

*Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П.,
Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Федотов А.Э.
Институт прикладной физики РАН*

Разработка и тестирование электронно-оптической системы импульсного сильноточного релятивистского гиротрона

Разработана и экспериментально исследована электронно-оптическая система сильноточного релятивистского гиротрона Ka-диапазона, состоящая из магнито-изолированного диода и участка сильно-неоднородного магнитного поля, обеспечивающего раскачку поперечных скоростей электронов в пучке. Измеренные характеристики пучка находятся в хорошем соответствии с расчетными данными.

Ключевые слова: гиротрон, винтовой электронный пучок, взрывоэмиссионный катод

Гиротроны являются наиболее распространенной разновидностью электронных мазеров на циклотронном резонансе. Важным их преимуществом является модовая селективность, позволяющая использовать электродинамические системы с высокой сверхразмерностью, кроме того, в конструкции гиротронов отсутствуют замедляющие системы и другие, мелкомасштабные по сравнению с длиной волны элементы, присущие большинству классических электровакуумных приборов СВЧ. Эти достоинства становятся особенно важными в контексте задачи освоения мегаваттного уровня выходной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн.

Современные гиротроны для установок управляемого термоядерного синтеза обеспечивают выходную мощность до единиц МВт на частоте 140-170 ГГц [1,2], обладая при этом достаточно высоким КПД. Очевидно, что дальнейшее существенное наращивание мощности выходного излучения возможно только при увеличении мощности используемого электронного пучка, то есть при повышении энергии электронов до значений, соответствующих области сильного релятивизма и наращивании тока пучка. Известно, что при надлежащем подборе продольных распределений амплитуды высокочастотного поля в гиротроне можно достичь высоких значений КПД даже в области сильного релятивизма [3]. В частности, в ИПФ РАН были экспериментально реализованы гиротроны мультимегаваттного уровня выходной мощности, запитываемые электронными пучками с энергией 250-300 кэВ, на длине волн 10 мм с КПД 50% [4] и на длине волны 3 мм с КПД порядка 20% [5]. Однако для достижения уровня мощности в несколько сотен мегаватт, по-видимому, уже недостаточно возможностей термоэмиссионных катодов, использованных в данных приборах. Очевидным выходом является использование взрывной эмиссии для формирования сильноточного электронного пучка, но в этом случае невозможно реализовать традиционный для гиротронов метод формирования пучка с помощью магнетронно-инжекторной пушки из-за невозможности локализации на взрывном катоде области эмиссии электронов. Таким образом, для сильноточного гиротрона необходимо сначала сформировать прямолинейный пучок, а затем осуществить в нем раскачку поперечных скоростей электронов.

Расчет на основе системы усредненных уравнений, а так же прямое численное моделирование методом крупных частиц с помощью трехмерного PIC-кода KARAT показали [6] возможность реализации в гиротроне на частоте 30 ГГц эффективного

взаимодействия умеренно высокой моды TE₃₋₂ с сильноточным релятивистским винтовым пучком со следующими параметрами: энергия электронов 500 кэВ, ток пучка, 2 кА питч-фактор (отношение поперечных и продольных скоростей) ~1. Расчетная выходная мощность составила 250 МВт при электронном КПД 25%. Целью настоящей работы являлась разработка и экспериментальное тестирование электронно-оптической системы, способной произвести такой пучок.

В качестве основы системы был использован сильноточный ускоритель Синус-6, обеспечивающий в согласованном режиме электронный пучок с током до 5 кА при ускоряющем напряжении до 600 кВ в импульсах длительностью 20 нс. Поскольку столь высокий ток пучка является избыточным в контексте рассматриваемой задачи, для его снижения был использован двойной коаксиальный катод (рис.1) с регулируемым расстоянием между эмитирующими кромками, создающий два пучка, из которых внутренний является основным и в дальнейшем транспортируется через резонатор, а внешний осаждается на специальный коллектор и служит, фактически, для регулировки величины рабочего тока.



Рис.1 Двойной коаксиальный катод.

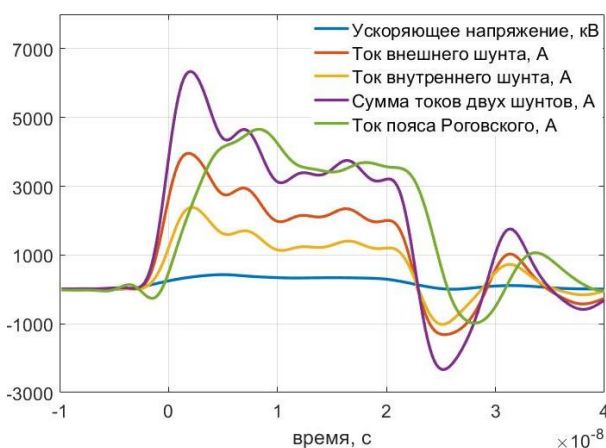


Рис.2 Осциллограммы напряжения и тока двойного пучка.

Для диагностики двухпучковой системы использовался специально изготовленный двойной токовый шунт, а так же встроенный в ускоритель пояс Роговского.

Раскачка поперечных скоростей пучка осуществлялась с помощью кикера, создававшего неоднородное магнитное поле на пути пучка. Рассматривались различные варианты кикеров. Как с использованием постоянных магнитов, так и в виде одной или двух коротких импульсных катушек, расположенных предельно близко к пучку и создающих поперечное магнитное поле. Две катушки позволяют обеспечить значительно лучшую однородность поперечного поля на сечении пучка (и тем самым снизить разброс поперечных скоростей), но при этом одну из катушек необходимо размещать внутри пучка. В конечном итоге, предпочтение было отдано наиболее простой с точки зрения экспериментальной реализации схеме с одной импульсной катушкой.

Численный расчет, выполненный с помощью 2D версии PIC-кода KARAT что раскачка пучка до состояния с питч-фактором близким к единице возможна при использовании в качестве кикера импульсной катушки с габаритами 3*2мм и суммарным током порядка 9500А*витков.

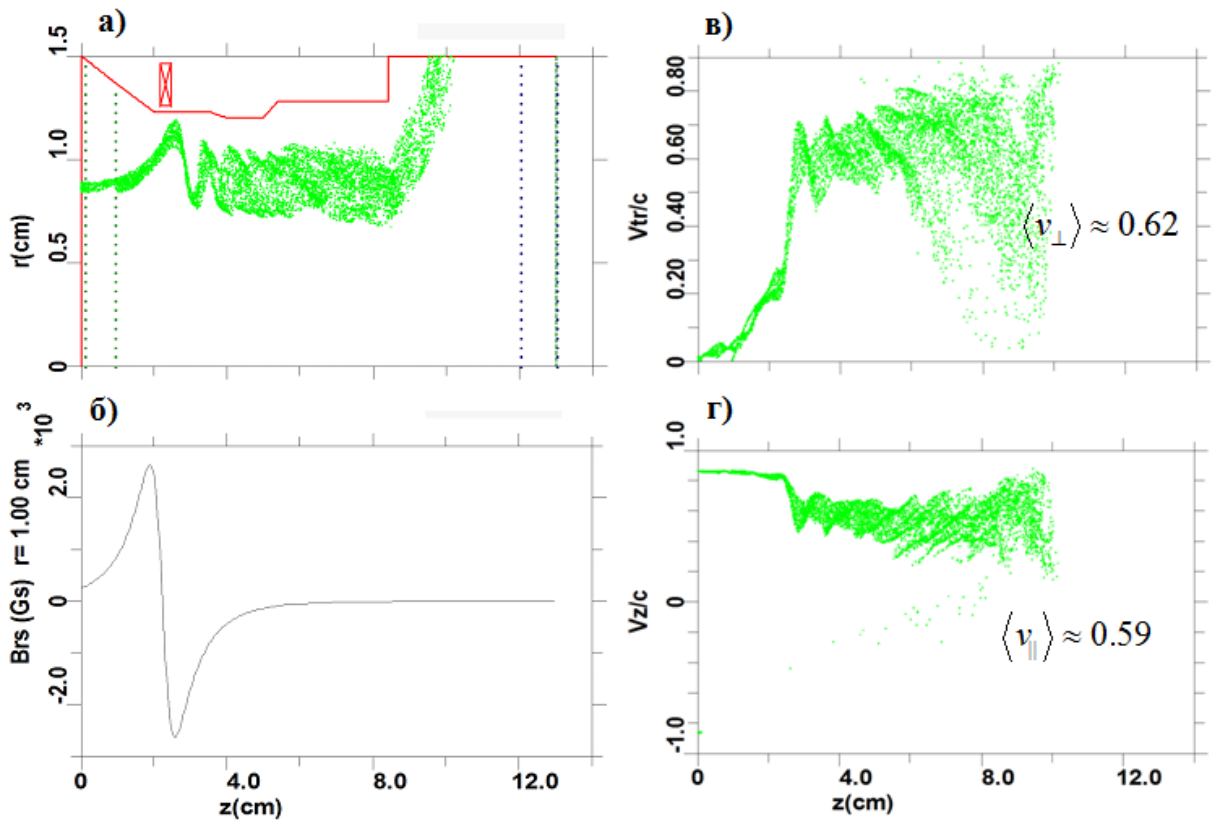


Рис.3 численный анализ системы раскачки пучка в виде одиночной импульсной катушки: а) траектории частиц; б) поперечное поле, создаваемое катушкой; в) поперечные компоненты скорости частиц в зависимости от продольной координаты; г) продольные компоненты скорости частиц в зависимости от продольной координаты.

Данная катушка была изготовлена и испытана с применением отдельного источника питания, соответствующим образом синхронизированного с источником питания основного соленоида. Система питания позволяет в значительном диапазоне варьировать поля кикера и основного соленоида независимо друг от друга, обеспечивая возможность точной настройки системы раскачки.

При экспериментальном исследовании работы кикера обнаружилось, что при увеличении напряжения питания кикера, ток коллекторного шунта начинает значительно падать (рис.4). По всей видимости, это соответствует осаждению части электронов на стенку канала транспортировки пучка в области, где ведущее магнитное поле основного соленоида «просаживается» полем кикера. Максимальное напряжение питания кикера, при котором токоперехват практически не наблюдается составило 150 В, что несколько меньше расчетного значения 175 В.

Экспериментально диагностика пучка осуществлялась снятием серии его отпечатков на мишенях, располагаемых на различных расстояниях от области неоднородного поля на масштабе длины ларморовского шага электронов.

Результаты измерений в режиме без токоперехвата достаточно хорошо согласуются с траекторным анализом осуществленным с помощью 2D версии PIC-кода KARAT (Рис.5). Согласно данным моделирования, питч-фактор пучка при напряжении питания кикера 150 В составил ~ 0.6 .

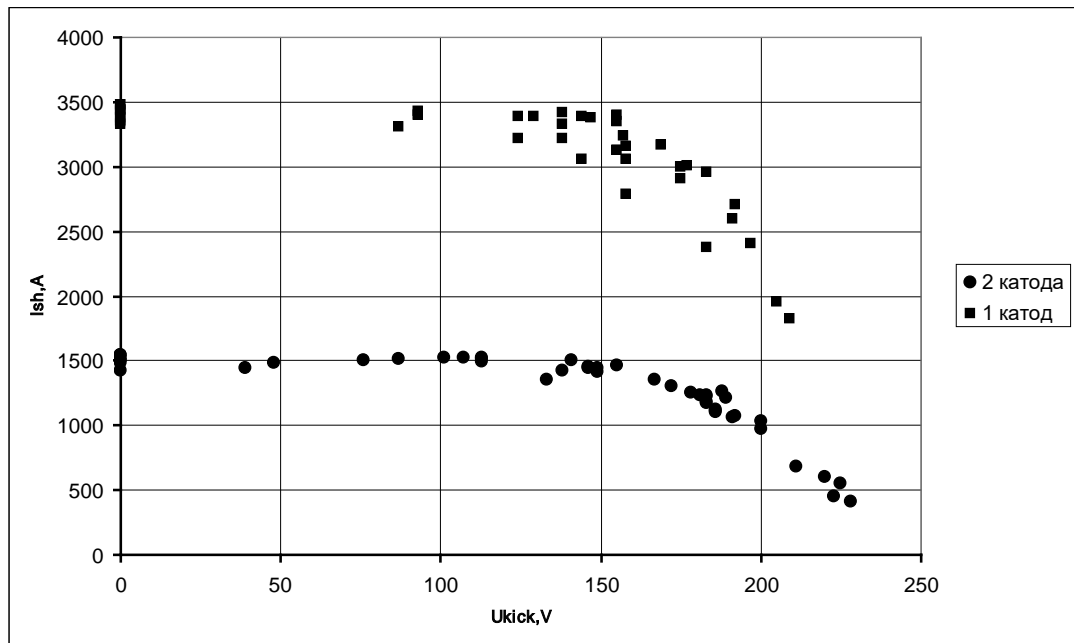


Рис.4 Зависимость тока коллекторного шунта от напряжения питания кикера в однокатодном и двухкатодном (расстояние между излучающими кромками катодов 15мм) варианте пушки.

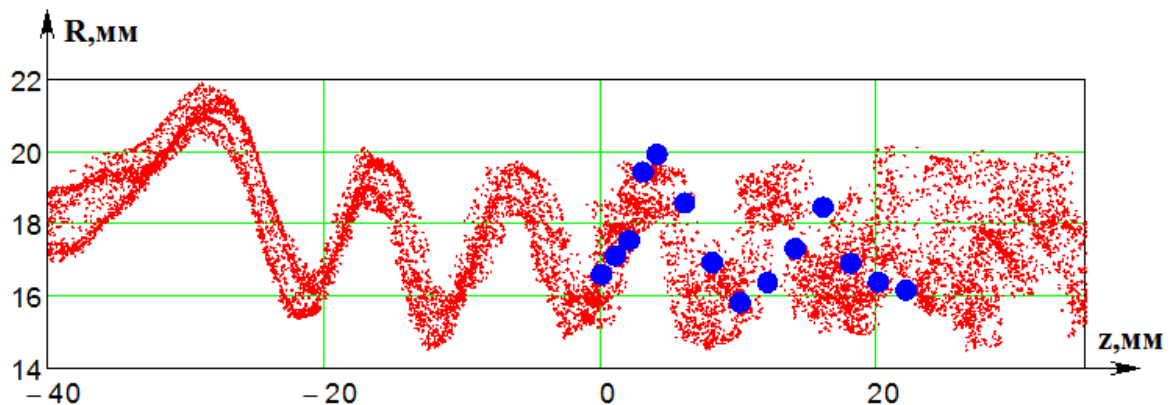


Рис.5 Расчетное положения частиц в KARAT-моделировании (мелкие точки) в сравнении с экспериментально снятыми отпечатками пучка на мишени (крупные точки).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-08-01001.

Библиографический список

1. Thumm M. IEEE Trans. on Plasma Science V.42 no.3 (2014)
2. Thumm M. // KIT Scientific Reports. 2015. Band-Nr. 7717.
3. Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Моисеев М.А. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2001. Т. 44. №4. С.345.
4. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запечалов В.Е. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 10. С.914.
5. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G. et al // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64. No. 4. P. 1865.
6. Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, А.П. Конюшков и др. // Изв. РАН. Серия Физическая. 2018. Т. 82. №1. С. 56-60.