

На правах рукописи

ВОЛКОВ *Владимир Николаевич*

ПРОТОТИП ЭЛЕКТРОННОГО ФОТОКАТОДНОГО
ВЧ ИНЖЕКТОРА СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ
РЕЗОНАТОРОМ

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

НОВОСИБИРСК – 2007

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Петров Виктор Михайлович – кандидат технических наук,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера,
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Винокуров Николай Александрович – кандидат физико-математических наук,
профессор, Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера, СО РАН, г. Новосибирск.

Черноусов Юрий Дмитриевич – кандидат технических наук,
Институт химической кинетики и горения,
СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2007 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И.Будкера СО РАН.

Автореферат разослан: «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Для создания излучения высокой мощности и высокой яркости в ЛСЭ и в источниках СИ, а также для других применений, требуются интенсивные релятивистские электронные пучки с короткими сгустками, обладающими малым эмиттансом и большим зарядом. Современные возможности позволяют получать сгустки с эмиттансом порядка 1π мм мрад и зарядом до 1 нКл с длительностью сгустков ~ 20 псек.

В настоящее время наиболее интенсивные и высококачественные пучки получают в ускорительных комплексах, состоящих из ВЧ фотопушки и из сверхпроводящего линака. До сих пор фотопушки выполнялись с нормально проводящими ускоряющими резонаторами. Для того, чтобы получить малый эмиттанс, в этих пушках применяется фокусировка (помощью магнитных полей соленоидов и большого темпа ускорения (порядка 20-30 МэВ/м)). Фотопушки с теплыми резонаторами могут работать только в импульсном режиме.

Применение сверхпроводящего резонатора в фотопушке позволит работать в непрерывном режиме. Применение новых технологий с использованием сверхпроводящих резонаторов обеспечит получение пучков с нормализованным эмиттансом 1π мм мрад в сгустках с зарядом в два раза большим (2 нКл). Современные лазерные системы, которые применяются в фотопушках, могут обеспечить частоту повторения этих сгустков до 100 МГц, и ток пучка электронов до ~ 200 мА.

Цель работы

- проведение расчетных и инженерных исследований с целью создания ВЧ пушки со сверхпроводящим резонатором, обеспечивающей получение пучков с нормализованным эмиттансом 1π мм мрад в сгустках с зарядом больше 2 нКл и с длительностью ~ 20 псек. Пучок должен быть согласован с линейным ускорителем (бустером) расположенным не ближе чем 0.5 м после пушки. Резонансная частота должна быть 1300 МГц. Размеры резонатора и форма должны быть адаптированы к имеющемуся технологическому и испытательному оборудованию в DESY. Фотокатод должен быть заменяемым. Катод должен заменяться в резонаторе, находящемся при температуре 4.2 К в условиях высокого вакуума. Для этого должен использоваться стандартный магнитный манипулятор.
- разработка и экспериментальное исследование прототипа (экспериментального образца) ВЧ пушки с одноячейным сверхпроводящим резонатором. Получение высокой добротности резонатора до 10^{10} . Тренировка резонатора возбуждением ускоряющего ВЧ поля в резонаторе с максимальным ускоряющим

градиентом до 12 – 25 МВ/м. Проведение испытательных работ по замене фотокатода, находящемся при температуре 4.2 К в условиях высокого вакуума при использовании стандартного магнитного манипулятора. Получение в сверхпроводящем резонаторе фототока до 100 мкА с Теллурид-Цезиевого фотокатода, приготовленного в препаративной камере и возбуждаемого импульсами лазера с длительностью 5 псек и частотой 26 МГц. Исследование влияния работы фотокатода на характеристики сверхпроводящего резонатора.

Научная новизна

1. Впервые в мире исследован, разработан и создан сверхпроводящий узел ВЧ фотопушки (см. рис. 1), состоящий из ускоряющего резонатора, фильтра пробки и соединяющей их сверхпроводящей трубки (11).

2. Новое применение известного способа деформации резонаторов для настройки их резонансной частоты, в конструкции резонатора фильтра пробки привело к возможности регулировать углубление катода в ускоряющем резонаторе и настраивать тем самым электрическую ВЧ фокусировку пучка.

3. Впервые в мире разработана и исследована конструкция катодного узла (см. рис.2), размещенного в вакуумном корпусе (4) и содержащего узел катодного стержня (6,21,24), позволяющая заменять стержень с фотокатодом без развакуумирования системы при температуре 4.2 К.

4. В диссертационной работе впервые в мире разработано и применено охлаждение жидким азотом катодного узла, расположенного в сверхпроводящем резонаторе.

5. Обосновано новое применение в катодном узле материалов с разным коэффициентами теплового расширения, позволяющие при замене катодного стержня использовать разогрев катодного узла газообразным азотом для уменьшения давления между стержнем и теплообменником.

6. Впервые в практике работы ВЧ пушек была разработана и применена в конструкции катодного узла электрическая изоляция катода от резонатора по постоянному току.

7. Впервые в практике работы ВЧ пушек была разработана и применена в конструкции катодного узла тепловая изоляция между сверхпроводящим узлом и катодным узлом с помощью вакуумного зазора и тонкостенных нержавеющей труб.

8. Новая разработка и применение в конструкции фотопушки электрического контакта по ВЧ току между фотокатодом и ускоряющим сверхпроводящим резонатором с помощью отрезка коаксиального волновода с малым волновым сопротивлением, внутренним проводником в котором является катодный стержень, а наружным – трубка сверхпроводящего узла ВЧ пушки (11, рис.1).

9. Первое в мире обоснование, разработка и применение коаксиального фильтра, встроенного в катодный узел. Коаксиальный фильтр и сверхпроводящий резонатор фильтра-пробки образуют заградительный фильтр, который предотвращает излучение ВЧ мощности из резонатора при деформировании фильтра пробки в пределах расстояний между его стенками $7.5 \div 8.5$ мм (см. рис.3, размер Gap), и при любых электрических характеристиках цепей внешнего оборудования, подключаемых к катодному узлу. Излученная ВЧ мощность из резонатора через заградительный фильтр не превышает ВЧ мощность, рассеянную в сверхпроводящих стенках резонатора.

10. В диссертационной работе обосновано, исследовано и разработано в ВЧ фотопушке новое явление электрической ВЧ фокусировки для компенсации роста эмиттанса пучка. Рассчитана оптимальная величина углубления катода (2 мм), обеспечивающая получение минимального эмиттанса пучка при компенсации.

11. Впервые в мире для ВЧ пушек исследовано и разработано применение вогнутой сферической формы торца катодного стержня с фотокатодом, вдвое увеличивающую эффективность компенсации роста эмиттанса (эмиттанс 1π мм мрад для 2 нКл, вместо 1 нКл).

12. В диссертационной работе обосновано, исследовано и разработано в ВЧ фотопушке новое явление магнитной ВЧ фокусировки с применением ТЕ моды для компенсации роста эмиттанса пучка. Рассчитана оптимальная величина индукции магнитного ВЧ поля ТЕ моды (поля на оси: $B_{\max} = 0.3$ Т для ускоряющего поля с $E_{\max} = 50$ МВ/м), обеспечивающая получение минимального эмиттанса пучка – 1π мм мрад.

13. Впервые в мире показано, что фокусирующая сила магнитной ВЧ линзы такая же, как у соленоида, с тем же распределением индукции поля вдоль оси, какую имеют действующие значения магнитного поля ТЕ моды.

14. Впервые в мире исследован случай возбуждения ТЕ и ТМ мод в одном резонаторе. ТЕ мода возбуждается на частоте не кратной частоте ускоряющей моды. В этом случае разные сгустки пучка попадают в неодинаковые фазы ТЕ моды. Из-за этого эмиттансы сгустков получаются неодинаковые, то есть в пучке появляется пульсация эмиттансов сгустков. Величина пульсации эмиттансов сгустков экспоненциально уменьшается с ростом частоты ТЕ моды. Ускоряющий резонатор имеет ТЕ₀₂₁ моду с частотой $f_{TE021} \sim 4285$ МГц. Если применить эту моду для компенсации эмиттанса, то пульсации эмиттансов сгустков будут меньше 3%. ТЕ₀₂₁ мода возбуждается от отдельного генератора, частота которого поддерживается равной резонансной частоте ТЕ₀₂₁ моды.

15. Впервые в мире исследован случай, когда даже при возбуждении ТЕ моды на частоте не кратной частоте повторения сгустков, пульсации эмиттанса получаются нулевые. Зависимость величины пульсаций от частоты повторения имеет много максимумов и минимумов. Однако,

огибающая пульсаций экспоненциально убывает с ростом частоты. Можно сконструировать резонатор, имеющий такую резонансную частоту ТЕ моды, при которой пульсации эмиттанса нулевые.

16. В диссертации по-новому обоснован выбор ТЕ моды для получения необходимой фокусировки. Поле моды ТЕ на оси резонатора должно быть $V_{\max} \sim 0.3 \text{ Т}$ (для ускоряющего поля с $E_{\max} = 50 \text{ МВ/м}$). При этом индукция поля на поверхности, в суперпозиции с полем ускоряющей моды, не должна превышать $V_{\text{peak}} \sim 0.2 \text{ Т}$. Этому условию отвечает мода TE_{021} (см. рис.9).

17. В диссертации определены новые условия согласования пучка фотопушки с линаком, при которых фотопушку и линак можно расположить в разных криостатах. Исследования показали, что это условие выполняется, если фотопушка имеет 3.5 ускоряющих ячейки и $E > 8 \text{ МэВ}$. В этом случае кроссовер располагается на расстоянии от фотопушки $> 0.5 \text{ м}$, а для получения малого эмиттанса, начало линака должно располагаться в кроссовере.

18. В диссертации проведены новые аналитические исследования эффекта компенсации роста эмиттанса на основе методов электронной оптики. Исследования прояснили закономерности в результатах численного моделирования динамики пучка в ВЧ пушке. В частности, показано уменьшение эмиттанса и выравнивание плотности заряда в сгустках при ВЧ фокусировке.

Практическая ценность

Основная область применения: – инжекторы электронов для линаков ЛСЭ, источников СИ. Инжекторы электронных линаков для установок с электронным охлаждением протонов и для других установок. Также источники релятивистского электронного пучка для промышленного применения и прикладных исследований.

Ниже перечислены некоторые научные центры и установки, в которых проектируется применение ВЧ фотопушек со сверхпроводящими резонаторами, в которых используются результаты, полученные в диссертационной работе (см. список литературы из диссертации):

- FZD [40] – инжектор для сверхпроводящего линака ELBE для ЛСЭ. Сгустки должны иметь заряд от 77 пКл до 1 нКл с нормализованным эмиттансом меньше $1 \pi \text{ мм мрад}$.
- Daresbury, Cornell и др. [72] – инжектор для сверхпроводящего микротрона-рекуператора ЛСЭ. Средний ток электронного пучка 100 мА с нормализованным эмиттансом меньше $1 \pi \text{ мм мрад}$.
- BESSY-FEL [73, 74] – инжектор для сверхпроводящего линака ЛСЭ. Сгустки должны иметь заряд от 2.5 нКл с нормализованным эмиттансом меньше $1.5 \pi \text{ мм мрад}$.

- BNL [20, 75] – инжектор для проекта электронного охлаждения RHIC. Сгустки должны иметь заряд от 5 нКл с нормализованным эмиттансом меньше 5π мм мрад.
- AES [76, 77] – инжектор для микротрона-рекуператора ЛСЭ. Сгустки должны иметь заряд от 10 нКл с нормализованным эмиттансом меньше 10π мм мрад.
- SASE-FEL [78, 79]. Сгустки должны иметь заряд от 1 нКл с нормализованным эмиттансом меньше 1π мм мрад.
- PKU-FEL [80] – Сгустки должны иметь заряд до 100 пКл с нормализованным эмиттансом меньше 2π мм мрад.
- CEBAF [81].

Публикации и апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, изложены в 12 публикациях, приведенных в списке литературы. Основные результаты работы докладывались на ускорительных конференциях (PAC, EPAC, APAC, FEL) и публиковались в рецензируемых журналах (Nucl. Instr. and Meth., Physical Review ST AB). Всего по теме диссертации опубликовано 30 работ, 4 из которых опубликованы в рецензируемых журналах [2, 3, 6, 8], издан препринт [1] (см. список литературы, стр.15-16).

На защиту выносятся

1) Конструкция сверхпроводящего узла ВЧ пушки, состоящего из ускоряющего резонатора и резонатора фильтра пробки и связывающей их трубки. Ускоряющий резонатор обеспечивает необходимый темп ускорения. Фильтр пробка предотвращает проникновение ВЧ мощности в катодный узел и во внешние цепи. Трубка используется как внешний проводник низкоомной коаксиальной линии для обеспечения ВЧ контакта катода с резонатором. За счет продольных деформаций резонатора фильтра пробки изменяется углубление катода в ускоряющем резонаторе и обеспечивается настройка электрической ВЧ фокусировки в фотопушке.

2) Конструкция катодного узла, который обеспечивает замену катода без развакуумирования системы. Обеспечивает необходимый теплоотвод от катодного стержня к кулеру, охлаждаемому жидким азотом. При этом температура фотокатода (самая горячая область катодного узла) превышает температуру жидкого азота на несколько градусов.

3) Принцип работы заградительного фильтра, состоящего из фильтра пробки (сверхпроводящий резонатор) и коаксиального фильтра. Совместная работа коаксиального фильтра и фильтра пробки, деформируемого для настройки ВЧ фокусировки пучка, исключает влияние внешних электрических цепей при любых электрических параметрах этих цепей.

4) Способы компенсации эмиттанса. Из-за того, что длительность электронных сгустков соизмерима с периодом ускоряющего высокочастотного поля и электронный сгусток имеет значительный заряд, то

поперечный эмиттанс растёт при удалении от катода, если не применять специальных мер. Для того, чтобы скомпенсировать рост эмиттанса, вызванного этими причинами, в которых все действующие на пучок поперечные силы линейны по радиусу, автором предложен способ компенсации роста эмиттанса с помощью электрической и магнитной ВЧ фокусировки.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 81 наименование. Диссертация содержит 121 страницу машинописного текста, в том числе 50 рисунков и графиков, 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризован современный этап развития фотокатодных ВЧ инжекторов, обоснована актуальность ВЧ инжекторов со сверхпроводящими резонаторами, сформулирована цель работы, кратко изложены основные темы диссертации.

В первой главе дается описание сверхпроводящего узла ВЧ пушки.

Сверхпроводящий узел ВЧ пушки (см. рис.1) состоит из ускоряющего (4, 5) резонатора, резонатора фильтра пробки (2, 3) и связывающей их трубки (11). Трубка имеет внутренний диаметр $\varnothing 12$ мм. В эту трубку коаксиально вставлен катодный медный стержень диаметром $\varnothing 10$ мм. На торцевую поверхность катодного стержня коаксиально нанесен фотокатод. Диаметр фотокатода $\sim \varnothing 3$ мм.

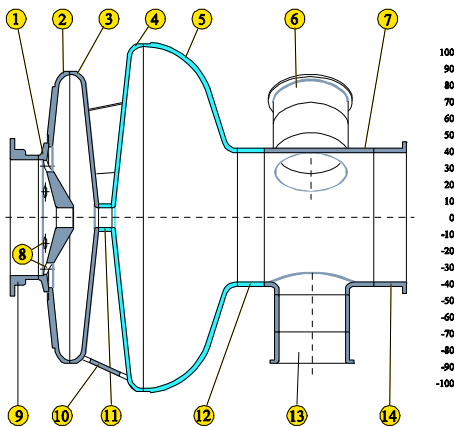


Рис. 1. Сверхпроводящий узел: 1 - бобышка, 2-5 - стенки, 6,7,9,12-14 - патрубki, 11 - трубка, 8 - отверстия (6 шт.).

Резонатор фильтра пробки расположен между нормально проводящим коаксиальным фильтром, встроенным в катодный узел, и сверхпроводящим резонатором ВЧ пушки. Изменяя углубление катода в резонаторе ВЧ пушки, можно настраивать электрическую ВЧ фокусировку пучка. Эта регулировка производится сдавливанием или растяжением резонатора фильтра пробки в пределах ± 0.5 мм.

Детали сверхпроводящего резонатора для ВЧ пушки изготавливались на экспериментальном производстве ИЯФ. Частично использовались стандартные детали,

изготовленные фирмой ACCEL (см. рис.1 – патрубки в правой части узла и правая чашка резонатора). Стенки резонатора делались из листового ниобия штамповкой. Закругления на краях чашек делались на токарном станке обкаткой краев роликом на специальной цилиндрической матрице по форме повторяющей геометрию соответствующей части резонатора. Трубка выточена из заготовки.

Для сварки ниобиевых частей резонатора использовалась установка вакуумной электронно-лучевой сварки [1], созданная в институте для сварки ниобиевых резонаторов в 1992 году. Вакуум до 10^{-4} Па с низким парциальным давлением водорода, обеспечивался в установке при помощи диодно-испарительного насоса НМДИ-16/40. Этот насос был разработан в ИЯФ.

В главе 2 дается описание катодного узла и заградительного фильтра.

Катодный узел расположен в цилиндрическом корпусе (4, см. рис.2), охлаждаемом жидким гелием при $T = 2$ К. Чтобы уменьшить теплоприток к деталям ВЧ пушки, охлаждаемых жидким гелием, катодный узел со стержнем должны быть изолированы от них вакуумным промежутком.

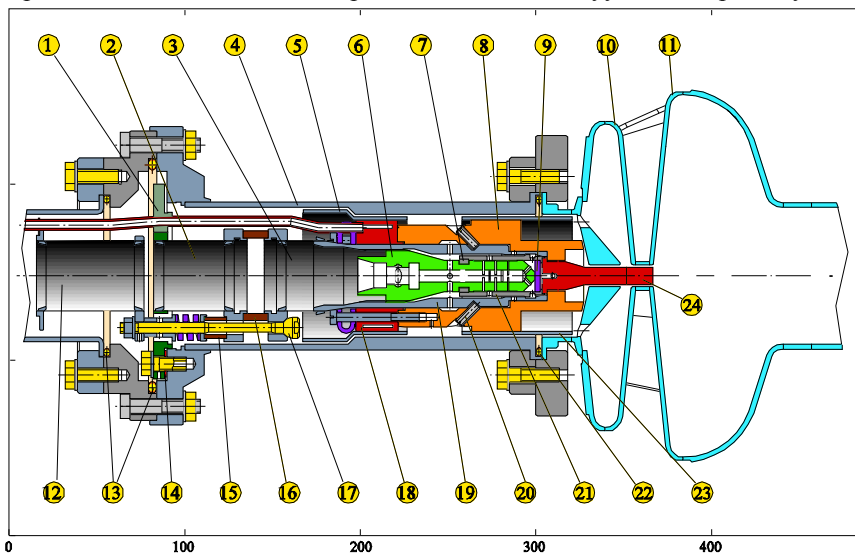


Рис. 2. Фотокатодная ВЧ пушка со сверхпроводящим резонатором: 1 - фланец крепления катодного узла к корпусу (4); 2, 3 - тонкостенные трубы из нержавеющей стали; 4 - корпус; 5 - внутренний проводник коаксиальной линии из нержавеющей стали; 6 - винт из титана; 7 - фиксирующие полукольца; 8 - теплообменник; 9 - диск; 10 - резонатор заграждающего фильтра; 11 - ускоряющий резонатор; 12 - тонкостенная труба; 13, 22 - вакуумные уплотнения; 14 - регулировочные шайбы; 15, 16 - керамические изоляторы; 17 - винты; 18 - кулер с каналом и трубками подачи жидкого азота; 19 - патрон с внутренней резьбой; 20 - винты; 21 - стаканчик с припаянным к нему стержнем (24); 23 - внутренний проводник коаксиальной линии из нержавеющей стали; 24 - катодный стержень.

При этом стержень должен иметь хороший высокочастотный электрический контакт с резонатором. Контакт по постоянному току с резонатором должен отсутствовать. Это, во-первых, дает возможность измерения тока пучка. Во-вторых, позволяет бороться с возможным мультитакторным разрядом в 1 мм промежутке около стержня. Такой разряд подавляется, когда на стержень подключено напряжение в несколько киловольт относительно корпуса и сверхпроводящего узла.

Катодный стержень должен интенсивно охлаждаться, так как на нем рассеивается ВЧ мощность до 30 Вт с максимальными удельными потерями на фотокатоде $80 \div 100$ Вт/см². Температура катодного узла должна быть достаточно низкой, чтобы поток мощности теплового излучения с катода на стенки сверхпроводящего резонатора был невелик. Для этого теплообменник с закрепленным на нем катодным стержнем, охлаждаются жидким азотом.

Так как катод заменяемый, то наряду с тем, что фотокатодный стержень должен сильно прижиматься к теплообменнику во время работы, он должен легко отсоединяться для перемещения в препаративную камеру. Во время отсоединения от охлаждающего теплообменника и во время постановки катода на место, давление между стержнем и теплообменником должно быть невелико. Это давление ограничено максимальным усилием, которое можно создать с помощью стандартного магнитного (вакуумного) манипулятора при вкручивании стержня в теплообменник. Кроме того, усилие должно быть ограничено из-за наличия тонкостенных деталей тепловой развязки между резонатором и корпусом криостата, а также деталей (2, 3) в катодном узле.

Для выполнения этих условий, в катодном узле детали выполнены из материалов с разными температурными коэффициентами расширения. Ослабление давления между катодным стержнем и теплообменником происходит при разогреве катодного узла газообразным азотом. После разогрева катодного узла, манипулятором можно вынуть отработавший катод и заменить его новым катодом. После постановки катода, катодный узел вновь замораживается жидким азотом, тогда давление вновь возрастает. Максимальное давление между катодным стержнем и теплообменником ограничено применением пружинящих элементов в конструкции катодного узла.

Хороший ВЧ контакт стержня с резонатором обеспечивается в конструкции, состоящей из коаксиальной линии с низким волновым сопротивлением, внутренним проводником в которой является катодный стержень. Наружным проводником является трубка, связывающая осуществляющий резонатор и резонатор фильтра пробки.

Заградительный фильтр предотвращает проникновение ВЧ мощности из резонатора во внешние цепи. Заградительный фильтр представляет собой последовательно включенный сверхпроводящий фильтр пробку и нормально проводящий коаксиальный фильтр, встроенный в катодный узел (см. рис. 3).

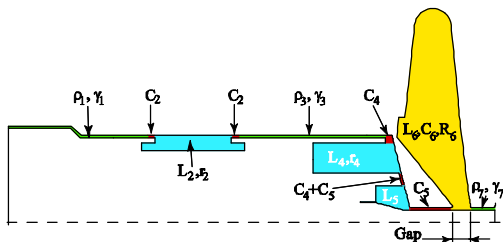


Рис. 3. Заградительный фильтр.

Коаксиальный фильтр, состоит из последовательности четверть-волновых отрезков коаксиального фидера с малым и большим волновыми сопротивлениями (см. рис.3, элементы с индексами 1÷5). Собственная резонансная частота фильтра пробки равна рабочей частоте 1300 МГц, если его зазор равен $Gap \sim 8$ мм. Однако для настройки ВЧ фокусировки этот зазор должен изменяться на ± 0.5 мм. Расчеты показали, что если коаксиальный фильтр будет иметь 5 последовательно включенных отрезков коаксиальной линии с чередующимися волновыми сопротивлениями, то излучаемая мощность во внешние цепи не будет превышать мощность потерь в стенках сверхпроводящего ускоряющего резонатора.

Для расчетов использовалась эквивалентная схема (см. рис.4). Предполагалось, что внешняя нагрузка (Z_{Load}) может принимать любые значения, соответствующие комплексной полуплоскости сопротивлений с положительными активными сопротивлениями. Сопротивление нагрузки для фильтра пробки определяется конформным преобразованием этой полуплоскости через параметры коаксиального фильтра. Полуплоскость нагрузок коаксиального фильтра преобразуется в круг на плоскости нагрузок фильтра пробки (см. рис.5). Диаметр этого круга лежит на положительной части действительной оси. Максимальное значение активного сопротивления в этой области нагрузок фильтра пробки – 2.4 Ом.

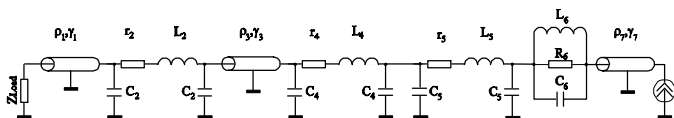


Рис. 4. Эквивалентная схема заградительного фильтра.

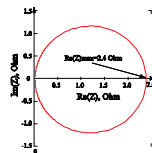


Рис. 5.

Глава 3 посвящена испытаниям прототипа сверхпроводящей ВЧ пушки.

Испытания прототипа сверхпроводящей ВЧ пушки проводились в DESY и в Росендорфе. Перерыв между этими испытаниями был 2 года. Резонатор в это время хранился под вакуумом.

В DESY резонатор ВЧ пушки испытывался на стенде, предназначенном для испытания 9-ти ячеечных структур типа TESLA. Испытания проводились в вертикальном криостате при $T = 2$ К. В этих испытаниях,

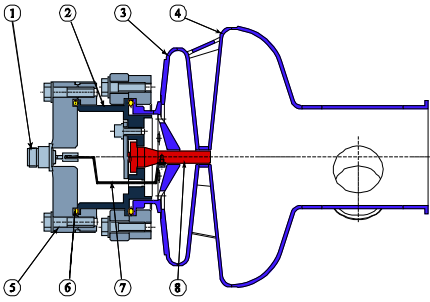


Рис. 6. Крепление катодного стержня.

$Q=10^{10}$. Расчеты показывают, что поверхностное сопротивление в резонаторе фотопушки близко по величине к сопротивлению в резонаторах TESLA. Из-за своей формы, одиночные резонаторы TESLA имеют добротность $2 \cdot 10^{10}$.

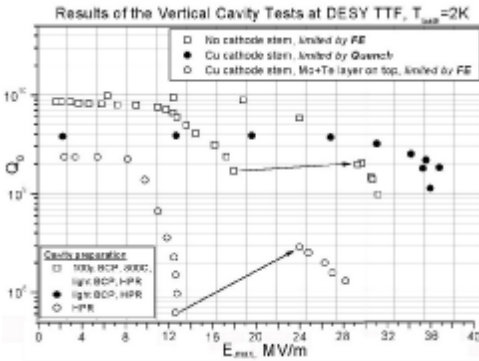


Рис. 7. Результаты испытаний в DESY, $T=2$ К.

$V_{\max} = 0.091$ Т. В 9-ти ячейчных резонаторах TESLA максимальные поля $E_{\max} = 60$ МВ/м, $V_{\max} = 0.12$ Т; в одиночных резонаторах $V_{\max} = 0.2$ Т. Эти испытания подтвердили, что фильтр пробка хорошо предотвращает проникновение ВЧ мощности из резонатора. В третьем испытании резонатора со стержнем, имеющим слой теллура на молибденовой подложке, была измерена проводимость теллура при температуре 2 К. Она составила $\sigma_{Te} = 0.007 \pm 0.01$ 1/Ом·м. Пробоя в резонаторе не было. Максимальное поле в резонаторе ($E_{\max} = 29$ МВ/м) ограничивалось из-за больших токов автоэмиссии из теллура, в условиях ограниченной мощности ВЧ генератора ($P < 100$ Вт) и при его недостаточной согласованной связи с резонатором. В DESY аналогичные фотокатоды в теплых ВЧ пушках, имея меньшие токи автоэмиссии, работают при $E_{\max} = 50 \pm 60$ МВ/м.

вместо катодного узла, использовался узел, показанный на рис. 6. Было проведено три испытания: без фотокатодного медного стержня, с чистым медным стержнем без фото-слоя и с нанесенным на его торце слоем теллура на молибденовой подложке, имитирующим фотокатод (см. рис. 7).

В первом испытании без стержня была получена собственная добротность на малом уровне ВЧ мощности

Максимальное поле на оси в резонаторе ($E_{\max} = 31$ МВ/м) ограничивалось тепловым пробоем из-за автоэмиссионных токов с края отверстия для стержня.

Во втором испытании, из-за уменьшения напряженности поля на краю отверстия со вставленным стержнем, максимальное поле в резонаторе $E_{\max} = 38$ МВ/м, ограничение определялось тепловым пробоем в максимуме магнитного поля на экваторе резонатора

Испытания ВЧ фотопушки при работе с пучком проводились в исследовательском центре Дрездена (FZD). В ускорительной лаборатории FZD специально для этого был создан стенд. В состав испытательного стенда входил криогенный стенд с горизонтальным криостатом, лазерная система, система клистронного ВЧ генератора с подводющим волноводом, система диагностики электронного пучка и пульт с автоматизированной системой управления. Для снабжения криостата жидким гелием использовалась существующая криогенная система сверхпроводящего ускорителя ELBE. Эти эксперименты проводились при температуре 4.2 К. Длительность электронных сгустков, эмитированных с фотокатода, была 5 псек. Частота повторения – 26 МГц, заряд сгустков – $1.5 \div 20$ пКл, средний ток – $10 \div 130$ мкА, энергия до 1 МэВ.

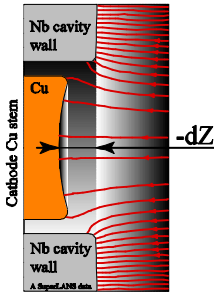
Эксперименты в FZD показали, что характеристики резонатора не изменились в течение длительного срока хранения (2 года). В процессе трехнедельной работы с пучком, характеристики резонатора также не изменились. Можно заключить, что при работе с фотокатодом стенки резонатора не загрязняются. В экспериментах была подтверждена работоспособность конструкции катодного узла, использующего принцип теплового расширения разнородных металлов для усиления давления в контакте фотокатодного стержня с теплообменником.

Эти испытания прототипа, проведенные впервые, показали, что ВЧ характеристики резонатора (Q , E_{\max} , V_{\max}) довольно хорошие. При дальнейшем продолжении работ над ВЧ фотопушкой со сверхпроводящим резонатором, ее характеристики можно максимально приблизить к рекордным характеристикам резонаторов TESLA.

Глава 4 посвящена описанию способов компенсации роста эмиттанса.

В ВЧ пушках, в начале, малый поперечный нормализованный эмиттанс сгустков растет из-за действия в протяженном сгустке сил пространственного заряда и из-за действия переменного электромагнитного поля. В нормально проводящих ВЧ пушках, для компенсации роста эмиттанса (emittance compensation) в интенсивном пучке, используется фокусировка пучка с помощью соленоидов. В сверхпроводящих резонаторах использование магнитостатического поля проблематично. Поэтому проводился поиск других способов фокусировки пучка для компенсации роста его эмиттанса.

Численное моделирование динамики сгустков в ВЧ пушке проводилось для сгустков с длительностью 20 псек, имеющих однородную плотность электронов в поперечном сечении. Ток в сгустке изменяется по форме трапеции с фронтами длительностью 1 или 2 псек. Заряд электронных сгустков 1 или 2 нКл. Ускоряющее поле на оси – $E_{\max} = 50$ МВ/м – меньше предельного на текущий момент. Индукция магнитного поля на стенках резонатора $B_{\max} < 0.2$ Т. Для расчетов использовалась программа ASTRA.



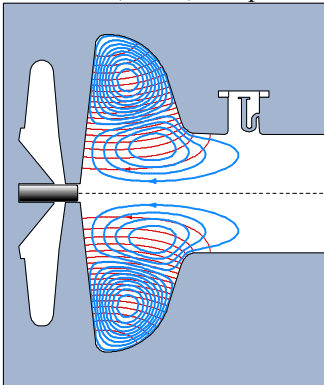
Для компенсации роста эмиттанса пучка в сверхпроводящей ВЧ пушке были предложены электрическая и магнитная ВЧ фокусировки. Электрическая ВЧ фокусировка создается ВЧ полем ускоряющей моды. Магнитная ВЧ фокусировка создается ВЧ полем высшей магнитной моды (TE) в резонаторе, возбуждаемая от отдельного генератора. Названия электрическая и магнитная ВЧ фокусировки условные,

Рис. 8. Фотокатодный стержень в отверстии резонатора.

так как все ВЧ поля имеют электромагнитный характер, и это учитывалось в расчетах.

Для того, чтобы получить электрическую ВЧ фокусировку, катод должен быть углублен относительно стенки резонатора, примерно, на $dZ = -2$ мм (см. рис.8).

При углублении катода в стенке резонатора происходит искривление силовых линий ускоряющего поля. Радиальные составляющие этого поля образуют фокусирующую линзу. Оптическая сила этой линзы превышает дефокусирующие силы пространственного заряда возле катода, где из-за малой скорости фотоэлектронов эти силы наибольшие ($\sim 1/\beta\gamma^2$). При малой скорости фотоэлектронов, интегрально, они получают больший фокусирующий импульс возле катода, чем дефокусирующий импульс сил на остальной части ускоряющего поля. Применение фотокатода со сферической поверхностью, при компенсации эмиттанса электрической ВЧ фокусировкой, позволяет получить эмиттанс 1π мм мрад для сгустков с зарядом в 2 раза большим (2 нКл) по сравнению с плоским катодом (1 нКл).



Магнитная ВЧ фокусировка создается ВЧ полем магнитной моды TE_{021} (см. рис.9). TE мода возбуждается в резонаторе отдельным ВЧ генератором с мощностью $20 \div 30$ Ватт.

Рис. 9. Магнитные силовые линии TE_{021} моды и электрические линии TM_{010} моды.

Для возбуждения магнитной моды TE_{021} и ускоряющей моды TM_{010} используется один ввод мощности. Магнитные силовые линии поля TE моды напоминают силовые линии соленоида. Резонатор на частоту TE моды специально не подстраивается. Частота TE моды (~ 4285 МГц) может быть некрatная частоте ускоряющего поля. После компенсации роста эмиттанса магнитной ВЧ фокусировкой (из-за переменного магнитного поля) нормализованные эмиттансы отдельных сгустков отличаются друг от друга меньше 3%. Согласно аналитическим исследованиям, фокусирующая сила

такой магнитной ВЧ линзы состоит из двух частей: 1) фокусирующей силы соленоида, имеющего такое же распределение индукции на оси, как распределение действующих значений индукции ТЕ моды; 2) переменной фокусирующей силы соленоида, зависящей от фазы ТЕ моды, которая экспоненциально убывает с ростом частоты ТЕ моды. На рисунках 10 и 11 пульсации эмиттанса обозначены толщиной линий на графиках.

Расчеты показывают, с увеличением углубления катода до 2 мм, эмиттанс уменьшается (см. рис. 10). При углублении больше 2 мм, эмиттанс начинает расти. Аналогично при увеличении индукции поля магнитной ТЕ моды до 0.3 Т (см. рис. 11), эмиттанс уменьшается и возрастает при большей индукции. Максимальная индукция в суперпозиции магнитных полей ускоряющей и магнитной мод на стенках не превышает допустимые 0.2 Т (см. рис. 11).

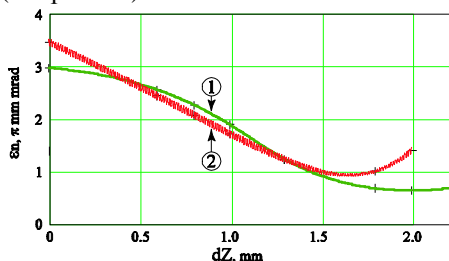


Рис. 10. Зависимость эмиттанса от углубления катода при ВЧ электрической фокусировке. (1) - 1 нКл, (2) - 2 нКл, дополнительно возбуждена ТЕ₀₂₁ мода с $B_{max}=0.3$ Т на оси.

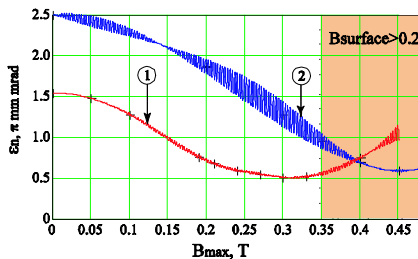


Рис. 11. Зависимость эмиттанса от индукции поля ТЕ моды на оси для сгустков 1 нКл. (1) - углубление катода $dZ=2$ мм, (2) - нет углубления, $dZ=0$ мм.

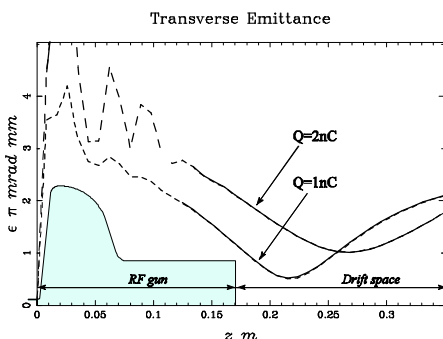


Рис. 12. Зависимость эмиттанса от расстояния до катода при электрической и магнитной ВЧ фокусировке.

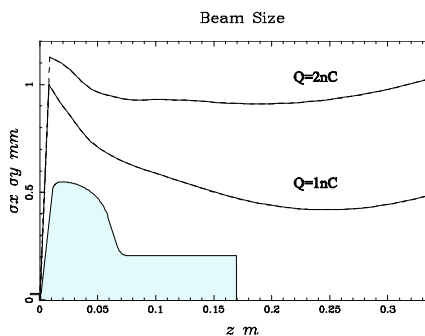


Рис. 13. Зависимость поперечного размера сгустков от расстояния до катода. Кроссовер пучка в минимуме.

При оптимальных режимах получено уменьшение нормализованного эмиттанса в 4÷5 раз. ВЧ фокусировка обеспечивает эмиттанс 1 π мм мрад для 2 нКл сгустков. В нормально проводящих ВЧ пушках с магнитоэлектрической

фокусировкой, такой же эмиттанс получен в расчетах DESY для сгустков до 1 нКл. Кроме того, ВЧ фокусировка обеспечивает оптимальное согласование электронного пучка с линаком, не требующее дополнительной фокусировки после пушки.

При компенсации роста эмиттанса, минимальную величину эмиттанс сгустков принимает на некотором расстоянии от пушки (см. рис. 12). Кроссовер пучка располагается чуть ближе этого расстояния (см. рис. 13). Для получения минимума эмиттанса за линаком, начало ускоряющего поля линака должно располагаться в кроссовере пучка. Расстояние от пушки до кроссовера пучка растет с повышением энергии пучка ВЧ пушки и начинает превышать 1 м при 8÷10 МэВ. Такие энергии можно получить с применением трех дополнительных ускоряющих ячеек в ВЧ пушках. Таким образом, ВЧ пушки с несколькими дополнительными ускоряющими ячейками уже можно располагать в отдельном от линака криостате.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы:

1. В ИЯФ был разработан и изготовлен прототип фотопушки со сверхпроводящим резонатором. Успешно решена проблема совмещения со сверхпроводящим резонатором нормально проводящего катодного узла. Конструкция катодного узла [10] позволяет осуществлять замену катода без развакуумирования системы. Обеспечивает поддержание низкой температуры катода, близкой к 80 К. Обеспечивает хороший ВЧ контакт катода с резонатором и изоляцию его от резонатора по постоянному току, позволяющую подключать к нему потенциал в 1 – 2 кВ для подавления мультипакторного разряда.
2. Исследован и разработан принцип работы и конструкция заградительного фильтра [12]. Данный заградительный фильтр позволяет исключить влияние внешних цепей на работу ВЧ пушки. Кроме того, позволяет настраивать электрическую ВЧ фокусировку пучка в ВЧ пушке перемещением фотокатода по оси в пределах ± 0.5 мм.
3. Разработаны новые технологии получения в фотопушках со сверхпроводящим резонатором интенсивных высококачественных пучков с малым эмиттансом [2, 8, 9, 11]. Для ВЧ фотопушки разработаны два новых способа ВЧ фокусировки пучка – электрическая и магнитная ВЧ фокусировки. Оба способа вместе позволяют получать в ней сгустки с эмиттансом до 1 пм мрад и с зарядом больше 2 нКл. Рассчитаны оптимизированные параметры ВЧ фокусировки, при которой максимальные поля на поверхности резонатора не превышают предельно допустимые величины 0.2 Т.

4. Испытания ВЧ характеристик прототипа, проведенные в научном исследовательском центре DESY [3], и испытания фотопушки с пучком, проведенные в научном исследовательском центре в FZD [6, 7], показали хорошую работоспособность всех ее частей и высокие ВЧ характеристики.
5. За время работы по данной теме, с целью оптимизации параметров, автором было проведено большое количество численных расчетов (>200) динамики электронного пучка в ВЧ пушках с различными резонаторами, состоящими из 1, 1.5, 3.5 ячеек. Для расчетов использовались современные программы LANS и ASTRA. Проведенные аналитические выкладки подтверждают полученные результаты численного моделирования и позволяют сделать выводы обобщающего характера.

Основные результаты диссертации, вклад соискателя (автора) в которые имел определяющий характер, опубликованы в следующих работах:

- [10, 12] – конструкция сверхпроводящего узла, катодного узла и заградительного фильтра;
- [2, 8, 9, 11] – электрическая и магнитная ВЧ фокусировки пучка; автором рассчитаны варианты фотопушек, обеспечивающих эффект укорочения сгустков до суб-пикосекундной длительности [5] и фотопушек с большим током и низкими требованиями к эмиттансу для применения в промышленности [4].
- [3, 6, 7] – испытания прототипа ВЧ пушки.
- Автор разрабатывал технологию сварки ниобиевого резонатора и непосредственно проводил электронно-лучевую сварку резонатора на установке ИЯФ [1].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бибко С.И., Вещеревич В.Г., Волков В.Н., Карлинер М.М., Седяров И.К., Сингатулин Ш.Р. Автоматизированная установка электронно-лучевой сварки // Препринт ИЯФ 93-63, Новосибирск. - 1993. - 15 с.
2. Janssen D., Volkov V. RF focusing-an instrument for beam quality improvement in super conducting RF guns // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - A 452. - 2000. - pp. 34-44.
3. D. Janssen, V. Petrov, V. Volkov, et al. On the way to a superconducting RF-gun: first measurement with the gun cavity // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – A445. -2000. - pp. 408-412.
4. Volkov V.N., Konstantinov S.G., Kudryavtsev A.M., Myskin O.K., Petrov V.M., Tribendis A.G., Janssen D. Application of auto cathode in a superconducting electron RF injector for the industry accelerators // ProcId. APAC01. - September 17-21, 2001. - Beijing, China. - pp. 170-172.

5. Volkov V.N. Generation of Sub-Picoseconds Electron Bunches in Superconducting RF Photocathode Injector // 2003 Particle Accelerator Conference. - May 12-16, 2003, Portland, Oregon USA. - pp. 2044-2046.
6. Janssen D., Petrov V., Volkov V., et al. First operation of a superconducting RF-gun // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – A507. -2003. - pp. 314-317.
7. D. Janssen, S. Konstantinov, J. Kruchkov, O. Myskin, V. Petrov, A. Tribendis, V. Volkov (BINP), et al. Measurements of the FZR Superconducting RF Photoelectron Gun // 2003 Particle Accelerator Conference, May 12-16, 2003, Portland, Oregon USA.
8. K. Flottmann, D. Janssen, and V. Volkov. Emittance compensation in a superconducting rf gun with a magnetic mode, Phys. Rev. ST Accel. Beams 7, 090702 (2004).
9. Volkov V. Photocathode 1.5 (1, 3.5) cell superconducting RF gun with electric and magnetic RF focusing // Совещание по численным расчетам сверхпроводящих ВЧ пушек. - Берлин. - 2-3 июня 2005. - www.Fzd.de/projects/EUROFEL/MeetingBerlin_files/volkov.ppt/ - 13 pp.
10. V.N. Volkov, Ya.G. Kruichkov, V.M. Petrov, A.G. Tribendis, D. Janssen. Cathode assembly of superconducting photocathode RF gun. // RUPAC, Novosibirsk. -15-18 September 2006.
11. V.N. Volkov, V.M. Petrov, D. Janssen. Superconducting photocathode RF guns // RUPAC, Novosibirsk. -15-18 September 2006.
12. V.N. Volkov, Ya.G. Kruichkov, V.M. Petrov, A.G. Tribendis, D. Janssen. Stop-filter of superconducting RF gun cathode assembly // RUPAC, Novosibirsk. -15-18 September 2006.