

Профилированный ступенчатый рефлектор для селекции мод в гиротронах, работающих на второй циклотронной гармонике

© Ю.Ю. Данилов, Э.Б. Абубакиров

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: danilov@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 1 июня 2026 г.
Принято к публикации 2 июля 2026 г.

Селективное отражение высокой несимметричной пространственно-развитой моды цилиндрического волновода исследовано в приложении к замыканию обратной связи в гиротронах, работающих на второй циклотронной гармонике. Найдены профиль и соотношение параметров ступенчатого рефлектора, обеспечивающие подавление паразитных мод в полосах циклотронного резонанса на первой и третьей гармониках при малом уровне потерь рабочей моды. Уменьшение добротностей паразитных мод при замене конического рефлектора на профилированный ступенчатый рефлектор продемонстрировано на примере резонатора миллиметрового релятивистского гиротрона, работающего на моде $H_{11,2,1}$ на второй гармонике.

Ключевые слова: профилированный ступенчатый рефлектор, миллиметровый релятивистский гиротрон, вторая циклотронная гармоника, электродинамическая селекция мод, высокая несимметричная мода.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.20.63603.20567

В настоящее время разработка умеренно релятивистских гиротронов, работающих на второй циклотронной гармонике, представляется перспективным подходом для получения мощных импульсов микроволнового излучения в миллиметровом диапазоне длин волн, что нашло отражение в [1–5]. Работа гиротрона на второй циклотронной гармонике позволяет обеспечить мультимегаваттный уровень выходной мощности без повышения индукции магнитного поля для импульсов микросекундной длительности [1]. Повышение выходной мощности таких источников и их продвижение во все более высокочастотный диапазон требуют использо-

вания пространственно-развитых электродинамических систем, работающих на все более высоких несимметричных модах. Это усложняет подавление паразитных мод в полосах циклотронного резонанса на других гармониках (особенно в полосе первой гармоники) и тем самым препятствует повышению уровня выходной мощности гиротрона в импульсном режиме. Более раннее возбуждение паразитных мод на фронте питающего импульса может быть преодолено за счет схемы питания [6] или фазовой синхронизации внешним сигналом [2] только в частных случаях. Традиционный резонатор гиротрона образован отрезком цилиндрического волновода, ограниченного неселективными коническими переходами к цилиндрическому волноводу, заперделному для собственных мод, со стороны катода и к цилиндрическому волноводу с расширенным сечением со стороны коллектора. Связанные с микроволновым пробоем ограничения [1] для мультимегаваттных гиротронов, работающих в режиме длинных импульсов, делают затруднительным использование метода электродинамической селекции, основанного на введении нерегулярности в центр резонатора [7]. Следовательно, существует необходимость разработки электродинамического рефлектора, который обеспечит замыкание обратной связи с очень высокой селективностью и будет располагаться в области малого электромагнитного поля со стороны катода (на месте конического рефлектора). Наиболее компактным из высокоселективных электродинамических элементов, альтернативных коническому сужению, является рефлектор, представляющий собой профилированное ступенчатое расширение [8,9]. Достоинства такого рефлектора в пространственно-развитой электродинамической системе были продемонстрированы при его моделирова-

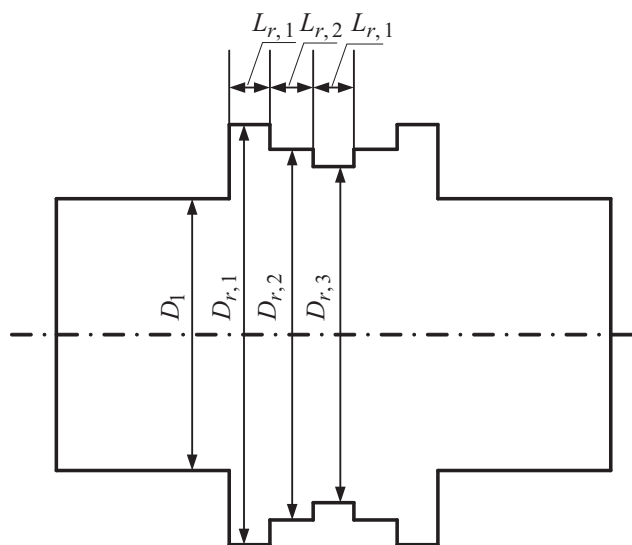


Рис. 1. Профиль селективного пятиступенчатого рефлектора моды $H_{11,2}$ цилиндрического волновода.

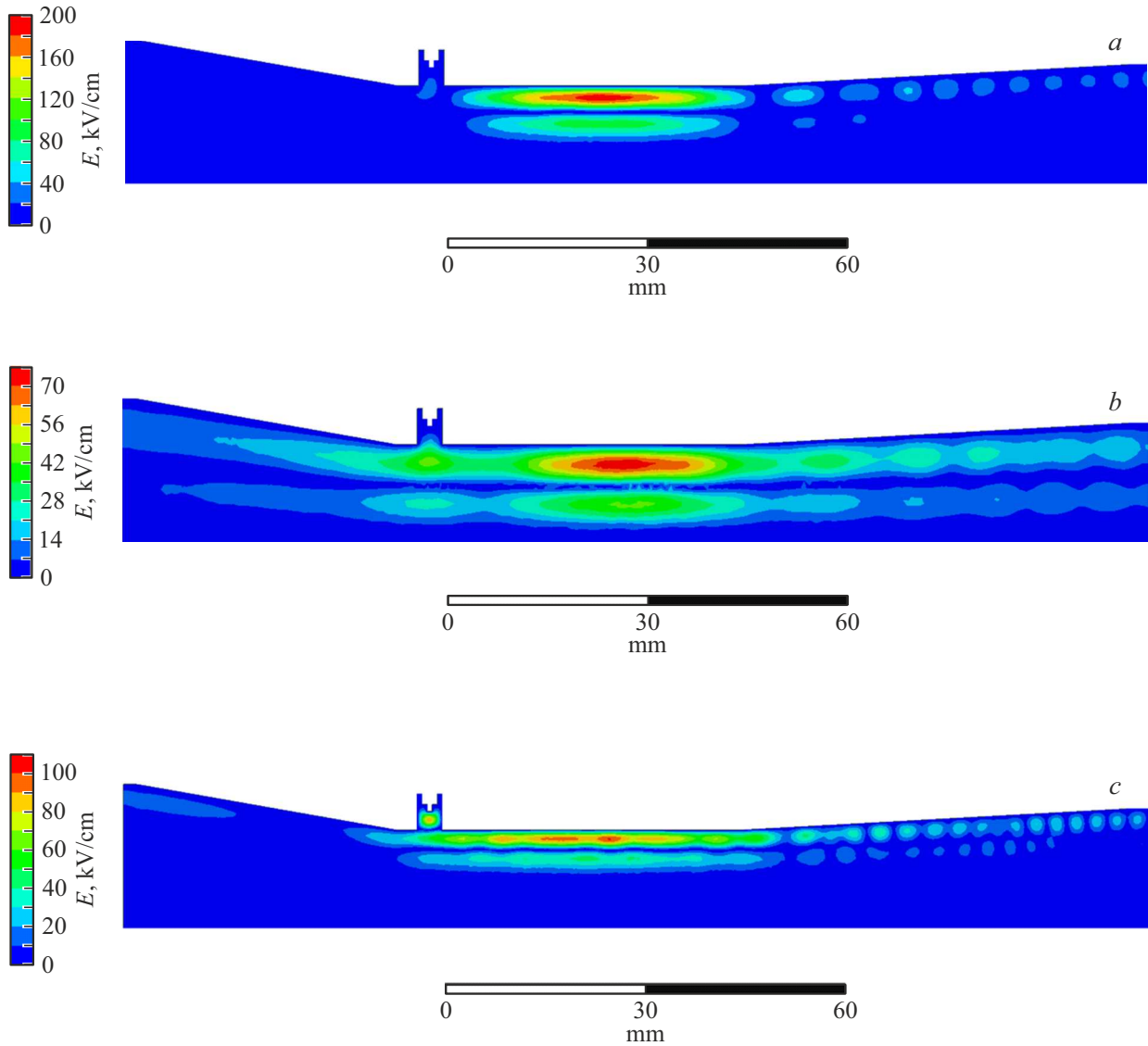


Рис. 2. Профиль резонатора гиротрона с селективным пятиступенчатым рефлексом: распределения и значения азимутальной компоненты электрического поля в продольном сечении, соответствующие рабочей моде $H_{11,2,1}$ (a) и паразитным модам $H_{4,2,1}$ (b) и $H_{19,2,1}$ (c) при питающей мощности 1 MW.

нии для микроволнового генератора мощных ультракоротких импульсов с рабочей модой $E_{0,2}$ [9].

Генерация колебаний в гиротроне имеет место, когда собственная частота одной из собственных H -мод резонатора находится вблизи частоты одной из циклотронных гармоник и ток электронного пучка превышает стартовый ток этой моды, значение которого определяется согласно известной формуле [10,11]. Состав околорезонансных паразитных мод определяется относительными ширинами полос генерации, которые составляют $(\lambda_n/L)\beta_{\parallel}$, где λ_n — длина волны, соответствующая n -й циклотронной гармонике, L — длина пространства взаимодействия электронного пучка с собственными модами резонатора, $\beta_{\parallel}$ — отношение продольной скорости электронов к скорости света. Для традиционного гиротрона, у которого длина пространства взаимодействия

L намного превышает λ_1 , отношения стартовых токов паразитных мод $I_{1,2,3}$ в полосах генерации первых трех циклотронных гармоник к стартовому току рабочей моды I принимают вид

$$\begin{cases} I_1/I \approx (2\beta_{\perp})^2(Q/Q_1)(G/G_1), \\ I_2/I \approx (Q/Q_2)(G/G_2), \\ I_3/I \approx (16/27\beta_{\perp})^2(Q/Q_3)(G/G_3). \end{cases} \quad (1)$$

В (1) $\beta_{\perp}$ — отношение поперечной скорости электронов к скорости света, G и $G_{1,2,3}$ — структурные факторы рабочей моды и паразитных мод, которые характеризуют эффективность их взаимодействия с пучком, Q и $Q_{1,2,3}$ — нагруженные добротности рабочей моды и паразитных мод в полосах генерации первой, второй и третьей гармоник. Нагруженные добротности

собственных мод традиционного гиротрона в основном определяются дифракционными потерями, обусловленными излучением через торцы резонатора, так как омические потери в боковых стенках являются существенно меньшими.

В мультимегаваттном релятивистском гиротроне, работающем на второй гармонике, электронная селекция мод осуществима только в этой полосе генерации [1], так как структурные факторы рабочей моды и ее главных конкурентов на первой и третьей гармониках примерно одинаковы. Этими конкурентами являются моды с тем же радиальным индексом, что обусловлено невысоким радиальным индексом рабочей моды. Электродинамическая селекция мод для такого гиротрона в полосах генерации на первой и третьей гармониках, как следует из (1), возможна при выполнении соотношений

$$Q/Q_1 > 1/(2\beta_{\perp})^2, \quad Q/Q_3 > (27\beta_{\perp}/16)^2. \quad (2)$$

Для моделирования селективного электродинамического рефлексора был выбран профиль резонатора мультимегаваттного релятивистского гиротрона, работавшего на второй гармонике в 5-миллиметровом диапазоне длин волн на моде $H_{11,2,1}$ [1]. Моделирование проводилось посредством программного кода ANSYS Electromagnetic Suite 2022 R2 [12] в пренебрежении омическими потерями. Изменения в профиле резонатора со стороны катода состояли в замене участка запрельного цилиндрического волновода и участка конического сужения на участок незапрельного цилиндрического волновода и профилированный ступенчатый рефлексор. Профиль рефлексора является симметричным и описывается следующими параметрами (рис. 1): $D_1 = 30$ mm, $D_{r,1} = 41$ mm, $D_{r,2} = 37.8$ mm, $D_{r,3} = 35.65$ mm, $L_{r,1} = 0.75$ mm, $L_{r,2} = 0.8$ mm.

Модифицированный профиль резонатора с пятиступенчатым селективным рефлексором, полученный в результате моделирования, представлен на рис. 2. Полная длина электродинамической структуры и добротность рабочей моды $H_{11,2,1}$, равная 1200, при модифицировании профиля оставались неизменными, что было обеспечено подбором длин участков незапрельного цилиндрического волновода с обеих сторон рефлексора. Профиль электродинамической структуры описывается следующими параметрами (со стороны катода на рис. 2) (D — диаметр, L — длина).

1. Цилиндрический участок: $D_0 = 44$ mm, $L_0 = 2$ mm.
2. Конический участок: $L_{c,1} = 40$ mm.
3. Цилиндрический участок: $D_1 = 30$ mm, $L_1 = 3.15$ mm.
4. Рефлексор (рис. 1).
5. Цилиндрический участок: $D_2 = 30$ mm, $L_2 = 46$ mm.
6. Конический участок: $L_{c,2} = 60$ mm.
7. Цилиндрический участок: $D_3 = 36.6$ mm, $L_3 = 2$ mm.

Смоделированный пятиступенчатый профиль рефлексора для моды $H_{11,2}$ цилиндрического волновода представляет собой аналог профиля рефлексора для моды цилиндрического волновода $E_{0,2}$ [9], который является

простейшим из возможных вариантов. Рабочее колебание рефлексора представляет собой нормальное колебание двух парциальных мод непрофилированного ступенчатого расширения. Центральная секция деформации и соседние с ней секции предназначены для смещения по частоте паразитных резонансов, обусловленных распространяющимися модами с радиальным индексом, меньшим, чем у рабочего колебания. Настройка рефлексора на заданную центральную частоту производится подбором параметров двух крайних секций деформации. Нормированные на исходную мощность частотные зависимости для моды $H_{11,2}$ представлены на рис. 3 (R и T — коэффициенты отражения и прохождения соответственно).

Принцип подавления паразитных мод на первой и третьей гармониках иллюстрирует рис. 2, где резонатор гиротрона с селективным рефлексором возбуждается волноводной модой со стороны коллектора. Паразитные моды $H_{4,2,1}$ и $H_{19,2,1}$ являются главными конкурентами рабочей моды $H_{11,2,1}$ на первой и третьей гармониках, поэтому на рис. 4 представлены нормированные на исходную мощность частотные зависимости резонатора для волноводных мод $H_{11,2}$ (а), $H_{4,2}$ (b) и $H_{19,2}$ (c). Представленные на рис. 2, а–с распределения азимутальной компоненты электрического поля и их значения, максимальные за период, соответствуют первым максимумам частотных зависимостей на рис. 4, а–с. Связь рабочей моды $H_{11,2,1}$ со следующей продольной модой $H_{11,2,2}$ при смоделированном профиле ступенчатого рефлексора отсутствует: резонансные кривые этих мод не перекрываются (рис. 4, а). В полосах генерации первой и третьей

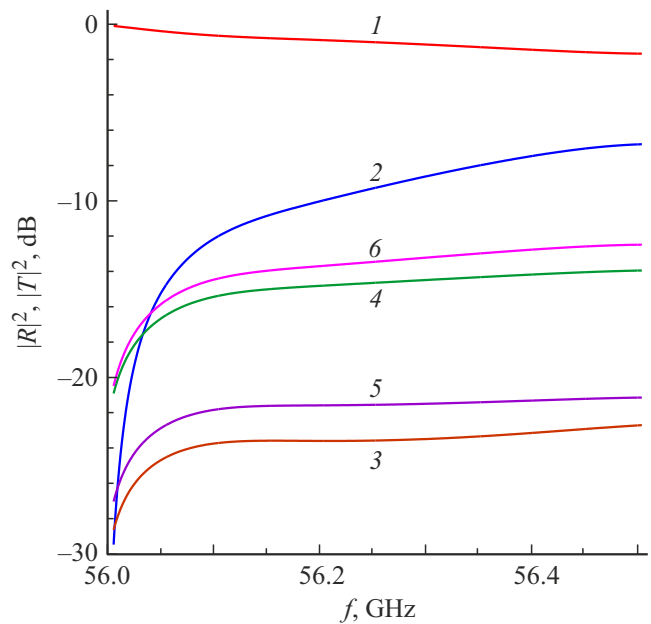


Рис. 3. Частотные зависимости селективного рефлексора моды $H_{11,2}$ (рис. 1): отражение (1) и прохождение (2) моды $H_{11,2}$, трансформация моды $H_{11,2}$ в отраженные моды $H_{11,1}$ (3) и $E_{11,1}$ (4) и в проходящие моды $H_{11,1}$ (5) и $E_{11,1}$ (6).

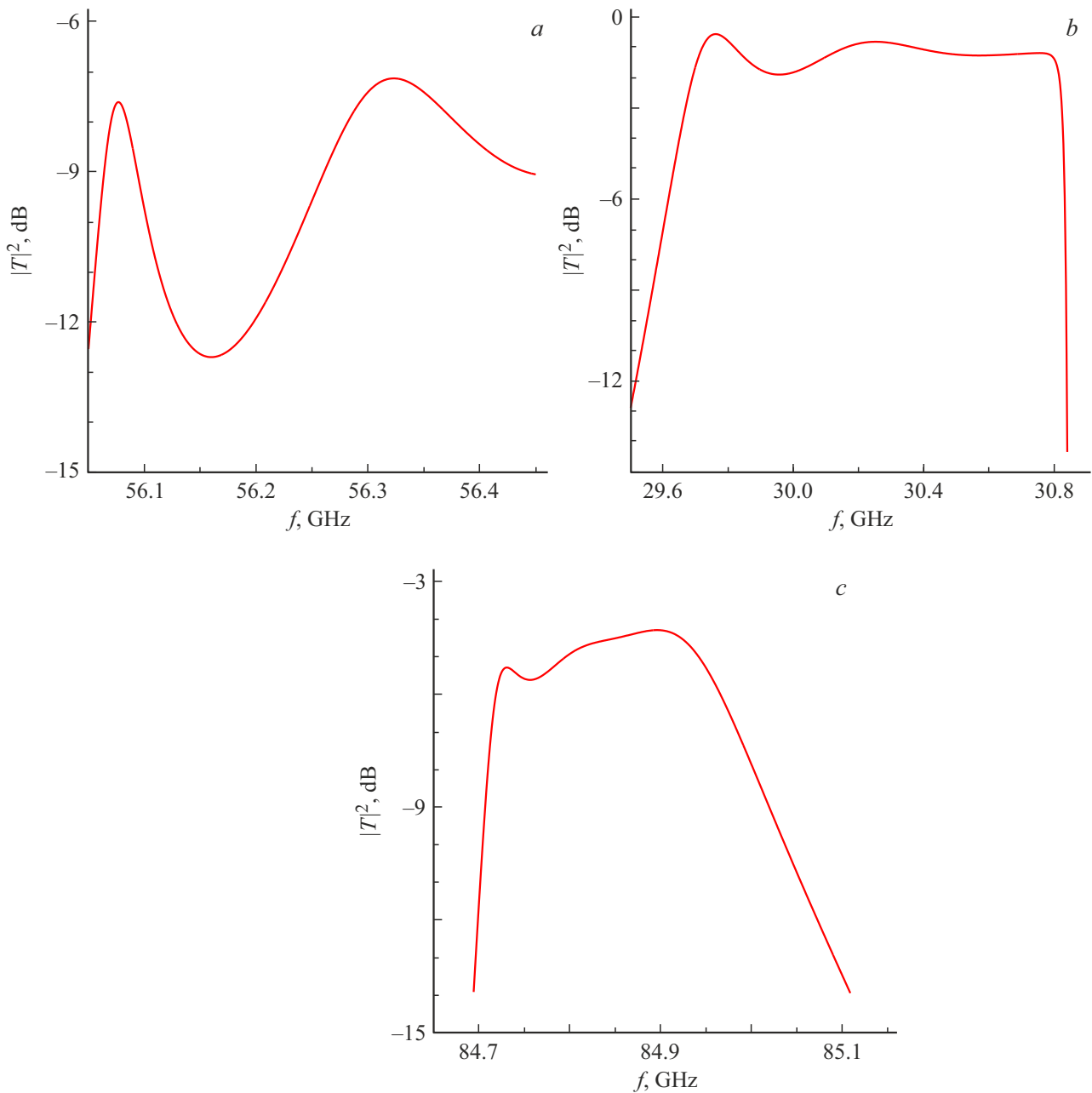


Рис. 4. Частотные зависимости резонатора с селективным рефлектором (рис. 2). *a* — прохождение моды $H_{11,2}$, *b* — прохождение моды $H_{4,2}$, *c* — прохождение моды $H_{19,2}$.

гармоник профиль рефлектора обеспечивает сильную связь каждой паразитной моды $H_{m,p,1}$ со следующей продольной модой $H_{m,p,2}$, в частности $H_{4,2,1}$ и $H_{4,2,2}$ (рис. 4, *b*), $H_{19,2,1}$ и $H_{19,2,2}$ (рис. 4, *c*). Сильная связь обусловлена намного меньшим отражением каждой из соответствующих мод цилиндрического волновода $H_{m,p}$ от селективного рефлектора по сравнению с модой $H_{11,2}$, что значительно уменьшает добротности паразитных мод резонатора $H_{m,p,1}$ и $H_{m,p,2}$ в полосах генерации первой и третьей гармоник. В результате для каждой пары паразитных мод $H_{m,p,1}$ и $H_{m,p,2}$ образуется широкополосное нормальное колебание с добротностью, существенно

меньшей, чем у парциальной моды $H_{m,p,1}$. Наименьшее отражение паразитных мод в полосе генерации первой гармоники обеспечивается выбором продольной длины рефлектора, меньшей чем $\lambda_1/2$. В этом случае колебания H -типа в ступенчатом расширении отсутствуют, и оно не является резонансным рефлектором для H -мод цилиндрического волновода.

Добротность каждого H -колебания в полосах генерации первых трех гармоник была определена из частотных зависимостей мощностей волноводных мод, проходящих через резонатор, в частности представленных на рис. 4: $H_{11,2}$ (*a*), $H_{4,2}$ (*b*), $H_{19,2}$ (*c*). Моделирование

показало, что добротность рабочей моды $H_{11,2,1}$ превосходит добротности паразитных H -колебаний в 45 раз в полосе первой гармоники и в 4 раза в полосе третьей гармоники. Следовательно, условия электродинамической селекции (2) будут выполняться для гиротронов с типичным питч-фактором электронного пучка $g = \beta_{\perp}/\beta_{\parallel}$ в диапазоне 1–1.5 при энергии пучка, превышающей 5 keV.

При моделировании был определен диапазон значений максимальной напряженности электрического поля на поверхности рефлектора при скруглении его острых кромок с малым радиусом кривизны $(0.05–0.1)\lambda$ [13], типичным для микроволновых импульсных генераторов с уровнем мощности вплоть до нескольких гигаватт. Максимальная напряженность электрического поля рабочей моды на поверхности рефлектора при уровне пиковой мощности 1 MW не превышает 20 kV/cm, что намного меньше значений, типичных для наиболее мощных импульсных приборов [1,13,14].

Согласно [1], уровень выходной мощности релятивистского гиротрона, работающего на второй циклотронной гармонике, на длине волны 5.5 mm при улучшении селективных свойств гиротрона может быть повышен с 2 до 5 MW и ограничен микроволновым пробоем в центре резонатора гиротрона. Изменений в работе рефлектора при этом не произойдет, так как при уровне мощности 5 MW максимальная напряженность электрического поля в центре резонатора составит 120 kV/cm, а на поверхности рефлектора не превысит 45 kV/cm.

Полученные результаты позволяют заключить, что предложенная конструкция резонатора с профилированным ступенчатым рефлектором может быть использована по крайней мере вплоть до середины субмиллиметрового диапазона длин волн, где может оказывать существенное влияние погрешностей изготовления. Возможность использования предложенного рефлектора в конструкции резонатора гиротрона, работающего на моде с более высоким радиальным индексом, может потребовать дополнительного исследования в полосе циклотронного резонанса на третьей гармонике для конкретного электронного пучка. Отметим, что профилированные ступенчатые рефлекторы могут также найти применение в мультимегаваттных гироклистро-нах [15,16] и релятивистских гиротронах, работающих на третьей циклотронной гармонике [17].

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания FFUF-2024-0027.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.А. Завольский, Е.В. Иляков, Ю.К. Калынов, И.С. Кулагин, В.Н. Мануилов, А.С. Шевченко, Изв. вузов. Радиофизика, **61** (1), 44 (2018). [N.A. Zavolsky, E.V. Ilyakov, Yu.K. Kalynov, I.S. Kulagin, V.N. Manuilov, A.S. Shevchenko, Radiophys. Quantum Electron., **61** (1), 40 (2018). DOI: 10.1007/s11141-018-9868-5].
- [2] G.G. Denisov, I.V. Zotova, I.V. Zhelezov, A.M. Malkin, N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, E.S. Semenov, M.Yu. Glyavin, IEEE Trans. Electron Dev., **69** (2), 754 (2022). DOI: 10.1109/TED.2021.3134187
- [3] D.V. Peponis, K.A. Avramidis, I.G. Chellis, Z.C. Ioannidis, S. Illy, J. Jelonnek, G.P. Latsas, I.G. Tigelis, IEEE Trans. Electron Dev., **70** (12), 6587 (2023). DOI: 10.1109/TED.2023.3326431
- [4] I.G. Chellis, K.A. Avramidis, D.V. Peponis, Z.C. Ioannidis, G.P. Latsas, S. Illy, J. Jelonnek, I.G. Tigelis, IEEE Trans. Electron Dev., **71** (3), 2140 (2024). DOI: 10.1109/TED.2024.3356472
- [5] E.V. Ilyakov, D.S. Krupin, I.S. Kulagin, A.N. Leontyev, A.M. Malkin, K.V. Mineev, B.Z. Movshevich, R.M. Rozental, A.S. Sergeev, A.S. Shevchenko, I.V. Zotova, N.S. Ginzburg, Phys. Plasmas, **32** (7), 073302 (2025). DOI: 10.1063/5.0267833
- [6] Н.И. Зайцев, С.А. Запечалов, А.В. Малыгин, М.А. Моисеев, А.С. Шевченко, Изв. вузов. Радиофизика, **53** (3), 196 (2010). [N.I. Zaitsev, S.A. Zapevalov, A.V. Malygin, M.A. Moiseev, A.S. Shevchenko, Radiophys. Quantum Electron., **53** (3), 178 (2010). DOI: 10.1007/s11141-010-9214-2].
- [7] I.V. Bandurkin, A.P. Fokin, M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin, I.V. Osharin, A.V. Savilov, IEEE Electron Dev. Lett., **41** (9), 1412 (2020). DOI: 10.1109/LED.2020.3010445
- [8] Н.С. Гинзбург, М.Н. Вилков, В.Н. Мануилов, Ю.Ю. Данилов, А.П. Конюшков, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, И.В. Зотова, Изв. вузов. Радиофизика, **65** (3), 212 (2022). DOI: 10.52452/00213462_2022_65_03_212 [N.S. Ginzburg, M.N. Vilkov, V.N. Manuilov, Yu.Yu. Danilov, A.P. Konyushkov, E.V. Ilyakov, I.S. Kulagin, I.V. Zotova, Radiophys. Quantum Electron., **65** (3), 196 (2022). DOI: 10.1007/s11141-023-10205-7].
- [9] Ю.Ю. Данилов, Э.Б. Абубакиров, Письма в ЖТФ, **50** (3), 10 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57037.19592 [Yu.Yu. Danilov, E.B. Abubakirov, Tech. Phys. Lett., **50** (2), 8 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57037.19592].
- [10] И.И. Антаков, В.Е. Запечалов, Т.Б. Панкратова, Ш.Е. Цимринг, в сб. *Гиротрон*, под ред. А.В. Гапонова-Грехова (ИПФ АН СССР, Горький, 1981), с. 192–215.
- [11] S.P. Sabchevski, G.S. Nusinovich, M.Yu. Glyavin, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, **45** (3–4), 184 (2024). DOI: 10.1007/s10762-024-00972-3
- [12] ANSYS Electromagnetic Suite 2022 R2 [Электронный ресурс]. <http://www.ansys.com>
- [13] С.Д. Коровин, И.К. Куркан, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов, Изв. вузов. Радиофизика, **42** (12), 1189 (1999). [S.D. Korovin, I.I. Kurkan, V.V. Rostov, E.M. Tot'meninov, Radiophys. Quantum Electron., **42** (12), 1047 (1999). DOI: 10.1007/BF02677128].
- [14] А.И. Климов, И.К. Куркан, С.Д. Полевин, В.В. Ростов, Е.М. Тотьменинов, Письма в ЖТФ, **34** (6), 23 (2008). [A.I. Klimov, I.I. Kurkan, S.D. Polevin, V.V. Rostov, E.M. Tot'meninov, Tech. Phys. Lett., **34** (3), 235 (2008). DOI: 10.1134/S1063785008030176].

- [15] E.B. Abubakirov, Yu.M. Guznov, S.V. Kuzikov, A.S. Shevchenko, A.A. Vikharev, S.A. Zapevalov, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **66** (3), 1273 (2018). DOI: 10.1109/TMTT.2017.2772917
- [16] Ю.Ю. Данилов, *Изв. вузов. Радиофизика*, **67** (8), 643 (2024). DOI: 10.52452/00213462_2024_67_08_643 [Yu.Yu. Danilov, *Radiophys. Quantum Electron.*, **67** (8), 581 (2025). DOI: 10.1007/s11141-025-10399-y].
- [17] Е.В. Иляков, Ю.К. Калынов, И.С. Кулагин, Н.А. Завольский, Ю.Д. Гром, В.Н. Мануилов, А.С. Шевченко, *Изв. вузов. Радиофизика*, **68** (3), 216 (2025). DOI: 10.52452/00213462_2025_68_03_216 [E.V. Ilyakov, Yu.K. Kalynov, I.S. Kulagin, N.A. Zavolsky, Yu.D. Grom, V.N. Manuilov, A.S. Shevchenko, *Radiophys. Quantum Electron.*, **68** (3), 195 (2025). DOI: 10.1007/s11141-026-10450-6].