

10;12

Катод с концевыми экранами для релятивистского магнетрона

© И.И. Винтизенко, А.И. Мащенко, В.Ю. Митюшкина

Физико-технический институт Томского политехнического университета
E-mail: vintizenko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2012 г.

Приведены результаты применения катода с концевыми экранами для релятивистских магнетронных СВЧ-генераторов. Получено увеличение мощности СВЧ-излучения на 40–50% по сравнению с катодом без экранов.

Использование сильноточных электронных ускорителей для питания различных СВЧ-генераторов открыло новые перспективы перед этими приборами. Такие достоинства приборов со скрещенными полями, как частотная и фазовая стабильность генерируемого излучения, низкий уровень побочных колебаний и гармоник, высокий КПД, небольшие весогабаритные показатели и стоимость, стали основой для проведения интенсивных исследований релятивистских магнетронных генераторов (РМГ) [1]. Первые эксперименты с РМГ позволили получить мощность от сотен мегаватт до нескольких гигаватт при КПД 10–30%. В отличие от генераторов О-типа в РМГ взаимодействие сильноточного релятивистского электронного пучка с высокочастотными полями происходит непосредственно в диоде, т.е. в области создания электронного пучка. В этом случае снимаются ограничения, связанные с обеспечением высокой энергии электронов при малом скоростном разбросе и освоением больших токов. В настоящее время исследования развиваются по пути создания стабильных эффективных источников СВЧ, работающих в импульсно-периодическом режиме [2].

Для классических магнетронов известен способ увеличения их эффективности, заключающийся в использовании экранов, устанавливаемых на краях катодов вне пространства взаимодействия. Концевые экраны имеют наружный диаметр, который превышает диаметр катода, а иногда и диаметр анода, что препятствует утечке электронов из

пространства взаимодействия под действием сил пространственного заряда.

Для релятивистских магнетронов концевые экраны не применялись из-за опасения образования взрывной электронной эмиссии на выступающих относительно поверхности катода поверхностях. Образование плазмы и ее дрейф в продольном магнитном поле с характерной для взрывной электронной эмиссии скоростью порядка 10^7 cm/s могут привести к замыканию плазмой промежутка концевой экран–торец анодного блока и закорачиванию источника питания. Следует добавить, что катоды РМГ связаны с источником питания только с одной стороны в отличие от классических магнетронов, имеющих, как правило, симметричное питание катода. Поэтому в РМГ кроме потерь за счет сил пространственного заряда имеется дополнительный фактор потерь тока из пространства взаимодействия под действием азимутального магнитного поля, возникающего из-за протекающего по катоду тока. В скрещенных радиальном электрическом поле между катодом и анодом и азимутальном магнитном поле протекающего тока на электроны действует сила, выталкивающая их из пространства взаимодействия.

Целью работы являлось исследование влияния катодных концевых экранов на характеристики РМГ. Эксперименты проводились на линейном индукционном ускорителе ЛИУ 04/6 с выходным напряжением до 400 kV, током до 4 kA и длительностью импульса по основанию ~ 180 ns. Схема эксперимента показана на рис. 1. РМГ 10-сантиметрового диапазона длин волн имел 6-резонаторный анодный блок 1 с внутренним диаметром 43 mm и длиной 72 mm с волноводным выводом мощности 2 и коаксиально аноду установленный графитовый катод 3 диаметром 20 mm, длиной 72 mm, с концевыми экранами 4. Магнитная система 5 на постоянном токе создавала магнитное поле индукцией до 0.59 T. На торцах анодного блока установлены торцевые крышки 6 толщиной 5 mm. Катод с помощью катододержателя 7 связан с высоковольтным фланцем 8 линейного индукционного ускорителя (ЛИУ), на который подавался отрицательный импульс напряжения. Диаметр высоковольтного фланца и расстояние до анодного блока изначально выбирались по результатам расчетов хода силовых линий магнитной системы так, чтобы линии, выходящие из пространства взаимодействия РМГ „замыкались“ на поверхность высоковольтного фланца. Тем самым уменьшаются потери электронов из пространства взаимодействия. Для ограничения утечки тока с противоположной

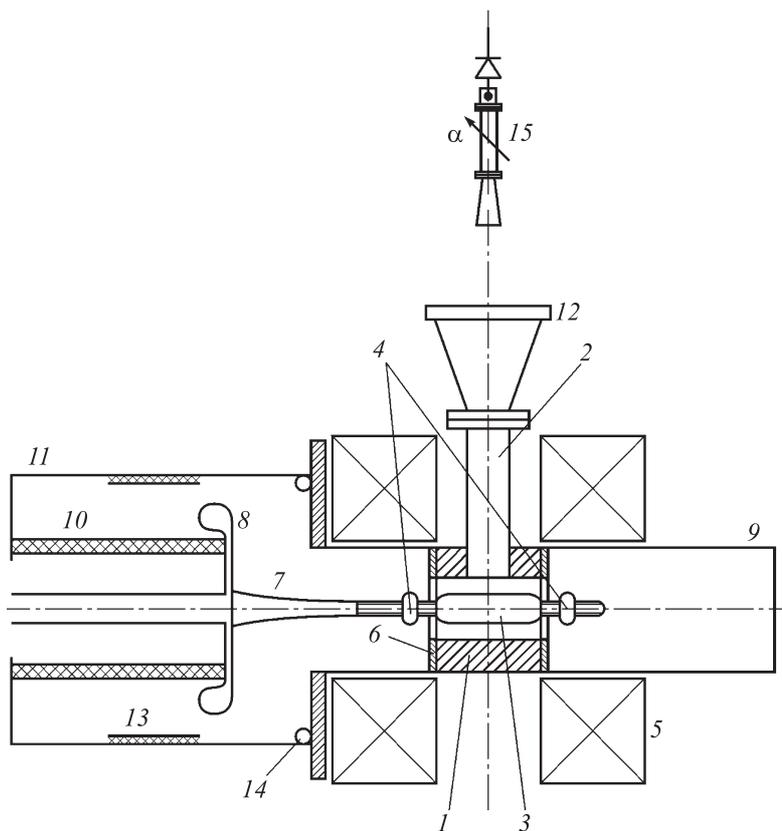


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — анодный блок магнетрона; 2 — волноводный вывод СВЧ-мощности; 3 — катод; 4 — концевые экраны; 5 — магнитная система; 6 — торцевые крышки анодного блока; 7 — катододержатель; 8 — высоковольтный фланец; 9 — труба дрейфа; 10 — изолятор ЛИУ; 11 — вакуумная камера ЛИУ; 12 — рупорная антенна с вакуумным окном; 13 — емкостный делитель напряжения; 14 — пояс Роговского; 15 — детектор СВЧ-сигнала с приемной антенной и аттенуатором.

стороны анодного блока использовалась труба дрейфа 9 с внутренним диаметром 184 mm. Чем больше диаметр трубы дрейфа, тем меньше предельный ток транспортировки в ней. Однако внешний диаметр трубы

ограничен внутренним диаметром магнитной системы. Чрезмерное увеличение диаметра приводит к неоправданному увеличению объема замагничивания и соответственно росту энергозатрат на создание магнитного поля.

Концевые экраны были изготовлены из дюралюминия в виде шайб с внешним диаметром 24 mm, толщиной 10 mm и радиусом скругления цилиндрической поверхности 5 mm. Экраны могли перемещаться относительно краев катода, для этого на поверхности катододержателя была выполнена резьба, а со стороны трубы дрейфа катододержатель выступал за пределы анодного блока на 70 mm.

Для регистрации характеристик высоковольтного импульса ЛИУ применялись емкостной делитель напряжения 13, пояс Роговского 14 для измерения полного тока ускорителя, а также ламповый детектор 15 с калиброванным волноводным ослабителем, размещенные в „дальней“ зоне для регистрации СВЧ-импульсов.

В экспериментах сравнивались выходные импульсы РМГ при использовании катода без концевых экранов, с одним экраном со стороны высоковольтного фланца, с одним экраном со стороны трубы дрейфа и с двумя экранами. Расстояние между концевыми экранами и катодом составляло по 12 mm с каждой стороны (до торцевых крышек анодного блока — по 7 mm).

На рис. 2 представлены зависимости мощности и длительности СВЧ-импульсов от величины индукции магнитного поля, снятые при равном зарядном напряжении первичного источника питания ЛИУ. Как видно из рис. 2, *a*, к заметному увеличению мощности СВЧ-импульса приводит экран, установленный со стороны трубы дрейфа. Это позволяет заключить, что основные утечки тока из пространства взаимодействия РМГ происходят в трубу дрейфа. Напомним, что выше уже сообщалось о принятых мерах по уменьшению потерь на поверхность высоковольтного фланца. Приведенные зависимости показывают, что в случае применения концевых экранов катода расширяется область синхронных магнитных полей, при которых регистрируется максимальный уровень СВЧ. Анализ осциллограмм показал, что при использовании экранов наблюдается увеличение выходного напряжения ЛИУ в сравнении с катодом без экранов за счет уменьшения потерь тока. В свою очередь это требует увеличения синхронного магнитного поля и сопровождается заметным увеличением мощности. На рис. 2, *b* также показаны зависимости длительности импульсов СВЧ от величины

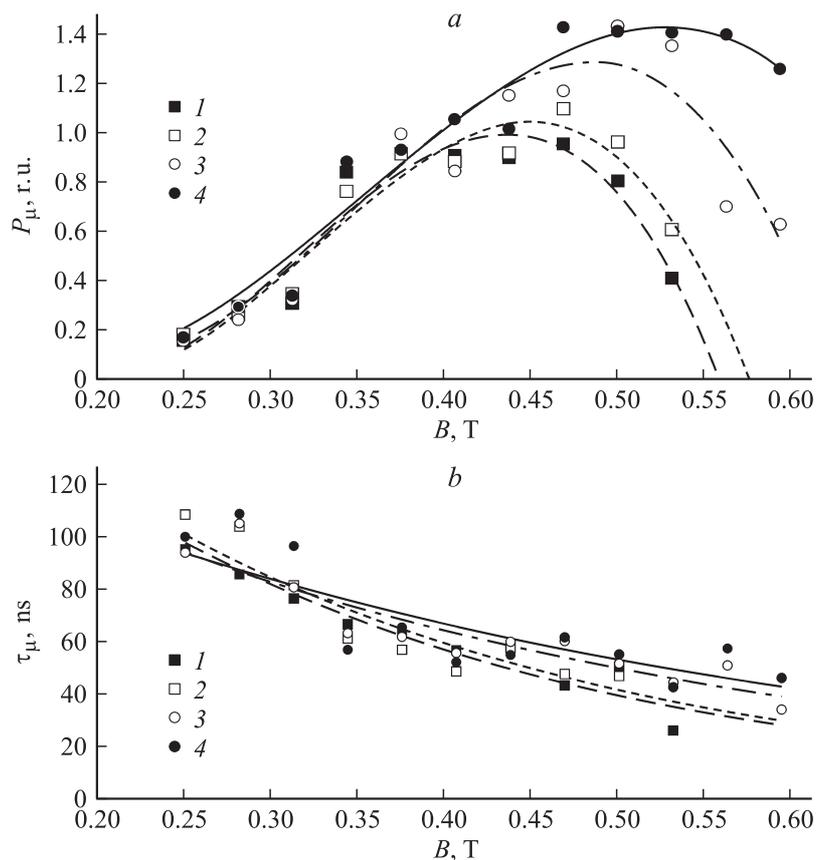


Рис. 2. Зависимости мощности (а) и длительности (б) СВЧ-импульса магнетрона от величины индукции магнитного поля при одном зарядном напряжении первичного источника питания ЛПИУ и разном исполнении катода: 1 — катод без концевых экранов; 2 — катод с экраном со стороны высоковольтного фланца; 3 — катод с экраном со стороны трубы дрейфа; 4 — катод с двумя экранами.

индукции магнитного поля. Обращает внимание примерное равенство длительности СВЧ-импульсов при наличии и отсутствии экранов на катоде, несмотря на существенное отличие в уровнях мощности выходных импульсов.

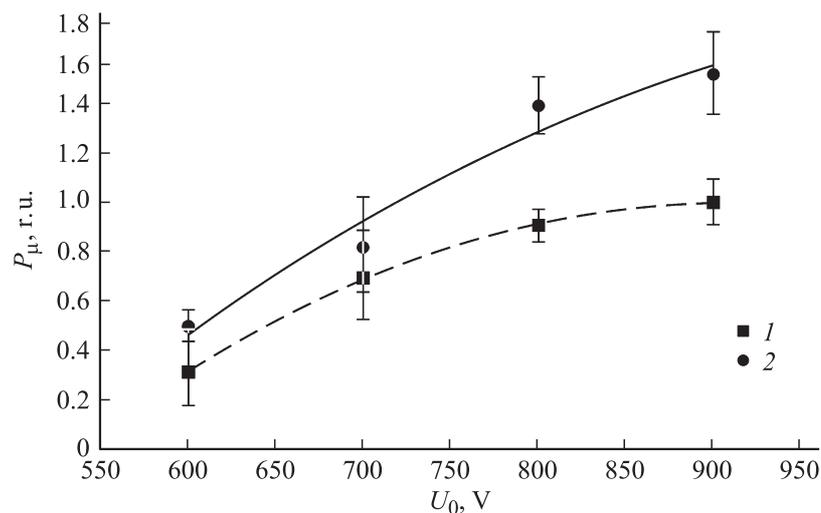


Рис. 3. Зависимость мощности СВЧ-импульса от величины напряжения первичного накопителя ЛИУ: 1 — катод без концевых экранов; 2 — катод с концевыми экранами.

Напряжение и ток в катод-анодном промежутке РМГ изменялись регулированием зарядного напряжения первичного накопителя энергии ЛИУ. Соответственно изменялась мощность выходного СВЧ-импульса, следовательно и величина пространственного заряда электронов. Результаты приведены на рис. 3, из которого следует, что положительное влияние использования концевых экранов проявляется в широком диапазоне напряжений и токов. Очевидно, что при выбранной конструкции катода с концевыми экранами не происходит развития взрывной электронной эмиссии с поверхности экранов, способной привести к снижению мощности магнетрона и уменьшению длительности его импульса по сравнению с катодом без концевых экранов.

Таким образом, в результате исследований релятивистского магнетронного генератора с катодными концевыми экранами установлено:

1) применение экранов увеличивает мощность излучения релятивистского магнетронного генератора на 40–50%, достигающей 400 MW, при сохранении длительности импульса СВЧ;

2) большее влияние оказывает экран, расположенный со стороны трубы дрейфа;

3) увеличение параметров импульса питания приводит к пропорциональному росту мощности СВЧ-импульсов.

Список литературы

- [1] *Винтизенко И.И., Новиков С.С. // Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы. Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2009. 430 с.*
- [2] *Винтизенко И.И., Новиков С.С. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 11. С. 95–104.*