

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
СУМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

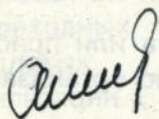
На правах рукописи

Шимко Анатолий Иванович


УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ  
СТРУКТУРЫ НА ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРАХ И  
ГРУППИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО  
ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА НА ЕЕ БАЗЕ

01.04.01 - техника физического эксперимента,  
физика приборов, автоматизация  
исследований



Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук



Сумы 1994 г.



00801677 (T)

Робота виконана в Інституті прикладної фізики  
АН України, г. Суми

Научний керівитель: доктор технічних наук  
И.С.Савченко

Офіційні опоненти: д.ф.-м.н., проф. Н.С.Репалов,  
УНЦ ХФТИ, г.Харьков  
к.ф.-м.н., доц. Г.С.Вороб'єв,  
СГУ, г.Суми

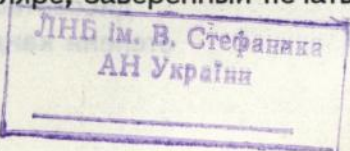
Ведущая організація: НІІ Електронної мікроско-  
пії, г.Суми

Захист дисертації состоится "2" 05 1994 г. в 15<sup>00</sup> часов  
на засіданні спеціалізованого ради К 22.01.01 в  
Сумському Державному університеті Адрес: 244007 Суми,  
ул. Р.-Корсакова, 2 тел. 33-34-65 *Додаток № 2/6*

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці СГУ

Автореферат розослан "8" 04 1994 г.

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



Учений секретарь  
спеціалізованого ради  
К 22.01.01

*[Signature]* Флат А.Я.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Последние годы развития науки и народного хозяйства можно характеризовать как интенсивным расходом энергоресурсов, так и поиском путей их восстановления и пополнения. В этой связи все больше внимания уделяется космической энергетике. В энергетическом комплексе космической станции важное значение отводится преобразователям энергии первичного источника в энергию СВЧ колебаний. Рассматривается как модульный вариант мощностью до 5 кВт на основе полупроводниковых приборов, магнетронов и клистронов, так и источники более мощного излучения в единичном приборе.

Как показывает анализ публикаций наиболее перспективными считаются клистронные генераторы сверхвысоких уровней мощности с рассредоточенным энергоотбором от сгруппированного пучка. Важное место в проблеме отводится системе формирования релятивистского электронного пучка (РЭП) высокого качества. Для того, чтобы получить излучение средней мощности 10,0 МВт от единичного прибора, можно сформировать РЭП в импульсном режиме с большой частотой повторения, а затем преобразовать его в энергию СВЧ колебаний. При этом должны быть решены задачи пространственно-временных и переходных процессов, градиентов электрических полей, тепловых нагрузок электродинамических структур, утилизации отработавшего РЭП, транспортировки СВЧ излучения. Многие из перечисленных проблем прежде должны быть исследованы в лабораторных условиях и предложены реализуемые технические решения.

Задача тем более важна, что за последнее время к источникам сверхвысоких уровней СВЧ мощности живой интерес проявляют и разработчики ускорителей на сверхвысокие энергии.

Кроме того, создание сверхмощных генераторов может быть полезным в установках термоядерного синтеза, разделения изотопов, сверхдальней связи и локации. Все это делает весьма актуальной разработку и создание комплекса аппаратуры для формирования импульсного РЭП наносекундного диапазона и построение на его базе релятивистского клистрона.

Цель работы. Целью настоящей работы является исследование сильнооточной ускоряющей структуры на четвертьволновых резонаторах в совокупности со всеми его структурными элементами; создание действующих полномасштабных образцов, совершенствование их конструкций и исследование характеристик при вариации нагрузки в широких пределах; поиск оптимальных условий передачи максимальной мощности от генератора электронному пучку; численное исследование группирователя сформированного РЭП с учетом пространственно-временных и переходных характеристик, их влияния на АЧХ преобразователя энергии РЭП в энергию СВЧ колебаний; создание экспериментальной базы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- исследованы радиотехнические характеристики ускоряющей структуры на  $\lambda/4$  резонаторах, узла связи, фидера передачи энергии от генератора к нагруженной ускоряющей структуре с целью их оптимального согласования с учетом сильнооточного электронного пучка;
- впервые для изготовления крупногабаритных ускоряющих структур применен биметалл сталь-медь, полученный методом взрыва;
- предложен, разработан и испытан ионнозащищенный источник электронов с применением керамики  $\text{LaV}_6$ , а также комбинированный источник для комплексных исследований;
- предложена и внедрена в четвертьволновых резонаторах методика очистки вакуумных поверхностей с помощью резонансного высокочастотного разряда (РВР);

- проведено численное моделирование динамики группирования РЭП наносекундной длительности с учетом пространственно-временных характеристик РЭП и переходных процессов в группирователе;

- предложены перспективные схемы сильноточных двухпучковых ускорителей (ионный и электронный пучки), а также способ и устройство группировки РЭП на его базе.

Практическая ценность заключается в разработке крупногабаритных ускоряющих структур из биметалла сталь-медь и методик расчета их основных электрофизических характеристик; создании и исследовании узла связи и фидера передачи максимальной мощности от генератора к нагруженной ускоряющей структуре, ионнозащищенного источника электронов, очистке поверхностей методами РВР; создании пакета программ расчета группирователя клистронного типа импульсного релятивистского пучка наносекундного диапазона с учетом пространственно-временных характеристик РЭП и переходных процессов в промежуточных резонаторах; предложены новые схемы построения двухпоточковых ускорителей и перспективные варианты технической реализации преобразователя энергии РЭП в энергию СВЧ колебаний.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Межотраслевом совещании (г.Москва, 1978 г.), на VI Всесоюзном семинаре по колебательным явлениям в электронных потоках (г.Ленинград, 1976 г.), на научно-технических конференциях СФТИ (г.Сухуми, 1985 - 1988 г.г.).

Публикации. Основные результаты диссертации содержатся в трех статьях и одном препринте. Оригинальные решения защищены авторскими свидетельствами СССР на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 170 стр., из них машинописного текста

124 стр., 44 рисунка, 2 таблицы. Список использованных источников составляет 176 наименований.

В первой главе дан анализ как новых методов генерации СВЧ колебаний, так и традиционных, с использованием энергии РЭП. Приведен обзор наиболее перспективных ускорительных установок для формирования интенсивных РЭП, а также результаты экспериментальных работ по достижению высоких градиентов электрических полей в электродинамических структурах и темпов ускорения.

Во второй главе приведено описание сильноточного резонаторного ускорителя на  $\lambda/4$  резонаторах, исследований резонаторов из биметалла сталь-медь, их электрофизических, энергетических и эквивалентных параметров; освещены вопросы согласования ВЧ генератора с нагруженным резонатором; описан ионнозащищенный источник электронов и даны результаты исследований применения резонансного высокочастотного разряда для очистки вакуумных поверхностей. Приведены результаты экспериментов по запуску ускорителя.

В третьей главе рассмотрены вопросы группировки импульсного РЭП наносекундного диапазона с учетом пространственно-временных характеристик пучка и переходных процессов в промежуточных резонаторах. Результаты численного моделирования приведены в виде трехмерных графиков, дается интерпретация результатов. Описан экспериментальный комплекс.

В четвертой главе кратко изложены характеристики перспективных ускорителей на базе  $\lambda/4$  резонаторов и их применение для формирования двухпучковых потоков: электронно-ионного и электронно-электронного с предварительной группировкой его части.

Автор защищает, представляя настоящую работу как диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, следующие основные положения, изложенные в диссертации:

1. Ускоряющую структуру на двух четвертьволновых резонаторах, выполненных из биметалла сталь-медь и состыкованных емкостными зазорами, исследование ее характеристик и обеспечения высокоэффективной передачи энергии от высокочастотного генератора электронному пучку.

2. Ионнозащищенный источник электронов и комбинированный инжектор на его базе.

3. Метод очистки вакуумных поверхностей резонаторов с помощью резонансного высокочастотного разряда.

4. Результаты численного моделирования процесса группирования наносекундных импульсов тока с учетом переходных процессов и пространственно-временной эволюции пучка.

5. Схему малогабаритного двухпучкового ускорителя и схему СВЧ преобразователя с предгруппирователем части пучка.

Содержание работы. Тенденция развития энергетики показывает, что наряду с традиционными источниками электроэнергии (тепловые, гидро- и атомные электростанции) широкое распространение получают и нетрадиционные (ветровые, приливные, термальные, солнечные и т.д.). Особое внимание за последние годы уделяется космическим электростанциям с СВЧ генераторами для передачи энергии на Землю. Для этих целей целесообразно поднять выходную мощность электровакуумных приборов СВЧ до 2-4 МВт, а в будущем - до 0,1-0,2 ГВт, используя в последнем случае усилители на релятивистских электронных пучках. Кроме того, такие области, как ускорители заряженных частиц сверхвысоких энергий, термоядерный синтез, радиолокация, по-прежнему остаются основными потребителями мощных СВЧ-приборов.

Как показывает опыт исследований ведущих научных центров наиболее перспективными приборами для применения в СВЧ-энергетике являются мощные клистроны на релятивистских электронных пучках (РЭП).

Аналізу состояния разработок в области формирования РЭП и генераторов СВЧ-диапазона сверхвысоких уровней

мощности посвящена первая глава диссертации. Показано, что в качестве источника РЭП могут быть использованы резонаторные ускорители прямого действия с частотой возбуждения в единицы мегагерц на базе четвертьволновых коаксиальных резонаторов. Выпускаемые промышленностью на момент разработки мощные генераторные триоды ГИ-56А, коммутаторы ИРТ-6, полупроводниковые вентили СВЛ-0,25, биметалл сталь-медь и др. позволили внедрить при разработке многоцелевого ускорительного комплекса передовые достижения и обеспечить проектные параметры.

Так как потери в ускоряющей структуре пропорциональны напряжению в квадрате, а прирост энергии пучка линейно зависит от напряжения, наиболее рациональным следует считать последовательное размещение ускоряющих станций при одновременном увеличении ускоряющих напряжений. В этом отношении предпочтительно использование двух четвертьволновых коаксиальных резонаторов, стыковка которых осуществлена емкостными зазорами. В емкостной части одного из них размещен инжектор, а в другом фокусирующая система транспортировки пучка к мишени. В высокодобротном контуре изменение нагрузки приводит к изменению как активной, так и реактивной компоненты входного сопротивления, что в свою очередь требует перестройки согласующих и компенсирующих устройств. Решению этих вопросов наряду с технологическими, а также исследованию возможности группировки РЭП и преобразованию его энергии в энергию СВЧ колебаний посвящена настоящая работа.

Из анализа эквивалентной схемы следует, что такая ускоряющая структура будет иметь две резонансные частоты. Для одной из них характерно противофазное распределение поля. Напряжение между торцами будет в два раза больше, чем радиальное. Оно соответствует колебательному контуру, у которого эквивалентная емкость состоит из емкости цилиндрического участка, емкости рассеяния и емкости торцового зазора. Индуктивностью служит отрезок короткозамкнутой коаксиальной линии.

Основные проектные и измеренные геометрические и электрофизические характеристики приведены в таблице.

Таблица

Наименование параметра	Условн. обозначения	Ед. измерения	Величина	
			Расчетн.	Измерен
Диаметр наружной обечайки	$D_1$	мм	3000	3000+/-3
Диаметр внутреннего коаксиала	$d_1$	мм	500	500+/-1
Диаметр емкостной насадки	$D_c$	мм	2600	2600+/-5
Длина обечайки	$L$	мм	4000	4000+/-2
Длина внутреннего коаксиала	$l_1$	мм	2350	2350+/-2
Длина емкостной насадки	$l_2$	мм	1500	1500+/-2
Торцовый зазор	$h_3$	мм	150	150+/-2
Эквивалентная емкость резонатора	$C_3$	пФ	1000	1070
Рабочая частота	$f_0$	МГц	5,8	5,72
Характеристическое сопротивление	$\rho_0$	Ом	27,4	26,0
Электрическая длина	$\beta l$	рад	0,294	0,282
Собственная добротность	$Q_0$	-	14500	9300
Шунтовое сопротивление	$R_{oe}$	МОм	0,384	0,242
Вакуумируемый объем	$V_1$	куб.м	28,2	28,2
Площадь поверхностей газовыделения	$S_1$	кв.м	95,6	95,6

Нагрузочная кривая  $U(I)$  такого резонатора определяется собственными потерями, мощностью ускоренного пучка и условиями согласования комплексных сопротивлений фидера и резонатора. Показано, что при возбуждении ускоряющей структуры с нескомпенсированной реактивностью узла связи и при ограниченности входного высокочастотного напряжения невозможно передать пучку номинальную мощность. Подробно анализируется диодный режим, когда ток формируется ВЧ полем и подчиняется

релятивистскому закону "3/2". Для этого случая рабочие параметры обеспечиваются как установкой диодного зазора, так и величиной связи с питающим фидером. При полной мощности генератора 100 МВт в соответствии с нагрузочной характеристикой может быть обеспечен ток до 500А и напряжение до 3,0 МВ. С ростом ускоряемого тока КПД передачи энергии пучку может достигать 90-95%.

Аналитически исследована нагрузочная характеристика для выбранного зазора, площади петли связи и вариации нагрузки (тока пучка). Показано, что при параллельной схеме компенсации, хотя и рекомендуются узлы связи малой площади, но величина компенсирующей емкости зависит не только от индуктивности петли, но и от активной компоненты нагрузки  $r_{вх}$ , т.е. от тока пучка. При последовательной схеме зависимости от  $r_{вх}$  нет, но необходимо использовать узлы связи большой площади. Регулировка связи осуществлена поворотом петли связи вокруг ввода энергии, т.к. величина связи  $X_{св}$  определяется только эффективной площадью связи с учетом кривизны поля, угла поворота и геометрии петли.

Конструктивно компенсирующий контур выполнен в виде отдельной экранированной сборки керамических К15-9 и вакуумного переменного КП1-3 конденсаторов. Исследован фидер передачи энергии на базе комплекта радиочастотных кабелей типа РК50-44-17, включенных параллельно. Определено, что наиболее целесообразно использовать низкоомные фидеры сопротивлением 8-12 Ом.

Изучены конструкции ускоряющих резонаторов действующих и проектируемых ускорителей с применением высокопроводящих покрытий и принято решение выполнить резонаторы из биметалла сталь-медь, изготовленного по индивидуальному заказу методом взрыва на Орско-Халиловском металлургическом комбинате; разработана технология сварки тонко- и толстолистовых заготовок, их обработки. Это позволило существенно упростить конструкцию, отказаться от дополнительного охлаждения крышек, наружной обечайки и емкостных насадок.

Конструктивно крышка выполнена из биметалла сталь 25мм - медь 7мм и снаружи подкреплена кольцевыми и радиальными ребрами жесткости. Наружная обечайка каждого резонатора выполнена из трех секций длиной 1333 мм, подкреплённых в месте стыка кольцевыми и угловыми ребрами жесткости. Измерение собственной частоты при откачке показало, что эквивалентный прогиб крышек составляет 0,71 мм, а дрейф частоты при суточном изменении температуры - 68,5 Гц/К. На этапе тренировки очистка токопроводящих поверхностей проводилась с помощью резонансного высокочастотного разряда при мощности возбуждения 500 Вт импульсами длительностью 500 мкс и частотой повторения 1 кГц. При технологическом развакуумировании применен метод опрессовки вакуумных поверхностей сухим азотом. Перечисленные меры позволили почти вдвое повысить начальный уровень тренировки и получить напряжение на ускоряющем промежутке 2,5-2,6 МВ.

После тренировки ускоряющих резонаторов исследовалась транспортировка пучка. Первые же эксперименты показали, что мощный плазменный факел и поток нейтральных частиц с мишени достигал ускоряющего промежутка, удаленного на расстояние 6,0 м от мишени. Появлялись пробои ускоряющей структуры, а эмиттер катодного узла разрушался. Это стимулировало поиск и разработку катодного узла, защищенного от встречного потока ионов, газов и частиц материала мишени. В результате был создан катодно-подогревательный узел КПУ 50-20 с центральным отверстием и танталовым ленточным нагревателем. При этом не было замечено изменений в однородности теплового поля по поверхности катода, и эмиссионных характеристик.

С усовершенствованным катодом были проведены эксперименты по формированию длинноимпульсного цуга электронного тока в диодном режиме. Исследовался дрейф пучка в электропроводе  $\varnothing 45$  мм с помощью подвижного коллектора в режиме малых токов (3-5 А) и при ускоряющем напряжении до 700 кВ. По следу пучка на токоприемной медной шайбе установлено, что диаметр пучка составляет не

более 10 мм. Аналогичные результаты при тех же энергетических характеристиках были получены методом прожига алюминиевых фольг, размещенных в электронопроводе на специальной этажерке с шагом 1000 мм. Разработан и испытан комплексный источник электронов на базе КПУ50-20. В нем предусмотрен плазменный источник, который удаляется из высокотемпературной зоны и экранируется.

В диодном режиме формирования моноимпульс тока имеет колоколообразную форму, поэтому при транспортировке до физической камеры электроны, прошедшие ускоряющий зазор в приамплитудной фазе, догоняют электроны, вышедшие с фазой менее  $90^\circ$ . Происходит пространственно-временная группировка моноимпульса тока, что подтверждено численными расчетами и экспериментально.

Проведено численное моделирование группирователя импульсного релятивистского клистрона наносекундного диапазона, на базе пучков, формируемых ускоряющей структурой на  $\lambda/4$  резонаторах с учетом пространственно-временных характеристик пучка и изменения частоты конвекционного тока в результате дрейфа. Моделирование проводилось путем разбиения фазовой протяженности сгустка на условные крупные частицы со ступенчатым изменением амплитуды тока и напряжения.

Реакция промежуточных резонаторов на ступенчатое возбуждение сгруппированного пучка вычисляется в виде суммы всех ступенек до рассматриваемого временного интервала. Переходные процессы учитываются введением комплексного сопротивления, нагруженного  $i$ -й частицей резонатора. При этом расстройка  $n$ -го резонатора складывается из конструктивной  $\Omega_{оп}$ ; расстройки, вызванной переменными характеристиками пучка и переходными процессами  $\Omega_{ein}$  и времяпролетной расстройки  $\Omega_{din}$ . Расчеты проведены на ЭВМ серии ЕС-1055М. Программа работает в диалоговом режиме с выводом результатов счета на графопостроитель. Исходными данными приняты амплитуда ускоряющего напряжения  $U_0 = 1,0$  МВ,

амплитудное значение ускоряемого тока  $I_0=500$  А, длительность полупериода ускоряющего поля  $\tau_{\mu}=80$  нс, частота модуляции  $f_0 = 3,0$  ГГц, мощность модулирующего сигнала  $P = 200$  Вт. Для упрощения счета форма импульса тока принята прямоугольная.

Анализ процессов группирования показывает, что синусоидальная форма ускоряющего напряжения на низкоэнергетичных "хвостах" приводит к перегруппировке импульса тока и, как правило, его потере. Для оптимального группирования наносекундных импульсов нагруженная добротность резонаторов должна быть 50 - 200, а соседние резонаторы расстроены вниз и вверх по частоте с учетом девиации конвекционного тока. При этом эффективная длительность сгруппированного импульса значительно сокращается, что ограничивает в конечном счете КПД преобразования. Эксперименты по группировке РЭП проводились на однорезонаторном макете  $\lambda/4$  ускорителя в режиме накопления энергии и формировании короткого цуга (2-3 моноимпульса) тока электронной пушкой с термокатодом.

В работе описан ускоритель и приведены результаты исследования в различных режимах; представлены аппаратный состав и процедура согласования генератора с нагрузкой оперативной перестройкой параметров выходного контура мощного генератора. Приведены характеристики импульсного СВЧ генератора на лампах ГИ12Б и высоковольтных детекторных секций на диодах 6Д16Д, их калибровка по мощности. Описаны эксперименты по формированию и транспортировке РЭП вдоль оси группирователя.

В четвертой главе приведены предложенные автором некоторые перспективные схемы малогабаритных резонаторных ускорителей. Источник ВЧ мощности размещен непосредственно на короткозамыкающей крышке резонатора. Он содержит две и более генераторных ламп, объединенных в одном колебательном контуре. Передача энергии в ускоряющий резонатор осуществляется через несколько индуктивных узлов, размещенных в

короткозамыкающей крышке. Ионные источники расположены по наружной обечайке, а отклоняющие системы - внутри емкостной насадки. Ускоряющее напряжение устанавливается таким, чтобы время дрейфа ионов было равно нечетному числу полупериодов колебаний ускоряющего поля. Перспективным для генерации и эффективного усиления СВЧ колебаний признано устройство, в котором основной электронный поток формируется в резонаторном ускорителе от кольцевого катодного узла типа КПУ50-20. Дополнительный пучок формируется и группируется до ускоряющего зазора и проходит через центральное отверстие в основном катоде. После ускорения оба пучка направляются в группирователь.

### Основные результаты работы.

1. Впервые исследованы радиочастотные характеристики ускоряющей структуры при вариации тока пучка и условия согласования ее с питающим фидером, обосновано применение биметалла сталь-медь, полученного методом взрыва.
2. Разработан и исследован новый ионно-защищенный и комбинированный источник электронов.
3. Предложена и внедрена методика очистки вакуумных поверхностей с помощью резонансного высокочастотного разряда.
4. Проведено численное моделирование динамики группирования РЭП наносекундной длительности, впервые учтены пространственно-временные характеристики РЭП и их влияние на процесс группировки.
5. Предложены перспективные схемы малогабаритных ускорителей, формирующих совмещенные потоки ионов и электронов, а также с предгруппированием части пучка.

Основные результаты, рассмотренные в диссертации, опубликованы в работах:

1. Иремашвили Д.В., Шимко А.И. / Энергетические характеристики четвертьволновой ускоряющей структуры,

нагруженной сильноточным пучком электронов // ВСРЭ. Сер. ИРФ. - 1987. в.1(13).-с.60.

2. Иремашвили Д.В., Шимко А.И. / Сильноточный резонаторный ускоритель миллисекундной длительности // Тезисы докл. Межотраслевого совещ. М.: НИИ Титан. - 1978.

3. Иремашвили Д.В., Шимко А.И. / К вопросу эффективной передачи энергии сильноточному пучку электронов в ускоряющих структурах на коаксиальных  $\lambda/4$  резонаторах // ВСРЭ сер. ИРФ.- 1987. в.2(14). - с.48.

4. Савченко И.С., Шимко А.И., Шавловский Б.Л. / Импульсный многорезонаторный группирователь релятивистского клистрона наносекундного диапазона. Препринт ИПФ АН Украины № 07-93. Сумы, 1993.

5. Иремашвили Д.В., Мухаметов С.М., Шимко А.И./ ИМРК на базе  $\lambda/4$  резонаторного ускорителя // Тезисы докл. VI Всесоюзного семинара по колебательным явлениям в электронных потоках. Л.: СЗПИ 1976.

6. Иремашвили Д.В., Шимко А.И. / Двухпучковый группирователь ИМРК // там же.

7. А.С. N511646 (СССР). Способ обезгаживания элементов электронных приборов / Сухомлинов В.В., Шимко А.И. Оpubл. в БИ. - 1976. - N15.

8. Иремашвили Д.В., Кузнецов П.И., Шимко А.И. и др./ Изучение пространственно-временных и энергетических характеристик электронных пучков  $\lambda/4$  ускорителя // ВСРЭ. сер. ИРФ. - 1985. в.2(10).- с.136.

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

ЛНБ ім. В. Стефанива  
АН України

AB 29.561