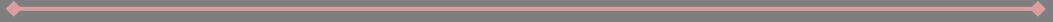




**УСТАНОВКА
ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ
МОНОКРИСТАЛЛОВ
КАРБИДА КРЕМНИЯ**





ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Карбид кремния (SiC) благодаря высокой теплопроводности и высокому значению напряжённости поля пробоя незаменим при изготовлении широкого класса приборов нового поколения для силовой и оптоэлектроники. Качество карбидкремниевых подложек является одним из основных факторов, определяющих процент выхода годных изделий при производстве эпитаксиальных структур для мощных нитридных светодиодов и силовых приборов на основе SiC.

В настоящее время при промышленном изготовлении монокристаллических слитков SiC используется метод, представляющий собой модификацию метода сублимации, впервые предложенного Лели и позднее развитого Таировым и Цветковым (модифицированный метод Лели, метод ЛЭТИ или „physical vapor transport“ PVT). Несмотря на значительный прогресс в технологии получения объёмного карбида кремния, существует ряд факторов, препятствующих достижению этим материалом его реального коммерческого потенциала. К таким факторам, в частности, относится неоднородность электрофизических свойств слитков по сечению и наличие в них структурных дефектов. К настоящему времени установлено, что основными причинами возникновения и распространения дефектов в объёме выращиваемых монокристаллов SiC являются отклонения от оптимальных технологических условий на стадиях зарождения и разращивания слитков.

Так, считается, что при выращивании слитка величина неоднородности удельного сопротивления материала вдоль оси роста и по его площади в сильной степени зависит от изменения соотношения парциальных давлений C/Si и легирующих примесей. Типичными структурными дефектами в кристаллах SiC являются политипные включения, малоугловые границы, проникающие винтовые и краевые дислокации, а также микротрубки, которые обычно рассматриваются как полые винтовые дислокации, распространяющиеся по всему кристаллу.

Проникающие винтовые и краевые дислокации главным образом наследуются слитком из затравочных кристаллов. Границы доменов формируются при полигонизации проникающих краевых дислокаций во время постростового охлаждения.

Конструктивные особенности современных установок, используемых для получения объёмного SiC методом PVT, затрудняют проведение *in situ* контроля технологических параметров в зоне роста, поэтому оценка условий проведённого процесса и их дальнейшая корректировка осуществляется постфактум, на основе изучения качества пластин, вырезанных из слитка.

Причиной появления политипных включений могут, в свою очередь, быть такие неоптимизированные ростовые параметры, как:

- температура роста, форма температурного поля;
- степень пресыщения;
- стехиометрия (соотношение реагентов) паровой фазы и наличие примесей;
- полярность поверхности затравочного кристалла.

Классически выращивание кристаллов сублимационным методом осуществляется при высоких температурах в замкнутых или полузамкнутых ростовых тиглях (Рис.1) и включает в себя сублимацию выступающего в роли источника поликристаллического материала, располагающегося в горячей области, перенос активных паров через камеру роста и их осаждение на подложке, располагающейся в относительно холодной зоне. Качество выращиваемых кристаллов в сублимационной технологии в значительной степени определяется распределением температуры в ростовой системе, которое одновременно влияет на форму получаемых кристаллов, изменение структуры источника в процессе роста, паразитное осаждение поликристалла на стенках ростового тигля, и др.

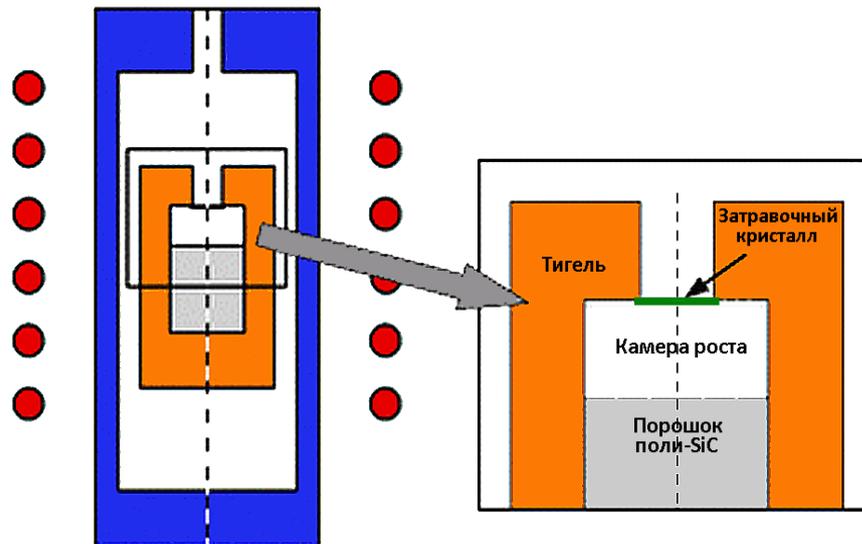


Рис.1. Схематическое изображение системы для роста кристаллов SiC.

Рис.1. – Рис.3. взяты с официального сайта фирмы Софт-Импакт <http://www.softimpact.ru>, специализирующейся на численном моделировании процессов роста кристаллов и плёнок полупроводниковых материалов. Рассматриваемая здесь модель классической схемы сублиминационного роста объёмных кристаллов включает в себя описание следующих механических и физико-химических процессов:

- Перенос тепла теплопроводностью, конвективный теплообмен и лучистый теплообмен
- Течение многокомпонентной газовой смеси
- Многокомпонентная диффузия
- Гетерогенные химические реакции
- Эволюция фронта кристаллизации
- Массообмен между ростовой камерой и внешним окружением через тонкие щели или поры в ростовом тигле
- Эволюция порошкового источника
- Огранка кристалла
- Динамика дислокаций

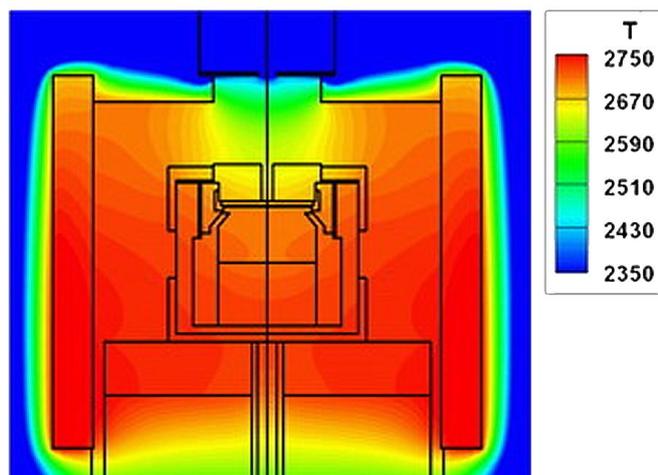


Рис. 2. Типичное распределение температуры в ростовой системе.

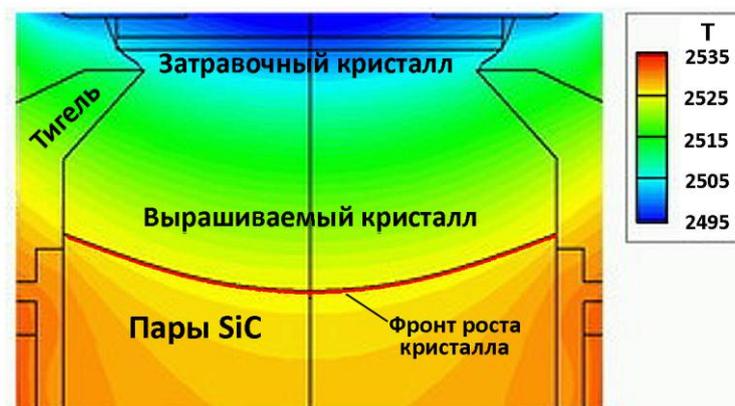


Рис. 3. Форма кристалла и распределение температуры в ростовой камере на конечной стадии ростового процесса.

Следует заметить, что при детальном изучении Рис.2. и Рис.3. градиенты температур для одной и той же зоны (например, границы затравочного кристалла) несколько отличаются (оставим это на добросовестности авторов или допустим, что рисунки приведены для разных стадий процесса). Однако это ни в коей мере не отражается на том факте, что фронт роста кристалла SiC на Рис.3 явно повторяет изотерму теплового поля, что подтверждается и доступными в СМИ фотографиями образцов выращенных кристаллов SiC. На Рис.4. видно, что верхняя на фото поверхность, которая является фронтом роста кристалла, близка к сферической форме.



Рис. 4. Кристалл SiC.

Таким образом, для получения кристаллов $\text{Ø}150$ мм и более необходимо формировать тепловое поле определённой формы.



ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Установка (Рис.5.) предназначена для выращивания монокристаллов карбида кремния \varnothing до 100 мм модифицированным методом Лели с применением уникального многозонного метода нагрева ростовой зоны.

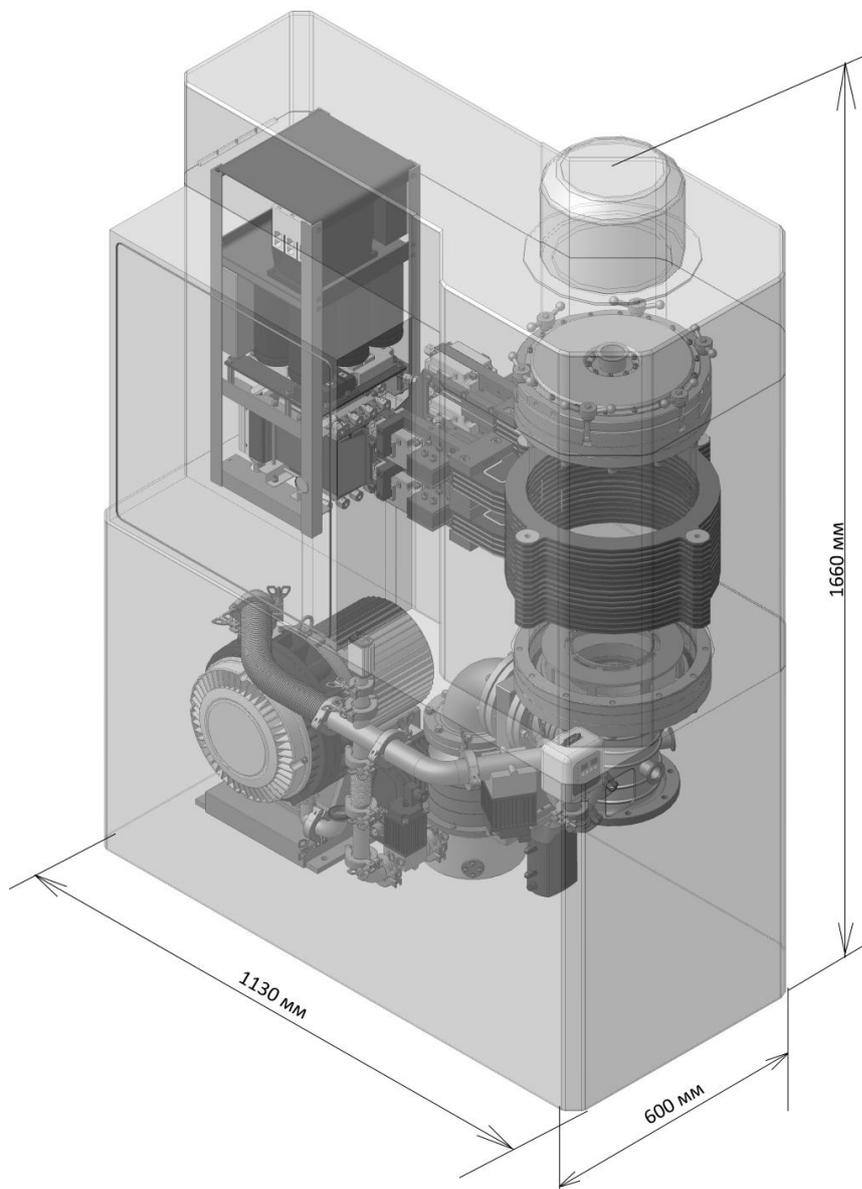


Рис.5. Компоновка и габаритные размеры установки для выращивания монокристаллов карбида кремния.

При проектировании установки изучены прототипы, как зарубежного производства, так и установки, выпускаемые на территории бывшего СССР, а также применен многолетний опыт предприятия по созданию силового оборудования для разных отраслей промышленности. Следует отметить, что в отличие от оборудования, производимого большинством фирм, установка, предлагаемая ООО «А-Веста» оснащается системой управления, системой силового питания (индукционным генератором), индуктором и ростовой камерой собственной разработки и производства, что позволило реализовать самые смелые инновационные технические идеи.



Установка состоит из следующих функциональных агрегатов:

- ростовой модуль для выращивания кристаллов SiC Ø100мм ;
- силовая часть;
- вакуумная система с форвакуумным и турбомолекулярным насосами;
- микроконтроллерная система управления;
- система водяного охлаждения со стабилизацией температуры, давления и расхода охлаждающей жидкости в каждом контуре охлаждения.

В настоящее время продолжаются разработки таких компонентов установки, как:

- прецизионный датчик толщины кристалла (датчик роста кристалла) ± 0.005 мм;
- прецизионный 6-ти канальный измеритель мощности:

1 канал	0 – 150 кВт ± 1 Вт;
5 каналов	0 – 35 кВт ± 0.85 Вт;
- 5-ти канальный графитовый нагревательный элемент (как опция установки) 150кВт = 5 x 30кВт при общем КПД управляющего + нагревательного тракта = 96%;
- гипертермальный датчик температуры 2000 - 3000°C $\pm 10^\circ$ C;

1. РОСТОВОЙ МОДУЛЬ

Ростовой модуль установки для системы нагрева «МЕДНЫЙ ИНДУКТОР - ГРАФИТОВЫЙ ТИГЕЛЬ» представлен на Рис.6 (здесь навесные компоненты системы не показаны; тигель, внутренние элементы ростовой ячейки в данный момент не отображены на рисунке, так как на них оформляются авторские свидетельства). Все металлические детали изготовлены из нержавеющей стали, колба – кварцевая труба Ø 280 мм и толщиной стенки 16 мм. Концы кварцевой трубы охлаждаются водой, конструкция водяного охлаждения колбы представлена на выноске Рис.6. Практически все металлические детали ростового модуля (кроме крепёжных деталей) также охлаждаются водой. Температура каждого контура охлаждения задаётся и поддерживается автоматически с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$, что в комплексе со стабилизацией потока воды и другими мерами, описанными ниже, позволяет предельно точно воспроизводить параметры наиболее удачного процесса роста. Оригинальная конструкция запорного узла позволяет оперативно производить работы по обслуживанию и ремонту оборудования, подготовке установки к работе. Наличие дополнительных портов стандарта ISO в нижней части ростового модуля позволяет подключать дополнительные датчики и оборудование в зависимости от потребностей технологического процесса.

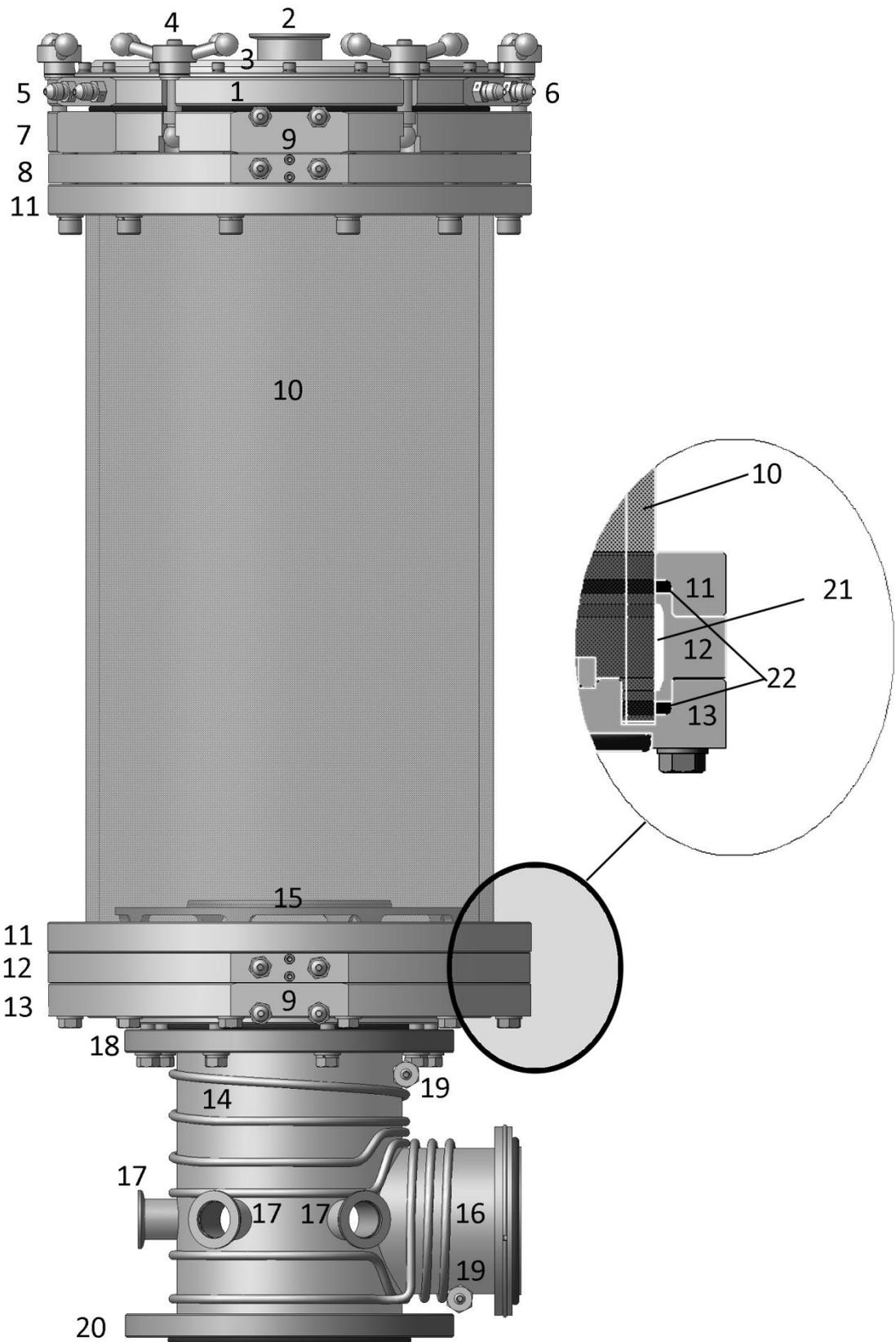


Рис.6. Ростовой модуль установки для системы нагрева «МЕДНЫЙ ИНДУКТОР - ГРАФИТОВЫЙ ТИГЕЛЬ».



1. Крышка ростовой камеры.
2. Порт ISO DN40 для подключения пирометра, датчика роста кристалла, датчика температуры.
3. Алюминиевая накладка – радиатор крышки ростовой камеры.
4. Запорный узел (резьбовой шаровой палец + барашек).
5. Порт подачи охлаждающей жидкости.
6. Порт подачи инертного газа или легирующей примеси (2 x 2 = 4 порта).
7. Верхний охлаждаемый фланец ростовой камеры.
8. Верхнее кольцо охлаждения кварцевой колбы.
9. Порты подачи охлаждающей жидкости на верхний охлаждаемый фланец ростовой камеры, кольца охлаждения кварцевой колбы, нижний охлаждаемый фланец ростовой камеры.
10. Кварцевая колба.
11. Затяжные верхнее и нижнее затяжные кольца кварцевой колбы.
12. Нижнее кольцо охлаждения кварцевой колбы.
13. Нижний охлаждаемый фланец ростовой камеры.
14. Низ ростовой камеры.
15. Держатель теплоизоляции.
16. Фланец ISO DN100 подключения турбомолекулярного насоса.
17. Порты ISO DN25-3 шт. и ISO DN40 -2 шт. для подключения навесного оборудования.
18. Фланец ISO DN160 подключения низа ростовой камеры к нижнему фланцу ростовой камеры.
19. Порт подачи охлаждающей жидкости в рубашку охлаждения низа ростовой камеры.
20. Фланец ISO DN160 подключения поворотного модуля тигля.
21. Полость в нижнем кольце охлаждения кварцевой колбы для циркуляции охлаждающей жидкости.
22. Флуоро-каучуковое (витоновое) уплотнительное кольцо.

2. СИЛОВАЯ ЧАСТЬ УСТАНОВКИ

Силовая часть установки предназначена для обеспечения стабильного высокоточного многозонного нагрева ростового тигля и состоит из:

- индукционного генератора 30 кГц – 150 кВт;
- 5-ти канального коммутатора мощности индуктора (5x35кВт);
- 5-ти канального блока индуктора (5x35кВт).

2.1. Индукционный генератор

Индукционный генератор предназначен для питания блока индуктора и состоит из:

- Микроконтроллерной схемы управления;
- Входного выпрямителя;
- Силового моста, собранного на IGBT транзисторах большой мощности;
- Высокочастотного силового трансформатора.



В основу схемы положен специально разработанный высокочастотный согласующий трансформатор (Рис.6), уникальная конструкция которого позволяет отдавать в нагрузку до 98% мощности; практически устранить реактивные потери и, как следствие, повысить надёжность устройства; в разы уменьшить габариты оборудования. Габариты всего индукционного генератора (Рис.7) составляют всего 643x256x238 мм.

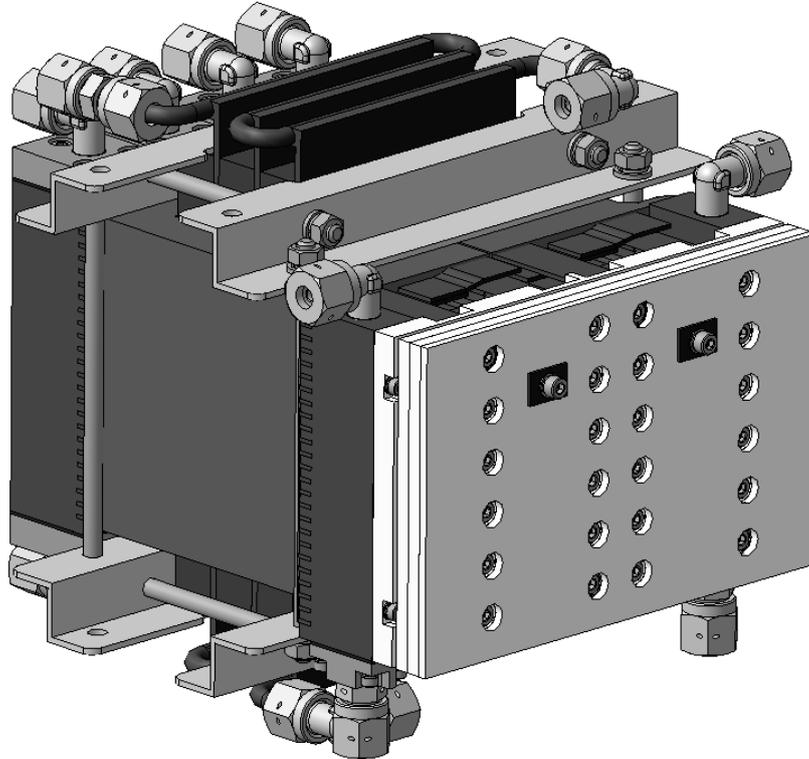


Рис.7. Мощный высокочастотный согласующий трансформатор.

Электронная микропроцессорная схема автоматически задаёт один из трёх режимов генерации рабочей частоты:

- Автогенераторный режим – частота генератора совпадает с резонансной частотой индукционного нагревателя, цифровая компенсация задержек в цепи ОС. Данный режим используется на этапах разогрева-охлаждения установки.
- Режим фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) – наиболее точный метод для определения резонанса в контуре индуктора, задания и поддержания мощности. Частота генератора совпадает с резонансной частотой индукционного нагревателя.
- Режим произвольной генерации – частота генератора отличается от резонансной частоты индуктора. Применяется, когда нет необходимости в максимальной мощности нагрева (например, при отжиге ростовой камеры).

Все силовые электронные компоненты генератора имеют водяное охлаждение, подобное охлаждению ростового модуля, что позволяет стабилизировать по температуре работу электронной схемы, тем самым повысив ее надёжность и точность.

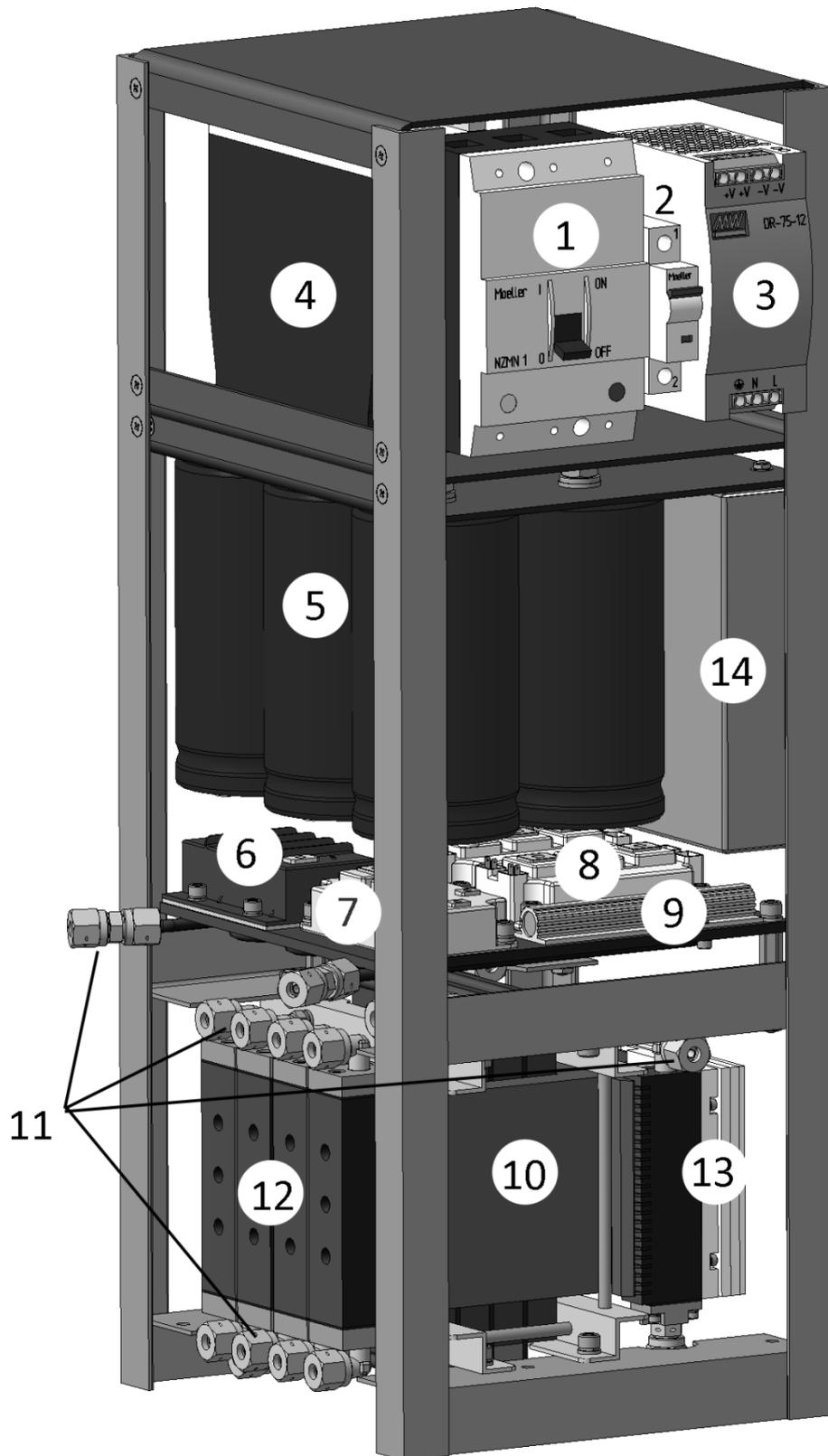


Рис.8. Блок индукционного генератора.

1. Входной трёхфазный силовой автомат.
2. Автомат питания блока электроники.



3. Блок питания электроники 24В.
4. Контактёр трёхфазный.
5. Батарея электролитических конденсаторов 15000 мкФх800В.
6. Трёхфазный диодный мост.
7. IGBT транзистор стартового заряда батареи конденсаторов.
8. IGBT сборки силового моста генератора.
9. Резистор стартового заряда батареи конденсаторов.
10. Высокочастотный согласующий трансформатор.
11. Порты подключения охлаждающей жидкости.
12. Выход высокочастотного согласующего трансформатора.
13. Входная колодка высокочастотного согласующего трансформатора.
14. Блок электроники.

2.2. Индуктор с коммутатором

Пятиканальный коммутатор мощности и пятиканальный индуктор выполнены в виде единого охлаждаемого водой блока (Рис.9), подключаемого непосредственно к выходу высокочастотного согласующего трансформатора.

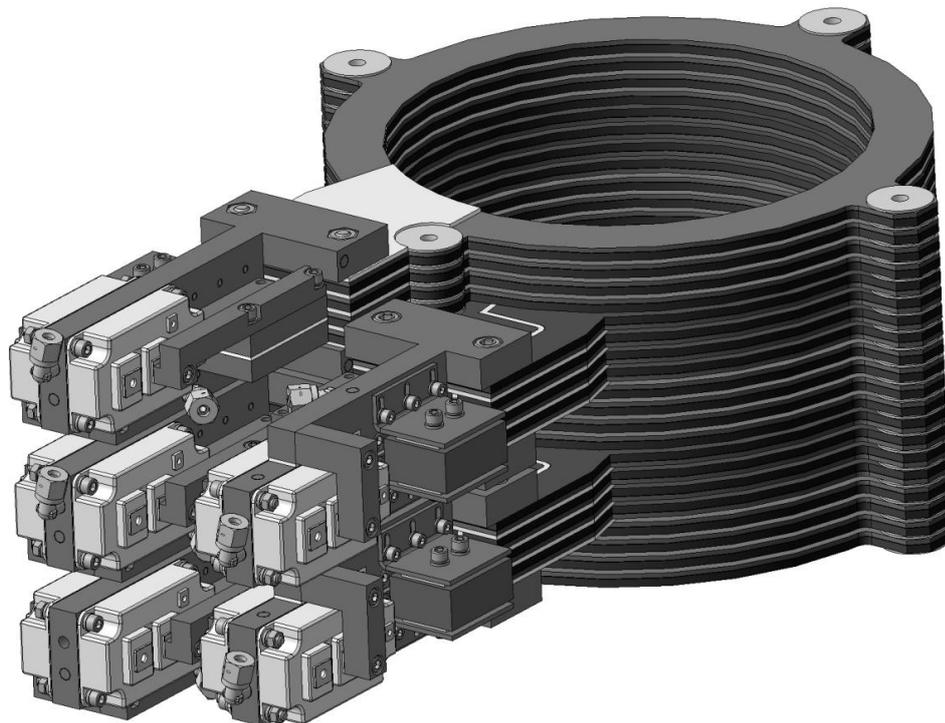


Рис.9. Индуктор с коммутатором в сборе .

Рассмотрим конструкцию блока индуктора на примере одной секции (Рис.10). Каждая секция состоит из четырёх витков, изготовленных из листовой меди толщиной 5 мм с фрезерованными или штампованными каналами для протока охлаждающей жидкости



(Рис.10 поз. 9) и запаянными медной крышкой толщиной 3 мм. Общая толщина витка с учётом припоя составляет 8,3 мм.

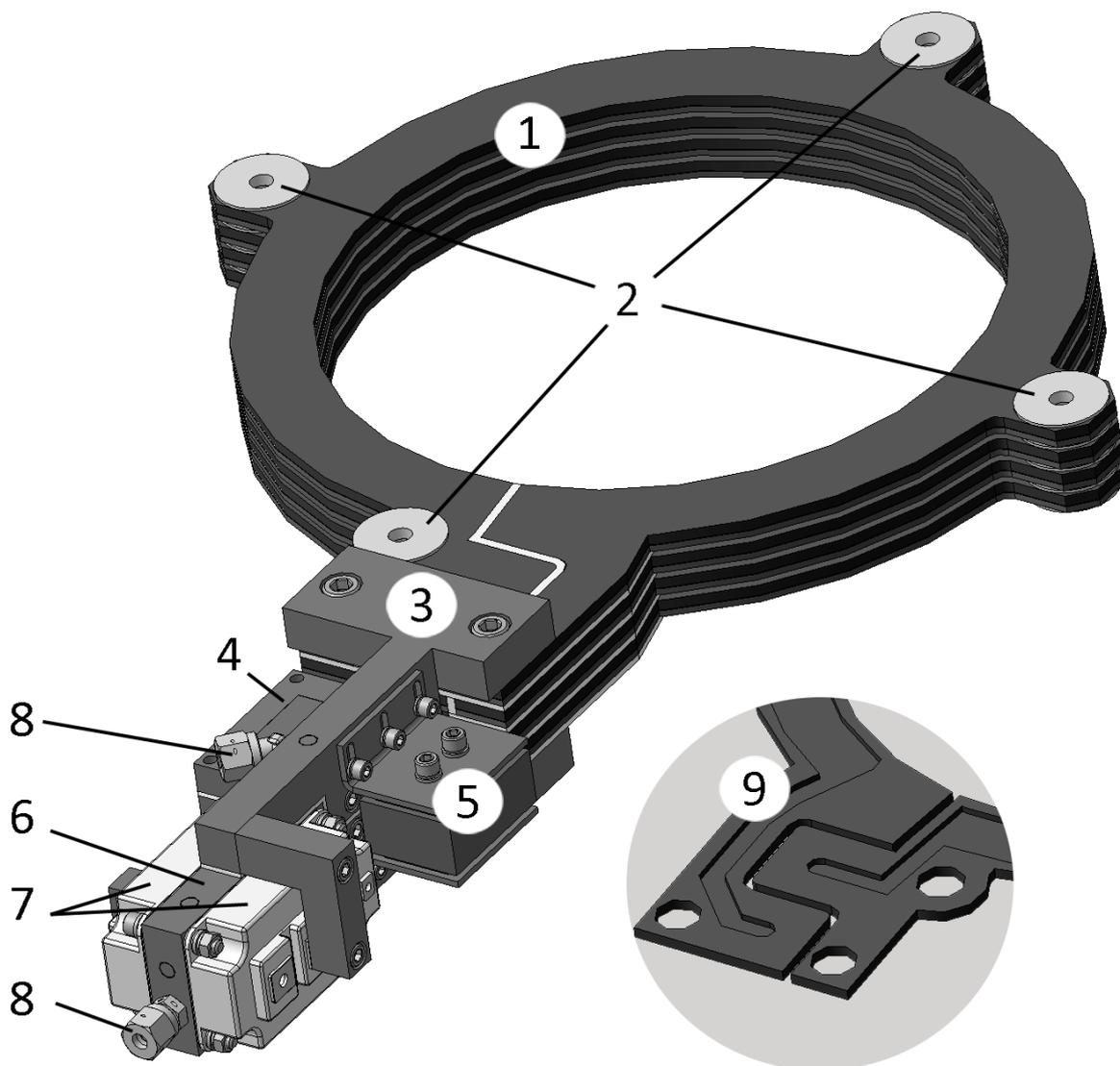


Рис.10. Одна секция индуктора.

1. Составной (паяный) виток с каналами для охлаждающей жидкости.
2. Крепёжные отверстия с межвитковыми фторопластовыми изоляторами.
3. Охлаждаемый водой токовод 1.
4. Основной конденсатор индуктора.
5. Регулировочный конденсатор индуктора .
6. Охлаждаемый водой токовод 2.
7. IGBT транзисторы регулировки мощности канала.
8. Порты подключения охлаждающей жидкости.
9. Внутренние каналы витка.



3. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная система установки (Рис.15.) выполнена в основном из стандартных каталожных деталей высоковакуумных систем ISO-K, ISO-F и ISO-KF выполненных из нержавеющей стали, что позволяет легко и быстро производить монтаж, ремонт, изменения и модернизацию оборудования.

Установка укомплектована:

- вакуумным спиральным безмасляным насосом модели Edwards GVSP30;
- вакуумным безмасляным турбомолекулярным насосом с магнитным подвесом ротора и интегрированным блоком питания со встроенным контроллером Edwards STP-iX455;
- компактным широкодиапазонным вакуумметром со встроенным цифровым дисплеем CC-10;
- датчиком вакуума Inficon BPG400;



Рис.11. Насос Edwards GVSP30.



Рис.12. Насос Edwards STP-iX455.



Рис.13. Вакуумметр CC-10.



Рис.14. Датчик вакуума Inficon BPG400.

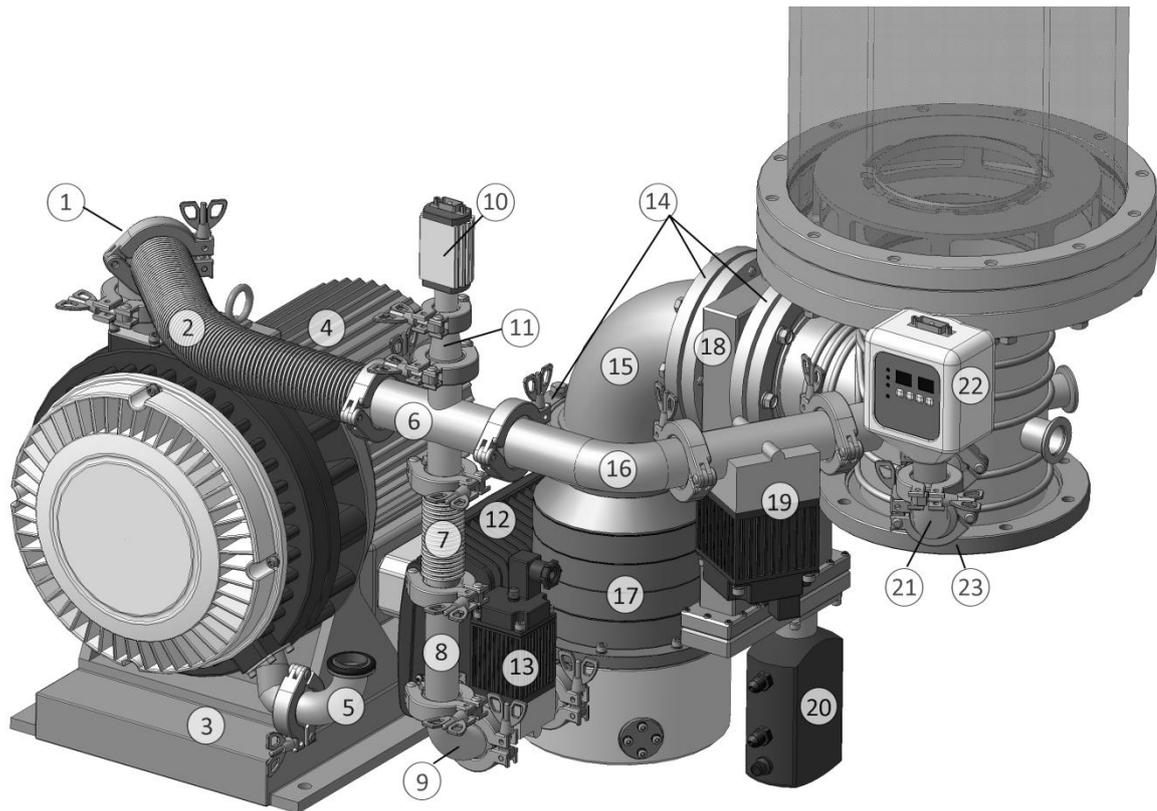


Рис.15. Вакуумная система.

1. Вход форвакуумного насоса (угол 90° DN40).
2. Сильфон 500 мм DN40.
3. Станина форвакуумного насоса.
4. Форвакуумный насос Edwards GVSP30.
5. Выход форвакуумного насоса (угол 90° DN25, подключается к вентиляционной магистрали).
6. Крестовина 90° DN40 x DN25.
7. Сильфон 100 мм DN25.
8. Удлинитель 100 мм DN25.
9. Угол 90° DN25.
10. Датчик вакуума Inficon BPG400.
11. Редукция DN25 x DN16.
12. Блок питания со встроенным контроллером ТМ насоса Edwards STP-iX455.
13. Вакуумный клапан с пневматическим приводом DN25 (IPV25PK).
14. Фланцы ISO-F DN100.
15. Угол 90° DN100.
16. Патрубок (не стандарт) угол 60° DN40.
17. Турбомолекулярный насос с магнитным подвесом ротора Edwards STP-iX455.
18. Запорный механизм вакуумного затвора GVI-100.
19. Вакуумный клапан с пневматическим приводом DN40 (IPV40PK).
20. Пневматический привод вакуумного затвора GVI-100.
21. Угол 90° DN25.
22. Вакуумметр СС-10.
23. Удлинитель 100 мм DN25.