

Ефремов Владимир Михайлович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ
В ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва 1999

Работа выполнена в ГНЦ РФ Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Научный руководитель — доктор технических наук Л.М.Севрюкова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.В.Петренко, кандидат технических наук Н.В.Лазарев.

Ведущая организация – Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук (г.Москва).

Защита диссертации состоится ” ____ ” _____ 1999 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета К 053.03.07 при Московском государственном инженерно-физическом институте (техническом университете) по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан ” ____ ” _____ 1999 г.

Просим принять участие в работе Совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 053.03.07

И.С. Щедрин

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1999

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В настоящее время высокочастотная сверхпроводимость интенсивно внедряется в ускорительную технику. Сверхпроводящие резонаторы используются в ускорителях электронов (S-DALINAC, TJNAF), тяжелых ионов (ATLAS), в больших коллайдерах (LEP, HERA, TRISTAN). С 1990 г. разрабатывается проект сверхпроводящего линейного коллайдера TESLA.

При реализации проектов больших ускорителей, требующих десятков или сотен сверхпроводящих резонаторов, одной из самых главных задач является снижение стоимости ускорителей. Этого можно достичь при увеличении ускоряющего поля в резонаторах, в результате, потребуется меньшее их количество. Стоимость может быть снижена также при использовании менее качественного и более дешевого исходного материала (ниобия) за счет применения более совершенных технологий обработки рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов.

Для уменьшения срока реализации крупных проектов необходимо также увеличить производительность при изготовлении большого числа сверхпроводящих резонаторов, что может быть достигнуто автоматизацией процесса.

Цель диссертационной работы — изучение и разработка автоматизированных технологических методов прецизионной обработки рабочей поверхности сверхпроводящих СВЧ-резонаторов за счет подавления эмиссионных эффектов для увеличения ускоряющих полей.

Научная новизна

В процессе проведения исследований получены следующие результаты:

1. Изучена характерная электрическая неустойчивость, возникающая при электрохимическом полировании сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов, изготовленных из ниобия электронно-лучевой плавки марки НРБ (слитки, лист, монокристалл). Проанализированы и впервые опубликованы общие черты электрической неустойчивости в полупроводниках, электрохимической системе и в ускоряющих резонаторах [1,2].

2. Экспериментально исследованы особенности колебаний электрического тока на участке отрицательного дифференциального сопротивления, в результате чего впервые обнаружены бифуркационные и стохастические явления в электрохимической системе, используемой при обработке сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов [1,6].
3. Впервые экспериментально изучен фазовый портрет стохастических колебаний при электрохимическом полировании сверхпроводящих ниобиевых резонаторов СМ-диапазона на участке вольтамперной кривой с отрицательным дифференциальным сопротивлением [6,8].
4. Исследованы гистерезисные явления в электрохимической системе и в СВЧ-системе со сверхпроводящим резонатором. Впервые найдена корреляция площади петли гистерезиса с кристаллографической ориентацией рабочей поверхности сверхпроводящего ускоряющего резонатора, т.е. с интегральной работой выхода электронов [4].
5. Изучены автоколебательные процессы, возникающие при электрохимическом полировании сверхпроводящих ускоряющих резонаторов из ниобия и сплава NbZr при наложении постоянного напряжения [8].

Практическая ценность работы:

1. Разработан и внедрен метод электрохимического полирования сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов с контролем процесса по виду “пакетов” колебаний тока, описываемых странным аттрактором, что позволило полностью исключить брак из-за растравливания рабочей поверхности резонатора [2].

2. Разработан и внедрен способ экспресс-контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов, что позволило исключить выбраковку резонаторов по эмиссионной способности после прохождения полного цикла обработки резонатора [4].

3. Создан комплекс экспериментально-технологического оборудования для форсированного и прецизионного финишного электрохимического полирования рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов [6].

4. Проведена оптимизация автоматического режима электрохимического полирования сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов из ниобия и его сплавов, что позволило в несколько раз повысить производительность процесса [6].

5. Предложен способ изготовления сверхпроводящих резонаторов из слитков крупнокристаллического ниобия, что позволило добиться существенной экономии материала [3].

Практическая реализация

Разработанная технология электрохимического полирования и новые методы контроля эмиссионных свойств использованы при изготовлении и исследовании сверхпроводящих резонаторов по программам международного научно-технического сотрудничества с различными фирмами, в том числе изготовлены:

- сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-резонаторы из слитков крупнокристаллического ниобия с конфигурацией “Wuppertal-shape” для Вупертальского университета (Германия);
- сверхпроводящие резонаторы из монокристаллического ниобия с различной кристаллографической ориентацией при совместных исследованиях по программе “Частота-время” (Госстандарт Российской Федерации) для Сибирского НИИ Физико-технических и радиотехнических измерений (г. Иркутск, Российская Федерация);
- детали сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов из листового ниобия “TESLA-shape” для Вупертальского университета (Германия);
- детали сверхпроводящих резонаторов “TJNAF-shape” для ускорительной лаборатории им.Томаса Джефферсона (США).

Апробация работы

Результаты проведенных исследований опубликованы в виде научных статей, препринта ИФВЭ, защищены авторскими свидетельствами, обсуждались на конференциях и совещаниях по ускорительной технике, таких как:

- V Международное рабочее совещание по высокочастотной сверхпроводимости. DESY, Гамбург (Германия, 1991 г.);
- специальный семинар по высокочастотной сверхпроводимости. Вупертальский университет (Германия, 1991 г.);
- VI Международное рабочее совещание по высокочастотной сверхпроводимости. CEBAF, Ньюпорт Ньюз (США, 1993 г.);
- XIV, XV, XVI Международные рабочие совещания по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ (Протвино, 1994, 1996, 1998 гг.);
- VII Международное рабочее совещание по высокочастотной сверхпроводимости. Жиф сюр Иветт (Франция, 1995 г.);
- V Европейский вакуумный конгресс. Саламанка (Испания, 1996 г.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Материал изложен на 96 страницах, содержит 25 рисунков и 18 таблиц. Список литературы включает 68 наименований.

Содержание работы

Экспериментальное исследование электрической неустойчивости

Диссертация начинается с обоснования актуальности темы и формулировки основных задач работы.

Далее кратко рассмотрены проведенные экспериментальные, методические и расчетные исследования, разработки технологий и сделанные выводы.

Экспериментальное исследование электрической неустойчивости при электрохимической (ЭХ) обработке рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих резонаторов включает изучение семейства вольт-амперных характеристик (ВАХ) со скоростью изменения напряжения от 0,006 до 3 В/с, исследование самопроизвольных колебаний тока и бифуркационных явлений на участке ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Особое внимание обращено на колебания, описываемые странным аттрактором, и на границы существования таких колебаний.

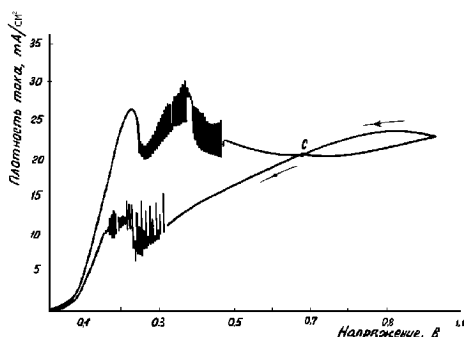


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика при ЭХ-обработке ниобия в электролите с объемным соотношением плавиковой и серной кислот 1:4 [1].

так как именно при таком условии анодное растворение металлов дает полирующий эффект. Следовательно, ЭХ-полирование ниобия необходимо производить в области напряжений, соответствующей существованию самопроизвольных колебаний тока.

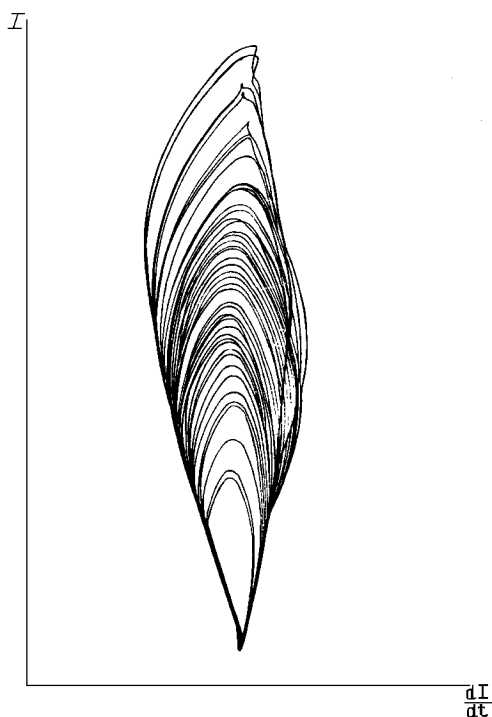


Рис. 2. Фазовый портрет стохастических колебаний [1].

Типичная ВАХ системы для ЭХ-полирования сверхпроводящих ускоряющих резонаторов показана на рис.1.

В определенной области напряжений в системе возникают самопроизвольные колебания тока, что объясняется отрицательным дифференциальным сопротивлением системы.

Отрицательный наклон вольт-амперной характеристики соответствует пассивации поверхности ниобия. ЭХ-полирование обычно производят при напряжениях, соответствующих пассивации,

В системе для ЭХ-полирования ускоряющих резонаторов при изучении формы колебаний в зависимости от напряжения наблюдается следующая картина [1]: при повышении напряжения в начале области существования колебания имеют квазисинусоидальную форму, затем происходят последовательные бифуркации (удвоения периода) колебаний. При дальнейшем повышении напряжения система переходит в область существования стохастических колебаний, описываемых странным аттрактором. Затем после прохождения верхней границы области существования стохастических колебаний наблюдаются колебания с удвоенным периодом (первая бифуркация), а при дальнейшем росте напряжения колебания становятся строго регулярными.

Фазовый портрет колебаний, снятый экспериментальным путем при значении напряжения в области существования стохастических колебаний и показанный на рис.2, представляет из себя проекцию на плоскость $(I, dI/dt)$ траектории электрохимической системы в многомерном фазовом пространстве переменных системы.

Из рисунка видно, что это фазовый портрет одного из простейших странных аттракторов с одной притягивающей областью с отталкивающей точкой внутри.

В процессе экспериментальных исследований электрической неустойчивости выявлены общие черты, которые использованы при разработке технологии прецизионного ЭХ-полирования рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих резонаторов с контролем процесса по виду “пакетов” колебаний тока, описываемых странным аттрактором, а также при разработке новых методов контроля [1]:

1. Наличие N- и S-образной вольт-амперной характеристики.
2. Возникновение колебаний тока в строго определенной области напряжения анод-катод.
3. Закономерное изменение формы и частоты осцилляций при изменении напряжения.
4. Возможность получения вольт-амперных характеристик с несколькими N-образными участками.
5. Ярко выраженный гистерезис.
6. Возможность использования системы в качестве задающего генератора.
7. Электролюминесценция.
8. Электрострикция.
9. Фотопроводимость.

При разработке процесса ЭХ-полирования сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов из ниобия нами использованы первые пять закономерностей, которые имеют наибольшую практическую значимость.

Первые три закономерности позволяют полностью контролировать процесс ЭХ-полирования сверхпроводящих ускоряющих резонаторов — поддерживать заданный режим процесса, оперативно управлять им и контролировать его по форме колебаний тока [2]. Четвертая закономерность дает возможность контролировать эмиссионную способность сверхпроводящих ускоряющих резонаторов в процессе ЭХ-обработки и изготавливать последние с наибольшей экономией материала [3,4]. Пятая закономерность позволяет задавать тот или иной темп процесса (отличающийся в десятки раз) в зависимости от предъявляемых требований к качеству обработки сверхпроводящих ускоряющих резонаторов [1].

Разработка метода прецизионной обработки рабочей поверхности сверхпроводящего резонатора

Недостатком применявшихся ранее методов ЭХ-полирования сверхпроводящих ускоряющих резонаторов на участке электрической неустойчивости является возможность возникновения брака за счет появления питтингов (язвенной коррозии)

из-за растравливания поверхности в местах каких-либо дефектов кристаллической структуры или примесей внедрения).

Исследования показали, что при ЭХ-полировании сверхпроводящих резонаторов при значении напряжения, соответствующем верхней границе области существования стохастических колебаний, никогда не наблюдалось образования питтингов [2]. Это значение можно назвать напряжением истинного электрохимического полирования.

Таким образом, в результате исследования электрической неустойчивости в ЭХ-системе при обработке ускоряющих СВЧ-резонаторов найден универсальный метод определения режима полирования, позволяющий исключить брак из-за питтингообразования при обработке резонаторов любой формы и конфигурации и при любой геометрии электролитической ванны.

Если напряжение, заданное значение которого находится в области существования странного аттрактора, подать на ЭХ-систему для полирования сверхпроводящего ниобиевого резонатора после перерыва поляризующего тока, возникают “пакеты” колебаний тока, показанные на рис.3.

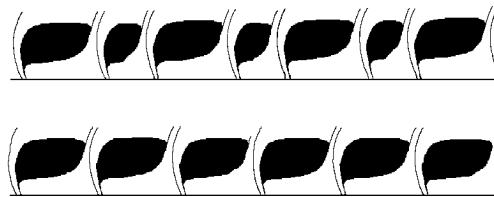


Рис. 3. Пакеты колебаний тока, полученные в области существования колебаний, описываемых странным аттрактором, при длительности перерывов поляризующего тока 45 секунд и 5 минут соответственно.

Из рисунка видно, что они имеют характерный вид пакетов осцилляций с определенной формой огибающей [1,2]. Если отключить ячейку от источника тока точно в момент окончания переходного процесса (пакета осцилляций), то после необходимой паузы при новом включении источника процесс в точности повторяется. При таком режиме ЭХ-полирования достигается наилучшее его качество. Это однозначно связано с тем, что значение напряжения находится в области существования странного аттрактора.

При изучении основных закономерностей электрической неустойчивости в электрохимической системе впервые получены и использованы в технологии сверхпроводящих ускоряющих резонаторов ВАХ с тремя N-образными участками [1]. Теоретически такое явление было предсказано В.Л. Бонч-Бруевичем в 1972 г. для полупроводников.

С практической точки зрения, это означает возможность проведения процесса ЭХ-полирования с различным съемом металла на пакет. На первом участке — сотые доли микрона, на втором — десятые, на третьем — единицы микрон.

Метод *прецизионного ЭХ-полирования резонаторов на постоянном токе* с контролем процесса по виду пакетов колебаний тока, описываемых странным аттрактором, удобно использовать для прецизионной финишной обработки резонаторов.

Для *форсированного* съема металла по толщине резонатора разработан новый оригинальный метод ЭХ-полирования на переменном напряжении [6], не имеющий аналогов за рубежом.

Несмотря на то, что первый метод обеспечивает прецизионное ЭХ-полирование ниобия и позволяет достигать наивысших результатов, он требует непрерывного ручного контроля процесса, так как выключение источника должно производиться в строго определенный момент, определяемый только визуально по ходу записи на самописец очередного пакета осцилляций. Чтобы преодолеть этот недостаток, необходима оптимизация автоматического режима полирования образцов и резонаторов из ниобия в различных кристаллографических состояниях.

Оптимизация автоматического режима обработки сверхпроводящего резонатора

Цель оптимизации — минимизировать значение коэффициента автоэлектронной эмиссии $\beta = E_{лок.}/E_{ср}$, так как автоэлектронная эмиссия оказывает наибольшее влияние на предельную величину ускоряющего поля в резонаторе. Поскольку одним из эффективных средств снижения β является ЭХ-полирование, проведена оптимизация автоматического режима ЭХ-полирования резонаторов с контролем процесса по виду пакетов колебаний тока.

Наиболее важна оптимизация автоматического режима ЭХ-полирования *сверхпроводящих ускоряющих резонаторов из листового ниобия*, наиболее часто используемого при создании современных ускорителей (CEBAF, TESLA, S-DALINAC).

На первом этапе проведена оптимизация полирования образцов ниобиевого проката методом быстрого спуска по следующим параметрам процесса: длительность включения тока, длительность перерыва тока, температура электролита и концентрация электролита. По найденному оптимизированному режиму отполированы получаша сверхпроводящего ускоряющего резонатора TESLA-shape из листового ниобия, сваренные затем электронно-лучевой сваркой по экваториальному шву. Измерения на таком резонаторе показали максимальное значение ускоряющего поля около 16 МВ/м, причем ускоряющее поле было ограничено дефектом в области сварного шва.

Далее оптимизирован автоматический режим ЭХ-полирования *сверхпроводящих резонаторов из монокристаллического ниобия*, представляющего особый интерес для фундаментальных исследований. Режимы технологического процесса, полученные в результате этого, позволили получить максимальное поле на поверхности образцов без появления эмиссионных центров до 90 МВ/м [5]. После нахождения оптимального автоматического режима ЭХ-полирования монокристаллического ниобия проведено полирование СВЧ-резонаторов из монокристаллического ниобия с кристаллографической осевой ориентацией $\langle 111 \rangle$ в данном режиме. Измерения показали максимальное значение поля на оси ускоряющего резонатора 42,8 МВ/м. Теоретическое предельное значение поля на оси резонатора из ниобия составляет 50 МВ/м.

При оптимизации автоматического режима ЭХ-полирования рабочей поверхности *ускоряющих резонаторов из крупнокристаллического ниобия* на первом этапе использованы режимы, найденные для ниобия монокристаллического, дополнительная оптимизация которых позволила получить максимальное поле на поверхности образцов без появления эмиссионных центров до 85 МВ/м. На основе этих режимов проведено ЭХ-полирование получаш ниобиевого сверхпроводящего резонатора конфигурации “Wuppertal-shape”, изготовленных из крупнокристаллического ниобия. Из отполированных таким образом получаш изготовлены сверхпроводящие резонаторы, сваренные по экваториальному шву электронно-лучевой сваркой. Измерения на полученном таким образом резонаторе показали максимальное значение ускоряющего поля около 6 МВ/м, причем ускоряющее поле, как и в предыдущем случае, было ограничено дефектом в области сварного шва.

Исследование и разработка технологии сверхпроводящих резонаторов из сплава H2B

С целью поиска новых материалов, обеспечивающих более высокие ускоряющие поля в сверхпроводящих резонаторах, исследована возможность использования в технологии сверхпроводящих резонаторов сверхпроводящего сплава H2B, разработанного в ГИРЕДМЕТе. Всего исследовались восемь партий образцов после различных видов холодной деформации и серии отжигов [7,9]. С каждой партией были проведены по три серии экспериментов по ЭХ-полированию на постоянном токе с использованием контроля процесса по виду колебаний тока, описываемых странным аттрактором, что позволило подойти к области параметров процесса, близких к оптимальным.

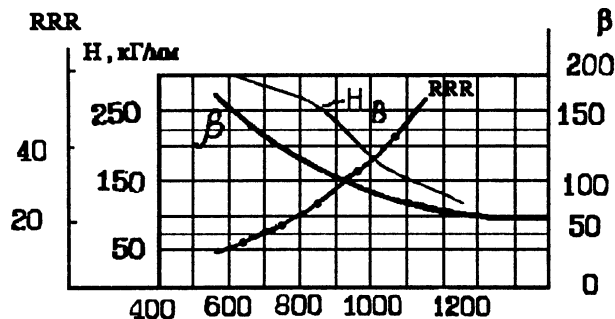


Рис. 4. Зависимость микротвердости, коэффициента автоэмиссии β и RRR от температуры отжига.

На рис.4 показаны зависимости микротвердости и коэффициента автоэмиссии β , RRR ($R_{300K}/R_{4,2K}$) полированной поверхности образцов H2B от температуры отжига.

Из рис.4 видна хорошая корреляция между микротвердостью, RRR рабочей поверхности образца H2B и его эмиссионными свойствами. Образцы из сплава H2B после ЭХ-полирования имели эмиссионные характеристики на уровне лучших ниобиевых образцов, что делает сплав H2B перспективным материалом для применения в сверхпроводящих СВЧ-резонаторах для ускорителей заряженных частиц.

Оптимизация оксиполирования сверхпроводящих резонаторов из ниобия

Проведена оптимизация параметров режима оксиполирования рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов с целью минимизировать коэффициент автоэлектронной эмиссии за счет очистки от примесей тантала и тяжелых металлов поверхностного слоя рабочей поверхности резонаторов [10,11].

Оптимизация проведена по пяти параметрам: X_1 — напряжение формирования анодной пленки после достижения ею заданной толщины (в вольтах); X_2 — плотность тока формирования пленки на начальном этапе процесса (миллиампер/см²); X_3 — концентрация раствора электролита относительно однонормальной; X_4 — экспозиция при напряжении формирования (в минутах); X_5 — температура электролита, С (градусы Цельсия).

Задача оптимизации оксиполирования ниобия была таким образом сведена к отысканию такого сочетания параметров X_1, \dots, X_5 , при котором эмиссионная способность поверхности образцов была бы минимальна.

На первых двух этапах для установления центра области экспериментирования применялся метод быстрого спуска по всем переменным X_1, \dots, X_5 .

После второго этапа проведена оптимизация по схеме второго порядка, в качестве которой выбран план Хартли, требующий всего 27 наблюдений. По плану Хартли получена система нормальных уравнений, которая была решена методом преобразования матрицы коэффициентов к треугольному виду. Решение привело к следующей модели процесса (в приведенных переменных):

$$\begin{aligned} \beta/100 = & -1,62X_1 - 0,36X_2 + 0,06X_3 - 2,91X_4 + 4,98X_5 + 0,17X_1^2 + 0,03X_2^2 + \\ & + 0,29X_3^2 + 0,79X_4^2 - 0,88X_5^2 - 0,23X_1X_2 - 0,39X_1X_3 + 0,14X_1X_4 - \\ & - 0,19X_1X_5 - 0,36X_2X_3 + 0,08X_2X_4 + 0,29X_2X_5 + 0,10X_3X_4 + \\ & + 0,46X_3X_5 - 0,17X_4X_5 + 1,20 \end{aligned}$$

В области поиска был найден локальный минимум функции $\beta (X_1, \dots, X_5)$ с координатами (9,2; 8,5; 55; -2,0).

Оксиполирование сверхпроводящих резонаторов в найденном оптимизированном режиме позволило получить значения коэффициента автоэлектронной эмиссии β на рабочей поверхности резонатора от 34 до 47 в зависимости от качества исходного ниобия марки НРБ-1. Как известно, из исследований других лабораторий [5], такие значения β обеспечивают ускоряющие поля в резонаторах TESLA-shape на уровне 20-24 МВ/м.

Разработка метода экспресс-контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов

При исследовании электрической неустойчивости в ЭХ-системе со сверхпроводящим СВЧ-резонатором экспериментально установлено [1], что вольт-амперная кривая обладает ярко выраженным гистерезисом. Это явление легло в основу разработки метода экспресс-контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов.

Соотношение площадей петель гистерезиса для цилиндрических резонаторов из монокристаллического ниобия с различными осевыми ориентациями таково [4]:

$$\langle 111 \rangle : \langle 100 \rangle : \langle 110 \rangle = 1 : 2 : 10.$$

В то же время интегральная работа выхода электронов (эВ) с рабочей поверхности таких резонаторов соотносится, как [4]

$$\langle 111 \rangle : \langle 100 \rangle : \langle 110 \rangle = 4,461 : 4,141 : 4,088.$$

Таким образом, существует хорошая корреляция площади петли гистерезиса и интегральной работы выхода электронов. Это свойство петли гистерезиса было использовано для разработки способа экспресс-контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности ускоряющих резонаторов [4].

Обычно для определения эмиссионных свойств рабочей поверхности ускоряющего резонатора изготавливают образцы-свидетели из того же материала (слитка, листа). Этот образец проходит такой же цикл технологической обработки, что и ускоряющий резонатор. После этого в высоковакуумной камере проводят определение его эмиссионных свойств. Часто эти исследования проводят на самом резонаторе после всех видов обработки.

Недостатком этих методов контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности резонаторов является невозможность изготовления образца-свидетеля с ориентацией кристаллов, соответствующей рабочей поверхности резонатора, а также вероятность отбраковки исследуемого резонатора после длительного цикла технологической обработки.

Сверхпроводящие резонаторы считались прошедшими контроль, если отношение площади петли гистерезиса к рабочей поверхности резонатора не превышает заданной величины 200 мВт/см^2 .

Таким образом, на базе изучения гистерезисных явлений в ЭХ-системе с целью уменьшения затрат времени для изготовления сверхпроводящего резонатора с необходимыми эмиссионными свойствами разработан метод экспресс-контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих резонаторов, которые определяются ее кристаллографическим состоянием.

Описанный метод был использован для нахождения оптимального положения рабочего объема резонатора в конкретных слитках крупнозернистого ниобия [3]. При этом поступали следующим образом: брался цилиндрический слиток достаточной длины, и в нем вытачивался необходимый объем тоже цилиндрической формы, после чего производилась диагностика его эмиссионных свойств данным методом. Если результаты диагностики были неудовлетворительными, то резонатор перетачивался из того же слитка таким образом, что рабочий объем сдвигался по оси вглубь слитка с определенным шагом, после чего вновь производилась диагностика, и в случае неудовлетворительного результата процесс продолжался аналогичным образом, пока не удавалось получить резонатор, пригодный по своим эмиссионным свойствам.

Эксперименты показали, что таким образом удается получить достаточно качественный резонатор практически из каждого слитка крупнозернистого ниобия, чем достигается весьма значительная экономия дорогостоящего материала при минимальных затратах времени.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

1. В Отраслевой проблемной лаборатории технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов (ОПЛ ТИСПР) Минатома России при ИФВЭ при непосредственном участии автора диссертации разработан комплекс экспериментально-технологического оборудования для изучения бифуркационных и гистерезисных явлений, а также для обработки рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов СМ-диапазона.

2. Исследованы явления электрической неустойчивости в системах с отрицательным дифференциальным сопротивлением, а также бифуркационные явления, на основе которых разработан “Способ обработки сверхпроводящего резонатора” с использованием прецизионного электрохимического полирования рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов с контролем процесса по виду пакетов колебаний тока, описываемых странным аттрактором, что позволило провести автоматизацию процесса (Авторское свидетельство № 1410790, 1985 г.).

3. С целью подавления электронной эмиссии для увеличения ускоряющих полей изучено влияние кристаллографической ориентации рабочей поверхности сверхпроводника на эмиссионные свойства, на основе чего разработан “Способ контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности сверхпроводящих ускоряющих резонаторов и СВЧ-структур для ускорителей заряженных частиц” (Авторское свидетельство № 137325, 1985 г.).

4. Исследованы гистерезисные явления. На основе полученной корреляции между интегральной работой выхода электронов с рабочей поверхности сверхпроводящих резонаторов и образцов с площадью петель гистерезиса разработан экономичный “Способ изготовления сверхпроводящих резонаторов” (Авторское свидетельство № 1552948, 1989 г.).

5. С целью снижения эмиссионных эффектов в сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторах совместно с фирмой ГИРЕДМЕТ (г.Москва) исследована возможность использования сплава H2B. Получена хорошая корреляция между коэффициентом автоэлектронной эмиссии, микротвердостью рабочей поверхности и RRR исходного материала при различных температурах отжига в высоком вакууме.

6. С использованием методов математического планирования эксперимента проведена оптимизация процесса оксиполирования ниобиевых сверхпроводящих ускоряющих резонаторов, позволяющего очистить поверхностный слой сверхпроводника от примесей тяжелых элементов.

7. Рассмотренные в диссертации технологии и методы используются в совместных работах в рамках международного научно-технического сотрудничества с TJNAF (США), Вуппертальским университетом (Германия) и Корнельским университетом (США), а также при создании демонстрационного линейного ускорителя электронов (ОИЯИ, г.Дубна) и разработке сверхпроводящего ускорителя электронов, известного за рубежом как SVAAP (сверхпроводящий вертикальный ускоритель для прикладных целей), проект которого разрабатывается совместно сотрудниками ОПЛ ТИСПР при ГНЦ ИФВЭ и кафедрой “Электрофизические установки” МИФИ.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ефремов В.М., Погорелов Ю.С., Севрюкова Л.М. Электрическая неустойчивость при анодном растворении металлов. 1. Явление электрической неустойчивости на постоянном токе. — Препринт ИФВЭ 85-191, Серпухов, 1985.
2. Севрюкова Л.М., Ефремов В.М. Способ обработки сверхпроводящего резонатора. — Авторское свидетельство № 1410790, 1985. БИ № 46, 1990, с.223.
3. Севрюкова Л.М., Ефремов В.М., Баженов А.В., Масалов В.Л., Ри Т.Ю. Способ изготовления сверхпроводящего резонатора. — Авторское свидетельство № 1552948, 1989. БИ № 2, 1991, с.214.
4. Севрюкова Л.М., Ефремов В.М. Способ контроля эмиссионных свойств рабочей поверхности сверхпроводящего резонатора. Авторское свидетельство № 137325, 1985. БИ № 32, 1991, с.273.
5. Berks M., Gladun A., Kurakin V., Mueller G., Piel H., Efremov V.M., Sevryukova L.M. et al. Advance in Microwave Properties and Applications of Superconductors at the University of Wuppertal. — In: Proc. of the 5-th Workshop on RF Superconductivity. — DESY, Hamburg, Germany, 1991, v.1, p.32.
6. Efremov V.M., Sevryukova L.M., Hein M., Ponto L. Improved method for electrochemical polishing of niobium superconducting cavities. — In: Proc. of the 5-th Workshop on RF Superconductivity. — DESY, Hamburg, Germany, 1991, v.1, p.433-456.
7. Ефремов В.М., Пестерев С.М., Севрюкова Л.М., Киселев В.А., Пахомов В.Я. Эмиссионные свойства новых материалов для сверхпроводящих резонаторов. Сплав H2B. — В сб.: Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, с.151-157.
8. Гадецкий В.О., Ефремов В.М., Севрюкова Л.М., Филиппов С.С. Использование электрофизических явлений в технологии сверхпроводящих резонаторов. Бифуркации. Странный аттрактор. Гистерезис. — В сб.: Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994, с.158-160.
9. Ageev A.I., Efremov V.M., Kiselev V.A., Pakhomov V.Y., Pesterev S.M., Sevtyukova L.M. Field emission properties of the alloy H2B. — In: Proc. of

- the 7-th Workshop on RF Superconductivity. — Gif sur Yvette, France, 1995, v.1, p.389-395.
10. Efremov V.M., Matveeva O.V., Pesterev S.M., Sevryukova L.M., Zarucheisky E.V., Zvonarev I.A. Field emission properties of the Nb with thin oxide films. — In: Proc. of the 5-th European vacuum conference, Salamanca, Spain, 1996, p.45.
 11. Ефремов В.М., Звонарев И.А., Матвеева О.В., Пестерев С.М., Севрюкова Л.М. Влияние специальных окисных покрытий на эмиссионные свойства ускоряющего резонатора. — В сб.: Труды XV международной конференции по ускорителям заряженных частиц. — Протвино, 1996, с.167-170.
 12. Efremov V.M., Sevryukova L.M., Suzdalev V.I. The study of electrochemical polished superconducting cavity copper shells with the process control according to the current oscillations packets kind. — In: Proc. of the 8-th Workshop on RF Superconductivity. — Abano Terme, Italy, 1997, Th.43.

Рукопись поступила 12 апреля 1999 г.

В.М.Ефремов

Экспериментальное изучение электрической неустойчивости и ее применение в технологии сверхпроводящих резонаторов для ускорителей заряженных частиц.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 7.04.99. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1,62. Уч.-изд.л. 1,24. Тираж 100. Заказ 82. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

