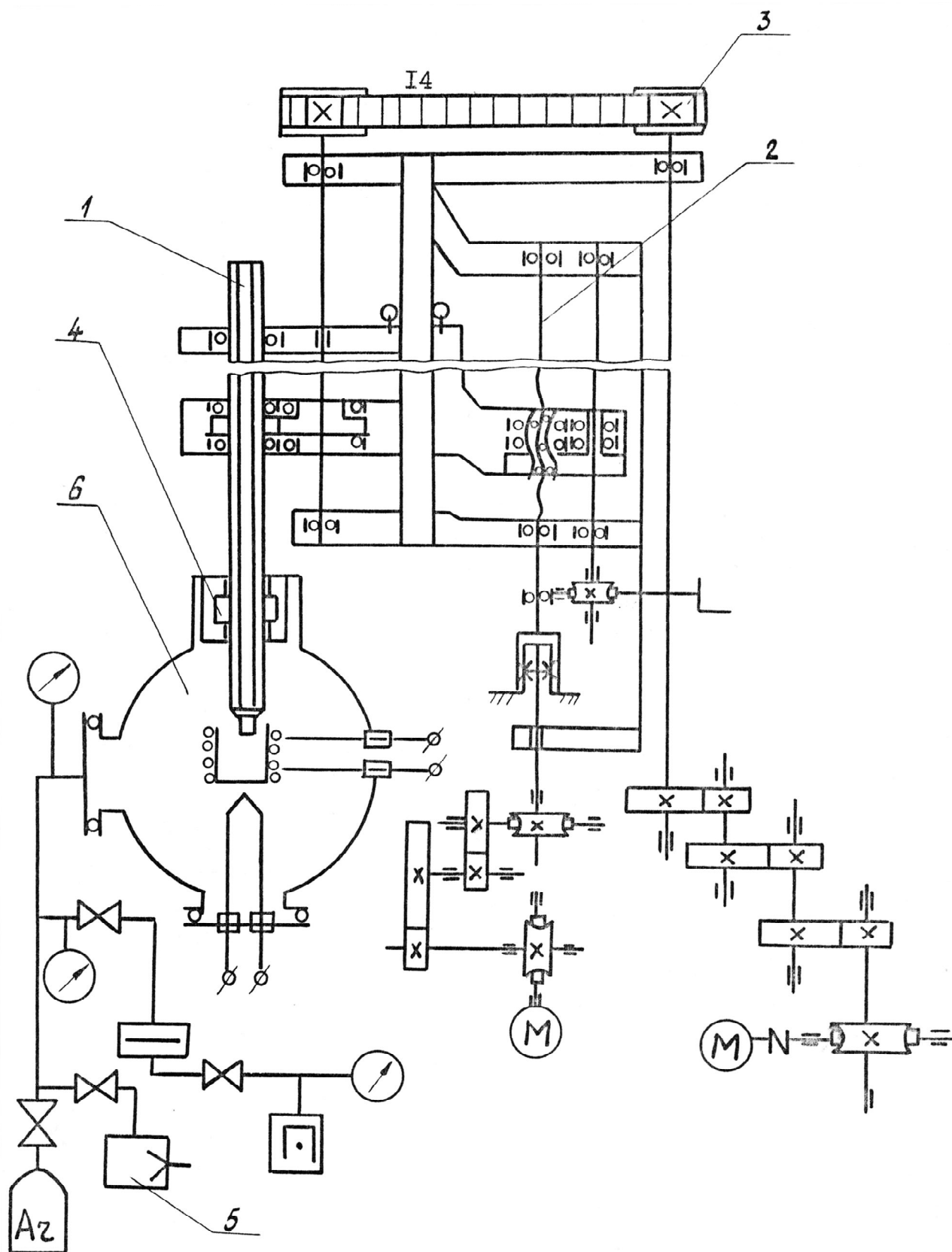


Рис. 1.3. Вакуумно-кинематическая схема установки выращивания монокристаллов НИИ «Полус»

На рис. 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 $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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.

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.

1.2. 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. 1.4 и 1.5, где на рис. 1.4 изображена верхняя камера установки; на рис. 1.5 – 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.1.6÷1.10)

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

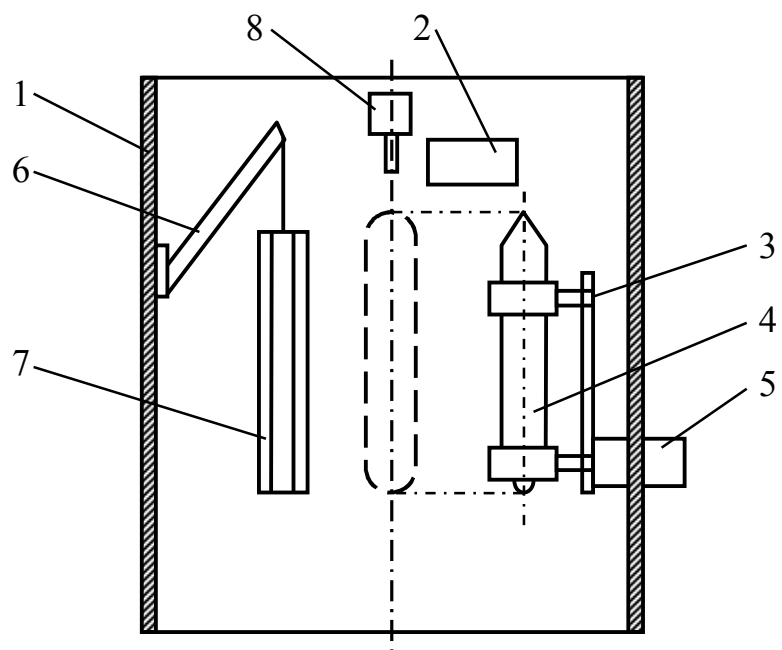


Рис. 1.4. Верхняя камера установки

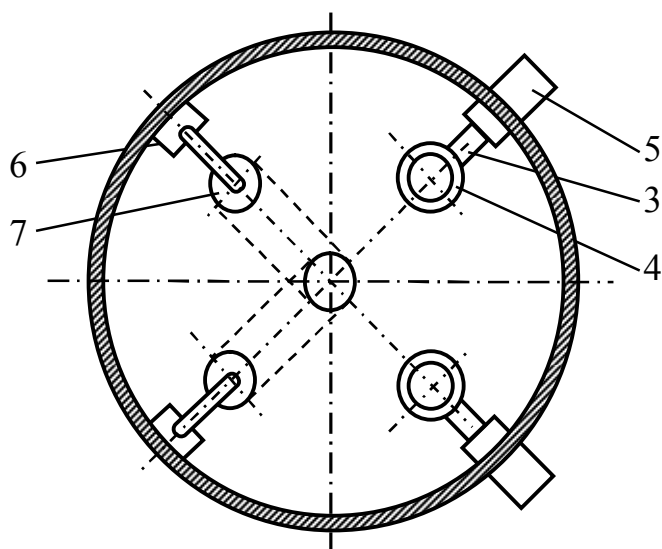


Рис. 1.5. Поперечный разрез верхней камеры

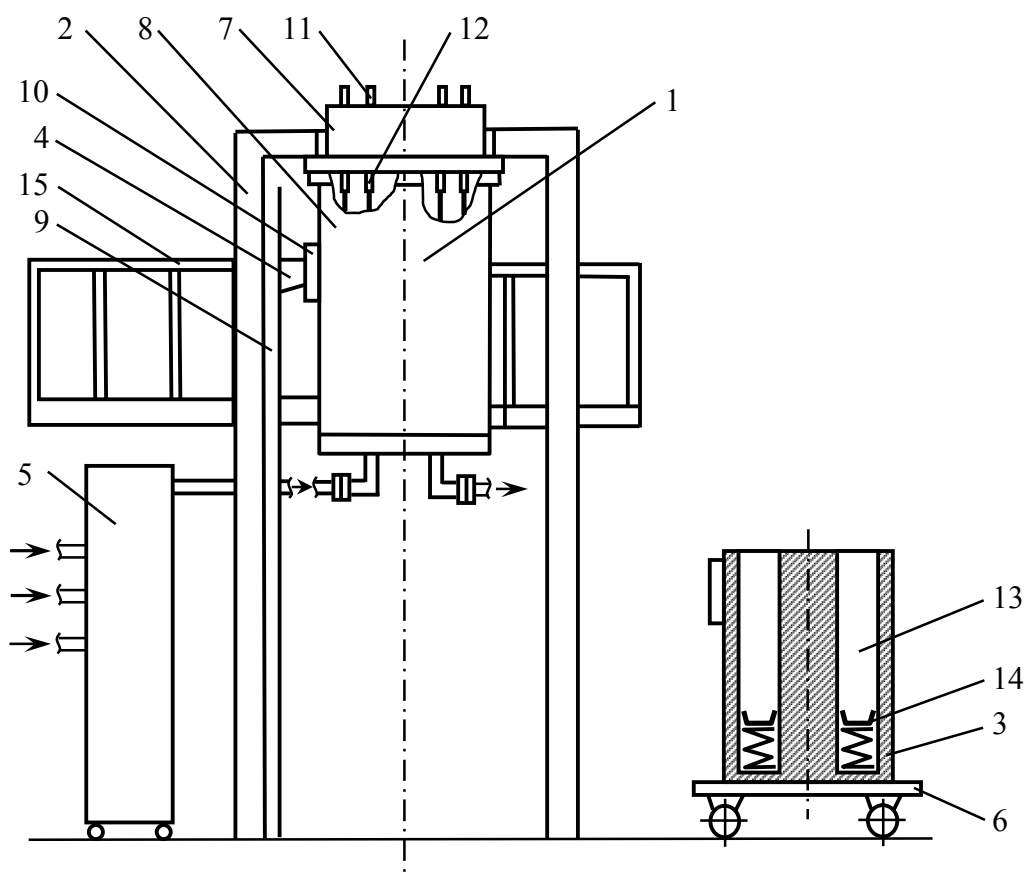


Рис. 1.6. Общий вид установки

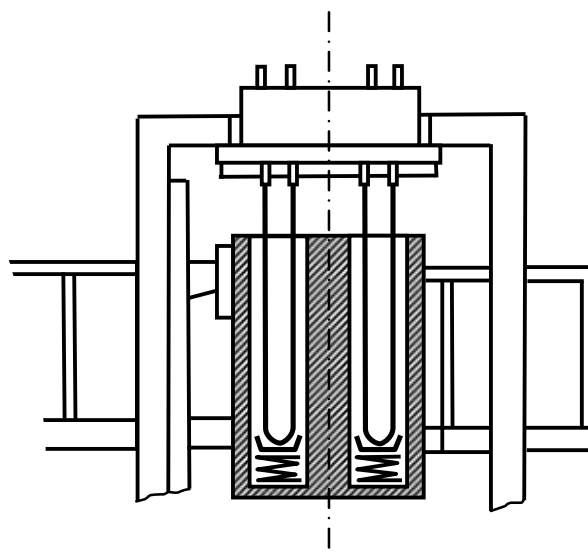


Рис. 1.7. Контейнер с основами в положении загрузки

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,

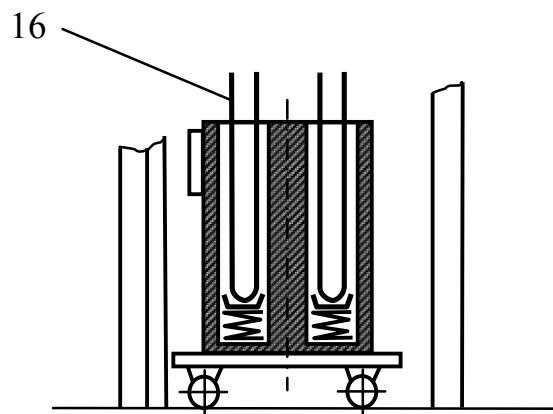


Рис. 1.8. Контейнер с основами перед загрузкой

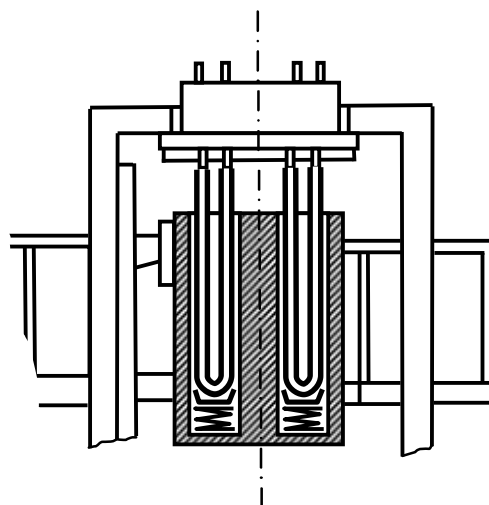


Рис. 1.9. Контейнер на подъемнике в момент разгрузки

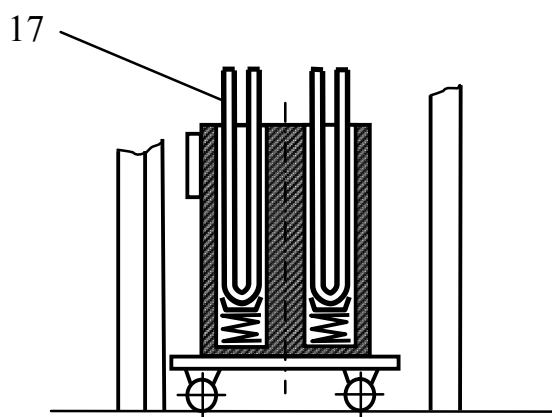


Рис. 1.10. Контейнер на тележке со стержнями после разгрузки

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-разгрузочной зоны. На рис. 1.6 изображена установка для получения стержней поликристаллического кремния, общий вид; на рис. 1.7 – контейнер с основами в положении загрузки; на рис. 1.8 – контейнер с основами перед загрузкой; на рис. 1.9 – контейнер на подъемнике в момент разгрузки; на рис. 1.10 – 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. 1.11), 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 основами 15 подкатывается под реактор 1 (рис. 1.12), 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. 1.13), поочередно устанавливает основы 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. 1.14), 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. 1.15) 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 опускается 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

(рис. 1.16÷1.18) [5]

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.

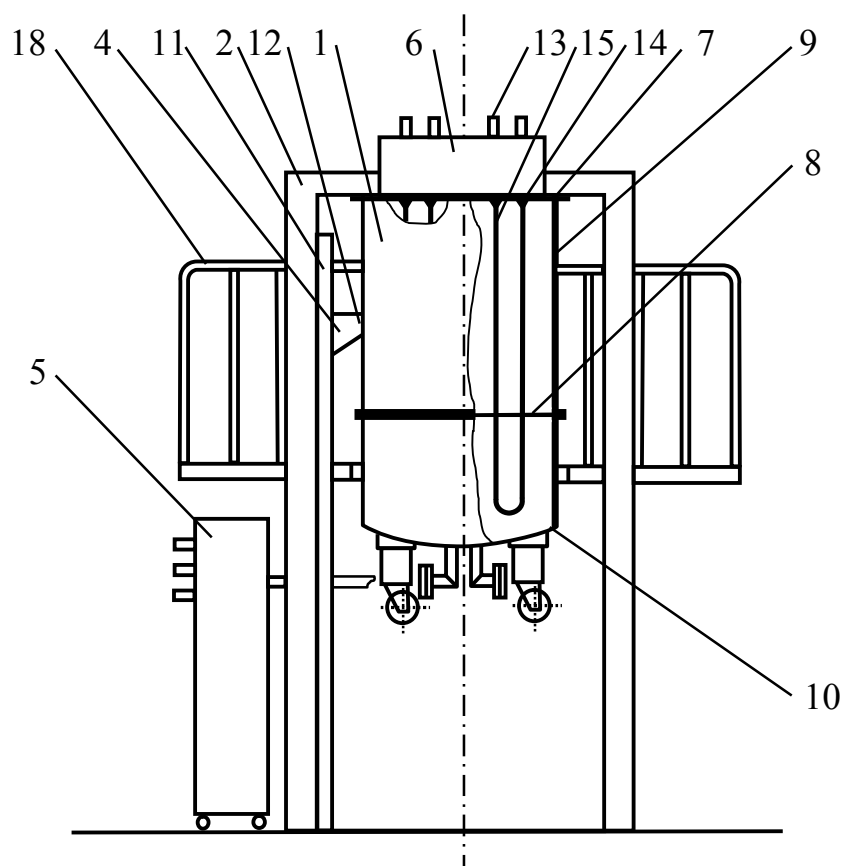


Рис. 1.11. Общий вид установки

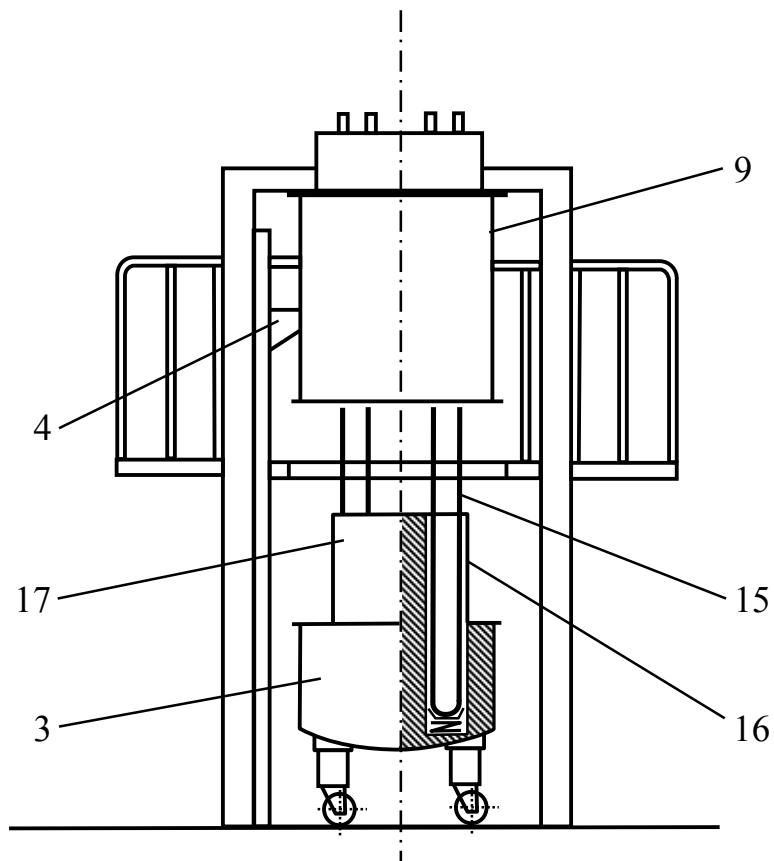


Рис. 1.12. Контейнер с основами, установленный после снятия нижнего дна реактора, перед загрузкой

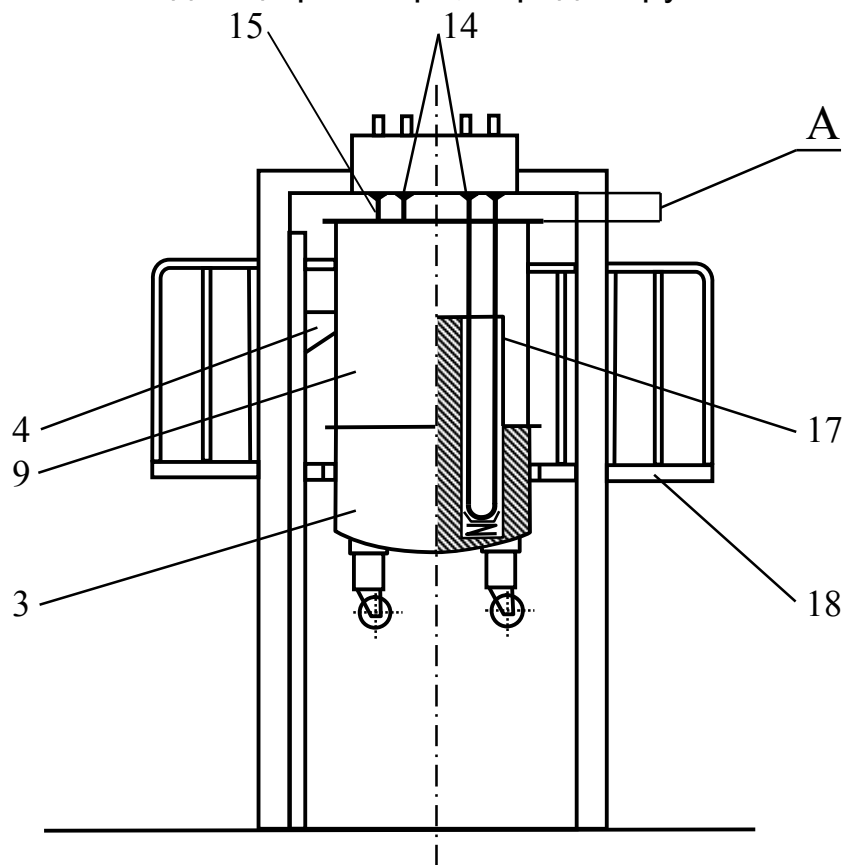


Рис. 1.13. Контейнер с основами в положении загрузки

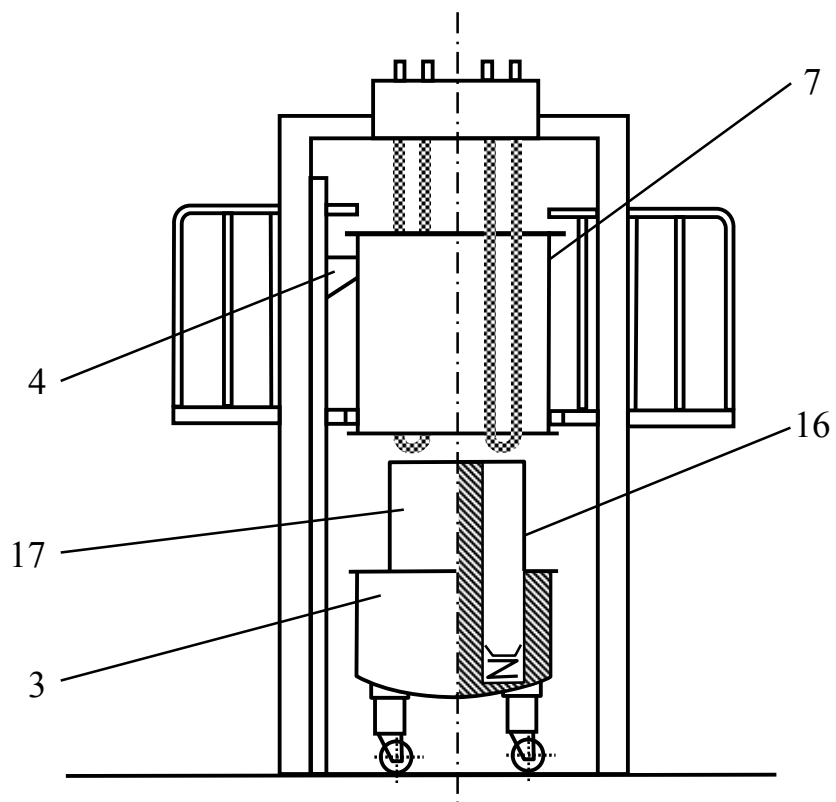


Рис. 1.14. Контейнер, установленный после снятия донней части реактора, перед загрузкой стержней

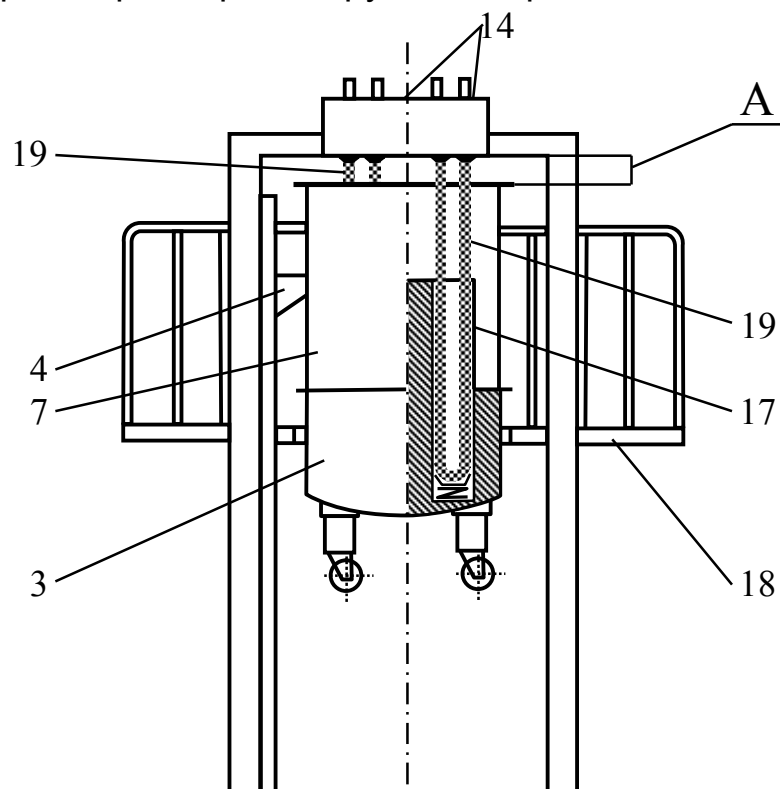


Рис. 1.15. Контейнер в положении разгрузки стержней

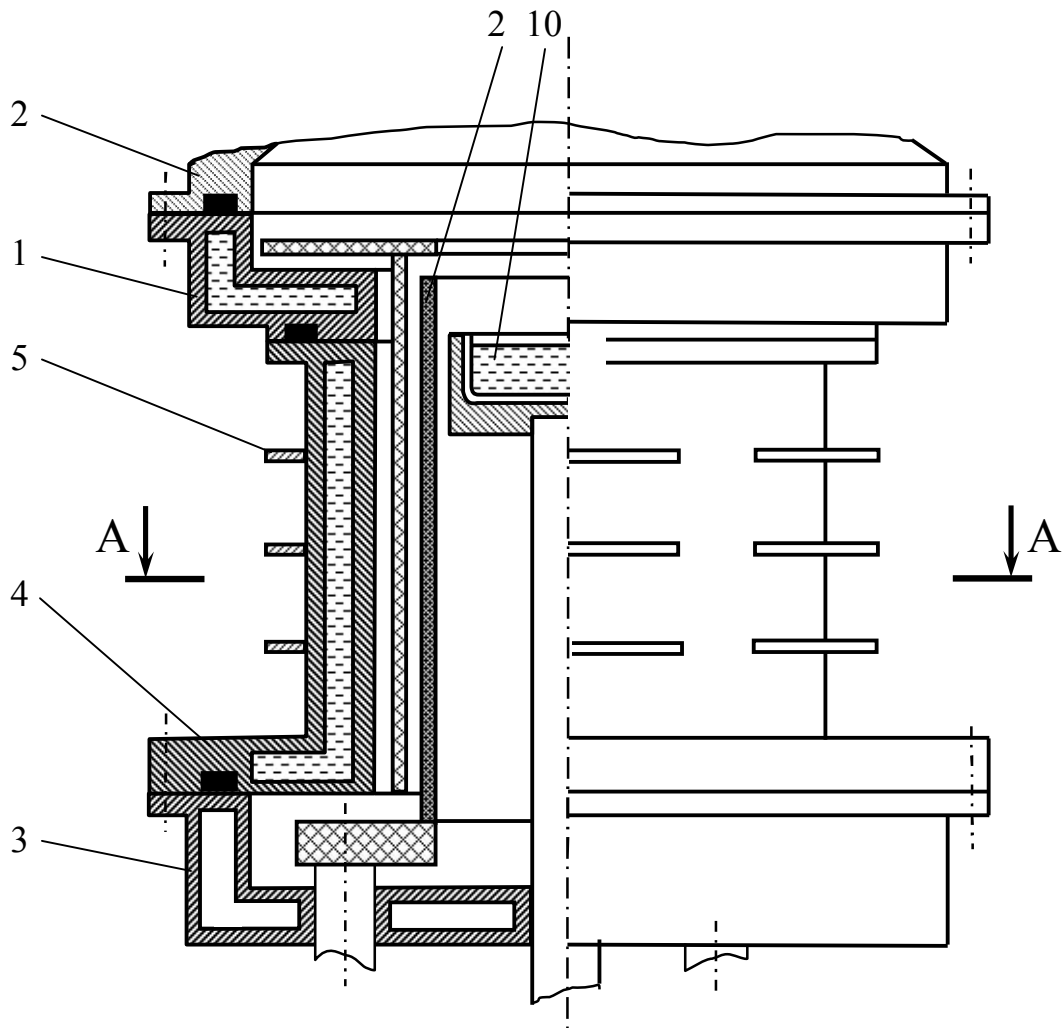


Рис. 1.16. Поперечный разрез А-А плавильной камеры в зоне размещения направляющих элементов

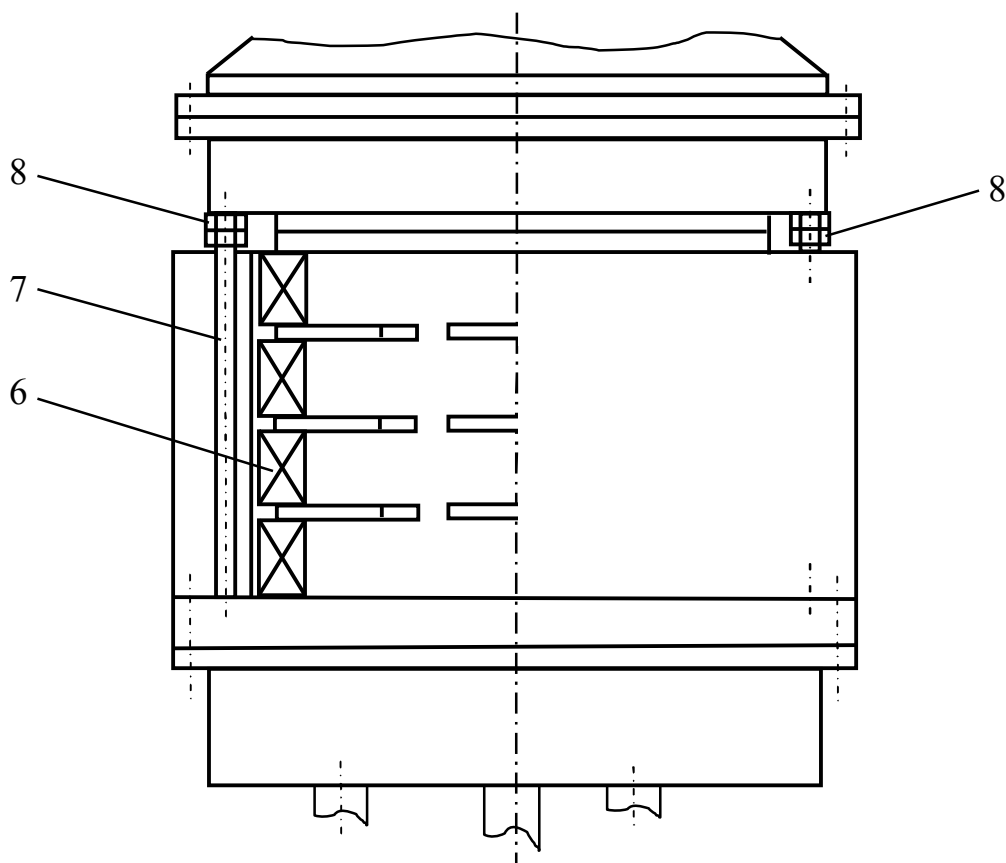


Рис. 1.17. Плавильная камера с магнитной системой и распорным устройством

Поскольку обмотка магнитной системы выполнена на охлаждаемой рубашке средней части между направляющими элементами 5, то рубашка и направляющие элементы, являясь элементами системы охлаждения, увеличивают площадь охлаждения, упрощая конструкцию системы охлаждения и уменьшая расход воды.

Устройство для выращивания кристаллов из расплава [6] (рис.1.18)

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 дополнительным 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.1.18÷1.25) 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.

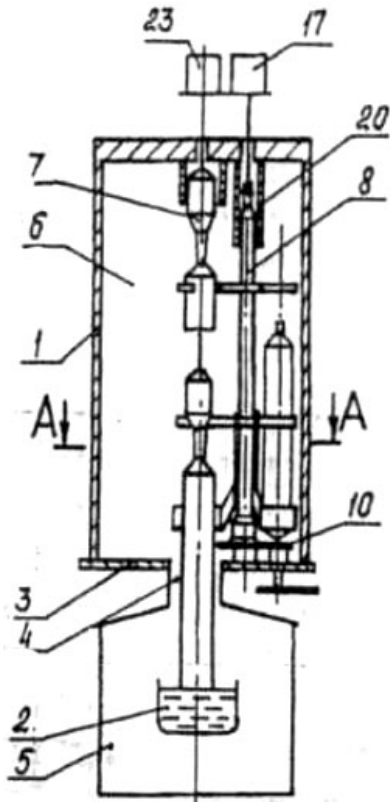


Рис. 1.18. Устройство (продольный разрез)

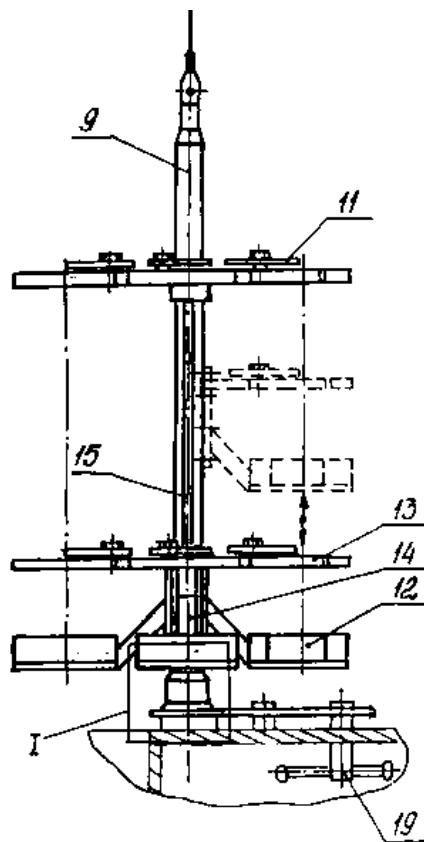


Рис. 1.19. Вид на кассету с приводом поворота

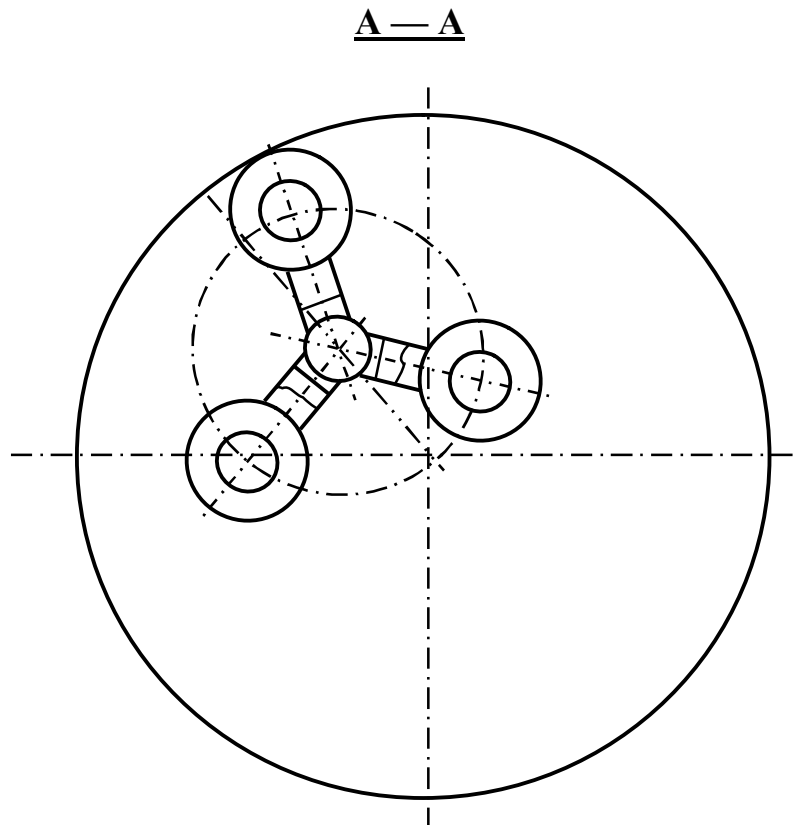


Рис. 1.20. Исходное положение установки кассеты (сечение А-А на рис. 1.18)

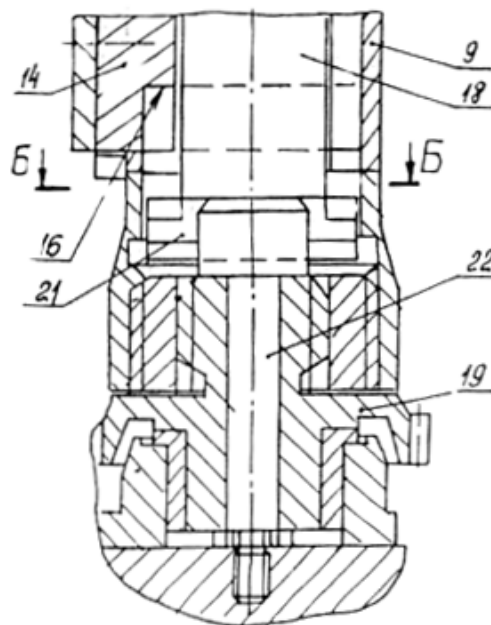


Рис. 1.21. Узел 1 на рис. 1.19

Б — Б

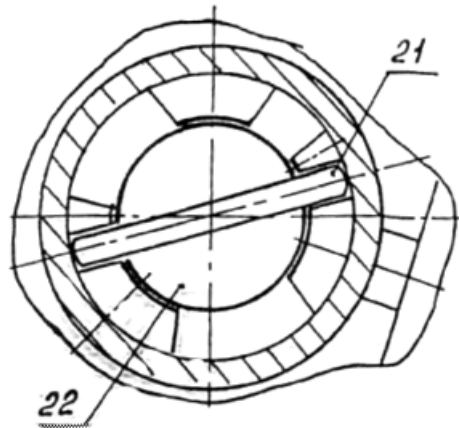


Рис. 1.22. Сечение Б-Б на рис. 1.21 (исходное положение)

А — А

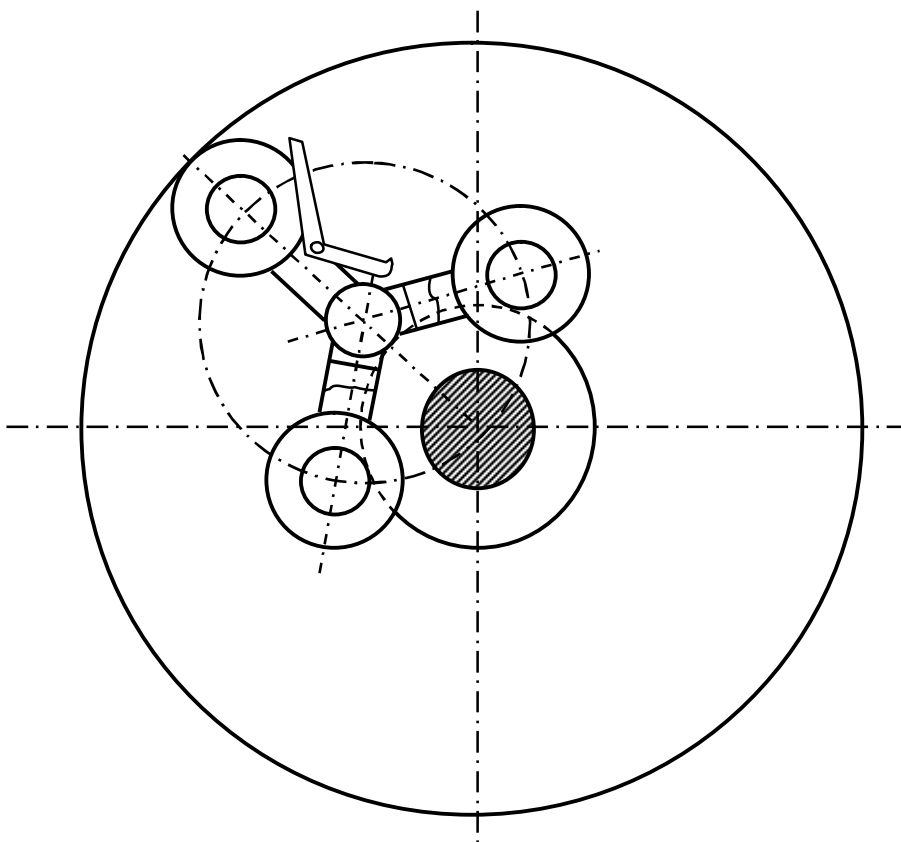


Рис. 1.23. Сечение А-А на рис. 1.18 (положение выращивания)

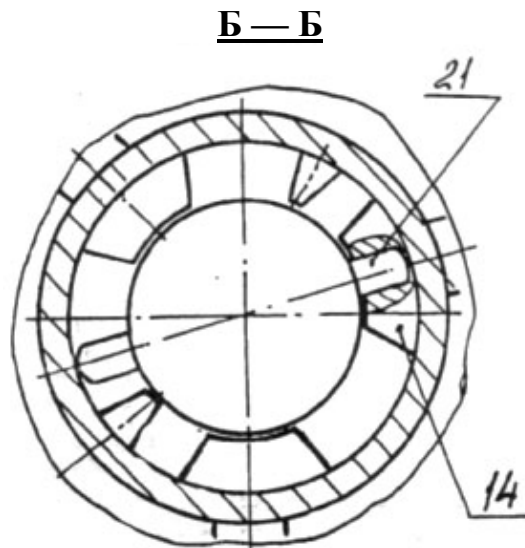


Рис. 1.24. Сечение Б-Б на рис. 1.21 (положение выращивания)

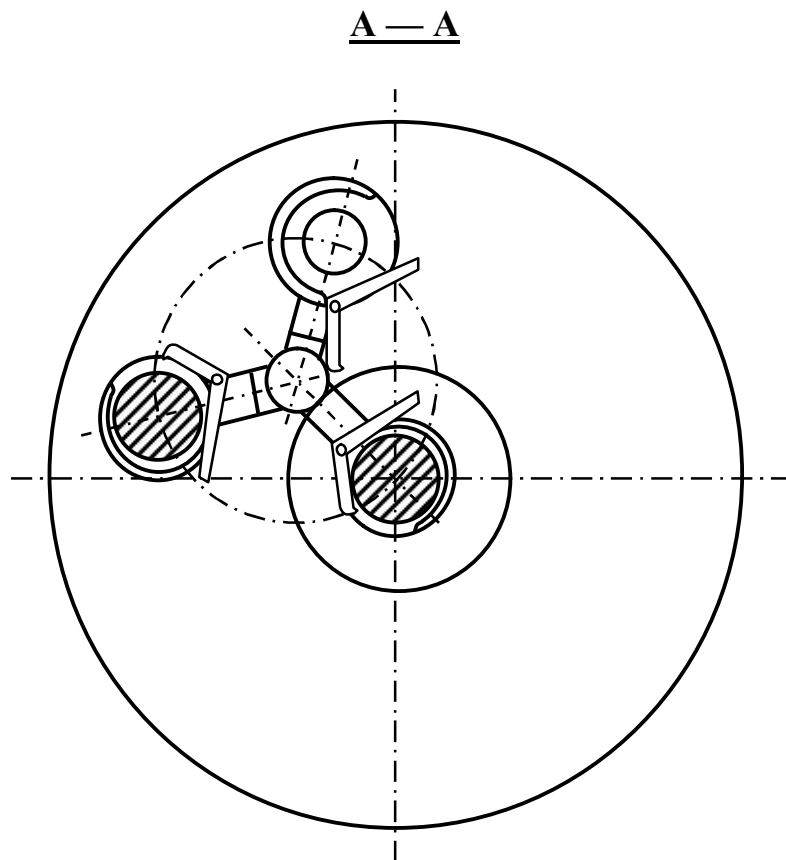


Рис. 1.25. Сечение А-А на рис. 1.18 (положение отделения кристалла)

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 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.

1.3. 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. 1.26, а;
- планетарный винтовой механизм (ПВМ) — см. рис. 1.26, б;
- винтовой механизм с промежуточными резьбовыми роликами
- шарико-винтовой механизм (ШВМ) — см. рис. 1.26;
- несоосный резьбовой механизм (НРМ) — см. рис. 1.27, а;
- волновой резьбовой механизм (ВРМ) — см. рис. 1.27, 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 конструктивные 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. 1.2.

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:

$$\Delta S = \sqrt{\delta \sum^2 \varphi + \delta \sum^2 ВП + \delta \sum^2 ШП} \quad (1.1)$$

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

$\delta \sum ВП$ – 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]:

$$d = D \sqrt{\frac{\gamma_{ж} V_2}{\gamma_{кр} V_1}} \quad (1.2)$$

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

$$V = \frac{S + \Delta S}{T} \quad (1.3)$$

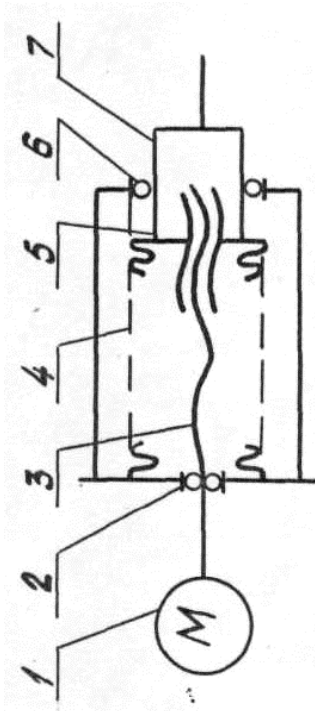
где $S + \Delta S$ – путь, пройденный штоком, и его кинематическая погрешность;

T – время перемещения штока.

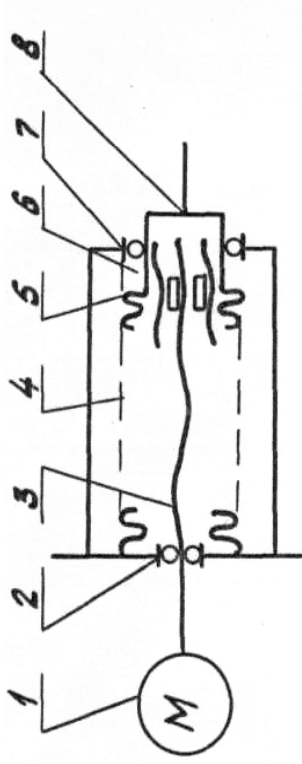
Расчет показал, что при скорости перемещения 0,5 мм/ч, погрешность скорости ΔV составляет $\pm 0,05$ мм/ч., а диаметр монокристалла при полученной погрешности скорости штока равен:

$$d_1 = 140 \sqrt{\frac{0.11 \cdot 0.3}{0.2(0.5 - 0.05)}} = 84.77 \text{ (мм)} \quad (1.4)$$

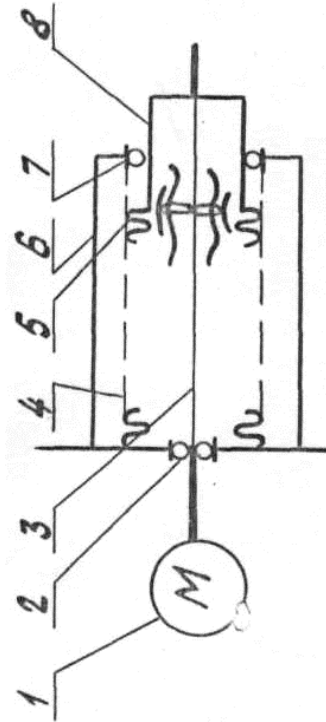
$$d_2 = 140 \sqrt{\frac{0.11 \cdot 0.3}{0.2(0.5 + 0.05)}} = 76.68 \text{ (мм)}$$



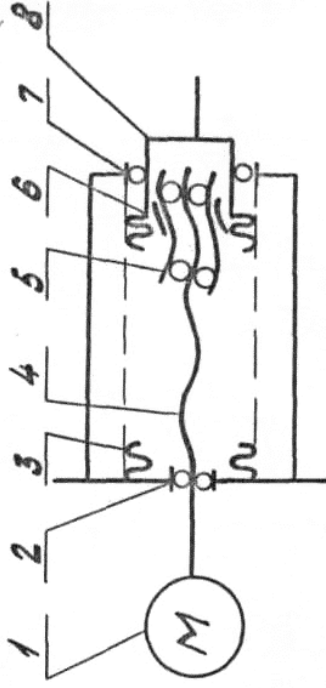
- а) 1 – электродвигатель; 2 – опора; 3 – ведущий вал;
4 – сильфон; 5 – уплотнение; 6 – опора;
7 – ведомый элемент



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

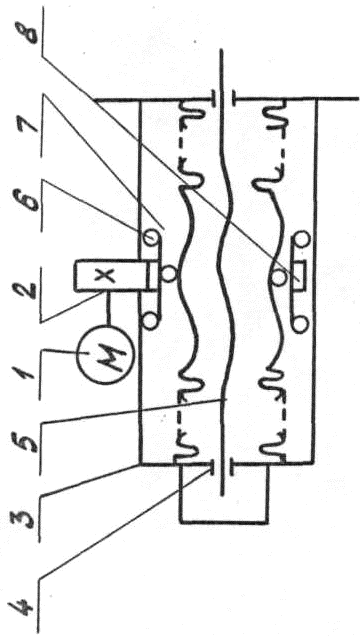


- г) 1 – электродвигатель; 2 – опора; 3 – сильфон;
4 – ведущий вал; 5 – шарики; 6 – уплотнение;
7 – ведомый элемент; 8 – опора

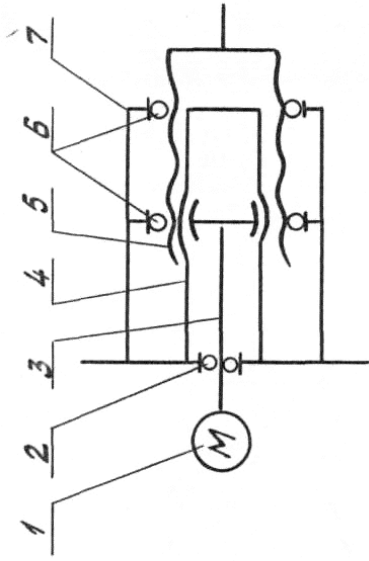


- б) 1 – электродвигатель; 2 – опора;
3 – ведущий вал; 4 – сильфон; 5 – уплотнение;
6 – опора; 7 – ролики; 8 – ведомый элемент

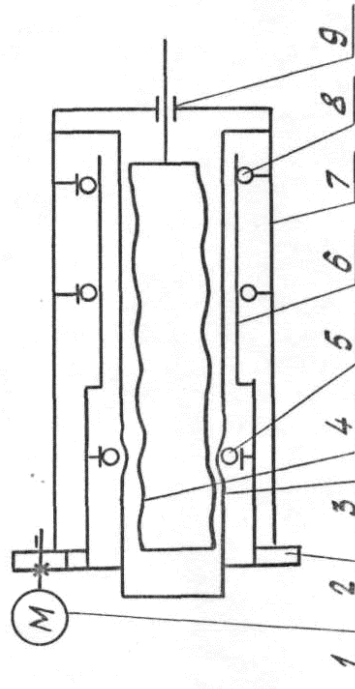
Рис.1.26. Винтовые механизмы с сильфонной герметизацией



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



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



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

Рис.1.27. Винтовые механизмы с сильфонной герметизацией и герметизацией при помощи гибких элементов

Таблица 1.2

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 перемещения V , м/с
Винтовые механизмы скольжения (ВМС)	0,57	35	10^{-9}	8	450	-0,02
Планетарный винтовой механизм (ПВМ)	0,95	8÷12	10^{-9}	10	450	-0,2
Винтовой механизм с промежуточ- ными резьбовыми роликами (ВМСПРР)	0,93	10÷15	10^{-9}	1	450	-0,2
Шарико-винтовой механизм (ШВМ)	0,97	10÷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÷8	$2 \cdot 10^{-9}$	22	450	-0,1
Волновой резьбовой механизм (ВРМ)	0,7	5÷8	$2 \cdot 10^{-9}$	9	450	-0,1

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 незаданных 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 скипера 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 движения 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 работах [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 изго-

товления, 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 мнению 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 Venford 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 небольшому 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 большим 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 покры-

тиям 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 исследования могут использоваться для создания методики расчета и проектирования высокоточных герметичных волновых резьбовых передач ВРП.

1.4. 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. 1.28. Поток тепла Q_n , поступающий к тиглю от нагревателя, равен сумме потоков тепла, отводимых излучением от расплава Q_{up} теплопроводностью Q_{mk} и излучением Q_{uk} 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_u :

$$G_r = \Delta T_r / r = (T_u - T_n) / r, \quad (1.5)$$

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

$$G_x = \Delta T_x / x = (T_1 - T_2) / x, \quad (1.6)$$

где x – расстояние по длине кристалла.

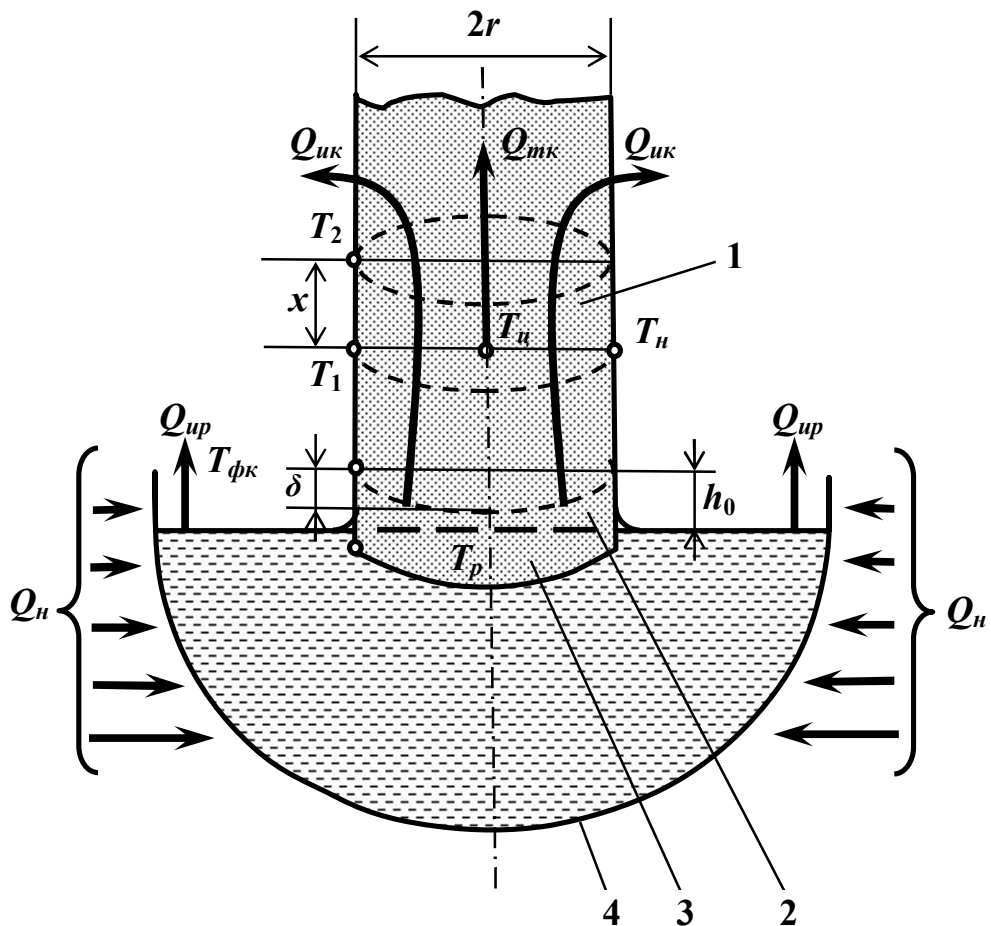


Рис. 1.28. Схема тепловых потоков и изотерм в системе расплав-кристалл при выращивании монокристалла методом Чохральского: 1 — кристалл; 2 — столбик расплава; 3 — переохлажденная область расплава; 4 — тигель; δ — стрела прогиба фронта кристаллизации; h_0 — высота столбика расплава; $T_{фк}$ — температура на фронте кристаллизации; T_p — температура изотермы, ограничивающей переохлажденную область расплава.

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 меха-

низму 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.
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. 1.29.

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 выращиваемого 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.

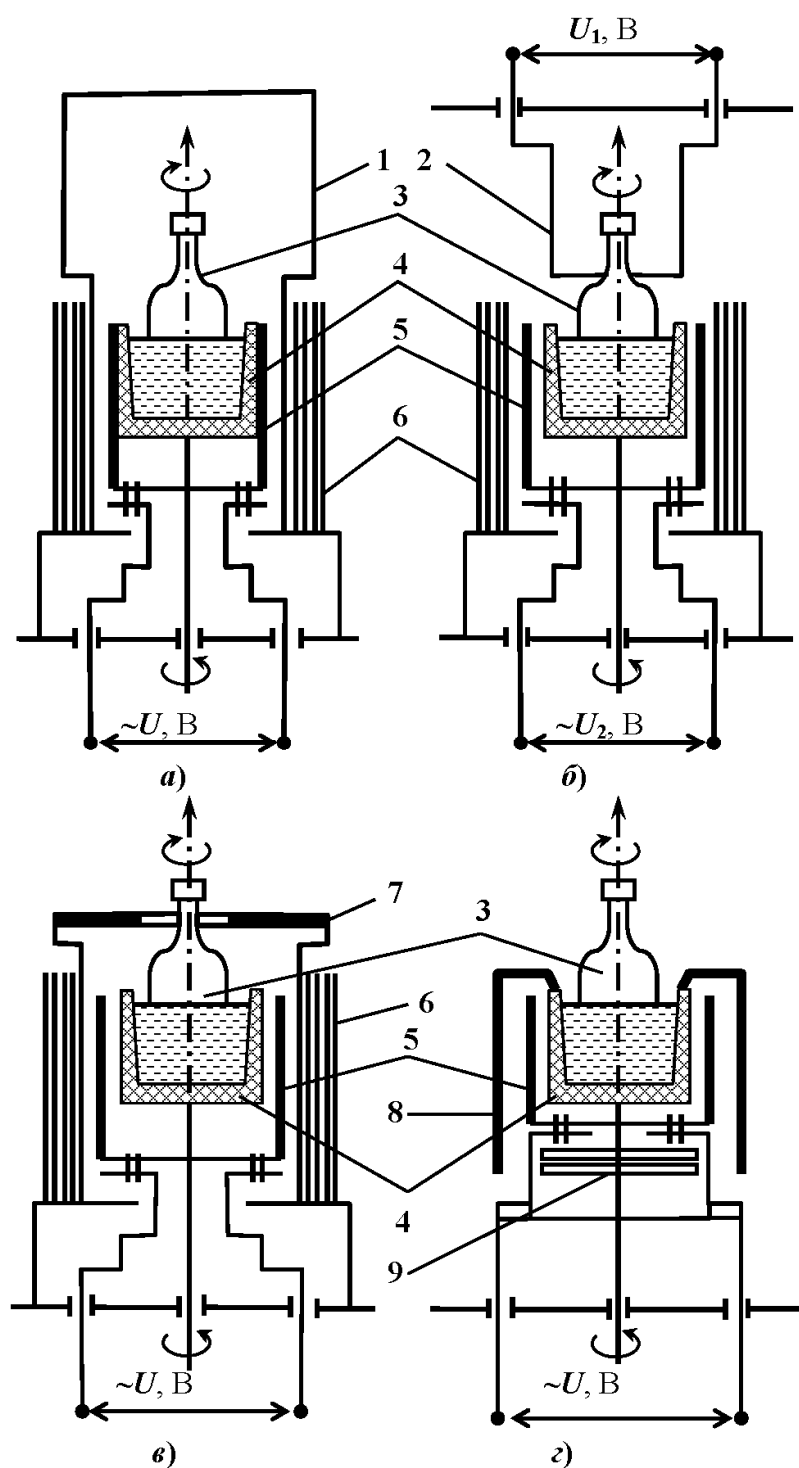


Рис. 1.29. Схемы тепловых узлов с различными видами экранировок: *а, в* – пассивные (полузакрытая и закрытая); *б* – активная; *г* – открытая (подвижная); 1 – верхний боковой экран; 2 – нагреватель; 3 – кристалл; 4 – графитовая подставка с кварцевым тиглем, содержащем расплав; 5 – нагреватель тигля; 6 – боковые экраны; 7 – потолочный экран; 8 – вращающийся боковой экран; 9 – донные экраны.

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 подставки 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. 1.29, *а*, в окружающее монокристалл пространство над тиглем поступает большее количество тепла, что 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. 1.29, *в*) и открытые (рис. 1.29, *г*). 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 вытяги-

вания последнего. Экранировка выращиваемого монокристалла может быть пассивной (экраны) или активной (нагреватель, сопротивления, (рис. 1.29, 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. 1.29, г 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.

1.5. 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. 1.3.

Таблица 1.3

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

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 автоматической 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. 1.30 и рис. 1.31 изображены блок-схемы управления процессом вытягивания слитка и процессом вакуумной откачки соответственно.



Рис. 1.30 Схема управления процессом вытягивания слитка

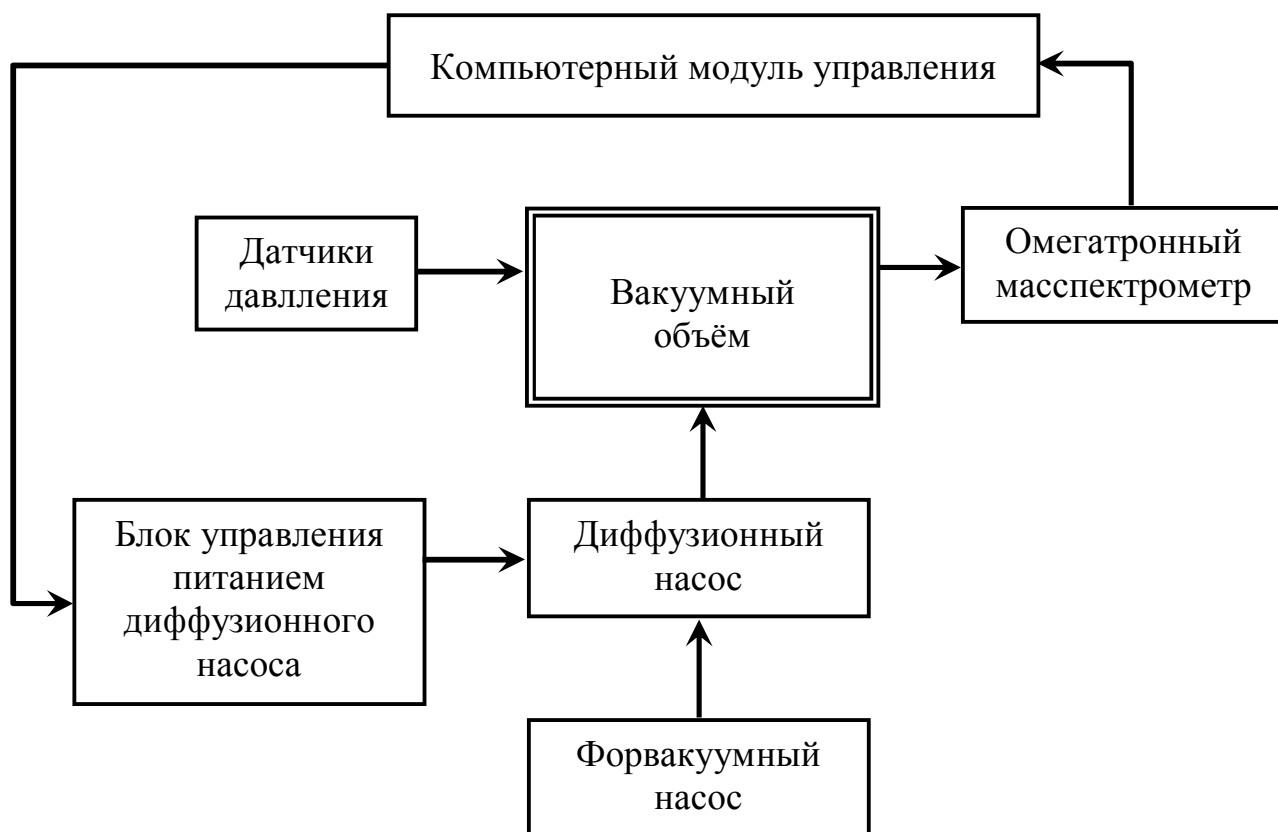


Рис. 1.31 Схема управления процессом вакуумной откачки

1.6. 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, 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.

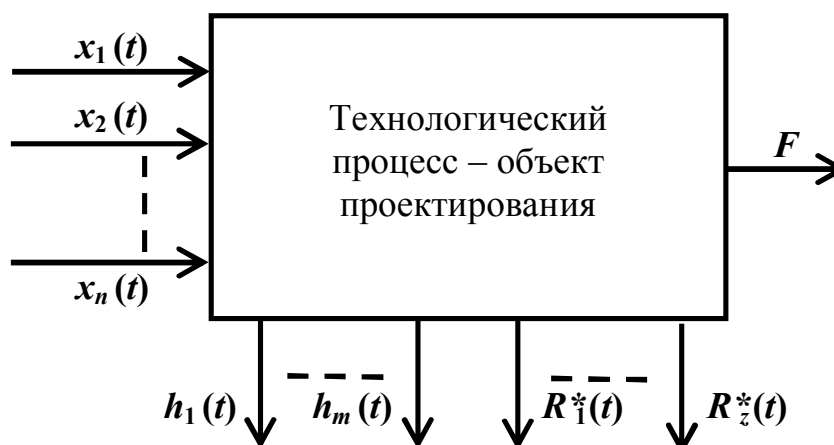


Рис. 1.32 Постановка задачи оптимизации технологического процесса

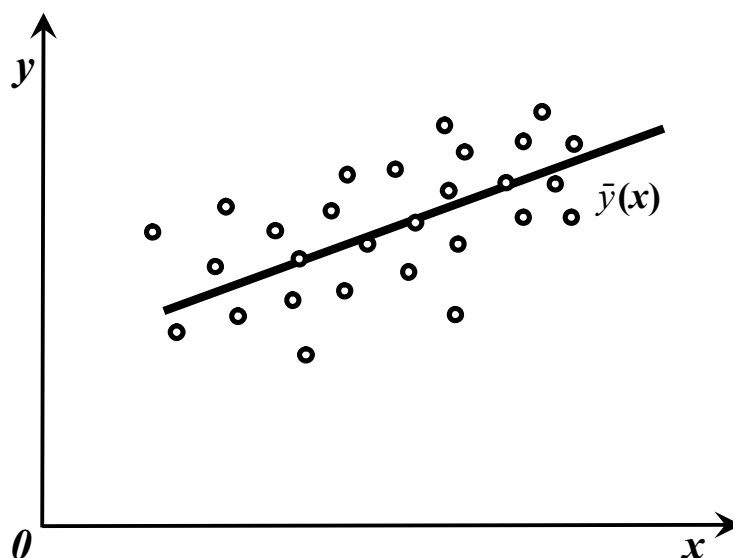


Рис. 1.33. Линия регрессии

Постановку задачи оптимизации технологического процесса можно представить следующим образом (рис. 1.32). 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.

$$F(X(t), R^*(t)) = \min_{R(t)} \{F_k(X(t), R(t))\}. \quad (1.7)$$

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:

$$h_j(t) \leq b_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (1.8)$$

где b_j – требуемые или допустимые значения соответствующих параметров.

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

Подобные задачи оптимизации решают в два этапа. На первом этапе определяют идеальный вектор управления $R^*_{ud}(t)$, обеспечивающий оптимизацию технологического процесса. Практически реализовать это не представляется возможным, и вектор $R^*_{ud}(t)$ является эталоном, к которому надо стремиться. Зная $R^*_{ud}(t)$, 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. 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 плоскости. Полная совокупность вариантов изображается множеством точек, показанных на рис. 1.33. 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 ожи-

дания и обозначая через $p(x, y)$ совместную вероятность данных значений x и y , находим

$$\bar{y}(x) = M_{(y|x)} \frac{\sum_y yp(x, y)}{\sum_y p(x, y)}. \quad (1.9)$$

Определяя $\bar{y}(x)$ при различных x , можно построить линию, графически выражающую эту зависимость и называемую линией регрессии y по x (рис. 1.33). 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

$$\bar{y}(x) = a + b(x - M_{(x)}). \quad (1.10)$$

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

$$\varphi(a, b) = M \left\{ [y - \bar{y}(x)]^2 \right\} = \min. \quad (1.11)$$

Выражение (1.11) с учетом (1.10) дает следующую систему уравнений для определения коэффициентов a и b :

$$M_{(y)} - a = 0; \quad M[y(x - M_{(x)})] - b\sigma_x^2 = 0. \quad (1.12)$$

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 (1.12) 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 коэффи-

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:

$$\max_{X \in X} f_1(X) = f_1^*, \quad A_1 = \{X : X \in X, f_1(X) = f_1^*\}, \quad (1.13)$$

второе подмножество:

$$\max_{X \in A_1} f_2(X) = f_2^*, \quad A_2 = \{X : X \in A_1, f_2(X) = f_2^*\}, \quad (1.14)$$

m -е подмножество:

$$\max_{X \in A_{m-1}} f_m(X) = f_m^*, \quad A_m = \{X : X \in A_{m-1}, f_m(X) = F_m^*\}. \quad (1.15)$$

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:

$$\max_{X \in A} f_1(X), \quad A = \{X : X \in X, f_i(X) \geq a_i, i = 2, 3, \dots, m\}, \quad (1.16)$$

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:

$$a_i > \max_{X \in X} f_i(X), \quad (1.17)$$

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 необходимо 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 кри-

терия определяет допустимую область для максимизации критериев более низкого ранга. Для того, чтобы взяться за многокритериальную проблему таким путем, необходимо решить следующие оптимизационные задачи:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \max_{X \in X} f_1(X), A_1 = \{X : X \in X, f_1(X) \geq a_1 - d_1\}, \\
 a_2 &= \max_{X \in A_1} f_2(X), A_2 = \{X : X \in A_1, f_2(X) \geq a_2 - d_2\}, \quad (1.18) \\
 a_m &= \max_{X \in A_{m-1}} f_m(X).
 \end{aligned}$$

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 соглашаются,

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.1.34).

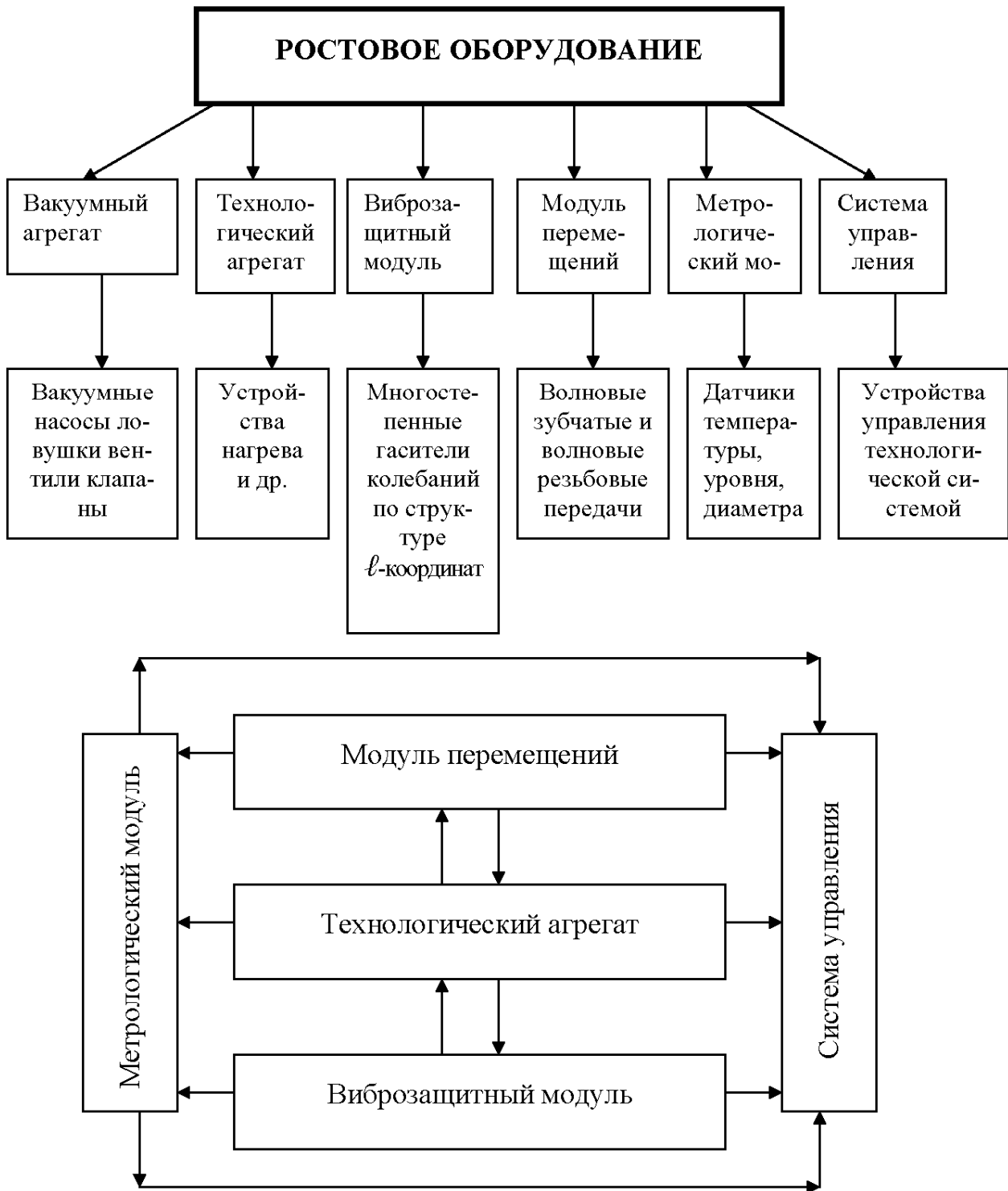


Рис. 1.34. Агрегатно-модульная схема ростовой установки

Для выполнения поставленных задач необходимо провести исследование по основным модулям ростовой установки: технологическому, метрологическому, модулю управления.

ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

2.1. Параметры состояния системы расплава-кристалл

Для термодинамики важное значение имеют термические явления. В случае термических взаимодействий между системой и окружающей средой количество теплоты (*работа «термических сил»* или *«термическая работа»*) определяется с помощью выражения

$$dA_t = TdS, \quad (2.1)$$

где dA_t – элементарное количество теплоты, Дж или ккал;

T – абсолютная температура, определяемая по шкале Кельвина, °К; S – энтропия, Дж/°К, или ккал/°К.

Выражение (2.1) впервые было введено в термодинамику Р. Клаузиусом в 1865 г. и получило наименование *уравнения второго начала термодинамики*.

Из приведенных примеров видно, что для различных явлений, изучаемых в термодинамике с количественной стороны, устанавливается единая форма выражения работы (количества воздействия). Соответствующую формулу, определяющую обобщенную работу любого рода, можно записать в следующем виде:

$$dA = PdE, \quad (2.2)$$

где dA – элементарная (бесконечно малая) обобщенная работа; P – обобщенная физическая величина, которая объединяет в себе электрический потенциал φ , химический потенциал μ , абсолютную температуру T и т.д.; E – обобщенная физическая величина, которая объединяет в себе электрический заряд q , массу вещества m , энтропию S и т.д.

Формулой (2.2) определяется общее правило аналитического выражения обобщенной работы. Это правило может быть распространено на все без исключения формы движения материи и соответствующие им взаимодействия.

Единообразие формы выражения количественной меры взаимодействия системы и окружающей среды для самых разнородных явлений – механических, электрических, химических, тепловых и т.д. – не случайно и имеет глубокий внутренний смысл: в этом единообразии отражается единство природы окружающего нас материального мира.

Рассмотрим подробнее физический смысл величин P и E , входящих в выражение (2.2). Обобщенные физические величины P и E , объединяемые правилом (2.2), играют в термодинамике принципиально различную роль. Начнем с изучения величины E .

Анализ показывает, что взаимодействие любого рода между системой и окружающей средой в общем случае может быть сопоставлено с процессом изменения величины E системы. Это непосредственно следует из того, что в уравнение (2.2) обобщенная величина E входит под знаком дифференциала, то есть для количественной меры взаимодействий существенными являются не сами значения величины E , а лишь её изменения dE .

На основании изложенного, обобщенная физическая величина E , изменение которой служит признаком наличия взаимодействия определенного рода, называется *фактором экстенсивности* или *координатой состояния системы*. Ее именуют также *обобщенным зарядом*.

Каждому роду взаимодействия системы и окружающей среды соответствует изменение одного вполне определенного фактора экстенсивности. Число факторов экстенсивности, которые одновременно могут изменяться в системе, определяется числом ее внешних степеней свободы.

Если свойства системы допускают появление и изменение в ней некоторой формы важной в термодинамическом отношении, то это должно означать, что система располагает соответствующей *внутренней* (заложенной в самой ее структуре) *степенью свободы*.

Например, всем телам доступна наиболее примитивная форма движения материи — перемещение в пространстве. Любым телам присуща также термическая форма движения материи. Это означает, что все тела располагают внутренними степенями свободы, связанными с перемещением в пространстве и термическими взаимодействиями (структура любой системы допускает взаимодействия, связанные с перемещением в пространстве, а также с нагревом и охлаждением тел).

Число внутренних степеней свободы равно числу форм движения материи, характерных для данной системы. В общем случае у системы, обладающей m важными в термодинамическом отношении формами движения, число внутренних степеней свободы также равно m .

Число связанных степеней свободы l , как и общее число степеней свободы m , зависит от конкретных свойств системы. С изменением условий, в которых находится система, величины l и m могут изменяться.

Наличие связей между внутренними степенями свободы позволяет аналитически отобразить состояние системы, так как каждая функция состояния однозначно определяется факторами экстенсивности E (обобщенными зарядами). В соответствии с этим всегда можно составить такие уравнения, в которых аргументами будут служить факторы экстенсивности E , а функциями — функции состояния.

Если в уравнении фактор интенсивности P (обобщенный потенциал) связан с факторами экстенсивности E (обобщенными зарядами), то оно носит название *уравнения состояния*; если уравнением осуществляется связь между внутренней энергией и параметрами P и E , то оно именуется *калорическим уравнением состояния*.

Уравнение состояния для двух связанных внутренних степеней свободы ($m = 2$) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= f_1(e_1; e_2); \\ P_2 &= f_2(e_1; e_2). \end{aligned} \right\}$$

Продифференцировав эти уравнения по x , имеем:

$$\frac{dP_1}{dx} = \frac{\partial P_1}{\partial e_1} \cdot \frac{de_1}{dx} + \frac{\partial P_1}{\partial e_2} \cdot \frac{de_2}{dx},$$

$$\frac{dP_2}{dx} = \frac{\partial P_2}{\partial e_1} \cdot \frac{de_1}{dx} + \frac{\partial P_2}{\partial e_2} \cdot \frac{de_2}{dx}.$$

Умножим первое уравнение на коэффициент L_{11} , второе на L_{22} :

$$\left. \begin{aligned} L_{11} \frac{dP_1}{dx} &= L_{11} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} \cdot \frac{de_1}{dx} + L_{11} \frac{\partial P_1}{\partial e_2} \cdot \frac{de_2}{dx}; \\ L_{22} \frac{dP_2}{dx} &= L_{22} \frac{\partial P_2}{\partial e_1} \cdot \frac{de_1}{dx} + L_{22} \frac{\partial P_2}{\partial e_2} \cdot \frac{de_2}{dx}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Левая часть первого уравнения определяет полный поток заряда e_1 в системе, левая часть второго уравнения – поток заряда e_2 , т.е.

$$j_1 = -L_{11} \frac{dP_1}{dx};$$

$$j_2 = -L_{22} \frac{dP_2}{dx}.$$

Если градиент второго потенциала равен нулю $\left(\frac{dP_2}{dx} = 0\right)$, то второго потока нет, а в первой формуле выражения (2.3) слагаемое $\frac{\partial P_1}{\partial e_1} \frac{de_1}{dx}$ представляет собой силу X_1 , для первого потока:

$$X_1 = -\frac{\partial P_1}{\partial e_1} \cdot \frac{de_1}{dx}.$$

Аналогичным образом при отсутствии первого потока из второй формулы выражения (2.3) получим:

$$X_2 = -\frac{\partial P_2}{\partial e_2} \cdot \frac{de_2}{dx}.$$

Из выражений для X_1 и X_2 находим производные:

$$\frac{de_1}{dx} = -\frac{X_1}{\frac{\partial P_1}{\partial e_1}};$$

$$\frac{de_2}{dx} = -\frac{X_2}{\frac{\partial P_2}{\partial e_2}}.$$

Подставляем найденные величины в формулу (2.3):

$$\left. \begin{aligned} j_1 &= L_{11}X_{11} + L_{12}X_2; \\ j_2 &= L_{21}X_1 + L_{22}X_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$L_{12} = L_{11} \frac{\frac{\partial P_1}{\partial e_2}}{\frac{\partial P_2}{\partial e_2}};$$

$$L_{21} = L_{22} \frac{\frac{\partial P_2}{\partial e_1}}{\frac{\partial P_1}{\partial e_1}}.$$

Уравнения (2.4) определяют с количественной стороны процессы *переноса зарядов* в системе с двумя связанными внутренними степенями свободы. Они по существу являются *кинетическими уравнениями состояния* такой системы. В термодинамике необратимых процессов их именуют еще *термодинамическими уравнениями движения* или *линейными уравнениями переноса*.

Из формул (2.4) видно, что они отражают зависимость любого данного потока от всех сил. Причина этой зависимости, как теперь ясно, заключается в тех связях, которыми располагают внутренние степени свободы данной системы. Из предыдущего следует, что *общее число кинетических уравнений состояния (переноса) равно числу l связанных внутренних степеней свободы системы*. Этот вывод имеет принципиальное значение, так как не учет какой-либо из степеней свободы может привести к неправильным заключениям о характере взаимного влияния различных потоков.

Коэффициенты L_{11} и L_{22} в уравнениях переноса (2.4) представляют собой обычные проводимости системы: L_{11} – коэффициент проводимости по отношению к первому обобщенному заряду, L_{22} – коэффициент проводимости по отношению ко второму обобщенному заряду. Это могут быть коэффициенты теплопроводности, электропроводности, диффузии и т.д. Коэффициенты L_{12} и L_{21} характеризуют взаимное влияние потоков в системе: коэффициент L_{12} определяет влияние второго потока (второй силы X_2) на величину первого потока, коэффициент L_{21} – влияние первого потока (первой силы X_1) на величину второго потока. Коэффициенты L_{12} и L_{21} были названы К. Эккартом *коэффициентами увлечения*.

Л. Онзагером был сформулирован принцип микроскопической обратимости (этот принцип рассмотрен в конце параграфа). С его помощью методами статистической механики было установлено, что для линейных уравнений (2.4) справедливо следующее соотношение:

$$L_{12} = L_{21}. \quad (2.5)$$

Это равенство называется *соотношением взаимности Онзагера*.

Справедливость соотношений взаимности (2.5) термокинетики может быть легко доказана на основе макрофизических соображений путем использования соотношений взаимности термостатики.

Действительно, в линейных уравнениях переноса (2.4)

$$L_{12} = L_{11} \frac{A_{12}}{A_{22}},$$

и

$$L_{21} = L_{22} \frac{A_{21}}{A_{11}}.$$

Для каждой из степеней свободы получаем:

$$L_{11} = -\frac{dx}{d\tau F} \frac{1}{\left(\frac{\partial P_1}{\partial e_1}\right)_{e_2}},$$

и

$$L_{22} = -\frac{dx}{d\tau F} \frac{1}{\left(\frac{\partial P_2}{\partial e_2}\right)_{e_1}}.$$

Заменяя, в данном случае, производные их значениями A_{11} и A_{22} и подставив полученные результаты в предыдущие формулы, получим

$$L_{12} = -\frac{dx}{d\tau F} \frac{A_{12}}{A_{11}A_{22}},$$

и

$$L_{21} = -\frac{dx}{d\tau F} \frac{A_{21}}{A_{11}A_{22}}.$$

Приняв во внимание соотношения взаимности получаем

$$L_{12} = L_{21},$$

что и требовалось доказать.

Как видим, соотношения взаимности термокинетики есть, в конечном итоге, следствие дифференциальных соотношений термодинамики. Оттуда же вытекает и принцип микроскопической обратимости Л. Онзагера.

Соотношениями взаимности утверждается равенство перекрестных коэффициентов, которые определяют взаимное влияние потоков. Для иллюстрации количественной стороны взаимного влияния различных потоков продифференцируем линейные уравнения (2.4): первое по X_2 при постоянной силе X_1 и второе по X_1 при постоянной силе X_2 , имеем:

$$\left(\frac{\partial j}{\partial X_2} \right)_{X_1} = L_{12} ;$$

$$\left(\frac{\partial j_2}{\partial X_1} \right)_{X_2} = L_{21} .$$

Отсюда на основе соотношений взаимности (2.5) получаем

$$\left(\frac{\partial j_1}{\partial X_2} \right)_{X_1} = \left(\frac{\partial j_2}{\partial X_1} \right)_{X_2} .$$

Приращение потока обобщенного заряда j_1 , отнесенное к единице приращения силы X_2 , равно приращению потока заряда j_2 , отнесенному к единице приращения силы X_1 .

В случае распространения термического заряда (энтропии) в анизотропном кристалле из соотношений взаимности следует, что градиент температуры в 1° на 1м вдоль оси x вызывает такой же поток термического заряда в направлении оси y , какой температурный градиент в 1° на 1м вдоль оси y вызывает в направлении оси x .

2.2. Зарождение и рост монокристаллов кремния

Современное представление о процессе кристаллизации основывается на данных молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики равновесных и неравновесных процессов (физической кинетике).

Система кристалл-материнская фаза (жидкость или пар) представляет собой пространство, занимаемое атомами (молекулами), находящимися в постоянном движении и взаимодействии. При температуре плавления плоская граница кристалла с материнской фазой находится в динамическом равновесии. Это значит, что количество атомов, присоединяющихся к твердой фазе, равно количеству атомов, уходящих в материнскую фазу. Фазовое превращение (1-го рода) без создания границы раздела немислимо.

Создание границы раздела и ее движение в сторону материнской фазы (либо в противоположную сторону – плавление или растворение) связано со скачком потенциальной энергии или работой перехода атомов из одной фазы в другую.

Работа образования границы раздела с поверхностью s определяется как

$$F = \sigma s,$$

где σ – поверхностное натяжение или работа, необходимая для создания единицы поверхности.

При постоянном давлении свободная энергия каждой из фаз определяется из соотношения

$$F_i = U_i - TS_i,$$

где U_i – внутренняя энергия фазы; S_i – энтропия; F_i – та часть энергии, которой могут обмениваться различные фазы.

В равновесии свободной энергии равно нулю ($\Delta F=0$). Фазовое превращение происходит так, что система переходит в состояние с меньшей свободной энергией, причем изменение свободной энергии, приходящейся на атом, определяется разностью химических потенциалов ($\Delta\mu_i$). При этом

$$\mu = \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right)_i.$$

Изменение свободной энергии при переходе атомов из материнской фазы в кристалл, происходящее без изменения границы раздела, а только вследствие переохлаждения, определяется как

$$\Delta F' = F'_1 - F'_2 = \frac{L\Delta T}{T_S}, \quad (2.6)$$

где $\Delta T = T_S - T$ – переохлаждение; L – теплота перехода.

С учетом образования границы раздела в виде сферической оболочки S :

$$\Delta F = \frac{V\rho}{M}(F'_1 - F'_2) - \sigma S, \quad (2.7)$$

где V – объем; M – молекулярная масса; ρ – плотность.

Чтобы переход был термодинамически выгодным, радиус возникшего кристалла должен быть больше некоторого критического размера:

$$r^* = \frac{2\sigma MT_S}{\rho L\Delta T}. \quad (2.8)$$

Это и есть радиус критического зародыша, то есть такого образования новой фазы, которая может находиться в равновесии с окружающей материнской фазой в переохлажденном состоянии. Следует обратить внимание на то, что при температуре плавления в равновесии могут находиться фазы только с плоской границей раздела ($r^* \rightarrow \infty$).

Подставляя выражение (2.8) в формулу (2.7), можно найти работу образования зародыша новой фазы, сферической или кубической формы:

$$\Delta F = \frac{1}{3}\sigma s.$$

Соотношение для радиуса критического зародыша можно получить и другим способом – используя известную формулу Томсона:

$$\ln \frac{p_r}{p_{\sim}} = \frac{2M\sigma}{RT\rho r},$$

откуда

$$r^* = \frac{2M\sigma}{RT\rho \ln \frac{p_r}{p_{\sim}}}, \quad (2.9)$$

где R – универсальная газовая постоянная; p_{\sim} и p_r – соответственно парциальные давления атомов материнской фазы над плоской и искривленной поверхностью (для критического зародыша $p_r = p$, где p – парциальное давление в материнской фазе).

При выводе формулы (2.9) использовано следующее соотношение:

$$\Delta F'' = RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.10)$$

Изменение свободной энергии связано с изменением парциального давления при изотермическом процессе. Ввиду того, что парциальное давление пропорционально концентрации в растворах, размер критического зародыша, образовавшегося в твёрдом или жидком растворе, определится из соотношения

$$r^* = \frac{2\sigma M}{\rho RT \ln \frac{c}{c_{\sim}}}. \quad (2.11)$$

Если в однокомпонентной материнской фазе имеются два сферических кристалла с радиусами $r_1 \leq r_2$, то при данной температуре кристалл меньшего радиуса уже не будет устойчивым, так как у его поверхности парциальное давление будет больше, хотя температура везде остается одинаковой.

Условия (2.6) и (2.10) приводят к важному выводу, что равновесие определяется не только переохлаждением, а и кривизной границы раздела. Это зна-

чит, что истинное равновесие с минимумом свободной энергии возникает в случае плоской границы раздела и при отсутствии переохлаждения.

Если система переохлаждена, в равновесии с материнской фазой могут находиться зародыши критического размера. В этом случае система находится в метастабильном равновесии, а избыток свободной энергии определяется соотношением

$$\Delta F_i = RT \ln \frac{p}{p_{\sim}} = \frac{2\sigma M}{\rho r^*}. \quad (2.12)$$

Равновесие кристалл-исходная фаза следует понимать как динамическое равновесие, состоящее из двух процессов. Первый из них – это отрыв и присоединение атомов непосредственно к поверхности кристалла. Кинетика этого процесса определяется энергией взаимодействия атомов в кристалле и кинетической энергией атомов окружающей среды.

Второй процесс определяет количество атомов выделяющейся фазы, сталкивающихся с поверхностью кристалла в единицу времени. Он также зависит от кинетической энергии движения атомов среды, но, кроме этого, он определяется скоростью выравнивания концентрационных и тепловых градиентов.

Каждый из этих процессов может стать лимитирующим звеном, а кривизна границы раздела в данном случае является своеобразным «регулятором», обеспечивающим равновесие.

Действительно с понижением температуры увеличивается кривизна поверхности зародыша из-за того, что энергия, необходимая для удержания атомов на поверхности, уменьшается. Одновременно увеличивается и метастабильность системы.

Под степенью метастабильности понимают запас свободной энергии, которая превышает минимальную энергию при данной температуре. Переход в стабильное состояние может произойти только после преодоления некоторого потенциального барьера, определяемого энергией активации. Обычно чем больше метастабильность системы, тем меньше энергия активации.

При зарождении и росте кристаллов степень метастабильности можно определить по отношению парциального давления (концентрации) исходной фазы при данном переохлаждении к парциальному давлению над поверхностью кристалла:

$$\Delta F_i = RT \ln \frac{p}{p_r},$$

где p_r – давление над поверхностью кристалла радиуса r .

Если считать, что $\frac{L\Delta T}{T_S}$ – максимальная свободная энергия, которая может быть извлечена при данном переохлаждении из системы кристалл-жидкость, то выражение

$$\frac{L\Delta T}{T_S} - RT \ln \frac{p}{p_r} > 0$$

и покажет избыток свободной энергии системы, которая остается в ней при фазовом переходе.

Величина

$$K_0 = \frac{L\Delta T}{T_S RT \ln \frac{p}{p_r}} \geq 1, \quad (2.13)$$

является мерой завершенности фазового перехода.

Фазовый переход будет полностью завершенным если $K_0 = 1$. В противном случае избыток свободной энергии остается в системе в виде искривленных и сильно протяженных границ раздела. В процессе роста кристаллов при достаточно большом переохлаждении K_0 всегда больше единицы, и это обычно приводит к появлению неравновесных форм роста кристаллов.

Кристалл плавится, когда $K_0 < 1$, и находится в равновесии с окружающей материнской фазой, когда $K_0 = 1$.

Определение величины критического зародыша, проведенное Гиббсом и Кельвином на основании термодинамических расчетов, дает возможность судить лишь о работе, необходимой для создания одного кристалла, который с увеличением размера приводит к уменьшению суммарной свободной энергии системы.

Механизм образования такого зародыша с точки зрения молекулярно-кинетической теории был описан Фольмером, Странским, Френкелем, Каитшевым и др. Согласно этим представлениям предполагается, что в газе или в жидкости имеются флуктуации, по структуре и плотности близкие к твердому кристаллическому веществу. Вероятность образования флуктуации:

$$P = P_0 e^{-\frac{A}{RT}}.$$

Скорость образования центров с учетом вязкости жидкости равна

$$v = K_1 e^{-\frac{A}{RT}} e^{-\frac{U}{RT}},$$

Где A – работа образования зародыша; U – энергия активации перемещения атомов; K_1 выводится путем сложных расчетов и примерно соответствует числу ударов молекул о границу раздела.

Если не учитывать зависимости скорости роста от вязкости материнской фазы, то скорость зарождения определяется следующим соотношением [11]:

$$\left. \begin{aligned} u &= K_1 e^{-\frac{B\sigma^3}{T(\Delta T)^2}}; \\ B &= 32 \left(\frac{M}{\rho} \right)^2 T_3^2 \frac{1}{L^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

2.3. Влияние условий выращивания на качество монокристаллического кремния

При соприкосновении затравки с расплавом в ней в результате термоудара возрастает плотность дислокаций. Это увеличение плотности дислокаций тем больше, чем больше сечение затравки. Так, например, при изменении сечения затравки от 2×2 до 12×12 мм плотность дислокаций в зоне термоудара при бестигельной зонной плавке изменяется от $1,5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^6$ см⁻². (Исходная плотность дислокаций в затравках была примерно одинаковой и составляла $3 \cdot 10^3 \div 9 \cdot 10^3$ см⁻²). Протяженность зоны термоудара также изменяется при увеличении сечения затравки. Повторное затравление не приводит к дополнительному увеличению плотности дислокаций.

Угол разрастания слитка от затравки до заданного диаметра влияет на плотность дислокаций. Проведенные эксперименты показали, что изменению угла разрастания от 10° до 70° при использовании затравки сечением 3×3 мм приводит к изменению плотности дислокаций на $1 \div 2$ порядка (от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5$ см⁻²). Помимо влияния на общую плотность дислокаций, изменение угла разрастания («конуса») сказывается также на равномерности распределения дислокаций.

На практике угол «конуса» выбирают в зависимости от требований к плотности дислокаций и экономических соображений.

Изменение тепловых условий установок для выращивания может, не меняя общей закономерности, существенно изменить конкретные значения оптимального угла разрастания слитка [11].

Использование затравок малого сечения приводит к уменьшению количества дислокаций, прорастающих в монокристалл при затравлении. Однако при уменьшении сечения затравки существенную роль начинает играть ее механическая прочность.

Дэш показал, что, выращивая на затравке с большой скоростью длинную тонкую шейку, можно добиться выхода дислокаций на поверхность шейки и в

дальнейшем получать бездислокационные монокристаллы. Практика работы подтвердила выводы Дэша.

Используя метод «тонких шеек» при бестигельной зонной плавке, а также по Чохральскому, можно получить бездислокационные монокристаллы кремния достаточно большого диаметра и длины. Однако вырастить бездислокационные монокристаллы удастся далеко не в каждой тепловой системе.

Попадание на фронт кристаллизации мельчайших примесей-частиц при выращивании бездислокационных слитков может оказаться достаточным для зарождения и развития дислокаций.

Изучение внешнего вида бездислокационных монокристаллов показало, что они имеют кривизну. Эта кривизна, как правило, мало заметна для монокристаллов, выращенных по методу Чохральского, и отчетливо видна на монокристаллах бестигельной зонной плавки. Кривизна обычно возникает уже в конусной части слитка. В области выхода на диаметр на поверхности бестигельных монокристаллов появляется четкий «бугор». От бугра начинается «гребень» – выступающая узкая площадка, идущая вдоль слитка, причем именно бездислокационная часть слитка характеризуется наличием такого гребня.

Появление дислокаций в слитке соответствует месту исчезновения гребня. Закономерностей в распределении гребня в зависимости от места выхода явных и неявных граней не замечено.

В случае, когда бездислокационные монокристаллы выращивали бестигельной зонной плавкой без вращения растущей части, гребень, как правило, появлялся на поверхности слитка, противоположной выходу ножек индуктора.

Большинство исследователей связывает процесс образования больших концентраций дислокаций в кристаллах с температурными градиентами, которые приводят к неравномерному сжатию отдельных участков кристалла.

Искривление поверхности раздела жидкое–твердое вызывает сжатие холодным периферийным кольцом горячей сердцевины. При этом напряжения могут превысить предел упругости, и произойдет пластическая деформация. В результате пластической деформации может образоваться высокая плотность

дислокаций и других несовершенств. Биллинг, Беннетт и Соьер, Дорендорф и другие изучили основные закономерности влияния температурных градиентов на совершенство монокристалла.

Пенинг [11] рассчитал полярную диаграмму сдвиговых напряжений, возникающих в слитке вследствие температурных градиентов. Совпадение картины распределения напряжений с макрокартиной распределения дислокаций было исключительно хорошим. Это подтверждает, что образование дислокационных линий скольжения связано с напряжениями в слитке. В зависимости от того, выпуклый или вогнутый фронт кристаллизации, горячая сердцевина монокристалла будет расширяться или сужаться. С учетом этого факта, а также того, что форма фронта под влиянием различных факторов изменяется, в монокристалле могут возникать различные по распределению и величине напряжения. Следствием этого является, по-видимому, наблюдаемое разнообразие в распределении дислокаций. Так, например, с использованием поляризационного метода удалось установить, что в монокристаллах с распределением дислокаций «по периферийному кольцу» напряжение в поверхностном слое достаточно высокое.

Для выявления формы фронта кристаллизации широко применяют следующие методы:

1. Выявление формы фронта кристаллизации с помощью *p-n*-перехода. В этом случае в кремний, например *n*-типа, вносят примесь бора, чтобы получить *p-n*-переход между кристаллом *n*-типа и расплавом *p*-типа. Область *p-n*-перехода выявляется травлением.

2. Метод «отрыва» растущего кристалла от расплава. Этот метод заключается в том, что в определенный выбранный момент времени резко увеличивают скорость перемещения слитка – происходит отрыв кристалла от поверхности расплава. Чем выше скорость отрыва, тем более точно поверхность отрыва отражает фронт кристаллизации. Недостаток этого метода – то, что к части поверхности всегда пристает затвердевающая капля. Кроме того, небольшое количество жидкости может удерживаться поверхностным натяже-

нием на других частях поверхности, искажая истинную структуру поверхности отрыва. При бестигельной зонной плавке применяют разновидность этого метода – зона резко «выдувается» направленным потоком инертного газа.

3. Метод анодного травления. Метод основан на разной степени травимости участков слитка с различным содержанием примеси. В качестве электролита используют раствор щелочи или смесь плавиковой и уксусной кислот. Анодом служит сам образец, катодом – никелевая пластина. Перед травлением образцы шлифуют микропорошками. Во время электролитического травления образцы и электролит часто разогреваются, при этом выявляемость резко ухудшается. С целью устранения этого явления травление проводят в импульсном режиме.

Иногда удается также выявить фронт кристаллизации обычным химическим глубоким травлением в смеси плавиковой и хромовой кислот. Сопоставление форм фронта кристаллизации, выявленных описанными методами для одних и тех же слитков, показало хорошее соответствие.

Метод анодного травления широко используют также для выявления неоднородностей в распределении примесей. Для этих же целей широко применяют также метод замера удельного сопротивления в точках.

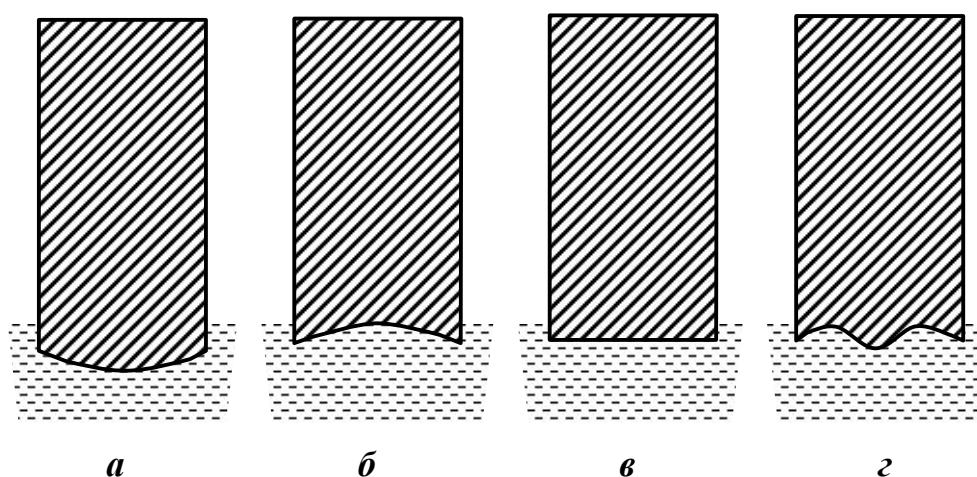


Рис. 2.1. Форма фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов кремния по методу: а, б, в – Чохральского; г – бестигельной зонной плавки

Исследования показали, что для монокристаллов кремния, полученных по методу Чохральского, наиболее характерны формы фронта кристаллизации, приведенные на рис. 2.1, а÷в. На рисунке представлены лишь схемы фронта. В действительности фронт кристаллизации ограничен не плавной, а ступенчатой поверхностью. Часто на фронте кристаллизации (для случаев а,б,г на рис. 2.1) можно наблюдать плоские участки разной протяженности.

Кроме этого, в отдельных случаях на фронте кристаллизации образуются макро– и микровпадины, выступы и т.д.

При выращивании монокристаллов бестигельной зонной плавкой форма фронта кристаллизации довольно сложная (см. рис. 2.1, г). С изменением скорости прохода зоны форма фронта кристаллизации существенно меняется. По длине монокристалла форма фронта кристаллизации также меняется, но с увеличением скорости прохода значительно меньше.

Форма фронта кристаллизации существенно влияет на распределение и плотность дислокаций в монокристалле. Анализ условий выращивания большого количества монокристаллов кремния с дислокационными малоугловыми границами группы *a* показал, что их появление наблюдается, как правило, при вогнутом в сторону затравки фронте кристаллизации.

Влияние кривизны формы фронта кристаллизации на плотность дислокаций хорошо иллюстрируется на рис. 2.2.

Для получения малой плотности дислокаций стремятся вести процесс выращивания с поддержанием плоского фронта кристаллизации. Однако в случае, когда удается получить бездислокационную верхнюю часть растущего кристалла, при дальнейшем выращивании даже значительные отклонения от плоского фронта могут и не приводить к образованию дислокаций.

Механизм роста монокристаллов из расплава, на первый взгляд, кажется гораздо проще, чем рост из газовой среды. Действительно в данном случае совершенно не приходится учитывать роль химических реакций, связанных с

получением атомов кремния, и поэтому, казалось бы, задача о росте кристалла целиком сводится к решению простейшей задачи о теплоотводе.

Однако в действительности условия выращивания монокристаллов оказались настолько сложными, что до самого последнего времени в литературе трудно найти хоть сколько-нибудь обобщающую попытку описать механизм присоединения атомов на фронте кристаллизации.

В методах Чохральского и бестигельной зонной плавки кристалл выращивается так, что у фронта кристаллизации имеется очень узкая зона жидкости с температурой меньше температуры плавления. Остальная жидкость перегрета. В переохлажденной зоне температура на фронте кристаллизации, повидимому, не снижается больше, чем на 1 град ниже температуры плавления. Такие «жесткие» условия приводят к значительным относительным колебаниям переохлаждения в различных участках фронта кристаллизации. В практике для роста достижения более или менее устойчивого процесса роста кристалл и тигель с расплавом непрерывно вращают в противоположные стороны.

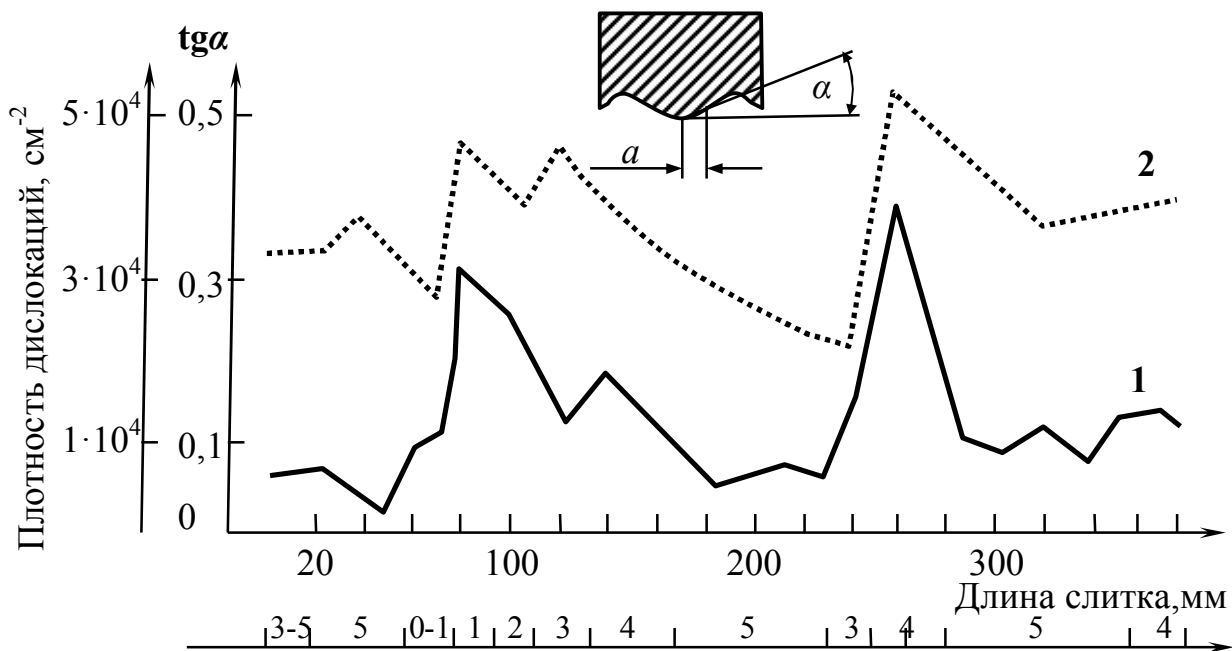


Рис. 2.2. Влияние кривизны формы фронта кристаллизации на плотность дислокаций при бестигельной зонной плавке: 1 — кривизна границы раздела, определяемая $\operatorname{tg} \alpha$; 2 — плотность дислокаций

Конфигурация фронта может быть изменена в зависимости от скорости выращивания и в некоторой степени скорости вращения.

Несмотря на столь сложные условия, нет сомнения, что и здесь действуют те же механизмы роста, которые были рассмотрены в предыдущих главах. Определение их сочетания затрудняется тем, что кристалл и жидкость вращаются друг относительно друга и условия роста каждой точки поверхности раздела в течение определенного промежутка времени меняются. В работе [11] эта особенность кристаллизации по методу Чохральского была особенно хорошо описана. В соответствии с этой работой основная причина, вызывающая необходимость вращения кристалла и жидкости, – асимметрия теплового поля. Без вращения кристалл растет в сторону менее нагретой жидкости, и форма его искажается.

На рис. 2.1 представлены различные формы границы раздела, встречающиеся в процессе выращивания монокристаллов этими методами. Каков же механизм роста в каждой точке представленных поверхностей?

Если исходить из принципа, что осуществляется тот механизм роста, который обеспечивает наибольшую скорость роста, а в качестве параметра взять k и ΔT (считая ΔT малым), то поставленный выше вопрос можно решить вполне однозначно. При этом кристалл может и не успеть принять кривизну границы раздела, обеспечивающую максимальную скорость роста.

Прежде чем перейти к сравнению скоростей роста, определяемых тем или другим механизмом роста, выясним физический смысл кривизны раздела на границе кристалл-жидкость, которая определяется радиусом кривизны, входящим в формулу Томсона

$\left(\ln \frac{p}{p_{\sim}} = \frac{2\sigma M}{\rho R T r_0} \right)$, формулы для определения критического радиуса зародыша и др. Фронт кристаллизации в рассматриваемых методах кристаллизации может иметь отрицательную кривизну.

Для расчета скорости роста решающего значения не имеет. Дело в том, что величина искривления границы раздела вводится для определения изменения величины парциального давления либо изменения свободной энергии в

сравнении с парциальным давлением и свободной энергией плоской поверхности:

$$\ln \frac{p}{p_{\sim}} = \frac{2\sigma M}{\rho R T r} ; \quad \Delta F = R T \ln \frac{p}{p_{\sim}} = \frac{2\sigma M}{\rho r} .$$

С другой стороны, изменение свободной энергии системы зависит от величины поверхности:

$$\Delta F = \sigma \Delta s = \frac{2\sigma M}{\rho r} .$$

Следовательно, величина $2M / \rho r = \Delta s = s_r = s_{\sim}$, но Δs является разницей между плоской поверхностью, составленной из моля атомов, и искривленной ступенчатой поверхностью из тех же атомов. Это можно представить в виде схемы, представленной на рис. 2.3.

Рис. 2.3,а представляет собой плоский слой n^2 элементарных ячеек с ребром a_0 и общей поверхностью $2s_{\sim} + 4n a_0^2$. Предполагаем, что при искривлении поверхности ступени будут иметь высоту ребер, равную элементарной ячейке. Ввиду того, что количество ячеек остается тем же, то искривленную, вписанную в сферу радиуса r поверхность можно представить схемой (рис.2.3,б). В разрезе эта поверхность представлена на рис. 2.3,в. Как видно из этих схем, исходная поверхность осталась неизменной; суммарная же поверхность увеличилась вследствие обнажения боковых сторон элементарных ячеек ($a^2 n_1$), которые выдвинулись из базисного слоя. Изменение величины поверхности в результате искривления:

$$\Delta s = 2s_{\sim} + 4n a^2 + A a^2 n_1 - 2s_{\sim} - 4n a^2 = A a^2 n_1 . \quad (2.15)$$

Коэффициент A означает, что одновременно образовались равные по величине поверхности снаружи и изнутри слоя первоначальных элементарных ячеек.

Таким образом, независимо от того, куда направлена кривизна поверхности кристалла, изменение свободной энергии, связанное с этим, всегда положительно.

Изменение парциального давления над твердым телом также определяется не знаком кривизны, а количеством ослабленных связей, приходящихся на единицу искривленной поверхности. Зависимость парциального давления от кривизны границы раздела для твердого тела следует рассматривать как некоторое приближение. Оно связано с появлением ступенчатости, так как искривленную поверхность твердого тела в другом виде представить невозможно. Действительно, если на плоской поверхности, граничащей с жидкостью, находится группа атомов или один атом, не связанные в элементарную ячейку (представительница твердой фазы), то эту группу атомов или одиночный атом с гораздо большим основанием следует отнести к жидкой фазе. На поверхности с большой кривизной силы взаимодействия между атомами, находящимися на поверхности кристалла по высоте могут приближаться к межатомному расстоянию кристаллической решетки. Это, по-видимому, и обуславливает возможность нормального роста кристалла–атом жидкой фазы может присоединиться в любой, достаточно охлажденной точке поверхности кристалла.

Приведенные выше рассуждения, естественно, нельзя применить к границе жидкость–пар (при достаточно высокой температуре), потому что искривленная поверхность жидкости состоит из ступеней атомарного размера и, следовательно, отрицательная кривизна увеличивает силы сцепления соседних атомов.

Таким образом, главный вывод, вытекающий из этих рассуждений, сводится к тому, что все ранее сделанные теоретические выводы действительны и для вогнутой и для выпуклой границ раздела кристалл–жидкая фаза.

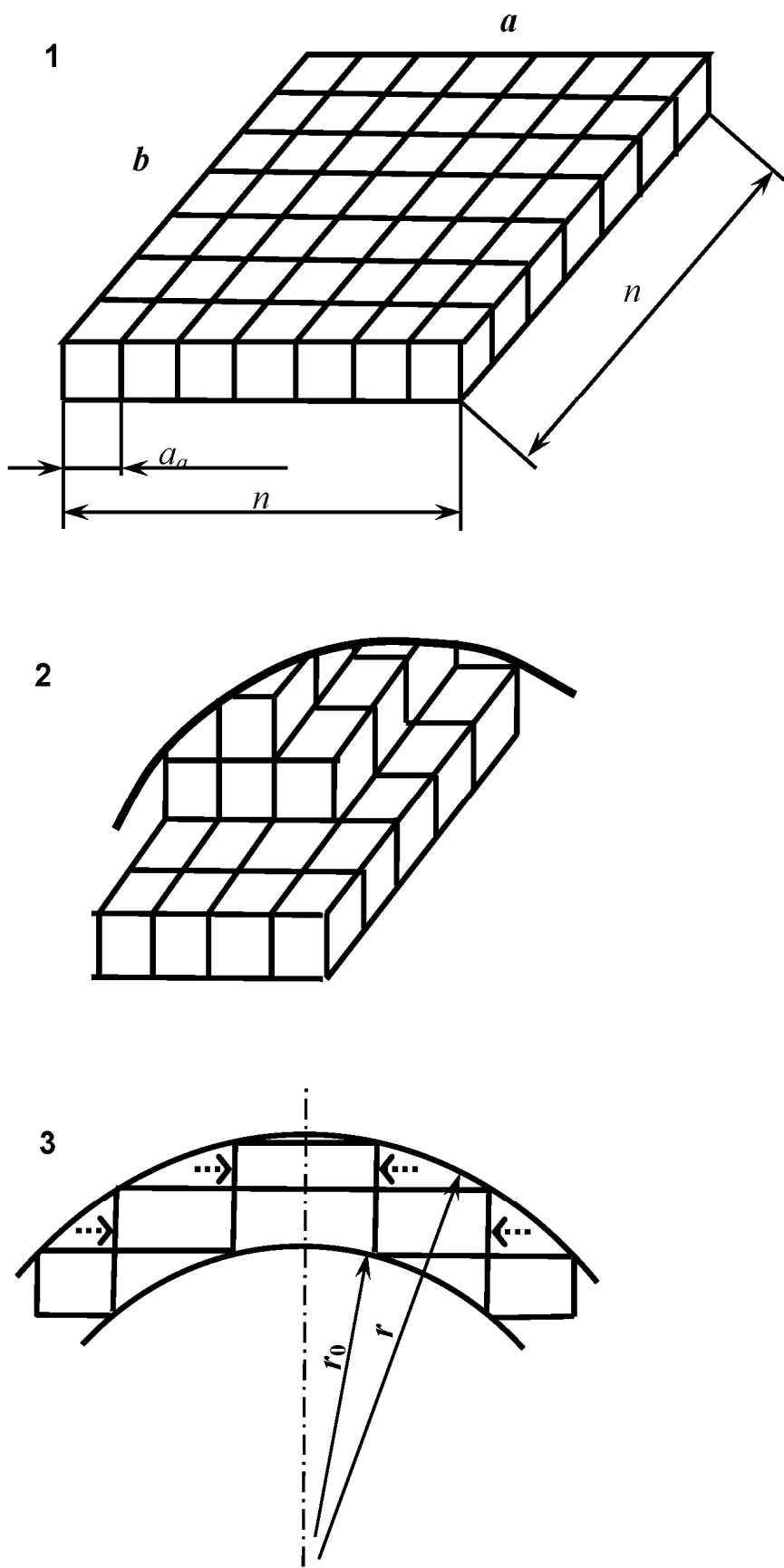


Рис. 2.3. Схема поверхности раздела

Отметим еще один важный момент в анализе роста поверхностей различной кривизны. Искривление границы раздела приводит к увеличению свободной энергии системы не только из-за возникновения дополнительной поверхности. В тех случаях, когда переохлаждение становится достаточно большим, на фронте кристаллизации могут появляться поверхности с увеличенным поверхностным натяжением. Однако изменение поверхностного натяжения на фронте кристаллизации, по-видимому, приводит к скачкообразным изменениям свободной энергии, в результате чего появляются значительные нарушения структуры поверхности. Во всяком случае в кристаллах со структурой алмаза для этого необходимы значительные переохлаждения.

Перейдем теперь к определению основного механизма роста при выращивании монокристаллов методом Чохральского или бестигельной плавки.

Отношение скорости роста по нормальному механизму к скорости роста, определяемой послойным механизмом, сводится к следующему:

$$\left. \begin{aligned} \frac{u_n}{u_n} &= \frac{4}{3} \frac{a_1}{r(k-2)\Delta T_1} ; \\ \frac{k^2 + 4}{k + 2} &\approx \frac{4}{3} . \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

В этом соотношении $a = \frac{2\sigma MT_s}{\rho L}$ для определения величины a необходимо знать поверхностное натяжение на границе кристаллического кремния и его расплава. В работе [11] приводится формула, подтвердившаяся при определении поверхностного натяжения на границе кристалл-расплав для многих элементов:

$$\sigma = \frac{L\rho}{2M} r' ,$$

где r' – половина параметра элементарной ячейки кристаллографической решетки элемента.

Подставляя в эту формулу $r' = 2.7 \cdot 10^{-10}$ м и соответственно значения других величин, получим

$$\sigma \approx 500 \text{ Дж/м}^2.$$

Эта величина оказалась больше значения, полученного расчетным путем, $\sigma \approx 108 \text{ Дж/м}^2$. Однако сопоставление с данными работы [11], где приведены экспериментальные и расчетные значения σ , полученные с помощью использованной нами формулы, показывают, что $\sigma \approx 500$ – более достоверная величина, хотя бы из тех соображений, что теплота кристаллизации кремния гораздо больше теплоты кристаллизации любого из приведенных в работе веществ.

Соотношение скоростей роста при послойном и двумерном механизме дает следующее выражение:

$$\frac{u_n}{u_\partial} = \frac{a_1}{\Delta T \left(r_1 - \frac{a_1}{\Delta T} \right)} = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{\Delta T \left(r_1 - \frac{5 \cdot 10^{-7}}{\Delta T} \right)} = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{r_1 \Delta T - 5 \cdot 10^{-7}}. \quad (2.17)$$

Следовательно, для больших r рост идет преимущественно по механизму образования двумерного зародыша. При прочих равных условиях с уменьшением переохлаждения и малых r_1 сначала осуществляется послойный рост, а затем при очень малых переохлаждениях возможен и нормальный рост.

Следует, однако, помнить, что все приведенные выше рассуждения справедливы для роста кристаллов с радиусом кривизны, отличным от радиуса, обеспечивающего максимальную скорость роста (r_m). Для роста с постоянным радиусом кривизны:

$$r_m \approx \frac{a_1}{\Delta T} + \frac{a_1}{\Delta T_1} \sqrt{1 + \frac{B'}{k-2}}. \quad (2.18)$$

При $r_1 > \frac{1 \cdot 10^{-4}}{\Delta T_1}$ осуществляется рост с образованием двумерного за-

родыша. Если учесть зависимость $r_m(\Delta T)$, то с увеличением переохлаждения рост переходит в послойный, а затем и в нормальный.

Эта последовательность особенно хорошо соблюдается в тех направлениях роста, где поверхностное натяжение, входящее в константу a , мало.

Рассмотрим теперь основные особенности выращивания монокристаллов методом Чохральского и бестигельной зонной плавки и на основании изложенного попытаемся представить схему роста и объяснить экспериментальные данные.

Взаимодействие затравки и расплава

При внесении затравки в перегретую жидкость она несколько оплавляется и утончается до момента вытягивания, затем с началом вытягивания на нее накристаллизовывается расплав. Оглавление затравки и толщина, до которой она оплавляется, зависят от времени выдержки. При достаточно большой выдержке она приобретает форму полусферы и, наконец, может приобрести совсем малую кривизну границы раздела. В зависимости от кривизны границы раздела начальные стадии кристаллизации могут протекать с помощью различных механизмов роста: начиная с нормального – при большой кривизне границы раздела и кончая двумерным – при малой. Считается общепринятым, что если рост идет по нормальному механизму, поверхностные дефекты кристалла залечиваются, так как во время такого роста одиночные атомы присоединяются к любым точкам поверхности. Поэтому такие затравки, если они имеют дислокации, при условии $r < 7 \cdot 10^{-5} / (\sqrt{\Delta T_1} (k-2))$ не должны индуцировать дефекты в кристаллизующейся на них материал.

Структура фронта кристаллизации

Чаще всего в условиях производства в начале процесса вытягивания сочетаются послойный и двумерный рост, причем в нормальном направлении механизм роста двумерный, а в тангенциальном направлении – послойный. На рис. 2.4,а,б представлен рост монокристалла с выпуклым в сторону жидкости и вогнутым фронтом кристаллизации.

На рис. 2.4,в приведена структура границы раздела со сложным изгибом, который чаще всего встречается при выращивании кристаллов по методу бесстыгельной зонной плавки.

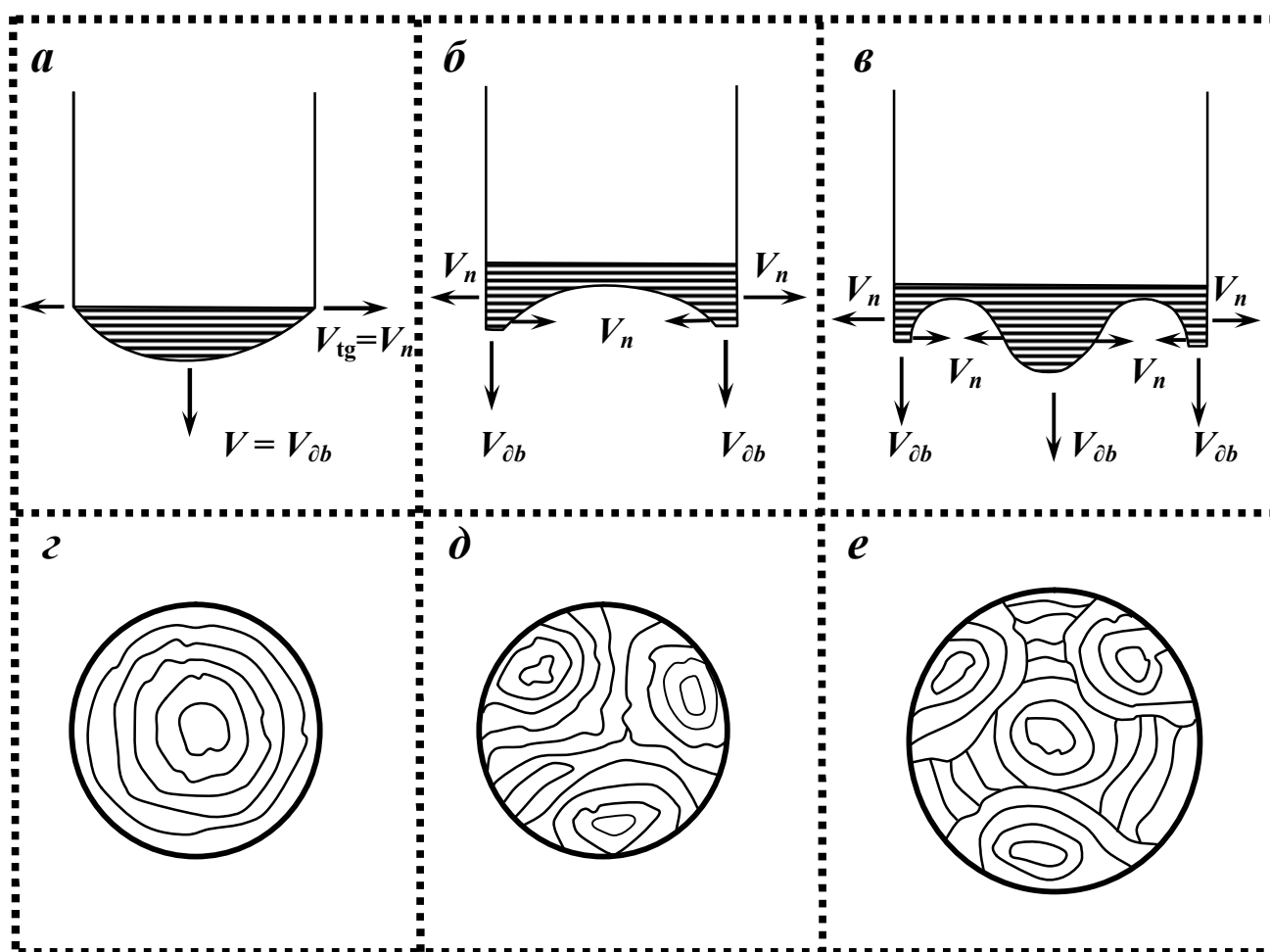


Рис. 2.4. Схема роста при выращивании монокристаллов из расплава:
а, б, в – продольный разрез; г, д, е – поперечный разрез

Для формы фронта, представленной на рис. 2.4,а рост может обеспечиваться образованием одного двумерного зародыша на выпуклой части кристалла; для формы, представленной на рис. 2.4,б – вследствие образования одного или нескольких зародышей на выступающем внешнем ободке кристалла, а для формы, представленной на рис. 2.4,в рост может осуществляться не меньше чем двумя зародышами. Один из них должен образовываться на внутренней выпуклой части, второй (или несколько) – на внешнем ободке. Распределение температуры на фронте определяется, с одной стороны, неодинаковым нагревом жидкости и кристалла. С другой стороны, это распределение усложняется, если происходит встречный тангенциальный рост зародышей. В вогнутых к жидкости участках фронта скапливается теплота кристаллизации, и эти места обычно сильно перегреваются. Естественно, что центральная часть выпуклой поверхности на рис. 2.4, а также может перегреваться.

Таким образом, в процессе роста различные участки поверхности кристалла претерпевают значительные колебания температуры. В плане картина роста представлена на рис. 2.4,г÷е. На рис. 2.4,д,е показан случай образования трех периферийных зародышей. Не исключено (особенно для случая на рис. 2.4, е), что их количество может отличаться от этой цифры.

Скорость роста от нормали при прочих равных условиях больше скорости тангенциального роста. Поэтому рост выпуклых частей кристалла, достигнувших более горячих слоев жидкости, приостанавливается, пока кристалл приобретает необходимый диаметр вследствие тангенциального роста.

Эти части в значительной степени перегреваются и, приходя на некоторое время в равновесие с жидкостью, становятся плоскими. Фотографии таких поверхностей, полученных путем обрыва кристалла, представлены на рис. 2.5.

На фотографии показана поверхность кристалла, оторванная от жидкости. Закристаллизовавшиеся остатки жидкости в виде трех маленьких бугорков и одного центрального указывают на четыре участка жидкости, которые были перегреты по сравнению с остальной поверхностью кристалла.

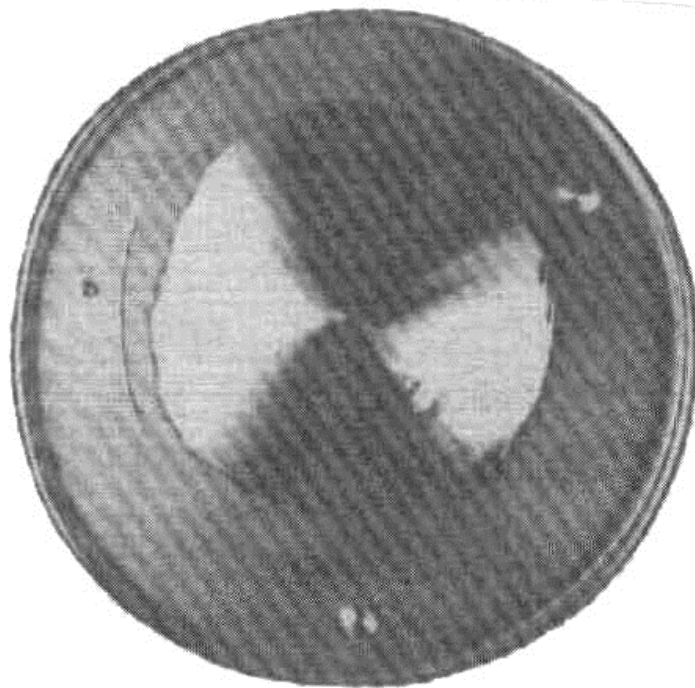


Рис.2.5 Фотография поверхности торца кристалла, полученной путем отрыва кристалла от расплава

Более высокая температура в этих местах возникла в результате интенсивного образования двумерных зародышей. Такое симметричное образование зародышей часто встречается на плоских поверхностях. При вогнутом фронте они образуются на периферийной плоскости, при выпуклом – в центральной части образца, а на поверхности, близкой к плоской – так, как это показано на рис. 2.4, е.

Часто наиболее нагретая область не совпадает с осью кристалла; в этом случае двумерный зародыш может образоваться в стороне от центра поверхности. Понятно, что двумерные зародыши не могут возникнуть рядом, так как в направлении бокового роста зародышей выделяется тепло кристаллизации и поэтому зона вокруг места возникновения зародыша обычно нагрета до более высокой температуры. Поэтому новые двумерные зародыши возникают несколько дальше. Симметрия в расположении зародышей, представленная на рис. 2.4,е, является результатом удачного сочетания скорости вращения кристалла и такого местного переохлаждения, когда скорость бокового роста двумерного зародыша отстает от скорости вращения настолько, что на

поверхности раздела три раза за один оборот возникает достаточное переохлаждение, необходимое для образования нового двумерного зародыша. Этим же определяется и расстояние периферийных центров возникновения двумерного центра кристаллизации. При вогнутом фронте наиболее сильно перегревается внутренняя центральная часть поверхности. В этом месте нагрев может быть настолько большим, что скорость роста в направлении нормали не только становится равной нулю, но может наступить даже некоторое оплавление. В этих местах обычно плоские участки отрыва не встречаются. Если температура поверхности очень близка к температуре плавления, то такая поверхность стремится стать плоской и прийти в равновесие с жидкостью. Идеально плоской может быть лишь плоскость, наиболее густо усеянная атомами. Остальные плоскости – атомошероховатые и, как правило, состоят из ступеней высотой в межатомное расстояние.

Распределение примесей

При выращивании монокристаллов методом Чохральского и бестигельной зонной плавкой распределение примесей определяется коэффициентом распределения примеси в твердой и жидкой фазе K . Если $K > 1$, большая часть примеси остается в жидкой фазе, и наоборот. Можно было бы предположить, что канальная неоднородность, которая наблюдается в кристаллах, выращиваемых в направлении [11] определяется разным переохлаждением в различных частях фронта кристаллизации и, следовательно, K должно изменяться от одной точки поверхности к другой. Можно привести следующие основные положения, на основании которых следует сделать вывод о причинах возникновения канальной неоднородности:

1. Канальная неоднородность возникает только в том случае, когда кристалл выращивания в направлении $\langle 111 \rangle$ и на фронт кристаллизации выходит грань $\{111\}$.
2. Грань на фронте кристаллизации возникает чаще всего тогда, когда он выпуклый в сторону расплава.

3. Граница зоны канальной неоднородности с остальной частью кристалла – часто довольно четкая.

4. Канальная неоднородность зависит от скорости выращивания монокристалла.

5. Канальная неоднородность встречается на выпуклых и плоских участках фронта кристаллизации, но только там, где на поверхность может выйти плоскость [11].

Эти особенности возникновения канальной неоднородности, по нашему мнению, можно объяснить, исходя из закономерностей роста кристалла.

Рассмотрим сначала особенности формирования различных участков растущей поверхности монокристалла. На рис. 2.4 представлены схемы тангенциального роста, которые хорошо демонстрируют образование резкой границы кристалл-жидкость. Участки, где встречаются растущие навстречу один другому (тангенциально), двумерные зародыши, нагреты гораздо сильнее из-за интенсивного выделения теплоты кристаллизации. При большой скорости выращивания выделяющаяся теплота кристаллизации быстро уводится, и эти участки быстро зарастают, не оказывая особого влияния на распределение примесей. Кроме того, в этом случае может нарушаться симметрия в образовании двумерных зародышей и мест их срастания.

При небольшой скорости выращивания двумерные зародыши образуются сильно нагретыми и количество примеси, переходящей из жидкости в кристалл, здесь резко отличается от остальной части поверхности. «Стержень» канальной неоднородности всегда состоит из плоских участков грани [11], которая обладает наибольшей адсорбционной способностью. Там, где эта грань выходит на поверхность, всегда имеется канальная неоднородность.

Чем большую часть поверхности занимает «плоскость ожидания», т.е. максимальная поверхность, которая вырастает (тангенциально) до образования на ней двумерного зародыша, тем больше ширина стержня канальной неоднородности (рис. 2.6).

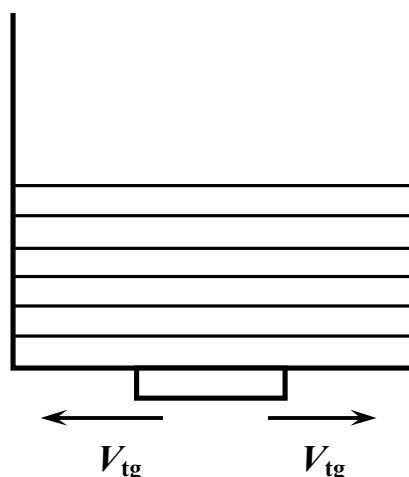


Рис. 2.6 Схема роста в области канала

В вертикальном направлении – рост за счет образования двумерных зародышей, в тангенциальном – послойный механизм.

Во время разрастания двумерного зародыша вдоль поверхности кристалла его центральная часть охлаждается и адсорбирует большое количество примесей. Затем после переохлаждения идет процесс образования новых групп двумерных зародышей в центральной части стержня. В это время перегревается центральная часть стержня и наступает перерыв в «перенасыщении». Таким образом, канальная неоднородность сама по себе периодически неоднородна по высоте.

Не следует, однако, понимать это так, будто периодичность по высоте, соответствует последовательности зарождения двумерных зародышей. Эта периодичность связана со скоростью вытягивания монокристалла. В пространстве это приводит к геликоидальной (винтовой поверхности). Движение кристалла приводит к тому, что большое количество двумерных зародышей образует ступенчатую поверхность, растущую тангенциально примерно в одних и тех же температурных условиях. Большая группа двумерных зародышей образуется в сильно переохлажденной жидкости. В уже прогретой жидкости образуется меньше зародышей. Поэтому, полосы, содержащие много примесей

(светлые на микрофотографии), обычно толще полос с меньшим количеством примесей (темные).

Как правило, «поверхность ожидания» больше всего на плоском участке фронта кристаллизации. Естественно, что и ширина канала будет больше. Протяженность «поверхности ожидания» определяет ширину канала. На выпуклых участках, а здесь всегда переохлаждение больше, поверхность не успевает еще разрастись, как возникает уже следующий зародыш. Это хорошо подтверждается. Все каналы характерны плоскими поперечными полосами. Даже цилиндрические каналы, концентрично расположенные вокруг центрального канала (обычно в вогнутой части фронта), тоже имеют узкие горизонтальные полосы, содержащие большое количество примесей.

Таким образом, главная причина образования канальной неоднородности та, что механизм роста с образованием двумерных зародышей (в сочетании со скоростью вращения и вытягивания монокристалла в направлении (111)) создает периодичность в переохлаждении.

Распределение дислокаций

Рассмотрим теперь, как распределение дислокаций связано с особенностями роста кристалла. Исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать следующий важный вывод. Ввиду того, что в бездислокационных кристаллах малоугловые границы не встречаются при любом фронте кристаллизации, образование этих границ является результатом действий механизма роста, а также присутствия в кристалле дислокаций.

Наблюдения за процессом возникновения дислокации в монокристаллах показывают, что имеется два источника дислокации. Первый из них – это сама затравка.

Если она имеет дислокации, то они обычно переходят в кристалл. Вторым источником являются внутренние напряжения, связанные с тепловым ударом или действием достаточно больших механических напряжений. Прделанные в данной работе эксперименты показывают, что под действием напряжений, свя-

занных с неуравновешенностью при росте монокристалла, дислокации не образуются.

Бездислокационный монокристалл обычно вырастает сильно искривлённым (из-за неоднородности и изменчивости теплового поля) и, естественно, поэтому имеет внутренние напряжения. Однако под их действием он не деформируется, и, следовательно, новые дислокации не возникают.

Кристаллы, получившие дислокации из затравки, обычно вырастают относительно правильной цилиндрической формы.

Проращение дислокаций в наращиваемом слое кремния на примере роста монокристалла в направлении, перпендикулярном к грани (111), можно представить, как проращение экстраполуплоскости в тангенциально разрастающийся двумерный зародыш. При росте кристалла в других направлениях слоистый рост тоже повторяет дефект упаковки, и лишние полуплоскости проращают в слои накристаллизационного материала. Линия дислокации при нарастании слоев из одного центра двумерной кристаллизации воспроизводится до тех пор, пока она из-за наклона экстраплоскости к оси кристалла не выйдет на его поверхность.

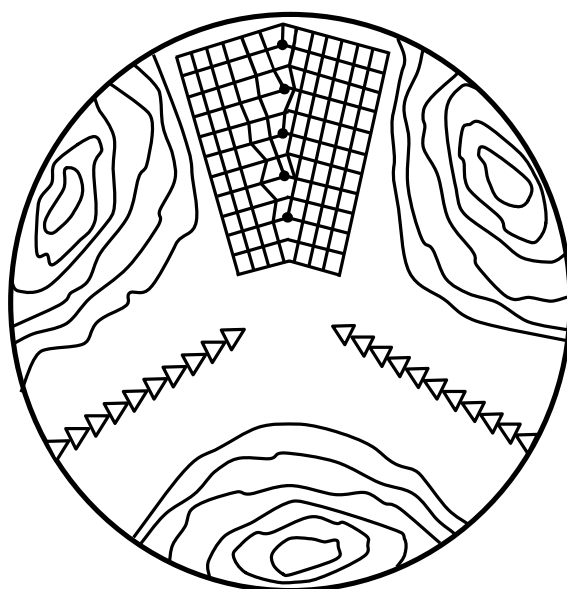


Рис.2.7. Схема образования малоугловых дислокационных границ при образовании на периферии фронта кристаллизации трех двумерных зародышей

Переходящие в растущий монокристалл дислокации в дальнейшем размножаются под действием термических нарушений.

Рассмотрим случай, когда на поверхности раздела образуется несколько двумерных зародышей, расположенных в разных местах. Если слои, растущие от разных зародышей, к месту встречи подойдут несколько разориентированными, образуются дислокации (см. схему на рис. 2.4 и рис. 2.7). Как следует из самого механизма их возникновения, эти дислокации будут образовывать малоугловые границы, расположенные в плоскости, параллельной направлению выращивания. Если к месту встречи два участка монокристалла, растущих от разных зародышей, подойдут с одинаковой ориентацией, дислокации образовываться не будут.

От чего зависит ориентация участков кристалла, растущих от разных двумерных зародышей? Прежде всего, от степени совершенства той поверхности («подложки»), на которой образуются и растут двумерные зародыши. Если исходная поверхность не имеет структурных дефектов, двумерные зародыши должны расти с одинаковой ориентацией и на стыке дислокации образовываться не будут. Этим объясняется отсутствие малоугловых границ и в бездислокационных монокристаллах при росте с вогнутым или сложным фронтом кристаллизации (т.е. при нескольких двумерных центрах кристаллизации).

В случае, когда образование и рост двумерных зародышей осуществляются на поверхности с дислокациями, соответствующие участки монокристалла к месту стыка должны подойти с отличной ориентацией – в результате образуются малоугловые границы. Граница встречи зародышей, растущих навстречу один другому, может быть насыщена примесями и вакансиями. Это должно способствовать ее стойкости при отжиге.

Описанный механизм образования малоугловых границ подтверждается и тем, что малоугловые границы обычно образуются при вогнутом фронте кристаллизации. Действительно при вогнутом фронте рост осуществляется благодаря периферийным двумерным зародышам. Приведенная на рис. 2.6 схема образования трех двумерных периферийных зародышей.

Проблема получения монокристаллов с заданной плотностью дислокаций связана с контролируемым введением и размножением дислокаций, а также контролем механизма роста.

Остановимся на главных проблемах по улучшению экономических показателей производства полупроводников кремния и повышению качества получаемого продукта.

Как следует из теории, форма и скорость роста кристалла при прочих равных условиях определяются соотношением температуры жидкости и температуры кристалла (верхнее, фронта кристаллизации) для метода Чохральского и бестигельной зонной плавки, а для кристалла, растущего в газовой среде – температурой фронта кристаллизации и парциальным давлением паров кремния над кристаллом.

Контроль, соответствующий подбор и поддержание оптимального режима позволяет в значительной степени улучшить процесс производства и интенсифицировать его. Те же теоретические данные показывают, что контроль температуры и парциальных давлений должен быть достаточно точным, ибо доводка до оптимальности и устранение различных причин нарушения совершенства монокристаллов требуют получения информации с точностью, например, для температуры $0,1^{\circ}\text{C}$. Такого рода данные позволили бы рассчитать и автоматизировать процесс выращивания. К сожалению, таких прямых методов точного определения температуры и парциального давления на фронте кристаллизации, которые уже сейчас можно применить в производстве, еще нет. Поэтому главная задача исследований в области выращивания монокристаллов – получение косвенных данных, по которым можно было бы судить о распределении температуры и парциального давления на фронте кристаллизации.

Для обеспечения оптимальных условий роста бездислокационных монокристаллов требуется метрологическое обеспечение контроля тепловых режимов роста кристалла и возможность с помощью управляющих воздействий поддерживать эти режимы в оптимальном диапазоне регулирования.

ГЛАВА 3. ВОЛНОВЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Волновая передача — механическая передача, передающая движение за счет циклического возбуждения волн деформации в гибком элементе. Передача движения обычно производится посредством зубьев, винтового принципа, а также фрикционного контакта. Данный вид передачи был изобретен в 1959 году американским инженером У. Массером.

Волновые передачи применяют в авиационной и космической технике, в промышленных роботах и манипуляторах, в приводах грузоподъемных машин, станков, конвейеров и др. Основным преимуществом волновых передач является их герметичность, что позволяет передавать движение в объемы, находящиеся в химически агрессивной или радиоактивной среде, или в глубоком вакууме. Также существуют конструкции, служащие приводами герметических вентилялей.

Данная глава посвящена применению волновых передач в ростовом оборудовании, предназначенном для получения монокристаллического кремния.

3.1. Общие сведения о волновых зубчатых передачах

Волновая передача состоит из 3-х основных элементов – генератора волн 1, гибкого элемента 2 и жесткого колеса 3 (рис. 3.1).

Генератором волн волновой передачи называется элемент, создающий волну деформации в гибком элементе волновой передачи.

Планетарным генератором волн (рис. 3.2) называется генератор волн, имеющий собственное передаточное число.

Гибким элементом волновой передачи называется элемент в виде цилиндрической трубы или оболочки отрицательной кривизны, имеющий зубчатый венец на наружной поверхности (рис. 3.1, рис. 3.6÷3.8).

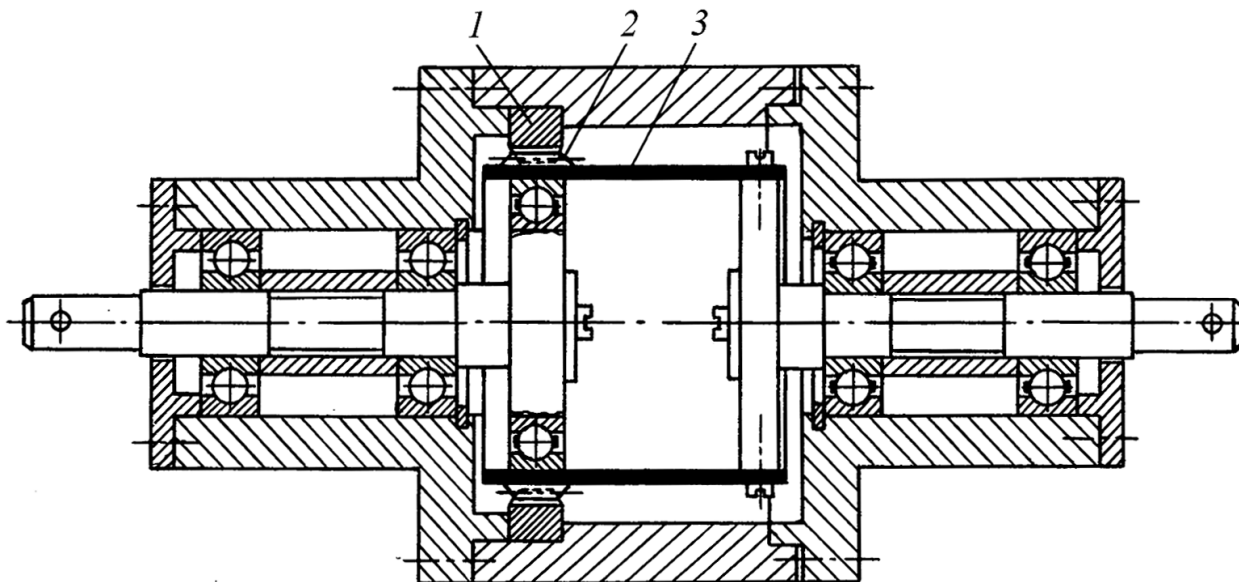


Рис. 3.1. Малогабаритная приборная волновая зубчатая передача

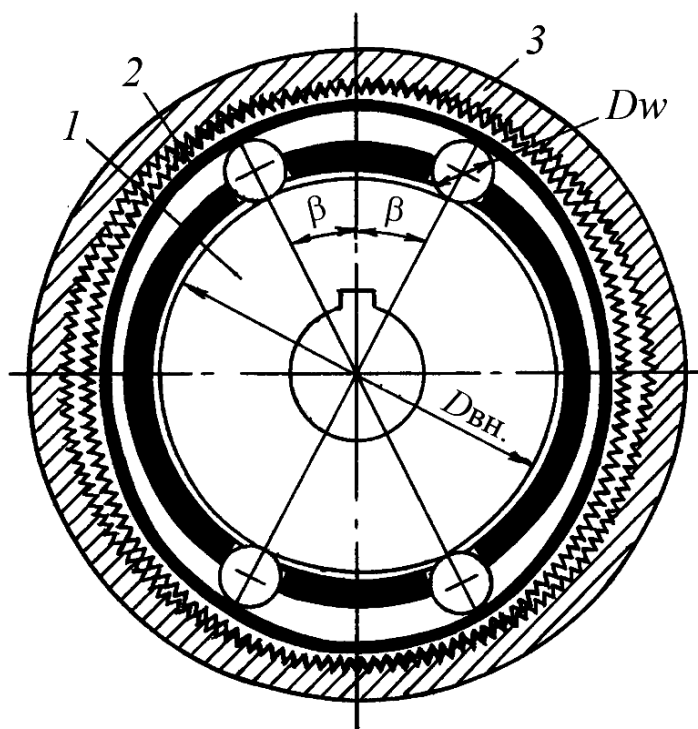


Рис. 3.2. Поперечный разрез волновой передачи с планетарным генератором волн: 1 – планетарный генератор волн; 2 – гибкий элемент; 3 – жесткое колесо

Жестким колесом волновой передачи называется кольцевой элемент, имеющий на внутренней поверхности зубчатый венец, причем зубья жесткого колеса или гибкого элемента входят в зацепление под действием генератора волн (рис. 3.2).

Роликовым генератором волн называется такой генератор, который создает волну деформации в гибком элементе с помощью 2-х или более роликов, которые представляют собой обычные радиальные шарикоподшипники 1 (рис. 3.3).

Дисковым генератором волн называется такой генератор, который создает волну деформации в гибком элементе с помощью 2-х дисков 1, оси вращения которых имеют некоторый эксцентриситет (рис.3.4).

Кулачковым генератором волн называется такой генератор, который создает волну деформации в гибком элементе с помощью гибкого шарикоподшипника 1, насаженного на кулачок 2 специального профиля (рис. 3.5).

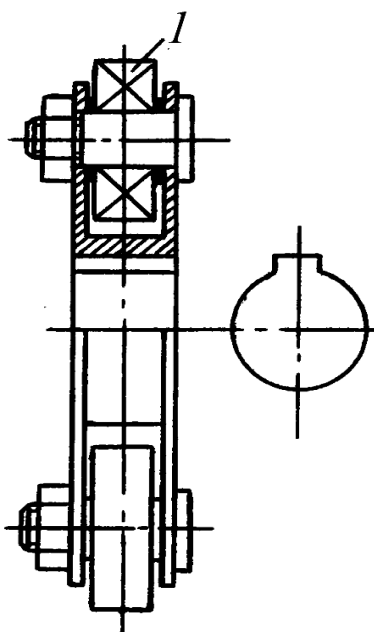


Рис. 3.3. Роликовый генератор волн:
1 – ролик

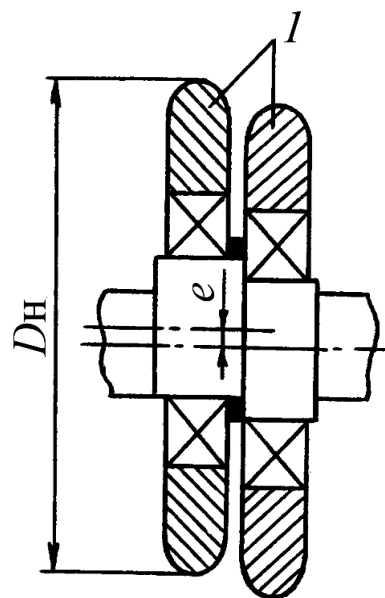


Рис. 3.4. Дисковый генератор волн:
1 – диски

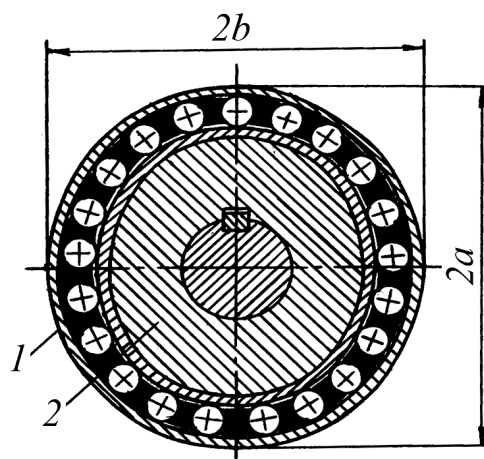


Рис. 3.5. Кулачковый генератор волн: 1 – гибкий шарикоподшипник; 2 – кулачок

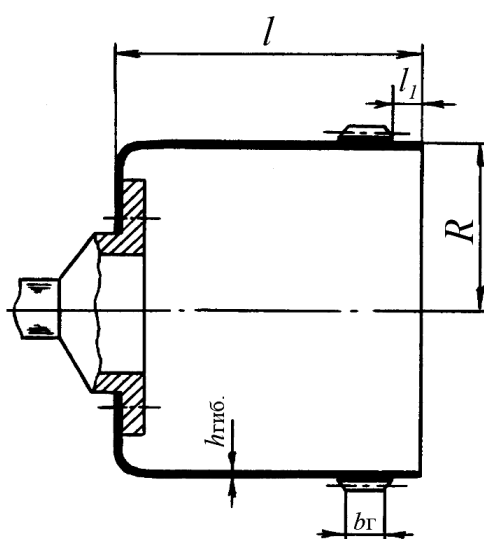


Рис. 3.6. Жесткое крепление гибкого элемента

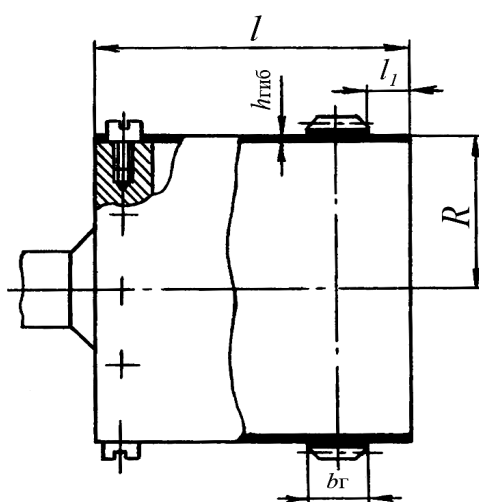


Рис. 3.7. Штифтовое крепление гибкого элемента

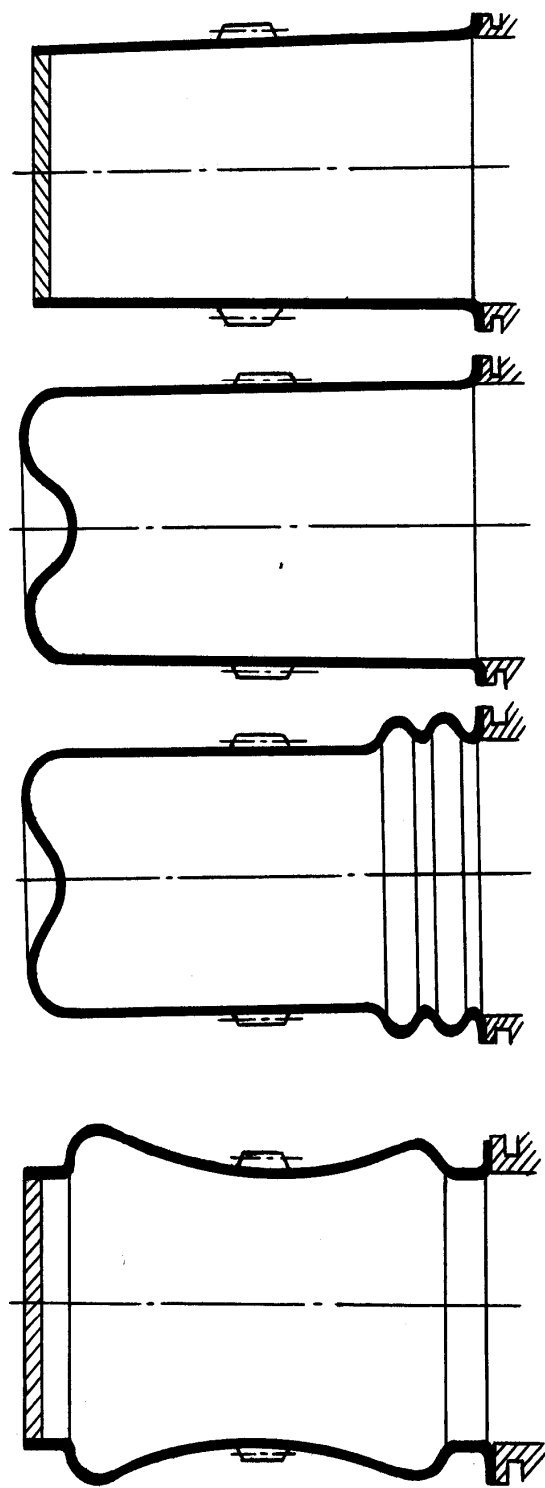


Рис. 3.8. Гибкие элементы для передачи движения в герметизированный объем

Волновые передачи могут использоваться как в качестве редукторов (рис. 3.9), так и в качестве вводов вращения (рис. 3.10, 3.11).

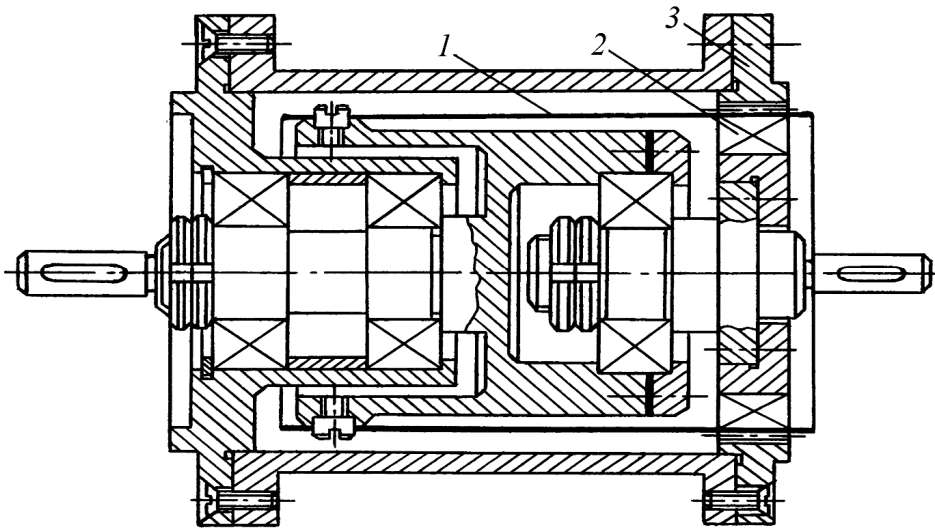


Рис. 3.9. Волновая зубчатая передача с размерами, уменьшенными в осевом направлении: 1 – гибкий элемент; 2 – генератор волн; 3 – жесткое колесо

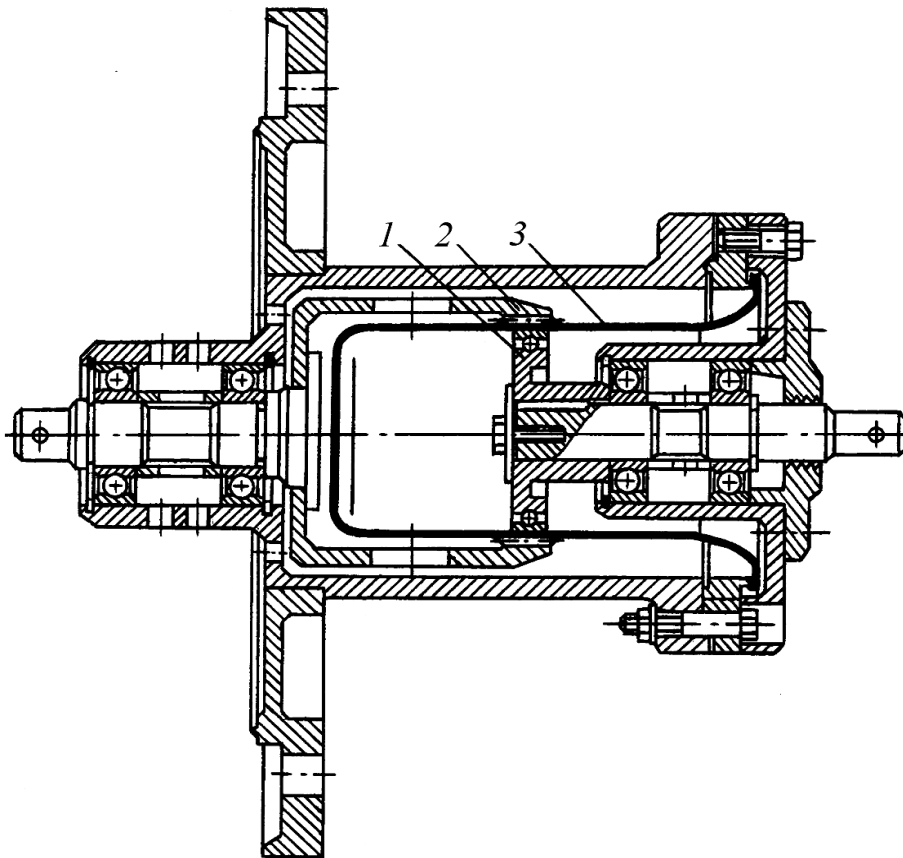


Рис. 3.10. Конструкция волнового вакуумного ввода с гибким элементом в виде цилиндрической оболочки: 1 – генератор волн; 2 – гибкий элемент; 3 – жесткое колесо

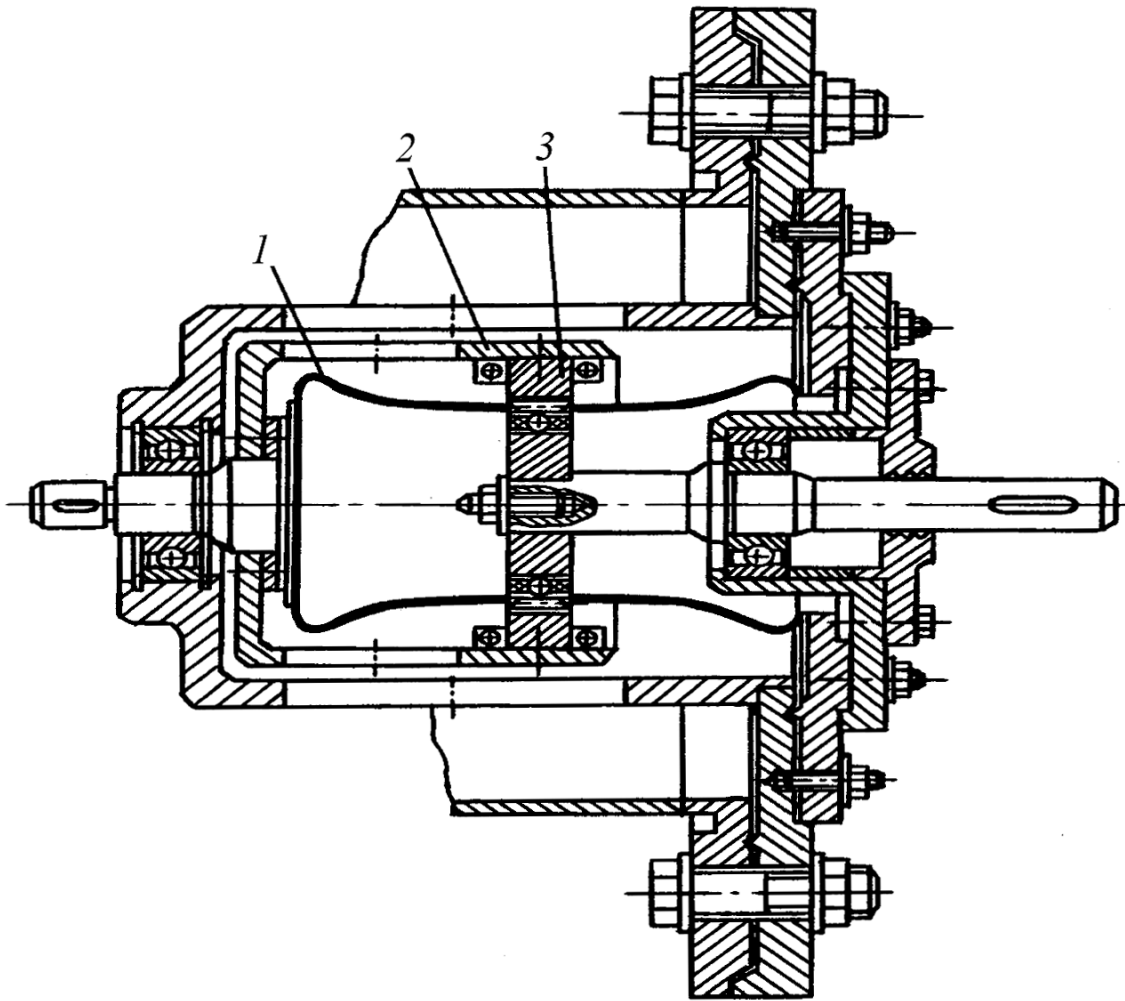


Рис. 3.11. Конструкция волнового вакуумного ввода с гибким элементом в виде оболочки отрицательной кривизны: 1 – генератор волн; 2 – гибкий элемент; 3 – жесткое колесо

3.2. Волновые зубчатые передачи ростового оборудования

Волновые зубчатые передачи (ВЗП) все более привлекают внимание разработчиков различного технологического и вспомогательного оборудования не только своей высокой нагрузочной способностью и кинематической точностью, но и встраиваемостью, обусловленной цилиндрической формой корпуса и возможностью расположения подшипников выходного вала, а также вала деформатора во внутреннем объеме гибкого колеса. Осевые габариты ВЗП определяет, в основном, длина цилиндра гибкого колеса (ГК) L_f .

Многочисленными исследованиями установлено, что L_f необходимо выбирать близкой к диаметру d_f с целью снижения влияния заделки ГК на работу волнового зацепления, а также на напряжения в заделке. Последние можно минимизировать применяя нежесткую заделку, например, зубчатую муфту.

Использование приводов с ВЗП в робототехнических системах поставило дополнительные требования по компактности и встраиваемости в шарнире манипуляторов. В частности, появилась необходимость вынесения опорного узла выходного вала ВЗП из внутреннего объема ГК наружу с базированием по посадочным диаметрам несущей конструкции (скелета) манипулятора. В этой связи весьма перспективным представляется использование ВЗП с коротким ГК в случае решения вопроса передачи момента крутящего с ГК на выходной вал без ухудшения качественных характеристик передачи.

Выбор геометрических параметров зацепления

Решение задачи передачи вращения от ГК к выходному валу связано с использованием волнового муфтового соединения, особенностью работы которого является необходимость обеспечения свободы передвижения точек зубьев гибкого колеса F во впадинах жесткой C полумуфты по замкнутой траектории (рис. 3.12), а также работоспособности гибкой оболочки и волнового муфтового зацепления.

Известные исследования по этим вопросам были связаны с использованием двухвенцового ГК [9] или нарезанием зубьев специальным зуборезным инструментом, дающим увеличенную ширину впадины [10].

В первом случае не обеспечивается работоспособность гибкого элемента из-за наличия дополнительного концентратора напряжений между зубчатыми венцами, во втором – широкое использование таких передач ограничено нетехнологичностью профиля зубьев.

Нами предложена система геометрических параметров зацепления ВЗП с гибким колесом-кольцом, реализуемая при использовании стандартного зуборезного инструмента.

Особенностью расчета геометрических параметров ВЗП с гибким колесом-кольцом, в отличие от обычной ВЗП, является равенство чисел зубьев гибкого Z_f и муфтового жесткого колес Z_{cm} .

Схема взаимодействия зубьев в волновом муфтовом зацеплении представлена на рис. 3.13.

Характер взаимодействия зубьев в волновом зацеплении определяется зазорами между боковыми поверхностями зубьев J_i , глубиной захода зубьев в зацепление и величиной несопряженности зубьев h_{di} , которую для мелко-модульных волновых передач можно представить как угол между касательными к боковым поверхностям в точках при вершинах зубьев θ_i .

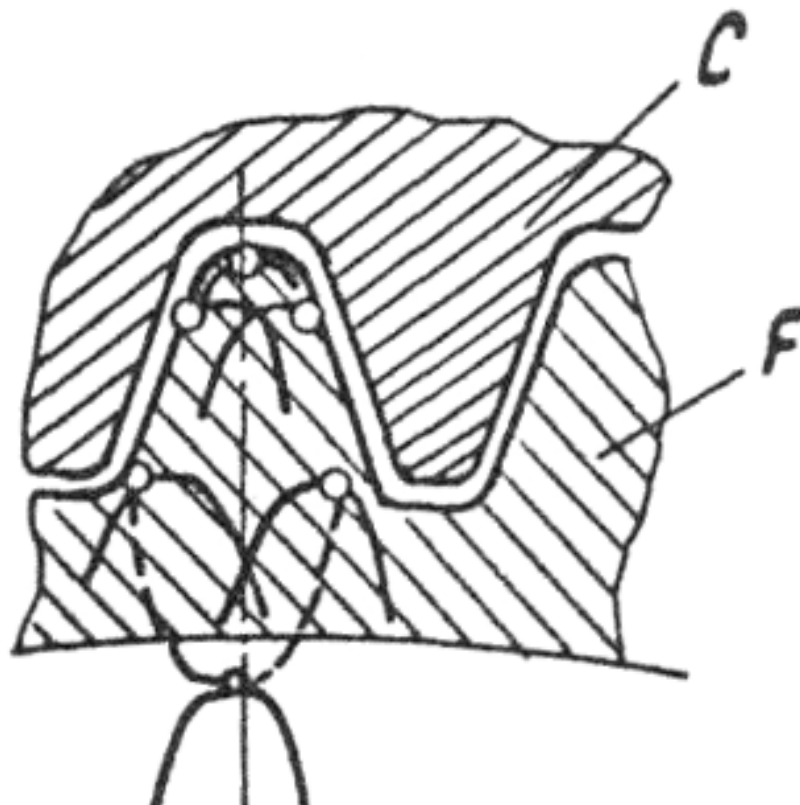


Рис. 3.12. Схема движения точек зубьев гибкого колеса-кольца во впадинах между зубьями жесткой полумуфты

Для волновой зубчатой передачи эти параметры определяются зависимостью [14]:

$$j_i = (r_{aF} \varphi_{Fi} - z_{Pi} P_{aF}) \cos \gamma_i + 0,5 [S_{taf} (1 - \cos \gamma_i) - S_{tFi} + P_{ac} - S_{tac}] - r_{ac} \varphi_i + z_{pi} P_{ac} - h d_i \sin \gamma_i, \quad (3.1)$$

где $h_{di} = a_w \cos \varphi_i + r_{aF} \cos \gamma_i - r_{ac}$ – значения глубины захода зубьев в зацепление; $P_{ac} = \tau_c r_{ac} = \frac{2\pi r_{ac}}{z_c}$ – окружной шаг жесткого колеса по окружности выступов; $P_{aF} = \tau_p r_{aF}$ – окружной шаг деформированного гибкого колеса.

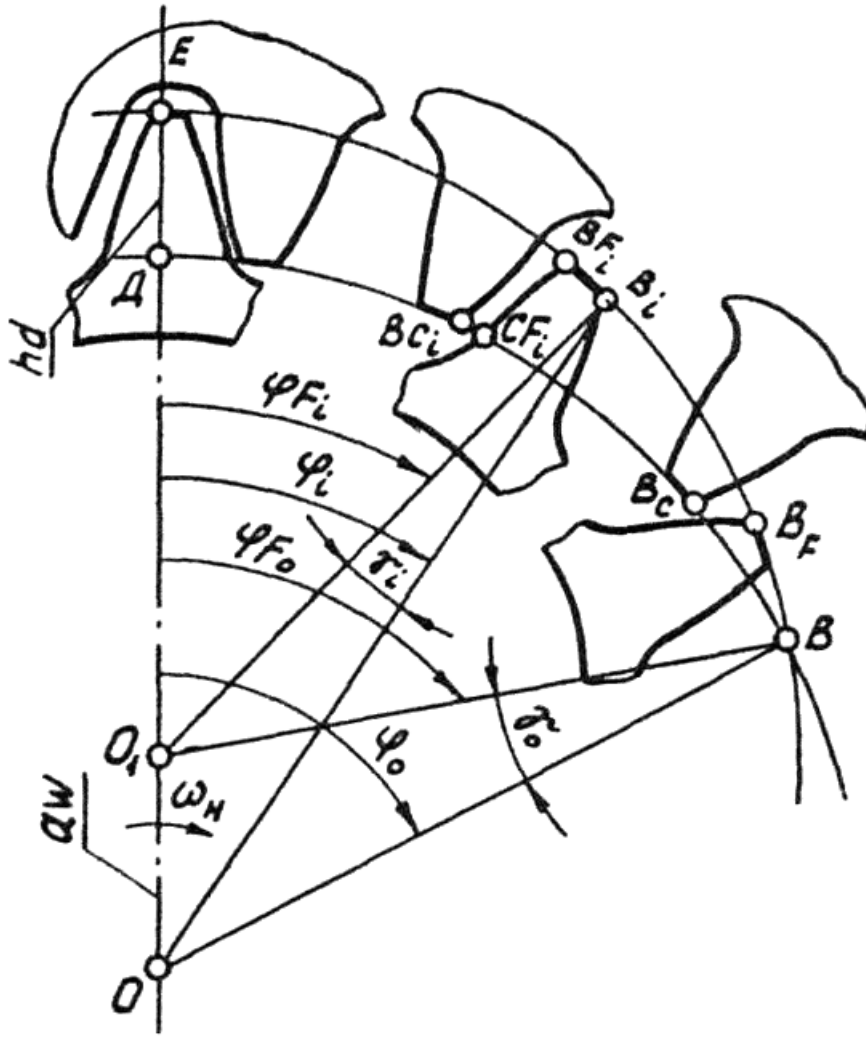


Рис. 3.13. Схема взаимодействия зубьев волнового муфтового зацепления

Здесь $\tau_F = \frac{2\pi}{k_{np} z_F}$ – угловой шаг гибкого колеса в зоне зацепления,

где $k_{np} = \frac{r_{np}}{r_{F_{вн}} - s_{12}}$ – коэффициент приведения.

Несопряженность зубьев

$$\theta_i = \gamma_i - \Psi_{jFi} - \Psi_{jCi} - 0,5(\Psi_{sac} + \Psi_{saF}) - \alpha_{a2} + \alpha_{ac}, \quad (3.2)$$

где Ψ_{jFi} , Ψ_{jCi} и Ψ_{saF} , Ψ_{sac} – угловые зазоры и угловая толщина зубьев на вершинах, соответственно; α_{aF} и α_{ac} – углы профиля на вершинах зубьев.

По аналогии с (3.1) и (3.2), для муфтового волнового зацепления из рассмотрения схемы зацепления, представленной на рис. 3.13 зазоры между зубьями

$$j_{im} = r_{ac} \varphi_i - P_{ac} (z_{pi} + 0,5) - 0,5 S_{tac} - [r_{aF} \varphi_{Fo} - P_{aF} (z_{pi} + 1)] \cos \gamma_i + \\ + 0,5 [S_{taF} (\cos \gamma_i - 1) - S_{tFi}] - hd_i \sin \gamma_i, \quad (3.3)$$

а несопряженность зубьев

$$\theta_{iM} = \gamma_i + \Psi_{jFi} + \Psi_{jci} + 0,5(\Psi_{sac} + \Psi_{saF}) + \alpha_{aF} + \alpha_{ac}. \quad (3.4)$$

Выбор параметров зацепления волновой передачи определяют из условий [14]:

$$S_{n(\tau_c \langle \varphi_i \rangle 0,35 \varphi_o)} \leq 0,5 \Delta \varphi_{op} r_{ac}; \quad (3.5)$$

$$[\theta_r]_{(\varphi_o)0} \leq \arcsin \frac{\Delta \varphi_{NP} \cos \alpha_{ac}}{r_{ac} \left(\frac{\Delta \varphi_{NP}}{r_{ac}} + \frac{hd}{\cos \alpha_{ac}} \right)^2 - 2 \frac{\Delta \varphi_{NP} hd}{\cos \alpha_{ac}} (1 + \sin \alpha_{ac})}; \quad (3.6)$$

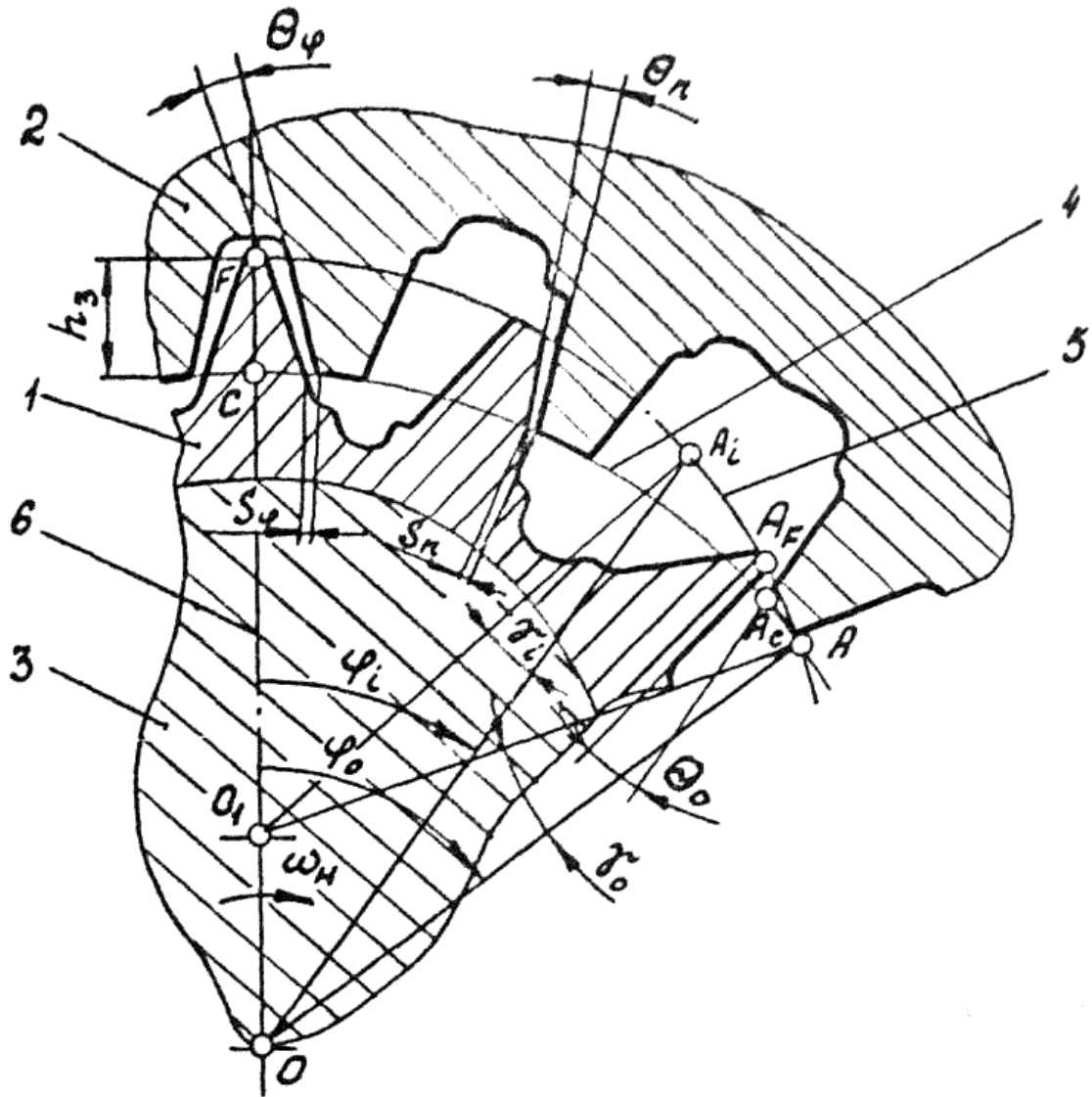


Рис. 3.14. Схема взаимодействия зубьев волновой передачи

$$\Delta\varphi_\tau = \frac{\Delta\rho_\tau}{r_{ac}} \leq \varphi_{\text{тп}}; \quad (3.7)$$

$$X_F \in |-(0,022z_F + 0,7); -(0,012z_F + 0,9)| \cup (0,021z_F + 1,2); -(0,028z_F + 0,8); \quad (3.8)$$

Условия (3.5)÷(3.7) определяются схемой на рис. 3.14.

Очевидно, величина люфта волновой передачи с гибким колесом-кольцом определяется как сумма люфтов волновой передачи и волнового люфтового соединения.

$$S_{n(\tau_c \langle \varphi_i \langle 0,35\varphi_0)} + S_{m(\tau_m \langle \varphi_i \langle 0,72\varphi_0)} \leq 0,5\Delta\varphi_{\text{оп}}r_{ac}; \quad (3.9)$$

$$I_n(\theta_n) + I_m(\theta_m) \leq 0,5\Delta\varphi_{\text{омп}}r_{ам}, \quad (3.10)$$

где $I_n(\theta_n)$ и $I_m(\theta_m)$ – величины приработочного износа зубьев волновой передачи и муфтового соединения в положениях n и m соответственно.

Выбор соотношения $S_n \cdot S_m J_n(\theta_n)$ и $I_m(\theta_m)$ осуществляется в зависимости от конкретных требований к передаче.

Приемлемые для малогабаритных волновых модулей условия зацепления зубьев ВЗП и муфтового соединения получены для

$$X_c = [0,5(d_{aF} - d_c) + mK_w - h_d + h_{ac}] / m ; \quad (3.11)$$

$$X_m = [0,5(d_{aF} - d_m) + mK_w - h_{dm} + h_{am}] / m ; \quad (3.12)$$

Выражения (3.8), (3.11) и (3.12) позволяют ограничить область поиска оптимального варианта при синтезе зацепления ВЗП с гибким колесом-кольцом.

Методика расчета волнового зубчатого и волнового муфтового зацеплений.

Теоретические и экспериментальные исследования ВЗП с гибкими колесами в виде стакана и кольца позволили разработать инженерную методику расчета зацепления, дающую значения параметров весьма близких к оптимальным.

Основные размеры ВЗП определяются диаметром гибкого колеса, значения которого выбираются из ряда:

$$d_{F_{\text{вн}}} = 42,52,62,80,100,120,150,160,200,240,300,320,400,420,480 . \quad (3.13)$$

Эти размеры в мм относятся к внутреннему диаметру ГК.

Предварительный расчет d_F проводят по формуле:

$$d_F \geq \frac{2,5}{K_u} \sqrt[3]{\frac{T}{P_p h_d \Psi_d \cos \alpha_x}} , \quad (3.14)$$

где T – момент нагрузки на валу, Н·мм;

P_p – допускаемое удельное давление в контакте зубьев, зависящее от материалов пары и рабочей среды;

h_d – относительная глубина захода зубьев в зацеплении (предварительно принимается $h_d = 1,2 \div 1,75$);

Ψ_d – относительная ширина зубчатого венца ($\Psi_d = 0,1 \div 0,2$, большие значения выбираются для более нагруженных передач);

α_x – угол профиля зубьев ГК на диаметре $d_{w_F} = d_F + 2x_F m$;

K_u – коэффициент передаточного числа ($K_u = 0,014$, при $K_u > 1$ принимают $K_u = 1$).

Полученное значение диаметра округлить до ближайшего из ряда (3.13).

Расчетные значения модуля зацеплений

$$m = \frac{d_{F_{\text{вн}}}}{Z_F} \quad (3.15)$$

округляют до ближайшего стандартного.

Задавшись величиной радиальной деформации $\omega_o \in [(1 \div 11)m_x; 0,017d_{F_{\text{вн}}}]$ и эксцентриситетом установки дисков (для дискового волнообразователя) $e = (3,5 \div 3,9)W_o$ (диаметр диска из геометрических соотношений $d_o = d_{F_{\text{вн}}} + 2(W_o - e)$), определяют параметры зацепления ВЗП и муфтового соединения.

$$d_F = mZ_F; d_c = mZ_c; d_m = d_F; \quad (3.16)$$

$$d_{w_F} = d_{F_{\text{вн}}} + 2(\delta_1 + h_F + c); \quad (3.17)$$

$$x_F = \frac{d_{w_F} - d_F}{2m}; \quad (3.18)$$

$$d_{a_F} = d_{w_F} + 2h_{a_F}; \quad (3.19)$$

$$d_{a_c} = d_{a_F} + 2(\omega_o - h_d); \quad (3.20)$$

$$d_{w_c} = d_{a_c} + 2h_{a_c}; \quad (3.21)$$

$$x_c = \frac{d_{w_c} - d_c}{2m}; \quad (3.22)$$

$$d_{f_c} = d_{w_c} + 2(h_{f_c} + c); \quad (3.23)$$

$$d_{a_M} = d_{a_F} + 2(\omega_o - hd_M); \quad (3.24)$$

при $h_{d_M} = h_d$; $d_{ac} = d_{am}$

$$d_{W_M} = d_{a_M} + 2h_{a_M}; \quad (3.25)$$

$$x_M = \frac{d_{W_M} - d_M}{2m}; \quad (3.26)$$

$$d_{f_M} = d_{W_M} + 2(h_{f_M} + c). \quad (3.27)$$

Зависимости (3.16)÷(3.27) позволяют определить исполнительные размеры зубчатой полумуфты, а также гибкого и жесткого колес ВЗП.

Опытно-промышленные образцы малогабаритных электромеханических модулей

Общий вид модуля электромеханического малогабаритного ОЛП21.01.000 представлен на рис. 3.15. Работает устройство следующим образом. От электродвигателя 1 вращение передается на генератор 4, который деформирует гибкое колесо-кольцо 5, взаимодействующее с жестким колесом 6, закрепленном между фланцами корпуса 2 и крышки 3. Вращение гибкого колеса на выходной вал 8 передается с помощью зубчатой полумуфты 7.

Устройство и принцип действия модуля электромеханического малогабаритного ОЛП 21.02.10.000 аналогично устройству ОЛП 21.01.000. Отличие состоит в том, что генератор 4 выполнен регулируемым.

Электродвигатель ДШИ 200-1-1 обеспечивает момент на валу генератора волн $T_{\partial\partial} = 0,25 \text{ Нм}$, при частоте приемистости 1200 Гц с угловым шагом $1,8^\circ \pm 0,3^\circ$.

ВЗП имеет передаточное число $U_{HF}^c = 76$ при $Z_F = 152$;

$Z_c = 154$; $Z_M = 152$; $m = 0,4 \text{ мм}$.

Внутренний диаметр гибкого колеса $d_{F_{\text{вн}}} = 62 \text{ мм}$. Крутящий момент на выходном валу модуля, номинальный $T = 4 \text{ Нм}$.

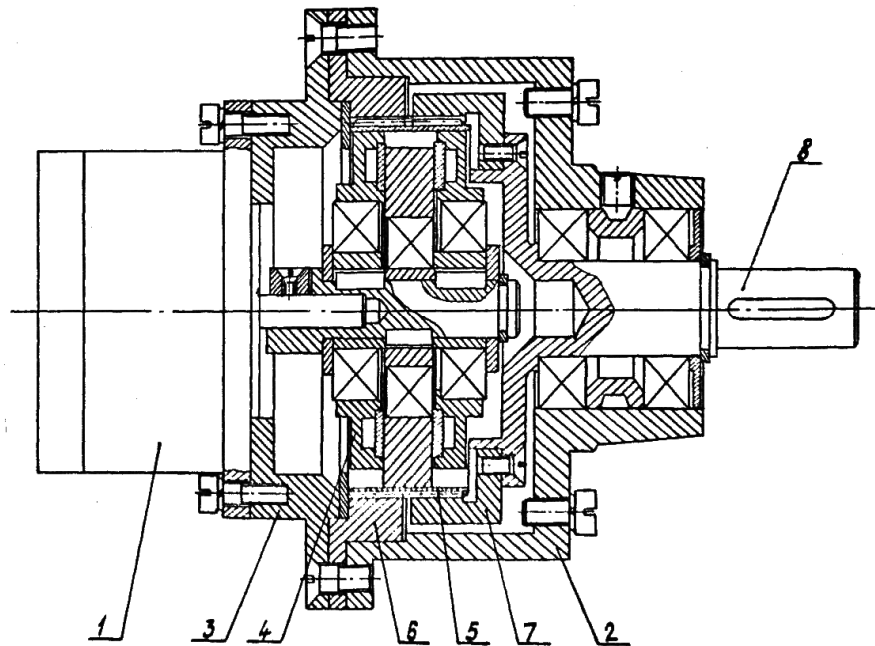


Рис.3.15. Общий вид модуля электромеханического малогабаритного: 1 — электродвигатель; 2 — корпус; 3 — крышка корпуса; 4 — генератор; 5 — колесо гибкое; 6 — колесо жесткое; 7 — полу муфта зубчатая; 8 — вал выходной.

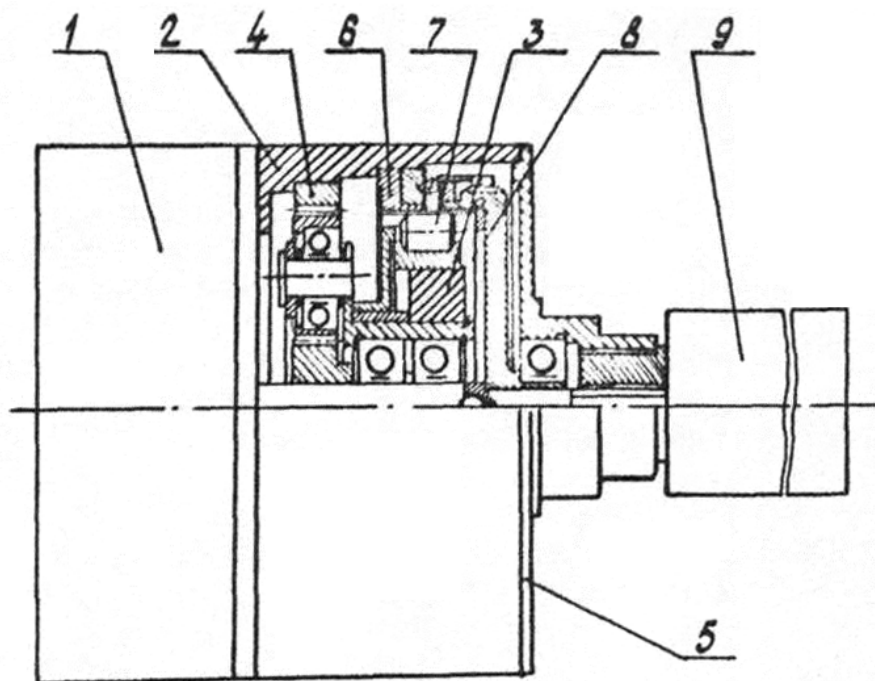


Рис. 3.16. Общий вид привода потенциометра: 1 — электродвигатель; 2 — корпус; 3 — генератор; 4 — планетарная передача; 5 — крышка корпуса; 6 — колесо жесткое; 7 — колесо гибкое; 8 — полу муфта зубчатая; 9 — потенциометр.

Перегрузочная способность – 5. Направление вращения выходного вала противоположно направлению вращения вала электродвигателя.

Цилиндрический корпус модуля с фланцем обеспечивает удобство его встраивания в манипулятор.

Общий вид привода потенциометра ОЛП 21.03.000 представлен на рис. 3.16. Работает устройство следующим образом. От электродвигателя 1 вращение передается на центральное колесо планетарной передачи 4, а с водила планетарной передачи на кулачковый генератор 3, деформирующий гибкое колесо-кольцо 7, взаимодействующее с жестким колесом 6, закрепленном неподвижно в корпусе 2. Вращение гибкого колеса передается на валик потенциометра 9 с помощью зубчатой полумуфты 8. Передаточное число планетарной передачи 4, а ВЗП $U_{HF}^c = 70$. Диаметр гибкого колеса $d_{F_{вн}} = 42\text{мм}$; $z_F = 140$; $z_c = 142$; $z_M = 140$; $m = 0,3\text{мм}$.

Направление вращения валика потенциометра противоположно направлению вращения вала электродвигателя.

3.3. Исследование высокоточных модулей перемещения слитков монокристаллического кремния на базе волновых резьбовых передач и вводов

Основными конструктивными элементами базовых конструкций волновых резьбовых передач и вводов (см. рис. 3.17÷3.19) являются гибкий и жесткий элемент, генератор волн и опора вала генератора волн и жесткого элемента.

Выбор основных геометрических параметров гибкого элемента аналогично параметрам гибких элементов волновых муфт определяется в зависимости от посадочного диаметра, определив который с учетом рекомендаций по выбору параметров резьбового или зубчатого зацеплений осуществляется выбор параметров жесткого элемента и основная компоновка ввода.

При этом учитывается, что для конструкции механизма важно уменьшить его вес и металлоемкость, улучшить технологичность, повысить эксплуатационную надежность и долговечность. Поэтому в зависимости от назначения волновой передачи, в частности, в случае применения ее в качестве ввода движения для увеличения полезного объема вакуумной камеры следует брать передачу с наружным генератором волн (см. рис. 3.19), а для уменьшения веса и габаритов ввода – передачу с внутренним генератором волн (см. рис. 3.17). Для увеличения надежности системы и получения двух и более движений в вакуумной камере, применяются волновые передачи-муфты (см. рис. 3.18).

Далее из условия работы привода (ввода) выбирают материалы элементов зацепления, условия их термохимической обработки и из справочных таблиц назначаются основные прочностные и эксплуатационные параметры.

В общем случае при проектном расчете значение посадочного диаметра d_n^p определяют по формуле, полученной с учетом специфики взаимодействия элементов зацепления вакуумного волнового, резьбового, зубчатого и муфтового ввода:

$$d_n^p \geq \frac{2,5}{k_i} \sqrt[3]{\frac{T_1}{[p] h_d \Psi_{bd} \cos \alpha^x}}, \quad (3.28)$$

где

k_i — коэффициент передаточного отношения ($k_i = \frac{i}{100}$, при $k_i > 1$ принимают $k_i = 1$, для волновых резьбовых передач зацепления $k_i = 1$);

$[p]$ – допустимое удельное давление в контакте элементов зацепления, зависящее от материалов пары и рабочей среды (определяется экспериментально, для предварительных расчетов. При использовании материалов и покрытий на основе дисульфида молибдена MoS_2 , принимают $[p] = 15 \div 30$ МПа);

h_d – относительная глубина захода элементов в зацепление (для резьбового зацепления и предварительных расчетов зубчатого зацепления $h_d = 1,2 \div 1,5$,

для уточненных расчетов зубчатого зацепления h_d выбирается по графику рис. 3.20;

Ψ_{bd} – относительная ширина нарезки ($\Psi_{bd} = \frac{b}{d_h} = 0,1 \div 0,2$, большие значения выбираются для более нагруженных передач);

α – угол профиля зацепления ($\alpha = 40^\circ$ – для зубчатого зацепления и $\alpha = 60^\circ$ – для резьбового);

В случае резьбового ввода:

$$T_1 = \frac{95.6 F_a V}{\eta n_1} \quad (3.29)$$

– крутящий момент на валу волнового резьбового ввода.

Здесь F_a, V, n – заданные нагрузка и скорость перемещения исполнительного звена, а также частота вращения вала генератора волн; η – коэффициент полезного действия волновой резьбовой передачи, предварительное значение которого равно $(0,5 \div 0,7)$; уточненное значение к.п.д. определяется после определения конкретных параметров передачи по рекомендациям [13];

В случае зубчатого ввода:

$$T_1 = \frac{T_2}{i \eta} \quad (3.30)$$

– крутящий момент на валу волнового зубчатого ввода.

Здесь T_2, i – заданный момент нагрузки и передаточное отношение ввода;

η – коэффициент полезного действия волновой зубчатой передачи, предварительные значения которого равны $(0,91 \div 0,95)$;

Полученное значение d_n^p округляется до ближайшего из стандартного рядов зацеплений (см. табл. 3.1, 3.2), по которым выбираются основные гео-

метрические параметры жесткого и гибкого элементов (см. рис. 3.21, 3.22) или определяются по разработанным рекомендациям, представленным в таблице 3.4 с учетом специфики выполнения резьбового и зубчатого зацеплений.

При этом из условия прочности гибкого элемента определяем предельное значение радиальной деформации:

$$\omega_{\max} \leq \frac{1}{80dn}. \quad (3.31)$$

В зависимости от ее значения из условия максимальной долговечности гибкого элемента при его достаточной радиальной жесткости его при использовании радиальной деформации, уменьшенной в сравнении с высотой рабочего участка профиля резьбы (сопряженная пара, у которой виток недеформированного гибкого элемента не выходит полностью из впадин резьбы жесткого элемента ни в одном из радиальных ее сечений для любого сочетания резьбы — см. табл. 3.4) определяем максимально допустимое значение шага зацепления

$$\rho_o \approx 2,84\omega_{\max} \quad \text{или} \quad \omega_{\max} \approx 0,35\rho_o \quad (3.32)$$

Из условия меньших потерь в зацеплении (большого к.п.д.), достаточной долговечности и выполнения заданных эксплуатационных характеристик, уточняем значение шага зацепления, условие заходности резьб (см. табл. 3.2) и уточняем основные параметры элементов зацепления.

В отличие от простых зависимостей определения геометрических параметров зацепления волновой передачи, винт-гайка (нарезаемого резцом) из условия минимизации, величина радиальной деформации ω_o определение геометрических параметров ВЗП по этим же условиям вызывает определенные трудности, связанные со спецификой выполнения волнового зубчатого сопряжения смещенными исходными контурами (получаемого зубодолблением и зубонарезанием).

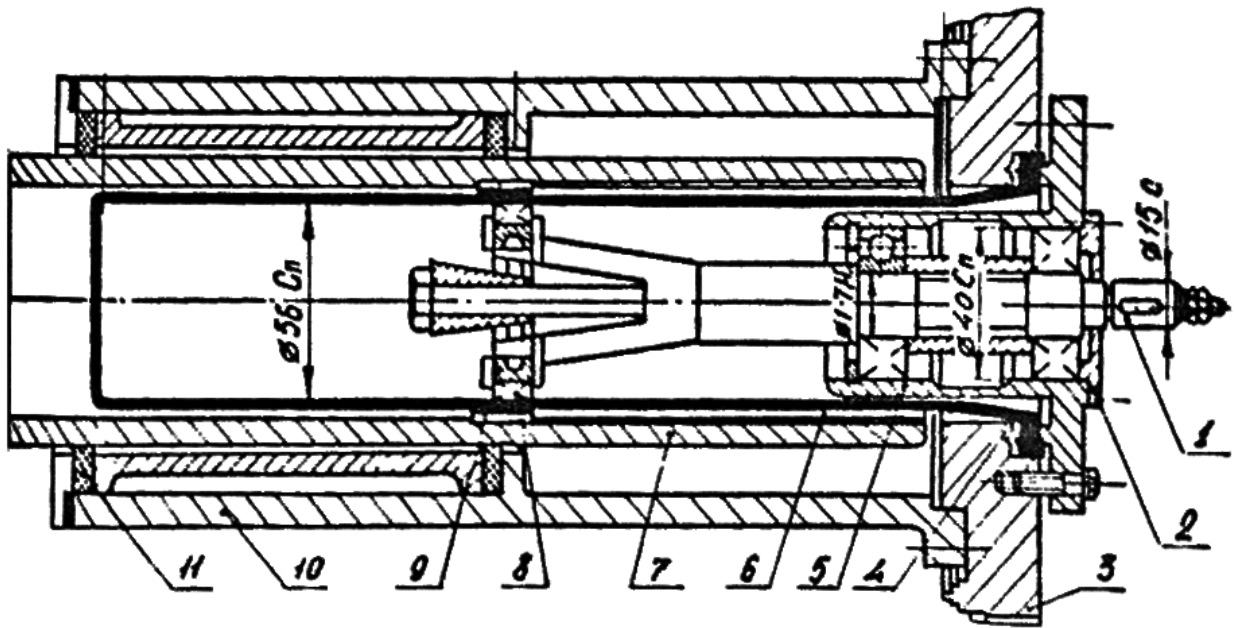


Рис. 3.17. Базовая конструкция волнового резьбового ввода с внутренним генератором волн

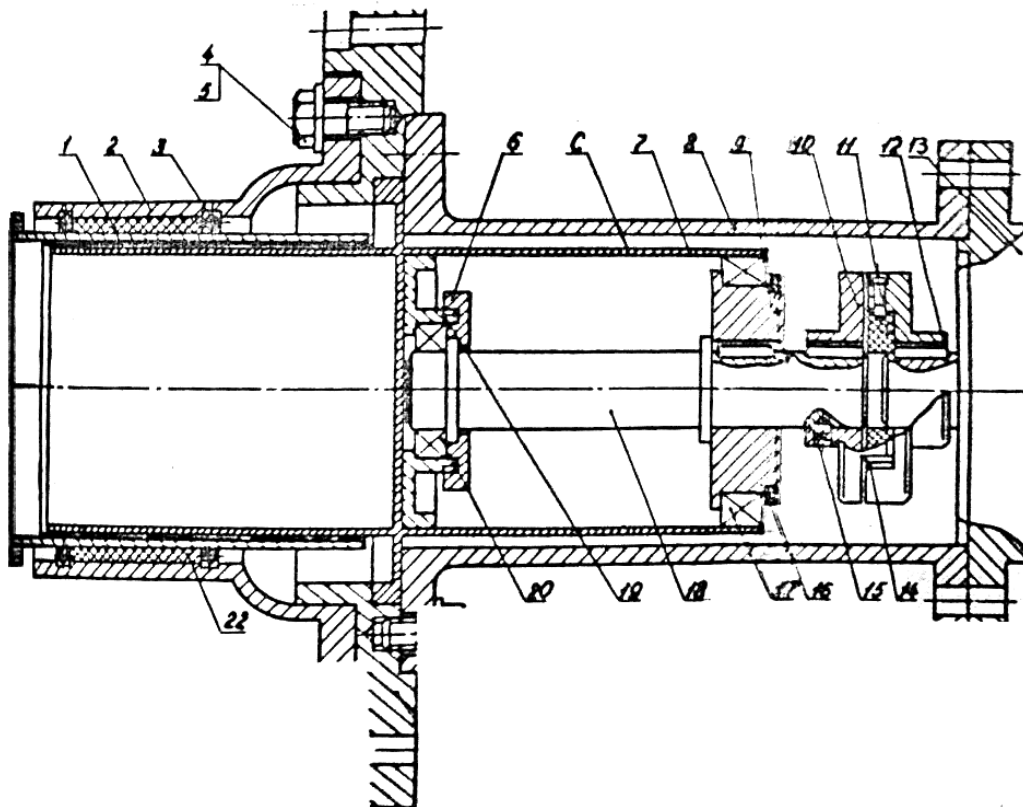


Рис. 3.18. Базовая конструкция волнового резьбового ввода-муфты с внутренним генератором волн

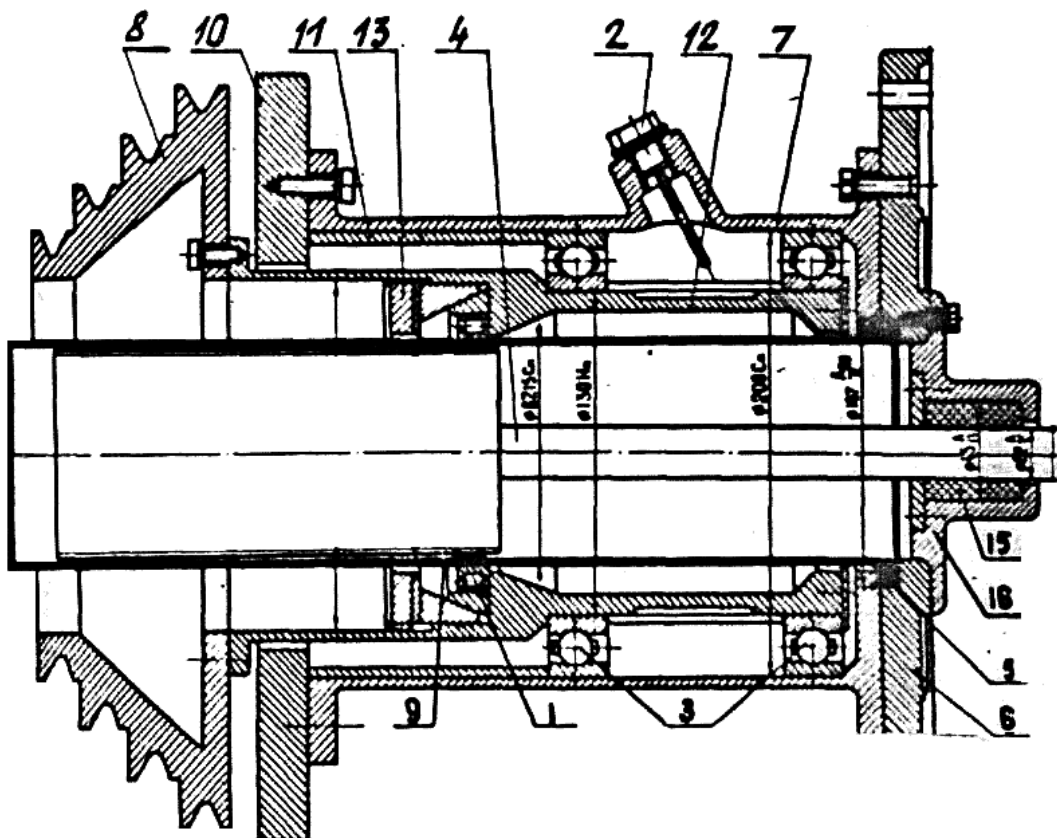


Рис. 3.19. Базовая конструкция волнового зубчатого ввода с наружным генератором волн

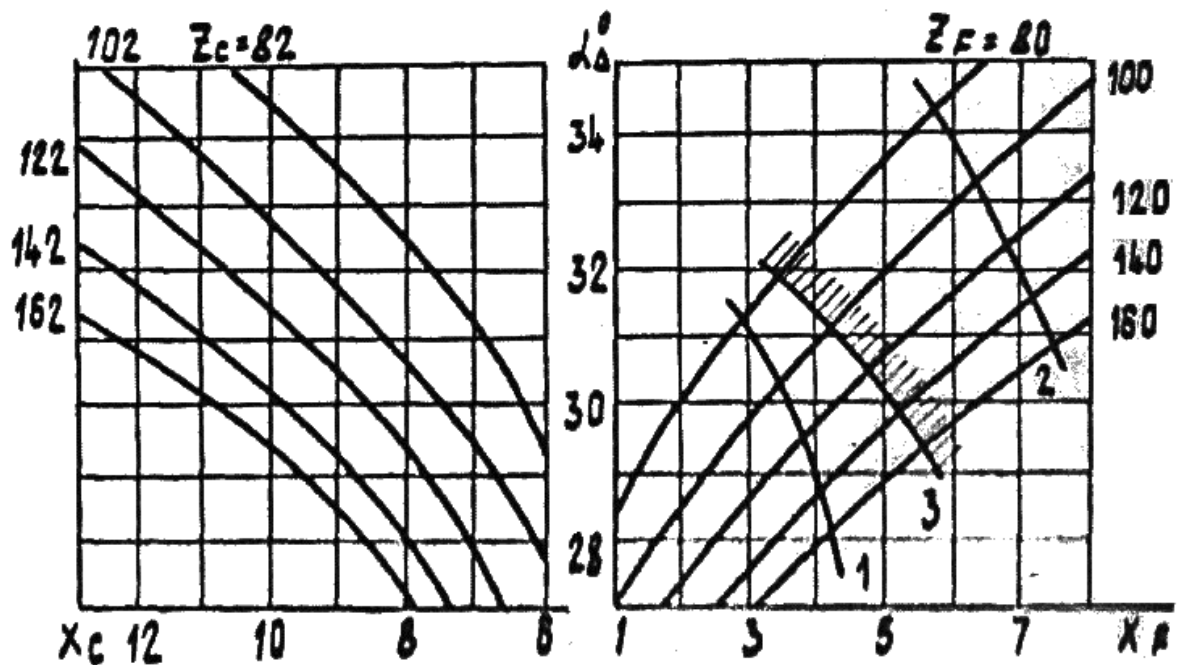


Рис. 3.20. Углы профиля на радиусе заострения соответственно для колес с внутренними и внешними зубьями

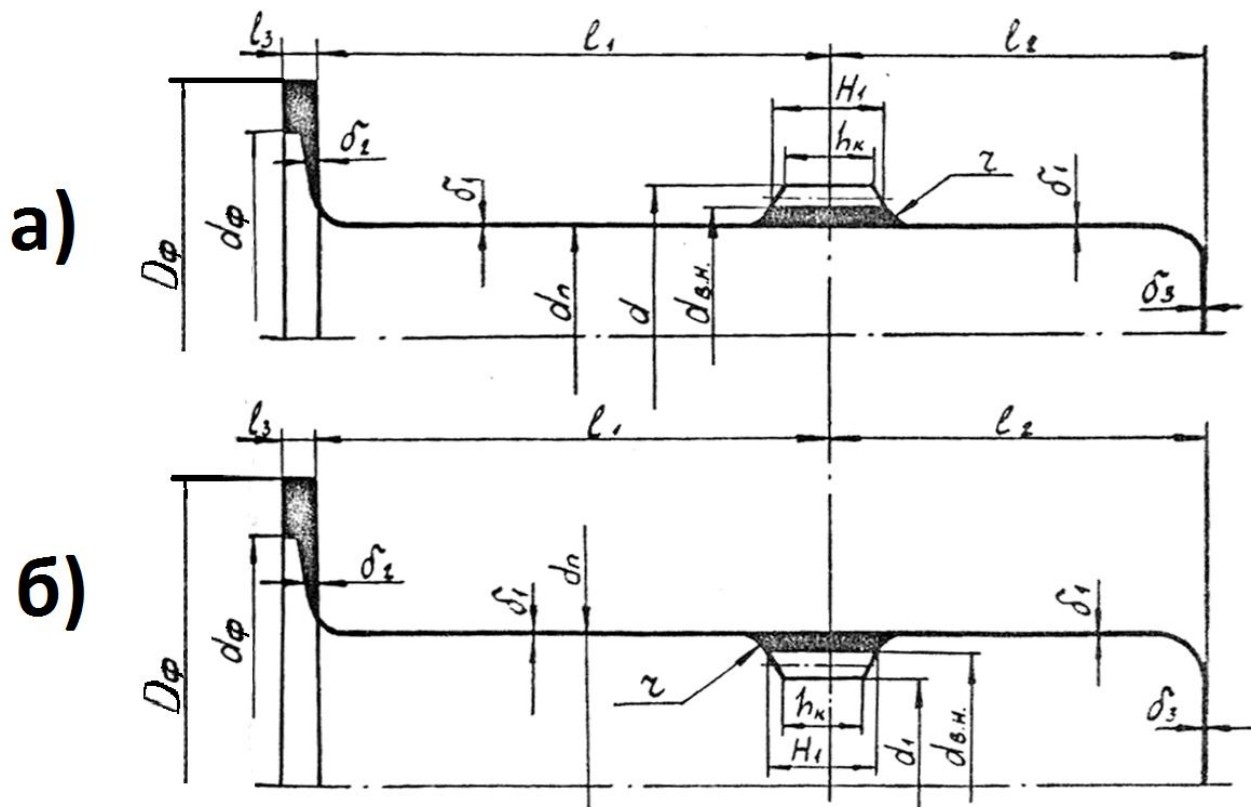


Рис. 3.21. Параметры гибких элементов (см. табл.3.4)

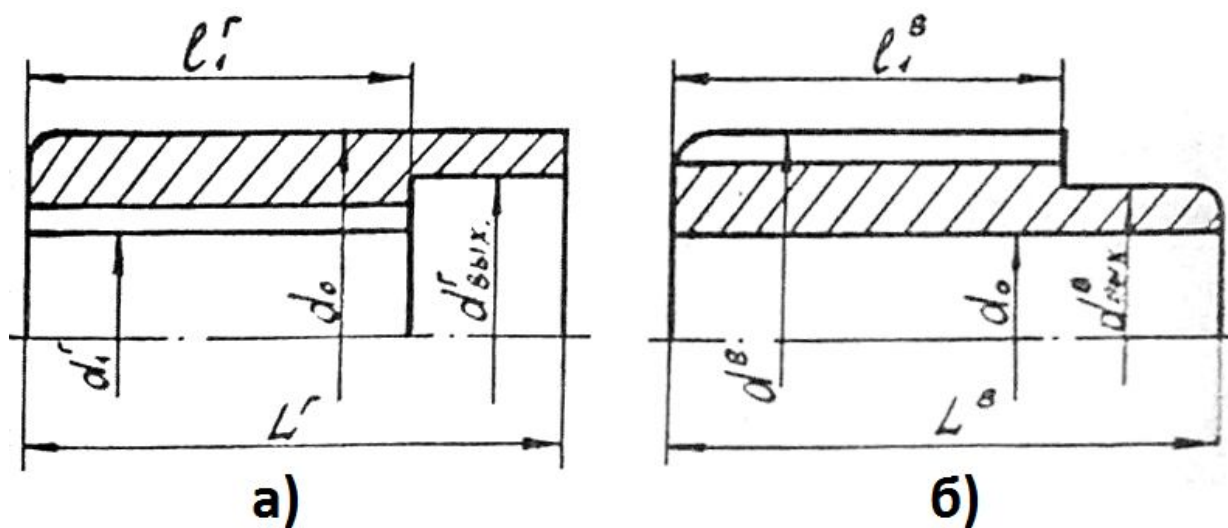


Рис. 3.22. Параметры жестких элементов (см. табл.3.4)

Таблица 3.4

Рекомендации к конструированию элементов зацепления
(к рис. 3.21 и к рис. 3.22)

Наименование	Обозначение	Гибкий винт	Гибкая гайка
Посадочный диаметр	d_n	$= D_r$	d_r
Толщина оболочки	δ_1	$\frac{1}{180} \leq \frac{h_o}{d_n} \leq \frac{1}{100}$	
Толщина оболочки у фланца	δ_2	$= 3\delta_1$	
Толщина дна (или диафрагмы)	δ_3	$= 2\delta_1$	
Ширина фланца	l_3	$= (5 + 7)\delta_1$	
Диаметр под резьбу	$d_{ен}$	$= d_n + 2\delta_1 + 0,006d_n$	$= d_n - 2\delta_1 - 0,006d_n$
Наружный (внутренний) диаметр резьбы	$d; d_1$	$d = d_{ен} + 1,4057p_o$	$d_1 = d_{ен} - 1,4057p_o$
Высота витка резьбы	H_p	$= 0,70375p_o$	
Внутренний диаметр фланца	d_ϕ	$= (1,4 + 1,5)d_n$	
Наружный диаметр фланца	D_ϕ	Согласно ГОСТ	
Ширина пояса резьбы	H_1	$= (0,08 \div 0,2)d_n$	
Длина резьбы	h_K	$= np_o \approx (6 \div 7)p_o$	
Радиус резьбового перехода	r	$= 0,00d_n$	
Длина от фланца до середины резьбы	l_1	конструктивно,	но $l_1 \geq (1,0 \div 1,5)d_n$
Длина от середины резьбы до дна	l_2	конструктивно,	но $l_2 \geq (1,0 \div 1,5)d_n$
Общая длина	L	$L = l_1 + l_2 + l_3$	

Таблица 3.4 (продолжение)

Наименование	Обозначение	Жесткая гайка	Жесткий винт
Внутренний (наружный) диаметр резьбы	$d_1^F; d^B$	$= d; = (d - 0,4p_o)$	$= d_1; = (d_1 + 0,4p_o)$
Диаметр под подшипник скольжения (опору качения)	d_o	$= 1,1d_1^F$	$= 1,1d^B$
Диаметр выхода резьбы	$d_{вых}$	$= d_1^F + 2p_o$	$= d^B - 2p_o$
Длина резьбы	l_1^F	l_1	
Общая длина	L^F	$= l_1 + l_2 + 10мм$	

3.4. Аналитические выражения составляющих погрешностей положения ведомого звена волновой резьбовой передачи

При разработке ВРП, отвечающих заданным требованиям технологического оборудования по кинематической точности, необходимо аналитическое исследование конструкций ВРП, заключающееся в определении максимального значения ожидаемой кинематической погрешности. Для анализа отклонений размера, отклонений расположения поверхностей и профиля, отклонения формы и шероховатости можно задаться совокупностью гармонических составляющих, определяемых совокупностью отклонений с различными частотами. Для аналитического изображения действительного расположения поверхностей, отклонений формы, шероховатости и профиля контура сечения поверхности, используем закон распределения линейной функции независимых случайных аргументов [58]

$$Z = \sum_{j=1}^n A_j X_j + B, \quad (3.33)$$

где A_j, B – постоянные коэффициенты.

Приведем анализ кинематической погрешности на примере разработанной базовой схемы ВРП. Наличие люфтов в кинематической цепи приводит к снижению главного перемещения и кинематической точности ведомого звена.

Люфты присущи всем механическим передачам, однако волновым в меньшей мере, что выгодно отличает их от остальных.

Учитывая сказанное, в качестве критерия оценок точности резьбовых волновых передач, можно принять люфты, мертвый ход и кинематическую погрешность ведомого звена.

Задачу решаем следующим образом:

Устанавливаем аналитическую зависимость, связывающую рассматриваемый показатель точности механизма с показателями, характеризующими погрешность отдельных деталей механизма в виде отклонения размеров поверхностей и их взаимного расположения [58].

Для этого используем зависимости [58] по определению осевого перемещения ведомого звена

$$S_3 = S_z(\varphi_1) \pm \Delta S_z(\varphi_1), \quad (3.34)$$

где φ_1 – угол поворота ведущего звена генератора волн; ΔS_z – погрешность положения ведомого звена гайки.

Создание ВРП, отвечающей заданным требованиям оборудования по параметру кинематической точности, требует проведения аналитического исследования конструкции передачи, заключающегося в определении наибольшего значения ожидаемой кинематической погрешности.

Анализ кинематической погрешности проведем на основе теории вероятностей, приведенной в [58].

Отметим, что ошибки, возникающие при механической обработке, сборке и т.д., в большинстве случаев подчиняются различным законам распределения. Известные аналитические зависимости при нормальном законе

распределения, связывающие числовые характеристики случайных величин с координатами границ их зоны рассеивания, в соответствии с [58] будем обозначать формулой

$$\delta_X = X_{\epsilon} - X_{\eta}, \quad (3.35)$$

где δ_X – зона рассеивания (поля допуска); X_{ϵ} – верхнее отклонение; X_{η} – нижнее отклонение.

Координата середины поля допуска

$$X_o = \frac{X_{\eta} + X_{\epsilon}}{2}. \quad (3.36)$$

Для определения среднего значения математического ожидания $M(x)$ и среднего квадратического отклонения $\delta(x)$ случайной величины X вводятся коэффициент относительной асимметрии $\alpha(x)$ и относительное среднее квадратическое отношение $\lambda(x)$.

При этом

$$\alpha(x) = \frac{M(x) - x_o}{\frac{\delta_x}{2}};$$

$$\lambda(x) = \frac{\sigma(x)}{\frac{\delta_x}{2}}. \quad (3.37)$$

На этом основании определяется среднее значение математического ожидания случайной величины через координаты границ её зоны рассеивания:

$$M(x) = ax = X_o + a(x) \frac{\delta_x}{2} = \frac{X_{\eta} + X_{\epsilon}}{2} + a(x) \frac{X_{\epsilon} - X_{\eta}}{2}. \quad (3.38)$$

Аналогично представляется среднее квадратичное отклонение случайной величины X через координаты границ зоны её рассеивания:

$$\sigma(x) = \lambda(x) \frac{X_B - X_H}{2} \quad (3.39)$$

Практически границы зоны рассеивания случайной величины X принимают значения 0 и $3,44K$, где K – параметр распределения.

Кинематическую погрешность ВРП рассмотрим на примере конструкции одной из схем ВРП, выбранной на базе проведенного ранее анализа.

На основе рассмотренных законов распределения и учитывая, что указанные ошибки являются как случайными, так и систематическими величинами. Составим расчетную схему (рис. 3.24), на которой укажем следующие погрешности отдельных деталей: ошибки сборки (взаимного расположения деталей);

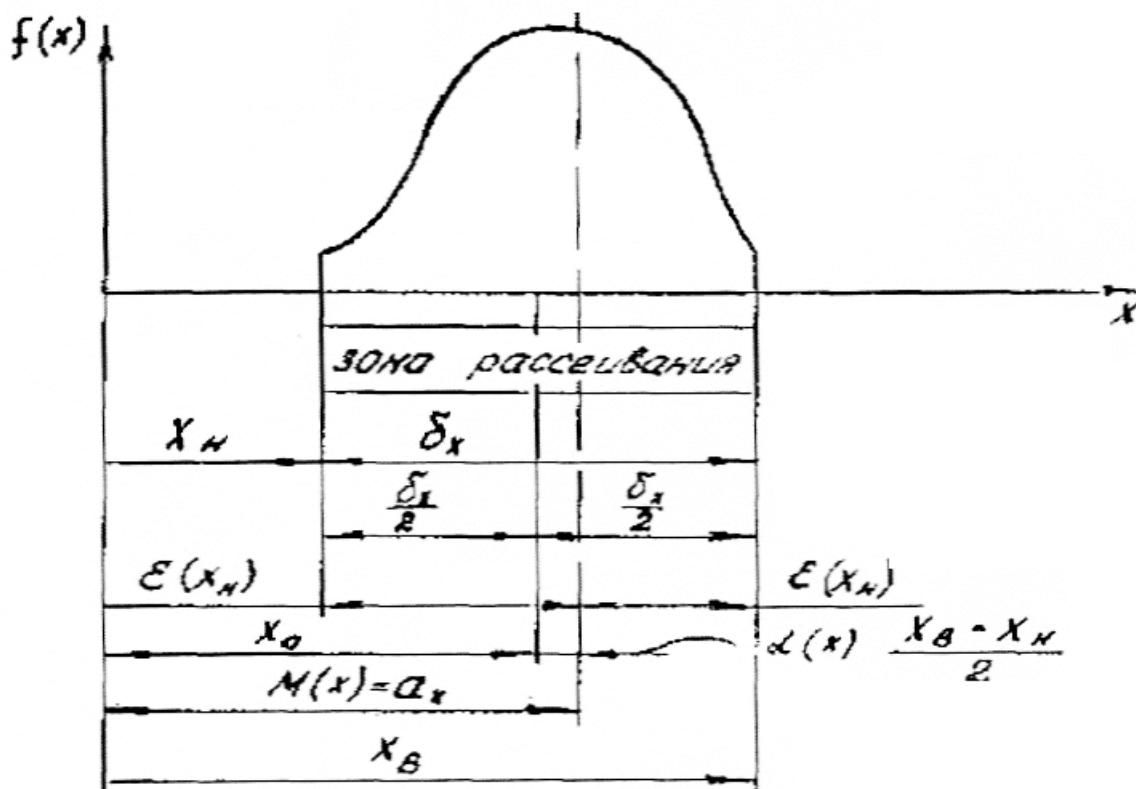


Рис. 3.23. Поле допуска

зазоры в посадках; радиальное биение вращающихся элементов; ошибки микронеровностей соприкасающихся поверхностей; радиальной жесткости генераторов волн и радиальной податливости жесткого элемента; осевой податливости гибкого элемента.

Представим общую погрешность как результат сложения независимых случайных векторов:

$$\Delta = R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n A_i R_i + R_{gi} \quad (3.40)$$

где A_i – постоянный коэффициент.

Рассмотрим ошибки деталей ВРП, которые совершают вращательное движение R_{gi} . Вследствие того, что эти детали вращаются с различными частотами, то и ошибки этих деталей будут проявляться с такими же частотами.

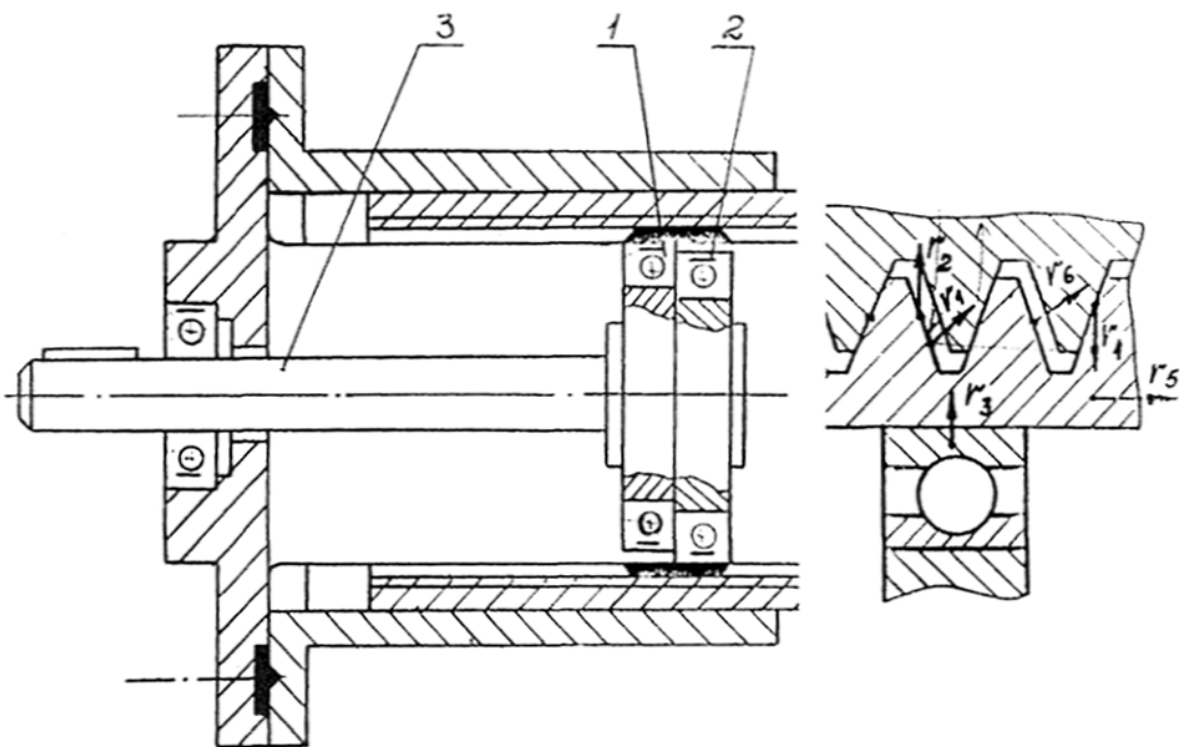


Рис. 3.24. Расчетная схема ВРП

Рассмотрим частоты вращения деталей ВРП и обозначим следующим образом:

n – частота вращения ведущего вала 3.

Оценим частоты вращения деталей ВРП в зависимости от n . Здесь

n_1 и n_2 – частоты вращения внутренних колец первого и второго подшипников (№ 7000106), с параметрами: наружный диаметр 55мм; внутренний диаметр 30мм; ширина 9мм; диаметр шариков 5,56мм; число шариков 14.

$$n_1, n_2 = n,$$

n_3 и n_4 – частота вращения шариков первого и второго подшипников вокруг своей оси;

$$n_3, n_4 = K_1 n, \text{ где } K_1 = \frac{R_6}{d_{ш}},$$

$n_5 = n_6$ – частоты вращения наружных колец первого и второго подшипников вокруг оси вала;

$$n_5 = n_6 = K_2 n, \text{ где } K_2 = \frac{d_{об}}{d_{дис}} = \frac{56}{55} = 1,018.$$

Определяем частоту вращения шариков относительно внутреннего и наружного кольца подшипников 1 и 2:

n'_3 и n'_4 – частоты контактирования шариков первого и второго подшипников с внутренними кольцами,

$$n'_3 = n'_4 = n_3 - n = 3,32n - n$$

n''_3 и n''_4 – частоты контактирования шариков первого и второго подшипников с наружными кольцами,

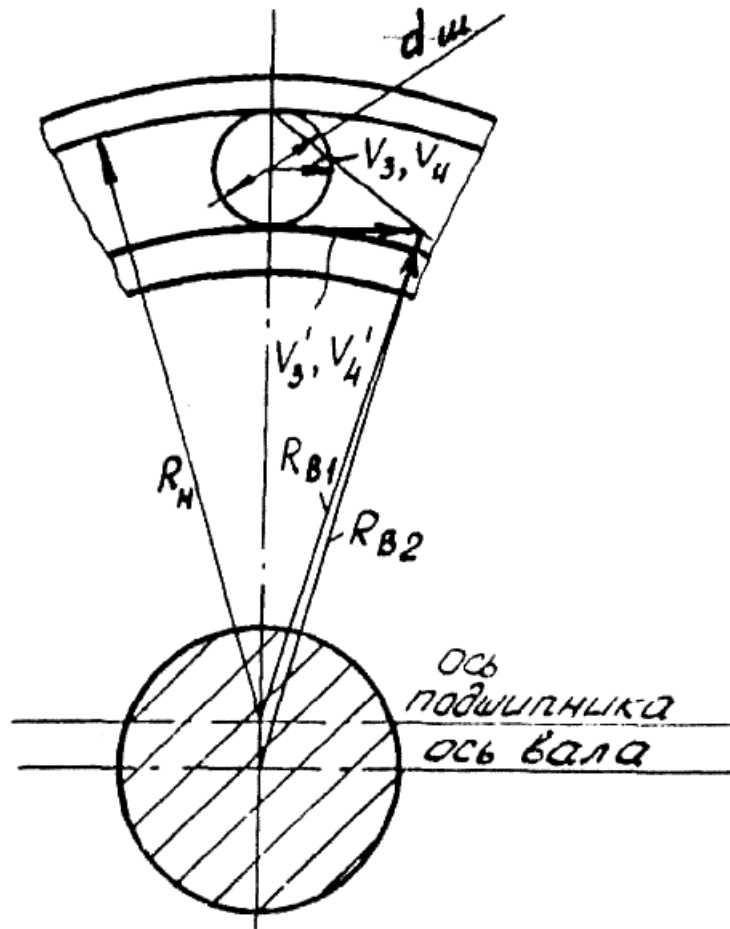


Рис. 3.25. Расчетная схема генератора волн

$$n_3'' = n_4'' = n_4 - n = 3,32n - n.$$

Определим частоту вращения шариков первого и второго подшипников относительно оси вала:

$$n_3'' = n_3 + n = 3,32n + n,$$

$$n_4'' = n_4 + n = 3,32n + n,$$

Таким образом, в ВРП определилось 7 основных частот изменения погрешностей изготовления и сборки деталей, влияющих на кинематическую погрешность ВРП:

$$n, (n_1 \text{ и } n_2), (n_3 \text{ и } n_4), (n_5 \text{ и } n_6),$$

$$(n_3' \text{ и } n_4'), (n_3'' \text{ и } n_4''), (n_3''' \text{ и } n_4''').$$

Из полученных расчетов видно, что наименьшую частоту вращения имеет ведущий вал n – первая гармоника, период которой можно принять равным 360° . Тогда периоды проявления частот остальных погрешностей будут :

$$\begin{aligned}
 &P_2(n_1 \text{ и } n_2) \approx 360^0; P_3(n_3 \text{ и } n_4) \approx 108^0; P_4(n_5 \text{ и } n_6) \approx 353^0; \\
 &P_5(n'_3 \text{ и } n'_4) \approx 155^0; P_6(n''_3 \text{ и } n''_4) \approx 155^0; P_7(n'''_3 \text{ и } n'''_4) \approx 83^0.
 \end{aligned}$$

Так как гибкий элемент жестко закреплен одним концом во фланце, то торцевое биение подшипников генератора волн оказывает незначительное влияние на общую осевую погрешность ВРП.

Поэтому ошибки от торцевого биения в расчетах не учитываем.

Распределение величин радиальных биений подшипников генератора волн в соответствии с [58] подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием:

$$M(Rg_{n,v,2}^{\kappa,\delta}) = 0,5\Delta R, \quad (3.41)$$

где κ и δ – погрешность кольца подшипника и дорожки качения; n и v – погрешность наружного и внутреннего колец подшипников 1,2; 1 и 2 – номера подшипника в расчетной схеме; ΔR – допускаемая погрешность радиального биения.

$$\begin{aligned}
 M(Rg_{n_1}^{\kappa}) &= 0,5\Delta R_{n_1}^{\kappa} = 0,5 \cdot 9 = 4 \text{ мкм}; \\
 D(Rg_{n_1}^{\kappa}) &= \sigma^2(R_{n_1}^{\kappa}) = \left\{ \frac{\Delta R_{n_1}^{\kappa}}{6} \right\}^2 = 2,25 \text{ мкм}^2;
 \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\sigma^2(Rg_{n_1}^{\kappa}) = \frac{\Delta R_{n_1}^{\kappa}}{6} = 1,5 \text{ мкм};$$

Расчет остальных погрешностей подшипников аналогичен [58].

Полученные числовые данные векторов просуммируем:

$$M\left(\sum_{i=1}^m R_{H_i}\right) = M(R_{H_1}^\delta) + M(R_{H_2}^\delta) + M(R_{\theta_1}^\delta) + M(R_{\theta_1}^\kappa) + M(R_{\theta_2}^\kappa) = 17,5 \text{ мкм};$$

$$D\left(\sum_{i=1}^m R_{H_i}\right) = D(R_{H_1}^\delta) + D(R_{H_2}^\delta) + D(R_{\theta_1}^\kappa) + D(R_{\theta_2}^\kappa) + D(R_{H_2}^\kappa) = 7,66 \text{ мкм}^2;$$

$$\sigma\left(\sum_{i=1}^m R_{H_i}\right) = \sqrt{D\left(\sum_{i=1}^m R_{H_i}\right)} = 2,76 \text{ мкм}. \quad (3.43)$$

Далее определим погрешности, которые будут зависеть от зазоров в зацеплении; микронеровностей соприкасающихся поверхностей; жесткости генератора волн; податливости жесткого элемента; податливости гибкого элемента; ошибок сборки.

Указанные погрешности рассмотрим отдельно. Здесь R_1 – вектор случайной величины, зависящей от осевого зазора в зацеплении ВРП:

$$R_1 = \Delta Y_1 = \frac{S_n}{\cos(\gamma \Delta \gamma)}, \quad (3.44)$$

где S_n – нормальный зазор у ВРП с параметрами:

$$S_n = P - P_1; \quad P_1 = 2a; \quad a = W \operatorname{tg} \gamma; \quad \gamma_z \approx 32^\circ;$$

$$a = 0,7 \cdot 0,645 = 0,45; \quad P_1 = 0,904; \quad S_n = 1 - 0,904 = 0,100 \text{ мм}.$$

Рассмотрим параметры, оказывающие влияние на S_n ; к ним можно отнести:

$\Delta d_{жс}$ – отклонение диаметра жесткого элемента;

ΔW – отклонение радиального перемещения;

$\Delta \gamma_z, \Delta \gamma_{жс}$ – отклонение угла наклона образующей жесткого и гибкого элементов.

Определим ожидаемую погрешность осевого зазора при нормальном законе её распределения [58]:

$$M(S_n) = \frac{\Delta d_{жсв}}{2} - \frac{\Delta d_{z_n} + \Delta d_{z_в}}{2} - \frac{\Delta W_H + \Delta W_в}{2} - \frac{\Delta \gamma_{жсн} + \Delta \gamma_{z_в}}{2} \cdot \varepsilon(S_n) = \varepsilon(S_в) =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\Delta d_{жсн} - \Delta d_{жсв}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d_{z_n} - \Delta d_{z_в}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W_H - \Delta W_в}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \gamma_{жсв} - \Delta \gamma_{z_в}}{2}\right)^2}, \quad (3.45)$$

где $\Delta d_{жсн}; \Delta d_{z_n}; \Delta W_H; \Delta \gamma_{жсн}$ – нижнее отклонение диаметров жесткого, гибкого элементов, радиального перемещения, угла наклона образующей профиля;
 $\Delta d_{жсв}; \Delta d_{z_в}; \Delta W_в; \Delta \gamma_{z_в}$ – верхнее отклонение диаметров жесткого, гибкого элементов, радиального перемещения, угла наклона образующей профиля.

Исходные данные: гибкий элемент М 59.6h₆x1, гайка М60x1

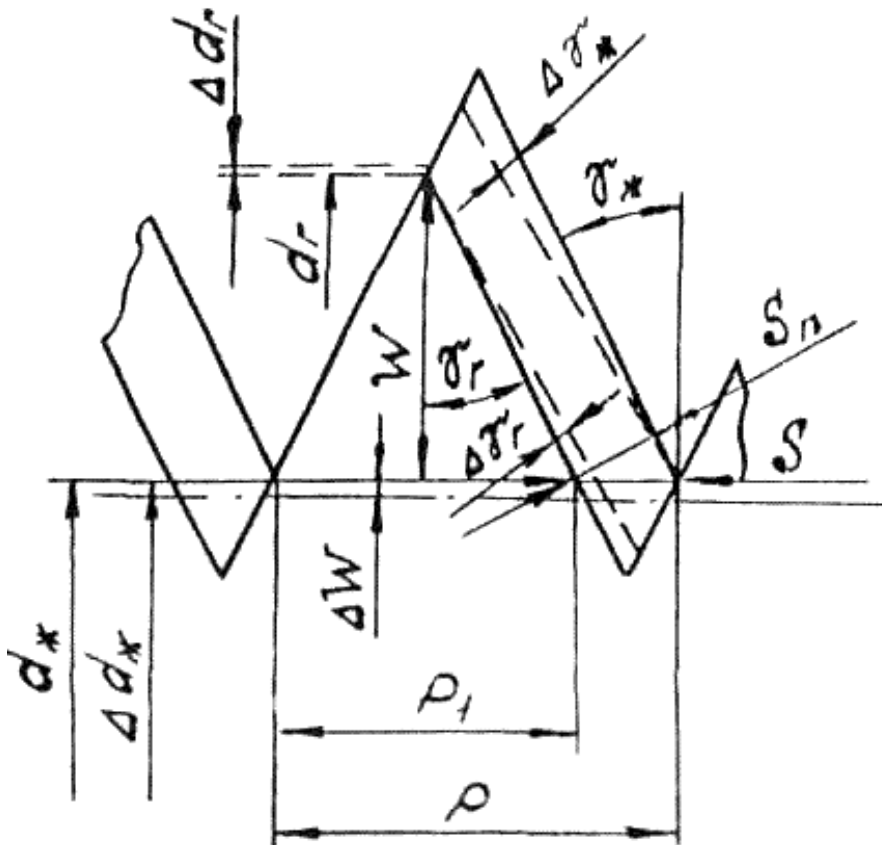


Рис. 3.26. Определение зазора в зацеплении ВРП

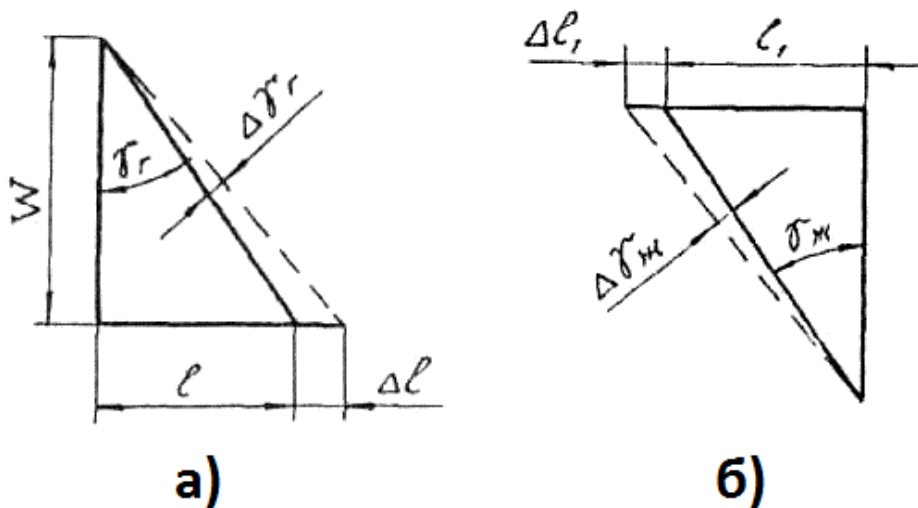


Рис. 3.27. Определение погрешности углов профиля элементов: а) гибкого элемента; б) жесткого элемента

$$\Delta d_{z_n} = -12 \text{ мкм}; \Delta d_{z_e} = 0; \text{ согласно стандартам СЭВ 305-76, 306-76};$$

$$\Delta d_{ж_n} = 0; \Delta d_{ж_e} = +15 \text{ мкм}; \Delta W_n = 0; \Delta W_e = +0,05 \text{ мкм};$$

$$\Delta \gamma_{z_n} = 0; \Delta \gamma_{z_e} = 0,06 \text{ мкм}; \Delta \gamma_{ж_n} = 0; \Delta \gamma_{ж_e} = 0,06 \text{ мкм};$$

$$\operatorname{tg}(\gamma_z + \Delta \gamma_z)W = l + \Delta l; \quad \operatorname{tg}(\gamma_{ж} + \Delta \gamma_{ж})W = l_1 + \Delta l_1.$$

Среднее значение общей погрешности

$$M(S_n) = 13,5 \text{ мкм}.$$

По формуле (3.45) вычислим предельное отклонение погрешности:

$$\varepsilon(S_{нв}) = \varepsilon(S_{nh}) = 9,6 \text{ мкм}.$$

Границы зоны рассеивания общей погрешности

$$S_{нв} = 13,5 + 9,6 = 23,1 \text{ мкм}.$$

$$S_{nh} = 13,5 - 9,6 = 3,9 \text{ мкм}.$$

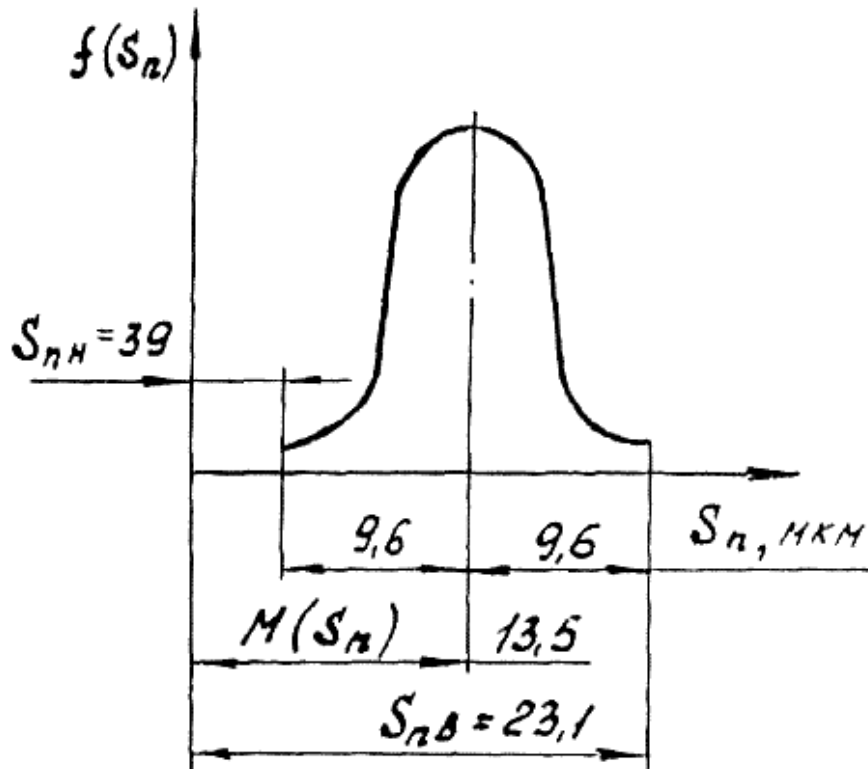


Рис. 3.28. Кривая рассеивания погрешностей нормального зазора в зацеплении

Так как $\alpha(\Delta d_{зв}) = \alpha(\Delta d_{жсн}) = 0$ и $\lambda(\Delta d_{зв}) = \lambda(\Delta d_{жсн}) = 0,33$, то среднее квадратичное отклонение погрешностей гибкого и жесткого элементов

$$\sigma_{жс} = \frac{\Delta d_{жсв} - \Delta d_{жсн}}{6} = \frac{15 - 0}{6} = 2,5 \text{ мкм},$$

$$\sigma_2 = \frac{\Delta d_{зв} - \Delta d_{зн}}{6} = \frac{0 - (-12)}{6} = 2,0 \text{ мкм},$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{жс}^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{2,5^2 + 2,0^2} = 3,2 \text{ мкм}.$$

R_2 – вектор случайной величины, зависящей от контактных обмятий шероховатости поверхности гибкого и жесткого элементов, равен:

$$R_2 = \Delta Y_2 = \frac{\Delta K}{\cos(\gamma + \Delta\gamma)}, \quad (3.46)$$

ΔK – погрешность микронеровностей, зависящая от контактного давления.

Шероховатость поверхности витка гибкого и жесткого элементов обуславливается совокупностью неровностей с относительно малыми шагами, получаемой при обработке поверхностей режущим инструментом.

Для построения системы допусков устанавливается зависимость между критериями R_a и R_z .

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля;

R_z – средняя высота неровностей.

Величину отношения $\frac{R_z}{R_a}$ можно получить, задаваясь определенным профилем, полагая, что шероховатость представляет собой ряд равнобедренных треугольников с соотношением $\frac{R_z}{R_a} = 4$ [58], что регламентировано ГОСТ 2789-73 для 1÷6 классов чистоты поверхности. На рис. 3.29 приведены графики зависимости шероховатости от нагрузки и кривой рассеивания погрешности шероховатости.

В данном случае верхнее и нижнее отклонения шероховатости гибкого и жесткого витков рассматриваем как независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону, т.е.

$$\alpha(\Delta K_n) = 0, \quad \lambda(\Delta K_n) = \lambda(\Delta K_g) = 0,33.$$

На этом основании согласно формуле (3.45) можно записать следующее:

$$M(\Delta K) = \frac{\Delta K_{нг} + \Delta K_{вг}}{2} - \frac{\Delta K_{нж} + \Delta K_{вж}}{2} - \frac{\Delta \gamma_{жн} + \Delta \gamma_{зв}}{2};$$

$$\varepsilon(\Delta K_n) = \varepsilon(\Delta K_g) = \sqrt{\left(\frac{\Delta K_{вг} - \Delta K_{нг}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K_{вж} - \Delta K_{нж}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \gamma_{жн} - \Delta \gamma_{зв}}{2}\right)^2},$$

где $\Delta K_{нж}$, $\Delta K_{нг}$ — нижнее отклонение поверхности шероховатости гибкого и жесткого витков;

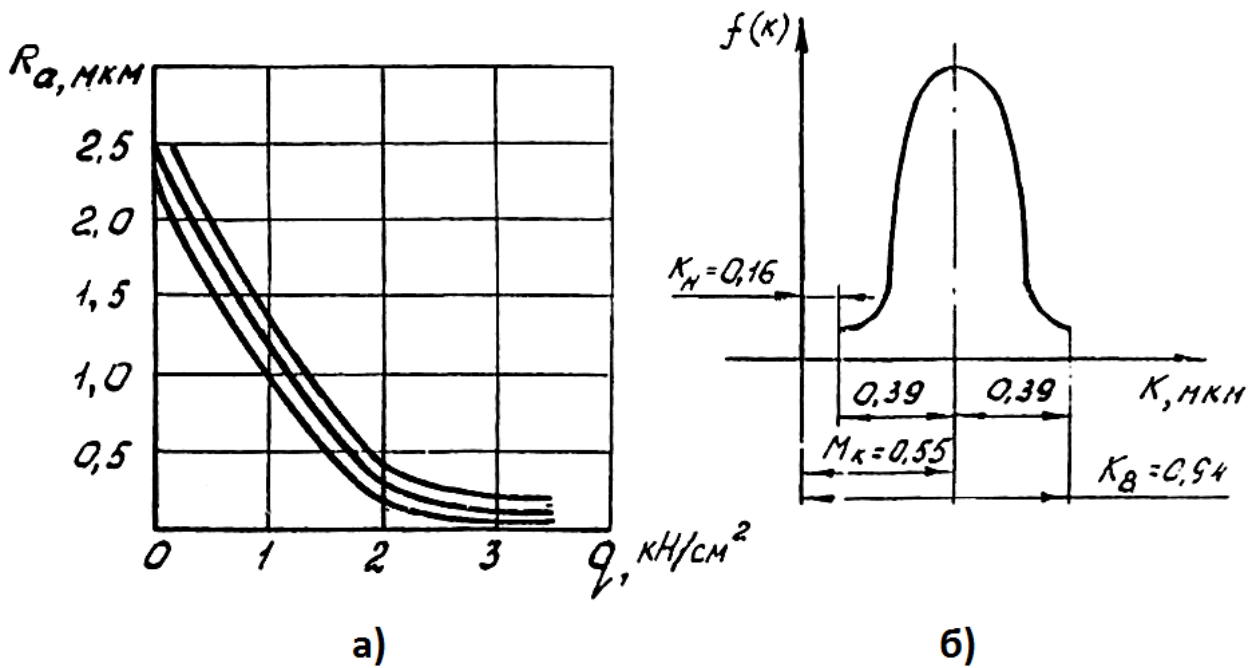


Рис. 3.29. а) зависимость шероховатости от нагрузки; б) кривая рассеивания погрешностей шероховатости

$\Delta K_{вг}$, $\Delta K_{вж}$ – верхнее отклонение шероховатости поверхности гибкого и жесткого витков;

$\Delta \gamma_{нж}$, $\Delta \gamma_{вг}$ – нижнее и верхнее отклонение угла наклона образующей профиля гибкого и жесткого витков.

Определим среднее значение, предельные отклонения шероховатости:

$$\Delta K_{вг} = +0,5 \text{ мкм}; \quad \Delta K_{вж} = 0; \quad \Delta K_{нж} = -0,6 \text{ мкм}; \quad \Delta K_{вж} = 0;$$

$$\Delta \gamma_{нж} = 0; \quad \Delta \gamma_{вг} \approx 0,06 \text{ мкм}.$$

По формуле (3.45) находим среднее значение шероховатости:

$$M(K) = \frac{0 + 0,5}{2} - \frac{0 - 0,6}{2} \approx 0,55 \text{ мкм}.$$

Границы зоны рассеивания шероховатости:

$$\Delta K_{г} = 0,55 + 0,39 = 0,94 \text{ мкм};$$

$$\Delta K_{н} = 0,55 - 0,39 = 0,16 \text{ мкм}.$$

Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{Г}$ и $\sigma_{В}$ вычислим по формулам:

$$\sigma_{г} = \frac{\Delta K_{вг} - \Delta K_{нж}}{6} = \frac{0,5 - 0}{6} \approx 0,08 \text{ мкм};$$

$$\sigma_{жс} = \frac{\Delta K_{вжс} - \Delta K_{нжс}}{6} = \frac{0 - (-0,06)}{6} \approx 0,01 \text{ мкм};$$

$$\sigma_{\kappa} = \sqrt{\sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{\delta}^2} = \sqrt{0,08^2 + 0,1^2} \approx 0,12 \text{ мкм}.$$

R_3 – вектор случайной величины осевой погрешности перемещения жесткого элемента, зависящий от податливости системы “гибкое звено – генератор волн”, обусловлен в частном случае контактными деформациями в генераторе волн, определяется в основном в радиальном направлении по формуле:

$$R_3 = \Delta Y_3 = \Delta R_1 \operatorname{tg}(\gamma_2 + \Delta \gamma_2), \quad (3.47)$$

где ΔR_1 — радиальная податливость; γ_1 — угол наклона образующей профиля гибкого элемента; $\Delta \gamma_1$ — погрешность угла наклона боковой стороны профиля гибкого элемента; $\Delta R_1 = \Delta r_n + \Delta r_{\delta} + \Delta d_n + \Delta d_{\delta}$.

Радиальная податливость системы «генератор – гибкий винт» включает контактные деформации внутреннего и наружного колец подшипника:

- по дорожкам качения Δr_{δ} и Δr_n ;
- по посадочным диаметрам колец Δd_{δ} и Δd_n .

Значение Δr определяют, используя рекомендации [58].

Зависимость радиальной податливости от нагрузки приведена в [20]:

$$\Delta r = \Delta m \sqrt{\left(\frac{N}{E}\right)^2 \frac{r_2 - r_1}{r_2 r_1}}. \quad (3.48)$$

Здесь N – нормальная нагрузка на один шарик в кН; E – модуль упругости материала; Δm – коэффициент перемещения.

$$\Delta m = \left(1,4 - 1,17 \frac{A}{B}\right)^2; \quad (3.49)$$

$$\text{где } \frac{A}{B} = \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right) \left(1 \pm \frac{r_1}{r_2}\right), \quad (3.50)$$

r_1 – радиус тела качения (шарика); r_2 – радиус дорожки качения; r_0 – радиус окружности центров шарика (в скобках второго сомножителя знак «-» обозначает, что для внутренней, «-» «+» для наружной дорожек качения).

Контактные деформации на посадочных диаметрах

$$\Delta d = c \sqrt{\frac{3q}{2d}}, \quad (3.51)$$

где q – погонная нагрузка на единицу ширины подшипника, кН/см, до 20кН/см; d – посадочный диаметр кольца; c – коэффициент, учитывающий характер стыка и величину шероховатости поверхности ($c = 0,08 \dots 0,12$) [58].

Проведем оценку погрешностей в радиальной податливости с учетом погрешности угла наклона образующей профиля гибкого элемента. На рис. 3.31 приведен график зависимости осевой погрешности от радиальной податливости генератора волн.

Исходя из того, что отклонение диаметра вала и отверстия распределены по нормальному закону, а податливость находится в пределах упругости. Определим среднее значение податливости генератора волн и погрешности отклонения образующей профиля гибкого элемента по нормальному закону распределения

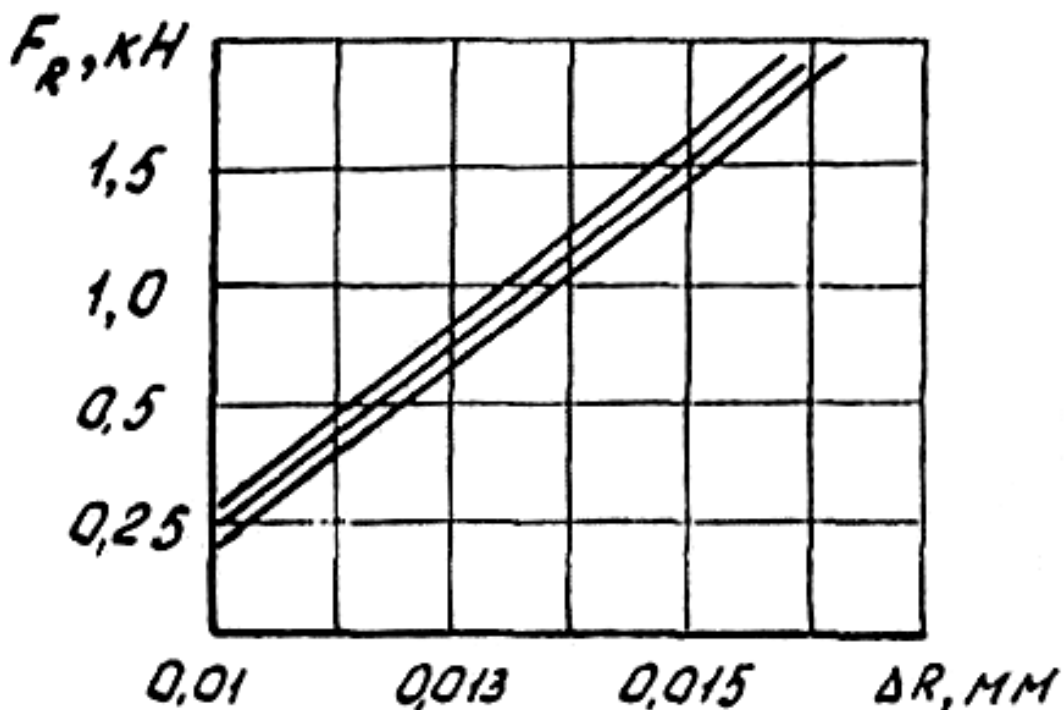


Рис. 3.30. Зависимость радиальной податливости от нагрузки

$$M(R_1) = \frac{\Delta R_{1H} + \Delta R_{1\theta}}{2} - \frac{\Delta \gamma_{жн} + \Delta \gamma_{\theta\theta}}{2}; \quad (3.52)$$

$$\varepsilon(R_{1H}) = \varepsilon(R_{1\theta}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{1H} - \Delta R_{1\theta}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \gamma_{жн} - \Delta \gamma_{\theta\theta}}{2}\right)^2},$$

где $\Delta R_{1\theta}; \Delta \gamma_{\theta\theta}$ верхнее отклонение податливости генератора и угла наклона образующей профиля гибкого элемента; $\Delta R_{1H}; \Delta \gamma_{жн}$ нижнее отклонение податливости генератора и угла наклона образующей профиля жесткого элемента.

Определим исходные данные и среднее значение податливости генератора волн и границы зоны рассеивания размеров:

$$\Delta R_{\theta} = +7,2 \text{ мкм};$$

$$\Delta R_{H} = -6,8 \text{ мкм};$$

$$\Delta \gamma_{жн} = 0;$$

$$\Delta \gamma_{\theta\theta} \approx 0,06 \text{ мкм};$$

$$M(R) = \frac{-6,8 + 7,2}{2} - \frac{0 - 0,06}{2} \approx 0,23 \text{ мкм};$$

$$M(R) = \frac{-6,8 + 7,2}{2} - \frac{0 - 0,06}{2} \approx 0,23 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon(R_{1H}) = \varepsilon(R_{1\theta}) = \sqrt{\left[\frac{7,2 - (-6,8)}{2}\right]^2 + \left[\frac{0 - (-0,06)}{2}\right]^2} = 7 \text{ мкм};$$

$$R_{1\theta} = 0,23 + 7 = 7,23 \text{ мкм};$$

$$R_{1H} = 0,23 - 7 = -6,77 \text{ мкм}. \quad (\text{см. рис. 3.32})$$

R_4 – вектор случайной величины осевой погрешности перемещения жесткого элемента, зависящий от радиальной податливости жесткого элемента,

$$R_4 = \Delta y_4 = \Delta R_2 \operatorname{tg}(\gamma_b + \Delta \gamma_b), \quad (3.53)$$

$$\Delta R_2 = \frac{F_R P^3}{\pi E J} \sum_{n \geq 2}^{\infty} \frac{\cos n \theta}{(n^2 - 1)^2 \frac{E h R}{E J \ln^2} \cdot \frac{1}{2(\pi \mu)} + \frac{n^2 l^2}{3 R^2}}, \quad (3.54)$$

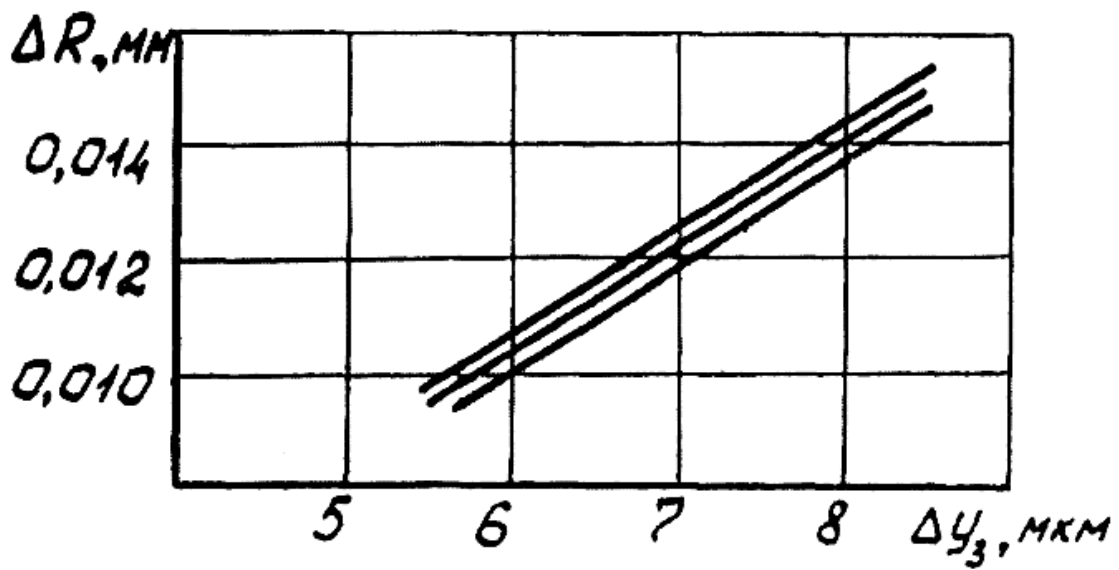


Рис. 3.31. Зависимость осевой погрешности от радиальной податливости генератора волн

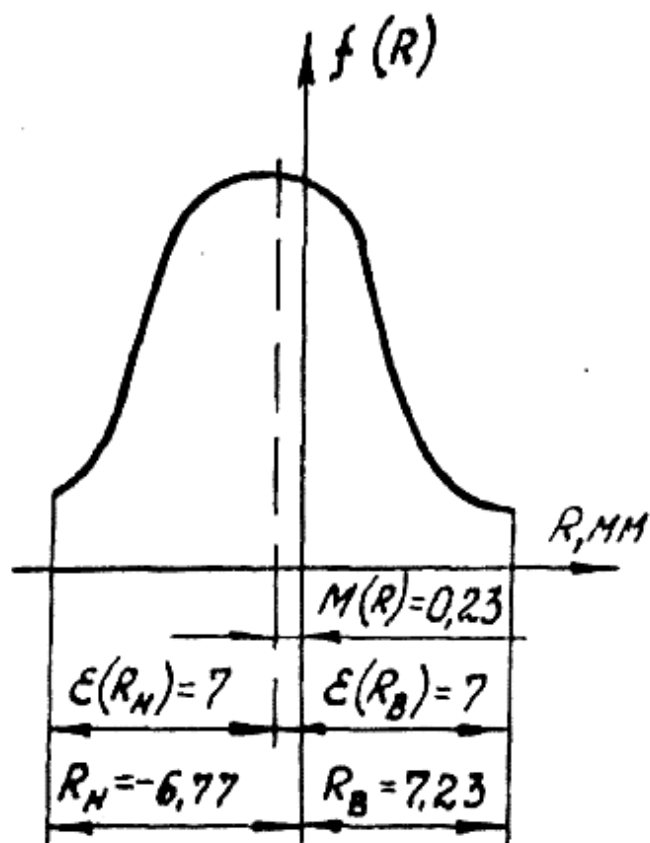


Рис. 3.32. Кривая рассеивания погрешностей размеров генератора волн

γ_B – угол наклона образующей профиля жесткого элемента; $\Delta\gamma_B$ – погрешность угла наклона боковой поверхности профиля жесткого элемента; $F_R^{общ}$ – суммарная радиальная нагрузка; μ – коэффициент Пуассона.

Параметр ΔR_2 определен В.Ф. Чижовым на примере деформации кольца, подкрепленного цилиндрической оболочкой, нагруженного на дуге [58].

Осевая деформация гибкого винта нагруженной значительными силами ВРП с учетом податливости витка как кривой балки переменного сечения на упругом основании является основной и наименее изученной составляющей погрешности резьбовой волновой передачи (см. рис. 3.33).

На рис. 3.34 показан график зависимости радиальной податливости жесткого элемента от осевой нагрузки и ее погрешность. Среднее значение радиальной податливости жесткого элемента определим так же, как величину R_3 , по нормальному закону распределения:

$$M(R_2) = \frac{\Delta R_{2н} + \Delta R_{2в}}{2} - \frac{\Delta\gamma_{жн} + \Delta\gamma_{жв}}{2},$$

где $\Delta R_{2в}, \Delta\gamma_{жв}$ – верхнее отклонение податливости жесткого элемента и угла наклона образующей профиля гибкого элемента; $\Delta R_{2н}, \Delta\gamma_{жн}$ – нижнее отклонение податливости жесткого элемента и угла наклона образующей профиля жесткого элемента.

Определим среднее значение радиальной податливости жесткого элемента и границы зоны рассеивания размеров при следующих данных:

$$\Delta R_{2в} = 1,4 \text{ мкм};$$

$$\Delta R_{2н} = 0;$$

$$\Delta\gamma_{жн} = 0;$$

$$\Delta\gamma_{жв} \approx 0,06 \text{ мкм}.$$

Получим:

$$M(R_2) = \frac{0 + 1,4}{2} - \frac{0 - 0,06}{2} \approx 0,67 \text{ мкм};$$

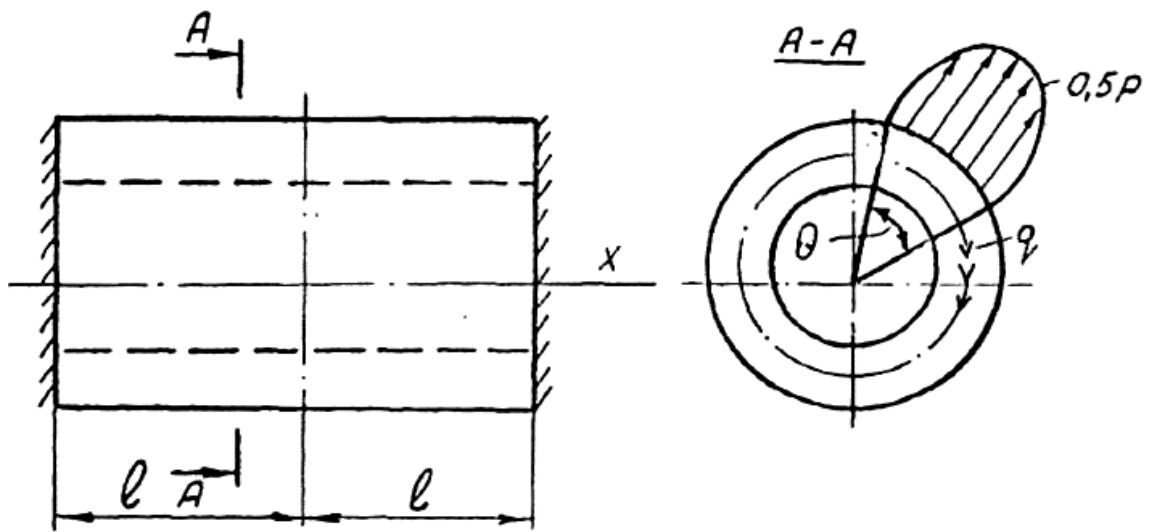


Рис. 3.33. Схема нагружения жесткого элемента

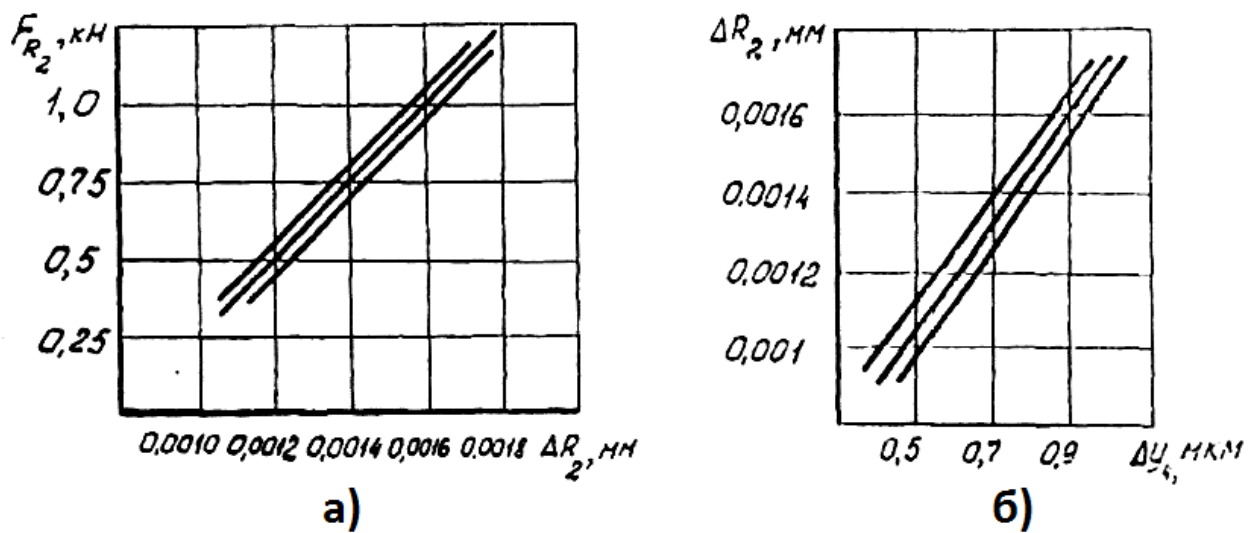


Рис. 3.34. Графики зависимости: а) радиальной податливости жесткого элемента от осевой нагрузки; б) погрешность податливости

$$\varepsilon(R_{2\sigma}) = \varepsilon(R_{2\gamma}) = \sqrt{\left(\frac{1,4-0}{2}\right)^2 + \left(\frac{0-(-0,06)}{2}\right)^2} \approx 0,7 \text{ мкм};$$

$$R_{2\sigma} = 0,67 + 0,7 \approx 1,37 \text{ мкм};$$

$$R_{2\gamma} = 0,67 - 0,7 \approx -0,03 \text{ мкм}.$$

Так как $\alpha(\Delta\gamma_{\text{жс}}) = \alpha(\Delta R_{2\sigma}) = 0$, $\lambda(\Delta\gamma_{\text{жс}}) = \lambda(\Delta R_{2\sigma}) = 0,33$ то

$$\sigma_{R_2} = \frac{\Delta R_{2\sigma} - \Delta R_{2\sigma}}{6} = \frac{1,4-0}{6} \approx 0,23 \text{ мкм},$$

$$\sigma_{\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{\text{жс}} - \Delta\gamma_{\text{жс}}}{6} = \frac{0,06-0}{6} \approx 0,01 \text{ мкм},$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{R_2}^2 - \sigma_{\gamma}^2} = \sqrt{0,23^2 - 0,01^2} \approx 0,22 \text{ мкм}.$$

$R_5 = \Delta\gamma_5$ – вектор случайной величины осевой погрешности перемещения ВРП, зависящий от осевой нагрузки.

$$R_5 = \Delta\gamma_5 = \frac{\Delta R_3}{\cos(\gamma + \Delta\gamma)}; \quad (3.55)$$

Используя известную зависимость [20] напряженно-деформированного состояния ВРП, определим осевое перемещение гибкого элемента:

$$\Delta R_3 = \frac{F_a R^2}{2E} \sum_{n \geq 2}^{\infty} \frac{\beta_{1n} (\alpha_2 - \alpha_1 h)}{J_1 J_2 n^2 (n^2 - 1)^2} \cos n\varphi, \quad (3.56)$$

где F_a – осевая нагрузка; R – радиус гибкого элемента; E – модуль упругости; J_1 , J_2 – осевые моменты инерции; h – толщина стенки; $\beta_{1n}, \alpha_2, \alpha_1$ – параметры [20].

На рис. 3.35 показаны схемы распределения осевой нагрузки.

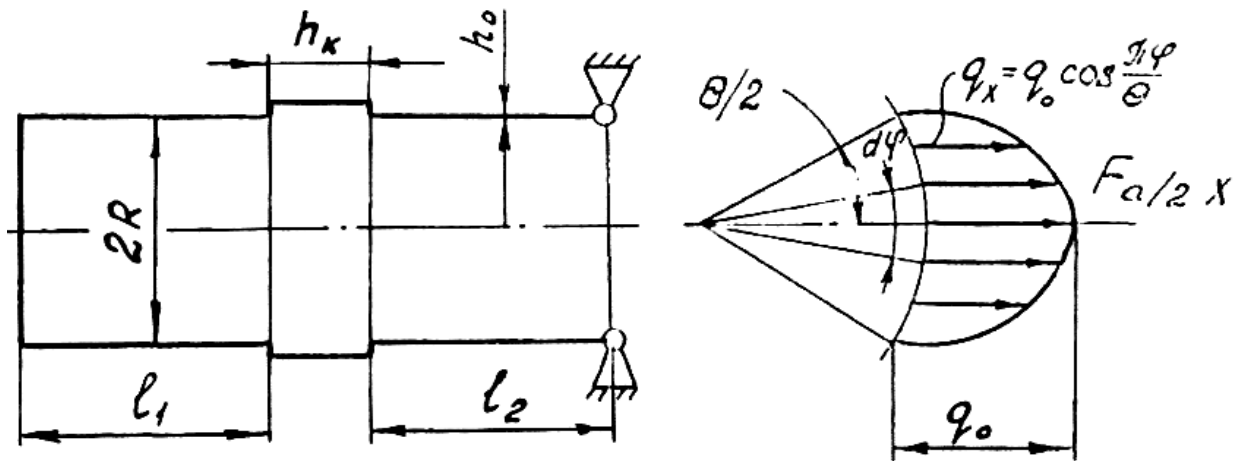


Рис. 3.35. Расчетная схема распределения усилий в гибком элементе ВРП

Найдем осевую погрешность ВРП, зависящую от осевой нагрузки, с учетом погрешности углов наклона образующих профилей гибкого и жесткого элементов.

Так как осевая податливость гибкого элемента находится в пределах упругости, осевую погрешность оценим по нормальному закону распределения (рис. 3.36).

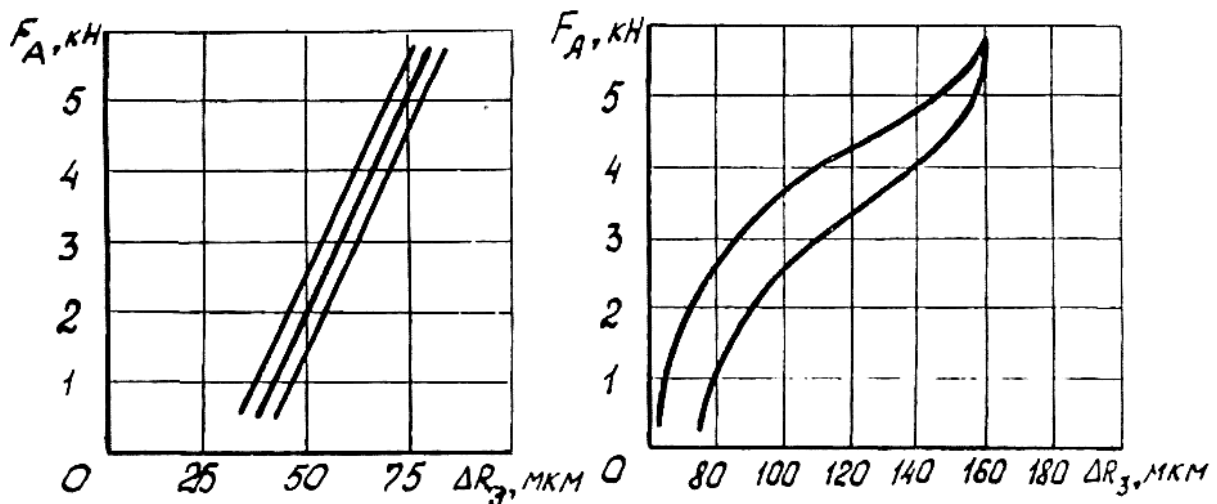


Рис. 3.36. Графики расчетных и экспериментальных перемещений

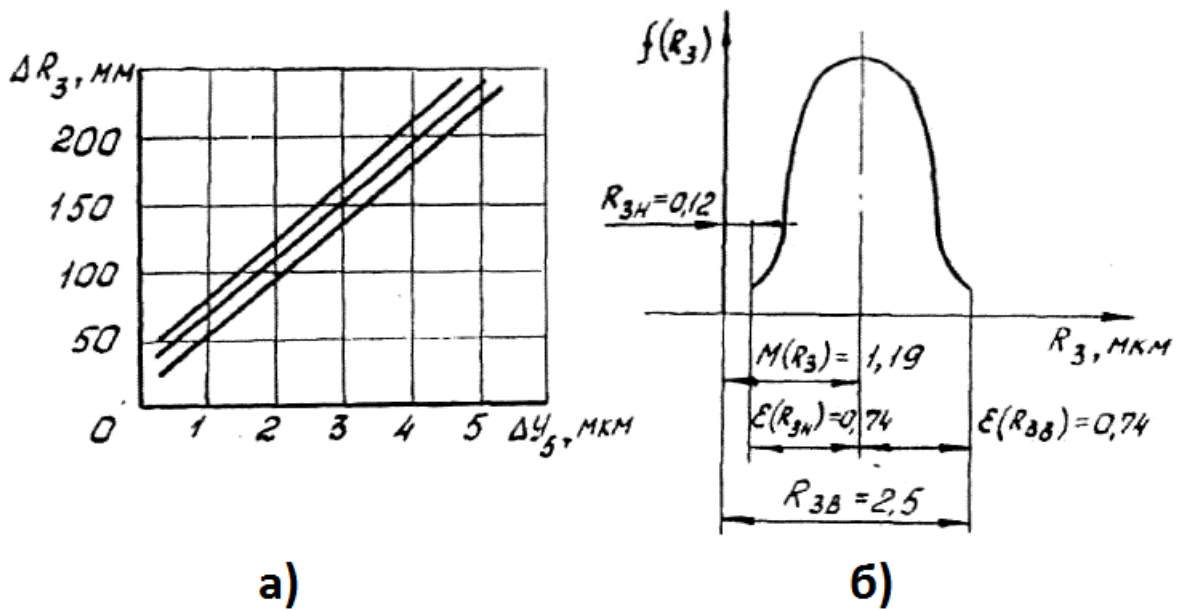


Рис. 3.37. Графики показателей точности: а — зависимость осевой погрешности ВРП от упругих деформаций гибкого элемента; б — кривая рассеивания погрешностей упругих деформаций гибкого элемента

Среднее значение осевой погрешности ВРП, зависящей от упругих деформаций и границы зоны рассеивания размеров, определим с учетом погрешности образующих профиля гибкого и жесткого элементов (3.47).

$$\begin{aligned} \Delta R_{3в} &= 0,5 \text{ мкм}; & \Delta R_{3н} &= 2 \text{ мкм}; \\ \Delta \gamma_{Гн} &= 0; & \Delta \gamma_{Гв} &\approx 0,06 \text{ мкм}; \\ \Delta \gamma_{жв} &\approx 0,06 \text{ мкм}; & \Delta \gamma_{жн} &= 0; \end{aligned}$$

Исходные данные:

$$\begin{aligned} M(R_3) &= \frac{\Delta R_{3н} + \Delta R_{3в}}{2} - \frac{\Delta \gamma_{Гн} + \Delta \gamma_{Гв}}{2} - \frac{\Delta \gamma_{жн} + \Delta \gamma_{жв}}{2} = \\ &= \frac{2 + 0,5}{2} - \frac{0 + 0,06}{2} - \frac{0 + 0,06}{2} \approx 1,19 \text{ мкм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(R_3) &= \varepsilon(R_{3н}) = \varepsilon(R_{3в}) = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{3в} - \Delta R_{3н}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \gamma_{Гн} - \Delta \gamma_{Гв}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \gamma_{жн} - \Delta \gamma_{жв}}{2}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{2 - 0,5}{2}\right)^2 + \left(\frac{0 - 0,06}{2}\right)^2 + \left(\frac{0 - 0,06}{2}\right)^2} \approx 0,75 \text{ мкм}; \end{aligned}$$

$$\alpha(\Delta R_3) = \alpha(\Delta \gamma_{жс}) = \alpha(\Delta \gamma_{Г}) = 0,$$

$$\lambda(\Delta R_3) = \lambda(\Delta \gamma_{жс}) = \lambda(\Delta \gamma_{Г}) \approx 0,33,$$

$$\sigma_{R_3} = \frac{\Delta R_{3в} - \Delta R_{3н}}{6} = \frac{0,5 - 2}{6} \approx -0,25 \text{ мкм},$$

$$\sigma_{\gamma_{жс}} = \frac{\Delta \gamma_{жсв} - \Delta \gamma_{жсн}}{6} = \frac{0,06 - 0}{6} \approx 0,01 \text{ мкм},$$

$$\sigma_{\gamma^r} = \frac{\Delta \gamma_{r6} - \Delta \gamma_{rн}}{6} = \frac{0,06 - 0}{6} \approx 0,01 \text{ мкм},$$

$$\sigma_{R_{\Sigma}} = \sqrt{\sigma_{R_3}^2 + \sigma_{\gamma_{жс}}^2 + \sigma_{\gamma^r}^2} = \sqrt{(-0,25)^2 + 0,01^2 + 0,01^2} \approx 0,25 \text{ мкм}.$$

R_6 – вектор случайной величины осевой погрешности ведомого звена ВРП, зависящей от технологических ошибок и сборки, (см. рис. 3.38), определяется по формуле:

$$R_6 = \Delta \gamma_6 = \delta_{=\gamma}^r + \delta_{=\beta}^{жс} \quad (3.57)$$

Уравнение ошибок осевого положения на длине прямолинейных участков профиля гибкого элемента можно представить так:

$$\delta_{z\gamma}^r = \Delta L + \Delta \rho \operatorname{tg} \gamma - \Delta \rho \frac{\Delta \gamma}{\cos^2 \gamma} + (\Delta l_3 \operatorname{tg} \gamma + \Delta l_4 \operatorname{tg} \gamma),$$

где L – линейное перемещение образующей профиля; ρ – радиус-вектор; $\Delta \rho$ – погрешность радиуса-вектора; l_3 – отклонение оси генератора от центральной оси; l_4 – отклонение оси фланца от центральной оси; γ – половина угла профиля гибкого элемента.

Уравнение ошибок осевого положения на длине прямолинейных участков образующих профиля жесткого элемента имеет вид:

$$\delta_{z\beta}^r = \Delta L - \Delta r \operatorname{tg} \beta + \Delta r \frac{\Delta \beta}{\cos^2 \beta}, \quad (3.58)$$

где L – линейное перемещение образующей профиля жесткого элемента; r – радиус среднего диаметра резьбы; β – угол наклона боковой поверхности профиля жесткого элемента.

Среднее значение осевой погрешности ВРП, зависящей от технологических ошибок, границы зоны рассеивания размеров определим по нормальному закону, $\delta_{z\gamma\beta}^r$ – верхнее отклонение линейного смещения гибкого элемента

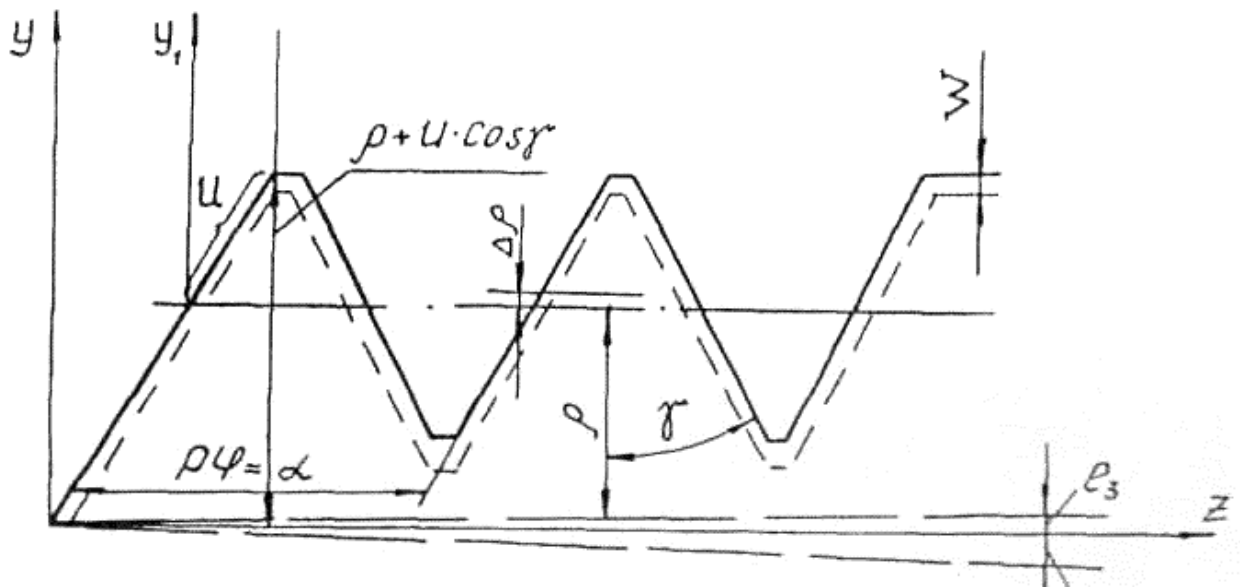


Рис. 3.38. Геометрия винтовой поверхности резьбы гибкого элемента

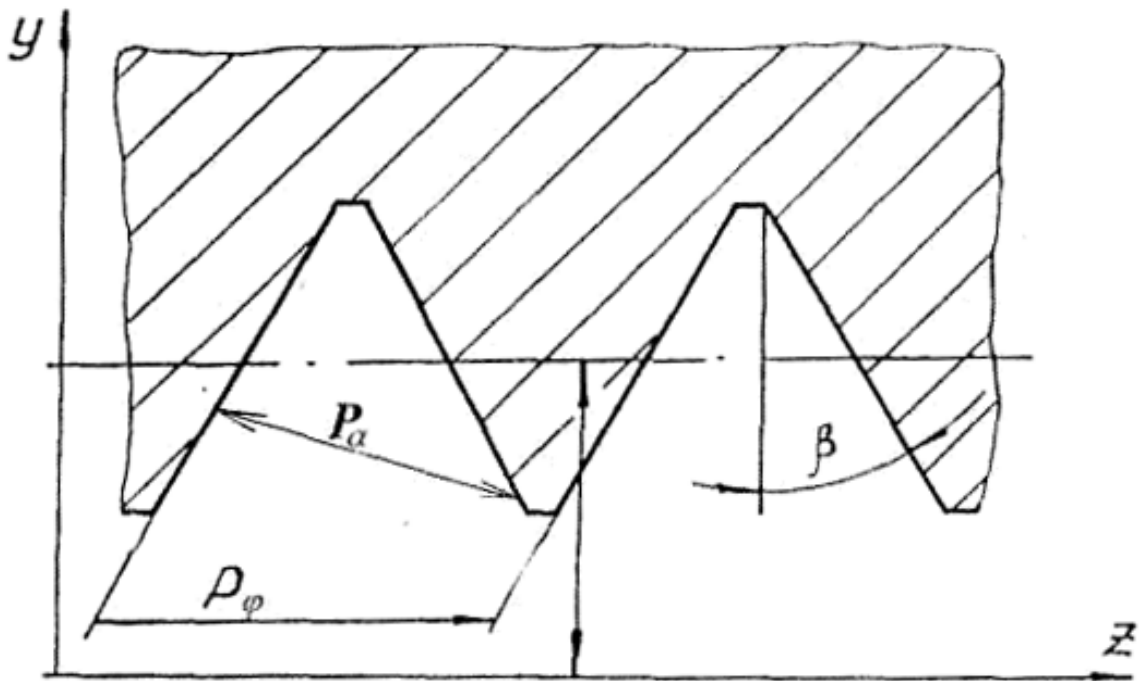


Рис. 3.39. Геометрия винтовой поверхности резьбы жесткого элемента

составляет 5 мкм; $\delta_{z\gamma n}^{\Gamma}$ – нижнее отклонение 0 мкм; $\delta_{z\beta s}^{\text{жс}}$ – верхнее отклонение линейного смещения жесткого элемента 6 мкм; $\delta_{z\beta n}^{\text{жс}}$ – нижнее отклонение линейного смещения жесткого элемента 0 мкм.

$$M(\delta) = \frac{0+5}{2} - \frac{0-6}{2} = 5,5 \text{ мкм},$$

$$\varepsilon(\delta_n) = \varepsilon(\delta_s) = \sqrt{\left(\frac{5-0}{2}\right)^2 + \left(\frac{0-(0-6)}{2}\right)^2} = \sqrt{6,25+9} = 3,9 \text{ мкм},$$

$$\delta_s = 5,5 + 3,9 = 9,4 \text{ мкм},$$

$$\delta_n = 5,5 - 3,9 = 1,6 \text{ мкм}.$$

Отсюда среднее квадратичное отклонение δ_s и δ_n находим по формулам:

$$\sigma_{\delta n} = \frac{\Delta\delta_s^{\Gamma} - \Delta\delta_n^{\Gamma}}{6} = \frac{5-0}{6} \approx 0,8 \text{ мкм},$$

$$\sigma_s = \frac{\Delta\delta_{\beta}^{\text{жс}} - \Delta\delta_n^{\Gamma}}{6} = \frac{0-(-6)}{6} \approx 1 \text{ мкм},$$

$$\sigma(\delta) = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_s^2} = \sqrt{0,8^2 + 1^2} \approx 1,3 \text{ мкм}.$$

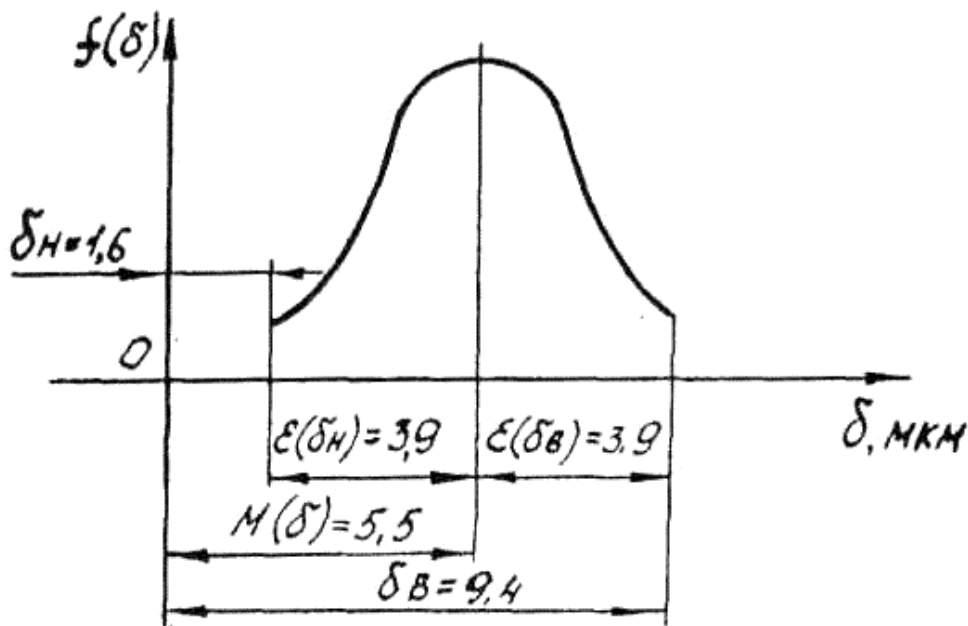


Рис. 3.40. Кривая рассеивания осевых погрешностей

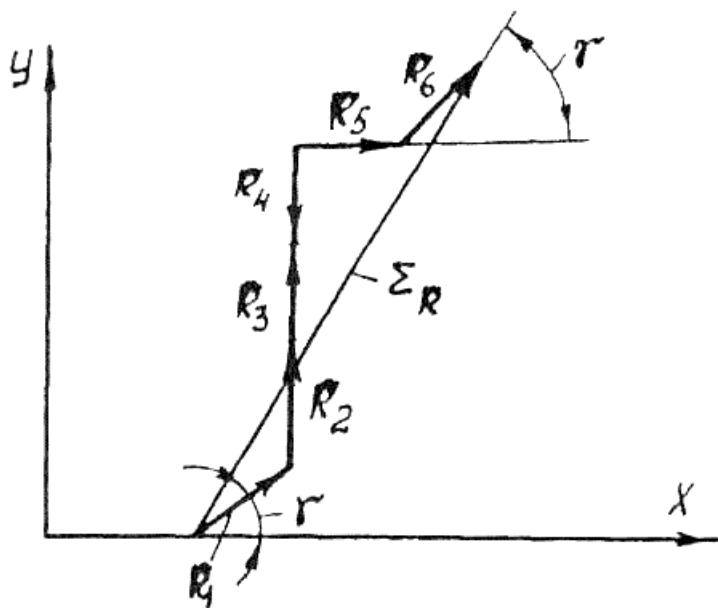


Рис. 3.41. Схема случайных векторов погрешности ВРП

Определим сумму случайных векторов R_{Σ} формуле:

$$R_{\Sigma} = \Sigma R_i; \quad (3.59)$$

$$R_{\Sigma} = (R_1 \cos \gamma + R_6 \cos \gamma + R_5)j + [(R_1 - R_6) \sin \gamma + R_2 + R_3 - R_4]j = x_i + y_i;$$

$$R_1 \sim m_1 \sigma_1^2; R_2 \sim m_2 \sigma_2^2; R_3 \sim m_3 \sigma_3^2; R_4 \sim m_4 \sigma_4^2; R_5 \sim m_5 \sigma_5^2; R_6 \sim m_6 \sigma_6^2.$$

Найдем математическое ожидание и дисперсию составляющих результатов векторов, расположенных под разными углами:

$$M_1 = (m_1 + m_6) \cos \gamma + R_5;$$

$$D_1 = (\sigma_1^2 + \sigma_6^2) \cos^2 \gamma + \sigma_5;$$

$$M_2 = (m_1 + m_6) \sin \gamma + m_2 - m_4;$$

$$D_2 = (\sigma_1^2 + \sigma_6^2) \sin^2 \gamma + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2.$$

Отсюда R_{Σ} имеет вид

$$R_{\Sigma} = [(R_1 + R_6) \cos \gamma + R_5]j + [(R_1 + R_6) \sin \gamma + R_2 + R_3 - R_4]j. \quad (3.60)$$

$$R = \sqrt{(R_1 + R_6)^2 + 2R_5(R_1 + R_6)\cos\gamma + R_5^2 + 2(R_2 + R_3 - R_4) \cdot (R_1 + R_6)\sin\gamma + (R_2 + R_3 - R_4)^2}.$$

Оценим долю погрешности каждого вектора, для этого рассмотрим сумму случайных векторов, как результат сложения простых периодических функций. Основываясь на теореме Фурье, применим гармонический анализ и представим каждую функцию $f(x)$ в виде бесконечного тригонометрического ряда.

Пусть

$$R(\gamma) = \sqrt{a + b \cos \gamma + c \sin \gamma}, \quad (3.61)$$

где $a = (R_1 + R_6)^2 + (R_2 + R_3 - R_4)^2 + R_5^2$; $b = 2R_5(R_1 + R_6)$; $c = 2(R_2 + R_3 - R_4)(R_5 + R_6)$; $0 \leq \gamma \leq 2\pi$.

Разложим функцию $R(\gamma)$ в ряд Фурье на отрезке $[0, 2\pi]$:

$$R(\gamma) = \alpha_0 + \sum \alpha_n \cos n\gamma + \beta_n \sin n\gamma,$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\gamma) d\gamma;$$

$$\alpha_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\gamma) \cos n\gamma d\gamma;$$

$$\beta_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\gamma) \sin n\gamma d\gamma.$$

где:

(3.62)

Так как коэффициенты $\alpha_0, \alpha_n, \beta_n$, в силу того, что они представляют собою ряд, найти точно невозможно, то найдем их значения приближенно.

Анализ результатов показал, что все вышеуказанные погрешности имеют одинаковый период проявления, поэтому составляем гистограмму погрешностей в процентах (см. рис. 3.42).

R_l – вектор случайной величины, зависящий от осевого зазора в зацеплении ВРП;

R_2 – вектор случайной величины, зависящий от контактных обмятий шероховатости поверхности гибкого и жесткого элементов;

R_3 – вектор случайной величины осевой погрешности перемещения жесткого элемента, зависящий от податливости системы "гибкое звено-генератор волн";

R_4 – вектор случайной величины осевой погрешности перемещения жесткого элемента, зависящий от радиальной податливости жесткого элемента;

R_5 – вектор случайной величины осевой погрешности перемещения ВРП, зависящий от осевой нагрузки;

R_6 – вектор случайной величины осевой погрешности ведомого звена ВРП, зависящий от технологических ошибок и сборки

Учитывая погрешности подшипников качения, определяем общую погрешность

$$\Delta_{общ} = R_{\Sigma} + R_g = 37,6 \text{ мкм.}$$

Зависимость, связывающая кинематическую погрешность ΔK с модулем вектора R_{Σ} имеет вид [160].

$$\Delta K = \sqrt{R_{\Sigma}^2} \quad (3.63)$$

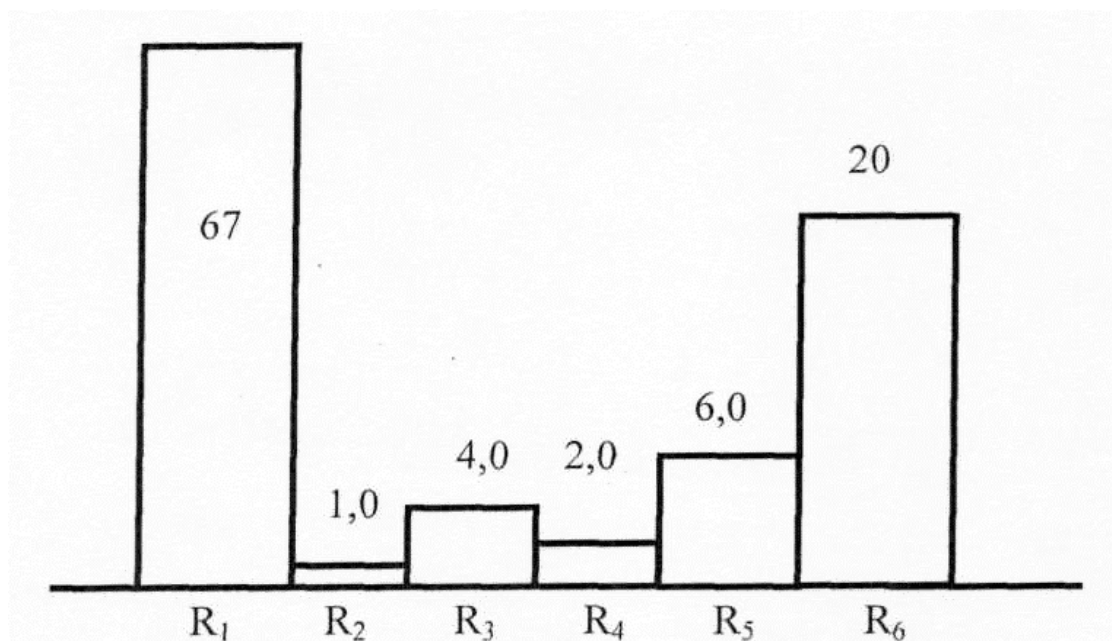


Рис. 3.42. Гистограмма составляющих погрешностей ВРП

ЛИТЕРАТУРА

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., ил.
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., ил.
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; руководи-

- тель 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 H 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 производ-

- ственных 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. Турьшев, 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. Турьшев 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.III8/ 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., ил.
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 вузов. – 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 gearing 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. Опытно-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 механизации 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 речного механизма // Вестник машиностроения. – 1984. – 13. – С. 29-31.
 105. А. с. № 1043392 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая речная 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.П. 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. Истомина 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 мелкомодульные зубчатые передачи и результаты их проверки на кинематическую тонкость. – Л., 1968.- С.45.

119. Чернова Л. С., Кащеев 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-Пахлеванян 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 // Расчет 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-Пахлеванян Р. И. Кинематическая точность волновых зубчатых 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., Ходданян К. А. Стенд для испытания технических передач в ваку-

- уме 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 мелко модульных 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. – 1984. – 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 винт-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 автоматизации: Справочник. – Т.1. – 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 приборостроении: 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.
171. Расчет и конструирование механических систем оборудования аэрокосмической и электронной техники: Учебное пособие для вузов / Н.В. Василенко, Е.Н. Ивашов, Л.Н. Логинов и др.; Под ред. профессора Н.В.

- Василенко. – Красноярск: Красноярск. книж. изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1997.
172. Конструирование механических систем автоматики: Учебное пособие для вузов / Н.В. Василенко, Н.И. Галибей, Л.Н. Логинов, Г.Г. Назаров. – Красноярск: Красноярск. книж. изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1997.
173. Механические системы вакуумно-космических роботов и манипуляторов: Учебное пособие для вузов / Н.В. Василенко, И.П. Бернацкий, Е.Н. Головенкин и др.; Под ред. профессоров Н.В. Василенко, К.Н. Явленского.: В 2 частях. – Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь». 1997.
174. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на газоотделение и упрочнение поверхностных слоев гибких элементов герметичных волновых передач / В.И. Усаков, Н.В. Василенко, Ю.П. Колесников и др. // Электронная техника. Сер. II, Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ / «Электроника», 1981. – Вып. 3 – д.с.п.
175. Александрова А.Т, Горюнов А.А., Ивашов Е.Н. и др. Разработка модулей промышленных роботов на основе l - координат, применительно к вакуумным условиям эксплуатации. – В сб. Промышленные роботы и манипуляторы для автоматизации и механизации производства.: Тезисы доклада научно-практического семинара: Владимир, 1983. – с. 64-69.
176. А.с. № 1283456 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/03. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, Л.Ф. Петров, И.Е. Трояновский – Оpubл. 15.01.87 //Б.И. № 2.
177. А.с. № 1298448 СССР, МКИ⁴ F 16 F 16/00, 7/10. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, В.П. Майборода, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 23.03.87 //Б.И. № 11.
178. А.с. № 1293406 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, Л.Ф. Петров, И.Е. Трояновский – Оpubл. 28.02.87 //Б.И. № 8.

179. А.с. № 1251026 № 1251026 СССР, МКИ⁴ G 105 В 13/00, G 05 G 19/00. Устройство управления динамической системой /Е.Н. Ивашов, И.Ю. Григорьев, М.И. Некрасов, С.В. Степанчиков – Оpubл. 15.08.86 //Б.И. № 30.
180. Курманалиев Т.И., Петров Л.Ф., Некрасов М.И., Ивашов Е.Н. Виброзащита объектов НКА. – В кн. Конструирование научных космических приборов. – М.: Наука, 1985. – с. 41-51, ил.
181. Ивашов Е.Н., Курчанова М.В. Плоские колебания исполнительных устройств промышленных роботов на *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР, Деп. рук. № 48 мш-86 Деп., 1986. – 20 с., ил.
182. Ивашов Е.Н., Курчанова М.В. Динамическая модель исполнительного устройства промышленного робота на *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР, Деп. рук. № 186-мш 86 Деп., 1986. – 23 с., ил.
183. А.с. № 1313686 СССР, МКИ⁴ В251/02, J 11/00. Манипулятор/ А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор и др. – Оpubл. 30.05.87 //Б.И. № 20.
184. А.с. № 1366389 СССР, МКИ⁴ В25 J 11/00. Механизмы для перемещения и ориентации деталей/ Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 15.01.88 //Б.И. № 2.
185. А.с. № 1335756 СССР, МКИ⁴ F 16 F Н1/00. Приводное устройство /Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, М.И. Некрасов, С.М. Оринчев. – Оpubл. 7.09.87 //Б.И. № 33.
186. А.с. № 1356375 СССР, МКИ⁴ В 25 J 11/00. Трансформируемая конструкция для фиксации положения объектов в пространстве /Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор, Т.И. Курманалиев и др., - 1.07.87 – ДСП.
187. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Исследование фрикционных характеристик твердосмазочных покрытий в вакууме. – В кн. Органические и полупроводниковые материалы. Пермь.: ПГУ, с. 175-181, ил.
188. А.с. № 1552537 СССР, МКИ⁴ В25 J 11/00. Трансформируемая конструкция для фиксации положения объектов относительно космического аппа-

- рата в пространстве /Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков., 22.11.89 – .
189. А.с. № 1356748 СССР, МКИ⁴ G 05 G 19/00. Устройство для определения положения тела в пространстве (его варианты) /А.Т. Александрова, А.А. Горюнов, Е.Н. Ивашов и др., 01.08.87 – ДСП.
190. Ивашов Е.Н., Курчанов М.В. Численное исследование динамики исполнительных устройств промышленных роботов в плоских *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР. Деп. рук. № 473 мш-86 Деп., 1986. № 13с., ил.
191. Ивашов Е.Н., Курчанов М.В. Численное исследование динамики исполнительных устройств промышленных роботов в пространственных *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР. Деп. рук. № 472 мш. 86, 1986. № 23с., ил.
192. Ивашов Е.Н., Курчанов М.В. Оценка погрешности позиционирования промышленных роботов в *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР. Деп. рук. № 210 мш-87 Деп., 1987. – 10с., ил.
193. Ивашов Е.Н. Собственные изгибные колебания пневмоцилиндра промышленного робота, смоделированного в виде цилиндрической оболочки и стержня. – В кн. Автоматизированные станочные системы и роботизация производства. Тула: ТПИ, 187 – с. 125-135, ил.
194. Ивашов Е.Н. Геометрические зависимости в роботах на *l*-координатах. В кн. Безлюдные роторные и гибкие технологии. Тула: ТПИ. 1987. – с. 7-10, ил.
195. Карапетян С.С., Коростелин Ю.И. Адгезионная модель трения. – ДАН. – Машиноведение, № 6, 1980ю –с. 100÷105, ил.
196. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Юрашев В.В. Теоретическая оценка работоспособных функциональных механизмов перемещения. – В сб. Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП. – М.: МИЭМ, 1985 – с. 95-100.

197. Асилин А.А. Метод оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износа. – В сб Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1968. - 23÷27 с.
198. А.с. № 1237414 СССР, МКИ⁴ В 25 J 11/00. *l*-координатный манипулятор /Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, М.И. Некрасов, И.В. Токарев – Оpubл. 15.06.86 //Б.И. № 22.
199. А.с. № 11278198 СССР, МКИ⁴ В25 J 1/02. Исполнительный орган манипулятора /Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, С.В. Степанчиков, Л.Ф. Петров – Оpubл. 23.12.86 //Б.И. № 47.
200. А.с. № 1315665 СССР, МКИ⁴ F 15 В 15/10. Устройство для передачи движения /Е.Н. Ивашов, В.П. Майборода, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 07.06.87 //Б.И. № 21.
201. Ивашов Е.Н., Курчанова М.В. Применение *l*-координатных манипуляторов. М.: ВНИИТЭР. Деп. рук. № 1071/19 мш-88. Деп. 1988. – 9 с., ил.
202. А.с. № 1495111 СССР, МКИ⁴ В 25 J 9/00, 11/00 *l*-координатный манипулятор /Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 23.07.89 //Б.И. № 27.
203. А.с. № 1574290 СССР, МКИ⁴ В 08 В 9/08 Система очистки емкостей /Г.К Антонова, Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др. – Оpubл. 30.06.90 //Б.И. № 24.
204. А.с. № 1620295 СССР, МКИ⁴ В 25 J 9/00, *l*-координатный манипулятор /И.Ю. Григорьев, Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др. – Оpubл. 15.01.91 //Б.И. № 2.
205. Ивашов Е.Н., Киреева Э.К., Курчанова М.В., Степанчиков С.В., Токарев И.В. Виброзащита машин и приборов с использованием *l*-координатных систем. – Тезисы доклада на 2-й Всесоюзной конференции по проблемам виброзащиты «Вибромаш-89»: Иркутск, 1989. – 0,2 с.
206. А.с. № 1600381 СССР, МКИ⁴ С 23 С 14/50, Устройство для транспортировки подложки в вакууме /И.Ю. Григорьев, Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др. – Оpubл. 15.06.90 //ДСП.

207. А.с. № 1639088 СССР, МКИ⁴ С 23 С 14/50, 14/24. Подложкодержатель / Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин, С.В. Степанчиков и др. – Оpubл. 01.12.90 //ДСП.
208. Ивашов Е.Н., Ляпин В.М., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Исполнительные устройства на основе *l*-координат для работы в условиях вакуума и чистых технологических средах. В кн. «Технология материалов и средства автоматизации в производстве изделий электронной техники. М.: 1989. с. 50-53.
209. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Пути создания устройства формирования движения в вакууме с учетом их влияния на изделия электронной техники. – В кн. Технология материалов и средства автоматизации в производстве изделий электронной техники. М.: 1989. – с. 78-81.
210. А.с. № 1469222 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00. Динамический гаситель колебаний /Г.К. Антонова. Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, Л.Ф. Петров, – Оpubл. 30.03.89 //Б.И. № 12.
211. А.с. № 1467286 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00., F 16 F 15/03. Гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, В.П. Майборода, М.И. и др. – Оpubл. 23.03.89 //Б.И. № 11.
212. А.с. № 1553372 СССР, МКИ⁴ В 25 J 1/02, 9/12 Привод перемещения рабочего органа /Г.К. Антонова. Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, С.В. Степанчиков, – Оpubл. 30.03.90 //Б.И. № 12.
213. А.с. № 1677391 СССР, МКИ⁴ F 16 С33/66. Узел трения для работы в экологически чистых средах /Г.К. Антонова. Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др., – Оpubл. 15.09.91 //Б.И. № 34.
214. А.с. № 1679729 СССР, МКИ⁴ F 15 В15/10. Инерциально-импульсное транспортное средство. / Е.Н. Ивашов, В.М. Курчанова, Е.Е. Мишина, И.В. Токарев. – Оpubл. 22.05.91 // ДСП.

215. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Проблемы вакуумной экологии в производстве изделий микроэлектроники. – Тезисы доклада на 3-ей НТК «Экология микроэлектроники – 90». М.: МИЭТ, 1990.
216. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Влияние вибраций вакуумного технологического оборудования на уровень привносимых загрязнений. – Тезисы доклада на 3-ей НТК «Экология микроэлектроники – 90». М.: МИЭТ, 1990.
217. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Методика расчета уровня загрязнений технологических объемов устройствами ввода и формирования движения. В кн. Обеспечение и контроль помещения и технологических сред в производстве изделий микро- и радиоэлектроники. М.: МИЭИ, 1989, - с. 65-72.
218. Ивашов Е.Н. Модели трения, изнашивания газовой выделения для вакуумного машиностроения. Вестник машиностроения, № 12. – 1990. с. 17-20.
219. Ивашов Е.Н. *l*-координатные исполнительные устройства в оборудовании производства электронной техники //Автоматическое оборудование и технология производства изделий электронной техники. М.: МИЭМ, 1991, с. 3-12.
220. Ивашов Е.Н. Применение *l*-координатных исполнительных устройств в напылительном оборудовании //Автоматическое оборудование и технология производства изделий из электронной техники. М.: МИЭТ, 1991, с. 33-37.
221. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Инженерная методика расчета механических устройств микроэлектроники на привносимый уровень загрязнений. – Сборник докладов 4-й НТК СНГ и зарубежных стран «Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях». М.: МИЭТ, 1992. – с. 121-127.
222. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В., Токарев И.В. Четырехуровневая система виброзащиты объектов микроэлектроники. – Сборник докладов 4-й НТК

- СНГ и зарубежных стран «Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях». М.: МИЭТ, 1992. – с. 150-154.
223. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Вакуумная технологическая экология в производстве изделий микроэлектроники. – Сб. докладов 4-й НТК СНГ и зарубежных стран «Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях». М.: МИЭТ, 1992. – с. 188-193.
224. А.с. № 1691091 СССР, МКИ⁴ В 25 J 9/00. l-координатный манипулятор /Е.Н. Ивашов. – Оpubл. 15.11.97 //Б.И. № 42.
225. А.с. № 1716214 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов – Оpubл. 31.03.92 //Б.И. № 8.
226. А.с. № 1733907, МКИ⁴ G 01 В 5/03. Механизмы перемещения /Н.В. Василенко, Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков – Оpubл. 15.05.92 //Б.И. № 18.
227. А.с. № 1713065 СССР, МКИ⁵ Н 02 № 2/00. Устройство для прецизионного перемещения изделий /Л.Л. Андреева, Г.К. Антонова, Н.В. Василенко, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – Оpubл. 15.02.92 //Б.И. № 6.
228. А.с. № 1716822 СССР, МКИ⁵ С23 С 14/56. Устройство для очистки вакуумной камеры / Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин, М.И. Некрасов, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков. – ДСП, 1992.
229. Ивашов Е.Н., Ляпин В.М., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. методика проектного и поверочного расчетов шарикоподшипников, предназначенных для работы в сверхвакуумном автоматизированном оборудовании. – В кн. Автоматизированные станочные системы и роботизация производства. Тула, ТПИ.: 1992. – с. 64-70.
230. А.с. № 1649194 СССР, МКИ⁴ Н57/04 Герметичная волновая зубчатая передача /Г.К. Антонова, Н.О. Голованова, Е.Н. Ивашов, С.В. Комаров, С.В. Степанчиков. – Оpubл. 15.05.91 //Б.И. №18.

231. А.с. № 1684557 СССР, МКИ⁴ F 16 F 5/00. Поглотитель ударов /Л.Л. Андреева, Е.Н. Ивашов, Н.В. Копнева, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков. – Оpubл. 15.10.91 // Б.И, № 38.
232. Коготков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 352с., ил.
233. Борисов С. Г., Истомина С. Н., Некрасов М. И. Экспериментальная установка для исследования кинематической точности устройств преобразования движения в высоком вакууме. – М.: Вестник машиностроения, №9, 1982. – с.17-22, ил.
234. Куцоконь В. А. Точность кинематических цепей приборов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 221с., ил.
235. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 455с., ил.
236. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Расчет интенсивности износа элементов подшипников скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 749 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.
237. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. К вопросу об определении момента трения в подшипнике скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 748 ап – Д82, 1982. – 4с., ил.
238. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Расчет коэффициента трения в подшипнике скольжения при сухом трении. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 899 ап – Д83, 1983. – 5с., ил.
239. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Расчет интенсивности износа в подшипнике скольжения при сухом трении. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 900 ап – Д83, 1983. – 5с., ил.
240. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Адгезионная модель трения металлических материалов подшипников скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 824 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.

241. Ивашов Е. Н., Папцов Г. М., Ганн К. Г. Напряжения и деформации в подшипниках скольжения и их влияние на трение и износ металлополимерных пар. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 721 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.
242. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Адгезионная модель трения разноименных металлических материалов подшипников скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 825 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.
243. Ган К. Г., Ивашов Е. Н. Характер износа фторонаполненных материалов и явления, сопровождающие его в вакууме. – М.: ЦНИИИЭлектроника. Деп. рук. № 8026/82, 1982. – 6с., ил.
244. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Исследование кинематики зацепления волновых передач с планетарным генератором волн. – М.: ЦНИИЭлектроника. Деп.рук. № 8028/82, 1982. – 6с., ил.
245. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Исследование напряженно-деформированного состояния гибких цилиндрических элементов волновых вводов. – М.: ЦНИИЭлектроника. Деп.рук. № 8530/83, 1983. – 9 с., ил.
246. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Долговечность радиальных однорядных шарикоподшипников при осевой нагрузке. – М.: ЦНИИЭлектроника. Деп.рук. № 8023/82, 1982. – 7 с., ил.
247. Ивашов Е. Н., Мельников А. И., Некрасов М. И. Определение интенсивности изнашивания зубьев волновых зубчатых передач. – М.: ВНИИТЭМР. Деп.рук. № 135, мш-85 Деп., 1985. – 6с., ил.
248. Хант К.Х. Кинематические структуры манипуляторов с параллельным приводом. – Конструирование и технология машиностроения, 1983, №4, с. 201-210.
249. Денисов А.Г., Кузнецов Н.А., Макаренко В.А. Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии: Обзоры по электронной технике: Сер. 7. Тех-

- нология, организация производства и оборудования. – М.: ЦНИИ Электроника, 1981, вып. 17 (828). – 52 с., ил.
250. Денисов А.Г., Садофьев Ю.Г., Сеничкин А.П., Молекулярно-лучевая эпитаксия (приборная реализация): Обзоры по электронной технике: Сер. 7. Технология, организация производства и оборудования. – М.: ЦНИИ Электроника, 1981, вып. 17 (828). – 52 с., ил.
251. Василенко Н.В., Ковалев Л.К. Механические системы вакуумного технологического оборудования для производства изделий квантовой электроники. Част 1. Вакуумное оборудование, механизмы ввода и формирования движения: Обзоры по электронной технике: Сер. 2 Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ Электроника, 1983, вып. 4 (978), - 62 с., ил.
252. Ковалев Л.К. Вакуумное оборудование для производства токопленочных структур квантовой электроники.: Обзоры электронной техники: Сер. 2 Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ Электроника, 1982, вып. 4 (886), - 83 с., ил.
253. Майборода В.П., Арутюнян Н.Х., Трояновский И.Е. Динамика и динамическая устойчивость неоднородных вязкоупругих систем. – В сб. трудов Всесоюзного симпозиума по устойчивости. – Калинин.: КПИ, 1982, -с. 102-106, ил.
254. Katsaitic Spiros. Gedampfte Zwangsscingungen von isound orthotropen Polygonplatten «Fortschr. Ber/VEDIZ», 1978, R 11, №28, s. 26.
255. Warburton G.B/ Optimumabsorber parameters for minimizing vibration response «Earth-quake Eng. And struct. Dyn». 1981, 9, №3, p. 252-262.
256. Кузнецов М.М. Волчкевич Л.И., Замчалов Ю.П. Автоматизация производственных процессов. – М.: Высшая школа, 1976. – 431 с., ил.
257. Некрасов М.И. Направления создания надежных механизмов и устройств формирования и преобразования движения в высоком и

- сверхвысоком вакууме. – М.: ЦНИИ Электроника. Деп. Рук. № Р3432, 1983. – 20 с., ил.
258. Hunt К.Н. Kinematic geometry of mechanisms. London . Oxford University Press. 1978, p. 426-428.
259. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов. М.: Машиностроение, 2007.
260. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. 1st ed. / ed. Kasap S., Capper P. Springer, 2006. P. 263.
261. Pfitzner L. 450 mm Manufacturing - Synergies and Benefits for Smaller Diameters [Электронный ресурс]?: презентация. Fraunhofer IISB, 2011.
262. Zheng Lu, Kimbel S. Growth of 450mm diameter semiconductor grade silicon crystals // Journal of Crystal Growth. 2011. Vol. 318. P. 193–195.
263. Chen-Fu Chien et al. Economic analysis of 450mm wafer migration // Proceedings of the International Symposium on Semiconductor Manufacturing, ISSM 2007. 2007. P. 1–4.
264. <http://www.giredmet.ru/>.
265. Б.А. Шагаров, Н.А. Терехин, Панов П.И. Технологические особенности выращивания МКК на установке «Кедр» (производство «Красмаш») // Сборник тезисов конференции «Кремний 2004». Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 2004. P. 86.
266. Жвирблянский В.Ю. Ростовое оборудование и требования, предъявляемые к нему // Тезисы докладов I-го Международного практического семинара «Оборудование и технологии роста кристаллов – 2009». Брянск: НИИ «Изотерм», 2009.
267. <http://nii-izoterm.ru>.
268. <http://www.pvatepla.com/>.
269. Czochralski-Puller EKZ 3500 for the mass production of silicon crystals up to 300 mm diameter [Электронный ресурс]: проспект. PVA TePla AG, 2013.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	том	стр.
ВВЕДЕНИЕ	1	3
ГЛАВА 1. ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АГРЕГАТОВ И МОДУЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	1	5
1.1. Кристаллизационные процессы выращивания монокристаллического кремния и их механическое обеспе- чение	1	5
1.2. Агрегаты и модули оборудования для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского	1	13
1.3. Сравнительные исследования волновых резьбовых передач модулей оборудования для выращивания монокри- сталлического кремния	1	32
1.4. Особенности тепловых модулей оборудования для выращивания монокристаллического кремния	1	49
1.5. Модули управления процессом выращивания монокристаллического кремния	1	56
1.6. Методы оптимизации технологического процесса выращивания монокристаллического кремния	1	60
ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	1	69
2.1. Параметры состояния системы расплав-кристалл	1	69
2.2. Зарождение и рост монокристаллов кремния	1	77
2.3. Влияние условий выращивания на качество монокристаллического кремния	1	83
ГЛАВА 3. ВОЛНОВЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	1	106

3.1. Общие сведения о волновых зубчатых передачах.....	1	106
3.2. Волновые зубчатые передачи ростового оборудования.	1	112
3.3. Исследование высокоточных модулей перемещения слитков монокристаллического кремния на базе волновых резьбовых передач и вводов.....	1	122
3.4. Аналитические выражения составляющих погрешностей положения ведомого звена волновой резьбовой передачи.....	1	133
ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИВНОСИМОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ОТ МОДУЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБЪЕМЕ РОСТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	2	3
4.1. Энергетический баланс в зоне трения модулей перемещения ростового оборудования.....	2	3
4.2. Модели трения и износа в условиях технологических вибраций.....	2	20
4.3. Расчет элементов модулей перемещения на привноси- мый уровень загрязнений в технологический агрегат.....	2	34
4.4. Примеры расчета на привносимый уровень загрязнений для модулей перемещения типа винт-гайка.....	2	39
ГЛАВА 5. ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МОДУЛИ РОСТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	2	49
5.1. Виброзащитные модули ростового оборудования с од- ной степенью свободы.....	2	50
5.2. Математическая модель виброзащитного модуля ростового оборудования на шесть степеней свободы.....	2	55
5.3. Анализ расчетов многостепенных виброзащитных модулей на ЭВМ.....	2	71
ГЛАВА 6. ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	2	98

6.1. Обобщенный критерий оценки качества изготовления монокристаллического кремния.....	2	98
6.2. Автоматизированные установки для выращивания монокристаллического кремния по методу Чохральского..	2	101
ГЛАВА 7. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОДУЛЕЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	2	129
7.1. Четырехуровневая структурная схема объекта проектирования.....	2	129
7.2. Математические модели объекта проектирования.....	2	133
7.3. Имитационное моделирование модулей ростового оборудования.....	2	144
7.4. Морфологический анализ в организации поиска технических решений модулей ростового оборудования.....	2	151
7.5. Методика выбора оптимального варианта технического решения модуля ростовой установки.....	2	158
7.6. Требования к стоимости научно-технической продукции.....	2	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	2	185
ЛИТЕРАТУРА.....	1, 2	162,187
ПОСЛЕСЛОВИЕ.....	2	216
ОГЛАВЛЕНИЕ	1, 2	191,217

Для заметок

Научное издание

МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕРИЯ ИЗ 7-И МОНОГРАФИЙ

Монография 7 Том I

БАЛАН Никита Николаевич
ВАСИН Владимир Анатольевич
ИВАШОВ Евгений Николаевич
СТЕПАНЧИКОВ Сергей Валентинович

МИКРОИНЖЕНЕРИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Редактор **П. С. Костомаров**
Технический редактор **П. С. Кузнецов**
Рисунок на обложке выполнен художником **Е.И. Сверчковой**

Подписано в печать 18.06.2013. Формат 60x84/16.

Бумага типографская. Печать – ризография.

Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 300 экз.

Заказ 1 Изд. № 2

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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ МОНОГРАФИИ

БАЛАН Никита Николаевич, к.т.н.
Главный специалист ФГУП «ВО «Внештехника»

ВАСИН Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент.
Доцент кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского

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

СТЕПАНЧИКОВ Сергей Валентинович, к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник.
Доцент кафедры «Электроника и наноэлектроника»
МИЭМ НИУ ВШЭ

ISBN 978-5-905872-14-3



9 785905 872143