

Состояние работ на установках со встречными пучками ВЭПП-2М и ВЭПП-4М Института ядерной физики СО РАН

С.И.Мишнев

Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск, Россия

Представлены результаты работы на установках со встречными пучками ВЭПП-2М и ВЭПП-4М за период 1996-98 гг. В данный период времени электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М работал в широком диапазоне энергий от 2×200 до 2×700 МэВ. Использование сверхпроводящего вигглера позволило набрать большой интеграл светимости, в частности, каждым из двух стоящих на коллайдере детекторов записано более 25 миллионов распадов ϕ -мезонов. В докладе обсуждается предстоящая модернизация коллайдера ВЭПП-2М, связанная с переходом на работу в режиме встречи круглых пучков, что позволит поднять светимость более чем на порядок.

Работа на комплексе ВЭПП-4М была связана в основном с освоением низкой для этого коллайдера области энергий от 2×700 до 2×1850 МэВ, запуском детектора КЕДР, физическими экспериментами на пучке "меченых" γ -квантов. Запущены первые каналы СИ на ВЭПП-4М, продолжалась регулярная работа с использованием СИ накопителя ВЭПП-3.

1. ВЭПП-2М

Установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2М (рис.1) начала работать на эксперимент с 1974 г. В 1987 - 1990 гг. установка подверглась модернизации, в результате которой была существенно улучшена инжекционная часть и установлены два новых детектора для проведения экспериментов по физике высоких энергий.

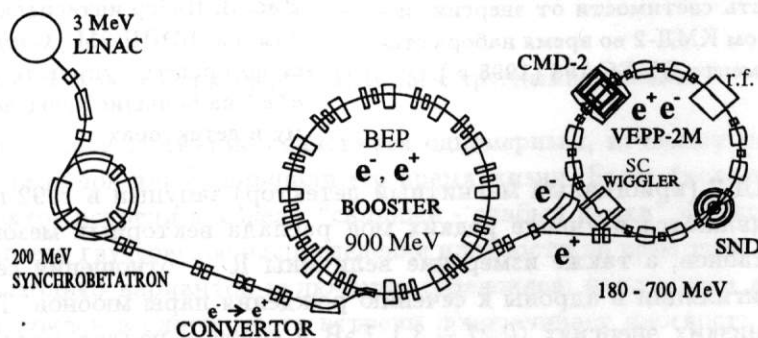


Рис. 1: Схема установки ВЭПП-2М.

Основные параметры коллайдера ВЭПП-2М:

- длина 18 м,
- рабочий диапазон энергий пучка $E = 180 \div 700$ МэВ,
- 1×1 сгусток; 2 места встречи,
- рабочие токи пучков ($E = 510$ МэВ): $I^+ = I^- = 50$ мА,
- максимальная светимость ($E = 510$ МэВ):
 $L_{max} = 4 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$
- максимальный параметр пространственного заряда ($E = 510$ МэВ):
 $\xi_{zmax} = .05; \xi_{xmax} = .02.$

В одном из промежутков коллайдера установлен сверхпроводящий 5-полюсный вигглер с максимальным полем $H_{WG} = 8$ Тл, создающий рост радиального эмиттанса пучка и радиационного затухания, что позволяет увеличить светимость и уменьшить внутрипучковое рассеяние.

Зависимость светимости (средней за время набора статистики на данной энергии) от энергии зарегистрирована на детекторе КМД-2 по событиям упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ на большие углы (рис.2). Вигглер был включен во время проведения эксперимента. Токи пучков и светимость в течение цикла набора статистики падали от начального максимального значения примерно в 1.5 раза, после чего производилась новая инжекция (рис.3). Светимость при больших токах меняется по закону $L \sim I_{пучка}$, поэтому ее величина, показанная на графике, приблизительно в 1.3 раза меньше максимальной для данной энергии.

На коллайдере установлены два детектора в противоположных промежутках, которые могут набирать статистику одновременно.

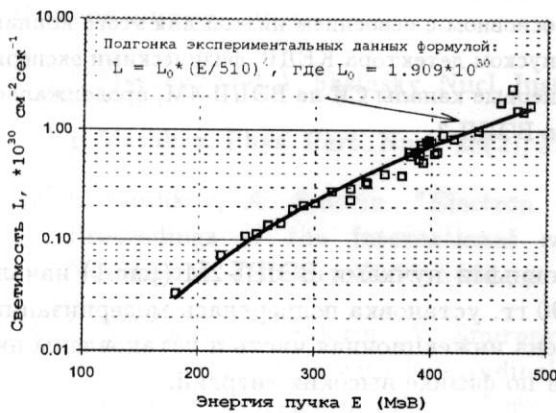


Рис. 2: Зависимость светимости от энергии, измеренная детектором КМД-2 во время набора статистики в эксперименте ОМЕГА98 (1998 г.).

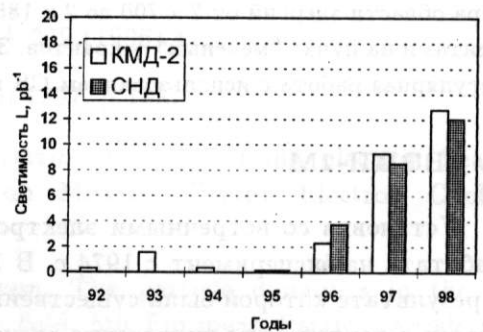


Рис. 3: Набор интеграла светимости по годам на ВЭПП-2М. Светимость измеряется по процессу упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ на большие углы, зарегистрированному в детекторах.

Детектор КМД-2 (криогенный магнитный детектор) запущен в 1992 г. Основными задачами КМД-2 являются изучение редких мод распада векторных мезонов, заряженных и нейтральных каонов, а также измерение величины R — отношения сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны к сечению рождения пары мюонов. Точное измерение величины R на низких энергиях ($0.27 \div 3.1$ ГэВ в системе центра масс) приобрело особую актуальность в настоящее время в связи с начавшимся в Брукхейвене экспериментом по прецизионному измерению аномального магнитного момента мюона, который должен определить вклад слабых взаимодействий в эту величину. Для этого необходимо правильно учесть вклад сильных взаимодействий, в котором определяющим оказывается именно знание величины R в указанной области сравнительно низких энергий [1].

Детектор СНД (сферический нейтральный детектор) начал работать в 1995 году. Главной частью этого детектора является 3-слойный электромагнитный калориметр на основе кристаллов $\text{NaI}(\text{TI})$, покрывающих телесный угол 90% от 4π . Эксперименты с детектором СНД в значительной степени ориентированы на изучение многофотонных конечных состояний распада ρ, ω, ϕ - мезонов. В 1997 г. на детекторе СНД был обнаружен новый класс электрических дипольных распадов ϕ -мезонов на $f^0\gamma$ и $a^0\gamma$. Результаты эксперимента сви-

детельствуют в пользу 4-кварковой модели легких скалярных частиц f^0 и a^0 [2]. Несколько позже такой же результат был получен на детекторе КМД-2.

ВЭПП-2М используется также как источник СИ для проведения исследований в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения ($\lambda = 500 \div 2 \text{ \AA}$); работают 5 экспериментальных станций.

Дальнейшая модернизация коллайдера ВЭПП-2М (рис.4) предполагает организацию работы с круглыми пучками в местах встречи [3]. Режим "круглых пучков" означает выполнение следующих условий:

- равные (и малые) β -функции в месте встречи $\beta_{x0} = \beta_{z0}$;
- равные поперечные эмиттансы, возбуждаемые независимо квантовыми флуктуациями излучения;
- бетатронные частоты либо равны при нулевой связи (нет расщепления частот): $Q_x = Q_z = Q_0$, либо отличаются на полуцелое число: $Q_1 - Q_2 = 0.5$ ("Мебиусная структура").

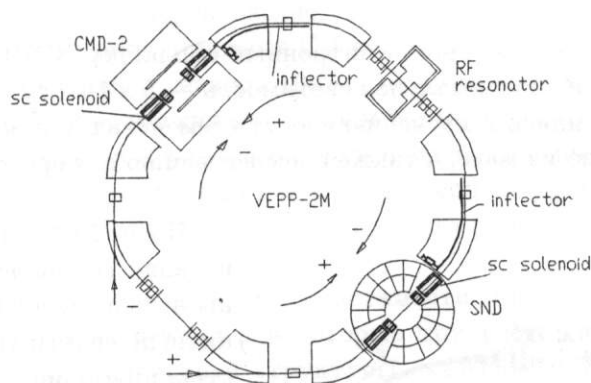


Рис. 4: Схема коллайдера ВЭПП-2М с круглыми пучками.

В результате поперечное движение становится одномерным, исчезают резонансы связи, которые раздували пучок или уменьшали его время жизни. Было проведено численное моделирование эффектов встречи в модели "сильный - слабый пучки" и в предположении, что сильный пучок имеет гауссовское распределение плотности по всем трем координатам. Рассматривалось несколько вариантов включения соленоидов; наилучшим признан вариант, когда пара соленоидов в одном месте встречи поворачивает плоскость бетатронных колебаний на 90° , а в противоположном месте встречи — на тот же угол в противоположном направлении (рис.5). Для сравнения показан расчетный эффект взаимодействия обычных для ВЭПП-2М плоских пучков.

Необходимые изменения в магнитной структуре предполагают замену квадрупольных дублетов в экспериментальных промежутках на сверхпроводящие соленоиды с полем около 9 Тл, уменьшения на 20% градиента в оставшихся квадруполях и доработки системы выпуска. В настоящее время большая часть необходимого оборудования изготовлена. Начало модернизации накопителя назначено на весну 1999 г. Расчетная светимость при энергии $E = 510 \text{ МэВ}$ $L \simeq 1 \times 10^{32}$ при токах пучков $I^+ = I^- = 180 \text{ мА}$.

В конце 1998 г. предполагается продолжить набор статистики на детекторах при энергии пучка выше 510 МэВ, так как после перехода к круглым пучкам эта область энергий будет недоступна для ВЭПП-2М.

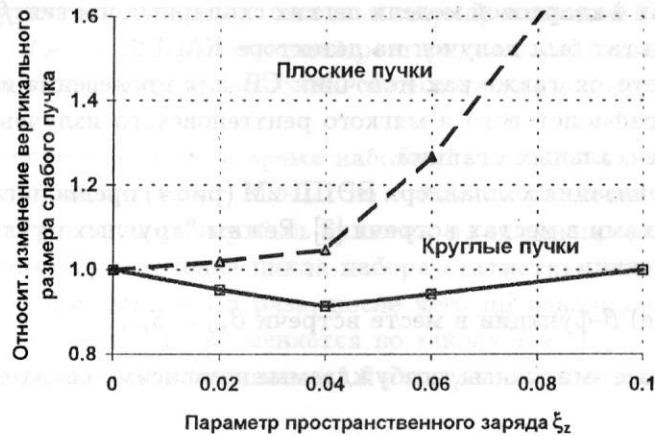


Рис. 5: Расчетное относительное изменение поперечного размера (радиуса) “слабого” пучка из-за взаимодействия с “сильным” пучком (для плоских пучков — изменение вертикального размера).

2. ВЭПП-4М

С 1980 г. в ИЯФ работал электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4. Его максимальная энергия достигала 5.3 ГэВ, максимальная светимость — $5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Главные физические результаты относились к изучению свойств семейства Υ -резонансов, в том числе к прецизионному измерению их масс, а также к исследованию двухфотонных взаимодействий e^+e^- .

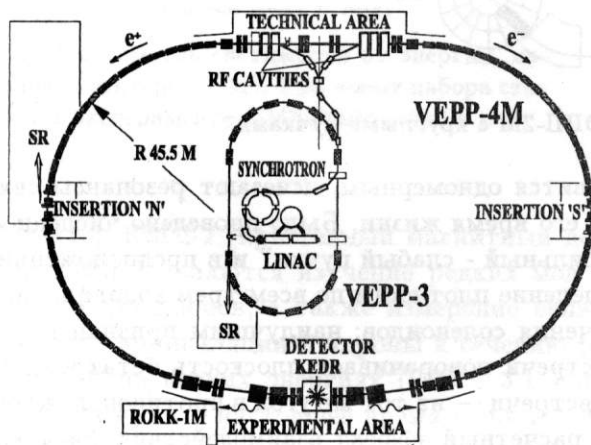


Рис. 6: Схема установки ВЭПП-4М.

После 1985 г. была проведена модернизация коллайдера, на нем установлены новый детектор КЕДР и новый магнитный спектрометр, являющийся частью прямолинейного промежутка коллайдера и позволяющий точно определить потери энергии электрона и позитрона после их двухфотонного взаимодействия в месте встречи; установка получила название ВЭПП-4М (рис.6).

Традиционно основным направлением деятельности ВЭПП-4М должно быть изучение области Υ -резонансов и одновременно набор статистики для двухфотонных процессов. Хотя по величине светимости ВЭПП-4М значительно отстает от работающего коллайдера CESR ($L_{max} = 6 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$)

и близких к запуску В-фабрик, все конкурирующие установки нацелены на работу с b-кварками, рождающимися при энергии в центре масс 10.58 ГэВ, в то время как лежащие ниже по энергии Υ -резонансы (9.46, 10.02 и 10.36 ГэВ) остаются недостаточно исследованными. Кроме того, наличие магнитного спектрометра позволяет с большой точностью фиксировать массу объектов, рождающихся в результате двухфотонных e^+e^- -взаимодействий, что делает ВЭПП-4М уникальной установкой в данной области экспериментов.

В последнее время возник интерес к проведению исследований на встречных пучках в низкой для ВЭПП-4М области энергий пучков — от 0.7 до 1.5 ГэВ — с целью максимально точного измерения величины $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ и возбужденных состояний векторных мезонов ρ^3 , ω^3 , ϕ^3 и т.д. Эта область энергий еще мало исследована; в настоящее время есть только один коллайдер ВЕРС (Пекин), работающий при близких энергиях.

Основные параметры коллайдера ВЭПП-4М:

- длина 366 м,
- частоты бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 8.54/7.58$,
- максимальная энергия пучка $E = 6$ ГэВ,
- 2×2 сгустка; 1 место встречи,
- рабочие токи пучков — до 20 мА,
- максимальная светимость (проект, $E = 5$ ГэВ): $L_{max} = 2 \times 10^{31} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$,
- в месте встречи: $\beta_z = .05$ м; $\beta_x = .75$ м; $D_x = .80$ м.

Для проведения экспериментов на встречных пучках на ВЭПП-4М установлен детектор КЕДР с продольным магнитным полем, основные компоненты которого: вершинный детектор, дрейфовая камера, черенковские счетчики на основе азрогеля, спинцилляционные времяпролетные счетчики, торцевые CsI-калориметры, калориметр на основе жидкого криптона, счетчики мюонов. С декабря 1997 г. по апрель 1998 г. детектор работал еще не в полной конфигурации, без магнитного поля и без калориметра на жидком криптоне. На нем была проделана некоторая работа по оптимизации фоновых условий, а также зарегистрирован J/ψ -резонанс ($E = 2 \times 1.55$ ГэВ), что позволило прокалибровать энергию пучка в ВЭПП-4М. В конце 1998 г. предполагается провести работу по полному комплектованию детектора.

Была проведена работа по получению светимости при энергиях пучка $1.0 \div 1.8$ ГэВ. В этой области энергий встретились некоторые трудности, связанные с тем, что остаточные поля в элементах магнитной структуры оказывают неблагоприятное влияние на стабильность и воспроизводимость рабочих режимов при изменении энергии. Кроме того, при низких энергиях уменьшаются декременты радиационного затухания и возрастает роль процессов внутривидового рассеяния.

Основными средствами воздействия на пучок были два дипольных вигглера с полями до 2 Тл, увеличивающие декременты радиационного затухания, энергетический разброс и эмиттанс пучка, а также два вигглера, имеющих магнитное поле и градиент на равновесной орбите, которые позволяли перераспределять декременты радиационного затухания. На рис.7 показаны экспериментальные данные по управлению радиальным размером пучка с помощью дипольных вигглеров. Пунктирная кривая — результат расчета для энергии 1 ГэВ.

Эксперименты по измерению светимости были выполнены в нескольких точках по энергии при максимально достижимых на этой энергии токах пучка (рис.8). Светимость измерялась по однократному тормозному излучению на частицах встречного пучка и по упругому рассеянию на малые углы. Поле дипольного вигглера оптимизировалось на каждой энергии. Приведенная для сравнения расчетная светимость определялась при неизменной магнитной структуре (в том числе поле вигглера уменьшалось пропорционально энергии), и предположении, что параметры пространственного заряда ξ_x, ξ_z не зависят от энергии, при этом расчетная светимость $L_{расч.} \sim E^4$. Экспериментальная зависимость светимости от энергии также получилась близкой к $L_{изм.} \sim E^4$, за исключением точки при $E = 1$ ГэВ, где, по-видимому, не были найдены оптимальные условия. Должно быть продолжено изуче-

ние этой точки, следует также попытаться продвинуться в область более низких энергий, вплоть до 0.7 ГэВ — сопряжения с максимальной энергией ВЭПП-2М.

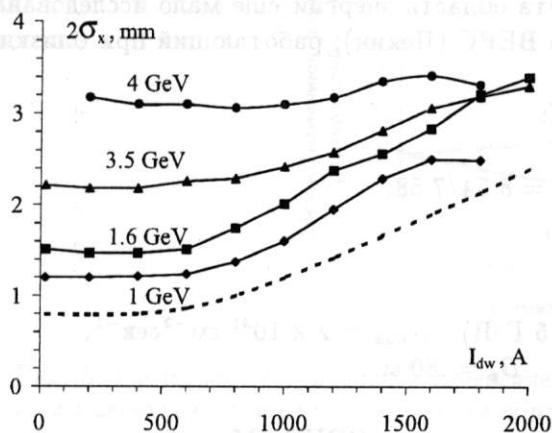


Рис. 7: Управление радиальным размером пучка с помощью дипольных вигглеров.

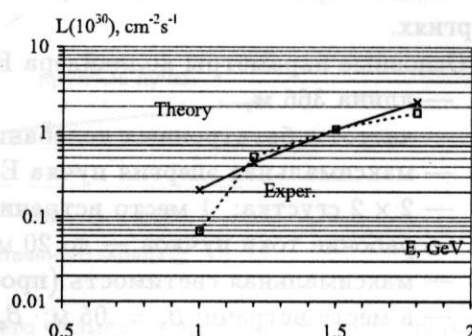


Рис. 8: Зависимость светимости от энергии (режим 2 × 2 сгустка).

Предполагается также в ближайшее время провести трекинговое моделирование эффектов встречи при условиях, соответствующих работе ВЭПП-4М при низких энергиях.

Другое направление деятельности ВЭПП-4М — работа с пучком γ -квантов, полученных путем обратного рассеяния лазерных фотонов на пучке релятивистских электронов в коллайдере (установка РОКК-1М) [4]. Основные параметры пучка γ -квантов: максимальная энергия $E_\gamma = 1.6$ ГэВ ($E_{\text{пучка}} = 6$ ГэВ); поток γ -квантов до 3×10^6 сек $^{-1}$. Энергия каждого γ -кванта может быть помечена с помощью магнитного спектрометра, измеряющего потерю энергии электрона, породившего этот квант. Диапазон энергий меченых γ -квантов от 2 до 61% от энергии электронного пучка; энергетическое разрешение $1 \div 3\%$ от энергии γ -кванта во всем диапазоне. Пучок обратнорассеянных γ -квантов имеет резкую верхнюю границу, зависящую от длины волны лазерных фотонов и энергии пучка; поскольку энергия γ -кванта коррелирована с углом его вылета относительно траектории пучка, коллимацией можно сузить энергетический спектр γ -квантов до $10 \div 25\%$ на половине высоты функции распределения. Можно работать также с пучком меченых γ -квантов тормозного излучения на атомах остаточного газа.

В последние годы сделано несколько серий экспериментов на пучке γ -квантов.

- Изучение фоторасщепления тяжелых и промежуточных ядер [5].
- Исследование нелинейных процессов квантовой электродинамики: было измерено эффективное сечение Дельбрюкковского рассеяния, и впервые наблюдался эффект расщепления фотона в кулоновском поле тяжелого ядра [6].
- Была проведена точная калибровка энергетического и пространственного разрешения элементов детекторов КЕДР (прототип калориметра на жидком криптоне) и BELLE, Япония (прототип калориметра на кристаллах CsI) [7].

На ВЭПП-4М начаты работы с использованием синхротронного излучения (СИ), для чего построен специальный экспериментальный зал; трассированы пучком СИ первые пять каналов, установлены две экспериментальные станции и проведены первые пробные эксперименты. Всего предполагается установить 14 каналов СИ и 20 экспериментальных станций.

Проведен ряд работ по изучению динамики пучка в ВЭПП-4М, в том числе исследование нелинейностей магнитной структуры, измерение динамической апертуры и ее коррекция [8], исследование поперечной неустойчивости пучка, связанной с импедансом вакуумной камеры и измерение распределения импеданса вдоль кольца [9].

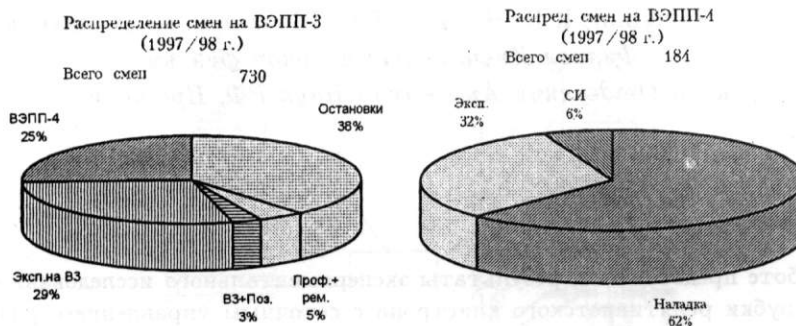


Рис. 9: Распределение времени в течение 1997/98 рабочего года (с 1 сентября 1997 г.) на установках ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Единицей учета времени считалась 12-часовая смена.

Накопитель ВЭПП-3 работает как инжектор, ускоряющий электроны и позитроны от 0.35 ГэВ до той энергии, которая нужна для коллайдера ВЭПП-4М (в диапазоне 1.0 ÷ 1.85 ГэВ). ВЭПП-3 имеет и самостоятельное значение: в последние 10 лет на нем были проведены эксперименты по изучению структуры дейтона на внутренней поляризованной мишени; по расщеплению тяжелых ядер пучком меченых γ -квантов; он работал как источник электронов для лазера на свободных электронах, генерирующего излучение в диапазоне длин волн 0.24 ÷ 0.7 мкм. Все это время он служил также источником СИ, на котором многочисленные группы вели работы по разнообразной тематике, относящейся к физике твердого тела, химии, биологии и т.д., а также литографии и LIGA-технологии.

В настоящее время (октябрь 1998 г.) коллайдер ВЭПП-4М выключен, так как разобран детектор КЕДР для установки недостающего оборудования. Накопитель ВЭПП-3 после летней остановки начал работу с пучком для потребителей СИ.

Список литературы

- [1] *CMD-2 Collaboration.* // Nuclear Physics A633 (1997), p. 268c.
- [2] *M.H.Achasov et al.* Proc. of the VII-th International Conference on Hadron Spectroscopy, Brookhaven, (1997), p. 26-35.
- [3] *V.V.Danilov et al.* Proc. EPAC'96, Barcelona (1996), p. 1149
- [4] *G.Ya.Kezerashvili et al.* Radiation of Relativistic Electrons on Periodical Structures (RREPS-97). International Symposium, September 7-12, 1997, Tomsk (accepted for publication at NIM-B).
- [5] *M.L.Terranova et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. v.24 (1998) 205-216.
- [6] *Sh.Zh.Akhmadaliev et al.* Photon-97. International Conference, Amsterdam, 1997.
- [7] *V.M.Aulchenko et al.* // Nucl. Inst. Meth. A379 (1996) p. 491.
- [8] *V.A.Kiselev et al.* Proc. EPAC'96, Barcelona (1996), p. 896.
- [9] *V.A.Kiselev et al.* Proc. EPAC'98, Stockholm (1998), p. 1005.

Исследование высоковольтной прочности секционированной ускорительной трубки релятивистского клистрона с сеточным управлением для VLEPP

В.Е. Балакин, В.Ф. Кузнецов, В.В. Сахаров, В.Е. Теряев, В.Ф. Фогель,
В.И. Чашурин, И.В. Чаюков, Т.С. Щепанюк, Ю.Р. Якубов
*Филиал Института ядерной физики
Сибирского Отделения Академии Наук РФ, Протвино, Россия*



В данной работе представлены результаты экспериментального исследования высоковольтной ускорительной трубки релятивистского клистрона с сеточным управлением, разрабатываемого в Филиале ИЯФ (Протвино).

Данная трубка внешним диаметром 205 мм состоит из 16 высоковольтных зазоров, изготовленных из алюминиевой керамики, и работает на постоянном напряжении. Проектное постоянное напряжение питания трубки до 1200 кВ. В работе кратко представлены экспериментальный стенд и методика измерений. Приводятся результаты испытаний каждого отдельного зазора ускорительной трубки и системы в целом. Также приведены экспериментальные данные по изучению высоковольтной прочности между электродами с вакуумной стороны трубки. Приведены экспериментальные значения максимальной напряженности на электродах, изготовленных из нержавеющей стали и бескислородной меди. Кратко описано влияние работающего катодно-сеточного узла на высоковольтную прочность.

Введение

Получение больших уровней СВЧ-мощности 100 МВт и более современные мощные СВЧ-приборы требуют увеличения мощности в электронном пучке. При этом желательно для увеличения КПД прибора уменьшать микропервеканс пучка, т.е. при сохранении мощности в пучке увеличивать его энергию. Современные мощные клистроны, разрабатываемые в SLAC и КЕК, работают при ускоряющем импульсном напряжении до 550 кВ. В ФИЯФ разрабатывается клистрон, работающий на постоянном напряжении до 1000 кВ [1]. В приборе применено сеточное управление пучком, что также позволяет увеличить эффективность его работы.

В клистроне используется секционированная ускорительная трубка для получения электронного пучка с требуемыми параметрами. В трубке используются ускоряющие электроды, изготовленные из нержавеющей стали. Внешняя сторона ускорительной трубки находится в баке с элегазом SF₆ под давлением 11 атм.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Полномасштабные испытания клистрона проводятся на стенде, который представляет собой 5-метровый модуль ускорителя. В проекте ускорителя VLEPP из таких модулей должна была состоять вся линейная часть ускорителя. Структурная схема стенда и его основные компоненты показаны на рис. 1. Основные технические характеристики стенда представлены в табл. 1.

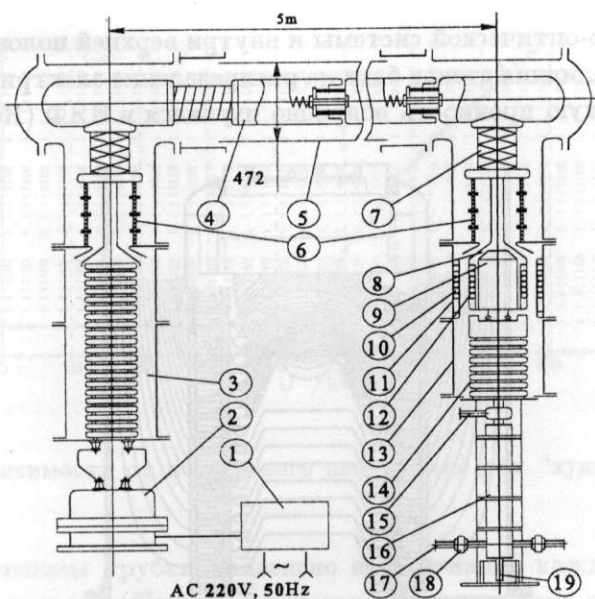


Рис. 1: Стенд испытания клистронов.

1 – тиристорный преобразователь частоты; 2 – высоковольтный трансформатор (30 кВ); 3 – умножитель напряжения; 4 – формирующая линия; 5 – корпус линии; 6 – опорные изоляторы; 7 – ограничивающий резистор; 8 – высоковольтный ввод; 9 – устройство управления пушкой; 10, 12 – первичная и вторичная обмотки газового трансформатора; 13 – бак клистрона; 14 – электронно-оптическая система; 15 – входной волновод; 16 – усилительная часть клистрона с магнитной системой на постоянных магнитах; 17 – выходной волновод; 18 – выходное СВЧ-окно; 19 – коллектор клистрона.

Таблица 1. Основные параметры стенда испытания клистронов.

Проектное напряжение	1150 кВ
Импульсный ток	250 А
Длительность импульса	500 нс
Частота повторения	5 Гц
Волновое сопротивление формирующей линии	300 Ом
Кол-во каскадов умножителя	40
Рабочая частота тиристорного преобразователя	20 кГц
Мощность тиристорного преобразователя	4 кВт
Частота газового трансформатора	1 кГц
Мощность газового трансформатора	2 кВт
Общий вес высоковольтного оборудования	2000 кг
Давление газа (SF ₆) в системе	12 атм.
Потребляемая мощность	6 кВт

Для измерения высокого напряжения на стенде используются резистивные высоковольтные делители, расположенные на опорных изоляторах стенда. Напряжение на входе умножителя также измеряется резистивными делителями. Ток утечки в высоковольтной системе вычисляется управляющим компьютером как разность между током потребления всей системы и током потребления высоковольтных измерительных делителей. Точность измерения тока утечки во всей высоковольтной системе составляет 2 мкА.

2. Результаты высоковольтных испытаний ускорительной трубки клистрона

Электронно-оптическая система клистрона, находящаяся внутри бака, заполненного газом SF₆, показана на рис. 2. Здесь же показаны силовые линии электрического поля с внеш-

ней стороны электронно-оптической системы и внутри верхней половины вакуумной стороны трубки. Эффект от влияния стенок бака на распределение электрической напряженности на трубке и электрическую прочность подробно изучался в ИЯФ (Новосибирск) [2].

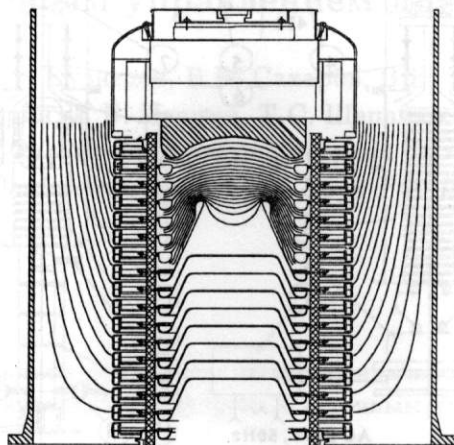


Рис. 2: Электронно-оптическая система клистрона в баке.

При исследовании высоковольтной прочности вакуумной части трубки возможное влияние стенок бака принималось во внимание. Основные трудности, с которыми столкнулись при высоковольтных испытаниях электронно-оптической системы клистрона, были связаны с большими напряженностями электрических полей на поверхности электродов в верхней части системы, высокой рабочей температурой электродов, а также с вероятным влиянием испарения материала катода на электрическую прочность системы в целом. На рис. 3 показана схема расположения электродов внутри системы.

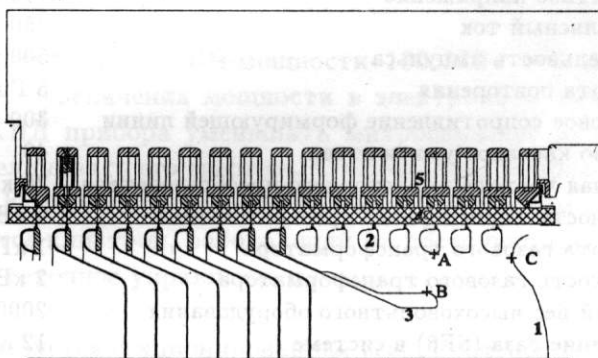


Рис. 3: Верхняя часть электронно-оптической системы клистрона. 1 – сеточный электрод; 2 – экранирующие электроды; 3 – фокусирующий электрод (анод); 4 – керамический изолятор; 5 – защитные электроды; A, B, C – места на электродах с повышенной напряженностью электрического поля.

В точке B напряженность на поверхности электрода 350 кВ/см, в точке A — 145 кВ/см, в точке C — 90 кВ/см, но это место расположено на поверхности управляющей сетки, которая изготовлена из меди. Все вышеприведенные значения на поверхности электродов приведены из расчета 1200 кВ на всей трубке (75 кВ на одном высоковольтном зазоре).

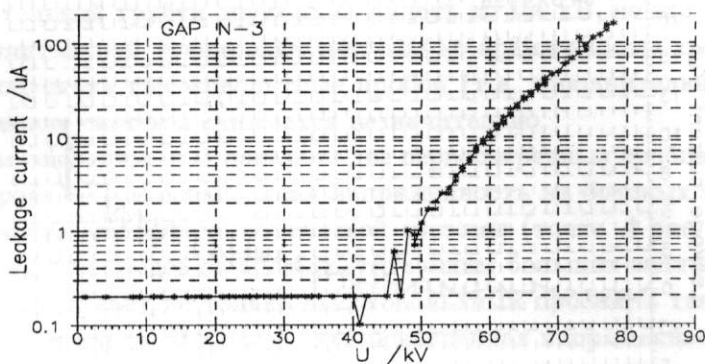


Рис. 4: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения для “худшего” высоковольтного зазора.

Перед полным включением трубки проведено исследование каждого высоковольтного зазора при отдельном включении. На рис. 4 показана величина тока утечки для “худшего” зазора, а на рис. 5 — для “лучшего”.

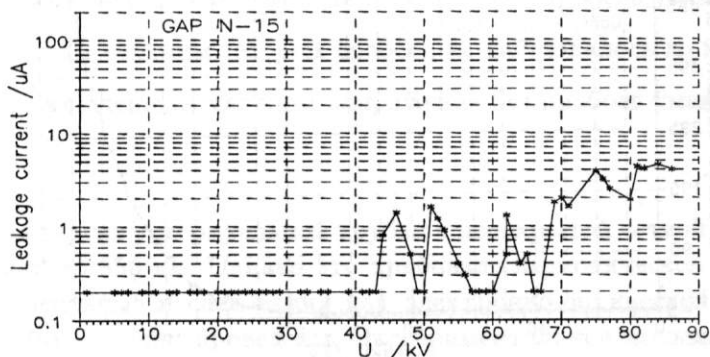


Рис. 5: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения для “лучшего” высоковольтного зазора.

Характеристики остальных зазоров занимают промежуточное положение между ними. Исходя из этого, ожидалось, что при подъеме напряжения до 900 кВ на всей системе высоковольтные свойства отдельного зазора не должны оказывать заметное влияние на прочность всей системы. Испытание восьми последовательно соединенных высоковольтных зазоров регулярной части ускорительной трубки показало, что это влияние действительно слабое (рис. 6).

Максимальное расчетное значение напряженности электрического поля на поверхности электродов регулярной части трубки составляет 115 кВ/см при напряжении на каждом зазоре 75 кВ. Эксперимент показал, что эта часть трубки нормально работает без пробоев при напряженности 76 кВ/см на поверхности электродов. Включение катода не приводит к появлению токов утечки и пробоям. В дальнейших экспериментах основное внимание уделялось исследованию высоковольтной прочности верхней части трубки. Уже при последовательном включении трех зазоров выше анода появляются значительные токи утечки между боковыми электродами и анодом (рис. 7). Порог появления этих токов соответствует напряженности на поверхности электродов 70 кВ/см, точка А рис. 3.

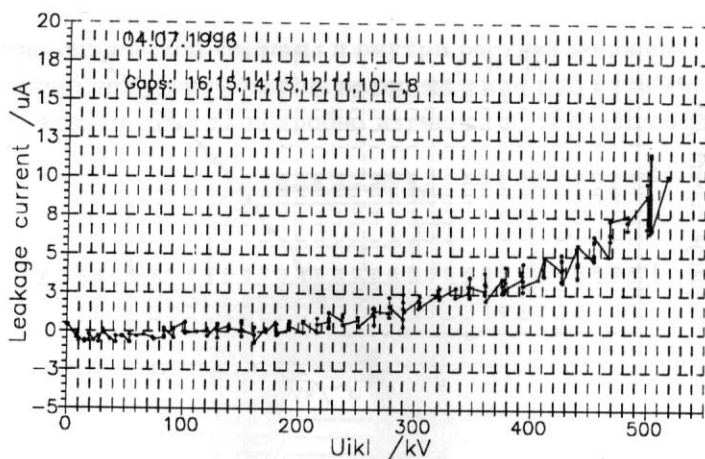


Рис. 6: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения для регулярной части ускорительной трубки (8 последовательно включенных высоковольтных зазоров).

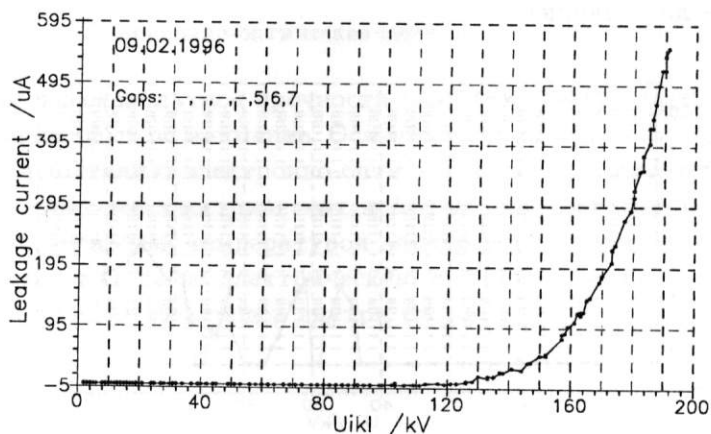


Рис. 7: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения между боковыми экранирующими электродами и анодом (3 последовательно включенных высоковольтных зазора).

Увеличение количества включенных в испытание зазоров естественно повысило порог по напряжению, при котором появляются заметные темновые токи. Напряжение стабильной работы достигло 400 кВ при семи последовательно включенных зазорах. Однако подключение ближайшего к управляющей сетке зазора снизило напряжение пробоя системы до 290 кВ. Напряженность на поверхности сетки при напряжении 400 кВ (выключенном первом зазоре) и при 290 кВ (включенном первом зазоре) составляет примерно 60 кВ/см (точка *C* рис. 3).

Особое внимание было уделено изучению высоковольтной прочности системы при включенном катоде клистрона. Известно, что испарение материала оксидного катода оказывает существенное влияние на высоковольтную прочность системы. Увеличение температуры электродов также уменьшает высоковольтную прочность системы. Экспериментально удалось показать, что влияние испарения материала катода и, вероятно, его напыление на электроды ухудшает прочность нашей системы в большей степени, чем повышение температуры электродов. При длительной работе катодного узла пробивное напряжение изучае-

мой части ускорительной трубки опускалось вплоть до 150 кВ, но это при условии полного отсутствия дополнительной тренировки системы во время работы катода. Если во время работы катода допускать высоковольтные пробои (т.е. дополнительную тренировку), то пробивное напряжение системы снижается незначительно.

Таким образом, эксперименты показали две первоочередные проблемы, которые необходимо решать. Первая — это повышенная напряженность на боковых экранирующих электродах в верхней части электронно-оптической системы (точка *A* рис. 3), что приводит к токам утечки с этих электродов на анод, достигающим больших величин вплоть до 500 мкА (рис. 7). Этот ток вызывает не только высоковольтный пробой, а также приводит к разрушению поверхности анода. Вторая — это повышенная напряженность на управляющей сетке (точка *C* рис. 3). Эта проблема усиливается такими факторами, как повышенная температура электродов, близость эмиссионной поверхности катода, а также тем, что сетка изготовлена из меди. Для увеличения электрической прочности управляющая сетка была покрыта нитридом титана методом магнетронного напыления, толщина покрытия порядка нескольких микрон. Все вышеописанные эксперименты были проведены также с покрытой сеткой. Были получены следующие результаты:

- С закороченным верхним зазором пробоев не наблюдалось до напряжения 370 кВ.
- При работе с включенным катодом напряжение без пробоев уменьшилось до 330 кВ.
- С незакороченным верхним зазором пробоев не наблюдалось до напряжения 390 кВ.
- При работе с включенным катодом напряжение без пробоев уменьшилось до 350 кВ.

Заключение

Вышеописанная версия ускорительной трубки с непокрытой сеткой работала в клистроне при напряжениях до 850 кВ. Однако это требовало периодической тренировки трубки. Тем не менее все основные исследования как электронно-оптической системы, так и самого клистрона были успешно проведены. Экспериментальное исследование высоковольтной электрической прочности трубки позволило выявить главные проблемы в конкретной конструкции, которые необходимо решать для достижения стабильной работы трубки на проектном напряжении.

Получены значения напряженностей полей на поверхности электродов, при которых отсутствуют токи утечек. Данные, полученные в результате этих исследований, позволяют проектировать новые версии ускорительных трубок без грубых ошибок. Так, проблему повышенной напряженности на экранирующих электродах (рис. 3, точка *A*) может быть решена увеличением диаметра трубки до 250 мм, а также дальнейшей оптимизацией самих электродов.

Другую проблему, связанную с повышенной напряженностью на поверхности медной сетки, необходимо решать как покрытием нитридом титана или другими материалами, так и дальнейшей оптимизацией ближайшего к сетке экранирующего электрода. Эти изменения позволяют рассчитывать на стабильную работу трубки до 900 кВ.

В настоящее время в ФИЯФ (Протвино) начато освоение технологии изготовления секционированных ускорительных трубок диаметром 250 мм. Две трубки, состоящие из десяти колец, были успешно применены в импульсном диоде [3] и клистроне X-диапазона, работающих на импульсном напряжении 550 кВ.

Список литературы

- [1] L.N. Arapov, P.V. Avrakhov, V.E. Balakin et al. "14GHz VLEPP Klystron", Third European Particle Accelerator Conference: Intern. conf., Berlin, 1992. Singapore: Editions Frontiers. 1992. - Vol 1.1. pp.330- 332.
- [2] V.E. Balakin, A.V. Kozhemyakin, E.G.Miginsky et al. "Operation of high-gradient bakeable accelerator tube on basis of the UF-46 ceramics". Novosibirsk, Preprint BINP 97-8.
- [3] V.A. Aleksandrov, V.E. Balakin, A.I. Bazhan, V.I. Chashurin et al. "Diode Gun with an Increased Beam Convergence for PPM Focused X-band Klystron". VII International Workshop on Linear Colliders, Zvenigorod, Russia, Sept. 29-Oct.3, 1997 Vol. II pp.964-966.

Studies of a Powerful PPM Focused X-band Klystron

P.Avrakhov, V.Balakin, V.Chashurin, V.Ezhov,
V.Ermakov, V.Gordienko, S.Kazakov, G.Kuznetsov, A.Larionov,
A.Lunin, N.Solyak, V.Teryaev, Yu.Valyaev, V.Vogel, Yu.Yakubov
Branch of the Institute of Nuclear Physic, Protvino, Russia
Y.H.Chin, S.Fukuda, T.Higo, S.Matsumoto, S.Michizono,
H.Mizuno, S.Tokomoto, H.Tsutsui
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Japan

Introduction

In 1997 BINP developed and produced PPM klystron for KEK. In the beginning of 1998 klystron was sent to Japan and was installed on the test-bench, where earlier were tested klystrons of *XB72K* series [2]. In May 1998 the testing of the klystron was carried out. Efficiency, calculated with the help of 1-D DISKLY code, is about 45 %, 2-D simulation, carried out with the help of code MAGIC [2], has shown the efficiency equal to 44 %. The output Traveling Wave (TW) system is close to the output system of klystron *XB72K*#9 [2]. The electric field strength at 100 MW of the output power achieves 760 kV/cm. Drift tube diameter and cavity shapes did not greatly differ from klystron *XB72K*#9, where parasitic oscillations were not observed. We also hoped to avoid problems connected with parasitic oscillations. The table of parameters of the klystron is represented.

Table 1. Main parameters of the PPM klystron

	Design	Experiment
Operating Frequency	11424 MHz	11424 MHz
Voltage	550 kV	550 kV
Beam Current	380 A	377 A
Cathode	Oxide type	
Cathode Diameter	120 mm	
Microperveance	0.93	0.92
Band Width	40 MHz	40 MHz
Input Saturation Power	50 W	50-100 W
Saturation Gain	63 dB	63-68 dB
Efficiency	45 %	38 %
Output Power	100 MW	77 MW

1. Electron gun

The electron beam in the gun is carried out by the 120 mm oxide cathode, that allows to have maximum of emission current density $J_{max} < 4A/cm^2$. As high-voltage insulator in this gun is used sectional accelerating tube comprising 10 ceramic rings. Constructive capacities, stationed along the accelerating tube, are designed so that the voltage distribution during the high-voltage pulse must be close to linear. As well as the voltage distribution in the tube, the properties of the generated beam strongly depend on the position of the electrostatic screen - the mobile electrode (pos. 1, Fig. 1). Moving this screen relative to the accelerating tube by

means of the special drive, thereby one can vary the voltage distribution in the tube or correct the beam optics. It seems that availability of correction is especially important for guns with high beam convergence because their development and assembly are very demanding from the point of view of precision which is not always attainable in practice.

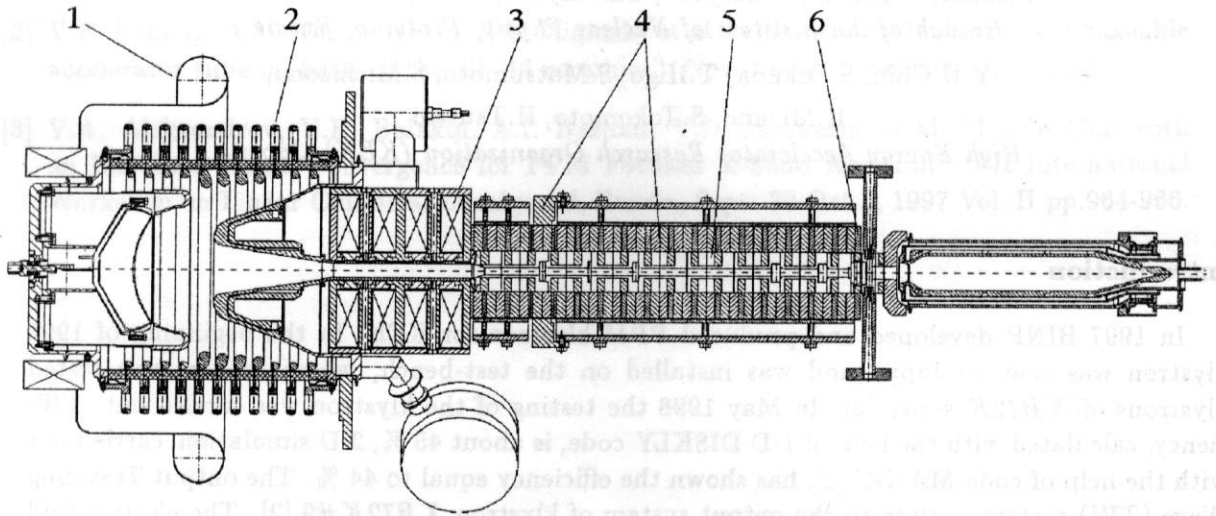


Figure 1: General view of BINP-KEK PPM klystron.

2. PPM Focusing System and Lenses

Two problems arise basically regarding the definition of parameters PPM. It is the choice of a period and the choice of magnetic field magnitude. Mainly the lower bound of Beam Voltage depends on the period, when the beam loses stability (Voltage Stop Band). The equilibrium diameter of the beam depends on the magnitude of magnetic field. The comparison of the root-mean-square field of PPM ($Brms$) with the field of solenoid approaches the comparison of the behaviour of the beam in the solenoid field. The behaviour of the beam in PPM and solenoid is close when the fields of solenoid and $Brms$ of PPM are equal.

We have selected the diameter of the beam equal to 4.5-6 mm when the drift tube diameter is 9.6-10 mm. It corresponds to $Brms$ equal to 2.6-3.1 kGs. The distance chosen between lenses is 26 mm. Let's name this distance geometric period. The period of magnetic field is 52 mm. The limit of beam stability is about 200 kV. We assume that the rise- and fall-pulse time is 200 ns, whereas the pulse duration is 1000 ns. Then at voltage below 200 kV the power value is estimated to be less than 1% of the total beam power. These power losses in the klystron channel can be considered to be quite admissible.

The magnetic system comprises polepieces pos. 5 brazed into the klystron body and removable magnetic blocks 4 (see Fig. 1). The inner part is axial symmetric. Four removable blocks are placed azimuthal symmetrically. The dipole and higher components of the magnetic field near the axis are shielded by the polepieces. The most dangerous for the beam thing is the dipole component of the magnetic field. It does not exceed 20 Gs on the axis when the field amplitude is 3.8 kGs. The removable blocks are installed on the klystron body by means of the special equipment. The klystron body is water-cooled.

The magnetic material Neodim-Ferrum-Bor is used. It possesses the magnetic energy, which is close to that of Samarium-Cobalt magnets. This material is cheaper, however, it is character-

ized by lower thermal stability than $Sm - Co$ has. The thermal measurements of the samples have shown that the temperature of magnets should not be higher than $60^{\circ}C$. To match the beam with PPM, two-lens system is used. One lens can be also used; however in this case it is necessary for matching to change not only the lens current but also the position of the lens concerning the PPM entrance point.

The output section of the PPM channel requires special reviewing. The calculations were done under the static condition when the energy of moving particles remained unchanged. To simulate the RF current and beam energy variations in the output TW system pos. 6, the initial current and initial energy of the beam were varied. These calculations have not revealed any noticeable discrepancy between the beam behavior in the output system with the solenoid type of magnetic field, on the one hand, and the PPM field, on the other. It was decided to extend the PPM field up to the collector. The amplitude of the field in an output part was about 2.5 kGs. Later, 2-D MAGIC calculations showed the necessity of increasing the PPM magnetic field in the output section up to the value equal to 4.5 kGs in order to reach 100 % of beam transmission through the output system. To minimize the risk of destruction caused by the pulse thermal load, the collector was tungsten-covered.

3. Simulation Codes

1-D disk model was used to simulate and analyse the beam dynamics. For klystrons with solenoid type of fields and the output systems as a single cavity, the net results, as well as the experimental results, were close to those obtained by means of 2-D codes. For simulations of the radial dynamics of the stationary beam in the magnetic field, 2-D code was used, which regarded the beam space charge and beam emittance. The magnetic field calculations were carried out using 2-D code. The magnetic fields remained axially symmetric when it was close to the polepieces and the axis. The field value was improved and azimuthal harmonics was established according to the test models. Clearly, that 1-D simulations are not reliable enough for carrying out the analysis of PPM klystrons with the output TW system.

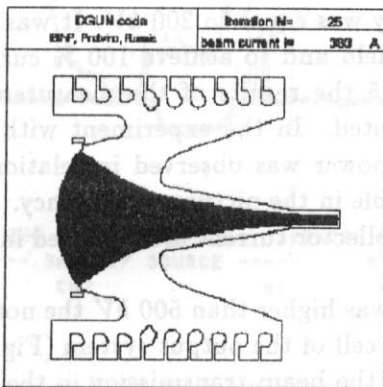


Figure 2: DGUN simulations of the electron gun.

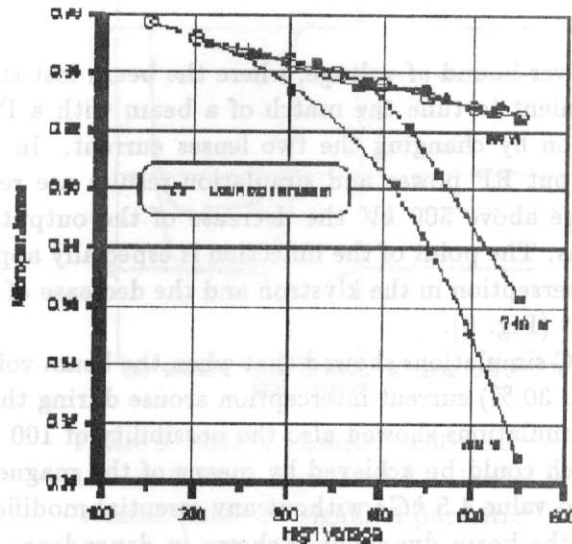


Figure 3: Microperveance vs beam voltage for different heating power of cathode (collector measurement).

Later, with the help of our Japanese colleagues from KEK, the analyses were conducted with the help of 2-D MAGIC code [2]. For simulations of the electron gun the precision code DGUN was used, which was developed by our colleague A.Larionov (Fig. 2). MAGIC [2] and EGUN simulations showed insufficient accuracy for the gun with the high compression of the electron beam. In Fig. 3 we can see that experimental perveance of the electron gun (black points) correspond to calculated perveance. The slope of the performance corresponds to relativity.

4. Experimental and simulation results. Discussion

The current transmission in the klystron channel in static condition (without any input RF power) was close to 100 % (Fig. 4).

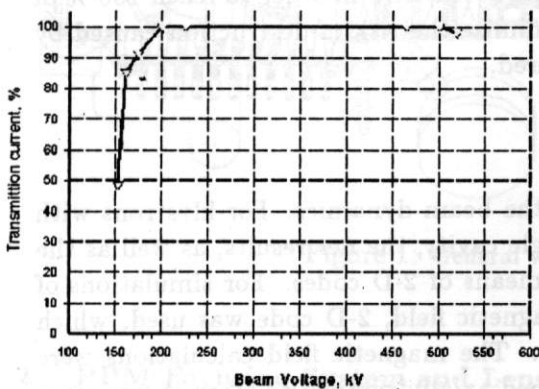


Figure 4: Transmission current through.

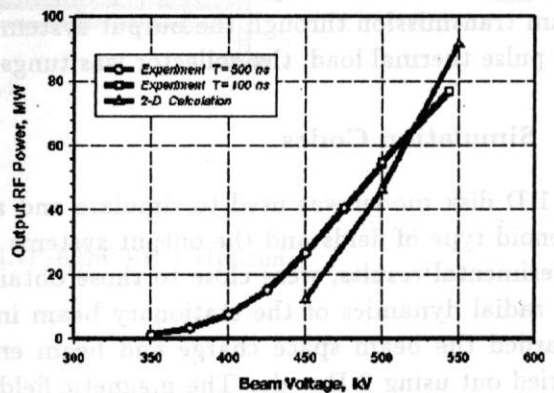


Figure 5: Output RF power vs beam voltage of PPM Klystron # 1. Magic 2-D calculations. Microperveance $P_m = 0.92$ the klystron vs beam voltage.

The lower bound of voltage, where the beam lost stability was equal to 200 kV. It was fast and convenient to tune the match of a beam with a PPM field and to achieve 100 % current transmission by changing the two lenses current. In Fig. 5 the results of the measurement of the output RF power and simulation results are represented. In the experiment with the gun voltage above 500 kV the decrease of the output RF power was observed in relation to simulations. The point of the inflection is especially appreciable in the picture of efficiency. The current intersection in the klystron and the decrease of the collector current are observed in the experiment (Fig. 6).

MAGIC simulations showed that when the beam voltage was higher than 500 kV the noticeable (up to 30 %) current interception arose during the last cell of the output system (Fig. 7). MAGIC simulations showed also the possibility of 100 % of the beam transmission in the collector which could be achieved by means of the magnetic fields increase in the output part of PPM up to value 4.5 kGs without any essential modifications of the magnetic scheme of PPM. In Fig. 7 the beam dynamics is shown in dependence on the magnetic field value. When the beam voltage is higher than 450 kV parasitic oscillations arose, which could be observed in the spectrum of the output RF signal and signal, reflected from the input cavity. The current transmission in the PPM channel in static condition (without RF) decreased in the moment,

appropriate to the time of oscillations beginning with the frequency equal to 21.2 GHz. In the initial part of the current pulse the beam transmission remained close to 100%.

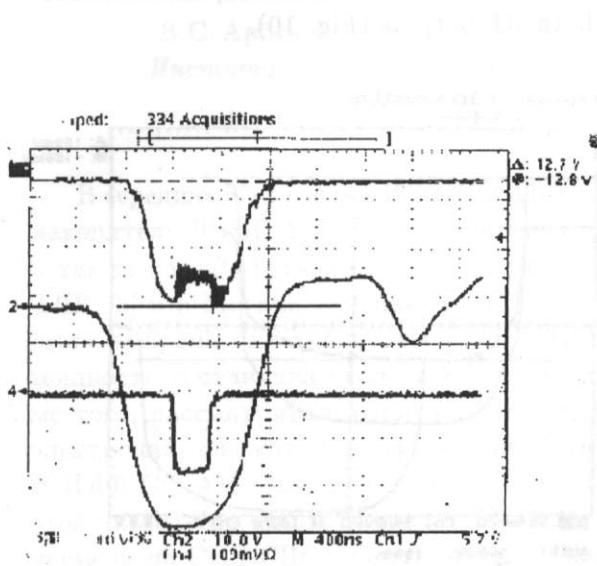


Figure 6: 1 - collector current, 2 - gun voltage, 4 - output RF signal.

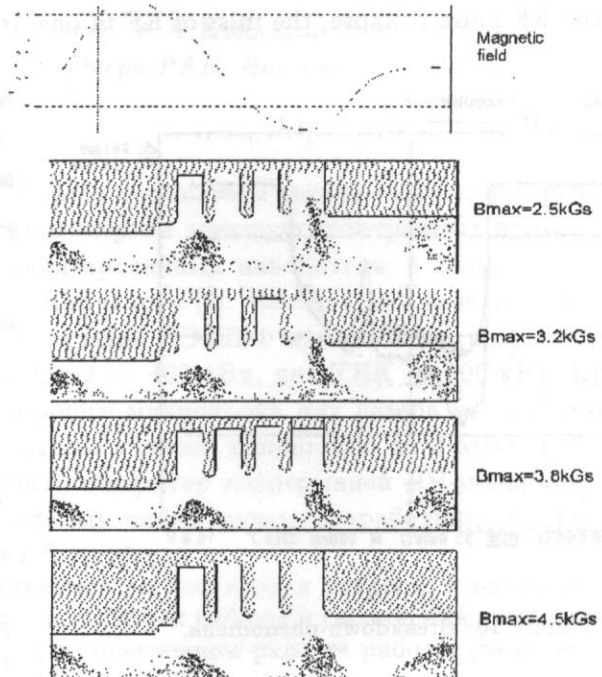


Figure 7: Beam dynamic in the output TW system.

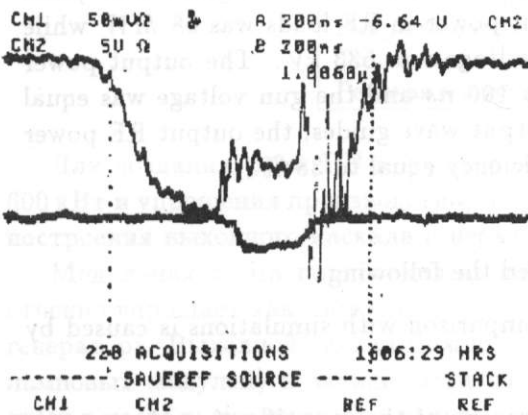


Figure 8: Beginning of oscillations.

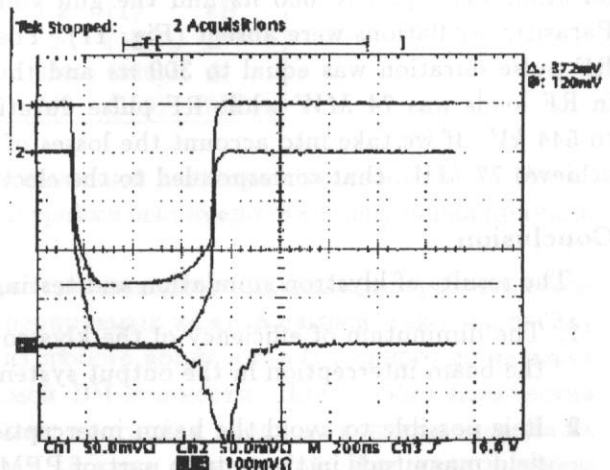


Figure 9: Shift of parasitic oscillations 1 - and 2 - signals of RF loads remain pure. 3 - signal of parasitic oscillations, $F=21.2$ GHz.

In Fig. 8: Above - the collector current, below - the signal of RF load, selected by RF filter of 21.2 GHz. The suppression of parasitic oscillations during operating RF pulse is observed.

The beginning of parasitic oscillations was shifted in accordance with the increase of the input RF pulse duration (Fig. 9).

When the output power was more than 50 MW the breakdown was observed, characterized by the RF pulse collapse, the miss of RF in one or both RF outputs (Fig. 10).

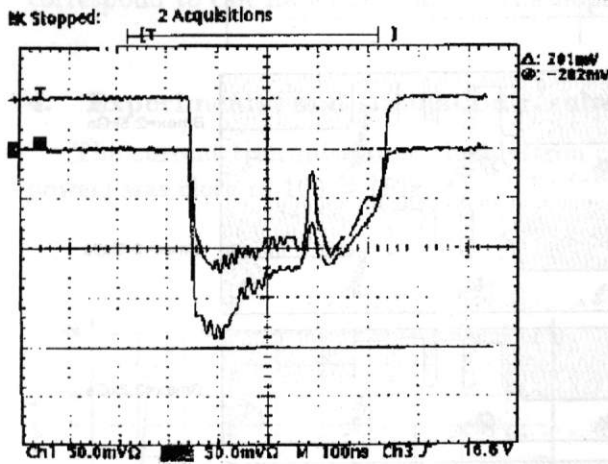


Figure 10: Breakdown phenomena.

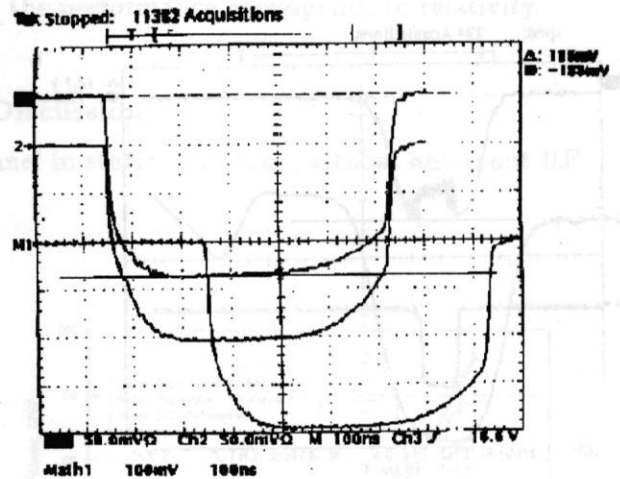


Figure 11: $P_{output} = 50 \text{ MW}$, $\tau = 600 \text{ ns}$.
1 - , 2 - signals of RF loads M1 - a total signal.

The breakdown repetition rate increased with the increase of the output power. The long training did not lead to any noticeable decrease of the breakdown repetition rate. The following limiting results are obtained. The output power in RF loads was 50 MW while RF pulse duration was equal to 600 ns and the gun voltage was 500 kV. The RF signals were pure. Parasitic oscillations were absent (Fig. 11). The output power in RF loads was 68 MW while RF pulse duration was equal to 300 ns and the gun voltage was 533 kV. The output power in RF loads was 74 MW while RF pulse duration was 100 ns and the gun voltage was equal to 544 kV. If we take into account the losses of the output wave guides, the output RF power achieves 77 MW, that corresponded to the electron efficiency equal to 38 %.

Conclusion

The results of klystron simulation and testing showed the following.

1. The diminution of efficiency of the klystron in comparison with simulations is caused by the beam interception in the output system.
2. It is possible to avoid the beam interception by means of the magnification of magnetic field magnitude in the output part of PPM.
3. The parasitic oscillations are detected in the klystron, and it is necessary to suppress them.

References

- [1] Balakin V. et all. The diode gun with the increased beam convergence for powerful PPM focused X-band klystron. LC97, Zvenigorod, Russia, Okt. 1997.
- [2] Chin Y.H. Modeling and Design of Klystron. Proc. LINAC'98, Chicago, 23-28.08.98

Мощный УКВ-генератор модульной конструкции для накопителей и ускорителей

В.С. Арбузов, А.А. Бушуев, Э.И. Горникер, А.А. Кондаков, В.М. Петров
Институт ядерной физики им. Г.И.Буджера РАН, Новосибирск, Россия

В середине 80-х годов в ИЯФ СО АН СССР были поставлены задачи — модернизировать накопитель ВЭПП-4 с целью увеличения тока и энергии электрон-позитронных пучков [1], а также разработать и построить два специализированных накопителя: в Зеленограде — ТНК [2] и в Москве — Сибирь-2 в ИАЭ им. Курчатова [3]. Частота для всех ВЧ-систем была выбрана близкой к 180 МГц. Для ВЧ-системы ВЭПП-4 максимально необходимая мощность составляла около 1 МВт, для Сибири-2 — 400 кВт, для ТНК — 200 кВт. Кроме того, рассматривался проект создания мощного микротрона для лазера на свободных электронах, для которого требовались генераторы с общей мощностью до 2 МВт [4, 5, 6]. В ИЯФ СО АН было принято решение создать генератор непрерывной ВЧ-мощности на этой частоте на основе тетрода ГУ-101А с водяным охлаждением, разработанного к этому времени на СЕД-СПБ («Светлана»), г. Санкт-Петербург.

Допустимые величины мощности, рассеиваемой на электродах тетрода, и напряжений питания приведены в табл. 1. Для повышения надежности работы и увеличения срока службы тетрода было решено использовать тетрод в облегченном режиме работы (величины в скобках).

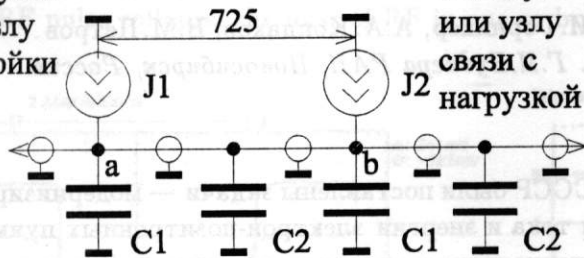
Таблица 1:

На экранной сетке	3	(2)	кВт
На аноде	250	(150)	кВт
На управляющей сетке	1,5	(1)	кВт
Анодное напряжение	14	(8,5)	кВ
Экранное напряжение	1,2	(1)	кВ
Напряжение накала	15	(12,5)	В
Ток накала	650	(580)	А
Рабочая частота	200	(180)	МГц

Для создания ряда ВЧ-генераторов с максимальной выходной мощностью от 150 до 600 кВт и упрощения производства, сборки и настройки был предложен модульный принцип построения выходного каскада генератора.

Модульная схема построения анодного контура выходного каскада генератора существенно упрощает как сложение мощностей, генерируемых каждой лампой, так и настройку генератора. Выходной каскад можно собрать из любого количества (от одного до четырех ламповых модулей) в зависимости от требуемой ВЧ-мощности. Для любого количества ламп в каскаде используется только один элемент настройки анодного контура каскада на резонансную частоту и один элемент для связи каскада с нагрузкой. При этом в любом варианте применяется одна и та же конструкция узла настройки анодного контура. Схема связи с нагрузкой определяется максимальной мощностью генератора. Для одномодульного (рис.2б) и двухмодульного каскадов (выходная мощность 150 и 300 кВт соответственно) применяется одна и та же конструкция узла связи с емкостной регулировкой величины коэффициента связи с передающей линией. В четырехмодульном каскаде (рис.3, выходная мощность до 600 кВт) применена конструкция узла связи с фиксированной величиной связи с линией передачи. Регулировка коэффициента связи с нагрузкой осуществляется трансформацией сопротивления в передающей линии. Конструкция соединений модулей между собой и с узлами подстройки и связи унифицирована.

К модулю
или узлу
настройки



К модулю
или узлу
связи с
нагрузкой

Рис. 1: Эквивалентная схема контура.

Эквивалентная схема анодного контура, в котором складываются мощности, генерируемые лампами (источники тока J1, J2), показана на рис.1. Размеры анодного контура подобраны так, чтобы на рабочей частоте матрица передачи между сечениями линии "а" и "б" имела вид, характерный для линии передачи с длиной, равной половине длины волны в ней:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

В этом случае фазы ВЧ-напряжений в сечениях "а" и "б" соседних модулей отличаются на π , а амплитуды равны. Мощности, развиваемые источниками, подключенными в указанных сечениях, суммируются в нагрузке общей линии связи.

Напряжения на анодах ламп соседних модулей также в противофазе, а амплитуды пропорциональны емкостям между анодом и экранирующей сеткой, разброс величин которых не превышает 5%. Геометрическая длина линии передачи между сечениями "а" и "б" (725 мм) выбрана несколько меньше половины длины волны. Поэтому элементы матрицы передачи приводятся (на рабочей частоте) к единичному виду выбором величин емкостей C1 и C2, подключенных параллельно линии в указанных сечениях.

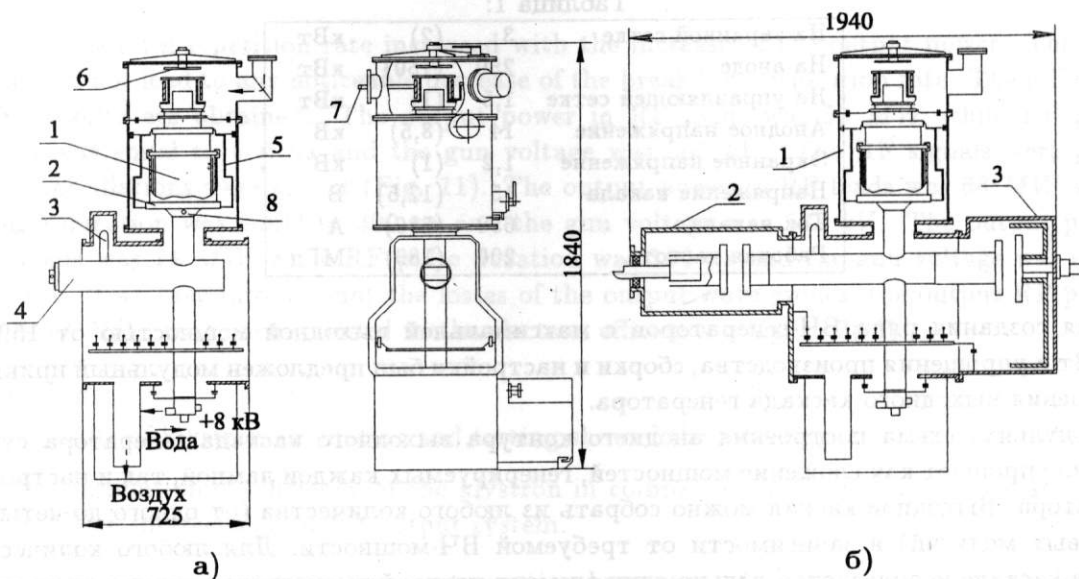


Рис. 2: Ламповый модуль (а); одномодульный каскад (б).

Эскизная схема лампового модуля для усилительного каскада, в котором реализован этот принцип сложения мощностей, приведена на рис.2а. Тетрод (1), помещенный в бак водяного охлаждения, конструктивно оформлен в легко отделяемый (для смены лампы) узел. Для оперативной замены лампы предусмотрен специальный разъем (8), размыкаемый через отверстие в корпусе модуля. Узел с тетродом присоединен к линии связи анодного контура (4). Настройка модуля производится фиксированной установкой размеров двух элементов. Высота накладного диска на анодном баке (2) изменяет импеданс C1, а длина шлейфа (3)

определяет импеданс S_2 в соответствии с эквивалентной схемой каскада. Особенностью схемы усилителя является также то, что блокировочной емкостью в цепи экранной сетки тетрода на рабочей частоте является только емкость между экранной и управляющей сетками.

Конструктивный конденсатор (5) служит для уменьшения доли ВЧ-тока анодно-сеточного контура, протекающего через блокировочные керамические конденсаторы в цепи экранной сетки. В конструкции анодного контура модуля предусмотрено также подключение четырех маломощных резистивных нагрузок (до 100 Вт) для подавления самовозбуждения в каскаде на высших модах колебаний. Входной контур модуля перестраивается по частоте конденсатором (6). Мощность возбуждения вводится коаксиальным фидером (7).

В одномодульном усилительном каскаде (рис.2б) ламповый модуль (1) объединен с узлом связи с нагрузкой (2) и узлом настройки частоты анодного контура (3). Отсутствие скользящих контактов в конструкции подвижных элементов этих узлов повышает надежность работы и не приводит к модуляции при настройке генератора. Это существенно для настройки ВЧ-системы при электронном пучке в ускорителе. На одномодульном каскаде при испытании ускоряющих резонаторов была получена мощность 135 кВт при КПД 62%. Коэффициент усиления каскада по мощности около 12.

Два генератора с одномодульным выходным каскадом в настоящее время эксплуатируются в ВЧ-системе инжектора для микротрона рекуператора [7]. Еще два таких же генератора установлены и работают в таком же ускорителе в Южной Корее (KAERI, г. Тайджон).

Двухмодульный каскад обеспечивал работу накопителя ВЭПП-4 до введения в действие следующего, более мощного усилителя. На нем была получена мощность 300 кВт при возбуждении пятирезонаторной ускоряющей системы. КПД каскада составил 66%. Возбуждение каждой лампы независимое от отдельных предварительных каскадов. Оптимальный баланс фаз и амплитуд возбуждающих напряжений достигается с помощью настройки анодных контуров предварительных каскадов.

Такой же вариант конструкции выходного каскада установлен и работает на накопителе "Сибирь-2" в РИЦ "Курчатовский институт". Оперативный диапазон перестройки частоты одномодульного каскада ± 6 МГц, двухмодульного — ± 4 МГц.

Проектная выходная мощность четырехмодульного варианта усилителя мощности (рис.3) составляет 600 кВт. Оперативный диапазон перестройки каскада $\pm 2,7$ МГц.

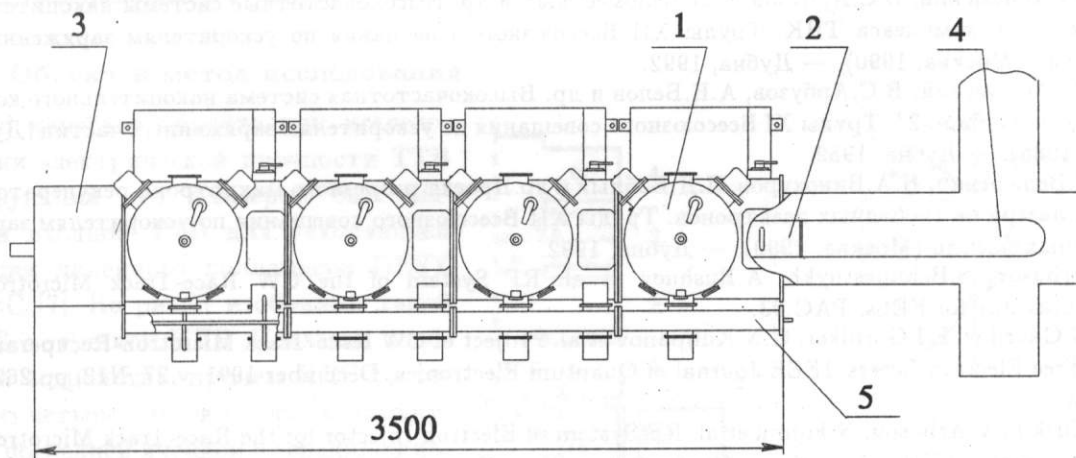


Рис. 3: Четырехмодульный каскад.

Четыре модуля (1) и узел настройки (3) соединены последовательно. Центральный проводник анодной линии связи (2) одновременно является внутренним проводником волноводно-коаксиального перехода (4), связывающего генератор с ускоряющей системой накопителя. Регулировка коэффициента связи генератора с ускоряющей системой предусмотрена в волноводном тракте, соединяющем генератор с резонаторами. Катодно-сеточные (входные) контура ламп объединены линией связи (5). Эквивалентная схема и принцип настройки входного контура 4-модульного каскада аналогичны схеме и настройке анодного контура (рис.1). Баланс амплитуд и фаз возбуждающих напряжений устанавливается с помощью емкостных шлейфов во входной линии связи.

Возможно применение этой конструкции для возбуждения двухмодульного варианта каскада. Каскад был испытан при возбуждении пятирезонаторной ВЧ-системы ВЭПП-4 в режиме с выходной мощностью 500 кВт.

КПД усилителя (мощность в нагрузке по отношению к мощности потребления от анодного выпрямителя) 53–54%. Максимальный КПД не был достигнут, так как ВЧ-напряжение на анодах в испытательном режиме было меньше критического. Дальнейшее повышение мощности было ограничено мощностью существующего источника анодного питания.

В настоящее время генератор с этим выходным каскадом и двухмодульным в качестве предварительного (в двухмодульном каскаде для экономичности накал и ВЧ-возбуждение подаются на одну из ламп) — обеспечивает работу накопителя ВЭПП-4. Все варианты исполнения усилителей устойчиво работают с любой нагрузкой (и без нагрузки) во всем диапазоне перестройки входного и выходного контуров и при любом уровне возбуждения на входе и не требуют установки развязывающих элементов между генератором и ускоряющей системой.

Опыт эксплуатации тетродов ГУ-101А в составе ВЧ-системы ВЭПП-4 показал, что срок их службы составляет около 6000–8000 часов. В проекте разрезного микротрона рекуператора, строящегося в ИЯФ в настоящее время, предусмотрено установить два ВЧ-генератора с четырехмодульным выходным каскадом.

Список литературы

- [1] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, А.Н.Белов и др. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-4М. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1988). — Дубна, 1989.
- [2] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, С.А.Беломестных и др. Высокочастотные системы накопительных колец комплекса ТНК. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1990). — Дубна, 1992.
- [3] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, А.Н.Белов и др. Высокочастотная система накопительного комплекса "Сибирь-2". Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1988). — Дубна, 1989.
- [4] В.Г.Вещеревич, Н.А.Винокуров, П.Д.Воблый и др. Проект разрезного микротрона-рекуператора для лазера на свободных электронах. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1990). — Дубна, 1992.
- [5] V.Arbusov, S.Belomestnykh, A.Bushuev et al. RF System of the CW Race-Track Microtron-Recuperator for FELs. PAC 93.
- [6] N.G.Gavrilov, E.I.Gorniker, G.N.Kulipanov et al. Project of CW Race-Track Microtron-Recuperator for Free Electron Lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, December 1991, v.27, N12, pp.2626-2628.
- [7] G.Kurkin, V.Arbusov, N.Fomin et al. RF System of Electron Injector for the Race-Track Microtron-Recuperator. XVII International Conference on High Energy Accelerators. — Dubna, 1998.

Экспериментальное исследование датчика положения пучка для линейных коллайдеров

В.Е.Балакин, А.И.Бажан, П.Б.Жоголев, П.А.Лунев,

И.А.Скарин, Н.А.Соляк, В.Ф.Фогель

Филиал Института ядерной физики

Сибирского Отделения Академии Наук РФ, Протвино, Россия

В. Якименко

ATF BNL - Brookhaven, USA

А.А. Лисицын

НПО "Исток", Москва, Россия

Прототип датчика положения пучка (ДПП) для использования в линейных коллайдерах, разработанный и изготовленный в Филиале Института ядерной физики, был испытан в марте 1998 года в ATF BNL на пучке электронов с энергией 45 МэВ и зарядом сгустка 0.5 нКл. Экспериментальная установка включала в себя три резонаторных ДПП, установленных на прецизионные подвижки для юстировки датчиков и калибровки их чувствительности. Подвижки позволяли перемещать в вертикальном и горизонтальном направлениях каждый датчик независимо в диапазоне 1.5 мм с дискретностью 0.3 мкм и точностью 0.05 мкм.

Схема обработки выходного сигнала ДПП обеспечивала регистрацию положения пучка при каждом импульсе во всех датчиках с учетом знака смещения. В условиях нестабильности пучка от импульса к импульсу (джиттера) порядка 25 мкм было достигнуто разрешение 1.9 мкм при динамическом диапазоне ± 150 мкм и 0.2 мкм — при динамическом диапазоне системы 15 мкм.

Введение

Одной из наиболее важных проблем при осуществлении проектов линейных коллайдеров является достижение высокой точности (порядка 0.1 мкм) выставки магнитных элементов и ускоряющих секций для сохранения малого эмиттанса пучка в процессе ускорения. Таким образом, разрешение ДПП, используемых в линейном коллайдере, должно быть лучше 0.1 мкм. Одним из наиболее эффективных и простым в изготовлении является ДПП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого смещенным от оси пучком на аксиально-несимметричной E_{110} моде [1, 3, 7, 8]. Амплитуда колебаний этой моды пропорциональна смещению пучка и заряду сгустка, а фаза зависит от направления смещения.

Одной из важных проблем является подавление основной и других аксиально-симметричных мод, возбуждаемых пучком независимо от смещения [3]. Тепловые шумы и шумы электроники определяют другой предел в достижении минимального разрешения ДПП. Предварительные расчеты и лабораторные тесты прототипов ДПП и электроники показали, что потенциально достижимое разрешение датчика для пучка ATF BNL лучше 0.1 мкм.

Целью описываемого эксперимента являлось испытание ДПП на реальном пучке и определение разрешения системы в условиях джиттера (нестабильности от импульса к импульсу) пучка. Эксперимент был проведен на установке ATF BNL с энергией пучка (45 ± 1) МэВ, зарядом одиночного сгустка 0.25–0.5 нКл и продольным размером 5–10 псек [6].

1. Экспериментальная установка

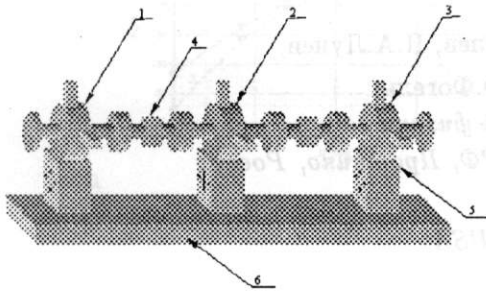


Рис. 1: Экспериментальная установка.

каналом через сильфоны (4). Подвижки и датчики были установлены на специальный стол и выставлены с использованием стандартной процедуры ATF.

Каждый ДПП имеет два выхода для сигналов горизонтального и вертикального смещений пучка, соединенных с размещенной вне защитного тоннеля электроникой с помощью СВЧ-кабелей длиной 4 м. Резонансная частота каждого датчика подстраивалась и стабилизировалась автоматически при помощи нагревателей.

2. Схема измерения сигналов ДПП

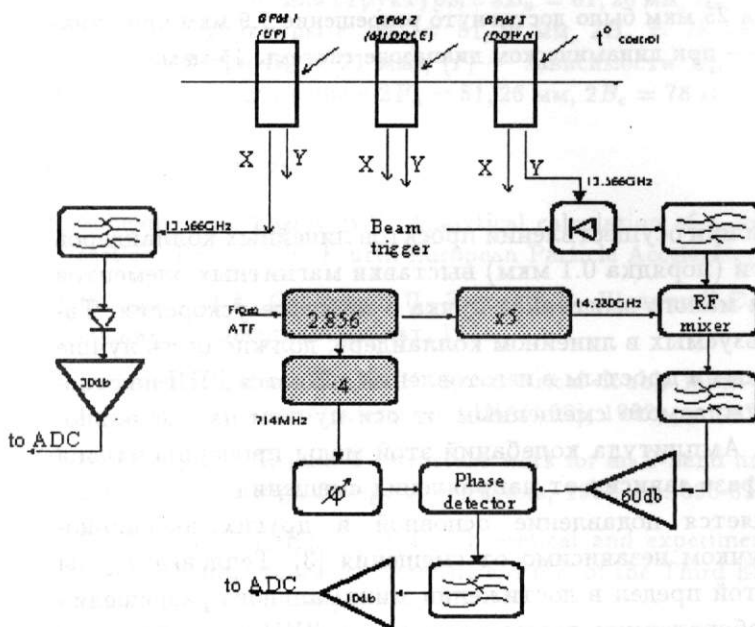


Рис. 2: Схема обработки сигналов ДПП.

Средства автоматизации, выполненные в стандарте КА-МАК, и специальное программное обеспечение позволяют измерять X-, Y-координаты каждого сгустка. В качестве опорного сигнала для смесителя и фазового детектора применялся сигнал линии опорной фазы ATF, что позволило избежать трудностей использования импульсного сигнала опорного датчика [1].

3. Измерения и результаты

Перед началом измерений пучок средствами ATF проводился вблизи центров резонаторов. Затем при помощи подвижек оси датчиков совмещались с осью пучка более точно. Для измерения положения во время этих процедур использовался амплитудный метод во всех каналах. После окончания предварительной выставки вертикальные каналы ДПП переключались на фазовый метод. Во время выставки пучка был обнаружен и зафиксирован механический сдвиг датчиков от прямой (рис. 3).

Рис. 3 представляет типичные результаты измерений амплитудным методом. В измерительном канале X_{down} , в отличие от X_{up} и X_{middle} , использовалась более чувствительная диодная головка. Из графика видно, что амплитудный метод может использоваться для измерений положения пучка, не требующих высокой точности, но в очень широком диапазоне отклонений пучка от оси. Первоначальные измерения показали, что джиттер пучка по положению и углу настолько велик, что превышает динамический диапазон схемы измерений. Поэтому подаваемые на фазовый метод сигналы датчиков были ослаблены на 30 дБ, и все представляемые далее результаты получены в данных условиях.

Рис. 4 представляет данные, полученные для вычисления чувствительности. Все датчики плавно перемещались подвижками в известном направлении в пределах ± 200 мкм. Используя вычисленную из этих данных чувствительность и данные о шумах электроники можно оценить ожидаемое разрешение: около 0.9 и 1.7 мкм соответственно для лучшего и худшего измерительных каналов.

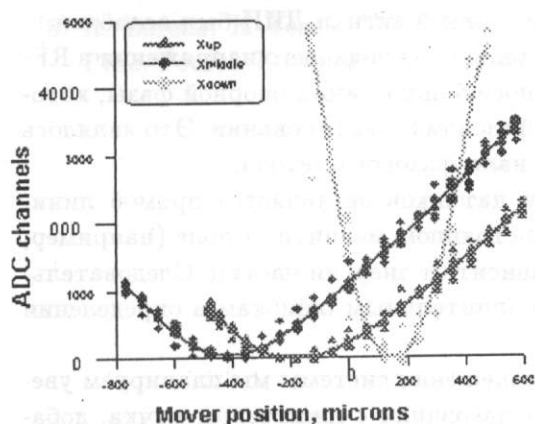


Рис. 3: Чувствительность амплитудного метода.

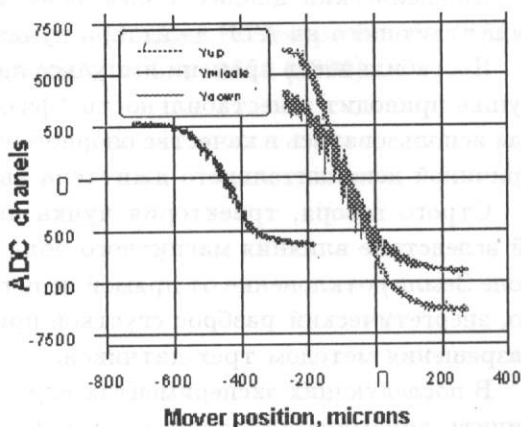


Рис. 4: Определение чувствительности фазового метода.

Рис. 5 поясняет, как можно определить в условиях джиттера пучка разрешение системы датчика положения, используя три ДПП [5]. Вычислив положение пучка в каждом датчике для данных, полученных без насыщения электроники, и построив зависимость, аналогичную показанной на рис. 5, мы получили разрешение системы — 1.9 мкм.

Часть измерений была проведена с ослаблением выходных сигналов датчиков только на 10 дБ. Однако в этом случае динамический диапазон электроники позволял измерять отклонения в пределах ± 15 мкм, что меньше диапазона джиттера пучка. Таким образом, схема измерений работала с насыщениями. Поэтому обработка этих данных довольно трудоемка. Результаты обработки, показанные на рис. 6, дают разрешение порядка 0.2 мкм.

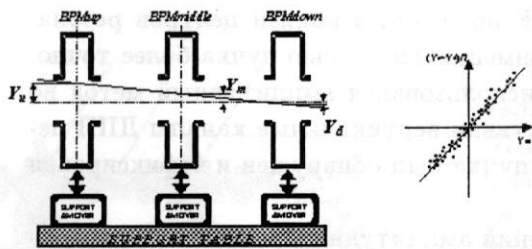


Рис. 5: Использование трех ДПП для определения разрешения.

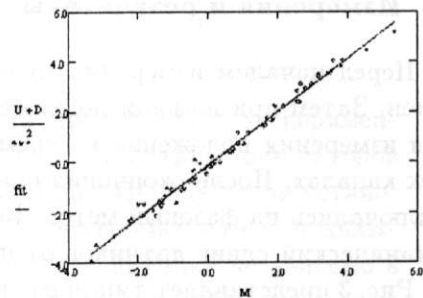


Рис. 6: Определение разрешения ДПП.

Заключение

Полная система резонаторного датчика положения пучка была протестирована в ATF BNL при использовании реального пучка, который имел джиттер по положению, углу, интенсивности и энергии. В данных условиях было получено разрешение системы в 0.2 мкм ($q=0.5$ нКл). Три независимых датчика использовались для исключения влияния джиттера пучка по положению и углу. Для абсолютной калибровки ДПП применялись прецизионные подвижки. Достигнутое разрешение определяется условиями проведения эксперимента и не является предельной величиной для данного ДПП.

Динамический диапазон электроники оказался недостаточным для работы в условиях существующего на ATF джиттера пучка. Поэтому выходной сигнал ДПП был ослаблен.

Нестабильность времени импульса лазера относительно ускоряющего напряжения в RF-пушке приводит к нестабильности "фазы пучка" относительно линии опорной фазы, которая использовалась в качестве опорного сигнала при фазовом детектировании. Это являлось причиной дополнительного джиттера выходного сигнала фазового метода.

Строго говоря, траектория пучка через систему датчиков не является прямой линией вследствие влияния магнитного поля. И даже в постоянном магнитном поле (например, поле Земли) отклонение от прямой не постоянно, а зависит от энергии частиц. Следовательно, энергетический разброс сгустков приводит к дополнительным ошибкам в определении разрешения методом трех датчиков.

В последующих экспериментах для улучшения разрешения системы мы планируем увеличить динамический диапазон электроники для согласования с джиттером пучка, добавить в установку опорный датчик для контроля "фазы пучка" относительно линии опорной фазы, попытаться исключить или учесть влияние магнитного поля.

Примечание

К моменту публикации статьи, в октябре 1998 года, был проведен следующий этап испытаний датчика положения. Был расширен динамический диапазон схемы обработки сигнала, изготовлена система контроля стабильности фазы по пучку, усовершенствовано программное обеспечение, приняты меры к экранизации магнитного поля между датчиками, коллективом ATF несколько улучшена стабильность пучка. Результаты, обработанные "on-line", дали разрешение 150 нм. Результат окончательной обработки будет опубликован позднее.

Список литературы

- [1] V. Balakin. "Concept BPM for VLEPP". Proc. 3rd Int. Workshop on Linear Colliders, v. 3, p. 155 (1991).
- [2] V. Balakin, V. Vogel, N. Solyak. "The Model of Beam Position Monitor for VLEPP". Proc. 3rd Int. Workshop on Linear Colliders, v. 3, p. 188 (1991).
- [3] W. Schnell. "Common-mode rejection in resonant microwave position monitors for linear colliders" CERN-LEP-RF/88-41, CLIC Note 70.
- [4] V. Balakin, A. Bazhan, P. Lunev et al. "Beam Position Monitor with nanometer resolution for Linear Collider". Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, v. 2, p. 1539 (1994).
- [5] T. Schintake. "Experimental Results from FFTB December 1995 run", Brief Memo (1995).
- [6] K. Batchelor, M. Babzien, I Ben-Zvi and others. "Operational experience on the Brookhaven National Laboratory Accelerator Test Facility". Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, v. 1, p. 736 (1994).
- [7] J.P.H. Sladen, I. Wilson, W. Wuensch. "CLIC Beam Position Monitor Tests", CERN-LEP-RF (1996).
- [8] R. Lorenz, K Yezza. "Test Results on Beam Position Monitor Prototype for the TTF", Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, v. 2, p. 1536 (1994).

Магნიконы — мощные высокоэффективные ВЧ-усилители. Современное состояние и перспективы*

И.А.Запругаев, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров, А.А.Никифоров,
Г.Н.Острейко, Г.В.Сердобинцев, В.В.Тарнецкий, С.В.Щелкунов
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера РАН, Новосибирск, Россия

Введение

Уже несколько десятилетий в ИЯФ СО РАН ведутся работы по созданию электронных СВЧ-приборов с нетрадиционным способом модуляции электронного потока. Как известно, в большинстве мощных приборов используется либо модуляция электронов по скорости (например, клистроны, ЛБВ, ЛОВ и др.), либо модуляция плотности электронного потока (лампы с сеточным управлением). В 1967 году академик Г.И.Будкер предложил новый ВЧ-усилитель [1, 2], в котором непрерывный релятивистский электронный пучок модулируется изменением своего пространственного положения путем круговой развертки. Применение релятивистских пучков и отсутствие электронных сгустков позволяло рассчитывать теоретически на получение высокой мощности и эффективности таких приборов.

1. Первые приборы с круговой разверткой пучка — гироконы

В 1970 году в Новосибирском институте ядерной физики был создан и испытан первый прибор с модуляцией электронного пучка путем круговой развертки, получивший название гирокона [1, 2]. Схема прибора изображена на рис. 1. В импульсном режиме работы на частоте 430 МГц был достигнут электронный КПД более 80%. Вслед за этим в Новосибирске на той же частоте был создан 65-МВт импульсный гирокона (рис. 1) для питания линейного ускорителя с энергией 50 МэВ [2, 4]. Этот прибор работает в составе электрон-позитронного источника ускорительного комплекса ВЭПП-4 с 1978 года по настоящее время. Кроме того, в нашем Институте были созданы 400-кВт гирокона непрерывного действия на частоте 180 МГц (рис. 1) [2, 4] и импульсный 7-ГГц гирокона, работающий на второй гармонике входной частоты [5]. Гирокона непрерывного действия работал в составе ВЧ-системы комплекса ВЭПП-4 с 1980 по 1982 год. Импульсный же 7-ГГц гирокона (рис. 1) создавался как прототип микроволнового СВЧ-источника для питания ускоряющей структуры электрон-позитронного коллайдера ВЛЭПП [6]. Исследования гирокона велись также и за рубежом. Так, в Los Alamos National Laboratory (LANL, США) был создан импульсный гирокона на частоту 450 МГц [7, 8]. Экспериментальные параметры перечисленных приборов сведены в табл. 1.

Теоретические и экспериментальные исследования гироконов различных конструкций и на различные параметры подтвердили их применимость в ускорительной технике, но вместе с тем вскрыли ряд ограничений, препятствующих получению высоких мощностей при продвижении в области коротких длин волн. К таковым относятся перегрев и пробой резонаторов из-за уменьшения их размеров, все возрастающая с увеличением частоты сложность проведения электронного пучка через узкие щели в выходном резонаторе без магнитной фокусировки и, соответственно, невозможность снижения энергии электронов пучка, т.е. увеличения микроперванса.

*Работа поддерживается РФФИ.

Таблица 1:

Гирокон	Первый	Непр. ВЭПП-4	Имп. ВЭПП-4	Имп. ВЛЭПП	Имп. LANL
Рабочая частота, МГц	430	182	430	7000	450
Мощность, МВт	0.6	0.4	65	60	0.15
Длит. импульса, мкс	20	CW	10	0.7	50
Напряжение пучка, кВ	320	240	1600	1200	82
КПД, %	65	60	75	25	23
Усиление, дБ	7	17	26	60	—

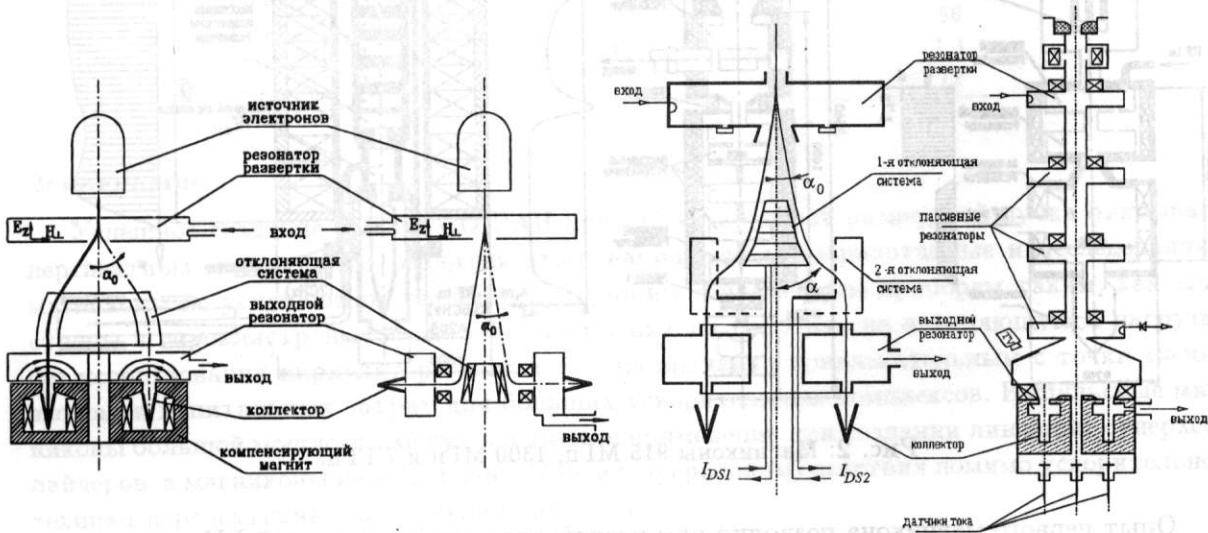


Рис. 1: Гироконы ИЯФ.

2. Магნიконы

Дальнейшее развитие электронных приборов с круговой разверткой стало возможно с изобретением и созданием "гирокона с магнитным сопровождением", получившего название магникон [9, 10]. Применение постоянного магнитного поля сопровождения и использование циклотронного резонанса обеспечивают длительное взаимодействие электронов с ВЧ-полями резонаторов и существенно облегчают транспортировку мощного электронного пучка. В магниконе электронный пучок пересекает все резонаторы прибора через центральные отверстия в торцевых стенках. Причем продольные размеры резонаторов системы модуляции составляют около половины длины волны, а выходного резонатора — несколько длин волн. Это приводит к значительному снижению напряженности ВЧ-полей и удельного тепловыделения в стенках резонаторов, к упрощению конструкции и увеличению эффективности прибора.

Первые испытания магникона — прототипа непрерывного (квазинепрерывного) микроволнового усилителя были проведены в нашем Институте в середине 80-х годов [11] и продемонстрировали рекордные результаты. На частоте 915 МГц были достигнуты мощность 2.6 МВт и электронный КПД 85% при работе на согласованную нагрузку. Затем были проведены испытания работы магникона на ускоряющую структуру разрезного микротрона [12]. На выходе ускорителя был получен ток 50 мА с энергией 6 МэВ в импульсе 30 мкс. В этих экспериментах было проверено еще одно замечательное свойство магникона — воз-

возможность работы на изменяющуюся резонансную нагрузку без циркулятора. Это свойство чрезвычайно важно при создании современных ускорительных комплексов в связи с высокой стоимостью вентиляльных устройств большой мощности. Схематическое устройство первого магникона изображено на рис. 2.

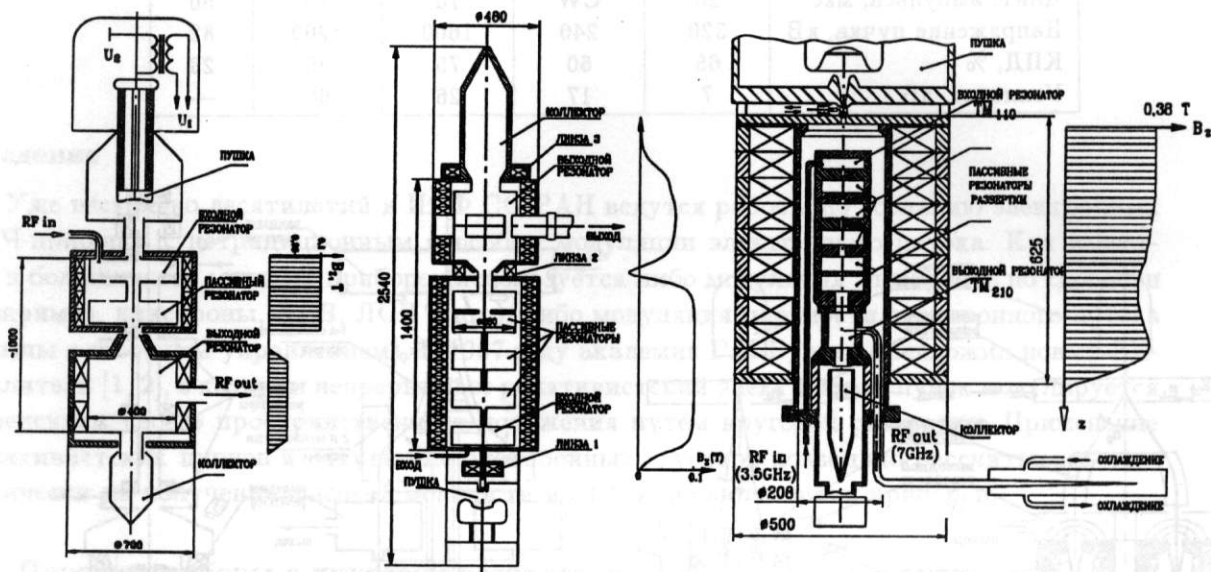


Рис. 2: Магниконы 915 МГц, 1300 МГц и 7 ГГц.

Опыт первого магникона позволил нам разработать альтернативный ВЧ-источник для проекта сверхпроводящего линейного электрон-позитронного коллайдера TESLA (Германия). Анализ показал возможность создания на частоте 1300 МГц магникона мощностью 10 МВт в непрерывном или длинноимпульсном режиме работы (рис. 2) с эффективностью более 70% [13]. На наш взгляд, этот магникон перспективен также в качестве ВЧ-источника протонных линейных ускорителей большой мощности для утилизации радиоактивных отходов.

В начале 90-х годов в ИЯФ начались работы по созданию продвинутой версии магникона. Этот магникон был предложен как прототип микроволнового источника для линейных суперколлайдеров [14]. Схема магникона приведена на рис. 2. Прибор работает на второй гармонике входной частоты и отличается от магникона усилителя тем, что постоянное магнитное поле сопровождения едино для системы модуляции и выходного резонатора.

Параллельно с экспериментальной работой шло совершенствование программного обеспечения для расчета электронной оптики, электромагнитных систем и динамики электронного пучка как в установившемся, так и в переходном режиме [15, 16, 17]. Был создан и успешно прошел испытания источник электронов с уникальными параметрами [18], исследованы различные варианты конструкции как самого прибора, так и отдельных его элементов [14]. По результатам численного моделирования и экспериментальных исследований был создан действующий импульсный магникон. На частоте 7000 МГц достигнута мощность 55 МВт при электронном КПД 56%. Основные экспериментальные параметры магниконов приведены в табл. 2 [19], здесь же указаны расчетные параметры магникона для TESLA.

Таблица 2:

Магნიкон	Первый	Для TESLA (проект)	Импульсный
Рабочая частота, МГц	915	1300	7000
Входная частота, МГц	915	1300	3500
Уск. напр. пучка, кВ	300	250	427
Ток пучка, А	12	51	230
Микропервеанс	0.073	0.4	0.86
Мощность пучка, МВт	3.6	12.8	99
Частота след. имп., Гц	1	10	1-2
Выходная мощность, МВт	2.6	10	55
Электронный КПД, %	85	76	56
Длит. ВЧ-импульса, мкс	30	2000	1.1
Усиление, дБ	30	52	72

Заклучение

Успешное создание в ИЯФ СО РАН приборов с круговой разверткой пучка открывает перспективы дальнейшего развития этого направления. Разработанные и исследованные магниконы не уступают по параметрам лучшим современным приборам таким, как клистроны и гироклистроны. А способность магникона работать на изменяющуюся нагрузку без использования циркулятора делает его чрезвычайно привлекательным с точки зрения экономии капитальных затрат для больших ускорительных комплексов. Импульсные магниконы большой мощности могут найти свое применение при создании линейных суперколлайдеров, а магниконы непрерывного (квазинепрерывного) действия помимо ускорительной техники перспективны для прикладных целей.

Список литературы

- [1] G.I. Budker et al. Microwave electron discharge device. U.S. Patent No. 3,885,193, 1975.
- [2] G.I. Budker et al. The Gyrocon — an Efficient Relativistic High-Power VHF Generator. Particle Accelerators, vol. 10, pp. 41-59, 1979.
- [3] М.М. Карлинер и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭПП-4. Система высокочастотного питания. Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-110, Новосибирск, 1984.
- [4] Г.И. Будкер и др. Высокочастотная система электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4 на основе гирокона — мощного УКВ генератора с несгруппированным релятивистским пучком. Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1, стр. 284-287, 1977.
- [5] В.Е. Балакин и др. Исследование макета импульсного гирокона сантиметрового диапазона. Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1, стр. 277-280, 1987.
- [6] В.Е. Балакин А.Н. Скринский. Проект ВЛЭПП. Вестник АН СССР, т.3, стр. 66-77, 1983.
- [7] P.J. Tallerico. Status of the Los Alamos Gyrocon. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-28, pp. 2797-2800, 1981.
- [8] P.J. Tallerico. A 150 kW, 450 MHz Gyrocon RF Generator. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-30, No 4, pp. 3420-3422, 1983.

- [9] М.М. Карлинер и др. Электронный прибор СВЧ-магнотрон. А.С. 1110335, Б.И., 4, 1986.
- [10] A.N. Belov et al. Magnicon — a New Microwave Generator for Accelerators. Proc. XIII International Part. Accel. Conf. (Novosibirsk, 1986), vol. 2, pp. 300–302, 1987.
- [11] М.М. Карлинер et al. The Magnicon — an Advanced Version of the Gyrocon. NIM-A, vol. A269, No 3, pp. 459–473, 1988.
- [12] В.Е. Акимов и др. Ускоряющая структура разрезного микротрона. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89–162, Новосибирск, 1989.
- [13] O. Nezhevenko et al. Magnicon — high power RF source for TESLA. In: Proc. of The Fourth European Part. Accel. Conf., v.3, pp. 1924–1926, 1994.
- [14] E.V. Kozyrev et al. Performance of the High Power 7 GHz Magnicon Amplifier. Particle Accelerators vol.55, pp.55–64, 1996.
- [15] B. Fomel et al. Computer-Aided Electron Gun Design. Proc. XIII Int. Conf. on High-Energy Accel., vol 1, 1987, стр. 353–355.
- [16] D. Myakishev and V. Yakovlev. The New Possibilities of SuperLANS Code. Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995.
- [17] V. Yakovlev et al. Numerical Simulation of Magnicon Amplifier. Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995.
- [18] Y.V. Baryshev et al. A 100 MW Electron Source with Extremely High Beam Area Compression. NIM, vol. A 340, pp.241–258, 1994.
- [19] E.V. Kozyrev et al. The New Results of the 7 GHz Pulsed Magnicon Amplifier Investigation. Proc. of Europ. Part. Acc. Conf., Stockholm, 1998, (to be published).

Мощные высокочастотные системы ИЯФ СО РАН

П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов., А.А.Бушуев, В.Г.Вещеревич, В.Н.Волков,
 Н.Г.Гаврилов, Э.И.Горникер, В.Н.Ерохов, М.М.Карлинер, Е.К.Кенжебулатов,
 А.А.Кондаков, С.А.Крутихин, Я.Г.Крючков, И.В.Купцов, Г.Я.Куркин,
 Л.А.Мироненко, В.Н.Осипов, В.М.Петров, А.М.Пилан, И.К.Седяров,
 А.Г.Трибендис, М.Ю.Фомин, Н.Г.Фомин, Е.Н.Харитонов
 Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера РАН, Новосибирск, Россия

В конце 80-х годов в Институте ядерной физики СО АН СССР было решено построить мощные высокочастотные системы для накопителя со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4 (ИЯФ), накопителей СИ "Сибирь-2" (Институт ядерных исследований им. Курчатова) и ТНК (Зеленоград), разрезного микротрона-рекуператора (ИЯФ). К этому времени самым мощным вакуумным электронным прибором в сравнительно коротковолновом диапазоне ($f=200$ МГц), выпускаемым отечественной промышленностью, была лампа ГУ-101А. Эта лампа была разработана на объединении "Светлана" (г.Ленинград) по заказу ИФВЭ (г.Серпухов) для УНК. Поскольку ИЯФ имел опыт работы в этом частотном диапазоне ($f=180$ МГц) и имел некоторое количество резонаторов для ВЧ-системы ВЭПП-4, было решено строить ВЧ-системы перечисленных выше ускорителей на частоте 180 МГц с использованием ВЧ-генераторных ламп ГУ-101А и ГУ-92А. Параметры ускорителей и их ВЧ-систем приведены в табл. 1.

Таблица 1:

№	Ускоритель	ВЭПП-4	Сибирь-2	ТНК	Разрезной Микротрон-рекуператор
1.	Энергия ускоряемых частиц (Гэв)	6.0	2.5	1.6-1.9	0.1-0.15
2.	Ток ускоряемых частиц (мА)	20×20	200	300	45
3.	ВЧ-мощность, потребляемая пучком (кВт)	130	150	50-90	55
4.	Количество резонаторов	6	2	2	19-51
5.	Макс. напряжение на одном резонаторе (МВ)	1.0	0.74	0.45	0.8
6.	Макс. суммарное напряжение на всех резонаторах (МВ)	6.0	1.48	0.9	12.8-38.4
7.	Шунтовое сопротивление резонатора (МОм)	6.4	6.4	4.0	4.0
8.	Максимальная мощность, рассеиваемая в резонаторе (кВт)	78	45	25	80
9.	Максимальная мощность, рассеиваемая в резонаторах (кВт)	468	90	50	1370-3930
10.	Номинальная мощность В Ч генераторов (кВт)	1000	400	400	1430-4000

Таким образом, для этих ускорителей необходимы были генераторы ВЧ-мощности на суммарную мощность $\sim 5,6$ МВт. Для того чтобы упростить и удешевить производство и монтаж на установках генераторов, была найдена возможность модульной конструкции каскадов на лампах ГУ-101А. В этом случае каскады собираются из трех модулей (рис.1): ламповый модуль 1, модуль вывода мощности из каскада 2 и модуль перестройки частоты 3. Модули вывода мощности одной стороной подсоединяются к выходному коаксиальному фидеру, а другой стороной — к ламповому модулю.

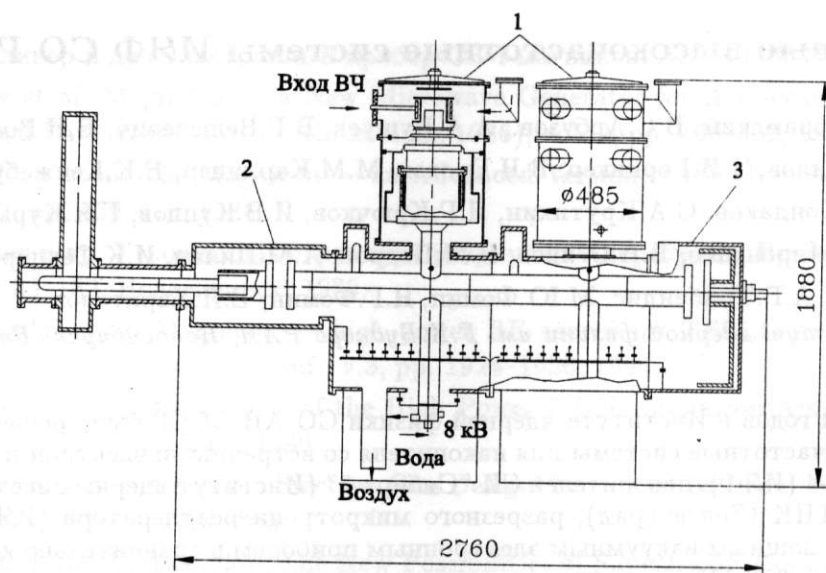


Рис. 1: Схематический чертеж генератора с двумя ламповыми модулями. 1 – ламповые модули, 2 – модуль вывода мощности, 3 – модуль перестройки частоты.

В каскаде может быть от одного до четырех ламповых модулей. Это обеспечивает соответственно выходные ВЧ-мощности на частоте ~ 180 МГц в непрерывном режиме 150; 300; 450; 600 кВт. Со свободной стороны последнего лампового модуля подсоединяется модуль перестройки частоты. Входные каскады генераторов были спроектированы по классической схеме на лампах ГУ-92А. Максимально допустимые параметры для лампы ГУ-101А показаны в табл. 2.

Таблица 2: Максимально-допустимые параметры для лампы ГУ-101А

Мощность, рассеиваемая на аноде	250 кВт
Напряжение на аноде	14 кВ
Напряжение на экранной сетке	1,2 кВ
Мощность, рассеиваемая на экранной сетке	3 кВт
Мощность, рассеиваемая на управляющей сетке	1,5 кВт
Напряжение накала	15 В
Ток накала	650 А
Рабочая частота	200 МГц.

Опытный образец двухлампового каскада на лампах ГУ-101А был произведен в мастерских ИЯФ. Массовое изготовление модулей генераторов было произведено в 1989–1991 гг. на Барнаульском радиозаводе. В выпрямителях анодного питания ВЧ-генераторов ВЭПП-4, “Сибирь-2” и ТНК используются тиристорные преобразователи, выпускаемые в Запорожье, и быстродействующая защита, разработанная и изготовленная в ИЯФ. Выпрямитель обеспечивает 8 кВ постоянного напряжения и до 2 МВт мощности. Быстродействующая защита обеспечивает отключение напряжения с анодов ламп генераторов при превышении тока лампы выше максимально допустимого за ~ 50 мксек. Это предотвращает возможное разрушение экранных сеток ламп при электрическом пробое в лампе. Если не отключать так быстро напряжение, то даже энергии, накопленной в фильтре выпрямителя, будет достаточно, чтобы разрушить сетки ламп, т.е. вывести лампу из строя.

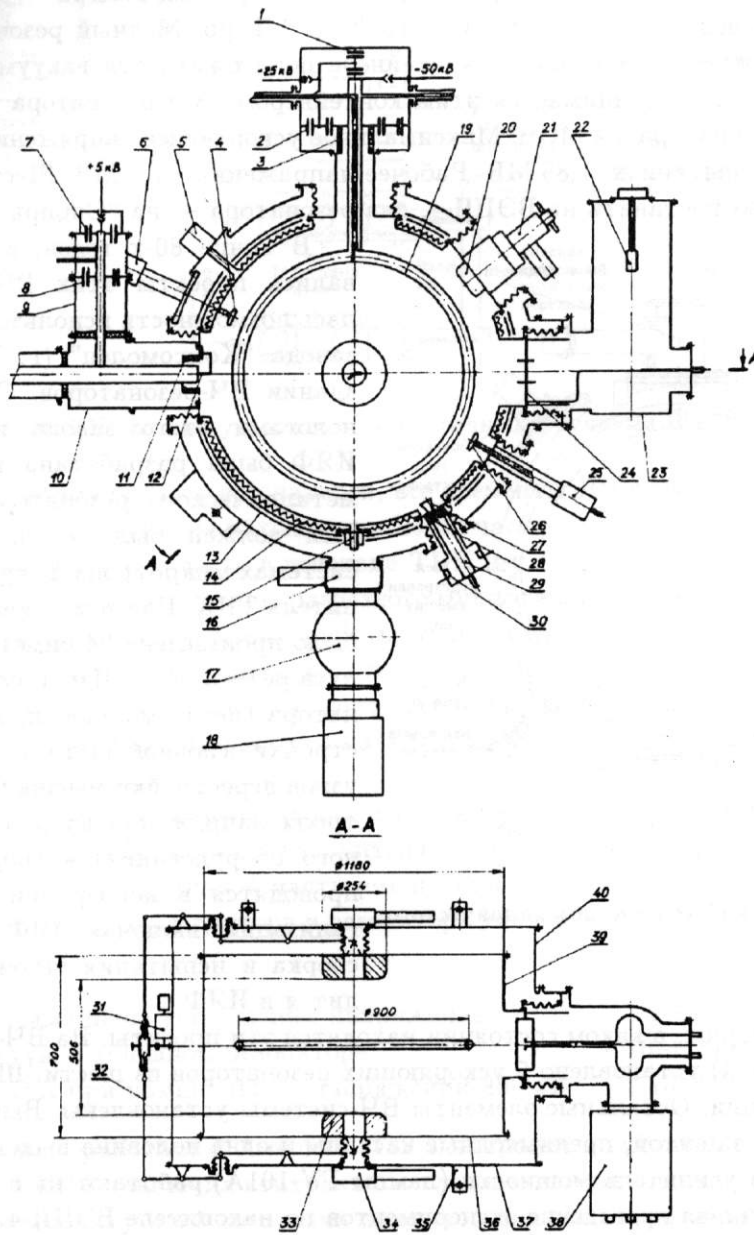


Рис. 2: Схематический чертеж двухкамерного резонатора 181 МГц. 1, 2, 7, 8 – блокировочные конденсаторы; 3, 11, 28 – керамические изоляторы; 4, 20, 26 – элементы подстройки высших мод; 6, 21, 25 – приводы подстройки; 5 – вывод нагревателей и термпар; 9 – четвертьволновый стакан; 10 – узел ввода мощности; 12 – петля связи; 13 – тепловые экраны; 14 – нагреватели; 15 – перепускной клапан; 16, 34 – вакуумные шиберы; 17 – азотная ловушка; 18, 38 – магниторазрядные насосы; 19 – противоразрядное кольцо; 22 – испаритель титана; 23 – сорбционный насос; 24 – электромагнитный экран; 27 – измерительная петля; 29 – отрезок коаксиальной линии; 30 – датчики напряжения; 31 – привод подстройки основной частоты; 32 – механизм подстройки; 33, 36, 39 – корпус резонатора; 37, 40 – вакуумный кожух; 35 – геодезические знаки.

В ВЧ-системах накопителя ВЭПП-4 и накопителя "Сибирь-2" было решено использовать ускоряющие резонаторы на частоту 180 МГц, которые были изготовлены для накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4 в семидесятые годы. Всего в ИЯФ было изготовлено 8 таких резонаторов. Резонаторы двухкамерные (рис.2). Внутренняя камера — это медный резонатор, в котором поддерживается вакуум 10^{-8} – 10^{-9} Торр. Медный резонатор помещен в контейнер из нержавеющей стали. В контейнере поддерживается вакуум 10^{-6} Торр. Атмосферное давление воспринимается этим контейнером. Вес резонатора ~5 т. Шунтовое сопротивление резонатора 6,4 МОм. Максимальное ускоряющее напряжение на резонаторе, полученное при испытаниях, 1,85 МВ. Рабочее напряжение ~1,4 МВ. Шесть таких резонаторов было решено поставить на ВЭПП-4, два резонатора — на "Сибирь-2".

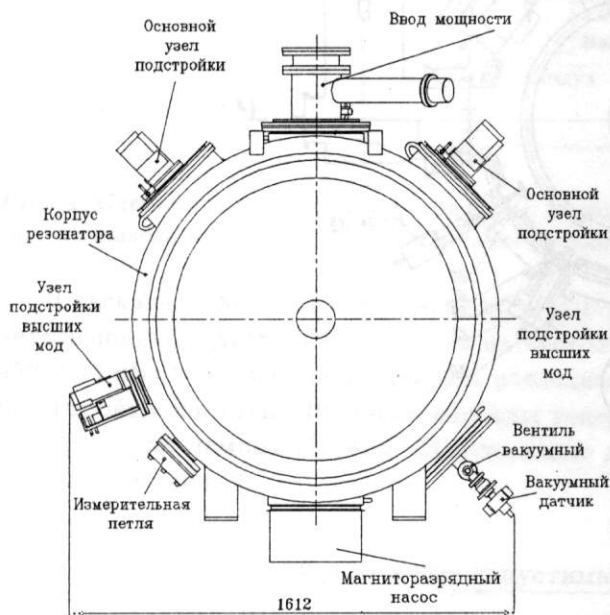


Рис. 3: Схематический чертеж биметаллического резонатора.

В конце 80-х годов, когда рассматривались проекты этих ВЧ-систем, появилась возможность использовать технологии завода "Комсомолец" (г. Тамбов) при создании ВЧ-резонаторов. Совместно с технологами этого завода и сотрудниками ИЯФ была разработана конструкция биметаллического резонатора (рис.3), который должен был использоваться в ВЧ-системах микротрона-рекуператора и накопителя ТНК. На этом заводе в 1990–1991 гг. было произведено 24 биметаллических корпуса резонаторов. Изготовление узлов резонатора (ввода мощности, двух узлов перестройки основной частоты резонатора, двух узлов перестройки высших мод, петли контроля напряжения на резонаторе, вакуумного оборудования) и сборка резонаторов проводятся в кооперации нескольких организаций, включая ИЯФ. Окончательная сборка и испытания резонаторов производится в ИЯФ.

Теперь рассмотрим, в каком состоянии находятся эти проекты. На ВЧ-системе накопителя ВЭПП-4 (рис.4) установлено 5 ускоряющих резонаторов из шести. Шестой резонатор требует реставрации. Остальные элементы ВЧ-системы установлены. Выпрямители с быстросрабатывающей защитой, предвыходные каскады и одна половина выходного каскада — четырехламповый усилитель мощности (лампы ГУ-101А) работают на 5 ускоряющих резонаторах, обеспечивая проведение экспериментов на накопителе ВЭПП-4. Выходная мощность ВЧ-генератора в этой конфигурации 500 кВт. Закончен монтаж второго мощного усилителя на 500 кВт. Когда возникнет необходимость, второй усилитель мощности будет подключен, и выходная мощность ВЧ-генератора ВЭПП-4 станет 1 МВт.

Все элементы ВЧ-системы накопителя "Сибирь-2" на частоту 181 МГц установлены. Система питания генераторов находится в рабочем состоянии. Половина ВЧ-системы, которая включает ускоряющий двухкамерный резонатор, ВЧ-генератор с выходным мощным каскадом на двух лампах ГУ-101А находится в рабочем состоянии и обеспечивает работу накопителя "Сибирь-2". Накопленный ток в накопителе 150 мА. Максимальная энергия электронов при этом токе 1,8 ГэВ. Другую половину ВЧ-системы планируется привести в рабочее состояние в конце этого года.

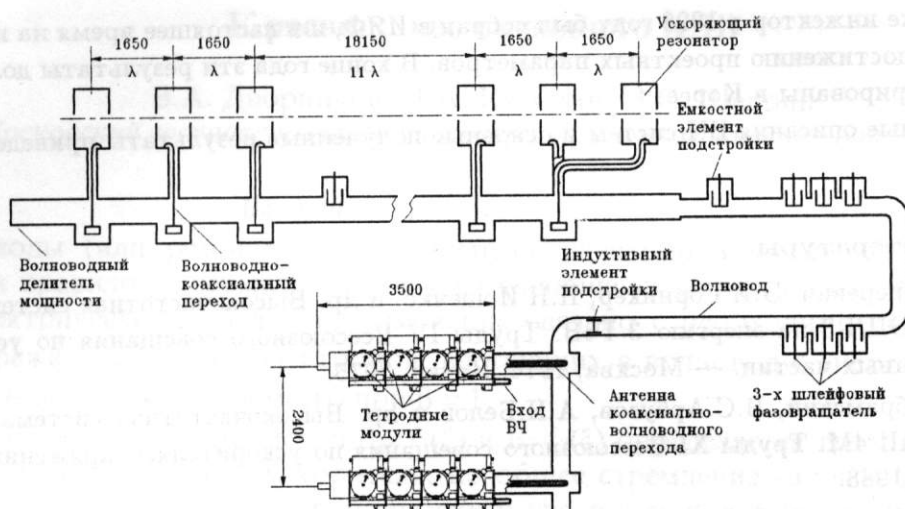


Рис. 4: ВЧ-система ускорителя со встречными пучками ВЭПП-4.

Кроме двух биметаллических резонаторов, все элементы ВЧ-системы накопителя ТНК изготовлены. Часть оборудования находится в ИЯФ, часть — в Зеленограде на ТНК. Пока никаких конкретных планов о вводе в действие ТНК нет.

Финансирование работ по созданию разрезного микротрона-рекуператора очень маленькое. Его едва хватает на строительные работы по подготовке помещений для размещения ускорителя. Только зарубежные контракты позволили сделать несколько шагов по созданию ВЧ-системы этого ускорителя. Так, контракт на поставку ускоряющего резонатора в университет Дьюк, штат Северная Каролина, США позволил провести испытания первого биметаллического резонатора в 1992 году.

Второй резонатор, предназначенный для поставки в США, потребовал некоторой переделки. Так как частота ВЧ-системы накопителя в Дьюк 178,5 МГц, то это потребовало изменения конструкции центральной части резонатора.

При испытаниях первого резонатора и резонатора университета Дьюк были достигнуты следующие результаты:

Максимальное ускоряющее напряжение	— 1.2 МВ
Вакуум в холодном резонаторе	— 10–11 Торр
Вакуум при номинальном напряжении 800 кВ	— $2 \cdot 10^{-9}$ Торр.

Резонатор успешно работает в Америке. Ток электронов в накопителе 150 мА.

В прошлом году ИЯФ заключил контракт с исследовательским центром KAERI, Южная Корея. По этому контракту ИЯФ изготовил инжектор для микротрона-рекуператора и два ускоряющих резонатора, которые могут быть использованы в микротроне-рекуператоре. Инжектор должен обеспечивать импульсы электронного тока длительностью 0,3 нсек, с частотой повторения от 1 кГц до 22,5 МГц и среднем токе при максимальной частоте повторения 22 мА. Энергия электронов 1,5 МэВ.

В состав инжектора входят три биметаллических резонатора и три генератора мощности. Один резонатор используется для клистронной группировки. Максимальное напряжение на этом резонаторе 150 кВ. Питается этот резонатор генератором с выходным каскадом на лампе ГУ-92А и с выходной мощностью 2 кВт. Два других резонатора — ускоряющие. Напряжение на этих резонаторах 650 кВ. Каждый резонатор питается от ВЧ-генератора с выходным каскадом на одной лампе ГУ-101А. Этот инжектор в начале этого года был собран в Корее, и на выходе был получен ток ~12 мА.

Такой же инжектор в 1998 году был собран в ИЯФ, и в настоящее время на нем ведутся работы по достижению проектных параметров. В конце года эти результаты должны быть продемонстрированы в Корею.

Подробные описания ВЧ-систем и основные полученные результаты приведены в литературе.

Список литературы

- [1] В.Г.Вещеревич, Э.И.Горникер, Н.Н.Иощенко, и др. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-3 на энергию 3 ГэВ. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — Москва, 1974. Наука, 1975.
- [2] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, А.Н.Белов и др. Высокочастотная система накопителя ВЭПП-4М. Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1988.
- [3] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, А.Н.Белов и др. Высокочастотная система накопительного комплекса "Сибирь - 2". Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1988. Дубна 1989.
- [4] П.Ю.Абрамский, В.С.Арбузов, В.А.Беломестных и др. Высокочастотная система накопительных колец комплекса "ТНК". Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990. Дубна, 1992.
- [5] В.Г.Вещеревич, Н.А.Винокуров, П.Д.Воблый и др. Проект разрезного микротрона-рекуператора для лазера на свободных электронах. Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990. Дубна 1992.
- [6] V.Arbuzov, S.Belomestnykh, A.Bushuev et al. RF System of the CW Race-track Microtron-Recuperator for FELs. PAC'93, Washington, USA.
- [7] R.F.Cavity for the Novosibirsk Race-track Microtron-Recuperator. N.Gavrilov, I.Kuptsov, G.Kurkin et al. Preprint of Budker INP # 94-92, Novosibirsk 1994.
- [8] Status of a 2-Mev CW RF injector for the Novosibirsk high power FEL. V.Anashin, V.Arbuzov, Y.Avlasov et al. SR-98, Novosibirsk, 1998.
- [9] RF-System of Electron Injector for the Race-Track Microtron-Recuperator. V.Arbuzov, N.Fomin, E.Gorniker et al. XVII International Conference on High Energy Accelerators. Sept. 7-12, 1998, Dubna, Russia.
- [10] В.С.Арбузов, А.А.Бушуев, Э.И.Горникер и др. Мощный УКВ генератор модульной конструкции для накопителей и ускорителей. Доклад на XVI совещании по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998.

Состояние работ на 2-МэВ инжекторе для мощного ЛСЭ

В.В. Анашин, Я.К. Авласов, В.С. Арбузов, Б.А. Баклаков, А.М. Батраков, И.В. Белоусов, В.П. Болотин, В.М. Боровиков, А.А. Бушуев, В.Ф. Веремеенко, В.Г. Вещеревич, Н.А. Винокуров, П.Д. Воблый, Н.Г. Гаврилов, Э.И. Горникер, Б.А. Гудков, Б.А. Довженко, Ю.А. Евтушенко, А.И. Ерохин, Е.И. Загородников, Е.М. Закутов, Н.И. Зиневич, Д.А. Кайран, А.Н. Кергинский, В.В. Колмогоров, Е.И. Колобанов, А.А. Кондаков, Д.А. Коршунов, Г.С. Крайнов, С.А. Крутихин, А.М. Крючков, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, А.А. Литвинов, Д.А. Марков, Л.Э. Медведев, А.С. Медведко, Е.Г. Мигинская, С.В. Мигинский, Л.А. Мироненко, А.Д. Орешков, В.К. Овчар, В.М. Петров, А.М. Пилан, В.М. Попик, И.К. Седяров, В.В. Смирных, И.Н. Сорокин, С.В. Тарарышкин, М.А. Тиунов, А.Г. Трибендис, В.А. Ушаков, М.А. Холопов, В.П. Черепанов, Т.В. Шафтан, М.А. Щеглов, А.А. Шейнгезихт, Е.И. Шубин, Г.И. Яснoв

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики им. Будкера разработан, изготовлен и запущен инжектор электронов на энергию 2 МэВ для мощного лазера на свободных электронах при Центре фотохимических исследований. Инжектор состоит из электронной пушки на энергию 300 КэВ, одного группирующего и двух ускоряющих ВЧ резонаторов с ВЧ-генераторами, вакуумной, магнитной и диагностической систем и поглотителя пучка. Электронная пушка, в которой используется катод с двумя сетками, обеспечивает электронный пучок со средним током 45 мА, частотой повторения 22,5 МГц и пиковым током до 2 А. ВЧ-система работает на частоте 180 МГц. ВЧ-генераторы обеспечивают выходную мощность до 260 кВт. Инжектор будет использоваться для мощного ЛСЭ на базе разрезного микротрона-рекуператора, который сейчас сооружается в Новосибирске.

В Центре фотохимических исследований (г. Новосибирск) ведется строительство инфракрасного лазера на свободных электронах со средней мощностью до 100 кВт на базе разрезного микротрона-рекуператора [1]. На данном этапе запущен в работу инжектор электронов с энергией 2 МэВ и ведутся работы по измерению параметров электронного пучка.

Инжектор (см. рис 1) состоит из электронной пушки (1), группирующего (2) и двух ускоряющих (3) резонаторов, магнитной (4) и вакуумной систем, системы управления и контроля и системы диагностики (5).

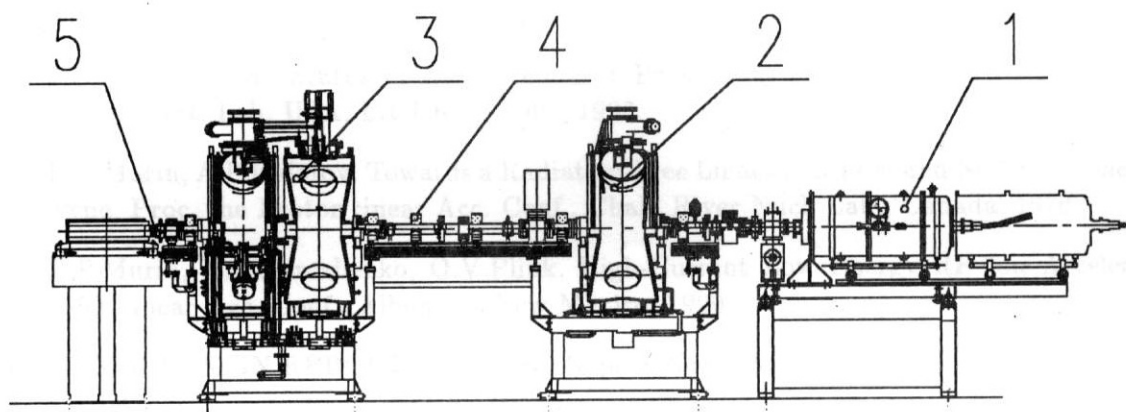


Рис 1.

Электронные сгустки с зарядом 2 нКл, длительностью 1,5 нс и частотой повторения от 2 кГц до 22,5 МГц получают с помощью 300-кэВ электростатической пушки, управляемой импульсным модулятором [2]. В качестве источника электронов применяется катодно-сеточный узел с оксидным катодом от высокочастотной лампы ГС-15Б.

ВЧ-система инжектора состоит из трех одинаковых резонаторов с рабочей частотой 180,3 МГц [3]. Ускоряющие резонаторы объединены в единый модуль. Каждый резонатор запитан от генератора, собранного на основе тетродов ГУ92А и ГУ101А. Группирующий резонатор обеспечивает ускоряющее напряжение 150 кВ, ускоряющие – до 800 кВ. Регулировка амплитуды и фазы ускоряющего напряжения и подстройка рабочей частоты и высших гармоник резонаторов осуществляются независимо.

Магнитная система инжектора состоит из набора соленоидов, фокусирующих электронный пучок по обеим координатам, и корректирующих магнитов. Расположение соленоидов и их фокусирующая сила рассчитывались с помощью специальной программы с учетом собственного заряда электронного пучка. Каждый соленоид и корректор запитаны от отдельных источников питания, которые управляются от компьютера.

Вакуумная система включает вакуумную камеру, керамическую ускоряющую трубку пушки, поглотитель пучка, набор магниторазрядных насосов с высоковольтными источниками питания и измерительных ламп. Вакуумная камера сделана в виде трубы диаметром 80 мм из нержавеющей стали. Так как мощность электронного пучка может быть до 70 кВт, то в вакуумную камеру вставлены медные коллиматоры с водяным охлаждением. Поглотитель – медный с водяным охлаждением и магнитной разверткой электронов, рассчитан на поглощение пучка мощностью до 100 кВт. Вся вакуумная система и ВЧ-резонаторы были прогреты при температуре около 250°C.

Система диагностики состоит из двух датчиков среднего тока, двух широкополосных датчиков, трех пикап-станций и модуля для измерения параметров электронного пучка.

Датчик среднего тока представляет собой комбинацию из пояса Роговского и феррозонда постоянного тока, которые обеспечивают измерение тока частотой от нескольких сотен килогерц до постоянного. Будучи размещенными в начале и в конце канала транспортировки электронного пучка, такие датчики используются не только для измерения среднего тока, но и для системы блокировки запусков пушки, когда разница между средними токами датчиков превышает определенный (300 мкА) порог из-за потерь электронов в канале. Широкополосный датчик с разрешением около 100 пс позволяет наблюдать отдельные импульсы тока, группировку электронов в сгустках и контролировать фазы влета сгустков в ВЧ-резонаторы. Пикап-станции служат для измерения траектории электронного пучка в канале.

Модуль измерения параметров пучка состоит из системы для измерения поперечных размеров и системы измерения продольного распределения. Продольное распределение измеряется с помощью оптического стробоскопического прибора-диссектора с разрешением 10 пс [4]. В качестве источника света для диссектора используется переходное излучение при выводе электронного пучка в специальный канал через титановую фольгу с помощью корректора при низкой частоте повторения или с помощью специального кикер-магнита при высокой частоте повторения.

Поперечные размеры пучка измеряются с помощью телекамеры с люминесцентного экрана или экрана переходного излучения при выводе пучка в специальный канал аналогично измерениям продольного распределения. Существует возможность измерения поперечных размеров электронного пучка без вывода его в специальный канал с использованием системы на основе магниевого струи.

В таблице приведены расчетные параметры электронного пучка для данного инжектора.

Таблица

Полная энергия	2 МэВ
Средний ток	45 мА
Частота повторения	до 22,5 МГц
Длина сгустка	≤ 200 пс
Заряд в сгустке	≥ 2 нКл
Энергетический разброс	≤ 15 кэВ
Эмиттанс	$\leq 50 \mu\text{м} \cdot \text{мрад}$

На данном этапе собраны и проверены все системы инжектора и получен электронный ток в канале транспортировки.

Список литературы

- [1] N.A. Vinokurov, N.G. Gavriliiv, et al. Status of high power free electron using race track microtron-recuperator. Proc. 17-th Free electron laser conference, New York, USA, (1996) 403.
- [2] В.М. Боровиков, А.Н. Кергинский, и др. Электронная пушка для инжектора лазера на свободных электронах. Труды данного совещания.
- [3] V.S. Arbuzov, et al. RF System of CW Race-Track Microtron-Recuperator for FEL's, Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conf., PAC-93, vol.2, p.1226.
- [4] E.I. Zinin. Stroboscopic method of electron-optical picosecond resolution chronography and its application in synchrotron radiation experiments. Nucl. Inst. and Meth., A208, (1983), p.439.

Электронная пушка для инжектора лазера на свободных электронах

В.М.Боровиков, А.Н.Кергинский, Б.М.Корабельников, Г.С.Крайнов,
А.М.Крючков, Э.А.Купер, А.В.Мадорский, Е.Г.Мигинская, А.М.Молокоедов,
В.К.Овчар, В.В.Прудников, И.Н.Сорокин, М.А.Тиунов, Г.И.Яснот
*Институт ядерной физики им. Г.И.Буджера СО РАН,
Новосибирск, Россия*

Представлены конструкция и экспериментальные результаты, полученные на тетродной электронной пушке, разработанной для инжектора лазера на свободных электронах [1]. Основные параметры: широкий диапазон частоты повторения электронных сгустков $0 \div 22.5$ МГц, пиковый ток ~ 1.8 А, длительность импульсов — 1.3 нс, малый эмиттанс электронного пучка с энергией 300 кэВ. Малый эмиттанс обеспечивается тетродным типом катодно-сеточного узла. Получен пучок электронов со средним током 30 мА. Величина среднего тока ограничивалась ухудшением вакуума в цилиндре Фарадея. Измеренная нестабильность электронных сгустков меньше ± 50 пс.

Введение

Для инжектора лазера на свободных электронах, создаваемого в Центре фотохимических исследований, разработана и запущена в эксплуатацию электронная пушка с термокатодом, находящимся под высоким потенциалом.

Общее описание системы

Общий вид электронной пушки, изготовленной в ИЯФ СО РАН, представлен на рис.1.

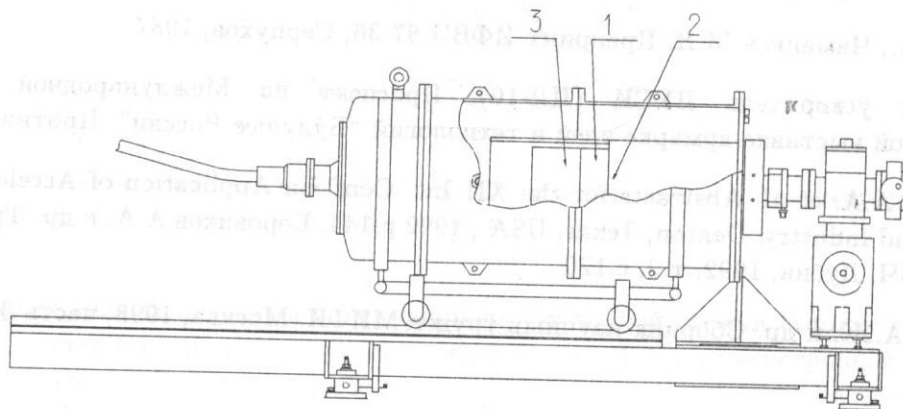


Рис. 1:

В состав электронной пушки входят следующие узлы:

1. Катодно-сеточный узел.
2. Ускорительная трубка.
3. Модулятор и источник питания модулятора.
4. Высоковольтный выпрямитель и генератор первичного напряжения.

1. Катодно-сеточный узел

В качестве источника электронного пучка используется катодно-сеточный узел, который представляет собой металлокерамическую конструкцию с цилиндрическими выводами электродов, металлוגубчатым оксидным катодом и двумя управляющими сетками.

Для обеспечения минимальной дополнительной индуктивности и емкости между катодом и сетками, что существенно важно для формирования запускающих импульсов наносекундной длительности, а также устранения необходимости принудительного охлаждения керамики были сконструированы и изготовлены специальные цанги, с помощью которых подавалось напряжение на накал, катод и управляющие сетки. Избыточное тепло от керамики отводилось специальным радиатором с малой паразитной емкостью.

2. Ускорительная трубка

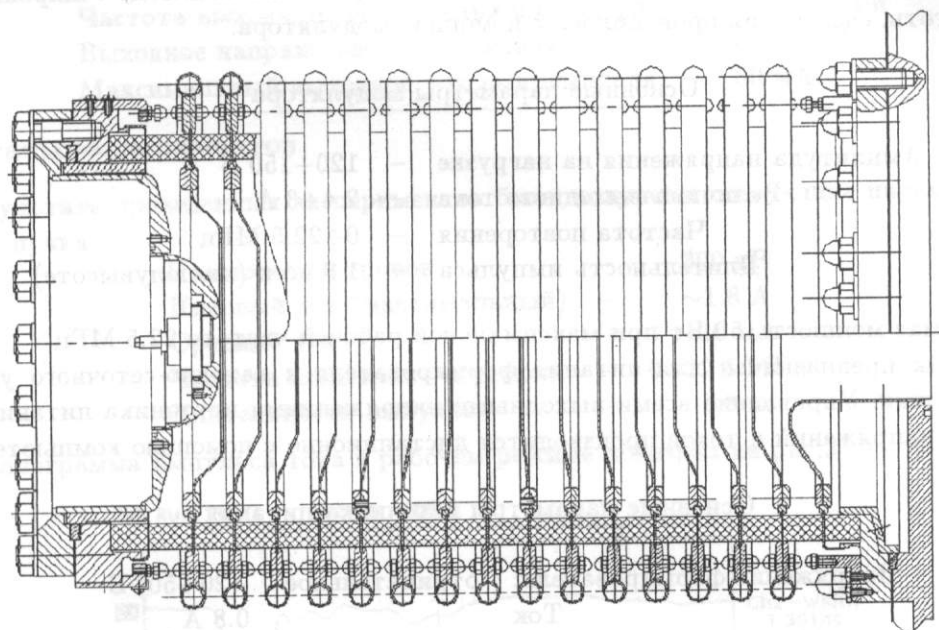


Рис. 2:

Ускорение и формирование электронного пучка проводились в ускорительной трубке, общий вид которой показан на рис.2. Данная трубка применялась в горизонтальном исполнении. Ускорительная трубка представляет собой вакуумно-плотный прогревной металлокерамический узел высотой ~ 350 мм и диаметром ~ 285 мм, состоящий из отдельных секций высотой 20 мм каждая. Внутри вакуумной части расположена система фокусирующих электродов, позволяющая получить необходимые параметры пучка на выходе из электронной пушки. На внешней части трубки находятся наружные электроды, на которых закреплен высоковольтный делитель, задающий равномерное распределение напряжения по секциям ускорительной трубки (~ 20 кВ на зазор при общем количестве секций 16) и экранирующие электроды, выравнивающие электростатическое поле на поверхности ускорительной трубки. Для защиты ускорительной трубки от полных и частичных пробоев, приводящих к падению электрической прочности вакуумных и газовых зазоров, разрушению тела изолятора или его поверхности, применены газовые разрядники, конструктивно расположенные на наружных электродах ускорительной трубки. Все внешние элементы ускорительной трубки находятся в газе (SF_6) под давлением.

Для передачи управляющих сигналов на модулятор использовались волоконно-оптические кабели, конструктивно расположенные внутри экранирующих электродов ускорительной трубки, чтобы избежать пробоев по поверхности. Для преобразования электрических сигналов в оптические и обратно использовался оптический конвертор. Передача сигнала запуска модулятора выполнена так, чтобы обеспечить минимальную задержку сигнала и минимальную нестабильность задержки.

Вакуумная откачка ускорительной трубки ведется с помощью вакуумного насоса типа ПВИГ. Производительность насоса 150 литров/мин., что позволяет поддерживать вакуум в ускорительной трубке на уровне $10^{-7} \div 10^{-8}$ Па. Контроль вакуума в электронной пушке осуществляется по току насоса.

Модулятор и источник питания модулятора

Формирование мощных и коротких импульсов напряжения на катоде с широким диапазоном частоты следования проводилось с помощью модулятора.

Основные параметры модулятора

Амплитуда напряжения на нагрузке	-	120 ÷ 150 В
Величина выходного тока	-	2.4 ÷ 3 А
Частота повторения	-	0 ÷ 22.5 МГц
Длительность импульса	-	1.3 нсек (на полувысоте)

Потребляемая мощность 50 Вт при максимальной рабочей частоте 22.5 МГц.

Источник предназначен для питания формирователя и катодно-сеточного узла электронной пушки. Управление всеми выходными напряжениями источника питания и измерение всех напряжений и токов производится дистанционно с помощью компьютера.

Основные параметры источника питания

Напряжение формирователя:	отрицательное	-(20 ÷ 50) В
Ток		0.8 А
Напряжение формирователя:	положительное	+(20 ÷ 50) В
Ток		0.7 А
Напряжение накала	-	(0.5 ÷ 8.5) В
Ток накала		4 А
Напряжение на катоде	-	+(30 ÷ 60) В
Ток на катоде		-0.1 А
Напряжение на второй сетке	-	+(150 ÷ 350) В
Ток на второй сетке		0.08 А

Модулятор и источник питания конструктивно расположены в непосредственной близости с катодно-сеточным узлом и находятся под потенциалом -300 кВ. Для развязки использовался разделительный изолированный трансформатор.

Высоковольтный выпрямитель и генератор первичного напряжения

Высоковольтное питание электронной пушки осуществляется от высоковольтного секционированного выпрямителя через высоковольтный коаксиальный кабель с многослойной твердой изоляцией. Каждая секция вторичной обмотки конструктивно совмещена с диодным выпрямителем, включенным по схеме удвоения напряжения. Для обеспечения

высоковольтной прочности используется конструкция незамкнутого магнитопровода. При этом коэффициент связи не превышает 0.6, что определяет требования на генератор первичного напряжения. Генератор подключается к низковольтной обмотке высоковольтного трансформатора и включает в себя цепь согласования импедансов. Генератор выполнен на основе мостового инвертора на IGBT транзисторах и снабжен быстродействующими защитами от превышения максимального тока и напряжения высоковольтного выпрямителя, собственной защитой от превышения тока в транзисторах и блокировками, контролирующими наличие воды в первичной обмотке высоковольтного выпрямителя и газа (SF_6) в высоковольтном выпрямителе и электронной пушке.

Основные параметры высоковольтного питания

Первичное напряжение питания	-	380 В
Частота питающей сети	-	50÷60 Гц
Частота выходного напряжения инвертора	-	400÷500 Гц
Выходное напряжение выпрямителя	-	0÷300 кВ
Максимальный выходной ток выпрямителя	-	50 мА

Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов были получены следующие параметры электронного пучка:

Энергия электронов	-	300 кВ
Пиковый ток (максимальный)	-	~1.8 А
Средний ток	-	~30 мА
Частота следования сгустков	-	0÷22.5 МГц
Длительность импульса	-	~1.3 нс

Осциллограмма импульса тока в рабочем режиме показана на рис.3.

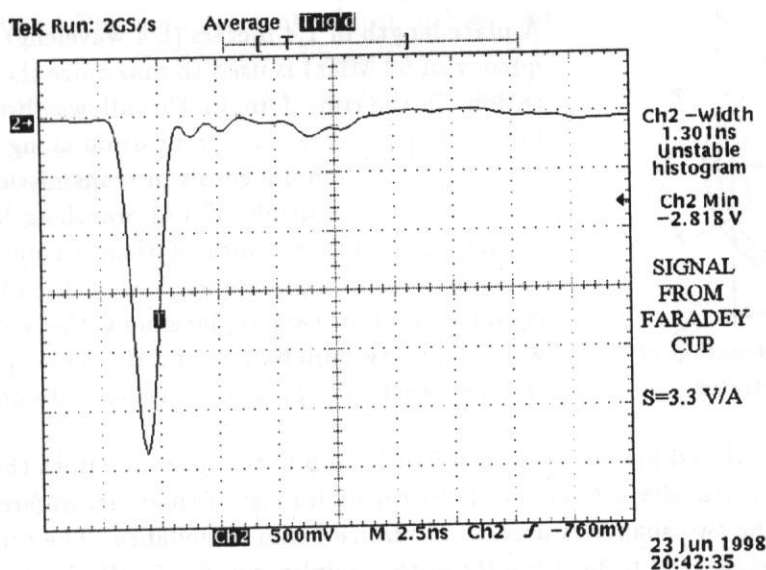


Рис. 3:

Список литературы

- [1] Н.Г.Гаврилов и др. Статус Новосибирского проекта мощного лазера на свободных электронах. Free-Electron Laser Challenges, Proceedings of SPIE, 2988, 185 (1997).