

Генерация шумоподобных сигналов терагерцового диапазона на основе эффекта умножения частоты в низковольтном гиротроне

Н.С. Гинзбург, М.Ю. Глявин, И.В. Зотова, А.М. Малкин, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: Исследована возможность генерации шумоподобного излучения терагерцового диапазона в гиротронах в режиме умножения частоты. Показано, что при типичных для высокочастотных гиротронов значениях рабочего тока пучка необходимый уровень надкритичности может быть достигнут при снижении энергии электронов. На примере гиротрона диапазона 0.25 ТГц в моделировании продемонстрировано, что в режиме умножения частоты излучение с шириной спектра более 20 ГГц может быть получено на удвоенной частоте в диапазоне 0.5 ТГц.

Ключевые слова: гиротрон, терагерцовое излучение, шумоподобные сигналы

1. Введение

Гиротроны, основанные на преобразовании в излучение энергии винтового электронного потока, играют значительную роль в физике и технике терагерцового диапазона [1]. В том числе, представляет интерес исследование возможности генерации с их помощью высокочастотного шумоподобного излучения для таких задач как некогерентная томография [2], контроль качества пищевой продукции [3], спектроскопические приложения [4]. Недавние исследования показали, что в условиях большого превышения рабочего тока над стартовым значением (большой надкритичности) в гиротронах могут быть реализованы режимы генерации шумоподобного излучения с относительной шириной спектра до 10% [5]. Задача создания источника шумоподобного излучения терагерцового диапазона может быть упрощена, если использовать взаимодействие на гармониках гирочастоты. Это позволяет уменьшить рабочее значение магнитного поля пропорционально номеру гармоники. Еще одним шагом на пути упрощения задачи может быть отказ от условия селективного возбуждения, т.е. допущение возможности одновременной генерации на основной и более высоких циклотронных гармониках в режиме умножения частоты [6]. Недостатком указанного эффекта, обусловленного нелинейными свойствами электронного пучка, является низкий коэффициент нелинейной трансформации. Тем не менее, указанный эффект неоднократно наблюдался экспериментально. В частности, в недавних экспериментальных исследованиях гиротрона диапазона 0.26 ТГц было зарегистрировано излучение на второй гармонике в диапазоне 0.52 ТГц с уровнем мощности 10-20 мВт, что составляет около 10^{-3} относительно мощности на основном циклотронном резонансе [7]. Следует отметить, что указанный уровень мощности

Данная работа посвящена анализу возможности получения широкополосного шумоподобного излучения терагерцового диапазона в гиротронах в режиме умножения частоты. Поскольку, как правило, значения рабочих токов в высокочастотных гиротронах невелики (менее 1 А), необходимое для перехода к режимам шумоподобной генерации значение надкритичности может быть достигнуто за счет снижения энергии электронов до нескольких электрон-вольт. Следует отметить, что принципиальным условием для работы гиротронов является

релятивистская зависимость гирочастоты от энергии частиц. Тем не менее, ранее [8,9] была продемонстрирована (в том числе, в экспериментах) возможность стационарных режимов генерации в подобных условиях, когда энергия частиц близка к энергии покоя. Далее на основе численного моделирования продемонстрировано, что в подобных условиях возможен переход к генерации шумоподобного излучения, в том числе, при возбуждении на второй циклотронной гармонике в режиме умножения частоты.

2. Расчет генерации шумоподобного излучения в режиме умножения частоты

Для генерации шумоподобных сигналов в гиротронах необходимо значительное увеличение параметра тока, который для дальнейших рассуждений удобно записать в следующем виде:

$$I_0 = 16 \frac{e|I|}{mc^3} \cdot G \cdot \frac{\gamma_0^2}{g^6} \cdot \left(\frac{I + g^2}{\gamma_0^2 - I} \right)^{5/2} \quad (1)$$

где I – ток электронного пучка, m, e – масса покоя и заряд электрона, c – скорость света, G – фактор связи пучка с рабочей модой [10], γ_0 – релятивистский масс-фактор, g – отношение поперечной и продольной скоростей электронов в пучке (питч-фактор). Принимая далее значение питч-фактора $g = 1$, что является типичным для высокочастотных гиротронов средней мощности, можно записать

$$I_0 = 16 \frac{e|I|}{mc^3} \cdot G \cdot \left(\frac{2\gamma_0^{4/5}}{\gamma_0^2 - I} \right)^{5/2} = 16 \frac{e|I|}{mc^3} \cdot G \cdot F(\gamma_0) \quad (2)$$

Из (2) следует, что параметр тока I_0 может быть увеличен тремя способами: 1) за счет тока винтового электронного пучка $|I|$; 2) за счет коэффициента связи G электронного пучка с рабочей волной; 3) за счет изменения энергии электронов и нарастания значения множителя $F(\gamma_0)$. Первый способ требует разработки достаточно сложных электронно-оптических систем. Например, для реализации большой надкритичности в гиротроне диапазона 0.5 ТГц с рабочей модой $TE_{5,1}$ требуется формирование винтового электронного пучка с током 50 А и энергией 30 кэВ [11]. В свою очередь, увеличение коэффициента связи G может быть достигнуто за счет снижения индекса рабочей моды, например, при переходе к взаимодействию с низшей модой $TE_{1,1}$. Здесь, однако, при повышении частоты возникает серьезное технологическое препятствие, поскольку даже при минимально реализуемом диаметре резонатора ~ 1 мм рабочая частота при возбуждении моды TE_{11} не превышает 170 ГГц. Вместе с тем, расчеты показывают, что параметр тока I_0 достаточно быстро увеличивается по мере уменьшения энергии электронов. К примеру, для параметров гиротрона с энергией электронов 3 кэВ и током 0.2 А, реализованного в работе [9], его значение достигает величины $I_0 \approx 2$, что, как показывает дальнейшее моделирование, вполне достаточно для генерации широкополосных шумоподобных сигналов.

Моделирование выполнялось на основе усредненных многомодовых уравнений с нефиксированной продольной структурой поля [11]. В указанной модели, в отличие от использованных ранее [10], учитывается конечное время пролета электрона через пространство взаимодействия. Это одновременно позволяет принять во внимание реальный наклон дисперсионной характеристики пучка относительно рабочей моды, а следовательно, и режимы двойного пересечения на НЧ и ВЧ резонансах. В ранее использованных моделях, время пролета считалось бесконечно малым, что соответствует вертикальной дисперсионной характеристике электронного пучка с единственным пересечением с рабочей модой.

В моделировании предполагалось, что винтовой электронный пучок с энергией 3 кэВ, током 0.2 А и питч-фактором 1.0 возбуждает на первой циклотронной гармонике моду $TE_{5,2}$ с рабочей частотой 0.25 ТГц. При этом, вследствие нелинейности электронно-волнового взаимодействия, в электронном пучке возникает вторая гармоника тока, которая обеспечивает излучение на удвоенной частоте в диапазоне 0.5 ТГц. Эффективное умножение частоты имеет место при выполнении соотношения $m_2 = 2m_1$, где $m_{1,2}$ - азимутальные индексы мод на первой и второй гармониках, и асимптотического условия кратности критических частот $f_c^2 = 2f_c^1$ [6]. В наилучшей степени этим условиям соответствует мода $TE_{10,3}$.

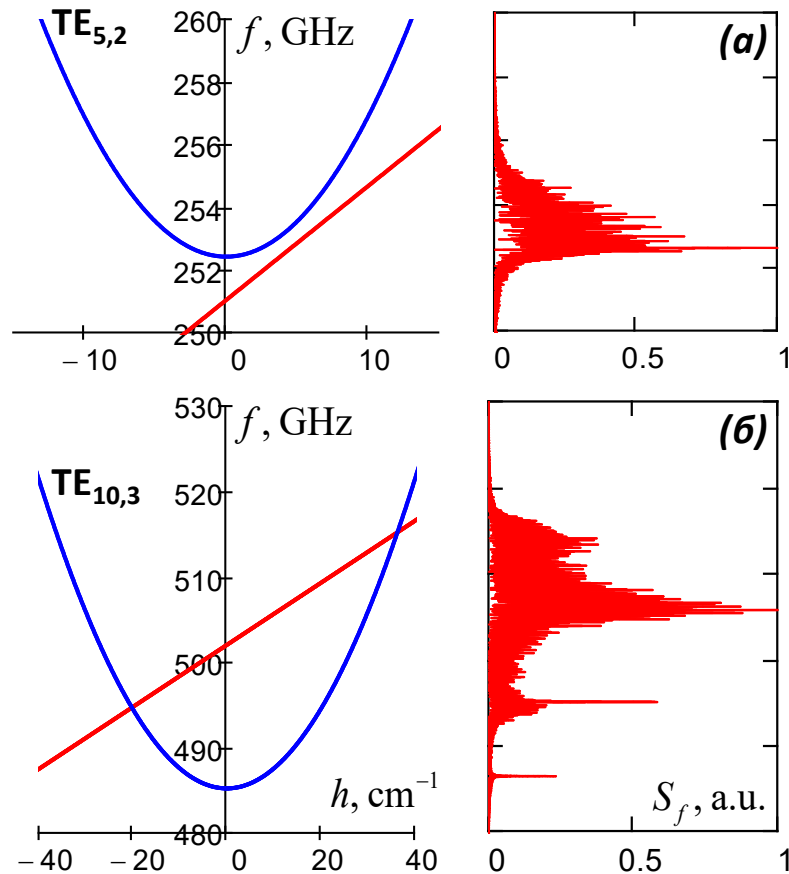


Рисунок 1. Дисперсионные диаграммы и спектр выходного излучения при взаимодействии на первой (а) и второй (б) гармониках гирочастоты.

Моделирование показывает, что при величине магнитного поля около 9 Тл в системе возбуждаются шумоподобные колебания на моде $TE_{5,2}$ в диапазоне 0.25 ТГц с шириной спектра около 3 ГГц и средней мощностью 20 Вт (Рис.1а). Одновременно на моде $TE_{10,3}$ в диапазоне 0.5 ТГц генерируется шумоподобное излучение с шириной спектра более 20 ГГц и средней мощностью около 0.1 мВт. Интересно отметить, что ширина спектра при этом практически совпадает с разностью частот синхронизма электронного потока с попутной и встречной волнами (Рис.1б) в режиме двойного пересечения дисперсионных характеристик пучка и рабочей моды.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность генерации широкополосного шумоподобного излучения терагерцового диапазона на основе

эффекта умножения частоты в гиротроне. Учитывая, что в настоящее время значения частоты генерации гиротронов на первой циклотронной гармонике достигают в непрерывном режиме 0.4 ТГц, данный подход может быть использован для создания шумовых источников в диапазоне до 0.8 ТГц.

Исследование выполнено в рамках государственного задания (договор № 0035-2021-0001) и при поддержке РФФИ (грант № 21-58-53051 ГФЕН_а).

Список литературы

1. Dhillon S. S. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap // J. Phys. D, Appl. Phys. – 2017. – V. 50. – No. 4. – Art. no. 043001.
2. Isogawa T. et al. Tomographic imaging using photonicallу generated low-coherence terahertz noise sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech. – 2012. – V. 2. – No. 5. – P. 485-492.
3. Takehara D. et al. Dual-polarization imaging with real-time capability using a terahertz noise source for food inspection // 43rd Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya. – 2018. – P. 1-2.
4. Sobakinskaya E. et al. High-resolution terahertz spectroscopy with a noise radiation source based on high-Tc superconductors // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – V. 50. – Art.no. 035305.
5. Розенталь Р.М. и др. Генерация широкополосного хаотического излучения в гиротронах в режиме перекрытия высокочастотного и низкочастотного резонансов // ЖТФ. – 2017. – Т.87. – №10. – С. 1555-1561.
6. Нусинович Г.С. и др. Теоретическое исследование паразитной генерации на гармониках рабочей моды в гиротронах // Радиотехника и электроника. – 1987. – Вып.6. – С. 1274-1280.
7. Glyavin M. et al. Investigation of the frequency double-multiplication effect in a sub-THz gyrotron // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. – 2020. – V.41. – No.10. – P. 1245-1251.
8. Гольденберг А.Л. и др. Технологический гиротрон с низким ускоряющим напряжением // изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2005. – Т.48. – №.10-11. – С. 835-841.
9. Bratman V.L. et al. Operation of a sub-terahertz CW gyrotron with an extremely low voltage // Phys. Plasmas. – 2017. – V. 24. – No. 11. – Art.no. 113105.
10. Nusinovich G.S. Introduction in the physics of gyrotrons. – J. Hopkins Univ. Press, 2004.
11. Rozental R.M. et al. Generation of electromagnetic rogue-waves in submillimeter-band gyrotrons // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. – 2019. – V. 40. – No. 2. – P. 150–157.