

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 микропервеанс 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.

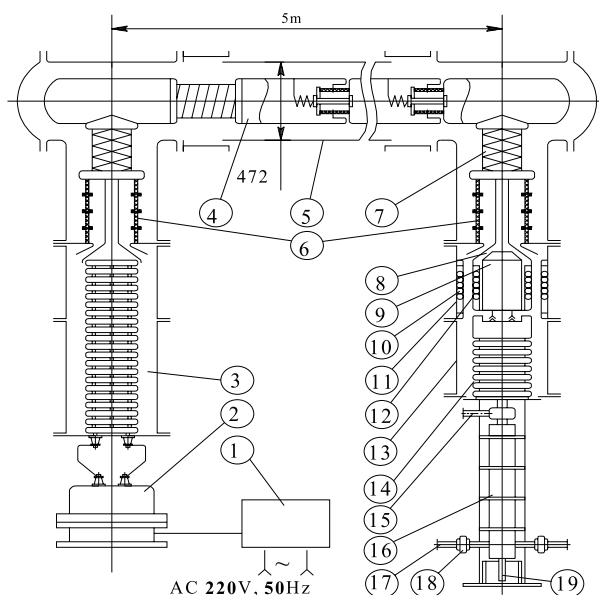


Рис. 1: Стенд испытания клистронов.

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].

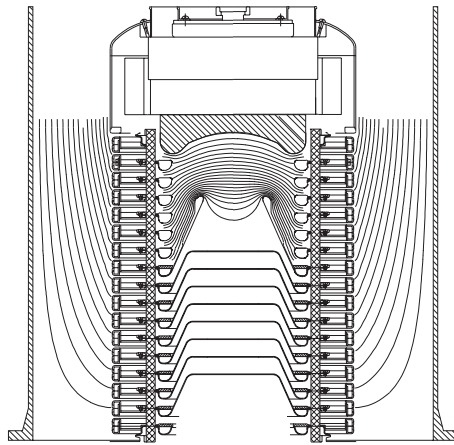


Рис. 2: Электронно-оптическая система клистрона в баке.

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.

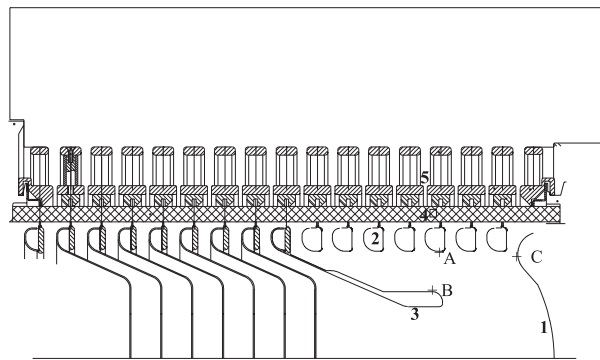


Рис. 3: Верхняя часть электронно-оптической системы клистрона. 1 – сеточный электрод; 2 – экранирующие электроды; 3 – фокусирующий электрод (анод); 4 – керамический изолятор; 5 – защитные электроды; *A*, *B*, *C* – места на электродах с повышенной напряженностью электрического поля.

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).

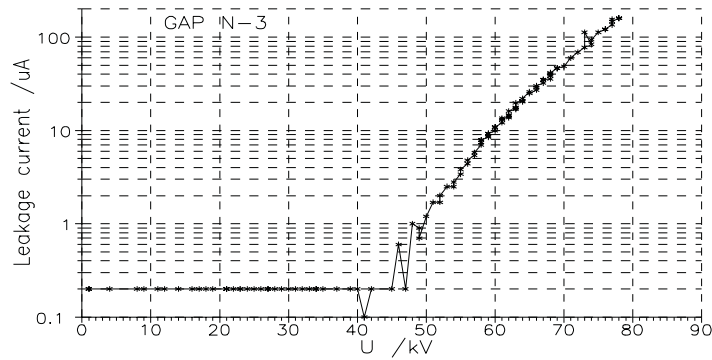


Рис. 4: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения для “худшего” высоковольтного зазора.

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”.

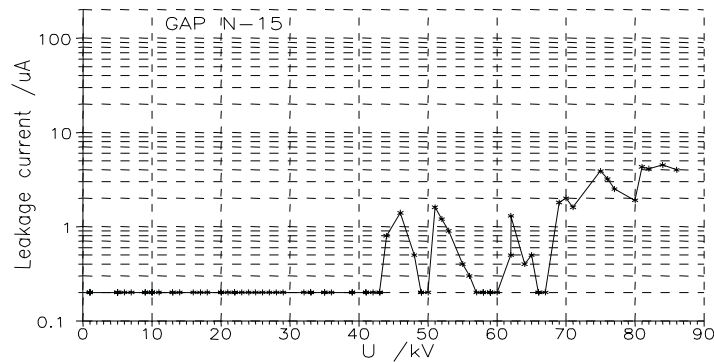


Рис. 5: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения для “лучшего” высоковольтного зазора.

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.

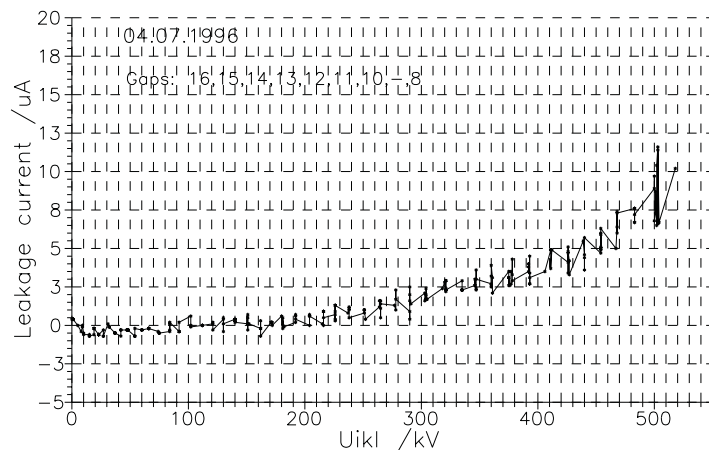


Рис. 6: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения для регулярной части ускорительной трубки (8 последовательно включенных высоковольтных зазоров).

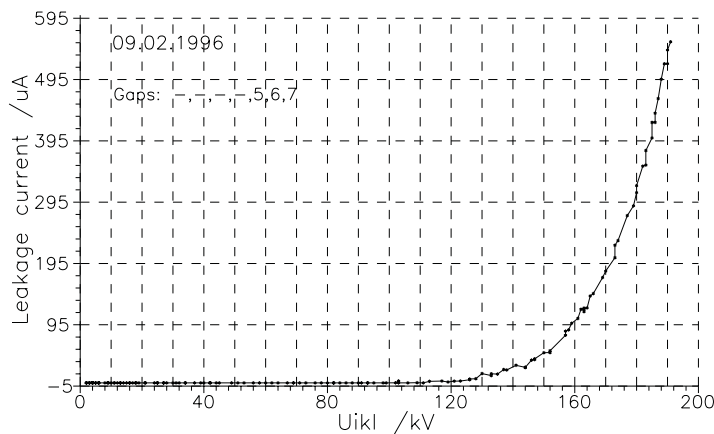


Рис. 7: Ток утечки в зависимости от постоянного напряжения между боковыми экранирующими электродами и анодом (3 последовательно включенных высоковольтных зазора).

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 пробой (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.