УДК 621.385.69

Проект непрерывного субтерагерцового гиротрона на второй циклотронной гармонике, основанного на использовании резонатора с селектирующим элементом

И.В. Бандуркин, И.В. Ошарин, М.С. Рябкова, А.В. Савилов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация: в работе описан проект коротковолнового гиротрона непрерывного действия с рабочей частотой около 0.8 ТГц с киловаттным уровнем мощности, где для улучшения селективности работы на второй циклотроной гармонике используется рабочий резонатор с селективными элементами.

Ключевые слова: гиротроны, терагерцовое излучение, резонаторы, селекция мод

1. Введение

В длинноимпульсных и непрерывных гиротронах субтерагерцового диапазона частот, основанных на использовании относительно маломощных пучков электронов, работа на высоких (второй и третьей) циклотронных гармониках привлекательна как способ уменьшения рабочих магнитных полей. Однако неизбежно возникает проблема селективного возбуждения рабочего колебания, поскольку необходимо подавить паразитные низкочастотные волны, возбуждаемые на низших циклотронных гармониках. Поскольку интенсивность электронно-волновой связи быстро уменьшается с ростом номера циклотронной гармоники, электронные методы селекции мод могут оказаться недостаточными для обеспечения селективной генерации высоких циклотронных гармоник. В такой ситуации для улучшения селективности следует использовать электродинамические методы.

В качестве возможного электродинамического подхода к решению проблемы селективности в гиротронах на высоких циклотронных гармониках было предложено использование цилиндрического резонатора с короткой резонансной неоднородностью (или набором коротких неоднородностей) [1]. Такой элемент должен быть резонансным для рабочей поперечной моды, возбуждаемой на высокой циклотронной гармонике; это означает, что если в качестве рабочей используется $TE_{m,n}$, то радиус неоднородности должен соответствовать на рабочей частоте отсечки следующей радиальной моды $TE_{m,n+1}$ (рис. 1 a). В этом случае неоднородность не влияет на рабочую моду, но увеличивает стартовый ток всех паразитных мод как за счет снижения их добротностей (за счет переизлучения на неоднородность этих мод в другие моды), так и за счет искажения аксиальных структур этих мод (рис. 1 b).

Впервые в эксперименте такой способ улучшения селективности сильно сверхразмерного (в поперечном направлении) открытого резонатора был продемонстрирован в импульсном гиротроне ТГц-диапазона 50 кВ / 10 А, работающем на второй циклотронной гармонике [2]. Можно также упомянуть моделирование и проектирование непрерывного гиротрона на второй гармонике (15 кВ / 0,5 А) с относительно широкой полосой перестройки частоты, обеспечиваемой применением резонатора с двумя короткими селективными неоднородностями [3].

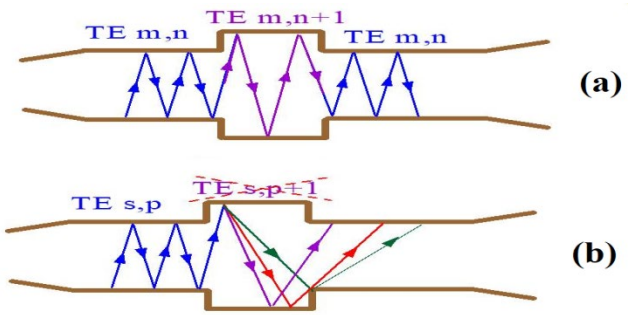

Рисунок 1. Схематическая иллюстрация работы нерегулярности, (a) резонансной для рабочей моды $TE_{m,n}$ и (b) нерезонансной для паразитной моды $TE_{s,p}$.

В настоящее время ведутся расчеты, направленные на создание гиротрона на второй гармонике (24 кВ /1 А), работающего на частоте около 0,8 ТГц в непрерывном режиме с выходной мощностью порядка киловатта. Гиротрон основан на использовании постоянного криомагнита, обеспечивающего поле до 16 Тл. В качестве рабочей выбрана поперечная мода $TE_{-6,6}$. В случае регулярного резонатора наиболее опасной паразитной волной на первой гармонике является мода $TE_{4,3}$. Использование резонатора с нерегулярностью, резонансной для рабочей моды $TE_{-6,6}$, не приводит к изменению как его дифракционной добротности, так и его пространственной структуры. Что касается паразитной моды $TE_{4,3}$, то использование селективной нерегулярности приводит к существенным изменениям. Из-за переизлучения поля ближней к отсечке волны на нерегулярности в далекие от отсечки волны дифракционная добротность этой моды оказывается существенно ниже дифракционной добротности паразитной волны в регулярном резонаторе, а собственная частота этой паразитной моды несколько увеличивается. В результате стартовый ток паразитной волны значительно увеличивается.

2. Частотно перестраиваемый гиротрон на второй гармонике

Использование резонатора с двумя селективными неоднородностями (рис. 2) рассматривалось в работе [3] как способ реализации суб-ТГц непрерывного гиротрона на второй циклотронной гармонике с относительно широкой полосой перестройки частоты. Рассматривался гиротрон 15 кВ / 0,5 А, работающий на частотах, близких к 0,4 ТГц, на относительно высокой поперечной моде TE6,6. Изменение рабочей частоты предполагалось обеспечить за счет изменения аксиального индекса q=1, 2, …, 8 рабочей моды $TE_{6,6,q}$. Согласно расчетам, это должно привести к возможности обеспечения выходной мощности порядка 10 Вт в полосе частот 0,3%. В то же время возбуждение наиболее опасной паразитной моды $TE_{4,3}$, возбуждаемой на основном циклотронном резонансе, должно быть подавлено во всей полосе перестройки частоты, что может быть обеспечено использованием резонатора с двумя короткими резонансными неоднородностями (рис. 2 а). Важно, что, согласно расчетам, эти неоднородности не нарушают аксиальные структуры различных аксиальных мод рабочей волны на второй гармонике (рис. 2 б).

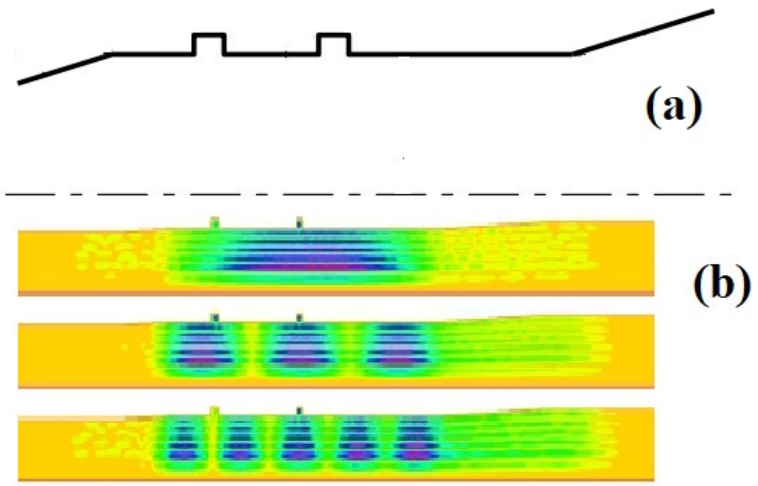

Рисунок 2. Моделирование резонатора частотно-перестраиваемого гиротрона. (a) Форма резонатора. (b) Структуры аксиальных мод с индексами q=1, 3 и 5 для рабочей моды $TE_{6,6,q}$ на второй гармонике.

3. Непрерывный гиротрон на второй гармонике с селективным резонатором

В настоящее время ведутся расчеты, направленные на разработку непрерывного гиротрона (24 кВ / 1 А), который будет работать на частоте 0,8 ТГц на второй циклотронной гармонике с выходной мощностью порядка киловатта. Гиротрон основан на использовании постоянного криомагнита, обеспечивающего магнитное поле до 16 Тл. В качестве рабочей выбрана та же по структуре мода, что и в упомянутой выше работе [3], однако с обратным (по отношению к гиро-вращению электронов) направление вращения (то есть $TE_{-6,6}$). Выбор моды с обратным вращением обусловлен ограничениями на радиус рабочего пучка, накладываемыми предполагаемой конфигурацией электронной пушки.

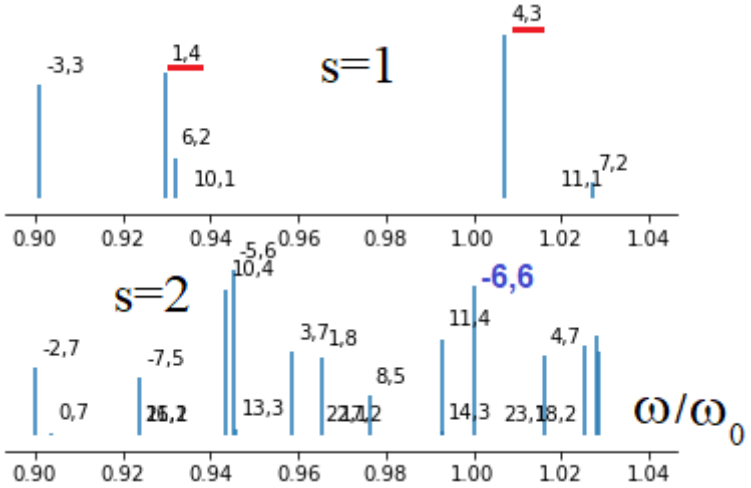

Рисунок 3. Спектры поперечных мод с частотами отсечки, близкими к $\omega_0/2$ в случае работы на основном циклотронном резонансе (s=1) и с частотами, близкими к рабочей частоте ω_0 в случае работы на второй циклотронной гармонике (s=2).

В случае регулярного рабочего резонатора наиболее опасной паразитной волной на основном циклотронном резонансе является мода $TE_{4,3}$ (рис. 3). Её зона генерации рабочей волны полностью перекрывает зону рабочей моды (рис. 4). Кроме того, потенциально опасными в данном случае являются также моды $TE_{1,4}$ и $TE_{-3,3}$,

возбуждающиеся в рабочей области магнитных полей в режиме лампы обратной волны.

Собственные моды нерегулярного резонатора рассчитывались путем решения 3-D уравнений Максвелла с заданной зависимостью поля от азимутальной координаты, соответствующей азимутальному индексу моды. Моделирование проводилось методом конечных элементов в 2-D области (r-z) [6]. Подбором геометрических размеров канавки удалось добиться ее практически полной «невидимости» для моды $TE_{-6,6}$, сохранив неизменными как добротность этой моды (Qdif=25000), так и продольный профиль поля в положении электронного пучка (рис. 5 a). Что касается паразитной моды $TE_{4,3}$, то использование селективной нерегулярности приводит к существенным изменениям (рис. 5 b). Эта мода трансформируется в три различные аксиальные моды. Первые две заполняют весь резонатор, хотя и имеют сложную аксиальную структуру (рис. 5 b). За счет переизлучения поля близкой к отсечке волны на нерегулярности в далекие от отсечки волны дифракционные добротности этих мод (Qdif=1200) существенно ниже дифракционной добротности паразитной волны в регулярном резонаторе (Qdif=5600). Кроме того, несколько увеличивается собственная частота этой паразитной моды. В результате стартовый ток этой волны увеличивается до 0.6 А, (рис. 4). Существует также еще одна паразитная мода, которая фактически заперта внутри неоднородности (рис. 5 b). Из-за малой эффективной длины ее поля возбуждение такой волны электронным пучком весьма затруднительно. Также наличие нерегулярности деструктивно влияет на моду $TE_{1,4}$, возбуждающуюся в режиме лампы обратной волны. При учете скоростного разброса в случае регулярного резонатора эта мода возбуждается при токах около 0.6 А в рабочей области магнитных полей, однако модификация резонатора повышает её стартовый ток примерно на 25 %.

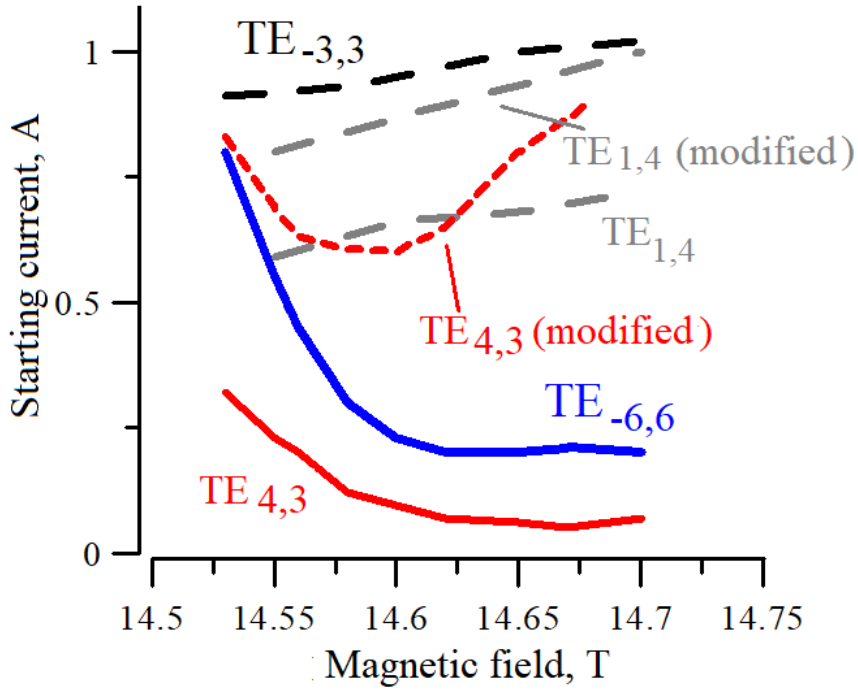

Рисунок 4. Стартовые токи рабочей и «паразитных» мод 0.8 ТГц гиротрона в случае регулярного и модифицированного резонатора. Синим цветом показана рабочая мода $TE_{-6,6}$, красным – мода $TE_{4,3}$, возбуждающаяся с гиротронном режиме, серым и черным – паразитные моды $TE_{-3,3}$ и $TE_{1,4}$, возбуждающиеся в режиме лампы обратной волны.

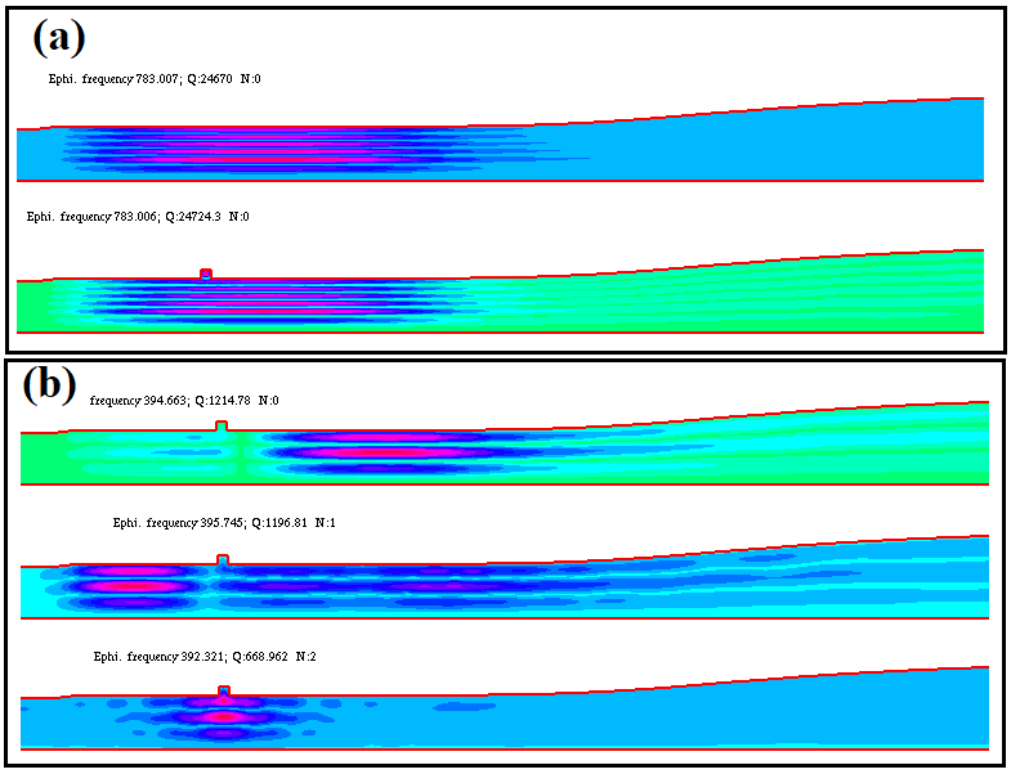

Рисунок 5. Моделирование резонатора гиротрона с частотой 0.8 ТГц. Структуры поля в регулярном и модифицированном резонаторе рабочей моды $TE_{-6,6}$ (a), а также структуры также наиболее опасной моды $TE_{4,3}$ в модифицированном резонаторе (b).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-10116).

Список литературы

1. Bandurkin I. et al. Method of providing the high cyclotron harmonic operation selectivity in a gyrotron with a spatially developed operating mode // IEEE Trans. Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – № 9.
2. Bandurkin I.V. et al. Demonstration of a selective oversized cavity in a terahertz second-harmonic gyrotron // IEEE Electron Device Lett. – 2020. – Т. 41.– С. 1412.
3. Bandurkin I.V. et al. Frequency-Tunable Second Harmonic Gyrotron With Selective Cavity: Design and Simulations // IEEE Trans. Electron Devices. – 2022. – Т. 69. – С. 1402.
4. Bratman V. et al. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range // Physical Review Letters. – 2009. – Т. 102. – № 24. – С. 24510
5. Kalynov Y. et al. Third-Harmonic 1 THz Large-Orbit Gyrotron with an Improved Quasi-Regular Cavity // IEEE Electron Device Letters. – 2023. – Т. 44. – № 10. – С. 1740–1743.
6. F. Hecht. New development in FreeFem++ // J. Numer. Math. – 2012. – Т. 20. – № 3-4. – С. 251–265.