

Концепция частотно-перестраиваемого субтерагерцового гиротрона с внешним отражателем

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

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: мы описываем концепцию коротковолнового гиротрона, основанного на комбинации двух элементов: нерегулярного резонатора с низкой добротностью и частотно-перестраиваемого внешнего зеркала, расположенного за выходным окном, то есть за пределами вакуумной зоны. Моделирование предсказывает возможность создания субтерагерцовых гиротронов с высокой (20% и выше) эффективностью электронно-волнового взаимодействия в широкой (~10%) частотной полосе.

Ключевые слова: терагерцовое циклотронное излучение, электронный циклотронный мазер

1. Введение

Для многочисленных спектроскопических приложений требуются компактные и относительно недорогие источники непрерывного излучения суб-терагерцового (сотни ГГц) частотного диапазона с относительно высокой (десятки Ватт – единицы киловатт) мощностью. Важным (с точки зрения спектроскопии) требованием к таким источникам является, с одной стороны, узкополосность спектра выходного излучения, а с другой стороны – возможность широкополосной перестройки частоты генерации. По совокупности ключевых характеристик (частота, мощность, компактность, непрерывность, узкополосность) субтерагерцовые гиротроны являются наиболее привлекательными источниками для таких приложений. Однако важным недостатком гиротронов, реализованных по традиционным схемам, является то, что использование в этих генераторах селективного циклотронного возбуждения электронами высокодобротных квазикритических мод открытых резонаторов существенно ограничивает возможности перестройки частоты. Характерные величины добротностей рабочих мод традиционных гиротронов соответствуют частотной полосе на уровне долей процента. Такой полосы бывает достаточно для точной подстройки под какую-либо полосу спектра исследуемого материала. Однако для спектроскопии идеально было бы иметь источник, обеспечивающий сочетание стабильности (узкополосности) генерируемого сигнала с возможностью его плавной перестройки в частотной полосе шириной хотя бы несколько процентов, что дало бы возможность получение спектральной картины в относительно широкой полосе.

В данной работе описывается схема реализации частотно-перестраиваемых гиротронов субтерагерцового частотного диапазона. Предлагается отказаться от традиционной схемы работы гиротронов, основанной на возбуждении высокодобротных квазикритических мод регулярных резонаторов. Вместо этого предлагается работать на далеких от отсечки низкодобротных продольных модах нерегулярного резонатора, селективное возбуждение которых электронным пучком обеспечивается только за счет отражения части выходного сигнала от расположенного за окном гиротрона (то есть вне зоны вакуума) узкополосного зеркала. Фактически, предлагается реализовать схему «резонансной лампы бегущей волны», в которой селективность и перестройка частоты осуществляется за счет (1) использования сменных или перестраиваемых внешних узкополосных рефлекторов и (2) отсутствия в нерегулярной электродинамической системе высокодобротных квазикритических гиротронных мод, которые могли бы возбудиться без внешнего отражения.

Использование нерегулярного резонатора с оптимизированным профилем обеспечивает возможность высокоэффективного возбуждения электронным пучком широкого спектра разных продольных мод системы. При этом частота возбуждаемой моды «диктуется» частотой отражения внешнего рефлектора, а перестройка частоты генерации обеспечивается механической перестройкой рабочей частоты рефлектора.

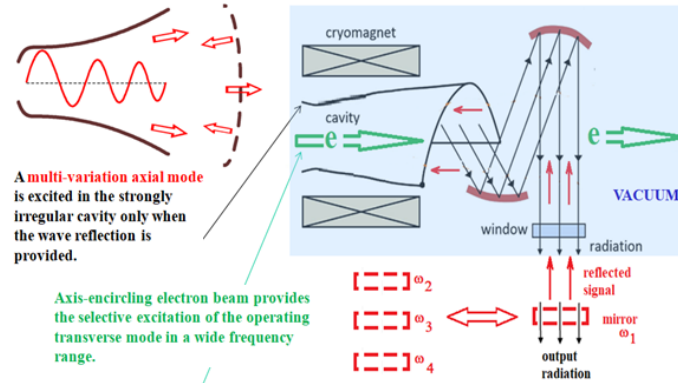


Рисунок 1. Иллюстрация схемы гиротрона с частотно-перестраиваемыми зеркалами.

2. Предварительный эксперимент

Идея схемы реализации частотно-перестраиваемого гиротрона возникла после анализа результатов экспериментов с непрерывным гиротроном с большой электронной орбитой (ГБО), работающим не третьей циклотронной гармонике на частоте 0,39 ТГц при параметрах рабочего электронного пучка 30 кэВ/0,7 А [1,2].

В очередной серии экспериментов [3] волновой пучок, сформированный в режиме возбуждения моды $TE_{3,7}$ резонатора круглого поперечного сечения, подавался в фокусирующую квазиоптическую систему. Для визуализации распределения волнового поля с помощью картины пробоя использовался поток газа, нагнетаемый в точку сжатия. В эксперименте разряд был получен, однако по «картинке» этого разряда было видно, что пробоем газа произошел в пучностях электрического поля стоячей волны (рис. 2), что объяснялось отражением излучения от системы ввода газового потока. В режимах наиболее яркого разряда измеренная по снимку разряда длина волны (около 2.5 мм) оказалась близка длине волны (2.28 мм, частота 132 ГГц) соответствующей генерации на 1-й циклотронной гармонике. Наиболее близкой к рабочей моде $TE_{3,7}$ среди мод спектра резонатора возбуждаемых приосевым электронным пучком на 1-й гармонике является мода $TE_{1,3}$. Этой моде в рабочем магнитном поле около 5 Тл на длине волны 2.28 мм соответствует радиус отсечки 3.1 мм. Это означает, что при проведении эксперимента условия для возбуждения моды $TE_{1,3}$ были обеспечены не в рабочем резонаторе (радиус которого был менее 3 мм), а в его выходной нерегулярной секции дифракционного вывода излучения.

Этот факт был подтвержден последующим теоретическим анализом и расчетами, которые показали, что в отсутствие отражения сложная многовариационная волна выходной секции резонатора не может возбудиться. При этом, однако, в присутствии отражений она возбуждается с достаточно высокой эффективностью (десятки процентов) даже в том случае, когда возбуждение этой волны в выходной секции резонатора осуществляется электронным пучком, который взаимодействовал с рабочей волной в регулярной секции резонатора и, соответственно, обладает достаточно большим скоростным и энергетическим разбросом.

Итак, данный эксперимент вместе с соответствующими расчетами показал, что
 - стабильная одночастотная генерация сложной волновой структуры нерегулярного резонатора может быть обеспечена даже за счет отражения части сигнала от широкополосного рефлектора,

- расчеты показывают, что при разных условиях (рабочих магнитных полях и частотах отражателя) на разных участках нерегулярного резонатора могут возбуждаться волны на разных частотах,

- эффективность генерации таких волн может быть весьма высока (десятки процентов) даже в условиях описанного выше эксперимента, когда профиль конусной секции резонатора не был оптимизирован с точки зрения использования его в качестве излучающей системы, а электронный пучок приобретал дополнительный скоростной и энергетический разброс в результате возбуждения рабочей волны в регулярной секции резонатора.

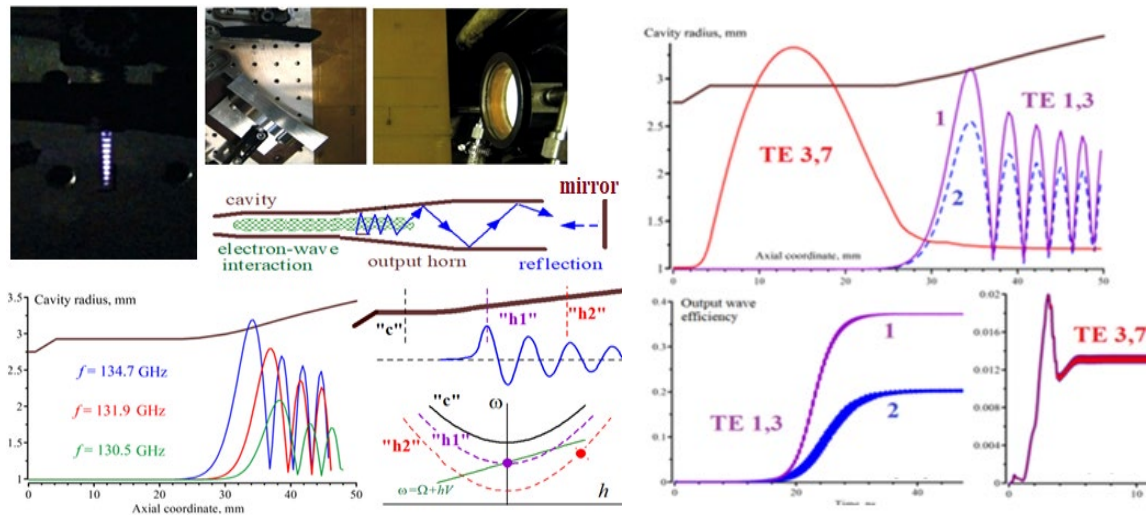


Рисунок 2. Эксперимент, в котором наблюдалось возбуждение волны на первой циклотронной гармонике в выходной конусной секции резонатора. Фото пробоя в области внешнего отражателя. Дисперсионные характеристики возбуждаемой поперечной моды в регулярной и конусной частях резонатора, а также расчетные структуры волн, возбуждаемых на различных частотах. Результаты двухволнового моделирования: рассчитанные продольные структуры волн на третьей и первой гармониках (моды TE 3,7 и TE 1,3), а также измеренные в электронном КПД мощности излучения двух волн как функции времени.

3. Расчеты частотно-перестраиваемого гиротрона

Опираясь на эти экспериментальные результаты, мы предлагаем схему частотно-перестраиваемого ГБО с нерегулярным резонатором и внешним отражателем (рис. 1). Ее идея основана на следующих принципах. Во-первых, предлагается использование резонатора с неоднородным (по продольной координате) профилем, в котором, в отличие от традиционного регулярного гиротронного резонатора, отсутствуют высокодобротные квазикритические моды с высокими дифракционными добротностями. Резонатор должен быть столь нерегулярен, что в отсутствие внешних отражений рабочий электронный пучок не мог бы обеспечить старт автоколебаний ни одной из волн системы.

Во-вторых, для обеспечения старта рабочего колебания на заданной частоте и последующего выхода на устойчивый стационарный режим генерации предполагается использовать отражение значительной части выходного сигнала гиротрона от внешнего (расположенного за окном гиротрона, т.е. вне зоны вакуума) узкополосного зеркала. Таким образом, рабочая частота возбуждаемых в такой системе колебаний «диктуется» частотой отражения внешнего зеркала. В такой системе перестройка частоты осуществляется изменением собственной частоты внешнего отражателя – то есть или простой заменой одного зеркала другим (как это изображено на рис.1), или же путем использования узкополосных зеркал с плавной механической перестройкой частоты отражения. Поскольку зеркало расположено за выходным окном гиротрона,

то есть вне зоны вакуума, любые механические манипуляции с ним не представляют проблемы. Дополнительной подстройкой рабочего магнитного поля гиротрона будет обеспечиваться оптимальный режим электронно-волнового взаимодействия на каждой из рабочих частот. Использование приосевого электронного пучка существенно повышает селективность системы, а также обеспечивает максимум взаимодействия электронов с «правильными» рабочими поперечными модами (азимутальный индекс которых совпадает с номером рабочей циклотронной гармоники) при использовании различных сменных резонаторов.

Рисунок 3 иллюстрирует результаты расчетов такой схемы. Профиль резонатора был оптимизирован с точки зрения обеспечения широкополосности перестройки частоты при возбуждении все той же моды TE_{1,3} на первой циклотронной гармонике на частоте около 135 ГГц. Приведены профиль рабочего резонатора, расчетные продольные структуры волн, возбуждающихся на разных частотах при условии использования узкополосного (т.е. фиксирующего рабочую частоту) зеркала с характерным коэффициентом отражения на уровне 50%, а также зависимость КПД электронно-волнового взаимодействия от частоты генерации. Расчеты предсказывают генерацию с электронным КПД на уровне 20-40% в полосе частот порядка 10%. Для электронного пучка 0,7 А / 30 кэВ это соответствует мощности 4-8 кВт в непрерывном режиме генерации. Естественно, в этих расчетах были учтены реальные характеристики используемого в данном ГБО электронного пучка (т.е. скоростной и позиционный разбросы).

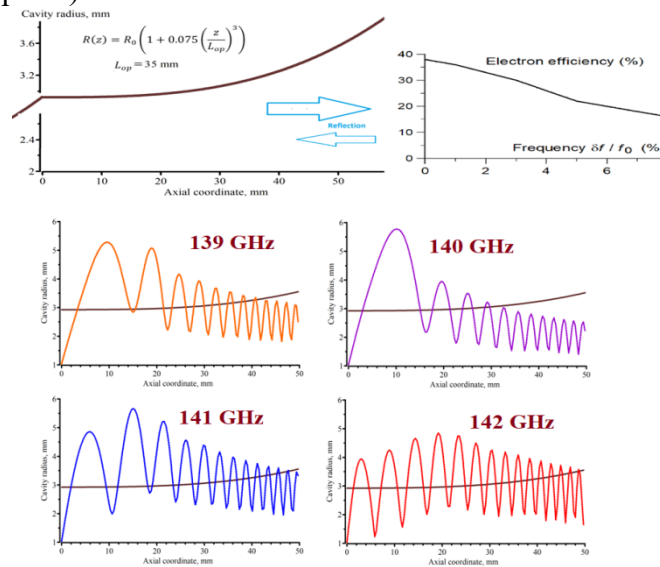


Рисунок 3. Расчеты гиротрона с нерегулярным резонатором и отражением от выходного зеркала. Профиль резонатора, рассчитанные продольные структуры волн, возбуждаемых на разных частотах, а также зависимость КПД электронно-волнового взаимодействия (идет отсчет от частоты f_0 , соответствующей частоте отсечки в самой узкой области резонатора).

Отдельной проблемой является создание внешних рефлекторов, которые должны обладать следующими свойствами:

- работа в субтерагерцовом частотном режиме (около 130 ГГц в гиротроне на основном циклотронном резонансе и 260 ГГц на второй циклотронной гармонике),
- плавная перестройка частоты отражения в полосе порядка 10%
- узкая (менее 1 %) частотная полоса при работе на заданной частоте.

В качестве одного из примеров решения этой задачи рисунок, приведенный ниже, иллюстрирует отражатель на основе брегговской структуры (гофрированной поверхности). При заданном периоде гофрировки, частоте, на которой эта гофрировка обеспечивает связь между падающей волной и волной, отражаемой назад (в

антизеркальном направлении), определяется углом падения волны на поверхность. В рассмотренном на рисунке ниже примере углу падения 45 градусов соответствует частота 135 ГГц, при этом изменение угла падения в пределах 42-48 градусов соответствует перестройке частоты отражателя в полосе более 10% без заметных изменений коэффициента отражения. При этом, при фиксированном угле падения (и, соответственно, центре частотной полосы отражения рефлектора) ширина этой полосы составляет не более 1%.

В качестве другого подхода предполагается исследовать возможность использования в гиротроне схемы сложного брегговского рефлектора, описанного в работе [4]. Он представляет собой планарную систему (планарный волновод, образованный двумя гофрированными металлическими плоскостями), основанную на сложном трехволновом процессе брегговского отражения (бегущая падающая волна → квазикритическая волна → бегущая отраженная волна). Как показано в упомянутой выше работе, узкополосный рефлектор такого типа может работать в субтерагерцовом частотном диапазоне. При этом плавная перестройка его частоты обеспечивается путем изменения расстояния между формирующими этот рефлектор металлическими плоскостями.

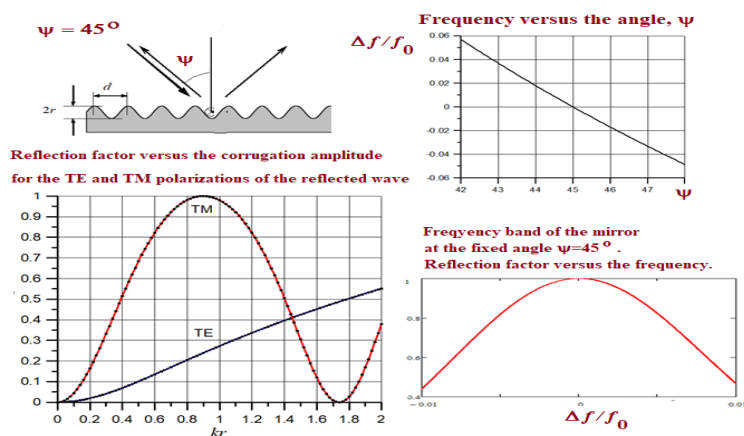


Рисунок 4. Геометрия отражателя брегговского типа, Зависимость коэффициента отражения для волн TE и TM поляризации от размера гофрировки при падении волны под углом 45 градусов, изменение рабочей частоты рефлектора при изменении угла падения волны, частотная полоса рефлектора при фиксированном угле падения волны

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

Список литературы

1. Bandurkin, I.V., Bratman, V.L., Kalynov, Y.K., Osharin, I.V., Savilov, A.V. Terahertz large-orbit high-harmonic gyrotrons at IAP RAS: recent experiments and new designs // IEEE Trans. Electron Devices. – 2018. – Т. 65. – С. 2287.
2. Kalynov, Yu.K., Manuilov, V.N., Fiks, A.Sh., Zavolskiy, N.A. Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic // App. Phys. Letters. – 2019. – Т. 114. – С. 213502.
3. Guznov Yu.M., Kalynov, Y.K., Osharin, I.V., Savilov, A.V. Competition of Spurious Fundamental-Harmonic Oscillations in the Horn Section of a High-Harmonic Gyrotron // IEEE Trans. Electron Devices. – 2021. – Т. 69. – С. 325.
4. Ginzburg, N.S., Malkin, A.M., Peskov, N.Y., Sergeev, A.S., Zaslavsky, V.Y., Kamada, K., Soga, Y. Tunable terahertz band planar Bragg reflectors // App. Phys. Letters. – 2009. – Т. 95. – С. 043504.