

# Высокочастотные электротехнологии. Состояние, проблемы, перспективы (Часть 2)

**В. Н. Иванов,**  
д. т. н., академик АЭНРФ,

**Б. М. Никитин,**  
академик АЭНРФ,  
доктор электротехники

**С. И. Брыков,**  
инженер

**Г. А. Горюшин,**  
к. т. н.

**В. Д. Требич,**  
к. т. н.

**Г. С. Эйленкриг,**  
инженер

**ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт токов  
высокой частоты им. В. П. Вологодина (ВНИИТВЧ), г. Санкт-Петербург**

*Первые годы развития высокочастотной электротехники характеризовались использованием особенностей воздействия высокочастотных электромагнитных полей на проводящие материалы. После организации ВНИИТВЧ были начаты исследования процессов взаимодействия высокочастотных электромагнитных полей и непроводящих материалов [1]. Результаты исследований были использованы при разработке технологий и оборудования для производства композиционных материалов, выращивания ценных полупроводниковых кристаллов.*

*Во ВНИИТВЧ были созданы технологии и оборудование для плазменной обработки материалов, ультразвуковые машины.*

**Ключевые слова:** диэлектрический нагрев и сварка непроводящих материалов, очистка и выращивание особо чистых кристаллов, плазменные технологии, ультразвуковые процессы.

**Д**иэлектрический нагрев непроводящих материалов. В диэлектрических материалах, помещенных в переменное электромагнитное поле конденсатора, происходит поляризация (смещение зарядов) и выделение энергии. Величина энергии пропорциональна частоте, квадрату напряженности электрического поля и зависит от свойств материала (относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$ ). Если произведение  $\epsilon \operatorname{tg} \delta > 0,05-0,10$ , то при достаточно высокой частоте (5,28–2450 МГц) диэлектрический материал удастся довольно быстро нагреть. Однородный диэлектрик с постоянными свойствами во всем объеме в равномерном электромагнитном поле (рис. 1, а) во всем объеме нагревается равномерно.

Исследования, проведенные во ВНИИТВЧ, позволили получить опыт нагрева ряда конструктивных диэлектрических материалов, используемых в промышленности (фенопласты, стекловолокниты, стеклопакеты, стеклопластики, древесину и древесную крошку, древесные пластины, реактопласты и термопласты, компаунды и т. д.). Результаты исследований позволили создать новые и эффективные процессы:

нагрев заготовок из реактопластов перед прессованием, сушка, склеивание, полимеризация и т. п. В середине 1960-х гг. ВНИИТВЧ сумел, используя результаты исследований, создать ряд промышленных технологических процессов и высокочастотного оборудования, наладить серийное производство и обеспечить внедрение.

В результате этих работ в России и СНГ работает более 100 установок для производства композиционных материалов, сушки дорогостоящих особо чистых порошков в том числе люминофоров, более 2000 установок для нагрева таблеток перед прессованием медицинских и электротехнических изделий, более 20 установок для сушки и вспенивания теплоизоляционных материалов.

Важным итогом исследовательских и конструкторских работ 1950-х–1960-х гг. стало создание и внедрение установок:

- для термообработки книг и ценных архивных документов, намокших при авариях (протечках, пожаротушении, рис. 1, б); режим термообработки может быть выбран для обеспечения сушки или дезинфекции;

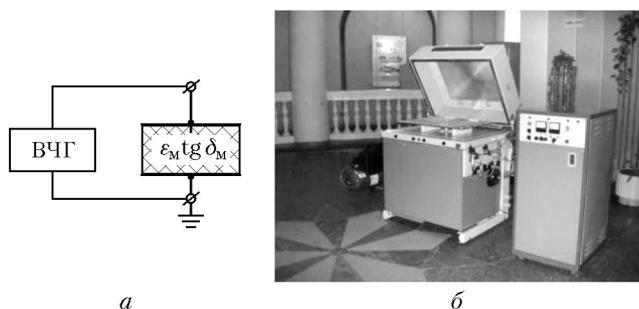


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и установка (б) для нагрева непроводящих материалов в электронном поле конденсатора ( $P=6$  кВт,  $f=27$  МГц)

- размораживания мясных и рыбных продуктов питания перед использованием;
- сушки древесины ценных пород.

Создана и испытана установка мощностью 12,0 кВт 27 МГц для склейки сотопакетов из бумаги номекс размером 914×600 в плане и высотой 80 мм. Сотопакеты являются важным элементом композиционных конструкций, используемых в авиакосмической промышленности.

В отличие от нагрева диэлектрических пакетов от внешнего источника тепла (время нагрева 2–2,5 ч) высокочастотный нагрев центральной части происходит за 20 мин. В настоящее время прорабатывается с помощью математического моделирования и создается комбинированный метод нагрева, включающий высокочастотный метод для нагрева всего объема пакета и нагрев внешними источниками для исключения отвода тепла с поверхности слоев.

Оригинальное и очень эффективное применение диэлектрического нагрева предложили НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина» (НПО РИ) и ФГУП ВНИИТВЧ, которые длительное время проводили работы по исследованию возможности переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с использованием СВЧ-нагрева [2]. В результате совместных исследований были отработаны конструкция резонатора, блока ввода СВЧ-энергии и режимы испарения жидкости и спекания остающихся твердыми компонентов (рис. 2). Полученные положительные результаты позволили разработать и изготовить опытно-технологическую установку «Мега» с колебательной мощностью 25 кВт на частоте 915 МГц для нагрева и переработки ЖРО непосредственно в бочке емкостью 200 л, в которой спеченные твердые радиоактивные отходы можно устанавливать для длительного хранения.

В настоящее время проводятся пуско-наладочные испытания установки в производственных условиях и отрабатываются технологические режимы. Полученные результаты позволили перейти, совместно со специалистами «Росатома» к разработке четырех более мощных установок (50 кВт 915 МГц), которые будут внедрены на предприятиях ГК «Росатом».

Разработана, создана и прошла испытания опытно-лабораторная СВЧ-установка для нагрева и отверждения базальтопластиковой арматуры, которая используется в строительстве, для крепления теплоизоляции.

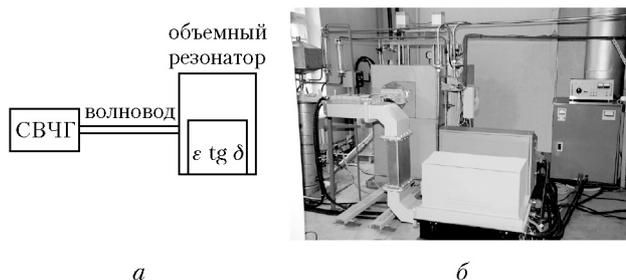


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и опытно-технологическая установка СВЧ «Мега» (б) для сушки и кальцинации жидких радиоактивных отходов

Полученные результаты дают основания рекомендовать эту методику для промышленного внедрения при производстве композиционных материалов.

**Высокочастотная сварка полимерных материалов.** При высокочастотной сварке термореактивных полимерных материалов в качестве пластин конденсатора используются электроды (рис. 3, а): нижний, на котором размещаются свариваемые элементы, и верхний подвижный, ширина которого определяет ширину сварного шва. После того, как верхний электрод будет опущен на свариваемые элементы и сожмет их, на электроды подается высокочастотное напряжение. В результате поляризации материал свариваемых элементов между электродами нагревается. Поскольку электроды охлаждают нижнюю и верхнюю поверхности свариваемых элементов, максимальная температура создается в зоне соприкосновения свариваемых элементов между собой. После достижения заданной температуры и деформации нагрев и сближение электродов прекращаются.

Проведенные исследования и экспериментальные работы позволили получить сплошной равнопрочный основному материалу сварной шов и создать ряд серийных установок для внедрения в промышленность. В настоящее время в России и СНГ работает более 2000 установок. Свариваются упаковки товаров народного потребления (пищевых и не пищевых), изготавливаются отличительные знаки, эмблемы для форменной одежды; для автомобильной промышленности — аккумуляторные бачки, топливные фильтры, элементы оформления салонов автомобилей.

К важным результатам НИР и ОКР ФГУП ВНИИТВЧ следует отнести создание и внедрение:

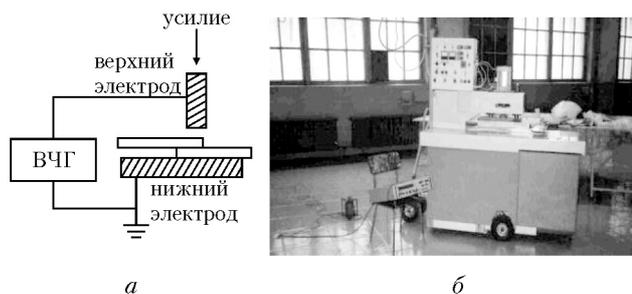


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и установка (б) для высокочастотной сварки непроводящих термопластических материалов

- установок для сварки одноразовых элементов систем переливания крови, измерения артериального давления, мешков для хранения крови, элементов аппарата сердце-легкое, противопролежневых матрацев и т. д.;
- установок для сварки оболочек дирижаблей, быстроразборных помещений для полевых госпиталей, жилья для людей, пострадавших при стихийных бедствиях (рис. 3, б);
- установок для сварки элементов боновых заграждений для защиты от разливов нефтепродуктов на поверхности водоемов.

### Очистка и выращивание особоличстных кристаллов.

В производстве особоличстных монокристаллов используются процессы:

- бестигельная зонная плавка (БЗП);
- зонная плавка в лодочке;
- групповое выращивание тонких прутков;
- индукционная плавка в холодном тигле.

**Получение монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки.** Метод БЗП (рис. 4) заключается в следующем. Верхний стержень (рис. 4, а), который подвергается переплавке, закрепляется вертикально в специальном держателе сверху. Снизу соосно с верхним стержнем в нижнем держателе закрепляется монокристаллическая затравка. На нижнем конце верхнего стержня с помощью специального индуктора, внутренний диаметр которого существенно меньше диаметра стержня, создается капля расплава кремния. Поскольку при комнатной температуре удельное сопротивление кремния весьма высоко (до  $2 \cdot 10^3$  Ом·м), для обеспечения индукционного нагрева кремниевый стержень с высоким удельным сопротивлением используют специальное устройство стартового разогрева — графитовое кольцо, которое временно устанавливают между индуктором и стержнем. После нагрева стержня до температуры более  $400^\circ\text{C}$  кольцо отводится в сторону и стержень нагревается непосредственно электромагнитным полем индуктора до появления капли. К образовавшейся капле подводится монокристаллическая затравка до соприкосновения и смачивания расплавом. После этого затравка перемещается вниз. Верхний и нижний держатели вращаются в разные стороны для обеспечения симметрии теплового поля.

Регулирование скоростей перемещения верхнего и нижнего держателей позволяют постепенно увеличить диаметр монокристалла до заданного (рис. 4, б). Процесс получения монокристалла происходит в атмосфере очищенного инертного газа.

В 1960-е–1980-е гг. ВНИИТВЧ совместно с ГИРЕДМЕТОМ и Запорожским титано-магниевым комбинатом проводил напряженные исследования по совершенствованию процесса и создавал оборудование для БЗП (рис. 4, в).

Бестигельная зонная плавка кремния для получения монокристаллов диаметром 100 мм, 125 мм и выше для электронной промышленности требует сложного специализированного оборудования. Технологический процесс БЗП сложен, требует точного нагрева и прецизионного перемещения относительно индуктора оплаваемого поликристаллического и растущего монокристаллического стержня. ВНИИТВЧ создал и внедрил в серийное производство оборудование для БЗП на Таганрогском заводе «ТОЗ-«Кристалл» для промышленного производства кремния на заводах страны. Во времена СССР были пущены и работали более 200 установок для очистки и выращивания методом бестигельной зонной плавки монокристаллов кремния и германия для полупроводниковой промышленности. Практически весь производимый в СССР монокристаллический кремний производился на установках ВНИИТВЧ. Качество монокристаллического кремния находилось на уровне лучших зарубежных образцов.

Получение монокристаллического кремния является очень важной составляющей кремниевой отрасли. Однако существование такой отрасли возможно только при развитии всех отраслей промышленности: химической, горнодобывающей, электротехнической, металлургической, электронной и т. д., при высоком научном потенциале развития фундаментальных и прикладных наук.

В результате многолетних усилий всех организаций в стране была создана новая отрасль промышленности, налажено производство металлургического кремния, переработка, очистка и производство монокристаллического бездислокационного кремния для электронной промышленности. ВНИИТВЧ участвовал на всех стадиях производства и переработки кремния.



Рис. 4. Принципиальная схема (а), фотографии постепенно увеличивающегося кристалла при бестигельной зонной плавке (б) и установка «Кристалл-114» для получения монокристаллического бездислокационного кремния диаметром до 125 мм методом бестигельной зонной плавки (в)

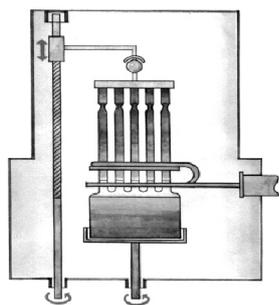


Рис. 5. Принципиальная схема (а) и установка «Кристалл-502» (б) для одновременного выращивания стержней-подложек диаметром 4–6 мм, длиной до 2 м (25 кВт, 1,76 МГц)

При получении поликристаллического кремния методом водородного восстановления из газовой фазы необходимы:

- прутки кремния — подложки, которые нагреваются до 1100°С и на которые осаждается кремний;
- специальные малогабаритные установки для бестигельной зонной плавки и получения монокристаллов диаметром 20–25 мм для определения марки партии поликристаллического кремния.

ВНИИТВЧ создал и наладил производство установок «Кристалл-115» для выращивания монокристаллов методом бестигельной зонной плавки для анализа качества поликристаллического кремния, а также установок «Кристалл-503» для получения 7–9 прутков-подложек одновременно. При групповом выращивании прутков использовался метод электромагнитного формообразования поверхности расплава, находящегося на оплавленном поликристаллическом стержне кремния. Схема процесса приведена на рис. 5, а, а установка на рис. 5, б.

Эффективность процесса при получении поликристаллического кремния методом водородного восстановления может быть повышена за счет скин-эффекта, возникающего при наложении продольного электрического поля на растущие стержни. Правильно выбранная частота и режим нагрева позволят стабилизировать температуру на поверхности стержней без перегрева его сердцевины. Для этого необходимо специальное оборудование, которое может разработать и изготовить ВНИИТВЧ.

В России в 1990-х гг. прошлого столетия из-за прекращения государственного финансирования фундаментальных исследований и отсутствия внутреннего платежеспособного рынка высоких технологий произошло существенное сокращение финансирования исследований и разработок в области совершенствования и развития производства полупроводникового и солнечного кремния. Совершенно прекращены исследования по совершенствованию и развитию производства монокристаллического кремния для изготовления силовых и микроэлектронных приборов. В то же время силовая электроника по праву считается важнейшей составной частью электроэнергетики в целом. Известно, что до

70% производимой в мире электроэнергии на пути к потребителю проходит через полупроводниковые преобразователи. Поэтому энергоэффективность в этой сфере приобретает самое актуальное значение. Требования к эффективности силовых преобразовательных устройств постоянно ужесточаются: все больше внимания уделяется не только минимизации энергетических потерь в преобразователях, но и увеличению плотности мощности в них (силовые ключи преобразователя должны работать с минимальными потерями энергии при коммутациях, при высокой плотности тока и обладать низким тепловым сопротивлением; большой эффект может дать переход на высокие частоты коммутации, что позволит уменьшить габариты, вес и стоимость устройств).

Для рациональной организации работ по созданию новых технологических процессов и оборудования для производства монокристаллического кремния, а также монокристаллов карбида кремния, необходимо создать Государственную Федеральную целевую программу «Кремний России». В создании такой программы обязательно должны участвовать ГК «Ростехнологии» и общественные организации, объединяющие лучших специалистов России, например, Академия электротехнических наук Российской Федерации.

**Очистка материалов методом горизонтальной зонной плавки.** При этом методе с помощью индукционного нагрева создается узкая зона расплава материала, помещенного в контейнер. Перемещение зоны расплава вдоль контейнера вызывает сегрегацию примесей на фронте кристаллизации. Часть примесей вытесняется в расплав, а другая часть захватывается кристаллизующимся материалом.

В результате многопроходной зонной плавки концы слитков оказываются загрязненными примесями. Средняя часть слитка оказывается наиболее очищенной.

Для промышленной реализации этого метода ВНИИТВЧ создал:

- технологию и оборудование для производства особо чистого алюминия (плавка производится в графитовой лодочке, помещенной в герметичную камеру из нержавеющей стали);
- технологию и оборудование для очистки кремния при плавке в кварцевом контейнере;

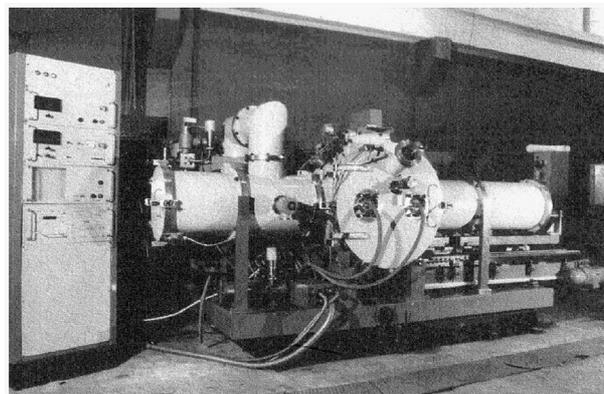


Рис. 6. Установка «Кристалл-806» для получения алюминия особой чистоты с содержанием примесей не более 0,001%

- технологию и оборудование для очистки германия (плавка производится в графитовой лодочке, помещенной в кварцевый контейнер).

Несмотря на известные трудности, ВНИИТВЧ в течение последних лет модернизировал, изготовил и внедрил одну установку «Кристалл-806» (рис. 6) (для очистки алюминия, одну — для очистки кремния, две — для очистки германия).

**Индукционная плавка в холодном тигле.** Тугоплавкие оксидные монокристаллы, стекла с температурой плавления выше  $2000^{\circ}\text{C}$ , плавленные керамические материалы на основе неметаллических высокотемпературных соединений широко применяются в современной технике и промышленности.

Наиболее перспективным процессом получения таких материалов признана индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ), потому что не требует специальных еще более тугоплавких материалов для изготовления тигля и нагревателя, исключает загрязнение получаемого материала компонентами, содержащимися в материале тигля. Принципиальная схема ИПХТ приведена на рис. 7, а. Боковая поверхность тигля образуется набором медных водоохлаждаемых трубок (рис. 7, б), которые соединены в нижней части тигля попарно в секции, а в верхней части подключены к коллектору, посредством которого осуществляется проток воды через секции для их охлаждения. Между трубками, из которых состоит боковая поверхность тигля, имеется зазор (0,5–1,5 мм), который исключает электрический контакт между ними, и не позволяет шихте в виде порошка или гранул высыпаться из тигля. В некоторых случаях дно тигля может быть съёмным, при этом оно собирается аналогично из водоохлаждаемых трубок.

Ток индуктора создает электромагнитное поле, которое через зазоры между трубками боковых стенок проникает в зону, где расположен обрабатываемый материал. Удельное электрическое сопротивление материалов, обрабатываемых в холодном тигле, при нормальной температуре слишком высоко, поэтому при рабочей частоте материал шихты не может воспринять энергию электромагнитного поля и разогреться. Приходится использовать другие способы для стартового разогрева шихты из холодного состояния до температуры плавления, при которой возможен прямой индукционный нагрев.

Обычно используют электродуговой или газоплазменный нагрев. Можно также добавлять в шихту металлы, входящие в состав обрабатываемого материала, которые нагреваются полем индуктора, нагревают шихту, а сами окисляются.

Индукционная плавка в холодном тигле (индукционная гарнисажная плавка, рис. 7), получившая развитие во Франции, России, США и Китае, является одним из перспективнейших направлений, которым занимается ВНИИТВЧ.

Этот метод плавки используется при реализации ряда процессов получения новых современных материалов:

1. Синтез и кристаллизация тугоплавких материалов (оксидов лантана, плавленного муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3+2\text{SiO}_2$ ), стекла ( $\text{La}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+6\text{SiO}_2$ ), а также хромитов иттрия и лантана).

Сегодня большой интерес промышленности вызывает технологический процесс и оборудование с холодным тиглем для синтеза чистых оксидных материалов в виде мерных блоков, как исходных материалов для выращивания кристаллов, например, лейкосапфира. Исходным сырьем для компактирования в холодном тигле служит порошок или гранулы оксида алюминия высокой чистоты (не менее 99,999%).

2. Выращивание монокристаллов на затравке (метод Чохральского) корунда, рубина, лейкосапфира, титаномангнетита, неодимгалиевого граната.
3. Получение тугоплавких и особочистых стекол на основе алюмосиликатных систем иттрия и лантана  $\text{R}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (где  $\text{R}-\text{Y}, \text{Sc}, \text{La}, \text{Er}$ )
4. Получение кристаллов фианитов на основе диоксидов циркония.
5. Выращивание объемных кристаллов нитридов алюминия и галлия. Гетероструктуры на основе нитрида галлия являются наиболее перспективными материалами для производства светодиодов и многоэлементных цифровых индикаторов. Источники света на основе светодиодов (GaN) имеют коэффициент полезного действия 25–30%, т. е. в 5–6 раз больше чем имеют лампы накаливания. Кроме того, материалы на основе GaN позволяют создать мощные высокочастотные полевые гетеротранзисторы. Реализация метода индукционной плавки в холодном тигле для вы-

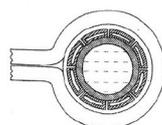
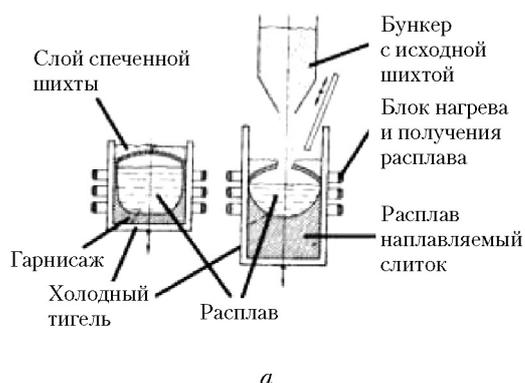


Рис. 7. Принципиальная схема (а) и установка «Кристалл-403» (в) для индукционной плавки в холодном тигле (мощность 160 кВт, частота 1,76 МГц, диаметр тигля 300 мм, длина 400 мм)

рацивания этих кристаллов весьма перспективно в ближайшем будущем.

Все эти материалы исключительно важны для стратегической и экономической безопасности страны, для развития авиакосмического комплекса, для атомной промышленности. Некоторые из них производятся в промышленных масштабах на установках для ИПХТ, изготовленных во ВНИИТВЧ. Другие — получены в лабораторных условиях в России или за рубежом.

Важным направлением работ с использованием ИПХТ является переработка промышленных отходов и техногенного сырья (твердых радиоактивных отходов, зольных остатков сжигания мусора). Предложения по использованию этого метода для компактирования радиоактивных отходов предприятиям Росатома сделано, проведены необходимые эксперименты. Однако промышленная реализация затягивается из-за отсутствия финансирования, чиновничьих проволочек и непрозрачной инфраструктуры.

**Бестигельная плавка и скоростная направленная кристаллизация при получении тонкостенных, вакуумноплотных фасонных отливок из высокопрочных материалов.** Впервые в мировой практике во ВНИИТВЧ был разработан и создан комплекс технологического оборудования [3] для отработки новой уникальной технологии изготовления крупногабаритных отливок фасонных деталей, работающих в экстремальных условиях (рис. 8), обеспечивающий использование следующих технологических возможностей:

- бестигельное оплавление исходной заготовки диаметром 160–200 мм с заданной скоростью;
- подачу расплава в полость опоки непрерывной струей с заданной температурой;
- предварительный равномерный нагрев тонкостенной опоки до заданной температуры;
- перемещение уровня хладагента, обеспечивающего кристаллизацию расплава, и уровня расплава над хладагентом с заданной скоростью при постоянном превышении уровня расплава над уровнем хладагента;
- перегрев расплава в форме в пределах 50–80°С;
- циркуляцию хладагента с определенной скоростью, обеспечивающей заданный теплоотвод от поверхности формы;
- охлаждение нагретого хладагента до заданной температуры во время его слива при циркуляции;

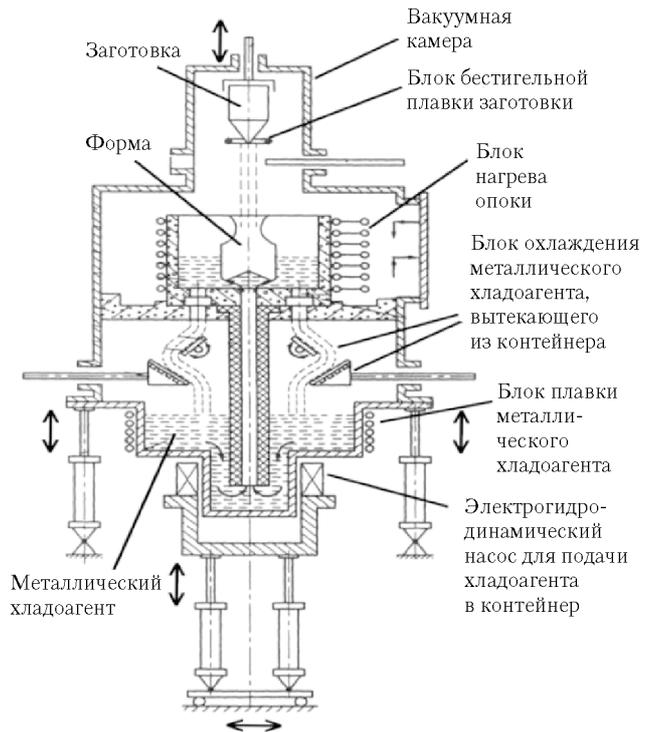


Рис. 8. Принципиальная схема установки «Кристаллизатор-106» для изготовления отливок изделий, работающих в экстремальных условиях методом скоростной бестигельной плавки и скоростной направленной кристаллизации

- кристаллизацию расплава в опоке со скоростью, обеспечивающей получение отливки заданной структуры и плотности.

Предполагалось, что реализация всех технологических возможностей комплекса при разработке технологии даст возможность получать отливки изделий, которые с успехом будут работать в экстремальных условиях. Однако, из-за отсутствия финансирования работы были приостановлены на этапе предварительных испытаний. Созданная коллективом ВНИИТВЧ сложная установка с комплексом новых передовых инженерных решений остается пока невостребованной.

**Плазменные технологии.** В нормальных условиях газы состоят из атомов и молекул, свободно и хаотически движущихся в пространстве. Свободных зарядов в них практически нет, поэтому электропроводность этих газов ничтожно мала. Ионизация газа в результате соударений заряженных частиц с нейтральными

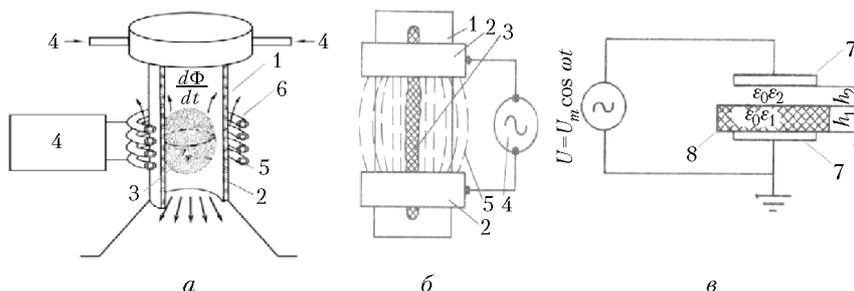


Рис. 9. Принципиальные схемы получения безэлектродного индукционного (а), емкостного (б) и коронного (в) разрядов 1 — кварцевая труба, 2 — кольцевые электроды расположенные на расстоянии один от другого, 3 — плазма, 4 — источник питания, 5 — электрическое поле, 6 — индуктор, 7 — плоские электроды, 8 — диэлектрическая пластина, барьер, ограничивающий ток коронного разряда

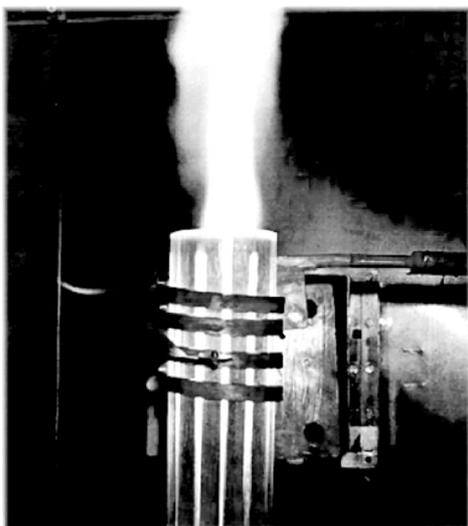


Рис. 10. Безэлектродный разряд в высокочастотном индукционном плазматроне (1000 кВт, 440 кГц)

молекулами, а также рентгеновское, космическое, радиоактивное излучение или нагрев газа до высокой температуры приводит к тому, что в газе содержится смесь отрицательно заряженных электронов, положительных ионов и нейтральных атомов. Такая смесь заряженных и незаряженных частиц называется плазмой, которая может проводить электрический ток. Плазма может существовать только при высоких температурах (более 2000°С).

ВНИИТВЧ разрабатывает технологические процессы с использованием безэлектродного разряда в плазме — индукционного и емкостного, а также тлеющего и коронного разряда (рис. 9, 10).

Низкотемпературная плазма (6000–10000°К) полученная в индукционных плазматронах, обладает рядом положительных свойств и позволяет реализовать ряд технологий, позволяет работать с любыми газами, в том числе, реакционными, ей свойственна высокая стабильность, практически неограниченный ресурс работы, большой объем и высокая чистота зоны разряда.

Наиболее интересны плазмохимические процессы, протекающие обычно внутри ВЧИ разряда или в плаз-

мохимическом реакторе. Совместно с РНЦ «Курчатовский институт» создана не имеющая аналогов в мире плазменно-мембранная технология для переработки природного сероводородсодержащего газа [4]. Вместо колонн с сорбентами для отделения сероводорода от основы — природного газа — используются специальные мембраны. Затем сероводород разлагается на водород (прекрасное топливо) и серу. При этом энергия при сгорании водорода теоретически в 6–12 раз (а практически в 3–6 раз) больше, чем требуется для разложения сероводорода. Процесс опробован на установках 600 кВт при частоте 440 кГц и 400 кВт при частоте 915 МГц (рис. 11).

Совместно с НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» созданы плазмохимический процесс и установки для переработки высокорadioактивных отходов. Во ФГУП ВНИИТВЧ были изготовлены и прошли опытно-промышленные испытания на модельных растворах три типа ВЧИ установок мощностью 10, 40 и 60 кВт с частотой тока 27,12; 1,76 и 5,28 МГц. Во всех случаях получены оксиды необходимого гранулометрического и фазового состава.

Во ФГУП ВНИИТВЧ проведены теоретические и экспериментальные работы по исследованию возможности получения в ВЧИ-плазматроне фуллерено-содержащей сажи из угольного порошка. Показано, что по сравнению с существующими методами получения фуллеренов в дуговой плазме из угольных электродов при использовании порошков резко повышается процент использования сырья в связи с возможностью повторной обработки.

Было изготовлено несколько лабораторных макетов. Наиболее совершенным был макет, где процесс получения сажи проводился в замкнутом герметичном газовом контуре с оборотным потоком при давлении 100–600 мм рт. ст. в смеси аргона с гелием в различных соотношениях. При этом плазма создавалась в гибридном плазматроне, представляющем собой сочетание дугового и ВЧИ плазматронов. На данном макете получена производительность более 100 г сажи в час с содержанием фуллеренов 2%. Имеются пути повышения производительности и увеличения процента содержания фуллерена в полученной саже соответственно до 500 г/час и 10%.

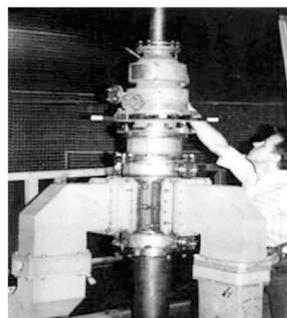
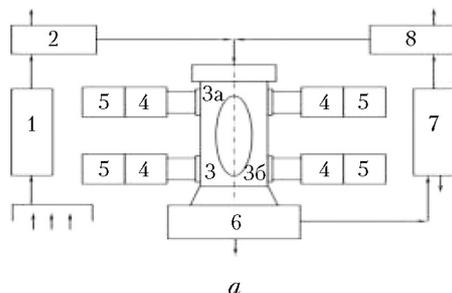


Рис. 11. Принципиальная схема (а) и плазменный реактор (б) установки для плазменно-мембранной переработки сероводородсодержащего природного газа (мощность 400 кВт, частота 915 МГц)

- 1 — узел очистки и осушки газа; 2 — узел мембранного разделения смеси «сероводород — углекислый газ»;  
 3 — плазмохимический блок, 3а и 3б — микроволновые плазматроны; 4 — магнетронные генераторы;  
 5 — источники питания магнетронных генераторов; 6 — сероконденсатор; 7 — система очистки газа от серного аэрозоля;  
 8 — блок мембранного разделения смеси «водород — сероводород»

Кроме описанных, к процессам, проводимым с введением материала в зону ВЧИ разряда, относится процесс получения титановых белил из тетраоксида титана в плазме кислорода, получение высококачественного кварца из порошка окиси кремния или из парогазовой фазы, получение абразивных материалов в виде окислов различных металлов и ряд других процессов, проводимых на оборудовании, разработанном во ФГУП ВНИИТВЧ. Сюда же можно отнести разработанный источник возбуждения спектров для спектрального анализа растворов.

Ряд плазменных процессов целесообразно проводить в струе плазмы на выходе из ВЧИ-плазмотрона, например, получение порошков сферической формы частиц. При такой организации, процесса порошок, вводимый в плазменную струю, не влияет на электрофизические параметры плазмы, в активной части плазмотрона в которой происходят электромагнитные процессы.

Сферические порошки применяются для изготовления фильтров, катодов, светоотражающих покрытий, для изготовления ТЭНов и во многих других областях.

Во ФГУП ВНИИТВЧ изготовлены и испытаны опытно-промышленные установки (60 кВт и 160 кВт) для обработки периклаза (MgO) и других окислов в плазме ВЧИ-разряда. Показано, что для стеклянных порошков целесообразна обработка с введением материала на выходе плазмотрона, для тугоплавкого периклаза наиболее эффективно подавать порошок в противотоке с плазменным потоком, направляемым вертикально вверх. При обработке периклаза в плазме ВЧИ-разряда в несколько раз увеличивается его удельное электрическое сопротивление, более чем в 2 раза снижается влагопоглощение и в среднем на 30% увеличивается текучесть. В результате увеличивается производительность при изготовлении ТЭНов и улучшается их качество.

Плазменными установками, разработанными во ФГУП ВНИИТВЧ, укомплектован цех в Ленинградской области, производящий стеклянные сферы для светоотражающих покрытий.

Накопленный большой опыт по использованию ВЧИ-плазмотронов для сфероидизации частиц позволил перейти к созданию технологии и оборудования для получения микро- и наносфер полых и сплошных, используемых в качестве наполнителей для изготовления композиционных материалов для аэрокосмической промышленности.

ФГУП ВНИИТВЧ разработал также ВЧИ-плазменные установки для отделки строительных изделий. Процесс в них основан на свойстве бетона, керамзитобетона и других строительных изделий самоокрашиваться под воздействием высокотемпературной струи газа с образованием стекловидной декоративной пленки различной фактуры в зависимости от параметров оплавления. Использование подстилающих слоев на поверхности изделий дает возможность получать широкую гамму цветов, их сочетаний, а также рисунков.

Во ФГУП ВНИИТВЧ было разработано три типа установок типа «Плазма-600» мощностью 60 и 160 кВт.

Две установки внедрены на предприятиях крупнопанельного домостроения в Сибири.

Исследования, проведенные ФГУП ВНИИТВЧ, позволили создать ВЧИ плазменные установки для нанесения упрочняющих покрытий на поверхности машиностроительных изделий — получение высокопрочного и износостойкого покрытия на поверхности инструмента, штамповой оснастки и других изделий с целью увеличения их срока службы.

Достоинством установок является то, что в отличие от большинства существующих установок такого типа, процесс ведется при атмосферном давлении в струе аргоновой или азотной плазмы с введением в плазму паров углеводородов и кремния. В результате на поверхности детали образуется пленка толщиной 2–5 мкм, содержащая смесь карбида и окислов кремния. Износостойкость изделия повышается в 2–6 раз в зависимости от материала и вида изделия.

Во ФГУП ВНИИТВЧ разработано три вида установок типа «Плазма-400» и внедрено на ряде предприятий России.

Важнейшим из направлений исследований плазменных технологий является моделирование процессов теплообмена при испытании летательных аппаратов.

При испытаниях детали летательных аппаратов располагаются в струе плазмы на выходе из индукционного плазмотрона. В зависимости от того, какие условия моделируются, используется плазма при атмосферном или пониженном давлении.

Во ФГУП ВНИИТВЧ для этих целей были разработаны и внедрены установки с ВЧИ-плазмотронами 160кВт, 1,76 МГц и 600 кВт и 1000 кВт, 440 кГц.

В разработках участвовали сотрудники кафедры электротехники и технологии СПбГПУ.

Результаты работ ФГУП ВНИИТВЧ в области плазменных технологий могут быть использованы в аэрокосмической промышленности:

- Предлагается также создать технологию и оборудование для получения мелкодисперсных быстро охлажденных порошков из жаропрочных никелевых сплавов. Нагретый в высокочастотном индукционном плазмотроне аргон оплавляет поверхность быстро вращающейся заготовки, например, никелевого сплава. Мелкие расплавленные частицы за счет центробежных сил срываются с поверхности заготовки и попадают в поток холодного аргона, быстро охлаждаются и попадают в сосуд для сбора.
- Во ФГУП ВНИИТВЧ длительное время проводились разработки, изготовление и внедрение на предприятиях России установок типа «Разряд» для обработки в коронном и барьерном разряде с целью повышения адгезионных свойств полимерных (в основном пленочных) материалов. Достигнуто увеличение адгезии для полиэтилена в 40–50 раз. Это необходимо для склейки, покраски и др. Для ФГУП ОНПП «Технология» создана и внедрена установка коронного разряда для улучшения адгезионных свойств бумаги «Номекс» перед нанесением на нее клеевых слоев и дальнейшем использовании в производстве сотопакетов.

- По предложению ФГУП ВНИИТВЧ и ФГУП ВНИИСВ предстоит создать технологические процессы и оборудование для окисления, карбонизации и графитации синтетических волокон, для аэрокосмической промышленности, с использованием электромагнитных полей высокой и сверхвысоких частот.
- Предложено использовать возможность нагревать в ВЧИ-плазматроне любой газ до высокой температуры (7000–1000°K) для разложения экологически вредных газов, в том числе образующихся при окислении ПАН-волокна в линиях карбонизации и графитизации.

Создан [5, 6] и передан для запуска в Национальный ядерный центр Казахстана Министерства энергетики и минеральных ресурсов (г. Курчатов), уникальный комплекс из четырех установок мощностью до 2000кВт каждая, частотой 13 МГц для высокочастотного подогрева плазмы ТОКАМАК КТМ.

**Ультразвуковые процессы.** С помощью материалов, которые меняют свой объем при воздействии магнитного или электрического полей, удается преобразовать высокочастотные электрические колебания в механические и использовать эффекты и явления, проявляющиеся при распространении ультразвуковых механических колебаний.

Мощные ультразвуковые колебания используют для сварки, мойки и очистки деталей перед сборкой узлов, диспергирования и т. д.

Разработано и налажено серийное производство двух типов уникальных установок модульного типа для ультразвуковой очистки фильтров летательных аппаратов, полученных методом порошковой металлургии.

Создана не имеющая аналогов установка для экстракции из растений полезных веществ, в том числе получения пищевой добавки «Зостерин» из морской травы зостера. Медицинские исследования показали, что Зостерин-ультра при регулярном потреблении связывает и выводит из организма тяжелые, в том числе радиоактивные металлы.

**Источники питания высокочастотных технологических установок.** Для всех электротехнологических процессов и установок ВНИИТВЧ в 1980-е гг. создал и наладил производство на предприятиях, которые входили в состав НПО «ВНИИТВЧ», либо были прикреплены к ВНИИТВЧ приказами Минэлектротехпрома. Выпускались источники питания мощностью от 5 до 1600 кВт частотой от 500 до 80 МГц.

При создании новых технологических процессов, требующих новых частот, ВНИИТВЧ создавал новые источники питания. Постепенно диапазон частот выпускаемых заводами и ВНИИТВЧ, постепенно расширялся до 2450 МГц. В лабораториях ВНИИТВЧ были сосредоточены основные источники питания, которые позволяют в кратчайшие сроки провести любой эксперимент при создании нового технологического процесса. А созданные и выпускаемые источники питания были основой для создания любой новой технологической установки.

К сожалению, из-за отсутствия финансирования в последние двадцать лет совершенствование источни-

ков питания не проводилось. При этом ряд источников питания устарели. Однако для диэлектрического нагрева, ростовых, плазменных и ультразвуковых технологических процессов ВНИИТВЧ разрабатывает и изготавливает источники питания в процессе выполнения заказов промышленных предприятий. Это затрудняет совершенствование источников питания. Тем не менее, ВНИИТВЧ создал и внедряет новые установки, в которых предусмотрены источники питания с промежуточным преобразованием частоты. Это уменьшает габариты и вес установок.

ВНИИТВЧ по-прежнему готов решать важнейшие государственные задачи, создавать новое электротехническое оборудование, обеспечивая экономическую, технологическую и военную безопасность страны.

В этих условиях особенно важно сотрудничество ФГУП ВНИИТВЧ с Академией электротехнических наук Российской Федерации.

#### Список использованных источников

1. В. Н. Иванов, Б. М. Никитин, В. И. Червинский. Высоочастотные электротехнологии. Состояние, проблемы, перспективы//Индукционный нагрев, № 4, 2012.
2. А. С. Алой, В. З. Белов, Б. Ю. Иванов, С. И. Брыков, В. Д. Требич, В. Н. Иванов, В. И. Добровольская, Г. А. Горюшин, Б. М. Никитин, Д. Б. Лопух, А. П. Мартынов, А. В. Вавилов, С. Н. Чеплюк, Развитие и реализация электротехнологий для кондиционирования радиоактивных отходов в России//Индукционный нагрев, № 2, 2011.
3. Ф. В. Безменов, В. А. Бодажков, В. И. Добровольская, В. Н. Иванов, В. И. Кирьянов, Н. В. Шарыгин, Г. А. Горюшин. Установка для получения точных заготовок из высокопрочных материалов методом бестигельной плавки и направленного затвердевания//Индукционный нагрев, № 3, 2009.
4. V. N. Ivanov, B. M. Nikitin, S. V. Brykov, G. S. Eilenkrig, V. D. Rusanov, V. K. Zhivotov, S. V. Dresvin, D. V. Ivanov. High-frequency plasma technology in gas and oil processes//XXVII Congress, St.-Petersburg, 21-25 May, 2012.
5. В. Н. Иванов, Б. М. Никитин, С. И. Брыков, Г. С. Эйленкриг, В. Д. Русанов, В. К. Животов. Плазменно-мембранная переработка природного сероводородсодержащего газа//Индукционный нагрев, № 6, 2008.
6. Э. И. Азизов, С. И. Брыков, В. Н. Иванов, В. Д. Требич, А. М. Губин. Основные принципы работы установок управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы//Индукционный нагрев, № 1, 2012.
7. Э. А. Азизов, А. А. Гостев, С. И. Брыков, С. Г. Гуревич, В. Н. Иванов, А. Подымов, В. Д. Требич, Г. А. Фрумкин, А. М. Губин, В. Л. Демидов, Е. В. Середенко, В. И. Энгелько, Г. В. Шаповалов. ВЧ-система дополнительного нагрева плазмы ТОКАМАК КТМ//Индукционный нагрев, № 1, 2011.
8. Ю. С. Кузьминов, Е. Е. Ломонова, В. В. Осико Тугоплавкие материалы из холодного тигля. М.: Наука, 2004с.
9. В. Д. Русанов, А. А. Фридман. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.

#### High frequency of electrotechnology. Status, Problems and Prospects

**V. N. Ivanov**, Doctor of Technical Sciences. **B. M. Nikitin**, **S. I. Brykin**, engineer. **G. A. Goryushin**, PhD. **V. D. Trebich**, PhD. **G. S. Eilenkrig**, engineer. All-Russian Research Institute of High-Frequency Currents n. a. V. P. Vologdin.

The early years of high-frequency electrical features were characterized using high-frequency electromagnetic fields exposure on conductive materials. After organizing All-Russian Research Institute of High-Frequency Currents research was started processes of interaction of high-frequency electromagnetic fields and non-conductive materials [1]. Research results were used to develop technologies and equipment for the production of composite materials, cultivation of semiconductor crystals.

All-Russian Research Institute of High-Frequency Currents were created in technology and equipment for the plasma treatment of materials, ultrasonic machine.

**Keywords:** dielectric heating and welding non-conductive materials, purification and cultivation of super-pure crystals, plasma technology, ultrasonic processes.