

Гиротронный резонатор с механически изменяемым поперечным сечением

И.В. Бандуркин, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов, Д.Ю. Щегольков

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в данной работе предложен электродинамический метод обеспечения непрерывной перестройки частоты в гиротроне субтерагерцового частотного диапазона. Метод основан на использовании квази-симметричной поперечной рабочей моды, возбуждаемой в резонаторе с азимутально несимметричным поперечным сечением. Изменение собственной частоты близкой к отсечке волны в этом резонаторе обеспечивается за счет механического изменения его поперечного сечения вращением вокруг оси резонатора системы одной механической части по отношению к другой.

Ключевые слова: гиротрон, механическая перестройка частоты, резонаторы.

1. Введение

Для спектроскопических приложений требуются компактные и недорогие источники непрерывного излучения субтерагерцового (сотни ГГц) диапазона частот с относительно большой малой (десятки ватт – единицы киловатт) мощностью. Важным требованием к таким источникам является, с одной стороны, узкополосность спектра выходного излучения, а с другой стороны, возможность широкополосной перестройки частоты генерации. В качестве конкретных приложений можно назвать спектроскопию высокого разрешения и, в частности, спектроскопию ядерного магнитного резонанса, а также радиоакустическое детектирование [1-5]. Наиболее привлекательными источниками для таких приложений являются гиротроны. Однако с точки зрения спектроскопических приложений важным недостатком традиционных гиротронов является использование селективного возбуждения электронами высокочастотной моды близкой к отсечке аксиальной моды открытого резонатора, что существенно ограничивает возможности перестройки частоты. Характерные добротности рабочих волн традиционных гиротронов соответствуют полосе частот на уровне долей процента. Такой полосы частот достаточно для настройки гиротрона на полосу спектра исследуемого материала. Однако для спектроскопии идеальным было бы иметь источник, обеспечивающий сочетание стабильности формируемого волнового сигнала вместе с возможностью его плавной перестройки частоты не менее нескольких процентов, что позволило бы получить спектральную картину в относительно широкой полосе.

В связи с этим в настоящее время рядом научных групп ведутся интенсивные работы по созданию субтерагерцовых гиротронов с широкополосной перестройкой частоты. Основные направления этих работ связаны либо с реализацией гиротронов на основе возбуждения относительно низкочастотных колебаний и, возможно, квазинепрерывного перехода от одного такого колебания к другому, либо с реализацией гиротронов с механической регулировкой параметров электродинамической системы (резонатора). Первый подход имеет естественные ограничения, связанные с обеспечением устойчивости и избирательности одночастотной генерации рабочей волны. В качестве примера следует упомянуть в первую очередь достаточно известную [6-8] идею изменения частоты гиротрона за счет увеличения магнитного поля и одновременно переход от работы на низшей квазикритической аксиальной моде открытого резонатора к возбуждению высших

аксиальных мод в режиме «генератора обратной волны» (ЛОВ). При этом непрерывность перестройки частоты обеспечивается перекрытием частотных полос соседних осевых мод за счет использования сразу нескольких приемов (минимизация отражений волн от выхода резонатора, повышенные омические потери, большое превышение рабочего тока над стартовым). Однако в большинстве экспериментов перестройка частоты относительно невелика (на уровне 1%) и сопровождается резким падением эффективности электронно-волнового взаимодействия при переходе от возбуждения волн гиротронного типа к работе в режиме ЛОВ.

Что касается гиротронов с механической перестройкой частоты, осуществляемой за счет изменения конфигурации резонатора, такие схемы давно исследуются [9-11]. В данной работе предлагается метод механического преобразования поперечного сечения резонатора гиротрона, основанный на вращении вокруг оси системы различных частей полости относительно друг друга. Здесь развивается подход, связанный с использованием резонаторов с азимутально-асимметричными сечениями в гиротронах [12]. В частности, недавно было показано, что использование этого типа резонаторов позволяет повысить селективность возбуждения симметричных $TE_{0,p}$ -мод [13]. В данной работе показано, что использование резонатора с азимутальной неоднородностью переменного размера обеспечивает механическую регулировку частоты рабочей $TE_{0,p}$ -моды.

2. Азимутально несимметричный резонатор для селективного возбуждения симметричных поперечных мод

Рассмотрим резонатор с поперечным сечением, состоящим из двух круговых секторов разного радиуса (рис. 1). Эти радиусы подчиняются соотношению $\frac{\mu_p}{R_1} \approx \frac{\mu_q}{R_2}$, где μ_p и μ_q – p -й и q -й корни уравнения $J_1(\mu) = 0$ (и $q > p$). Другими словами, они представляют собой собственные значения для мод $TE_{0,p}$ и $TE_{0,q}$ круглого волновода. Рисунок 1 иллюстрирует случай, когда радиусы R_1 и R_2 соответствуют модам $TE_{0,4}$ и $TE_{0,6}$. Поперечная структура этой волны показана на рис. 1 b; в меньшем секторе с $R = R_1$ это мода $TE_{0,p}$ азимутально-симметричного резонатора радиуса $R = R_1$, а в большем секторе с $R = R_2$ это мода поперечная мода $TE_{0,q}$ азимутально-симметричного резонатора радиусом $R = R_2$.

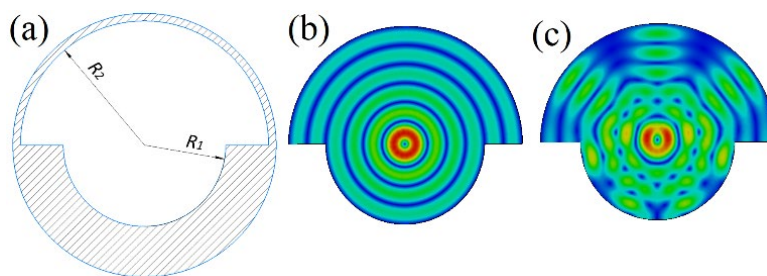


Рисунок 1. (a): Поперечное сечение азимутально-асимметричного резонатора. (b) и (c): Расчетные (моделирование CST) поперечные структуры электрического поля собственной моды для случаев, когда радиусы R_1 и R_2 (соответствующие модам $TE_{0,4}$ и $TE_{0,6}$ соответственно) согласованы с помощью уравнения (2), а также когда радиус R_2 несколько превышает резонансное значение.

Если радиус большего сектора немного превышает резонансное значение, $R_2 = R_{2+} = R_{2,res} + \delta R$, то поперечная структура волны усложняется (рис. 1 c), а его длина волны $\lambda = \lambda_+$ определяется волновыми числами, соответствующими меньшей и большей частям поперечного сечения резонатора. Если представить, что можно создать резонатор с регулируемым радиусом большего сектора (рис. 1 a), то изменение

этого радиуса в интервале $R_{2-} < R_2 < R_{2+}$ приводит к изменению длины волны собственной моды этого резонатора в интервале $\lambda_- < \lambda < \lambda_+$.

При моделировании мы решаем поперечную двумерную электродинамическую задачу с помощью вычислителя Eigenmode Solver в пакете CST Microwave Studio. Для расчетов был выбран радиус меньшей части поперечного сечения $R_1 = 2.42$ мм, что соответствует частоте, близкой к 263 ГГц. Среди найденных мод выбираем моду со структурой поля, в которой преобладает азимутально-симметричная составляющая, то есть находим моду, обладающую наибольшим значением структурного фактора,

$$F_{\text{str}} = \frac{\int_0^R \left| \int_0^{2\pi} E(r, \varphi) d\varphi \right|^2 r dr}{\left| \int_0^R \int_0^{2\pi} E(r, \varphi) d\varphi r dr \right|^2},$$

представляющую содержание азимутально-симметричной компоненты поля в полном поле $E(r, \varphi)$. При плавном изменении радиуса R_2 от $R_{2+} = 1.07R_{2, \text{res}}$ до $R_{2-} = 0.93R_{2, \text{res}}$ частота этой собственной моды изменяется от 273 до 252 ГГц, что соответствует полосе перестройки около 8%. В пределах этой полосы F_{str} уменьшается от 1 (случай точного резонанса, $R_2 = R_{2, \text{res}}$) до 0,5. Также, согласно моделированию, трансформация структуры поля в пределах этой полосы не приводит к существенному изменению омических потерь. Поэтому указанное уменьшение структурного фактора соответствует увеличению стартового тока моды в два раза.

3. Механическая перестройка частоты в резонаторе переменного азимутально-асимметричного сечения

Очевидно, что с технической точки зрения на практике трудно реализовать постепенное изменение радиуса R_2 . Более реалистичным вариантом технической реализации этого подхода является использование подвижного элемента («козырька»). Вращение этого элемента вокруг оси резонатора приводит к трансформации большего сектора резонатора (рис. 2 б). Если используется один козырек (рис. 2 с), то его поворот на 180 градусов соответствует изменению радиуса от R_{2+} до R_{2-} . Плавный поворот козырька должен обеспечивать плавную перестройку собственной частоты резонатора в диапазоне $f(R_{2-}) > f > f(R_{2+})$.

В моделировании 2D CST была исследована система с перестройкой частоты с помощью движущегося элемента (рис. 2 б). Здесь мы рассматриваем вращение одного «козырька» так, чтобы радиус изменился с R_{2+} на $R_{2, \text{res}}$ и сравниваем две схемы. В обоих случаях $R_{2, \text{res}}$ соответствует моде $TE_{0,5}$. Что касается R_{2+} , то в первом случае это немного больше радиуса, соответствующего пятому нулю функции Бесселя, $R_{2+} = R_{2, \text{res}} + 0.22$ мм (рис. 3 б). Напротив, во втором случае R_{2+} немного больше радиуса, соответствующего 6-му нулю Бесселя (рис. 3 с). Если случай, показанный на рис. 3 б, можно назвать «конфигурацией $TE_{0,4} + TE_{0,5}$ » (поскольку структура поля в большей части поперечного сечения резонатора остается близкой к $TE_{0,5}$ – при любом положении козырька), то случай, показанный на рис. 3 с, можно назвать «конфигурацией $TE_{0,4} + TE_{0,5} + TE_{0,6}$ », поскольку вращение козырьков приводит к постепенной трансформации структуры поля в большей части поперечного сечения резонатора от моды $TE_{0,6}$ до $TE_{0,5}$. Согласно моделированию, при правильном выборе радиуса R_{2+} во втором случае разницу с точки зрения результата между этими двумя конфигурациями можно сделать незначительной (рис. 3 а). Частота собственной волны со структурой, наиболее близкой к моде $TE_{0,4}$ азимутально-симметричного резонатора, довольно плавно изменяется примерно от 257,6 ГГц до 263 ГГц, так что полоса перестройки частоты составляет более 4%. Отметим, что в пределах всей полосы структурный фактор F_{str} относительно высок (более 50%).

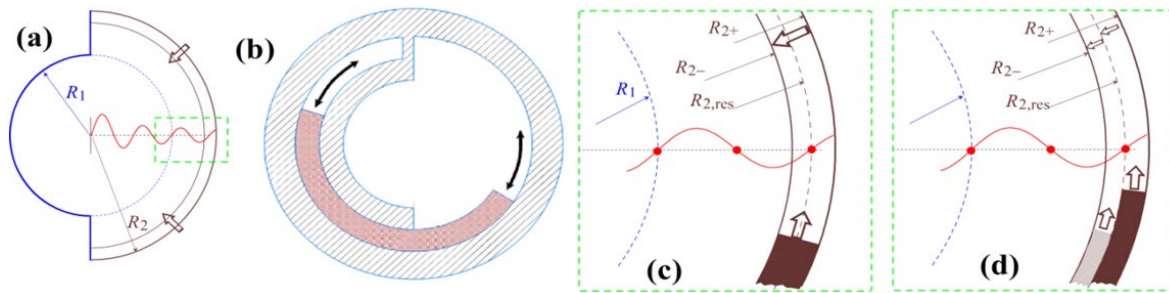


Рисунок 2. (а): Схема поперечного сечения азимутально-асимметричного резонатора с переменным радиусом большей части поперечного сечения. (б) Схема механического преобразования поперечного сечения резонатора с помощью вращающегося «козырька». (в) Постепенное одноэтапное ($R_{2+} \rightarrow R_{2-}$) уменьшение радиуса большей части поперечного сечения резонатора с использованием одного козырька. (д) Постепенное двухэтапное ($R_{2+} \rightarrow R_{2, \text{res}} \rightarrow R_{2-}$) уменьшение радиуса с использованием двух козырьков

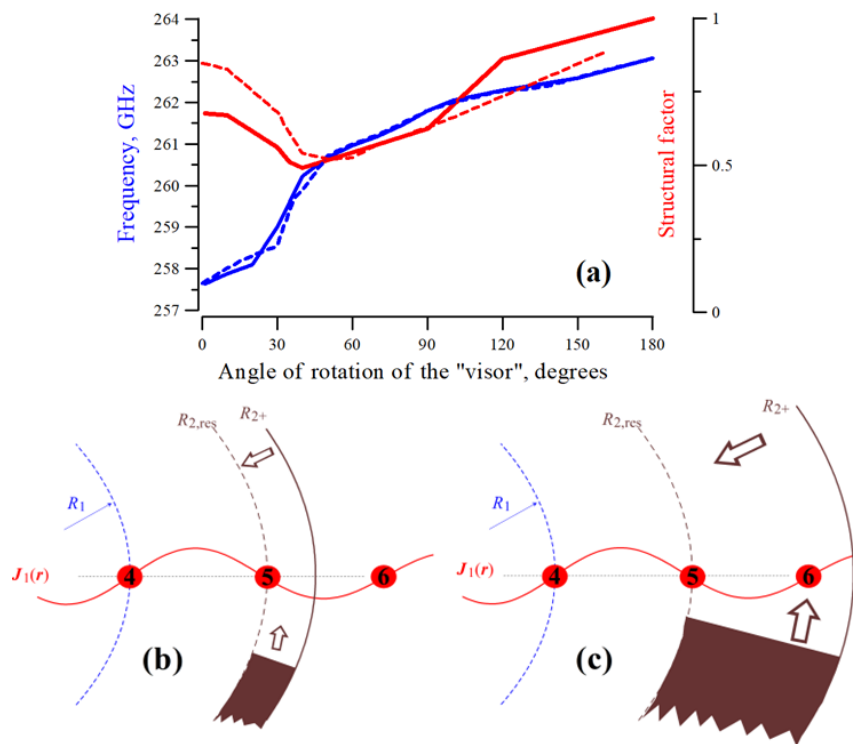


Рисунок 3. (а) Частоты возбуждаемых собственных волн и структурные факторы в зависимости от положения «козырька» в системе $TE_{0,4} + TE_{0,5}$, показанной на рис. 6 б (сплошные кривые), и в системе $TE_{0,4} + TE_{0,5} + TE_{0,6}$, представленной на рис. 6 с (штриховые кривые).

3. Заключение

В работе описано моделирование, иллюстрирующее электродинамический метод непрерывной перестройки частоты в гиротронах, основанный на механическом преобразовании азимутально-асимметричного резонатора гиротрона путем вращения различных частей резонатора вокруг общей оси. Основное преимущество метода заключается в том, что он автоматически сохраняет соосность системы и ее осевую однородность за счет ротационного характера преобразования поперечного сечения полости. Для иллюстрации метода рассмотрена симметричная близкая к отсечке волна гиротрона субтерагерцового диапазона частот. CST-моделирование предсказывает возможность достижения полосы перестройки частоты на уровне нескольких

процентов без серьезного искажения поперечной структуры рабочей моды $TE_{0,4}$ вблизи возможного положения электронного пучка.

Работа выполнена при поддержке **гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-10116)**.

Список литературы

1. Nanni E. et al. THz dynamic nuclear polarization NMR // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Т. 1. – С. 145.
2. Golubiatnikov G. Sub-Terahertz High-Sensitivity High-Resolution Molecular Spectroscopy with a Gyrotron // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Т. 10. – №. 5. – С. 502-512.
3. Blank M., Felch K. Millimeter-wave sources for DNP-NMR // *eMagRes*. – 2018. – Т. 7. – №. 4. – С. 155.
4. Denysenkov V. Liquid state DNP using a 260 GHz high power gyrotron // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2010. – Т. 12. – С. 5786.
5. Glyavin M. et al., High-power terahertz sources for spectroscopy and material diagnostics // *Physics-Uspokhi*. – 2016. – Т. 59. – С. 595.
6. Hornstein M. et al. Second harmonic operation at 460 GHz and broadband continuous frequency tuning of a gyrotron oscillator // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2005. – Т. 52. – №. 5. – С. 798-807.
7. Chang T. et al. Frequency tunable gyrotron using backward-wave components // *Journal of Applied Physics*. – 2009. – Т. 105. – №. 6.
8. Torrezan A. et al. Operation of a continuously frequency-tunable second-harmonic CW 330-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2011. – Т. 58. – №. 8. – С. 2777-2783.
9. Dumbrajs O. et al. Tunable coaxial gyrotron for plasma heating and diagnostics // *International Journal of Electronics*. – 1998. – Т. 84. – №. 4. – С. 411-419.
10. Glyavin M. et al. Smooth wideband tuning of the operating frequency of a gyrotron // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2008. – Т. 51. – №. 1. – С. 57-63.
11. Khozin M. et al. Multimirror quasi-cylindrical cavity resonators for frequency-tunable gyrotrons // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2010. – Т. 53. – №. 2. – С. 111-121.
12. Bandurkin I. et al. Mode Selective Azimuthally Asymmetric Cavity for Terahertz Gyrotrons // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2021. – Т. 68. – С. 347.
13. Bandurkin I. et al. Selective Excitation of Symmetric Modes in Gyrotrons with Azimuthally-Asymmetric Cavities // *46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. – 2021. – С. 1-2.