

*Богдашов А.А., Глявин М.Ю., Седов А.С.,  
Фокин А.П., Цветков А.И.  
Федеральный исследовательский центр Институт  
прикладной физики РАН*

## **Управление режимом генерации технологического гиротрона при слабом отражении от нерезонансной нагрузки**

*Представлены результаты экспериментов по влиянию нерезонансной нагрузки на режимы работы технологического гиротрона. Были измерены зависимости частоты и мощности выходного излучения в зависимости от расстояния между резонатором и нагрузкой. Полученные данные были сравнены с теоретическими расчетами и результатами численного моделирования. Проведенные эксперименты и расчеты позволяют предположить возможность продвижения такого метода управления режимами генерации в область больших частот.*

**Ключевые слова:** гиротрон, отражение от нагрузки, сантиметровое излучение.

Задачи управления и стабилизации параметров выходного излучения актуальна для большого числа практических приложений гиротронов различных частотных диапазонов, таких как диагностика плазмы, спектроскопия, технологические приложения. Привлекательной возможностью для стабилизации частоты гиротрона представляется воздействие внешнего сигнала, поступающего из выходного тракта в пространство взаимодействия вследствие отражения от удаленной нагрузки [1]. Преимуществом этого метода по сравнению с используемыми [2,3] является отсутствие сложных и дорогих быстроредействующих источников питания и простота изготовления такой нагрузки.

В данной работе исследовалось влияние отраженного сигнала на режимы генерации технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц, работающего на второй гармонике гирочастоты. Часть выходной мощности гиротрона отражалась от нерезонансного отражателя – кольца меньшего проходного диаметра, вставленного в выходной волноводный тракт. Параметры кольца были рассчитаны и выбраны таким образом, чтобы отраженный от него сигнал составлял 10% по мощности. Экспериментальная установка также позволяла изменять расстояние от окна гиротрона до отражателя в пределах нескольких длин волн.

Для данного эксперимента был выбран режим далекий от оптимального по КПД для данного гиротрона. Ток пучка составлял 0.5 А, рабочее напряжение 19.6 КВ. Характерный уровень мощность в таком режиме составил 2 Квт, что не позволяло тепловым потерям исказить параметры нагрузки.

На Рис.1 приведены результаты экспериментов по измерению частоты выходного излучения в зависимости от величины ведущего магнитного поля для двух случаев: наличия отражателя и без него. Как видно из рисунка при меньших магнитных полях (то есть вблизи оптимальной по мощности области полей) наличие отражателя существенно меняет наклон кривой стабилизируя частоту. Также в эксперименте наблюдалось сужение спектра выходного сигнала и перестройка частоты при сдвиге отражателя. Другим эффектом, наблюдавшимся в эксперименте, стала зависимость мощности выходного излучения от положения отражателя.

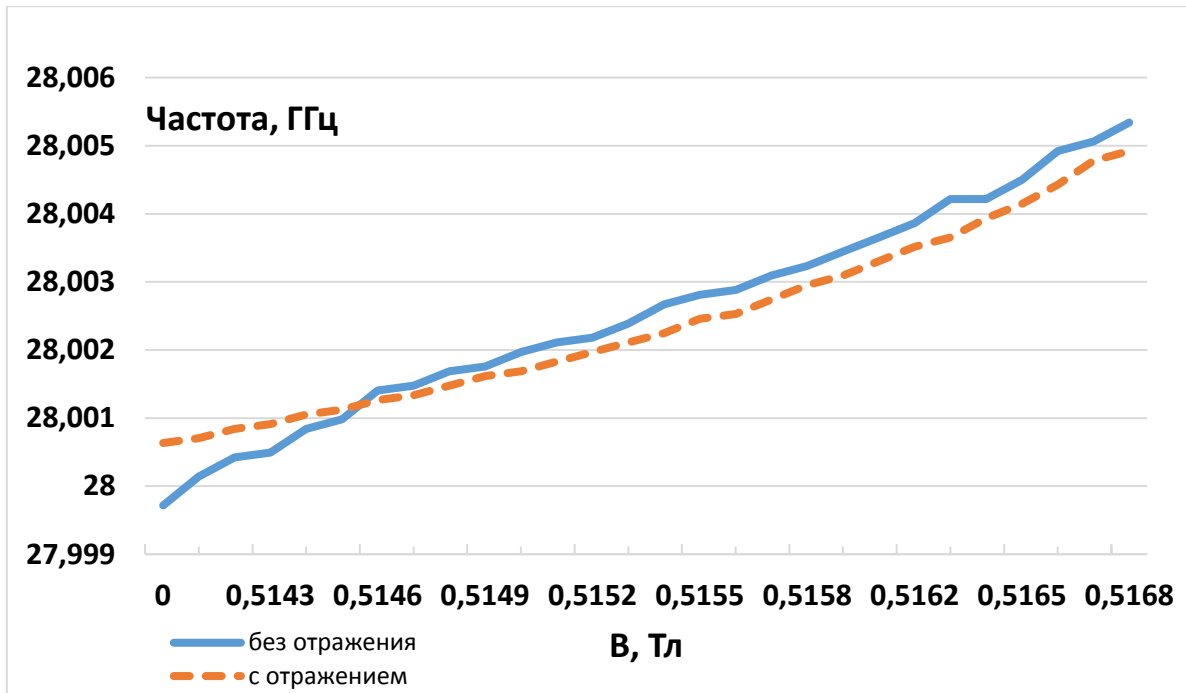


Рис.1. Экспериментальная зависимость частоты выходного излучения гитрона от ведущего магнитного поля

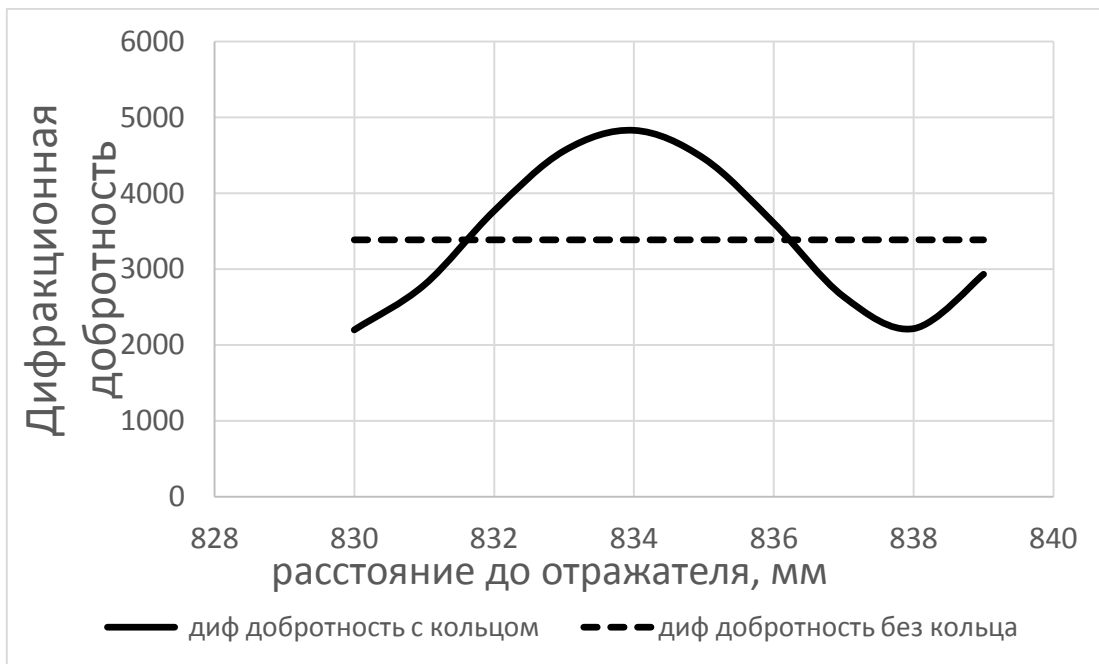


Рис.2. Расчетная зависимость дифракционной добротности от расстояния от резонатора до отражателя (сплошная кривая).

Для качественного количественного объяснения наблюдаемых в эксперименте эффектов было проведено численное моделирование параметров электродинамической системы и параметров электронно-волнового взаимодействия.

На первом этапе была посчитана добротность сложного резонатора, состоящего из непосредственно резонатора гиротрона и участка волноводного тракта до отражателя. Интегрирование уравнений при этом прекращалось через некоторое расстояние после

отражателя. Полученные данные (Рис.2) позволяют связать изменение режимов генерации с заметным изменением добротности вышеописанной системы. Как видно из расчетов зависимость добротности от положения отражателя имеет периодический характер с периодом порядка длины волны выходного излучения гиротрона. При этом сдвиг отражателя в пределах половины длины волны излучения может вдвое изменить добротность. Как уже отмечалось выше, рабочий режим, который был использован в эксперименте, был далек от оптимального по КПД взаимодействия, и поэтому, такое изменение добротности, приводило к значительному изменению эффективности взаимодействия электронов с электромагнитным полем в резонаторе, что и наблюдалось в эксперименте путем изменения мощности в зависимости от положения отражателя. Изменение частотной характеристики в зависимости от магнитного поля, наблюдавшейся в эксперименте поля можно также объяснить изменением добротности системы, так как изменение частоты в гиротроне обратно пропорционально величине добротности.

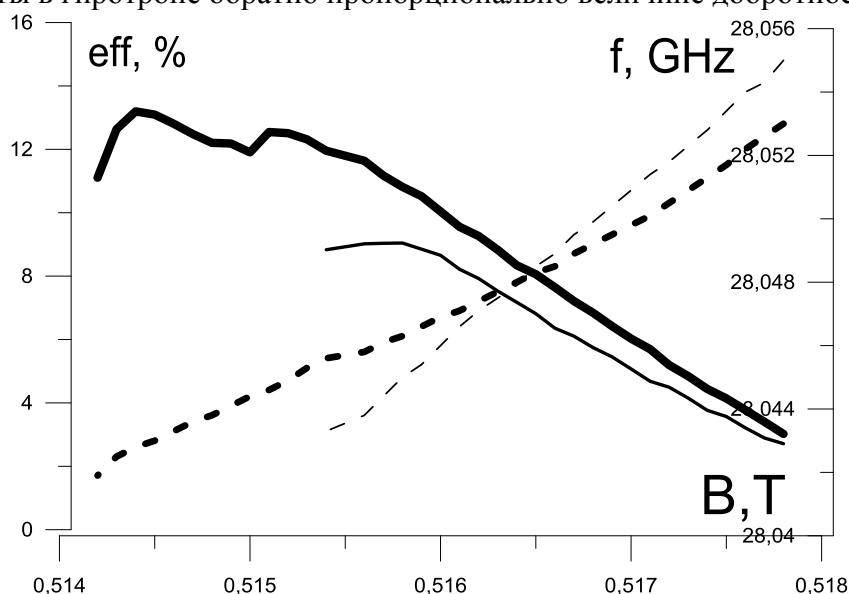


Рис.3. Расчетные зависимости мощности (сплошные линии) и частоты (пунктирные линии) для двух характерных положений нагрузки (толстые и тонкие линии)

Проведенное более сложное численное моделирование на основе системы самосогласованных уравнений, описывающих как взаимодействия пучка и волны в резонаторе, так и учитывающем распространение ВЧ-поля не только в резонаторе, но и в системе между резонатором и нагрузкой и после нее показало хорошее соответствие с результатами эксперимента (Рис.3). В целом проведенные эксперименты и расчеты позволяют предположить возможность продвижения такого метода управления режимами генерации в область больших частот.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, проект № МК-3452.2017.8

#### Библиографический список

1. М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, М.Л. Кулыгин, Ю.В. Новожилова, Стабилизация частоты гиротрона отражением от нерезонансной и резонансной нагрузки, Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 13
2. Idehara T., Mitsudo S., Ogawa I., Development of High-Frequency, Highly Stable Gyrotrons as Millimeter to Submillimeter Wave Radiation Sources, IEEE Transactions on Plasma Science, 2004. V. 32. №3. P. 910-916
3. G. Yu. Golubiatnikov, A. F. Krupnov, L. V. Lubyako, A. G. Luchinin, A. B. Pavelyev, M. I. Petelin, A. Fernandez Curto, Gyrotron frequency control by a phase lock system, Technical Physics Letters, 2006, Volume 32, Issue 8, pp 650–652B