

Частотно-перестраиваемый субтерагерцовый гиротрон с внешним отражателем

И.В. Бандуркин, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов, Е.С. Семёнов

Институт прикладной физики Российской академии наук

Аннотация: в работе описывается концепция субтерагерцового гиротрона, основанного на комбинации низкодобротного нерегулярного резонатора и частотно-перестраиваемого внешнего рефлектора. Моделирование предсказывает возможность создания гиротронов с высоким (20% и выше) КПД в достаточно широкой (~10%) частотной полосе.

Ключевые слова: гиротроны, терагерцовое излучение, перестройка частоты, конкуренция мод

1. Введение

Для ряда спектроскопических приложений требуются малогабаритные источники непрерывного излучения субтерагерцового диапазона частот с относительно высокими (десятки ватт – единицы киловатт) уровнями выходной мощности. Важным требованием к таким источникам является, с одной стороны, узкополосность спектра выходного излучения, а также возможность широкополосной перестройки частоты излучения. [1-5]. Следуя этому требованию, рядом научных групп ведется интенсивная работа по созданию субтерагерцовых гиротронов с относительно широкополосной перестройкой частоты. Основные направления исследований связаны либо с реализацией гиротронов на основе возбуждения относительно низкодобротных колебаний [6-7], либо с реализацией гиротронов с механической регулировкой параметров резонатора. Примером первого подхода является изменение частоты гиротрона при переходе к работе на высоких продольных модах, возбуждающихся в режиме «лампы обратной волны» (ЛОВ). Однако в большинстве экспериментов перестройка частоты невелика и сопровождается падением эффективности электронно-волнового взаимодействия. Механическая перестройка частоты гиротрона, обеспечиваемая изменением конфигурации резонатора, на практике затруднительна из-за высоких требований к точности позиционирования частей резонатора внутри вакуумной зоны. В данной работе развивается идея частотно-перестраиваемых гиротронов с нерегулярными резонаторами [8] и описывается схема реализации частотно-перестраиваемых гиротронов субтерагерцового диапазона частот (рис. 1). Эта схема основана на использовании низкодобротных мод нерегулярного резонатора, избирательное возбуждение которых обеспечивается за счет отражения части выходного сигнала от узкополосного зеркала, расположенного за окном гиротрона (т.е. вне вакуумной зоны). При этом частота возбуждаемой волны определяется частотой отражения зеркала, а перестройка частоты обеспечивается механической регулировкой рабочей частоты отражателя.

2. Концепция гиротрона с внешним зеркалом

В описываемой здесь схеме гиротрона (рис. 1), во-первых, предлагается использовать резонатор с неоднородным профилем, в котором отсутствуют близкие к отсечке моды с высокими дифракционными добротностями. Резонатор должен быть настолько нерегулярным, чтобы рабочий электронный пучок не мог обеспечить начало автоколебаний ни одной из волн системы (по крайней мере, это должно быть в диапазоне рабочих магнитных полей) при отсутствии внешних отражений.

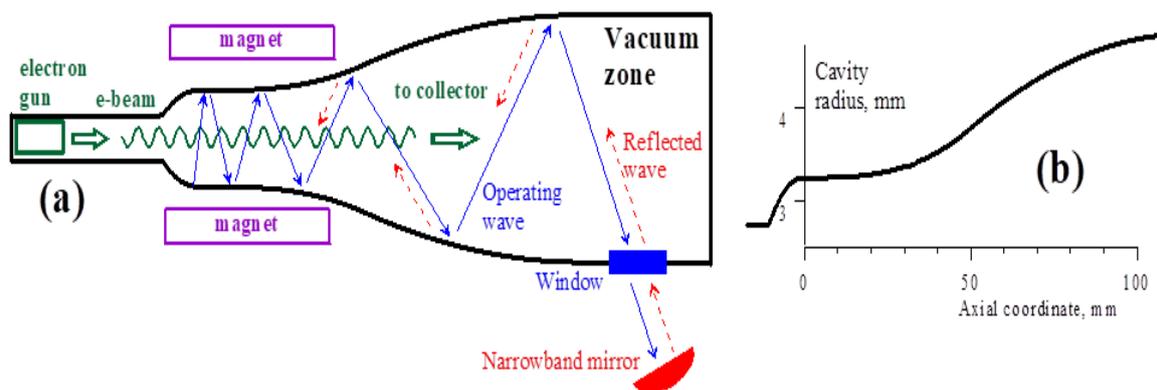


Рисунок 1. (а) Схема гиротрона с перестраиваемыми по частоте зеркалами. (б) Профиль «рабочего» варианта нерегулярного резонатора.

Во-вторых, для обеспечения старта рабочего колебания на заданной частоте и последующего вывода на устойчивый стационарный режим генерации предлагается использовать отражение значительной части выходного волнового сигнала от внешнего узкополосного зеркала. В такой системе перестройка частоты осуществляется изменением собственной частоты зеркала, то есть либо простой заменой одного зеркала другим, либо применением узкополосных зеркал с плавной механической регулировкой частоты отражения.

Идея схемы возникла после анализа экспериментов с непрерывным гиротроном с большой орбитой (ГБО), работающим на третьей циклотронной гармонике на частоте 0,39 ТГц с параметрами рабочего электронного пучка 30 кэВ/0,7 А [5]. В серии экспериментов [3] волновой пучок, сформированный в режиме возбуждения поперечной моды $TE_{3,7}$, подавался в фокусирующую квазиоптическую систему. Для визуализации распределения волнового поля по картине пробоя использовался поток газа, инжектируемый в точку сжатия. В эксперименте по «картине» разряда было видно, что пробой газа происходил в пучностях поля стоячей волны, что объяснялось отражением волны от системы течения газа. Длина волны, измеренная по изображению разряда (около 2,5 мм), соответствовала генерации моды $TE_{1,3}$ на основном циклотронном резонансе. Условия для возбуждения в нерегулярном конусообразном сечении дифракционного выхода излучения. При отсутствии отражения возбуждение таких волн в сечении конуса резонатора было бы невозможно. Этот факт был подтвержден последующим теоретическим анализом и расчетами [3]. Эксперимент и соответствующие расчеты показали, что устойчивая одночастотная генерация сложной волновой структуры нерегулярного резонатора может быть обеспечена за счет отражения части волнового сигнала от отражателя.

3. Моделирование гиротрона с частотно-перестраиваемым зеркалом

Описанный эксперимент использовался в качестве основы для будущего эксперимента по реализации гиротрона на основной циклотронной гармонике с перестройкой частоты. Повторяя параметры эксперимента [3], исследовалось возбуждение поперечной моды $TE_{1,3}$ в диапазоне частот 125-137 ГГц приосевым электронным пучком с энергией 30 кэВ / 0,5 А с питч-фактором 1,4. Упомянутый рабочий диапазон частот выбран в результате моделирования отражений от окна ГБО, на котором будет основываться будущий эксперимент. Коэффициент отражения этого окна имеет близкий к нулю минимум на частоте 130 ГГц и не превышает 10% в диапазоне рабочих частот 125-137 ГГц. Планируется возбудить рабочую волну $TE_{1,3}$ внутри неоднородного резонатора, в котором нет близких к отсечке мод с высокими дифракционными добротностями. Резонатор должен быть сильно нерегулярным,

чтобы электронный пучок не мог обеспечить начало автоколебаний какой-либо волны при отсутствии внешних отражений в рабочем диапазоне магнитного поля (Рис. 1 а). При этом профиль резонатора был оптимизирован с точки зрения обеспечения широкополосной перестройки частоты при обеспечении отражения выходного волнового сигнала.

Рисунок 1 б иллюстрирует «рабочий» вариант нерегулярного резонатора, выбранный в процессе моделирования. Расчеты основаны на использовании квазистационарной одночастотной версии числового кода «Angel» [9], который успешно применялся при моделировании различных гиротронов [10]. В расчетах омические потери рабочей моды $TE_{1,3}$ описываются омической добротностью 8000. Учитывается также разброс 35% по поперечной скорости, присутствующий в электронном пучке исследуемого ГБО, а также смещение в ведущих центрах электронов на 0,1 мм (этот фактор несколько снижает электронно-волновую связь). На рисунке 2 б показаны различные зависимости «стартовый ток от частоты волны», реализующиеся при разных магнитных полях в случае, когда $R=75\%$ мощности выходной волны отражается обратно в резонатор. Отметим, что при магнитных полях из рабочего диапазона $B=4,59-4,64$ Тл используется резонансный режим возбуждения рабочих волн типа ЛБВ. Это отличается от случая отсутствия внешних отражений, когда важнейшая самовозбуждающаяся волна возбуждается в гиротронном режиме электронно-волнового взаимодействия. Как видно из Рис. 3 б, при рабочем токе 0,5 А, варьируя рабочее магнитное поле, можно изменять рабочую частоту в диапазоне 125-137 ГГц.

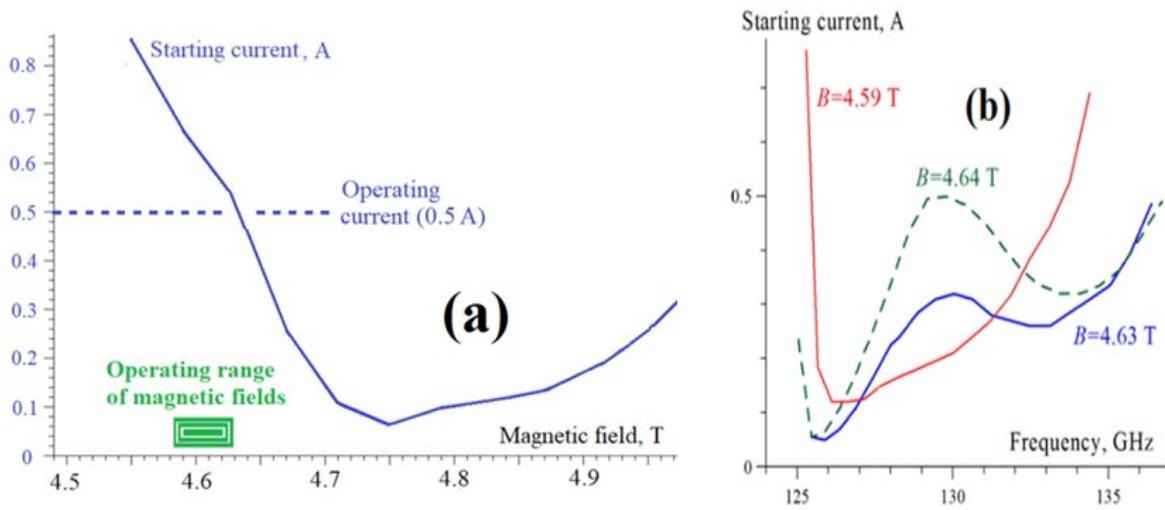


Рисунок 2. (а) Гиротрон без отражения выходного сигнала. Стартовые токи возбуждаемых волн в зависимости от магнитного поля. Показана также область рабочих полей для гиротрона с отражениями. (б) Гиротрон с коэффициентом отражения 75% выходного сигнала. Стартовые токи возбуждаемых волн в зависимости от их частот при разных магнитных полях.

На рис. 3 представлены зависимости электронного и выходного волнового КПД в стационарном режиме от частоты возбуждаемой волны при оптимальных значениях рабочего магнитного поля и коэффициента отражения по мощности. Мы видим, что типичные коэффициенты отражения, необходимые для обеспечения оптимальных режимов электронно-волнового взаимодействия, составляют 50-70%. Расчеты предсказывают генерацию с волновым КПД 40-10% в полосе частот порядка 10%. Для электронного пучка 0,5 А/30 кэВ это соответствует мощности 2-6 кВт в режиме непрерывной генерации. Омические потери составляют ~20% в высокоэффективном диапазоне частот (~125 ГГц) и увеличиваются до ~40% в низкоэффективном диапазоне частот (~135 ГГц) из-за необходимости большего коэффициента отражения. для

обеспечения генерации в этом диапазоне частот.

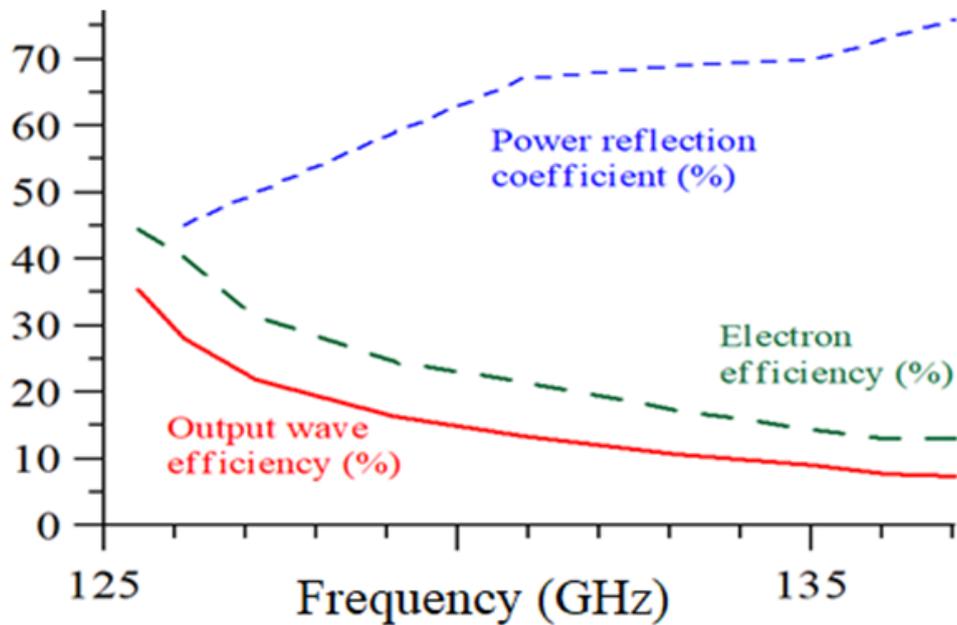


Рисунок 3. Электронный и волновой КПД в устойчивом режиме генерации гиротрона в зависимости от частоты возбуждаемой волны при оптимальных значения магнитного поля, а также соответствующий этим режимам коэффициент отражения по мощности.

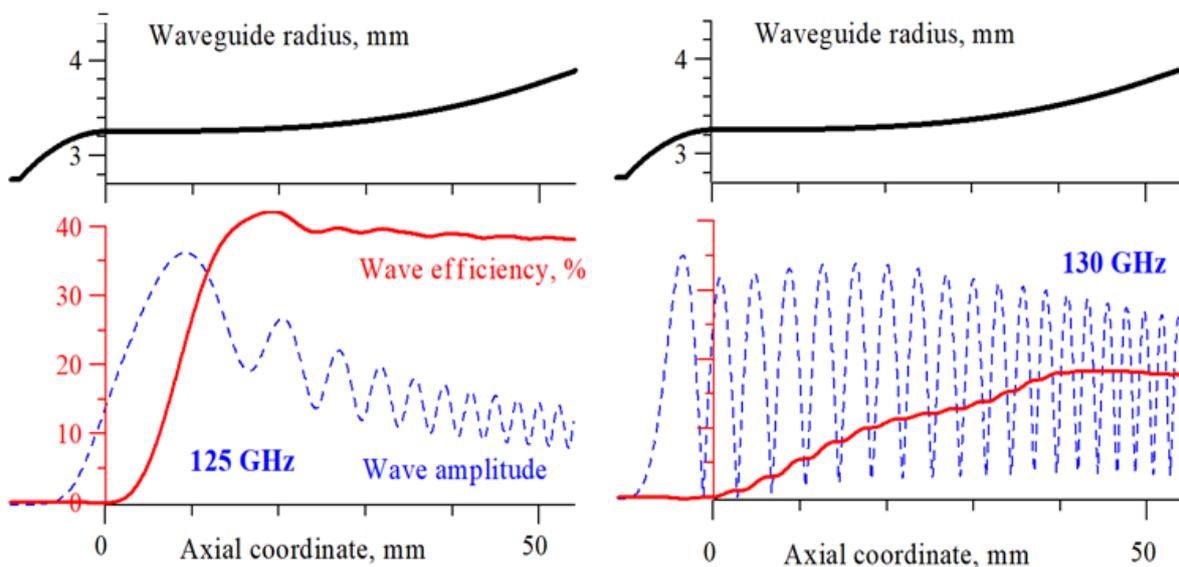


Рисунок 4. Продольные структуры волн, возбуждаемых на двух различных частотах, а также электронный КПД в зависимости от продольной координаты.

Расчетные продольные структуры волн, возбуждаемых на разных частотах, и зависимости волновых выходов от продольной координаты показаны на рис. 4. Если частота волны близка к частоте отсечки (≈ 125 ГГц) самой узкой части резонатора, то имеем близкий к гиротронному режиму электронно-волнового взаимодействия, происходящий во входной части резонатора, то есть электроны взаимодействуют в основном с первой вариацией сложной структуры волны, возбуждаемой внутри нерегулярного резонатора с монотонно увеличивающимся радиусом. Увеличение частоты генерации приводит к постепенному переходу от гиротронного взаимодействия электронов с первой вариацией многовариантной структуры волны к ЛБВ-взаимодействию электронного пучка с несколькими вариациями волновой

структуры. По мере удаления частоты волны от отсечки в процессе взаимодействия вовлекается все более протяженный участок резонатора.

3. Заключение

Согласно представленному моделированию, существует возможность реализации непрерывного субтерагерцового гиротрона, обеспечивающего уровень мощности 2-6 кВт с эффективностью выходной волны 10-40% в полосе непрерывной перестройки частоты порядка 10%. В то же время даже для конкретной системы, описанной в работе, некоторые вопросы остаются открытыми. Например, все описанные расчеты выполнены в рамках стационарного одночастотного подхода. Фактически используется модель бесконечно узкой полосы частот внешнего зеркала. Поэтому не исследуется проблема конкуренции различных продольных мод, существующих в длинной нерегулярной системе. Для рассмотрения проблемы требуется разработка подхода, описывающего многочастотную пространственно-временную динамику гиротрона с нефиксированной аксиальной волновой структурой и удаленным отражателем с узкой полосой частот. Такая теория должна дать ответ на вопрос, насколько узкая полоса частот внешних отражателей необходима для обеспечения устойчивой одночастотной генерации во всей полосе частотной перестройки.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00490)**.

Список литературы

1. Nanni E. et. al. THz dynamic nuclear polarization NMR // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Т. 1. – №. 1. – С. 145.
2. Golubiatnikov G. et. al. Sub-Terahertz High-Sensitivity High-Resolution Molecular Spectroscopy with a Gyrotron // *IEEE Transactions on THz Science and Technology*. – 2020. – Т. 10. – №. 5. – С. 502-512.
3. Guznov Yu. et al. Spurious Fundamental-Harmonic Oscillations in the Horn Section of a High-Harmonic Gyrotron // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2021. – Т. 69. – №. 1. – С. 325.
4. V.L. Bratman et al. Frequency tuning in a subterahertz gyrotron with a variable cavity // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2014. – Т. 61. – №. 10. – С. 3529-3533.
5. Kalynov Yu. et. al. Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic // *Applied Physics Letters*. – 2019. – Т. 114. – С. 213502.
6. Chang T. et. al. Frequency tunable gyrotron using backward-wave components // *Journal of Applied Physics*. – 2009. – Т. 105. – С. 063304.
7. Bratman V. Possibilities for Continuous Frequency Tuning in Terahertz Gyrotrons with Nontunable Electrodynamic Systems // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2016. – Т. 58. – №. 9. – С. 660-672.
8. Братман В. и др. Перестройка частоты в гиromонотроне с электродинамической системой в виде конического волновода // *Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника*. – 1976. – № 11. – С. 33-45.
9. Semenov E. et. al. Methods for Simulation the Nonlinear Dynamics of Gyrotrons // *Communications in Computer and Information Science*. – 2021. – Т. 1413. – С. 49–62.
10. Kalynov Yu. et. al. Parasitic excitation of fundamental-cyclotron-harmonic waves in high-harmonic gyrotrons // *Physics of Plasmas*. – 2021. – Т. 28. – С. 113105.