



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2001–11
На правах рукописи

Ларионов Александр Викторович

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КЛИСТРОНОВ
ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ КОЛЛАЙДЕРОВ**

01.04.20 – физика пучков и ускорительная техника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2001

Работа выполнена в филиале Института ядерной физики (г. Протвино).

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук В.Е. Балакин (ФИЯФ, г. Протвино).

Официальные оппоненты – профессор, доктор технических наук В.А. Тепляков (ИФВЭ, г. Протвино), доктор технических наук П.В. Невский (ФГУП НПО “Торий”, г. Москва).

Ведущая организация – Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2001 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142280, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 034.02.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В настоящее время как основной тип СВЧ источника для линейного коллайдера нового поколения рассматриваются мощные импульсные клистроны с РРМ фокусировкой (РРМ – Periodical Permanent Magnet., русское название МПФС – Магнитная Периодическая Фокусирующая Система). Разработка этих приборов осуществляется в рамках существующих проектов NLC (SLAC, США), JLC (КЕК, Япония), а также в рамках Российской Программы физики высоких энергий в Филиале ИЯФ (г. Протвино). При длине волны несколько сантиметров эти приборы должны обеспечивать импульсную выходную мощность не менее 50–100 МВт в микросекундном диапазоне и частоте следования импульсов около сотни герц.

Большое количество клистронов, необходимое для линейного коллайдера, накладывает дополнительные требования на характеристики и качество этих приборов. Наряду с высокой импульсной и средней ВЧ-мощностью важным является достижение высокого КПД, увеличение срока службы, простота и компактность конструкций, позволяющих осуществлять промышленный выпуск этих приборов. Аналогичные требования по простоте, компактности и надежности предъявляются и к устройствам, обеспечивающим высоковольтное питание клистронов. В целом все эти требования напрямую связаны со стоимостью проекта линейного коллайдера и рассматриваются как основные.

Оптические системы клистронов для проектов NLC и JLC развиваются по традиционной схеме с диодной пушкой. Высоковольтное питание этих приборов осуществляется модулятором. Полученная в них в настоящее время ВЧ-мощность составляет 50–70 МВт при частоте следования импульсов не более 10 Гц. Срок службы этих приборов не превышает 15–20 тыс. часов и ограничивается в основном ресурсом катода. Увеличение срока службы за счет понижения плотности тока на катоде может быть достигнуто при использовании пушек с повышенной компрессией. Однако в этом случае формируемый пушкой пучок становится более чувствительным к качеству сборки прибора, качеству катода и т.д., что очень нежелательно при промышленном производстве клистронов. По этой причине компрессия пучка в развиваемых сейчас клистропах ограничена величиной составляющей примерно 150:1, а актуальной является задача исследования и развития пушек с повышенной компрессией, которые менее чувствительны к точности сборки и позволяют корректировать возмущения пучка (в случае их наличия).

Промышленное производство клистронов заметно упрощается при использовании модульного принципа построения магнитной системы прибора. Суть здесь заключается в том, что элементы магнитной системы должны выполняться

в виде отдельных законченных модулей, сочетающих как простоту их сборки на приборе, так и возможность многократного использования. Развитие модульного принципа приводит к необходимости разработки новых типов согласующих магнитных линз, которые могут быть собраны на приборе по типу “зажим” (*clamp-on*) и соответственно к изучению способов построения оптических систем клистронов с такими линзами.

Вместо клистронов с диодными пушками в российском проекте ВЛЭПП было предложено использовать в коллайдере клистроны с сеточным управлением. Главным преимуществом этого подхода является значительно более дешевая и компактная схема высоковольтного питания клистронов с постоянным напряжением. В клистроне ВЛЭПП пучок формируется в ускорительной трубке релятивистской многоструйной пушкой при приложенном к трубке постоянном высоком напряжении. Прототип этого прибора, испытанный на импульсном высоком напряжении (при питании от трансформатора Тесла) продемонстрировал возможность получения ВЧ-мощности на уровне 40–70 МВт, однако одновременно высветил следующие проблемы: невысокое токопрохождение в пролетной трубке клистрона (80–85%), меньший в 1.5–2 раза ток (первеанс) пучка в максимуме токопрохождения. Для решения этих проблем необходимо развитие эффективных методов расчета релятивистских многоструйных пушек, поскольку сложная трехмерная геометрия таких систем с большим количеством мелкоструктурных деталей практически не позволяет проводить их прямой полномасштабный расчет и тем более оптимизацию. В то же время проектирование по двумерной модели, выполненное первоначально для пушки клистрона ВЛЭПП, оказалось слишком грубым. Следует подчеркнуть также важность экспериментальных исследований оптики многоструйной пушки на постоянном напряжении, поскольку именно это является основным преимуществом схемы с сеточным управлением.

В настоящее время ни один из рассмотренных выше типов клистронов не выбран окончательно для коллайдера. Поэтому с точки зрения перспектив актуальным является развитие обоих, что в итоге позволило бы в будущем выбрать наилучший.

Цели диссертационной работы

- 1.** Развитие эффективной численной модели для расчета релятивистских многоструйных пушек.
- 2.** Численный анализ и экспериментальные исследования на постоянном напряжении оптики мощной релятивистской многоструйной пушки, обеспечивающей суммарную компрессию более 100 в РРМ клистроне ВЛЭПП.
- 3.** Изучение новых способов построения оптических систем мощных РРМ клистронов с диодными пушками и их элементов, способствующих повышению эффективности использования этих приборов в линейном коллайдере.

Научная новизна и практическая ценность

1. Предложен и развит в виде кода MBGUN (*Multi-Beam Gun*) метод расчета многоструйных электронных пушек на основе эквивалентной модели трехмерного интенсивного многоструйного релятивистского пучка в аксиально-симметричной системе электродов пушки. Показана и реализована возможность построения полностью самосогласованных решений для многоструйной пушки. На основе расчетов реальных оптических систем показано, что MBGUN обеспечивает достаточно высокую скорость решения задач, при этом результаты расчетов значительно лучше соответствуют эксперименту, чем аналогичные, построенные по двумерным моделям.

2. Впервые исследована мощная релятивистская многоструйная пушка, формирующая пучок в ускорительной трубке при постоянном напряжении и обеспечивающая суммарную компрессию пучка по площади более 100 для РРМ клистрона ВЛЭПП. С целью увеличения тока (первеанса), соответствующего минимуму эмиттанса сформированного пучка, а также для уменьшения величины самого эмиттанса изучены вопросы выбора начальной структуры многоструйного потока, выбора конфигурации электродов в трубке, выбора формы, размеров и конструкций микропушек, формирующих струи. Исследовано влияние на оптику пучка перераспределения напряжения по ускорительной трубке, возникающего в установках с постоянным напряжением при отпирании пушки.

Итогом исследований является разработанная многоструйная пушка, позволяющая обеспечить в РРМ канале клистрона пучок с примерно вдвое большим первеансом и уменьшенным примерно втрое токооседанием. Экспериментально (при постоянном напряжении на трубке) реализован пучок с энергией 700 кэВ мощностью около 100 МВт с указанными выше свойствами. Достигнутая мощность примерно на порядок превышает мощность пучка в известных клистро-нах с сеточным управлением (при постоянном напряжении) и является экспериментальным подтверждением возможности использования сеточного управления в клистро-нах для линейных коллайдеров.

3. Разработана и исследована диодная пушка с повышенной компрессией, формирующая пучок в ускорительной трубке для мощного BINP¹ РРМ клистрона. В оптической системе пушки апробированы элементы, ослабляющие требования к точности сборки, и позволяющие корректировать возмущения пучка. Найдены режимы, надежно обеспечивающие высокое токопрохождение в клистроне. В пролетной трубе клистрона получен пучок с рекордной для этого класса приборов мощностью более 200 МВт (550 кВ, 377А) и токооседанием на уровне 1%. Полная компрессия пучка в приборе составляет примерно (500–600):1, при этом максимальная плотность тока на катоде пушки почти вдвое меньше, чем в аналогичных приборах, и не превышает 4 А/см².

¹ BINP-Branch of the Institute of Nuclear Physics.

4. В рамках разработки Toshiba PPM клистрона показана возможность создания оптической системы клистрона, которая обеспечивает управление сечением (диаметром) пучка в пролетном канале и одновременно построена в простейшем виде – с одной согласующей магнитной линзой типа “зажим” (clamp-on) и катодной катушкой. При этом равновесный диаметр пучка в пролетном канале может изменяться примерно в 1.5 раза, а пульсации огибающей пучка не превышают (согласно расчетам) 5–6%. Пучок с изменяющимся диаметром позволяет проводить дополнительную и эффективную “подстройку” токопрохождения в динамическом режиме и выходной ВЧ-мощности (КПД), что подтверждено в экспериментах, выполненных в КЕК.

5. Предложен новый тип согласующих магнитных линз типа “зажим” (clamp-on) – гибридные линзы. В конструкции используется комбинация постоянных магнитов и токовых катушек, что обеспечивает пониженное энергопотребление линзы. Показано, что в случае Toshiba PPM клистрона использование гибридной линзы обеспечивает по меньшей мере 10-кратное снижение энергопотребления.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке и совершенствовании мощных импульсных клистронов для линейных коллайдеров.

На защиту выносятся следующие результаты.

1. Разработанный в виде кода MBGUN (*Multi-Beam Gun*) метод расчета многоструйных пушек на основе эквивалентной модели трехмерного интенсивного многоструйного релятивистского пучка в аксиально-симметричной системе электродов пушки.

2. Результаты численного анализа (с помощью кода MBGUN) и экспериментальных исследований оптики мощной релятивистской многоструйной пушки, формирующей пучок в ускорительной трубке при постоянном напряжении с суммарной компрессией пучка по площади более 100 для мощного PPM клистрона ВЛЭПП.

3. Результаты исследования диодной пушки, формирующей пучок мощностью более 200 МВт с суммарной компрессией (500–600):1 в BINP PPM клистроне, с предложенными элементами, которые ослабляют требования к точности сборки и позволяют корректировать возмущения пучка до входа в PPM.

4. Результаты исследования предложенной оптической системы Toshiba PPM клистрона, обеспечивающей управление сечением (диаметром) пучка в пролетном канале и построенной в простейшем виде – с одной согласующей магнитной линзой типа “зажим” (clamp-on) и катодной катушкой.

5. Результаты исследования предложенной согласующей гибридной линзы типа “зажим” (clamp-on), имеющей пониженное энергопотребление за счет сочетания в конструкции постоянных магнитов и токовых катушек.

Апробация работы и публикации. Диссертация написана на основе работ, выполненных в филиале ИЯФ (г. Протвино) с 1992 по 2000 гг. Основные результаты докладывались на XII, XIV, XV, XVI Российских совещаниях по ускорителям заряженных частиц, международных совещаниях по линейным коллайдерам LC95, LC97, международных совещаниях по СВЧ-источникам для линейных коллайдеров RF93, RF96, RF98, международных совещаниях серии ISG (*International Study Group on Next Linear Collider*), Европейской конференции по ускорителям EPAC2000, семинарах ФИЯФ, КЕК (Япония) и опубликованы в работах [1–16].

Структура диссертации. Работа изложена на 125 страницах, состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 70 рисунков и список литературы из 51 наименования.

Содержание работы

Во Введении обосновывается актуальность рассматриваемых в диссертации задач, дается общая характеристика работы, формулируется цель работы и дается краткое содержание разделов диссертации.

Первая глава посвящена развитию численных методов и программ расчета интенсивных электронных пучков. В начале главы показаны трудности моделирования многоструйных пушек по двумерной модели. Приводится сопоставление результатов двумерных расчетов и экспериментальных данных для релятивистской многоструйной пушки клистрона ВЛЭПП.

Далее описаны численные алгоритмы кода **MBGUN** (*Multi Beam Gun*). В алгоритмах используется трехмерная модель интенсивного релятивистского электронного пучка в аксиально-симметричной геометрии электродов пушки. При этом старт струй (микроручей) в коде осуществляется с искусственно гладкой поверхности управляющей сетки, а их параметры предполагаются известными и могут быть найдены из двумерного расчета отдельной микропушки. (Микропушки, формирующие струи исключаются из трехмерного расчета)

Для расчета электрических полей в MBGUN используются сеточный метод решения уравнения Пуассона на сетке в цилиндрической системе координат. По координатам R, Z шаги сетки одинаковые. На границах расчетной области считаются заданным либо потенциал, либо условие Неймана. Решение уравнения Пуассона $\Delta\varphi = -4\pi\rho$ строится путем искусственного выделения усредненного по угловой координате θ решения: $\varphi = \langle\varphi\rangle + \delta\varphi$, $\rho = \langle\rho\rangle + \delta\rho$. Где $\langle\varphi\rangle$ – усредненное по угловой координате θ решение уравнения с граничными условиями такими же, что и для φ ($\Delta\langle\varphi\rangle = -4\pi\langle\rho\rangle$). Решение трехмерного уравнения $\Delta\delta\varphi = -4\pi\delta\rho$ осуществляется с граничными условиями, получаемыми

из условий для φ , которые преобразуются в условия вида $\delta\varphi = 0$ или условия Неймана $\partial\delta\varphi/\partial\vec{n} = 0$. Решение сеточных уравнений для $\langle\varphi\rangle, \delta\varphi$ осуществляется методом линейной верхней релаксации. Выделение аксиально-симметричного решения позволяет устранить нелокальное разностное краевое условие на оси ($R = 0$), оно заменяется условием $\delta\varphi = 0$, что упрощает и облегчает процедуру расчета.

В приведенном способе решения вклад от $\delta\varphi$ можно рассматривать как поправку, которая может вычисляться с необходимой для задачи точностью. Во многих случаях точность вычисления $\delta\varphi$ может быть понижена без ущерба для полного решения, что также ускоряет процедуру расчета.

Нахождение собственного магнитного поля многоструйного пучка реализовано в двух видах: 1) расчет в двумерной параксиальной модели – используется метод циклической редукции для уравнения Пуассона в круге; 2) расчет в пренебрежении θ составляющей тока пучка. В этом случае задача расчета поля приводится к решению трехмерного уравнения Пуассона и решается аналогично уравнению для φ . Расчет магнитного поля в параксиальной модели более экономичен по памяти компьютера и удобен для ускорительных трубок.

Для моделирования пучка в MBGUN используется гидродинамическая модель трубок тока с одной стержневой траекторией вдоль трубки. Интегрирование уравнений движения осуществляется по схеме типа предиктор-корректор. Самосогласованное решение всей электронно-оптической задачи строится методом последовательных приближений с релаксацией токов и зарядов.

Входными данными MBGUN для траекторной части являются следующие параметры струй (микроручей): координаты центра, направление старта, энергия, ток, диаметр, угол сходимости (расходимости) микроручей и перепад плотности тока по микроручу (аппроксимируется параболой). Возможными режимами расчета являются режим заданных параметров и режим декомпозиции. В первом случае стартовые параметры микроручей задаются постоянными и остаются неизменными в процессе всего расчета. В режиме декомпозиции они представляются в виде функций от электрического поля на стартовой поверхности в центре микроруча

$$D = D(E), \quad I = I(E), \quad \alpha = \alpha(E).$$

В процессе расчета (на каждой итерации) осуществляется постоянная “подстройка” решения согласно этим зависимостям. Стартовые параметры микроруча как функции поля находятся из двумерных расчетов отдельной микроручки. Расчет этих функций осуществляется в два этапа (рис.1). На первом этапе решается прямая задача (рис.1А). На управляющей сетке задается потенциал U_C , а замыкание расчетной области осуществляется введением плоского электрода с потенциалом $U_E > U_C$ на расстоянии, равном двум трем диаметрам отверстия сетки. Затем, на втором этапе, пучок с найденными параметрами на

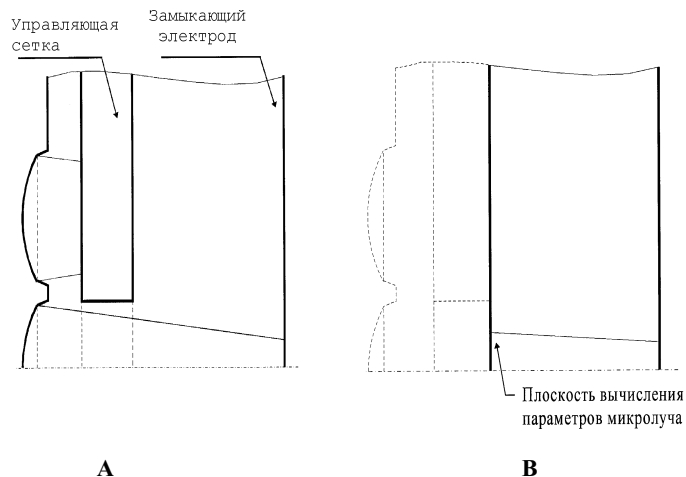


Рис. 1. Схема прямого и обратного расчетов микропушки.

плоском электроде “пускается” в обратную сторону, но уже в другой геометрии, моделирующей поверхность старта (рис.1В).

По найденным таким образом нескольким отдельным точкам (при варьировании U_E) и строятся путем интерполяции искомые функции. Основным смыслом построения этих функций заключается в том, что они задают некоторые эквивалентные стартовые параметры микролуча такие, что на небольшом расстоянии от искусственно гладкой поверхности сетки микролуч с этими параметрами как бы переходит в реальный, т.е. сформированный реальной микропушкой. Таким образом режим декомпозиции позволяет построить полностью самосогласованное решение для многоструйной пушки, учитывающее свойства микропушки.

В отличие от большинства электронно-оптических программ в MBGUN использован “случайный” по координатам старт трубок тока, т.е. в пределах каждого микролуча начальные координаты трубок тока распределяются с помощью датчика псевдослучайных чисел. Построенное вначале распределение не остается постоянным на протяжении всего расчета, а изменяется при переходе от одной итерации к другой, сохраняя только макрохарактеристики микролучей (ток, угол сходимости микролучей и т.д.).

Поскольку довольно трудно указать прямые трехмерные тесты для класса задач решаемых MBGUN, код тестировался по отдельным модулям. Тесты для полевой части проводились на двух, трехмерных электромагнитостатических задачах имеющих аналитическое решение: задача о точечных зарядах внутри проводящей сферы, задача с одной или несколькими тонкими бесконечными нитями (тока или заряда) внутри проводящего цилиндра.

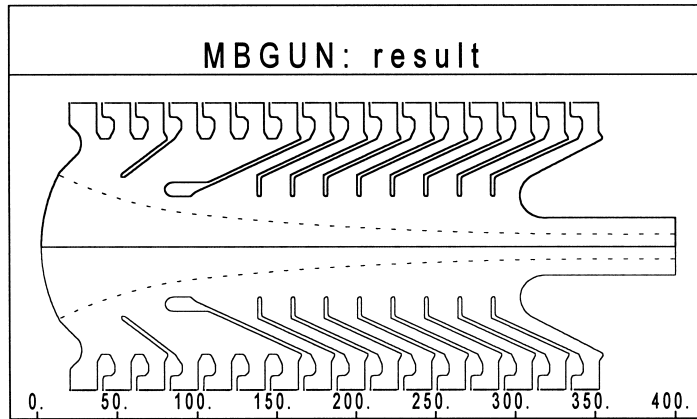
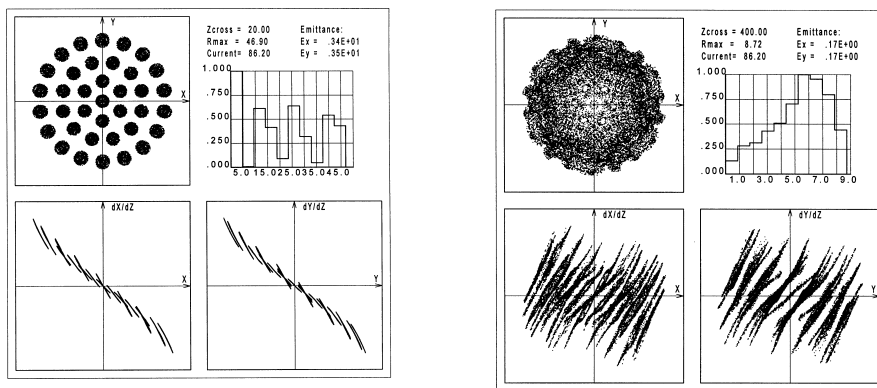


Рис. 2. Огибающая пучка в ускорительной трубке клистрона ВЛЭПП (оптимизированный вариант, $U = 500$ кВ).



$Z = 20$

$Z = 400$

Рис. 3. Сечение пучка в плоскости $z = 20$ и $z = 400$, его фазовый портрет и усредненное по углу распределение плотности тока.

Траекторная часть кода проверялась на задачах движения частиц в заданном поле. Также было проведено тестирование на двумерных задачах о расширении аксиально-симметричного пучка в свободном пространстве.

Пример расчета кодом MBGUN электронно-оптической системы клистрона ВЛЭПП приведен рис. 2–3. Электронный пучок ВЛЭПП клистрона формировался многоструйной пушкой в ускорительной трубке. Сравнение данных, полученных в расчетах, с экспериментальными данными показало хорошее их соответствие, что позволило использовать MBGUN для оптимизации оптики этого прибора.

Для расчетной сетки ~ 1 млн. узлов и числе трубок тока 6000 требуемая оперативная память MBGUN составляет 64 Мбт. Для нерелятивистских задач, а также для задач, в которых собственное магнитное поле пучка может рассчитываться в парааксиальном приближении, требуемая оперативная память может быть уменьшена до 16 Мбт. Характерное время расчета одного варианта оптики ВЛЭПП клистрона для Pentium II/400 при указанных здесь размерах сетки и трубок тока составляет 30–50 минут.

В следующем разделе этой главы описана двумерная программа DGUN (*Diode gun*), предназначенная для расчета интенсивных аксиально-симметричных электронных пучков и построенная с использованием программных модулей MBGUN. Код DGUN был развит специально как для решения специфических задач нахождения входных параметров микропушек для MBGUN, так и для расчета сложных оптических систем клистронов BINP PPM и Toshiba PPM.

Код DGUN имеет повышенные вычислительные ресурсы, адекватные современным персональным компьютерам. Расчетная сетка может достигать 500 тыс. узлов, число трубок тока – 1000. Для моделирования катода используется закон Ленгмюра для плоской или сферической поверхности. Реализованы специальные режимы для расчета входных параметров микропушек для кода MBGUN. Ввод внешних магнитных полей может быть сделан как по стандартной процедуре, т.е. по заданию магнитного поля на оси, так и путем использования сеток полей. Сетки магнитных полей (до 5 сеток по 50 тыс. узлов) могут быть рассчитаны известными программами Poisson, Pandira из пакета LANL (Los Alamos). При этом выходной файл этих программ одновременно является и входным для DGUN.

Код DGUN реализован под Windows, Windows NT имеет интерактивный графический интерфейс, а также возможность пакетного счета задач. Характеристикой возможностей DGUN, а также точности получаемых с ее помощью решений могут служить реально разработанные электронно-оптические системы клистронов BINP PPM и Toshiba PPM, рассматриваемые далее. Так, например, легко контролируемый в эксперименте параметр – первеанс пушки в этих приборах соответствует расчетному (DGUN) с точностью 1–2%.

Во второй главе приведены результаты численного анализа и экспериментальных исследований на постоянном напряжении релятивистской многоструйной пушки клистрона ВЛЭПП.

Глава начинается с описания схемы формирования пучка в клистроне (рис. 4) и формулирования оптических проблем. Пучок клистрона формируется многоструйной пушкой в ускорительной трубке на напряжении до 1000 кВ. Катод (диаметр 120 мм) и управляющая сетка прибора имеют ячеистую структуру и представляют собой набор из 37 рядом расположенных микропушек. Для уменьшения температуры управляющей сетки и тем самым для подавления с нее паразитной эмиссии сетка была изготовлена из меди и имеет толщину 6 мм. Сформированный в ускорительной трубке пучок с током до 150 А далее при помощи двух магнитных линз согласовывался с Магнитной Периодической Фокусирующей Системой – МПФС (или РРМ – *Periodical Permanent Magnet*) клистрона, сделанной на постоянных магнитах. Диаметр пролетного канала клистрона равен 11 мм, т.е. суммарная компрессия электронного потока здесь превышает 100. Демонстрационные эксперименты, выполненные ранее на установке ЭЛИТ Л2 (ИЯФ, г. Новосибирск) при питании ускорительной трубки импульсным высоким напряжением от трансформатора Тесла, показали принципиальную возможность получения высокой выходной мощности (40–70 МВт) в клистроне. Однако ток пучка, соответствующий минимальному эмиттансу и соответственно наилучшему токопрохождению через пролетный канал клистрона, оказался в этих экспериментах примерно вдвое меньше, чем ожидалось, а величина токопрохождения составляла 80–85%.

Далее обсуждается выбор структуры многоструйного пучка или схемы расположения микролучей (струй) в многоструйной пушке на управляющей сетке. На основе расчетов MBGUN показано, что расположение микролучей по

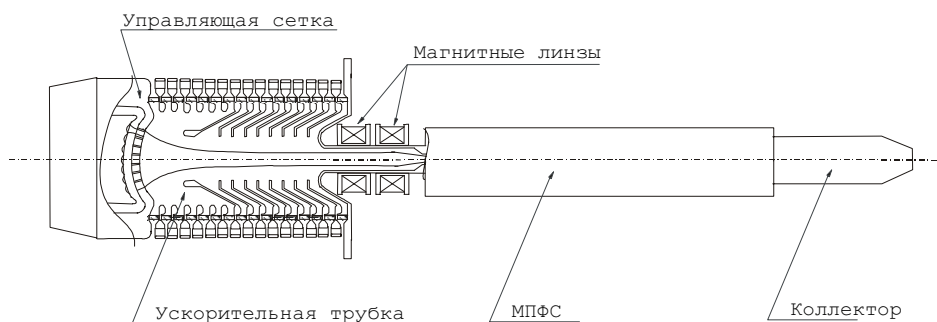


Рис. 4. Схема электронно-оптической системы клистрона ВЛЭПП.

схеме максимального заполнения является наилучшим. В этом случае пучок, формируемый многоструйной пушкой, имеет на выходе из системы формирования наименьший эмиттанс и более пригоден для использования в клистроне. Приводится сравнение со схемой расположения струй так называемого сбалансированного потока, предложенной в литературе.

В следующем разделе приведены результаты численного анализа конфигурации электродов трубки и геометрии микропушек, формирующих струи. Введено понятие оптимального тока и оптимального первеанса многоструйной пушки, соответствующих минимальному эмиттансу сформированного пучка. Рассмотрены пути их повышения. Показано, что эти величины могут быть повышены как за счет увеличения напряженности электрического поля на выходе из ячеек управляющей сетки, так и за счет оптимизации формы и размеров микропушек. Увеличение напряженности поля на выходе из ячеек сетки достигается изменением конфигурации электродов трубки. Поэтому повышение оптимального тока здесь ограничено сверху электрической прочностью трубки. Если увеличивать кривизну микрокатода и одновременно уменьшать зазор сетка–микрокатод, оптимальный ток тоже может быть увеличен. Однако в этом случае возрастает неоднородность распределения плотности тока по микрокатоду, что в пределе приводит к выходу на предельные по эмиссии катода режимы. На основе проведенного анализа был разработан вариант оптики многоструйной пушки с большим, примерно в 2 раза, оптимальным током (первеансом). Также показано, что для рассматриваемых задач оптимальный первеанс многоструйного пучка является величиной близкой к константе (в релятивистской области энергий). На рис. 5 показан итог численной оптимизации оптики клистрона ВЛЭПП. Здесь изображены зависимости выходного эмиттанса на выходе ускорительной трубки от тока пучка для первоначального варианта №1 и оптимизированного – №5. (Аксептанс пролетного канала клистрона составляет ≈ 400 мм · мрад, поэтому увеличение минимума эмиттанса для оптимизированного варианта можно рассматривать как слабое.)

Далее рассмотрен эффект перераспределения напряжения по ускорительной трубке в установках с постоянным напряжением. Рассмотрены установки СТЕНД 20, АТЛАНТ (филиал ИЯФ г. Протвино) с элегазовой изоляцией. Установка СТЕНД 20 представляет собой прототип отдельного 5-метрового

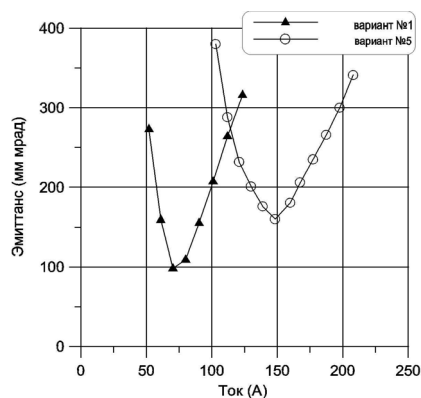


Рис. 5. Зависимость выходного эмиттанса от тока для вариантов оптики №1 и №5 ($U = 700$ кВ).

модуля высоковольтного питания клистрона ВЛЭПП. Принцип работы установки основан на частичном разряде высоковольтной накопительной линии на нагрузку (пучок клистрона). Установка АТЛАНТ была собрана из однотипных элементов, что и СТЕНД 20, однако в качестве накопителя энергии в ней использовалась собственная емкость каскадного умножителя напряжения, являющегося одновременно и источником высокого напряжения.

В момент прохождения импульса тока пушки в установках происходит подгрузка высокого напряжения. Из-за наличия емкости электродов трубки на землю (стенку бака) возникающее частичное перераспределение напряжения по трубке становится сильно нелинейным. Этот эффект в итоге приводит к уменьшению напряженности электрического поля на управляющей сетке, что уменьшает оптимальный ток (первеанс) многоструйного пучка. Получены реальные оценки этого эффекта для обеих установок. Показано, что оптимальный первеанс уменьшается при повышении энергии формируемого пучка. Величина поправки на значение оптимального первеанса находится в пределах 5–7%. Показано, что введение дополнительного внешнего электрода, располагаемого вокруг ускорительной трубки в элегазе, позволяет не только ослабить этот эффект, но изменить его знак.

В следующем разделе приведены результаты экспериментального исследования многоструйной пушки на постоянном напряжении. С целью уменьшения ореола в многоструйном пучке была проведена оптимизация оптики микропушек. В окончательном варианте у катодов микропушек, формирующих струи, была улучшена краевая заделка, т.е. сделана более близкой к пирсовской. При этом матрица микрокатодов изготавливалась из титана, имеющего антиэмиссионные свойства. Каждый микрокатод в этой схеме имел собственный подогреватель, что в итоге понизило мощность накала пушки на 30%. Все эти меры позволили увеличить токопрохождение через пролетный канал клистрона с РРМ фокусировкой с 85 до 95%, т.е. понизить токооседание примерно втрое.

Для оценки свойств сформированного многоструйной пушкой пучка кроме прямого измерения токопрохождения через пролетный канал клистрона использовались также измерения токопрохождения через толстую графитовую диафрагму. Как видно на примере (рис. 6–7), кривая токопрохождения через диафрагму хорошо коррелирует с токопрохождением через канал клистрона с РРМ фокусировкой и позволяет надежно оценивать как оптимальный ток (по середине области плато на кривых), так и ожидаемую величину токопрохождения в клистроне. Было исследовано несколько типов электронно-оптических систем. Анализ экспериментальных результатов показывает хорошее их соответствие расчетам. В итоговом варианте многоструйной пушки с улучшенной конструкцией микропушек и повышенным первеансом получен пучок с энергией 700 кэВ и импульсной мощностью около 100 МВт (рис. 8). Достигнутая мощность примерно на порядок превышает мощность в пучке в известных клистро-нах с сеточным управлением.

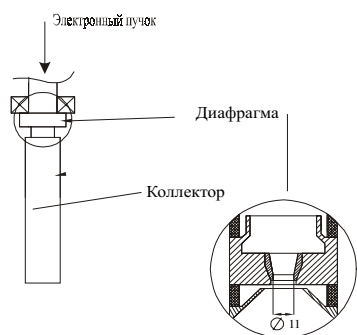


Рис. 6. Схема измерений с графитовой диафрагмой.

С учетом поправок на перераспределение напряжения по ускорительной трубке точность вычисления (предсказания) оптимального тока (первеанса) пучка кодом MBGUN находится в пределах 5–7%.

В третьей главе приведены результаты разработки и исследований электронно-оптических систем РРМ клистронов с диодными пушками (BINP РРМ и Toshiba РРМ). Разработка электронно-оптических систем этих приборов была выполнена автором в ФИЯФ (Протвино) в рамках коллаборации с КЕК (Япония) по проекту JLC. В первом разделе описана диодная пушка с повышенной сходимостью пучка (500–600):1, формирующая пучок в ускорительной трубке для BINP РРМ клистрона (рис. 9). При рабочем напряжении 550 кВ и токе 380 А максимальная плотность тока на катоде пушки не превышает 4 А/см^2 и меньше почти вдвое, чем в аналогичных приборах. Отмечается, что понижение плотности тока на катоде позволяет рассчитывать на увеличение ресурса работы прибора, однако при повышении компрессии начинают возрастать трудности, связанные с повышением чувствительности формируемого пучка к качеству исполнения пушки, т.е. к качеству катода, однородности

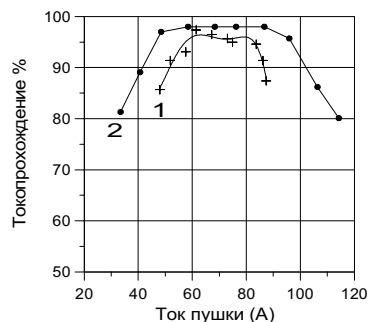


Рис. 7. Зависимости токопрохождения через РРМ канал клистрона (1) и графитовую диафрагму (2) $U = 600 \text{ кВ}$. (1) – измерения на СТЕНД 20, (2) – измерения на АТЛАНТ.

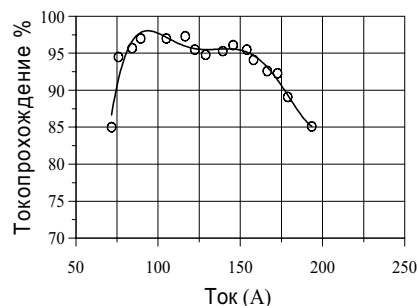
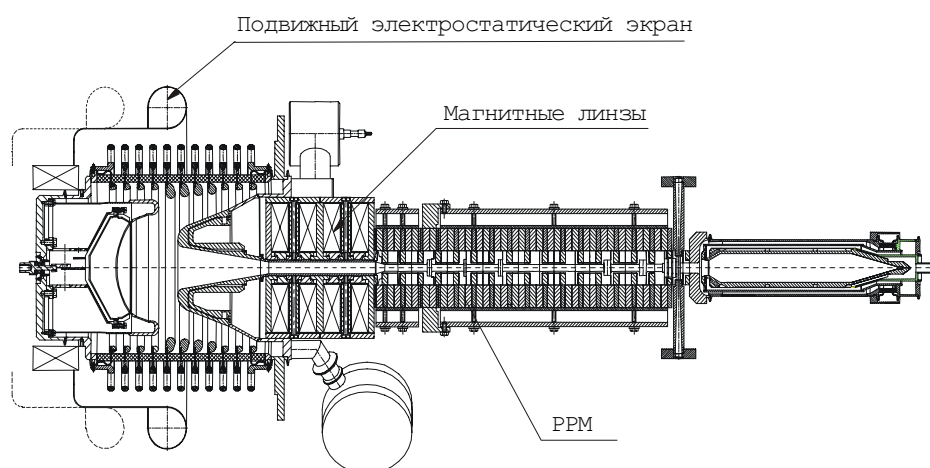


Рис. 8. Токопрохождение через графитовую диафрагму для оптимизированного варианта ($U = 700 \text{ кВ}$).

эмиссии, разного рода ошибкам и неточностям сборки. В условиях промышленного производства, совершенно необходимого из-за большого количества клистронов в линейном коллайдере, этот фактор является крайне нежелательным. Поэтому в существующих и развиваемых в настоящее время клистронах компрессия электронного пучка (по площади) невелика и не превышает величины ≈ 150 (150:1).

Необходимым условием для повышения компрессии является развитие пушек, менее чувствительных к точности сборки, чем стандартные, а также допускающих коррекцию полученных пучком возмущений в случае их появления. В рассматриваемой пушке эти качества обеспечиваются следующими элементами: подвижный электростатический экран, новая краевая заделка катода, пара разборных магнитных линз по типу “зажим” (clamp-on) для согласования и коррекции возможных возмущений пучка на входе в PPM канала клистрона.



Частота	11.424 ГГц	Напряжение	550 кВ
Выходная мощность	77 МВт	Ток пучка	377 А
КПД	38 %	Диаметр катода	120 мм
Усиление	63-68 dB	Период PPM	52 мм
Полоса	40 МГц		

Рис. 9. Схема и основные параметры VINP PPM клистрона.

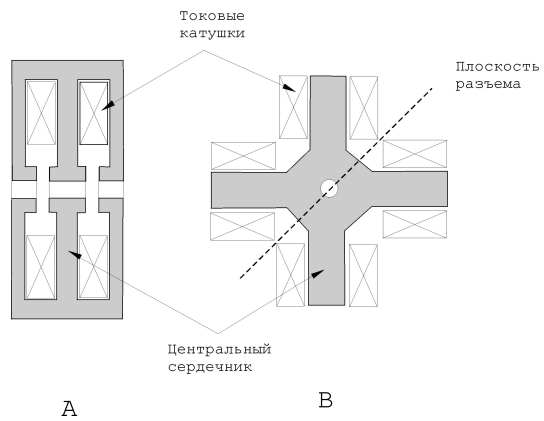


Рис. 10. Схема размещения токовых обмоток в реверсной разборной магнитной линзе.

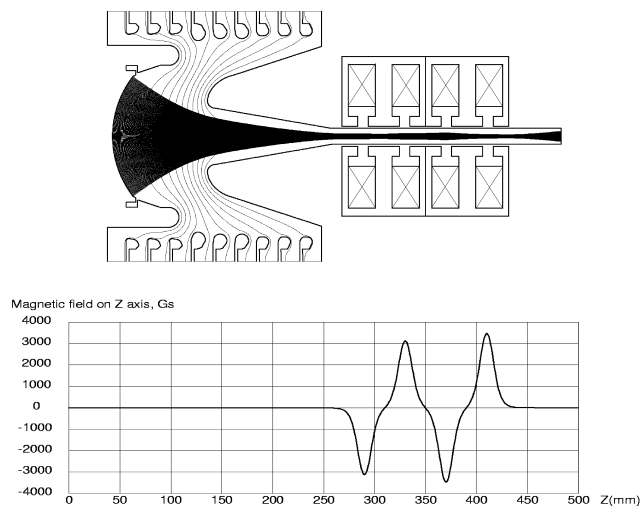


Рис. 11. Траектории пучка в пушке и магнитном поле реверсных линз (расчет DGUN).

Для ослабления эффекта возмущения пучка на кромке катода между катодом и прикатодным фокусирующим электродом установлено дополнительное кольцо. Кольцо непосредственно крепится прямо к катоду, является продолжением пирсовской заделки и расположено на очень малом от него расстоянии (0.15–0.2 мм), при этом второй тепловой зазор между кольцом и прикатодным фокусирующим электродом является невозмущающим. Допуск на него при сборке пушки не является критическим.

Для согласования пучка с полем РРМ использовались две линзы нового типа – реверсные разборные линзы (рис.10-11). Линзы формируют аксиально-симметричное поле с реверсом поля и могут быть сделаны по типу “зажим” (clamp-on). Как видно, конструкция линз позволяет сделать линзу разборной, т.е. состоящей из нескольких частей, легко стыкуемых на клистроне. Укажем также, что использование обычных аксиально-симметричных линз требует намотки катушек прямо на приборе, что при характерной потребляемой мощности в несколько сот ватт делает их использование неудобным для больших промышленных серий. Использование пары линз позволяет легко согласовывать пучок как в случае его коррекции, так и в случае присутствия в пучке небольших возмущений.

Далее обсуждаются результаты измерений размера сформированного пучка при помощи двух графитовых рамок, а также факторы, вызывающие возмущения пучка. В измерениях пучок проходил сквозь рамки, которые при их перемещении могли касаться границы пучка. Отмечается, что в месте, примерно соответствующем входу в пролетный канал клистрона с РРМ фокусировкой, легко достигался пучок размером 4–12 мм. При этом возмущающими факторами являлись магнитное поле нагревателя пушки и недостаток мощности накала пушки. Устранение этих факторов обеспечивает отсутствие ореола в пучке и формирование пучка с резкой границей. В найденных режимах в пролетной трубе клистрона получен пучок с рекордной для этого класса приборов мощностью более 200 МВт (550 кВ, 377А) при токопрохождении, близком к 100%. Величина токооседания в трубе клистрона находится на уровне 1% и лежит в пределах ошибки измерений.

В следующем разделе приведены результаты разработки электронно-оптической системы Toshiba РРМ клистрона. Электронный пучок клистрона формируется в диодной пушке типа Пирса при напряжении 480 кВ и токе 266 А (рис.12). Обсуждается главная особенность этой электронно-оптической системы – возможность управления сечением (диаметром) пучка в пролетном канале. Равновесный диаметр пучка в пролетном канале клистрона может изменяться примерно в 1.5 раза (рис.13), при этом пульсации огибающей пучка остаются минимальными (<5-6%). Режим перестройки диаметра пучка достигается в простейшей схеме – при помощи катодной катушки, создающей небольшое магнитное поле на катоде, и согласующей реверсной разборной линзы, выпол-

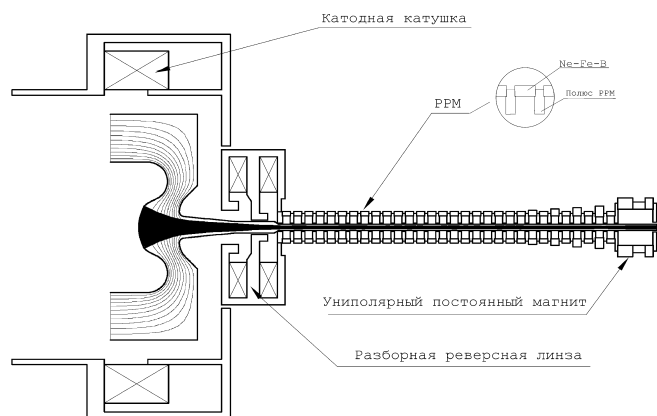


Рис. 12. Общий вид электронно-оптической системы Toshiba PPM клистрона (DGUN расчет).

няемой по типу “зажим”(clamp-on). При этом функцию задания равновесного размера пучка выполняет катодная катушка, а режим согласования с малыми пульсациями обеспечивается линзой. Класс решений для такой простейшей схемы довольно узок и был найден после численной оптимизации всей электронно-оптической системы как целое.

Далее показана возможность коррекции оптики пучка за счет маломощной аксиально-симметричной катушки располагаемой внутри согласующей линзы.

Затем приведены результаты экспериментов с клистроном, выполненные в КЕК (Япония). Показана возможность оперативной настройки КПД клистрона и токопрохождения в динамическом режиме за счет изменения размера пучка. В экспериментах при варьировании размера пучка в рабочем диапазоне (рис.13) выходная ВЧ-мощность клистрона изменялась в пределах 30%. При этом токооседание в пролетной трубе изменялось в пределах процента. По отношению к проектной точке подстройка размера пучка позволила увеличить мощность ВЧ на 5–7%. На напряжении 514 кВ в Toshiba PPM клистроне была получена мощность 72 МВт, при этом электронный КПД составил 47%.

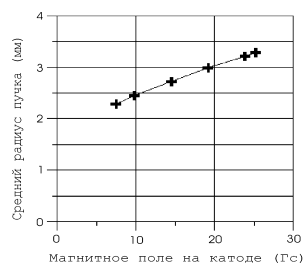


Рис. 13. Зависимость среднего радиуса пучка в канале Toshiba PPM клистрона от магнитного поля на катоде. (рабочий диапазон)

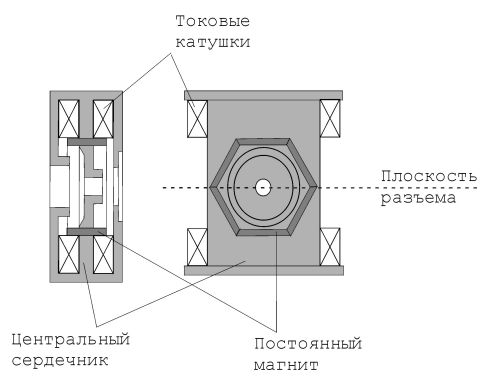


Рис. 14. Схема гибридной линзы.

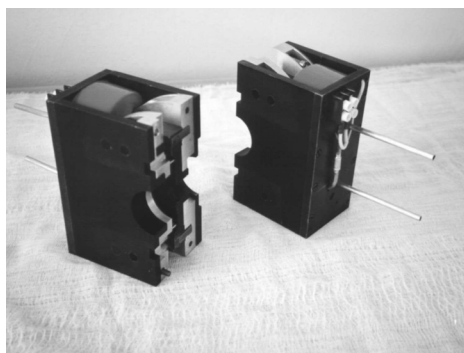


Рис. 15. Общий вид 2-составных модулей гибридной линзы Toshiba

Возможный разброс в характеристиках постоянных магнитов линзы (~5–10%) также перекрывается этим диапазоном изменения магнитного поля. Укажем также, что потребляемая мощность обычной реверсной разборной линзы в Toshiba PPM клистроне составляет около 1 кВт (в рабочей точке для 480 кВ).

Заключение

1. Предложен и развит в виде кода MBGUN (Multi-Beam Gun) метод расчета многоструйных электронных пушек на основе эквивалентной модели трехмерного интенсивного многолучевого релятивистского пучка в аксиально-симметричной системе электродов пушки. Разработаны сеточные алгоритмы

Далее в следующем разделе описан новый тип линз – гибридные линзы, сочетающие в своей конструкции постоянные магниты и токовые катушки. По структуре фокусирующего магнитного поля эти линзы являются полным аналогом реверсных разборных линз, однако потребляемая мощность в обмотках линзы может быть сделана значительно меньше для всех режимов работы клистрона. Конструкция этих линз также основана на принципе “зажим” (рис.14–15), причем структура фокусирующего поля полностью идентична структуре поля реверсной разборной линзы. Применительно к линзе Toshiba PPM клистрона оценка на основании численных расчетов показала, что использование гибридной линзы дает по меньшей мере 10-кратное снижение энергопотребления. Это же подтвердила экспериментальная конструкция гибридной линзы, обеспечившая при потребляемой мощности менее 80 Вт изменение амплитуды фокусирующего поля в пределах 80% ($V_{max}/V_{min} \approx 1.8$). Такой диапазон, в свою очередь, позволяет оптимизировать токопрохождение в приборе в диапазоне напряжений ~250–600 кВ.

расчета трехмерных электрических и магнитных полей в цилиндрической системе координат с искусственным выделением усредненного по угловой координате решения, способствующие упрощению расчета. Показана и реализована возможность построения полностью самосогласованных решений для многоструйной пушки путем параметрического сшивания двумерных численных решений для отдельной микропушки, формирующей струю, и многоструйного потока в целом. На основе практических расчетов показано, что MBGUN обеспечивает достаточно высокую скорость решения задач (например, для 37-струйной пушки клистрона ВЛЭПП – около 40 мин. на Pentium II/450), при этом получаемые результаты значительно лучше соответствуют эксперименту, чем аналогичные по двумерным моделям.

2. Проведен численный анализ оптики релятивистской многоструйной пушки, формирующей пучок в ускорительной трубке для мощного РРМ клистрона ВЛЭПП. Введены понятия оптимального тока и первеанса, соответствующие минимальному эмиттансу сформированного пучка. Показано, что минимальный эмиттанс сформированного пучка уменьшается при увеличении коэффициента заполнения многоструйного потока. Сделан вывод о предпочтительности расположения струй на управляющей сетке по схеме максимального заполнения. Установлено, что оптимальный ток пушки может быть повышен как путем увеличения напряженности электрического поля вблизи поверхности управляющей сетки за счет изменения конфигурации электродов, так и путем оптимизации формы и размеров микропушек, формирующих струи. Повышение оптимального тока ограничено сверху электрической прочностью трубки и увеличением неоднородности плотности тока по микрокатодам струй. С учетом указанных выше факторов разработан вариант оптики многоструйной пушки с повышенным оптимальным током (первеансом) примерно в 2 раза большим, чем существовавший первоначально.

3. Аналитически исследован эффект перераспределения напряжения по ускорительной трубке в установках с постоянным напряжением, используемых для высоковольтного питания клистрона ВЛЭПП. Показано, что подгрузка напряжения (уменьшение напряжения), возникающая в момент прохождения импульса тока, распределяется весьма нелинейно по ускорительной трубке, что приводит к снижению оптимального тока многоструйной пушки. Получена количественная оценка этого эффекта. Указаны возможные пути его устранения.

4. Экспериментально исследовано несколько вариантов оптики релятивистской многоструйной пушки (п.2) на установках с постоянным напряжением. За счет улучшения конструкции микропушек, формирующих струи, токооседание в пролетном канале клистрона с РРМ фокусировкой уменьшено примерно втрое (при суммарной компрессии пучка более 100). Установлено, что расчет с помощью кода MBGUN позволяет предсказывать оптимальный ток (первеанс) с погрешностью не более 5–7% по отношению к эксперименту. В итоговом вариан-

те многоструйной пушки с улучшенной конструкцией микропучек и повышенным оптимальным первеансом (п.2) реализован пучок с энергией 700 кэВ и импульсной мощностью около 100 МВт. Достигнутая мощность примерно на порядок превышает мощность в пучке в известных клистронах с сеточным управлением (при постоянном напряжении) и является экспериментальным подтверждением возможности использования сеточного управления в клистронах для линейных коллайдеров.

5. Разработана и исследована диодная пушка с повышенной компрессией пучка для VINP PPM клистрона, формирующая пучок в ускорительной трубке. Показана возможность осуществления простой коррекции оптики пучка за счет изменения положения электростатического экрана, располагаемого вокруг трубки. Апробирована новая краевая “заделка” катода, ослабляющая требования к точности сборки катодного узла, и схема согласования пучка в виде дуплета разборных магнитных линз типа “зажим”(clamp-on), допускающая коррекцию параметров пучка на входе в PPM. Проведены измерения размера сформированного пучка и найдены режимы, надежно обеспечивающие высокое токопрохождение в клистроне. В пролетной трубе клистрона реализован пучок с рекордной для этого класса приборов мощностью более 200 МВт (550 кВ, 377А) и токооседанием на уровне 1%. Суммарная компрессия пучка в приборе составляет (500–600):1, при этом максимальная плотность тока на катоде пушки почти вдвое меньше, чем в аналогичных приборах и не превышает 4 А/см^2 .

6. В рамках разработки Toshiba PPM клистрона показана возможность создания оптической системы клистрона, которая обеспечивает управление поперечным сечением (диаметром) пучка в пролетном канале и одновременно построена в простейшем виде – с одной согласующей магнитной линзой типа “зажим” (clamp-on) и катодной катушкой. При этом равновесный диаметр пучка в пролетном канале может изменяться примерно в 1.5 раза, а пульсации огибающей пучка не превышают (согласно расчетов) 5-6%. Пучок с изменяющимся диаметром позволяет проводить дополнительную и эффективную “подстройку” токопрохождения в динамическом режиме и выходной ВЧ-мощности (КПД) клистрона, что подтверждено в экспериментах, выполненных в КЕК.

7. Предложен новый тип согласующих магнитных линз типа “зажим” (clamp-on) – гибридные линзы. В конструкции используется комбинация постоянных магнитов и токовых катушек, что обеспечивает пониженное энергопотребление линзы. Теоретически показано, что использование гибридной линзы в случае Toshiba PPM клистрона обеспечивает по меньшей мере 10-кратное снижение энергопотребления. Разработана и исследована реальная конструкция линзы, экспериментально подтвердившая результаты расчетов.

Список литературы

1. C. Adolphsen, V. Balakin, Y. H. Chin . A. Larionov et al. Charter 5 X-band RF Power Source. - International Study Group Progress Report on Linear Collider Development // KEK Report 2000-7, SLAC R-559, April, 2000, pp. 150-172.
2. L.N. Arapov, P.V. Avrakhov, V.E. Balakin, ...A.V. Larionov et al. "High Power Sources for VLEPP". – In: Proc. Pulsed RF Sources for Linear Colliders, Montauk, NY october , 1994, pp.118-121.
3. Ларионов А.В. Программа для численного моделирования транспортировки неаксиально-симметричных электронных пучков в протяженных каналах. Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 90-19, Новосибирск, 1990.
4. Larionov A. Optic of VLEPP klystron- calculations and experiment. - Proc. of International Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF ' 93), Dubna-Protvino, Russia, 1993, pp. 111-118.
5. Л. Н. Арапов, В.Е. Балакин, Ю.Г. Бамбуров, ... А.В. Ларионов и др. Разработка высокочастотного источника ВЛЭПП. – Труды XII Всесоюзного Совещания по Ускорителям Заряженных Частиц. Дубна, 1992, т.2, с.30-34
6. А.В. Ларионов. MBGUN – специальный 3D-код для численного моделирования сеточных многолучевых пушек. Препринт ФИЯФ 94-1, Протвино, 1994.
7. A. Larionov, K. Ouglekov "DGUN- code for simulation of intensive axial-symmetric electron beams". - 6th International Computational Accelerator Physics Conference, TU Darmstadt, Germany, 2000, p.172.
8. V.E.Balakin, Y.Y. Chibukov, V.M.Fursa, A.V. Larionov, Y.R. Yakubov "Investigation of optical system for multy-beam gridded klystron"ю – In proc. Sixth International Workshop on Linear Collider (LC95), Tsukuba, Japan,1995, pp.1010-1017.
9. V.A.Alexandrov, P.V. Avrakhov, V.E.Balakin,...A.V.Larionov et al. "VLEPP DC voltage grid controlled klystron. Test facility and experimental results". – In proc. Sixth International Workshop on Linear Collider (LC95), Tsukuba, Japan,1995, pp. 987-993.
10. V.E. Balakin, Yu.D. Valyaev, A.V.Larionov et al "Multi-Beam Gridded Gun with Increased Perveance". - In Proc. of the Third Workshop on Pulsed RF Sources for Linear (RF96), Kandagava, Japan, 1996, pp. 156-160.
11. В.Е. Балакин, В.Ф. Ключев, Г.И. Кузнецов, А.В. Ларионов, Н.Г. Хавин, Г.И.Яснв. Отработка элементов электронно-оптической системы мощного релятивистского клистрона. – Труды 14 совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994, т.1, с. 230-235 .
12. В.Е.Балакин, Ю.Д. Валяев, А.В. Ларионов и др. Разработка электронно-оптической системы мощного релятивистского клистрона с сеточным

управлением. – Труды 15-го совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996, с 87-91.

13. V. Alexandrov, V. Balakin, A. Bazhan, ... A. Larionov et al. “Diode gun with an increased beam convergence for powerful PPM focused X-band klystron”. - In Proc. VII International Workshop on Linear Colliders (LC97), Zvenigorod, Russia, 1997, v.2, pp. 964-966.
14. P. Avrakhov, V. Balakin, V.Chashurin, ... A. Larionov et al. “Studies of a Powerful PPM Focused X-Band Klystron”. High Energy Density Microwaves, Pajaro Dunes, California, 1998, pp.51-58 . - Труды XVI совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1999, т.1, с.37-44.
15. Y.H.Chin, M. Akemoto, S. Matsumoto, ... A. Larionov et al. “Status of the X-band RF power source development for JLC”. – In: Proc. EPAC 2000, Vienna, 2000, pp. 456-458.
16. В.Е. Балакин, Ю.Д. Валяев, А.В. Ларионов и др. Разработка электронно-оптической системы Тошиба PPM клистрона. Препринт ИФВЭ 2001-6, Протвино, 2001.

Рукопись поступила 28 февраля 2001 г.

А.В. Ларионов.

Развитие электронно-оптических систем мощных импульсных клистронов для линейных коллайдеров.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 28.2.2001. Формат 60x84/16. Офсетная печать.

Печ.л. 1,42. Уч.изд.л.1.6. Тираж 100. Заказ 39. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

АВТОРЕФЕРАТ, 2001 –11, ИФВЭ, 2001
