

УДК 621.385.69

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ В СИЛЬНОТОЧНОМ РЕЛЯТИВИСТСКОМ ГИРОТРОНЕ Ка-ДИАПАЗОНА

© 2024 г. Э. Б. Абубакиров¹, А. Н. Денисенко¹, А. Н. Леонтьев^{1, 2, *},
К. В. Минеев^{1, 2}, Р. М. Розенталь^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
имени А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук”, Нижний Новгород, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
имени Н. И. Лобачевского”, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: leontiev@ipfran.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования генерации излучения в режиме умножения частоты на третьей гармонике в сильноточном гиротроне Ка-диапазона. В рамках трехмерного моделирования методом крупных частиц показано, что коэффициент нелинейной трансформации в W-диапазоне может достигать значений 0.5%. Представлены экспериментальные данные по регистрации излучения в данном диапазоне.

DOI: 10.31857/S0367676524010165, EDN: RZVNXQX

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется значительное число исследований, направленных на создание мощных источников в коротковолновой части миллиметрового диапазона. При этом наибольшие успехи продемонстрированы в приборах на основе прямолинейных электронных потоков, формируемых катодами взрывоэмиссионного типа. Так, в генераторах поверхностной волны получены импульсы мощностью 25 МВт с длительностью около 5 нс в диапазоне 75 ГГц [1] и свыше 2 МВт с длительностью около 2 нс в диапазоне 0.32–0.35 ТГц [2]. Вместе с тем с точки зрения получения миллиметрового излучения большой мощности существенным потенциалом обладают гиротроны, основанные на взаимодействии винтовых электронных потоков с незамедленными волнами. Расчеты показывают, что при использовании винтового электронного потока с энергией 500 кэВ и током 2 кА могут быть реализованы источники с уровнем 100–150 МВт в диапазоне 90–100 ГГц [3, 4] и более 80 МВт в диапазоне 300 ГГц [5]. Важным преимуществом гиротронов является отсутствие мелкомасштабных по сравнению с длиной волны элементов в электродинамической системе, а также низкая чувствительность к начальному скоростному разбросу частиц [6]. Однако гиротроны обладают и существенным недостатком, связанным

с необходимостью создания сильных магнитных полей, величина которых определяется условием близости частоты излучения ω к циклотронной частоте ω_H (т.н. условие циклотронного резонанса):

$$\omega \approx \omega_H = \frac{|e|H}{mc\gamma}, \quad (1)$$

где H — величина магнитного поля, e , m — заряд и масса электрона, γ — релятивистский гамма-фактор, который в вакуумной СВЧ электронике удобно записать через ускоряющее напряжение U , приложенное к анодному электроду электронно-оптичной системы (в случае сильноточных гиротронов необходимо также учитывать эффект “провисания потенциала”, вызванный значительным пространственным зарядом пучка):

$$\gamma = 1 + \frac{eU}{mc^2}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует весьма неприятная тенденция: в условиях сохранения неизменной частоты генерации гиротрона увеличение энергии электронного потока требует увеличения магнитного поля. Связь этих величин можно проиллюстрировать следующими примерами. Большинство гиротронов работает в области слабoreлятивистских энергий порядка 15–30 кэВ [7]. Соответственно,

для них значение релятивистского гамма-фактора составляет $\gamma \approx 1.03\text{--}1.06$. Наиболее мощные длинно-импульсные гиротроны используют электронные пучки с энергиями до 70–80 кэВ [8], что соответствует значению $\gamma \approx 1.13\text{--}1.16$. При энергиях 250–300 кэВ, при которых были реализованы гиротроны с термоэмиссионными катодами с рекордными значениями выходной мощности и эффективности в X-, Ka- и W-диапазонах [9–11], значение гамма-фактора (2) возрастает до $\gamma \approx 1.5\text{--}1.6$. Наконец, для типичных значений энергий порядка 500 кэВ, формируемых электронно-оптическими системами со взрывоэмиссионными катодами, значение гамма-фактора возрастает до $\gamma \approx 2$. В результате, по сравнению со слабoreлятивистскими гиротронами, магнитное поле должно быть увеличено в соответствующее число раз. Более точные расчеты дают несколько меньшее отношение. Так, в диапазоне 300 ГГц рабочее значение магнитного поля в слабoreлятивистском гиротроне с энергией пучка 15 кэВ составляет около 11 Тл [12], в то время как аналогичное расчетное значение для сильноточного релятивистского гиротрона с энергией пучка 500 кэВ составляет около 18 Тл [13]. Таким образом, коэффициент увеличения магнитного поля составляет около 1.6, а не 2, что связано с нелинейным эффектом смещения области максимального КПД в область меньших значений магнитных полей.

Одним из путей преодоления данной проблемы является селективное возбуждение колебаний на гармониках гирочастоты. Наибольшие успехи в этом направлении получены в гиротронах с электронно-оптическими системами, формирующими т.н. “приосевые” винтовые электронные потоки, движущиеся как единое целое вокруг оси системы. В частности, в традиционном гиротроне, работающем на основной гармонике гирочастоты, для получения генерации в диапазоне 1 ТГц требуется создание магнитного поля около 40 Тл [14], что является весьма непростой технологической задачей. Вместе с тем в гиротроне с приосевым электронным пучком генерация в данном диапазоне может быть получена за счет селективного возбуждения колебаний на третьей гармонике гирочастоты, при этом значения магнитных полей уменьшаются до уровня 13–14 Тл [15]. Однако в области релятивистских значений энергий приосевые пучки могут быть сформированы только при относительно малых значениях токов порядка нескольких десятков ампер [16], что не дает возможности создания на их основе генераторов большой мощности.

В связи с этим достаточно привлекательным выглядит механизм одновременной генерации излучения на основной и более высоких гармониках гирочастоты, основанный на эффекте умножения частоты. Данный механизм основан на нелинейных свойствах электронного пучка и подразумевает, что группировка в низкочастотной волне

приводит к тому, что компоненты электронного тока возникают не только на частоте этой волны, то также и на ее гармониках, которые в свою очередь уже инициируют генерацию высокочастотного излучения на соответствующих частотах. Для такого режима, когда высокочастотная волна возбуждается фактически заданным модулированным током, отсутствует проблема конкуренции мод. Вместе с тем существенным недостатком является низкий коэффициент нелинейной трансформации (КНТ), соответствующий отношению мощности излучения на высокой гармонике к мощности излучения на основной гармонике. Это обусловлено, с одной стороны, неэквидистантностью спектра мод цилиндрических волноводов, типично используемых в гиротронах, а с другой — быстрым падением коэффициентов связи с увеличением номера гармоники. В частности, проведенные в [17, 18] измерения мощности для гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц показали, что значения КНТ на второй циклотронной гармонике составили 10^{-4} (т.е. около 0.01% относительно мощности излучения на первой гармонике, а для третьей — около 10^{-6} (0.0001%)). В то же время хорошо известно, что степень спада коэффициентов связи на гармониках уменьшается с увеличением энергии электронов [19]. За счет этого, как было показано в наших предшествующих работах [20, 21], КНТ в сильноточном релятивистском гиротроне увеличивается на несколько порядков. Однако данные исследования были ограничены рассмотрением процессов излучения только на ТЕ-модах. Вместе с тем, как показано в данной работе, в релятивистской области энергий имеет место эффективное возбуждение и мод ТМ-типа. В работе также представлены результаты первых экспериментальных исследований генерации излучения на первой и третьей циклотронных гармониках в сильноточном гиротроне Ka-диапазона.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ГИРОТРОНА КА-ДИАПАЗОНА

Для эффективного умножения излучения в гармонику с номером s необходимо выполнение двух условий. Если гиротрон на основной циклотронной гармонике возбуждается на моде $TE_{m,n}$, то азимутальный индекс M моды на s -й гармонике должен удовлетворять соотношению:

$$M = s \times m. \quad (3)$$

Одновременно должно выполняться условие кратности критических частот:

$$\Omega_c = s \times \omega_c, \quad (4)$$

которое удобно переписать для значений собственных чисел мод:

$$v_M = \frac{R_0 \Omega_c}{c} = s \times v_m = s \frac{R_0 \omega_c}{c}, \quad (5)$$

где R_0 – радиус однородного участка резонатора гиротрона.

В классических гиротронах используются резонаторы в виде отрезка цилиндрического волновода круглого сечения, спектр мод которых является неэквидистантным, в силу чего одновременное выполнение условий (3) и (5) невозможно. Вместе с тем в работе [22] было показано, что для ТЕ мод круглого волновода действует асимптотическое соотношение, в соответствии с которым собственное число моды $TE_{M,N}$ при увеличении индекса M стремится к пятикратному значению собственного числа моды $TE_{m,n}$ при условии:

$$M = 5m, N = 5n - 3. \quad (6)$$

Как показано в работе [23], этот эффект позволяет рассчитывать на получение в современных мощных 250 ГГц гиротронах импульсов излучения в диапазоне 1.25 ТГц с ваттным уровнем мощности.

Однако для релятивистских гиротронов можно использовать еще одно асимптотическое соотношение, связывающее собственные числа ТЕ- и ТМ-мод, в соответствии с которым собственное число моды $TM_{M,N}$ при увеличении индекса M стремится к трехкратному значению собственного числа моды $TE_{m,n}$ при условии:

$$M = 3m, N = 3n - 2. \quad (7)$$

Дело в том, что в релятивистских областях энергий существенно возрастают коэффициенты связи пучка с ТМ-волнами. При этом в условиях подавления мод ТЕ-типа гиротроны на ТМ-модах являются весьма перспективными источниками мощного СВЧ излучения миллиметрового диапазона [24, 25].

Исследование эффектов умножения частоты было выполнено на основе трехмерного PIC-моделирования методом крупных частиц с использованием программы CST Particle Studio. В моделировании винтовой электронный пучок с начальной энергией 500 кэВ, током 2 кА и разбросом по скоростям около 20% возбуждал моду $TE_{-4,2}$ резонатора гиротрона на частоте 35 ГГц. Использовалось около 300 тысяч макрочастиц, количество узлов сетки составляло около 25 млн. После окончания взаимодействия электронный пучок высаживался на стенку электродинамической системы в спадающем магнитном поле. На рис. 1а представлена геометрия пространства взаимодействия, мгновенное положение макрочастиц и их распределение по энергиям.

На рис. 1б показана зависимость мощности излучения от величины магнитного поля на основной рабочей моде $TE_{-4,2}$ и моде $TM_{-12,4}$, для которых лучшим образом выполняются условия (3), (5)

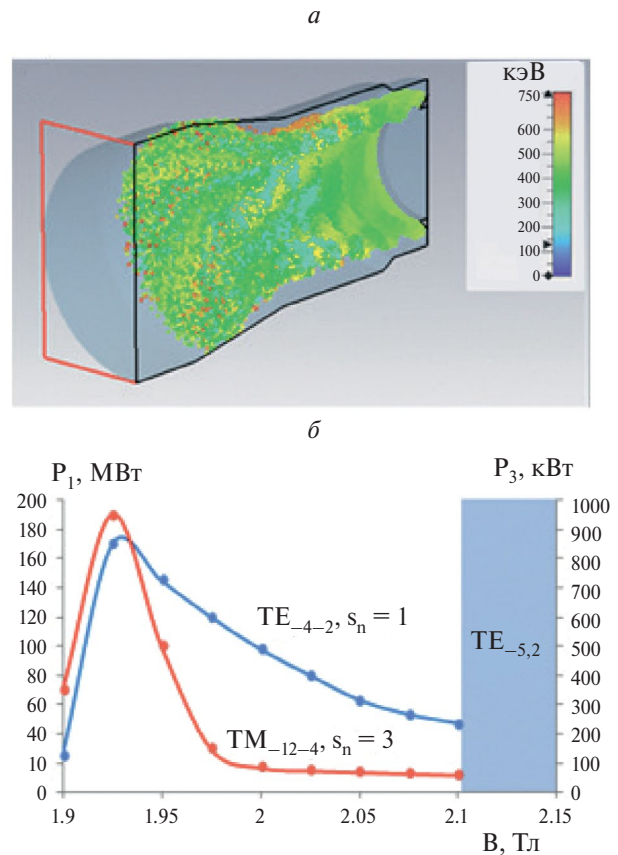


Рис. 1. Геометрия пространства взаимодействия в трехмерном моделировании методом крупных частиц, мгновенное положение макрочастиц и их распределение по энергиям (а). Расчетная зависимость мощности на основной гармонике (мода $TE_{-4,2}$) и на третьей гармонике гирочастоты (мода $TM_{-12,4}$) от величины магнитного поля (б).

в соответствии с асимптотическим соотношением (7). Видно, что максимум излучения на третьей гармонике достигает значения около 1 МВт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОНА

Гиротрон Ка-диапазона был разработан в ИПФ РАН на основе сильноточного ускорителя Синус-6, формирующего электронный пучок с током до 5 кА при ускоряющем напряжении до 600 кВ в импульсах длительностью 20 нс. Внешний вид гиротрона представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлена схема измерения параметров излучения. Основная часть излучения, проходящего через выходное вакуумное окно, поступала в калориметр, осуществляющий измерение поглощенной энергии с точностью $\pm 20\%$. Небольшая часть излучения перехватывалась волноводами Ка и W-диапазонов, ослаблялась аттенюаторами

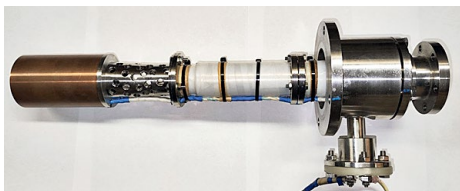


Рис. 2. Внешний вид экспериментального макета релятивистского сильноточного гиротрона.

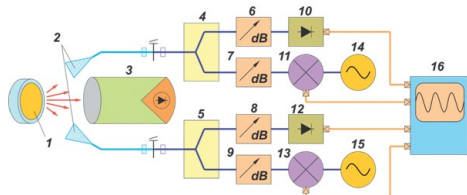


Рис. 3. Схема измерения параметров излучения гиротрона в Ka- и W-диапазонах. 1 – выходное окно гиротрона, 2 – волноводы, 3 – калориметр; 4, 5 – направленные ответвители; 6, 7, 8, 9 – аттенюаторы; 10, 12 – микроволновые детекторы; 11, 13 – смесители; 14, 15 – гетеродины; 16 – осциллограф.

и поступала на микроволновые детекторы, регистрирующие форму огибающей сигнала, и смесители. Сигналы с гетеродинов, работающих на частоте, примерно на 0.5–1 ГГц ниже предполагаемой частоты генерации гиротрона на основной и третьей гармониках, также подавались на смесители, промежуточная частота с выхода которых использовалась для расчета спектров. Для регистрации сигнала с детекторов и смесителей использовался осциллограф с рабочей полосой 4 ГГц и частотой дискретизации 20 млрд выборок в секунду.

Для оценки мощности выходного излучения использовался импульсный термопарный калориметр, который измерял полную энергию излучения гиротрона, большую часть которой составлял сигнал на основной гармонике. Таким образом, на данном этапе исследований мощность высокочастотного сигнала отдельно не измерялась.

В расчетных областях магнитных полей были зарегистрированы режимы генерации с характерной длительностью импульсов порядка 5 нс (рис. 4а) и частотой генерации примерно 35.7 ГГц (рис. 4б), что близко к расчетному значению

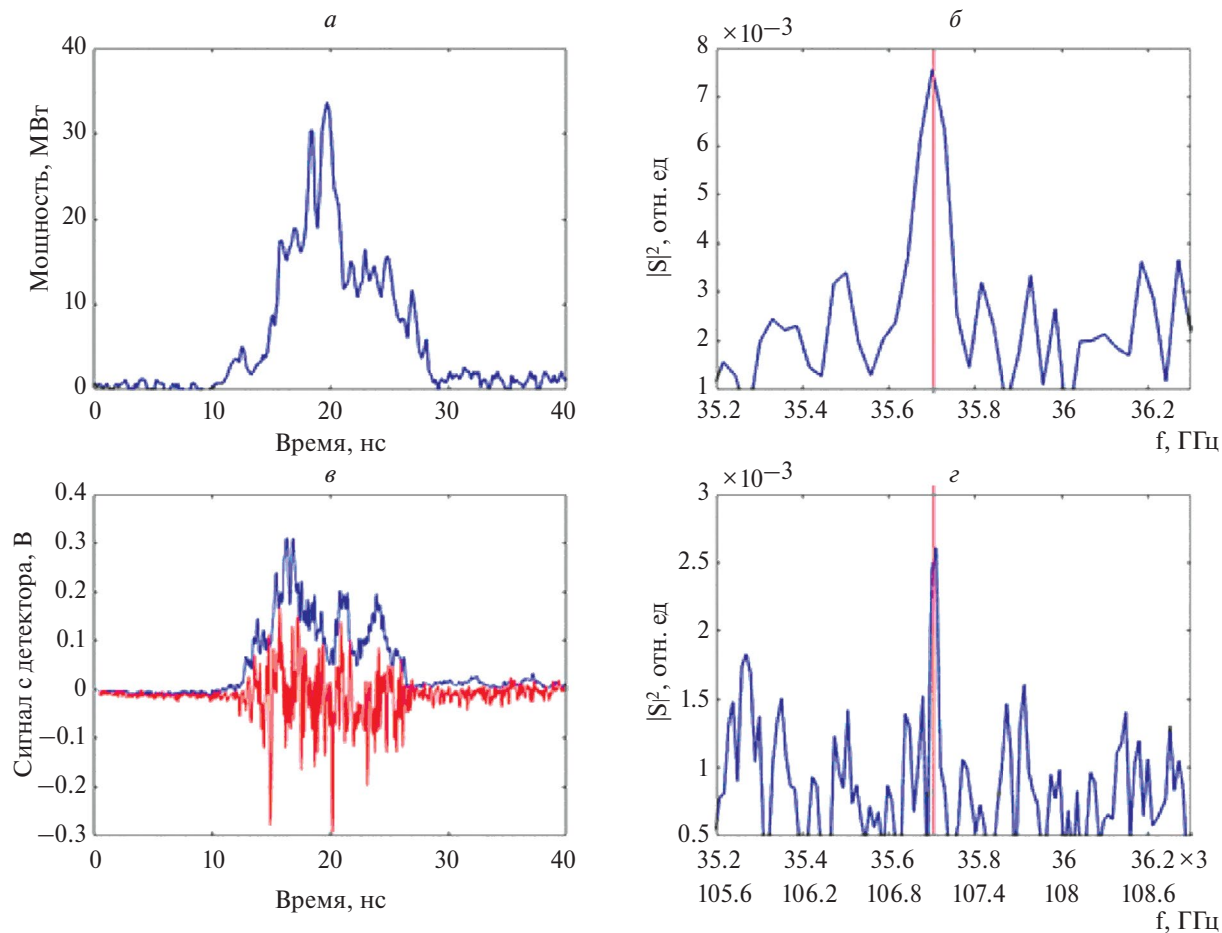


Рис. 4. Экспериментально измеренные формы импульсов на основной (а) и третьей (в) гармониках гирочастоты и соответствующие спектры (б) и (г).

частоты генерации моды $TE_{-4,2}$. Мощность полученных импульсов оценивалась по результатам калориметрических измерений и достигала значений 35–40 МВт.

На рис. 4в представлен сигнал с детектора W-диапазона. Его форма в достаточно хорошей степени соответствовала форме импульса излучения, зарегистрированного детектором Ka-диапазона. В свою очередь, частота сигнала W-диапазона в точности соответствовала утроенной частоте сигнала, наблюдаемого в Ka-диапазоне (рис. 4г). В совокупности эти данные свидетельствуют о том, что зарегистрированный сигнал W-диапазона действительно появляется вследствие эффекта умножения частоты. Согласно теоретическим расчетам, коэффициент нелинейной трансформации в такой системе может достигать значений 0.5%, что дает оценку верхнего значения уровня мощности в W-диапазоне порядка 200 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сильноточные релятивистские гиротроны представляются перспективными источниками мощного излучения миллиметрового диапазона. Вместе с тем первые экспериментальные исследования демонстрируют серьезное расхождение между расчетными и измеренными параметрами излучения. В частности, максимальная мощность на основной гармонике гирочастоты не превышала 40 МВт, что существенно меньше расчетных значений [13]. Одной из причин подобного поведения системы может являться нагрев проводящей оболочки индукционными токами: после нескольких десятков импульсов температура магнитного экрана достигала значений 50–60 °С. При таком изменении температуры происходит заметное уменьшение проводимости меди: со значения $5.8 \cdot 10^6$ См/м при комнатной температуре до значения около $4.8 \cdot 10^6$ См/м. Согласно расчетам, магнитное поле в области формирования пучка при этом увеличивается примерно на 14%. Одновременно с этим происходит изменение его профиля по продольной координате, что приводит к неоптимальному расположению катушки кикера. Как результат, питч-фактор пучка на входе в резонатор гиротрона уменьшается со значений около 1.0 до 0.6, что приводит к значительному снижению КПД. В свою очередь, увеличение тока кикера в этой ситуации хотя и дает увеличение питч-фактора пучка, но вместе с этим приводит к увеличению позиционного разброса ведущих центров электронов в пучке, что также не позволяет достичь высоких значений КПД.

Вместе с тем, несмотря на значительные расхождения экспериментально зарегистрированных значений мощности с результатами расчетов для

фундаментальной гармонике, регистрация излучения в W-диапазоне подтверждает возможность реализации режима умножения частоты в сильно-точном релятивистском гиротроне с потенциально высоким КНТ. Предполагается, что оптимизация режима генерации на фундаментальной гармонике приведет также к стабилизации и увеличению мощности на высоких гармониках в соответствии с расчетными значениями.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00161).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Palitsin A.V., Rodin Yu.V., Goykhman M.B. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2022. V. 44. No. 2. P. 317.
2. Wang J., Wang G., Wang D. et al. // Sci. Reports. 2018. V. 8. No. 1. Art. No. 6978.
3. Данилов Ю.Ю., Леонтьев А.Н., Малкин А.М. и др. // ДАН. Физ.-техн. науки. 2022. Т. 504. С. 3.
4. Данилов Ю.Ю., Денисенко А.Н., Леонтьев А.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 65. № 5–6. С. 448.
5. Rozental R.M., Danilov Yu.Yu., Leontyev A.N. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2022. V. 69. No. 3. P. 1451.
6. Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Мусеев М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 44. № 4. С. 345.
7. Thumm M. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2020. V. 41. No. 1. P. 1.
8. Thumm M., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. No. 7. Art. No. 073001.
9. Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Ilyakov E.V. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. No. 3. P. 840.
10. Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запезалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 10. С. 914.
11. Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2017. V. 64. No. 4. P. 1865.
12. Запезалов В.Е., Лыгин В.К., Малыгин О.В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 6. С. 461.
13. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 56; Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Konyushkov A.P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 1. P. 48.
14. Glyavin M. Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G. Yu. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. No. 1. Art. No. 015101.
15. Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. No. 24. Art. No. 245101.
16. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Yu.K. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. No. 2. P. 456.
17. Glyavin M., Zotova I., Rozental R. et al. // J. Infrared Millim. THz Waves. 2020. V. 41. P. 1245.
18. Golubiatnikov G. Yu., Koshelev M.A., Tsvetkov A.I. et al. // IEEE Trans. THz Sci. Tech. 2020. V. 10. No. 5. P. 502.

19. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. и др. // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 157.
20. Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 24. С. 11.
21. Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 1. С. 57; Leontyev A.N., Rozental P.M., Ginzburg N.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 46.
22. Denisov G.G., Zotova I.V., Malkin A.M. et al. // Phys. Rev. E. 2022. V. 106. No. 2. Art. No. L023203.
23. Denisov G., Zotova I., Zheleznov I. et al. // Appl. Science. 2022. V. 12. Art. No. 11370.
24. Danilov Yu.Yu., Leontyev A.N., Leontyev N.V. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2021. V. 68. No. 4. P. 2130.
25. Данилов Ю.Ю., Денисенко А.Н., Леонтьев А.Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 5–6. С. 448.

Investigation of the third harmonic generation in a high-current relativistic Ka-band gyrotron

E. B. Abubakirov^{a, *}, A. N. Denisenko^a, A. N. Leontyev^a, K. V. Mineev^{a, b}, R. M. Rozental^{a, b}

^a*Federal Research Center Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^b*Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, 603022 Russia*

^{*}*e-mail: leontiev@ipfran.ru*

Theoretical and experimental investigations of radiation generation in the frequency multiplication mode at the third harmonic in a high-current Ka-band gyrotron have been carried out. Within the framework of three-dimensional PIC-simulation, it is shown that the nonlinear transformation coefficient in the W-band can reach values of 0.5%. Experimental data on registration of radiation in this range are presented.

Keywords: gyrotron, high-current relativistic beams, high order cyclotron harmonics.