

УДК 621.372.8; 621.385.69

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА В РЕЛЯТИВИСТСКОМ ГИРОТРОНЕ В РЕЖИМЕ УМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ

© 2025 г. Член-корреспондент РАН Н. С. Гинзбург^{1, *}, И. В. Зотова¹,
А. Н. Леонтьев^{1, 2}, А. М. Малкин^{1, 2}, Р. М. Розенталь^{1, 2, *}, А. С. Сергеев¹

Поступило 11.09.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принято к публикации 07.10.2024 г.

В рамках усредненного подхода исследован режим умножения частоты в релятивистском гиротроне диапазона 300 ГГц. Показано, что в условиях селективного возбуждения колебаний на моде $TE_{33,2}$ на основной циклотронной гармонике возможна генерация излучения с частотой 1.5 ТГц и мощностью до 1.5 кВт на моде $TE_{165,7}$ с возбуждением пятой гармоники гирочастоты. Выполнено трехмерное моделирование гиротрона методом крупных частиц, на основе которого показано сужение зоны генерации на основной циклотронной гармонике по сравнению с расчетной в рамках упрощенной модели, что приводит к ограничению мощности терагерцового излучения на уровне 200 Вт.

Ключевые слова: релятивистская электроника, гиротроны, терагерцовое излучение

DOI: 10.31857/S2686740025010031, **EDN:** GUNUMI

В настоящее время импульсные гиротроны являются одними из наиболее мощных источников терагерцового излучения. Так, в диапазоне 0.67 ТГц был достигнут уровень мощности в 200 кВт [1, 2], а в диапазоне 1 ТГц — около 1.5 кВт [3, 4]. Однако в силу того, что указанные гиротроны работали на основной гармонике гирочастоты, требуемые значения резонансных магнитных полей составляли величины в десятки тесла. Необходимость создания сильных магнитных полей в достаточно большом объеме является одним из ключевых факторов, ограничивающих продвижение мощных гиротронов в более высокочастотные диапазоны. В этой связи представляет интерес исследование работы гиротронов на циклотронных гармониках. Одной из привлекательных возможностей здесь является использование эффекта умножения частоты, впервые исследованного в работах [5, 6]. Поскольку электронный пучок является нелинейной средой, в нем

под воздействием внешней или сгенерированной самим пучком низкочастотной (НЧ) волны возникают гармоники тока, которые обеспечивают последующее высокочастотное (ВЧ) излучение на гармониках НЧ-излучения. При этом в [7, 8] было показано, что относительно высокая эффективность НЧ–ВЧ-преобразования, характеризуемая отношением мощности излучения на гармонике гирочастоты к мощностью излучения на основной гармонике, может быть получена при работе на пятой циклотронной гармонике. Одновременно, при переходе к релятивистским значениям энергии электронных потоков коэффициент НЧ–ВЧ-преобразования значительно возрастает [9, 10].

В данной работе теоретически исследована возможность умножения частоты с возбуждением пятой циклотронной гармоники в импульсном релятивистском гиротроне диапазона 300 ГГц с рабочей модой $TE_{33,2}$, разработка которого ведется в Институте прикладной физики РАН [11]. Первоначальные расчеты выполнены на основе самосогласованной системы уравнений, описывающих процессы электронно-волнового взаимодействия с учетом начального разброса электронов по поперечным скоростям. На первой гармонике рассматривалось взаимодействие с единственной модой $TE_{33,2}$, а на пятой

¹ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: rrz@ipfran.ru

гармонике — с модой $TE_{165,7}$. Согласно расчетам в диапазоне 1.5 ТГц максимальная мощность излучения может достигать уровня в 1.5 кВт. Для анализа процессов конкуренции мод было выполнено трехмерное моделирование методом крупных частиц. Расчеты показали, что в области максимальных значений мощности на пятой гармонике гирочастоты происходит возбуждение паразитной моды на основной циклотронной гармонике. В результате максимальная мощность на пятой гармонике ограничивается уровнем 200 Вт.

1. РАСЧЕТЫ НА ОСНОВЕ УСРЕДНЕННЫХ УРАВНЕНИЙ

Рассмотрим модель гиротрона в виде отрезка слабонерегулярного цилиндрического волновода радиусом R_0 , в котором винтовой электронный пучок возбуждает несколько ТЕ-мод с номерами $n = 1, 2, 3, \dots$ и значениями азимутального и радиального индексов m_n и q_n , соответственно. Будем полагать, что каждая мода взаимодействует с пучком на s_n -й циклотронной гармонике; при этом частота излучения на заданной моде близка как к критической частоте моды в резонаторе $\bar{\omega}_n^c$, так и к величине $s_n \omega_H^0$, где $\omega_H^0 = eH_0/m_e c \gamma_0$ — гирочастота, H_0 — величина ведущего магнитного поля, γ_0 — релятивистский масс-фактор. Электрическое поле каждой из мод в рабочем пространстве может быть представлено в виде

$$\vec{E}_n = \text{Re} \left(A_n(z, t) \vec{E}_\perp^n(r) \exp \left(i s_n \omega_H^0 t - i m_n \varphi \right) \right), \quad (1)$$

где $A_n(z, t)$ — медленно меняющаяся комплексная амплитуда моды с номером n , функция $\vec{E}_\perp^n(r)$ описывает радиальную структуру моды, φ — азимутальный угол. Электронно-волновое взаимодействие с учетом разброса по скоростям в электронном пучке может быть описано следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} i \frac{\partial^2 a_n}{\partial Z^2} + s_n \frac{\partial a_n}{\partial \tau} + (i \Delta_n + i \delta_n(Z) + \sigma_n) a_n = \\ = i \frac{G_n}{4\pi^2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i(m_n - s_n)\varphi} \alpha(p_0) \int_0^{2\pi} p^s d\theta_0 dp_0 d\varphi}{\int_0^{2\pi} \alpha(p_0) \sqrt{\bar{g}_0^2 + 1 - \bar{g}_0^2 |p_0|^2} dp_0} \times \\ \times \sqrt{g_0^2 + 1 - \bar{g}_0^2 |p_0|^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{\bar{g}_0^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + i p \left(|p|^2 - |p_0|^2 \right) = i \sum a_n \left(p^* \right)^{s_n-1} e^{-i(m_n - s_n)\varphi},$$

где безразмерная амплитуда поля имеет вид

$$a_n = \frac{e A_n J_{m_n - s_n} \left(v_{m_n, q_n} R_b / R_0 \right)}{m c \omega_H^0} \frac{s_n^{s_n} \bar{\beta}_{\perp 0}^{-4}}{2^{s_n-1} s_n! \gamma_0}, \quad (3)$$

безразмерные координата и время записаны в виде

$$Z = \frac{\bar{\beta}_{\perp 0}^2 \omega_H^0}{2 \bar{\beta}_{\parallel 0}} z, \quad \tau = \frac{\bar{\beta}_{\perp 0}^4}{8 \bar{\beta}_{\parallel 0}^2} \omega_H^0 t, \quad (4)$$

$\bar{\beta}_{\perp 0} = \bar{V}_{\perp 0}/c$ и $\bar{\beta}_{\parallel 0} = \bar{V}_{\parallel 0}/c$ — средние значения нормированной поперечной и продольной скорости электронов на входе в область взаимодействия, $g_0 = \bar{\beta}_{\perp 0}/\bar{\beta}_{\parallel 0}$ — соответствующий питч-фактор, нормированный на среднее начальное значение комплексный поперечный импульс имеет вид

$$p = \frac{(p^x + i p^y) e^{-i s_n \omega_H^0 t + i(m_n - 1)\varphi}}{m \bar{V}_{\perp 0} \gamma_0}, \quad (5)$$

$$\Delta_n = \frac{8 \bar{\beta}_{\parallel 0}^2 s_n^2}{\bar{\beta}_{\perp 0}^4} \frac{s_n \omega_H^0 - \bar{\omega}_n^c}{\bar{\omega}_n^c} \quad (6)$$

есть циклотронная расстройка для моды с номером n ,

$$\delta_n(Z) = \frac{8 \bar{\beta}_{\parallel 0}^2 s_n^2}{\bar{\beta}_{\perp 0}^4} \frac{\bar{\omega}_n^c - \omega_n^c(Z)}{\bar{\omega}_n^c} \quad (7)$$

есть геометрическая расстройка, описывающая профиль резонатора $R(z)$, $\omega_n^c(Z) = v_{m_n, q_n} c / R(z)$ — функция, задающая зависимость критической частоты моды с номером n от продольной координаты, параметр возбуждения для пучка с радиусом инжекции R_b и током I_b , записывается в виде

$$\begin{aligned} G_n = 64 \frac{e I_b}{m_e c^3} \frac{\bar{\beta}_{\parallel 0} \bar{\beta}_{\perp 0}^{2(s_n-4)}}{\gamma_0} s_n^3 \left(\frac{s_n^{s_n}}{2^{s_n} s_n!} \right)^2 \times \\ \times \frac{J_{m_n - s_n}^2 \left(v_{m_n, q_n} R_b / R_0 \right)}{\left(v_n^2 - m_n^2 \right) J_{m_n}^2 \left(v_{m_n, q_n} \right)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где v_{m_n, q_n} — корень с номером q_n уравнения $J'_{m_n}(v) = 0$,

$$\sigma_n = 4 \frac{\bar{\beta}_{\parallel 0}^2}{\bar{\beta}_{\perp 0}^4} \frac{s_n^2}{Q_n} \quad (9)$$

есть коэффициент поглощения,

$$Q_n = \frac{R_0}{d_n} \left(1 - \frac{m_n^2}{v_{m_n, q_n}^2} \right) \quad (10)$$

есть омическая добротность для моды с номером n , d_n — соответствующая толщина скин-слоя.

Для учета начального разброса электронов по поперечным скоростям использовалась гауссова функция распределения

$$\alpha(p) = \frac{\sum_{j=-M}^M e^{-j^2\chi} \int_0^{2\pi} p_j^{s_n} d\theta_0}{\sum_{j=-M}^M e^{-j^2\chi} \sqrt{g^2 + 1 - g^2 |p_j^0|^2}}, \quad (11)$$

где целое число M определяет число фракций электронов, равное $2M + 1$, p_j – значение комплексного поперечного импульса для j -й фракции электронов, χ – параметр относительной ширины гауссовой кривой распределения.

Будем считать, что на входе в пространство взаимодействия электроны равномерно распределены по фазам циклотронного вращения

$$p_j(Z=0) = p_j^0 e^{i\theta_0}, \quad \theta_0 \in [0, 2\pi). \quad (12)$$

В свою очередь, $p_j^0 = (I + \varepsilon j) e^{i\theta}$, где ε – параметр абсолютной величины разброса.

С катодного конца пространство взаимодействия ограничено закритическим сужением, так что $a_n(Z=0) = 0$. В то же время на выходе системы в сечении $Z=L$, где L – нормированная длина резонатора, используется излучательное граничное условие [12]:

$$a_n(L, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a_n(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 0. \quad (13)$$

В использованных нормировках мощность излучения каждой из мод в выходном сечении находится по формуле

$$P_n [\kappa Bm] = 511.765 \cdot I [A] \cdot \frac{\gamma_0 \beta_{\perp 0}^2}{G_n} \operatorname{Im} \left(a_n \frac{\partial a_n^*}{\partial Z} \right) \Big|_{Z=L}. \quad (14)$$

Проведем далее численное моделирование электронно-волнового взаимодействия в релятивистском гиротроне диапазона 300 ГГц с рабочей модой $TE_{33,2}$, запитываемом винтовым электронным пучком с энергией 250 кэВ, током 100 А и питч-фактором 1.1 [11]. В данном гиротроне возбуждение колебаний на основной циклотронной гармонике происходит на моде $TE_{33,2}$, соответственно, $s_1 = 1$, $m_1 = 33$, $q_1 = 2$. Известно, что для эффективного умножения частоты с возбуждением циклотронной гармоники с номером s_n необходимо, чтобы азимутальные индексы мод на первой и s_n -й гармониках удовлетворяли соотношению $m_n = s_n m_1$ и чтобы выполнялось условие кратности критических частот $\bar{\omega}_n^c = s_n \bar{\omega}_1^c$ [5, 6]. Для исследуемого гиротрона таким условиям на пятой циклотронной гармонике удовлетворяет мода $TE_{165,7}$, для которой $s_2 = 5$, $m_2 = 165$, $q_2 = 7$.

На рис. 1 показана рассчитанная на основе уравнений (1) зависимость мощности излучения от величины магнитного поля. Значение начального разброса электронов по поперечным скоростям в данном случае выбиралось равным 30%, что соответствует результатам расчетов электронно-оптической системы исследуемого гиротрона. Максимальная мощность излучения на основном циклотронном резонансе достигает 6.5 МВт при магнитном поле около 14.7 Т. При этом в данной точке мощность генерации на пятой циклотронной гармонике на частоте около 1.5 ТГц составляет всего лишь порядка 10 Вт. По мере увеличения магнитного поля мощность генерации на основной гармонике плавно спадает. В свою очередь мощность генерации на пятой гармонике нарастает до уровня около 200 Вт при ведущем магнитном поле 15–15.2 Тл. При дальнейшем увеличении магнитного поля наблюдается резкий рост мощности ВЧ-излучения до уровня 1.5 кВт при величине магнитного поля около 15.4 Тл. Затем мощность излучения на гармонике снижается до уровня 200 Вт.

Существенное увеличение мощности генерации на пятой циклотронной гармонике может быть достигнуто при снижении величины начального разброса электронов по поперечным скоростям. Согласно расчетам, максимальная мощность генерации при разбросе 10% возрастает до уровня 4 кВт (см. рис. 1б, кривая 2).

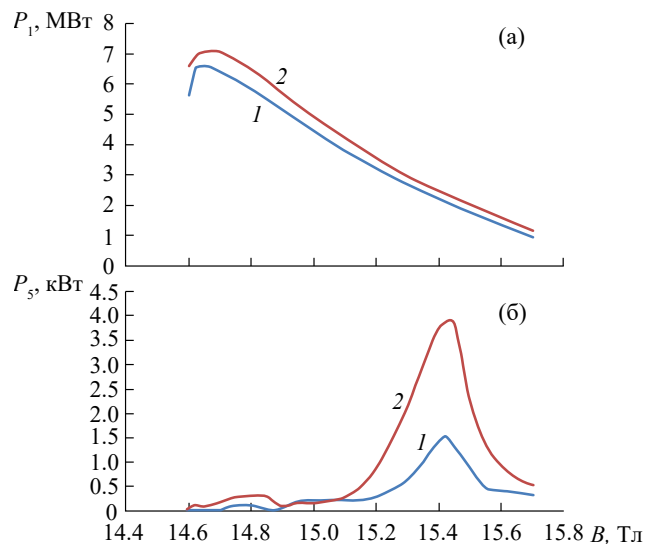


Рис. 1. Зависимость мощности генерации на первой (а) и пятой (б) циклотронных гармониках от величины магнитного поля при разных значениях начального разброса по поперечным скоростям электронов: кривая 1 – разброс 30%, кривая 2 – 10%.

На практике в релятивистских гиротронах подобное улучшение качества пучка может быть достигнуто за счет использования неадиабатических режимов формирования винтового электронного потока [13]. Однако это может потребовать существенного изменения геометрии электродов электронно-оптической системы разрабатываемого гиротрона. Еще одним способом снижения величины разброса может являться установка дополнительной диафрагмы, осуществляющей перехват отраженных от магнитной пробки электронов [14]. При этом, однако, может происходить снижение полного тока электронного пучка.

Следует отметить, что для достижения максимума генерации по мощности терагерцового излучения магнитное поле должно быть более чем на 5% отстроено от оптимального значения, соответствующего максимуму мощности на основной гармонике на частоте ~ 300 ГГц. При этом существует риск возбуждения паразитных колебаний, как это имеет место в гиротронах, работающих на модах с большими значениями индексов [15]. Вместе с тем, очевидно, произойдет резкое снижение уровня мощности на пятой циклотронной гармонике. Таким образом, необходимо провести исследование возбуждения гиротрона с учетом взаимодействия электронного пучка с паразитными модами.

2. РАСЧЕТЫ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО МЕТОДА КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Моделирование процессов конкуренции мод выполнялось с помощью трехмерного PIC-кода KARAT [16]. На рис. 2 показана геометрия пространства взаимодействия и мгновенное

положение макрочастиц. С левой границы в систему инжектировался винтовой электронный пучок с питч-фактором 1.1 и величиной начального разброса по поперечным скоростям около 30%. Магнитное поле задавалось постоянным на протяжении однородного участка резонатора. Далее величина продольной компоненты магнитного поля постепенно уменьшалась, в результате чего электронный пучок осаждался на стенку электродинамической системы. На правой границе расчетной области устанавливался поглощающий слой с переменной проводимостью, коэффициент отражения от которого не превышал 1% по мощности. Электрическая проводимость стенок задавалась равной электрической проводимости меди.

Исследуемый гиротрон разрабатывается на основе ранее реализованного импульсного релятивистского гиротрона диапазона 94 ГГц [17]. В указанном гиротроне использовались импульсы ускоряющего напряжения, экспериментально измеренная форма которых представлена на рис. 3. Видно, что в импульсе присутствует нарастающий фронт длительностью около 1 мкс. Однако на данный момент трехмерное PIC-моделирование динамики гиротронов на таких временах будет занимать очень много реального времени. Например, в работе [18] исследовался гиротрон диапазона 250 ГГц с рабочей модой $TE_{5,2}$, при этом расчет реализации длительностью 100 нс занимал около 80 ч на 20-ядерном компьютере. В работе [19] при исследовании гиротрона диапазона 110 ГГц с рабочей модой $TE_{22,6}$ требовалось 48 ч для расчета одной реализации длительностью 100 нс и компьютерная система с 256 ядрами. В работе [20] исследовался гиротрон диапазона 1.1 ТГц с рабочей модой $TE_{15,6}$. Расчет одной реализации длительностью около 50 нс

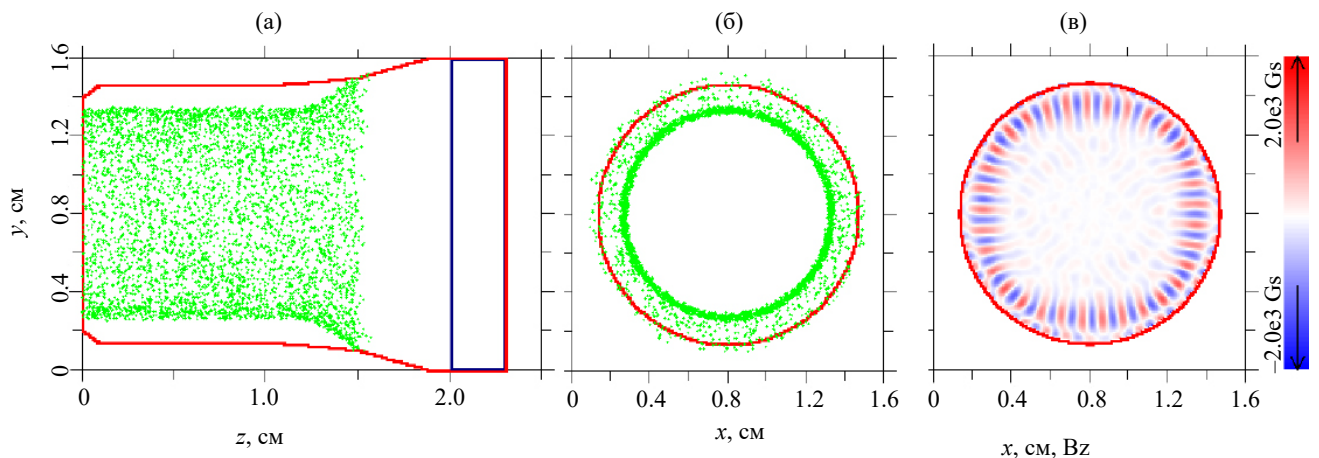


Рис. 2. Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц в продольном (а) и поперечном (б) сечениях расчетной области, а также распределение продольной компоненты высокочастотного магнитного поля в резонаторе при возбуждении рабочей моды $TE_{33,2}$ (в).

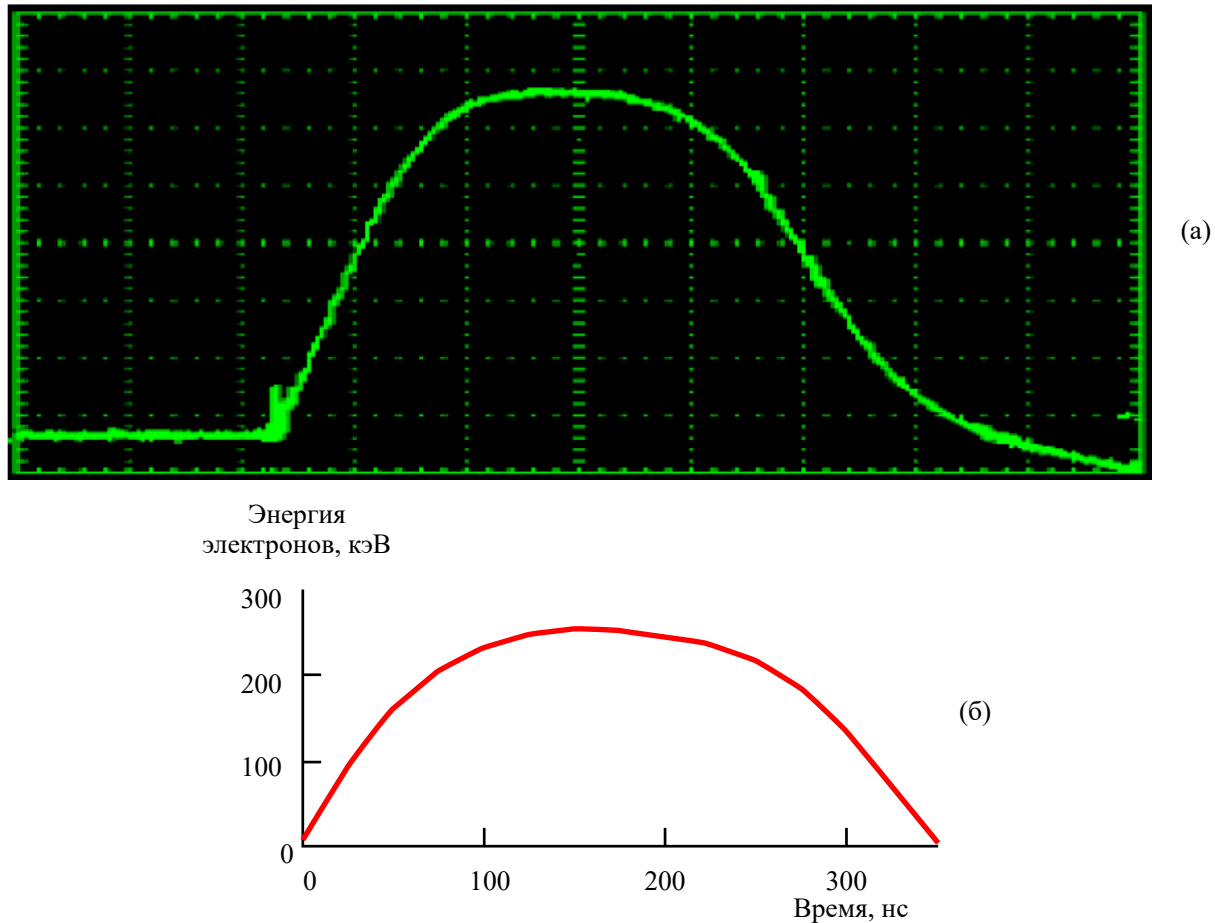


Рис. 3. Экспериментальная форма импульса ускоряющего напряжения (а) и форма импульса напряжения в трехмерном PIC-моделировании (б). Горизонтальный масштаб одной клетки осциллограммы – 500 нс.

занимал около 100 ч счетного времени при использовании компьютера с 16 процессорами и двумя GPU.

Таким образом, на настоящий момент представляется разумным исследование динамики гиротрона с применением PIC-кодов на временах порядка сотен наносекунд [21, 22]. В этой связи в моделировании полная длительность импульса ускоряющего напряжения была сокращена до 350 нс при сохранении его формы (см. рис. 3). Такое сокращение длительности не должно приводить к существенному изменению динамики системы. Это связано с тем, что длительности фронтов значительно превышают характерные времена установления колебаний $\sim Q/(2\pi f)$, где Q и f – добротность и собственная частота моды [23].

В силу некоторых ограничений кода KARAT, в моделировании можно было задать только дискретное изменение начального питч-фактора частиц с количеством значений не более четырех.

Вследствие этого использовался следующий алгоритм моделирования сценария включения: электронный пучок представлялся в виде последовательности четырех электронных импульсов длительностью 20, 40, 40 и 60 нс. Переход между импульсами осуществлялся путем уменьшения до нулевого значения тока и энергии электронов на заднем фронте импульса и одновременного увеличения от нуля до необходимого значения тока и энергии электронов на переднем фронте следующего импульса. На протяжении каждого из импульсов питч-фактор оставался постоянным. Его значение задавалось равным среднему значению питч-фактора на данном временном интервале, вычисленное на основе расчета электронно-оптической системы. Размер счетной сетки в моделировании задавался равным $175 \times 175 \times 231$ узлов, число макрочастиц составляло около 100 тыс.

На рис. 4 представлены полученные на основе моделирования импульса выходного

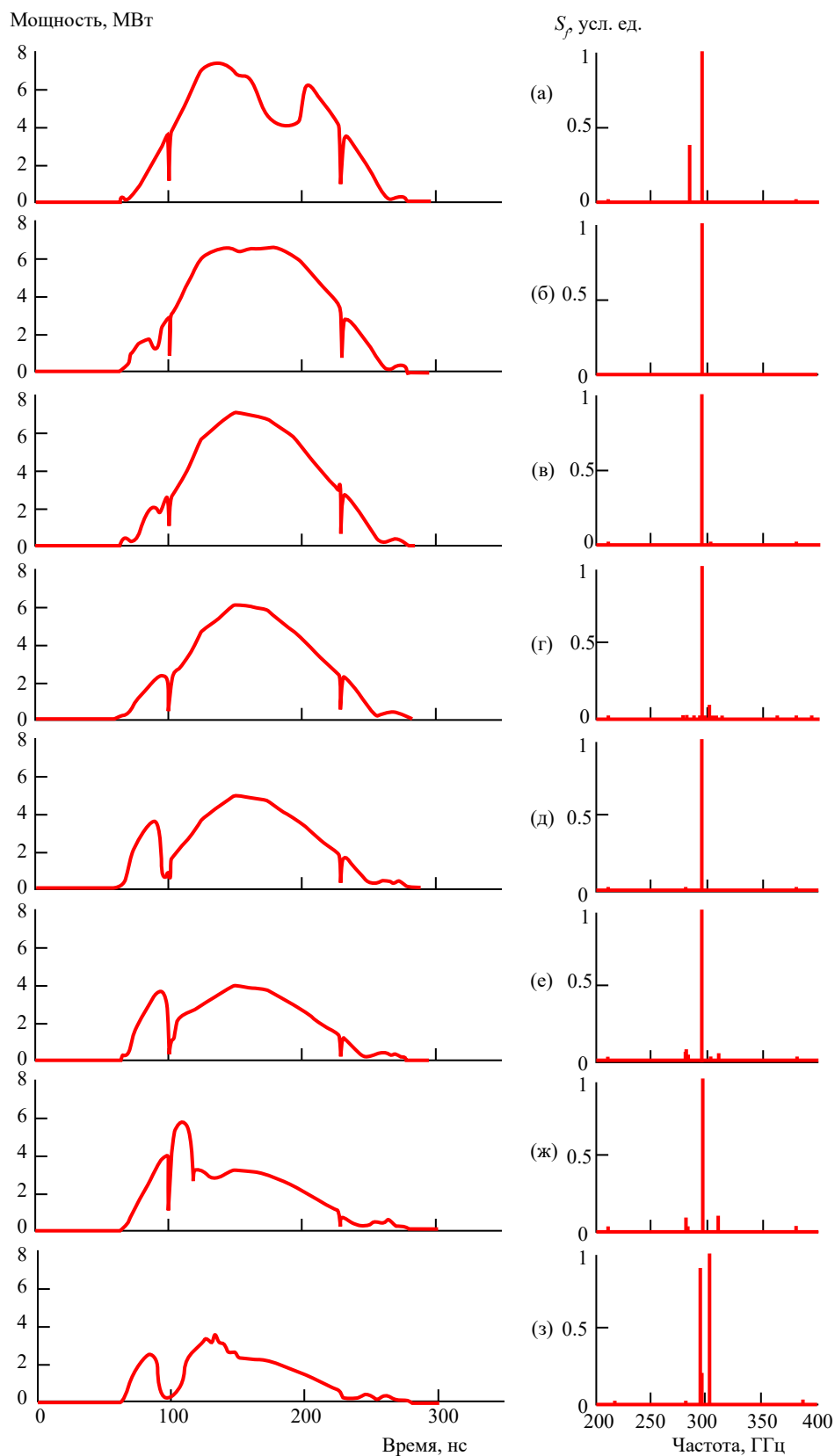


Рис. 4. Расчетная зависимость выходной мощности на первой циклотронной гармонике от времени (левый столбец) и соответствующие спектры сигнала на интервале от 100 до 230 нс (правый столбец) при последовательном увеличении магнитного поля: 14.55 Тл (а), 14.6 Тл (б), 14.7 Тл (в), 14.8 Тл (г), 14.9 Тл (д), 15.0 Тл (е), 15.1 Тл (ж), 15.2 Тл (з).

излучения и спектры центральной части импульса при последовательном увеличении магнитного поля. При значениях полей менее 14.6 Тл наблюдается срыв генерации на рабочей моде, что выражается в провале мощности в центральной части импульса (см. рис. 4а). Максимальная мощность генерации достигается при магнитных полях 14.6–14.7 Тл и составляет около 7 МВт (см. рис. 4б, в), что хорошо соответствует результатам расчетов по усредненным уравнениям. Структура поля излучения соответствует моде $TE_{33,2}$ (см. рис. 2в), частота генерации составляет около 300 ГГц.

При дальнейшем увеличении магнитного поля происходит плавное падение мощности до уровня 3 МВт при магнитном поле 15.1 Тл (см. рис. 4г–ж). При дальнейшем увеличении магнитного поля до 15.2 Тл происходит возбуждение паразитной моды, в результате чего в спектре одновременно присутствуют две спектральные компоненты (см. рис. 4з). Таким образом, учитывая данные расчетов по усредненным уравнениям, можно ожидать, что без применения специальных мер селекции колебаний в данном гиротроне возможно получение мощности в диапазоне 1.5 ТГц на уровне 200 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенного моделирования показывают возможность получения в релятивистском гиротроне импульсного излучения диапазона 1.5 ТГц с уровнем мощности около 200 Вт. В то же время, согласно одномодовому приближению, более высокий уровень ВЧ-мощности может быть достигнут в области магнитных полей, где происходит возбуждение паразитной моды на основном резонансе. Одним из способов решения этой проблемы может являться захват колебаний гиротрона внешним источником меньшей мощности [24], что расширяет зону генерации на рабочей моде. В качестве такого источника может использоваться слабо-релятивистский гиротрон с киловаттным уровнем выходной мощности. При этом задача разделения входного и выходного сигналов может быть решена путем использования специальных квазиоптических преобразователей [25].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-12-00161.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Седов А.С., Пу Р., Нусинович Г.С., Гранатштейн В.Л. Разработка мощного импульсного субтерагерцового гиротрона для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 8. С. 666–675.
2. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Богдашов А.А., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Родин Ю., Денисов Г.Г., Кашин Д., Роджерс Дж., Ромеро-Таламас К.А., Пу Р., Шкварунец А.Г., Нусинович Г.С. Экспериментальное исследование импульсного терагерцового гиротрона с рекордными значениями мощности и эффективности // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 8. С. 550–561.
3. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г. Терагерцовый гиротрон с импульсным магнитным полем // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 831–838.
4. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 1. Art.no.015101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101>
5. Нусинович Г.С., Павельев А.Б. Теоретическое исследование паразитной генерации на гармониках частоты рабочей моды в гиротронах // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 6. С. 1274–1280.
6. Завольский Н.А., Нусинович Г.С., Павельев А.Б. К теории паразитного излучения в гиротронах // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 3. С. 361–368.
7. Denisov G.G., Zotova I.V., Malkin A.M., Sergeev A.S., Rozental R.M., Fokin A.P., Belousov V.I., Shmelev M.Yu., Chirkov A.V., Tsvetkov A.I., Bandurkin I.V., Glyavin M.Yu. Boosted excitation of the fifth cyclotron harmonic based on frequency multiplication in conventional gyrotrons // Phys. Rev. E. 2022. V. 106. № 2. Art.no. L023203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.L023203>
8. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Железнов И.В., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С. Гироумножители на пятой циклотронной гармонике на основе мощных гиротронов для плазменных приложений // Изв. вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66. № 7/8. С. 527–537. https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_07_527
9. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Циклотронные и синхротронные мазеры / В кн. Релятивистская вы-

- сокочастотная электроника. Горький: ИПФАН СССР. 1979. С. 157–216.
10. Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С. Возбуждение высоких циклотронных гармоник в сильноточном релятивистском гиротроне в режиме умножения частоты // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 24. С. 11–14.
<http://doi.org/10.21883/PJTF.2022.24.54016.19176>
 11. Leontyev A.N., Plankin O.P., Rozental R.M., Semenov E.S. Design of a 300 GHz Relativistic Gyrotron with an output Power of more Than 7 MW // J. IR MM THz waves. 2023. V. 44. № 11/12. P. 998–1015.
<https://doi.org/10.1007/s10762-023-00950-1>
 12. Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // Int. J. Electron. 1986. V. 61. № 6. P. 881–894.
<https://doi.org/10.1080/00207218608920927>
 13. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Шевченко А.С. Экспериментальное исследование мощной магнетронно-инжекционной электронной пушки для релятивистских гироприборов // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 8. С. 680–685.
 14. Иляков Е.В., Кулагин И.С., Мануилов В.Н., Шевченко А.С. Эксперименты по формированию интенсивного винтового электронного пучка в условиях перехвата электронов, отраженных от магнитной пробки // Изв. вузов. Радиофизика 2007. Т. 50. № 9. С. 785–792.
 15. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Новажилова Ю.В., Фокин А.П., Зуев А.С., Семенов Е.С. Стабилизация частоты излучения гиротрона с удаленным отражателем в условиях взаимодействия мод эквидистантного спектра // Изв. вузов. Радиофизика 2022. Т. 65. № 8. С. 621–633.
https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_08_621
 16. Tarakanov V.P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc // Proc. EPJ Web Conf. 2017. V. 149. Art. no. 04024.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201714904024>.
 17. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Y.M., Kornishin S.Y., Leontyev A.N. et. al. W-Band 5 MW Pulse Relativistic Gyrotron // IEEE Trans. on Elec. Dev. 2017. V. 64. № 4. P. 1865–1867.
<https://doi.org/10.1109/TED.2017.2664106>
 18. An C., Zhang D., Zhang J., Li S. and Liu J. Design of a Low-Voltage High-Efficiency 250 GHz Gyrotron // 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). 2018. P. 1079–1081.
<https://doi.org/10.23919/APMC.2018.8617302>
 19. Lin M., Smithe D.N. Study on beam wave interaction and mode competition in a fusion gyrotron using 3-D EM PIC simulation // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019. P. 1–2.
<https://doi.org/10.1109/IVEC.2019.8745190>
 20. Bandurkin I., Fedotov A., Glyavin M., Idehara T., Malkin A., Manuilov V., Sergeev A., Tsvetkov A., Zaslavsky V., Zotova I. Development of Third-Harmonic 1.2-THz Gyrotron With Intentionally Increased Velocity Spread of Electrons // IEEE Trans. on Elec. Dev. 2020. V. 67. № 10. P. 4432–4436.
<https://doi.org/10.1109/TED.2020.3012524>
 21. Rozental R.M., Zotova I.V., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Tarakanov V.P. Generation of Electromagnetic Rogue-Waves in Submillimeter-Band Gyrotrons // J. of Inf., Mm, and THz Waves. 2019. V. 40. P. 150–157.
<https://doi.org/10.1007/s10762-018-0561-8>
 22. Huan J., Song T., Liang P., Qi X., Ran D., Zhang C., Yan Z., Wu Z., Zhang K., Zhao T., Hu M., Wei Y., Gong Y., Wang W., Liu D. Detailed Investigation on Nonstationary Behavior in a Frequency-Tunable Gyrotron // IEEE Trans. on Electron. Dev. 2022. V. 69. № 6. P. 3400–3406.
<https://doi.org/10.1109/TED.2022.3169111>
 23. Моисеев М.А., Нусинович Г.С. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. № 11. С. 1709–1717.
 24. Denisov G.G., Zotova I.V., Zheleznov I.V., Malkin A.M., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Semenov E.S., Glyavin M.Yu. Phase-Locking of Second-Harmonic Gyrotrons for Providing MW-Level Output Power // IEEE Trans. Electron Dev. 2022. V. 69. № 2. P. 754–758.
 25. Kuftin A.N., Denisov G.G., Chirkov A.V., Shmelev M.Yu., Belousov V.I., Ananichev A.A., Movshevich B.Z., Zotova I.V., Glyavin M.Yu. First Demonstration of Frequency-Locked Operation of a 170 GHz/ 1 MW Gyrotron // IEEE Electron Dev. Lett. 2023. V. 44. № 9. P. 1563–1566.

GENERATION OF PULSED TERAHERTZ RADIATION IN A RELATIVISTIC GYROTRON IN THE FREQUENCY MULTIPLICATION MODE

Corresponding Member of the RAS **N. S. Ginzburg^a, I. V. Zotova^a,
A. N. Leontyev^{a,b}, A. M. Malkin^{a,b}, R. M. Rozental^{a,b}, A. S. Sergeev^a**

^a*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod, Russia*

^b*National Research Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia*

Within the framework of the averaged approach, the frequency multiplication mode in a relativistic gyrotron in the 300 GHz range was studied. It is shown that under conditions of selective excitation of oscillations on the $TE_{33,2}$ mode at the fundamental cyclotron harmonic, it is possible to generate radiation with a frequency of 1.5 THz and a power of up to 1.5 kW on the $TE_{165,7}$ mode with excitation of the fifth harmonic of the gyrofrequency. A three-dimensional simulation of the gyrotron by the large particle method was performed, on the basis of which a narrowing of the generation zone at the main cyclotron harmonic was shown in comparison with that calculated within the framework of a simplified model, which leads to a limitation of the power of terahertz radiation at the level of 200 W.

Keywords: relativistic electronics, gyrotrons, terahertz radiation