

# Гироумножители на критических модах с эффективным возбуждением на выделенных высоких циклотронных гармониках

Г.Г. Денисов, И.В. Зотова, А.М. Малкин, А.С. Сергеев, Р.М. Розенталь, А.П. Фокин,  
В.И. Белоусов, М.Ю. Шмелев, А.В. Чирков, А.И. Цветков, И.В. Бандуркин, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** Предложен, теоретически обоснован и экспериментально протестирован метод эффективного возбуждения выделенных высоких ( $s = 4n + 1$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ ) циклотронных гармоник в гиротронах, работающих в режиме умножения частоты. Метод основан на специфическом свойстве критических частот собственных мод цилиндрических волноводов, стандартно используемых в гиротронах в качестве рабочих электродинамических систем. В проведенных экспериментах впервые продемонстрировано возбуждение на пятой циклотронной гармонике в режиме умножения частоты в стандартной гиротронной конфигурации. Согласно оценкам, мощность высокочастотного излучения на умноженной частоте 225 ГГц составила ~100 мВт, что находится в хорошем соответствии с результатами теоретического анализа. С использованием реализованных гиротронов с рабочими частотами 170-250 ГГц, предложенный метод открывает возможность создания источников мощного (до нескольких ватт) непрерывного излучения в наиболее неосвоенной части терагерцового диапазона 1-2 ТГц.

**Ключевые слова:** гиротрон, умножение частоты, терагерцовое излучение

## 1. Введение

В настоящее время прогресс в освоении терагерцового диапазона методами вакуумной электроники во многом связан с развитием гиротронов – источников высокочастотного излучения, использующих пучки электронов, вращающихся в однородном магнитном поле, и возбуждающих ТЕ-моды цилиндрических слабонеоднородных волноводов на критической частоте. При этом гиротроны с импульсными магнитными полями свыше 30 Тл, работающие на основном циклотронном резонансе, преодолели рубеж в 1 ТГц с рекордным уровнем мощности в несколько киловатт [1]. В то же время, единственным методом повышения частоты непрерывных гиротронов на данный момент является работа на циклотронных гармониках, что обусловлено проблемой формирования постоянных магнитных полей, которые в современных магнитных системах не превышают 10-15 Тл.

Известно, что в гиротронах селективное возбуждение рабочей моды на циклотронной гармонике осложняется сильной конкуренцией со стороны паразитных мод, находящихся в резонансе с электронным пучком на первой гармонике гирочастоты. В результате, в стандартных схемах гиротронов с цилиндрическими поливинтовыми электронными пучками на частотах свыше 0.1 ТГц получена генерация только при использовании второй циклотронной гармоники [2-4]. Непрерывная генерация на третьей циклотронной гармонике с частотой 0.4 ТГц [5] получена в так называемом гиротроне с большой орбитой (ГБО), использующем приосевые электронные пучки.

Альтернативным методом возбуждения гармоник является использование эффекта умножения частоты [6]. В этом случае высокочастотное (ВЧ) излучение

возбуждается как следствие нелинейного взаимодействия на низкочастотном (НЧ) циклотронном резонансе. В результате электронный пучок группируется на частоте НЧ волны и одновременно на всех ее гармониках, что приводит к одновременному высвечиванию НЧ и ВЧ колебаний. При этом, поскольку на высокой частоте имеет место вынужденное возбуждение резонатора гиротрона заданным током, удается избежать конкуренции с НЧ модами.

Недостатком метода умножения частоты является низкий коэффициент нелинейного преобразования  $K$ , определяемый отношением мощности  $P_s$  на гармонике с номером  $s$  и мощности  $P_1$  на основном циклотронном резонансе  $s = 1$ . Причиной этого, помимо того, что эффективность взаимодействия в принципе снижается с ростом номера гармоники, являются условия, определяющие принцип отбора рабочих мод. Во-первых, для эффективного умножения электронный пучок должен быть в резонансе вблизи критической частоты с двумя  $TE$  модами, характеризуемыми азимутальными и радиальными индексами  $(m_1, p_1)$  и  $(m_s, p_s)$  на первой и  $s$ -ой гармониках. То есть критические частоты указанных мод  $\omega_c^{BЧ} = v_{m_s, p_s} / R$  и  $\omega_c^{HЧ} = v_{m_1, p_1} / R$  должны быть пропорциональны с коэффициентом  $s$  (здесь  $R$  – радиус рабочего волновода,  $v_{m, p}$  – корень с номером  $p$  уравнения  $J'_m(x) = 0$ ,  $J_m(x), J'_m(x)$  – функция Бесселя порядка  $m$  и ее первая производная). Вторым необходимым условием является не равная нулю проекция тока пучка, сгруппированного на первой гармонике на поле рабочей моды, возбуждаемой на гармонике. Из теории гиротронов следует, что это выполняется только для мод с пропорциональными азимутальными индексами. То есть правила отбора мод могут быть сформулированы следующим образом [6]:

$$v_{m_s, p_s} \approx s v_{m_1, p_1}, \quad m_s = s m_1 \quad (1)$$

Условия (1) легко удовлетворить, если спектр критических частот является эквидистантным, однако в цилиндрических волноводах это не так, что и обуславливает низкие значения коэффициента конверсии  $K$ . В частности, в последних экспериментах, проведенных совместно группами ИПФ РАН и ИФМ РАН [7], прецизионные измерения мощности на основе циклотронного поглощения в гетероструктурах показали значения  $K$  порядка  $10^{-4}$  и  $10^{-6}$  на второй и третьей гармониках, соответственно. Это позволило сформулировать прогноз для высших гармоник как  $K \approx 10^{-2s}$ . В то же время, как будет показано далее, для гармоник с номерами  $s = 5, 9, 13, \dots$  приведенный закон спада коэффициента  $K$  не работает, и может быть обеспечено более эффективное возбуждение. Указанная возможность обусловлена особенностью спектра мод цилиндрического волновода или, что то же самое, свойством корней производных функций Бесселя, в результате чего условия (1) могут выполняться для определенных пар мод асимптотически с высокой точностью. Представлены теоретическая концепция, моделирование и результаты “proof-of-principle” эксперимента, в котором впервые в гиротроне было зарегистрировано излучение с частотой 0.22 ТГц и мощностью 80-100 мВт на 5-й циклотронной гармонике в непрерывном режиме. В заключении обсуждается возможность предлагаемого метода для получения мощного излучения в «терагерцовом провале».

## 2. Асимптотическая эквидистантность мод цилиндрического волновода для выделенных коэффициентов умножения

Необходимое свойство  $TE$  мод цилиндрического волновода может быть

установлено в рамках асимптотики Дебая для функций Бесселя, справедливой для больших значений азимутальных индексов мод  $m \gg 1$ . Главный член асимптотики может быть записан как

$$J_m(m \sec \Psi) \sim \left( \frac{2}{m\pi \cdot \operatorname{tg} \Psi} \right)^{1/2} \cos \left( m \cdot \operatorname{tg} \Psi - m\Psi - \frac{\pi}{4} \right), \quad (2)$$

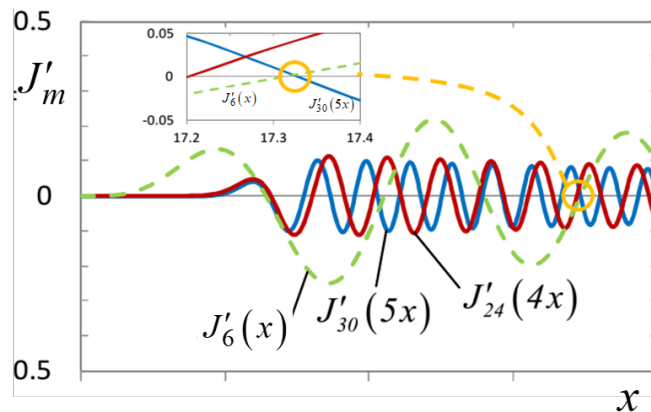
где  $\sin \Psi = \sqrt{1 - m^2/v_{m,p}^2}$ . Соответственно, нули производной функции Бесселя (т.е. корни уравнения  $J'_m(x) = 0$ ) совпадают в данном приближении с корнями уравнения  $\sin(m \cdot \operatorname{tg} \Psi - m\Psi - \pi/4) = 0$ . Отсюда следует  $m \cdot \operatorname{tg} \Psi - m\Psi - \pi/4 = (p-1)\pi$  и, с учетом того, что  $m \sec \Psi = v_{m,p}$ , получаем:

$$v_{m,p} \sin \Psi = m\Psi + \pi \left( p - \frac{3}{4} \right) + O(v_{m,p}^{-1}) \quad (3)$$

Поскольку  $m_s = sm_1$ , из (2) следует условие на радиальные индексы  $p$

$$p_s = sp_1 - 3(s-1)/4, \quad (4)$$

которое приводит к тому, что условия (1) асимптотически удовлетворяются вслед за равенством  $v_{sm_1,p_s} = sv_{m_1,p_1} + O(v_{m_1,p_1}^{-1})$ . Вследствие того, что индекс  $p$  является натуральным числом, из (3) получаем, что  $s-1$  должно быть кратно четырем, т.е.  $s = 5, 9, 13, \dots$ . Отметим, что условие (1) при этом хорошо выполняется для мод с достаточно низкими индексами  $m, p \leq 10$ . Например, Рис. 1 показывает, что точность выполнения (1) для случая  $s = 5$ ,  $m_1 = 6$ ,  $p_1 = 3$  составляет менее, чем 0.2%, т.е.  $(v_{sm_1,p_s} - sv_{m_1,p_1}) / sv_{m_1,p_1} \approx 0.002$ . При этом для возбуждения четвертой гармоники  $s = 4$  указанное соотношение (пересечение красной сплошной и штрихованной линий) существенно больше (см. выноску на Рис. 1).

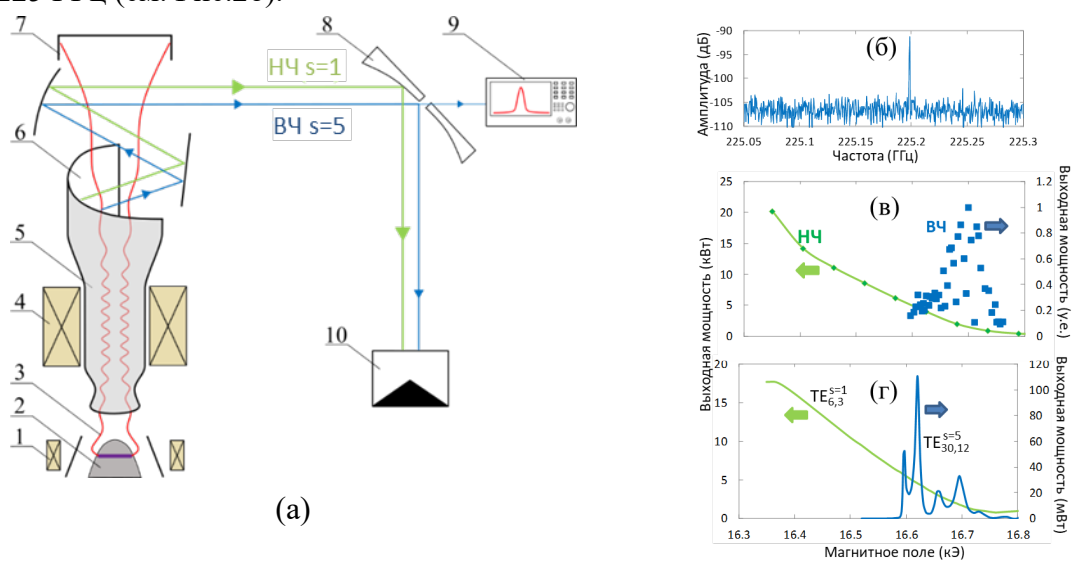


**Рисунок 1.** Демонстрация точности выполнения условия (1) для случая возбуждения на 5-ой циклотронной гармонике:  $s = 5$ ,  $m_1 = 6$ ,  $p_1 = 3$ .

### 3. Эксперимент по возбуждению пятой циклотронной гармоники в режиме умножения непрерывного гиротрона с рабочей частотой 45 ГГц

Полученные соотношения открывают возможность эффективного умножения частоты с возбуждением выделенных высоких циклотронных гармоник, что было

подтверждено в экспериментах по возбуждению 5-ой гармоники гирочастоты на базе непрерывного гиротрона с рабочей частотой на основном циклотронном резонансе 45 ГГц [8]. Указанный гиротрон запитывается винтовым электронным пучком с энергией 25 кэВ и током 2 А, обеспечивая максимальную мощность генерации около 20 кВт. Согласно проведенному анализу, поскольку рабочая мода гиротрона  $TE_{6,3}$ , оптимальной модой для возбуждения пятой гармоники на частоте 225 ГГц является мода  $TE_{30,12}$ . Принципиальная схема экспериментальной установки показана на Рис. 2. Для разделения ВЧ и НЧ компонент излучения использовалось квазиоптическое зеркало (8), обладающее высокими отражающими свойствами на частоте 45 ГГц и частично прозрачное для излучения на пятикратной частоте за счет диагностического отверстия в центре (коэффициент прохождения -43 дБ). После отверстия через прямоугольный волновод связи сигнал подается на детектор спектроанализатора Keysight N9010A. При этом детектируется сигнал только на частоте пятой гармоники 225 ГГц (см. Рис.2б).



**Рисунок 2.** (а) Принципиальная схема экспериментальной установки по возбуждению пятой циклотронной гармоники в гиротроне с рабочей частотой 45 ГГц: (1) – катодной соленоид; (2) – катод; (3) – трубчатый поливинтовой электронный пучок; (4) – основной соленоид, формирующий ведущее магнитное поле; (5) – резонатор гиротрона; (6) – квазиоптический преобразователь; (7) – коллектор; (8) – параболическое зеркало; (9) – спектроанализатор; (10) – калориметр. (б) Показания спектроанализатора. (в) и (г) Экспериментальная и расчетная зависимости мощности на 1-ой и 5-ой гармониках от ведущего магнитного поля.

На основе экспериментальных данных была оценена мощность ВЧ компоненты на пятой циклотронной гармонике. С учетом данных спектроанализатора (Рис.2б), значения коэффициента передачи на зеркале и потерь в волноводном тракте, указанная мощность составила  $\sim 80 \pm 20$  мВт. Указанное значение, а также полученная зависимость от магнитного поля (Рис.2в) хорошо соответствуют результатам теоретического анализа (Рис.2г). Важно, что коэффициент нелинейного преобразования составил  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ , что превосходит ожидаемую величину для 3-ей гармоники гирочастоты.

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования продемонстрировали выделенность возбуждения на 5-ой циклотронной гармонике в стандартной гиротронной конфигурации. Естественно, что для продвижения на этой основе в терагерцовый

диапазон необходимо использовать более высокочастотные гиротроны. Кроме того, при увеличении мощности излучения на основном циклотронном резонансе, мощность излучения на гармониках должна пропорционально увеличиваться. В настоящее время наибольшая мощность в стационарном режиме обеспечивается в гиротронах, предназначенных для плазменных приложений. В том числе ведутся активные работы по созданию непрерывных гиротронов для токамаков нового поколения с рабочими частотами 230-250 ГГц и суб-МВт уровнем мощности. Предварительные расчеты показывают, что с использованием разработанного в ИПФ РАН гиротрона такого типа с рабочей модой  $TE_{19,8}$  [9], мощность излучения на 5-ой циклотронной гармонике (т.е. на частотах вблизи 1.25 ТГц) может составлять несколько ватт. На данный момент подобный уровень мощности в указанном диапазоне может быть обеспечен только лазерами на свободных электронах, которые являются крайне громоздкими и дорогостоящими сооружениями.

Исследование выполнено в рамках **государственного задания №0030-2021-0027** (Программа "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года").

#### Список литературы

1. Glyavin M.Yu. et al. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // *Physical Review Letters*. – 2008. – V. 100. – P. 015101.
2. Idehara T. et al. The Development of 460 GHz gyrotrons for 700 MHz DNP-NMR spectroscopy // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – V. 36. – P. 613-627.
3. Blank M. et al. Development of high-frequency gyrotrons for spectroscopy and plasma heating applications // *45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* – 2020. – P. 1-2.
4. Glyavin M.Yu. et al. A 250-Watts, 0.5-THz continuous-wave second-harmonic gyrotron // *IEEE Electron Device Letters*. – 2021. – V. 42. – P. 1666-1669.
5. Kalynov Yu.K. et al. Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic // *Applied Physics Letters*. – 2019. – V. 114. – P. 213502.
6. Нусинович Г.С., Павельев А.Б. Теоретическое исследование паразитной генерации на гармониках частоты рабочей моды в гиротронах // *Радиотехника и электроника*. – 1987. – т. 114. – №6 – С.1274-1280.
7. Glyavin M.Yu. et al. Investigation of the frequency double-multiplication effect in a sub-THz gyrotron // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2020. – V. 41. – P. 1245-1251.
8. G.G.Denisov, et al. A 45-GHz/20-kW gyrotron-based microwave setup for the fourth-generation ECR ion Sources // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2018. – V. 65. – P. 3963-3969.
9. Denisov G.G. et al. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // *Review of Scientific Instruments*. – 2018. – V. 89. – P. 084702.