

05.10.12

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ КАРСИНОТРОНА НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

© *В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.Р.Ульмаскулов,  
М.И.Яландин, А.Е.Ермаков, С.В.Жаков,  
В.Г.Гасс, А.Ю.Коробейников*

Применение сильноточных релятивистских электронных пучков часто связано с их транспортировкой в протяженных вакуумных каналах. При высоких ( $10^3 - 10^4$  А/см<sup>2</sup>) плотностях тока для нескомпенсированных пучков единственно приемлемой является фокусировка в сильном продольном магнитном поле. Фокусирующая система коаксиальных вакуумных диодов с магнитной изоляцией и холодными катодами обычно объединяется с системой транспортировки пучка. Такие системы широко используются в релятивистских микроволновых приборах, при этом магнитные поля создаются сверхпроводящими магнитами или импульсными соленоидами с конденсаторными накопителями энергии. Сверхпроводящие системы громоздки и дороги, а импульсные соленоиды не обеспечивают продолжительную работу с высокой частотой повторения импульсов из-за перегрева обмотки. Кроме того, типичный энергетический баланс ускоритель — соленоид составляет 1:10.

Ранее нами исследовались карсинотроны (релятивистские лампы обратной волны [1]) миллиметрового диапазона с длительностью импульсов  $\sim 3$  нс, работавшие с малогабаритным сильноточными ускорителями РАДАН [2-3]. Импульсный соленоид 70-ГГц карсинотрона имел ступенчатый канал диаметром 14/10 мм. Протяженность квазигорного участка фокусирующего поля с напряженностью 25 кЭ была небольшой ( $\sim 50$  мм). При ускоряющем напряжении до 250 кВ диаметр вакуумного диода, включая изолятор, составлял всего 50 мм. Примерно такая же конфигурация была выбрана для создания фокусирующей системы на основе постоянных магнитов. Для определения требуемого значения аксиального поля постоянного магнита были учтены условия работы неидеального карсинотрона: влияние магнитного поля на стартовый ток прибора [4] и на формирование однородного по сечению пучка [5], а также эффекты циклотронного резонанса [6] и эффективность энергооб-

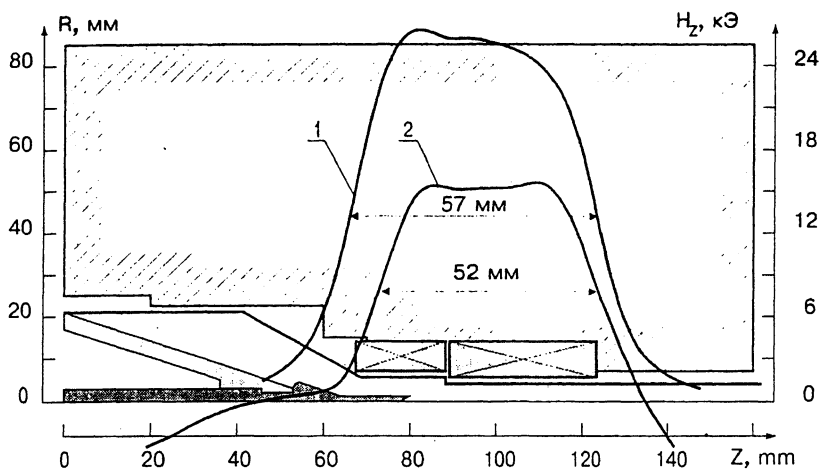


Рис. 1. Конфигурация импульсного соленоида и постоянного магнита. Напряженность аксиального магнитного поля на оси: 1 — импульсного соленоида, 2 — постоянного магнита.

мена между пучком и полем синхронной СВЧ-волны. Совокупность этих эффектов и условий вместе с экспериментальными данными, полученными нами ранее [2-3], определила минимальное значение аксиального магнитного поля на уровне 15 кЭ. Такое поле уже достижимо для постоянных магнитов на основе современных материалов, например сплава Nd-Fe-B. Сплав имеет остаточную индукцию  $B_r = 1.0-1.2$  Тл и высокую прямоугльность петли гистерезиса. Редкоземельные добавки Dy и Tb увеличивают его коэрцитивную силу до  $H_0 \sim 20$  кЭ.

Реальная конструкция рассчитывалась на основе общего подхода к синтезу оптимальных магнитных систем [7]. Она является некоторым приближением к идеальной системе, а ее параметры определяются компромиссом между сложностью изготовления и достижимыми характеристикам. Численное моделирование показало, что при  $B_r = 1$  Тл и  $H_0 = 17-20$  кЭ вполне реально получить аксиальное магнитное поле  $\sim 15$  кЭ на длине 40 мм. Были изготовлены магниты с  $H_c = 19-20$  кЭ и  $B_r = 1.15$  Тл, которые обеспечили индукцию в рабочей точке 0.95-1.02 Тл. Магнитная система собиралась из отдельных блоков, размеры которых оптимизировались для получения максимального аксиального поля при неоднородности  $\leq 5\%$  на рабочем участке.

На рис. 1 показаны геометрия импульсного соленоида [3] и контур постоянного магнита, обеспечивающие магнитное поле с однородным участком сравнимой протяженности. Зависимость  $H_z(z)$  для постоянного магнита отличается более резким спадом поля по краям и последующим

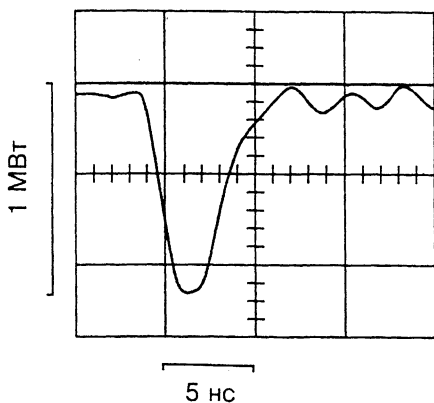


Рис. 2. СВЧ-импульс релятивистского карсинотрона диапазона 70 ГГц с фокусирующей системой на основе постоянного магнита.

реверсом поля. Реверс не создает сложностей со стороны коллектора пучка. С катодной же стороны реверс поля было необходимо сдвинуть в область меньших радиальных электрических полей вакуумного диода, чтобы снизить интенсивность генерирования шунтирующего (паразитного) электронного пучка с боковой поверхности катододержателя. Следует отметить, что такой сдвиг области реверса (рис. 1) привел к значительному ( $\sim 30\%$ ) увеличению габаритов и массы магнита (длины — до 160 мм, массы — до 22 кг).

Эмитирующая кромка трубчатого графитового катода диаметром 2.5 мм была расположена в области магнитного поля  $\sim 10$  кЭ, замедляющая система карсинотрона — на участке с  $H_z \sim 14.5$  кЭ. С помощью доизметрической пленки были получены отпечатки пучка в различных точках дрейфовой камеры. Перед входом в замедляющую систему пучок имел достаточно равномерную кольцевую структуру со средним диаметром  $\sim 2.2$  мм. Наиболее плотная фракция электронов эмитировалась внутренней кромкой трубчатого катода, что согласуется с расчетными данными [8]. Электроны, эмитируемые с наружной цилиндрической поверхности, имеют увеличенные поперечные скорости и соответствующие радиусы циклотронной орбиты. В результате трубчатый пучок с плотностью тока  $\sim 3 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> и толщиной стенки  $\sim 0.3$  мм окружен снаружи менее плотной фракцией, которая колимится анодным блоком и вызывает его эрозию. Такая размытость пучка оказалась весьма критичной для 70-ГГц карсинотрона, где пучок транспортировался вдоль стенки замедляющей системы на расстоянии  $\sim 0.3$  мм, сравнимом с характерным масштабом радиального спада поля синхронной волны. Измерения показали, что при расчетном стартовом токе кар-

сигнотрона 0.5 кА ток коллимированного пучка составлял 0.7–0.8 кА. На катододержателе наблюдались эмиссионные центры, создававшие шунтирующий пучок. При небольшом превышении рабочего тока над стартовым генерация излучения носила неустойчивый характер, проявляющийся в нетипичной для карсинотронов сильной зависимости уровня СВЧ-мощности от разброса ускоряющего напряжения. Тем не менее длительность импульса генерируемого излучения (рис. 2) соответствовала длительности тока пучка, а выходная мощность прибора достигала 1 МВт (мода  $E_{01}$ ), в том числе — при частоте следования импульсов 100 Гц.

Таким образом, для релятивистского 70-ГГц карсинотрона была экспериментально реализована фокусирующая система на основе постоянных магнитов, приемлемая для формирования и транспортировки сильноточного электронного пучка длительностью 4 нс, с током до 1 кА и энергией 250 кэВ. Использование такой системы кардинальным образом снижает потребляемую мощность релятивистского микроволнового генератора при высокой частоте повторения импульсов и снимает ряд ограничений на практическое использование сильноточных ускорителей и микроволновых приборов.

#### Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 76–113.
- [2] Быков Н.М., Коровин С.Д., Месляц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 9. С. 541–545.
- [3] Яландин М.И., Месляц Г.А., Шпак В.Г. и др. // Тр. Международного симпозиума SPIE “Интенсивные СВЧ-импульсы”. Лос-Анжелес, США. 1993. Т. 1872. С. 333–342.
- [4] Быков Н.М., Губанов В.П., А.В. Тунин и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. В. 5. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 101–124.
- [5] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 5–21.
- [6] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 157–216.
- [7] Жаков С.В., Лебедев Ю.Г., Гасс В.Г. // Материалы Международного симпозиума “Исследование проблем создания магнитных систем новых электрических машин и применения в них высокоэнергетических магнитотвердых материалов с целью совершенствования параметров и конструкций”. Суздаль, 21–26 мая 1990. М., 1991. С. 72–80.
- [8] Коровин С.Д., Пегель И.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 4. С. 139–145.

Институт электрофизики  
УрО РАН  
Институт физики металлов  
УрО РАН

Поступило в Редакцию  
26 октября 1995 г.