

УДК 621.385

ГИРОТРОНЫ С ПРИОСЕВЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ В ИПФ РАН

И. В. Бандуркин^{1,2}, *В. Л. Братман*^{1,3}, *Ю. К. Калынов*¹, *В. Н. Мануилов*^{1,2},
*И. В. Ошарин*¹, *А. В. Савилов*^{1,2*}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

³ Ариэльский университет, г. Ариэль, Израиль

В ИПФ РАН в течение многих лет развивается технология создания субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов с большими орбитами, позволяющих осуществлять селективную генерацию на более высоких циклотронных гармониках, чем это возможно в традиционных гиротронах. В настоящее время экспериментальные исследования ведутся на двух специализированных установках. На стенде, позволяющем формировать длинноимпульсные и непрерывные электронные пучки с энергией частиц до 30 кэВ, изучается прототип универсального субтерагерцового источника для магниторезонансной спектроскопии. В этом генераторе получена непрерывная селективная генерация на второй и третьей циклотронных гармониках с частотами 0,267 и 0,394 ТГц при мощности излучения 900 и 370 Вт соответственно. Для повышения эффективности генерации на третьей гармонике и получения генерации на четвертой гармонике с частотами до 0,65 ТГц разработаны новые резонаторы с периодическими фазовыми корректорами. На стенде с энергией электронов до 80 кэВ исследуются возможности повышения мощности импульсной генерации на третьей гармонике на частотах, близких к 1 ТГц, для использования в экспериментах по получению газового разряда в сфокусированном терагерцовом волновом пучке и генерации мощного экстремального ультрафиолетового излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Гиротрон представляет собой наиболее известную и развитую разновидность циклотронных мазеров, основанную на селективном возбуждении квазикритических мод волноводных резонаторов умеренно релятивистскими электронными пучками. Относительно низкие ускоряющие напряжения и сравнительно слабые ограничения на разброс параметров электронного пучка, которые достаточны для создания высокоэффективных генераторов с мощностью, недоступной другим источникам, делают гиротроны одними из наиболее привлекательных источников излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Основным фактором, ограничивающим продвижение гиротронов в терагерцовый частотный диапазон, является необходимость использования сильных магнитных полей. В настоящее время доступные для гиротронов криомагниты обеспечивают магнитные поля до $10 \div 15$ Тл, что соответствует электронным циклотронным частотам $0,3 \div 0,4$ ТГц. Это означает, что для достижения более высоких частот в длинноимпульсных и непрерывных гиротронах необходимо работать на высоких циклотронных гармониках. При этом, как правило, в высокочастотных традиционных гиротронах удаётся получать селективную генерацию со значительной мощностью излучения лишь на основной и второй гармонике [1–8]. Основным препятствием на пути использования более высоких гармоник при слабoreлятивистских энергиях электронов является быстрое ослабление интенсивности электронно-волнового взаимодействия с ростом номера гармоники и паразитное возбуждение низших гармоник.

Хорошо известным методом освоения более высоких гармоник является использование вместо традиционных гиротронов так называемых гиротронов с большой орбитой (ГБО) [9–17]. Этот

* saviлов@appl.sci-nnov.ru

подход основан на применении вместо трубчатых электронных пучков приосевых пучков, в которых частицы движутся по винтовым траекториям, охватывающим ось круглого резонатора. Такая конфигурация значительно повышает селективность возбуждения высоких гармоник, т. к. приосевой пучок способен возбуждать главным образом лишь моды с азимутальными индексами m , совпадающими с номером s резонансной циклотронной гармоники. Кроме того, приосевая конфигурация электронного пучка оптимальна с точки зрения интенсивности электронно-волнового взаимодействия на высоких гармониках.

В первом ГБО диапазона частот выше 0,2 ТГц, исследовавшемся в ИПФ РАН, для формирования приосевого электронного пучка использовалась квазипирсовская пушка с магнитным сопровождением частиц и высокой степенью компрессии пучка (в 4400 раз). В этой системе формировался приосевой пучок с высокой энергией частиц, 250 кэВ, током 3 А и длительностью 10 мкс, при использовании которого была получена одночастотная генерация на третьей циклотронной гармонике в гиротроне с двумя разными резонаторами на модах $TE_{3,5,1}$, $TE_{3,8,1}$ и $TE_{3,9,1}$ в частотном диапазоне 0,37÷0,41 ТГц с мощностью 10÷20 кВт [15].

В настоящее время в ГБО на высоких гармониках, развиваемых в ИПФ РАН, используются значительно меньшие ускоряющие напряжения. Следующий гиротрон на высокой циклотронной гармонике был реализован на установке «импульсный ГБО» с ускоряющим напряжением до 80 кВ [17] (см. рис. 1а). В этом гиротроне используется приосевой электронный пучок, формируемый пушкой с реверсом (каспом) магнитного поля, с током до 0,7 А и напряжением 50÷80 кВ. В первых экспериментах была получена селективная генерация на второй и третьей гармониках с мощностью на уровне 0,3÷2,0 кВт в широком диапазоне частот 0,55÷1,00 ТГц при магнитных полях 10÷14 Тл. Для повышения мощности выходного излучения этого ГБО до нескольких киловатт на частотах около 1 ТГц тестируются различные новые схемы нерегулярных резонаторов. Генератор с такими параметрами востребован для получения терагерцового разряда в газе.

Установка «непрерывный ГБО» [16] (см. рис. 1б) разработана в качестве прототипа многочастотного источника для спектроскопических приложений. Она основана на использовании криомагнита с полем до 5 Тл и приосевого пучка с энергией частиц до 30 кэВ и током до 0,7 А. Основная цель создания этой установки — получение непрерывной генерации на второй, третьей и четвёртой гармониках на наиболее востребованных для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) частотах 0,26, 0,39 и 0,52 ТГц с мощностью выходного излучения на уровне сотен ватт. К настоящему времени в этом гиротроне получена генерация на второй и третьей гармониках в длинноимпульсном [16] и непрерывном [18] режимах. Для обеспечения селективного возбуждения четвёртой циклотронной гармоники, а также для повышения эффективности работы на третьей гармонике создаются специальные протяжённые секционированные резонаторы с пониженными дифракционными добротностями рабочих мод.

2. ИМПУЛЬСНЫЙ ГИРОТРОН С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ

В первоначальном варианте установки «импульсный ГБО» электронно-оптическая система с каспом магнитного поля и последующим дрейфом частиц в увеличивающемся магнитном поле с высоким фактором компрессии (3000) формирует электронный пучок с током до 0,7 А и приемлемыми скоростным и позиционным разбросами в широкой области ускоряющих напряжений (50÷80 кэВ) и магнитных полей (10÷14 Тл). Система работает в импульсном режиме с длительностью импульса порядка 10 мкс и частотой повторения до 0,1 Гц. В первом эксперименте [17] была получена одномодовая генерация на второй и третьей циклотронных гармониках на четырёх частотах, лежащих в широком (0,55÷1,00 ТГц) частотном диапазоне. Мощность выходного излучения на второй гармонике на частотах 0,55 и 0,68 ТГц составила 0,6 и 2,0 кВт

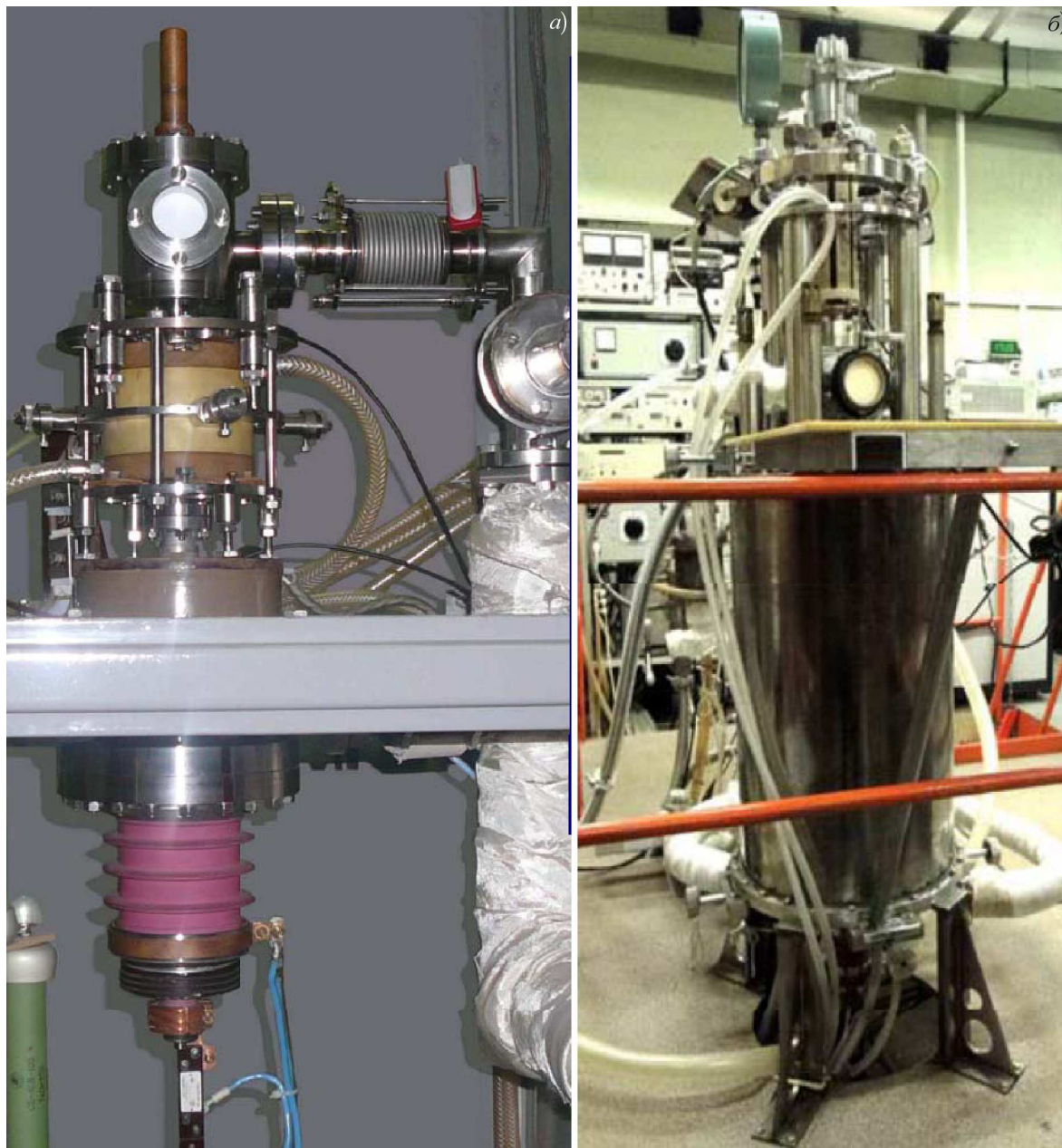


Рис. 1. Импульсный (а) и непрерывный (б) гиротроны с большой орбитой на высоких циклотронных гармониках, исследуемые в ИПФ РАН

соответственно, в то время как при генерации на третьей гармонике на частотах 0,87 и 1,0 ТГц, соответствующих возбуждению мод $TE_{3,6}$ и $TE_{3,7}$, мощность излучения равна $0,3 \div 0,4$ кВт.

В последнее время на этой установке проводятся исследования по повышению мощности импульсного ГБО при его работе на третьей гармонике с частотой около 1 ТГц для создания источника экстремального ультрафиолетового излучения, получение которого основано на получении разряда в газах в сфокусированном терагерцовом волновом пучке. Следует заметить, что ранее этот ГБО уже успешно применялся в подобных экспериментах [19, 20], в которых, однако, использовалась генерация на второй циклотронной гармонике с частотой излучения 0,55 ТГц и мощностью 1 кВт. В то же время эксперименты [21] и теоретические расчёты показали, что

для лучшего согласования греющего излучения с плазмой [22] и увеличения степени конверсии терагерцового излучения в экстремальное ультрафиолетовое излучение [23] необходимо увеличить частоту терагерцового излучения по крайней мере до 1 ТГц при сохранении киловаттного уровня мощности. Более того, эксперименты показали, что для расширения диапазона давлений газа, в котором существует разряд, необходимо повысить мощность гиротрона. При этом в случае достаточно сильной фокусировки терагерцового пучка на более высокой частоте можно существенно повысить удельный энерговклад в плазму, что приведёт, в частности, к увеличению её светимости в вакуумном и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах. Согласно оценкам, при частоте 1 ТГц и мощности в несколько киловатт можно надеяться получить мощность излучения до 100 Вт в востребованном диапазоне длин волн $13\div 17$ нм.

Согласно оценкам существенное повышение мощности излучения ГБО на частоте 1 ТГц с достигнутого значения 400 Вт до нескольких киловатт может быть достигнуто при существующих параметрах электронного пучка 80 кВ и 0,7 А благодаря лишь модификации традиционного резонатора, приводящей к уменьшению его омических потерь. Дело в том, что сравнительно низкая мощность ГБО с традиционным резонатором при работе на третьей гармонике и соответствующий ей относительно низкий коэффициент полезного действия (КПД), около 1 %, являются следствием слабости электронно-волнового взаимодействия на высокой гармонике и относительно низкого тока электронного пучка. Для самовозбуждения рабочего колебания в этом случае оказывается необходимым весьма протяжённый гиротронный резонатор с длиной в 24 длины волны, обладающий дифракционной добротностью более 20 000, что значительно превышает омическую добротность резонатора и приводит к большим потерям излучения. Расчёт для такой системы даёт относительно высокий КПД отбора волной энергии электронного пучка (электронный КПД) около 10 %, однако выходной КПД (отношение мощности выходного излучения к мощности электронного пучка) составляет согласно вычислениям лишь 1,5 % [14]. Это соответствует тому, что 85 % мощности, излучённой электронами в рабочую волну, теряется вследствие омических потерь. В такой ситуации снижение доли омических потерь, например в два раза, могло бы привести к увеличению мощности выходного излучения почти в четыре раза.

Одним из возможных методов, ведущих к повышению мощности, является использование различных схем нерегулярных резонаторов с улучшенной эффективностью электронно-волнового взаимодействия и пониженными омическими потерями. В частности, в работе [14] показано, что использование секционированного резонатора в описанном выше гиротроне может повысить выходной КПД до 5 %, что соответствует мощности генерации свыше 2 кВт. Возможность существенного снижения омических потерь в ГБО с подобным резонатором была продемонстрирована в модельном эксперименте [24].

Для дальнейшего роста мощности генерации предполагается увеличение напряжения и тока пучка с 80 кВ и 0,7 А до 100 кВ и 1,2 А, что позволит повысить мощность пучка почти в два раза. При этом согласно расчётам электронно-оптической системы удастся значительно улучшить качество электронного пучка, уменьшив вдвое разброс поперечных скоростей и увеличив питч-фактор электронов в рабочем резонаторе с $1,4\div 1,5$ до $1,7\div 1,8$. Поскольку стартовый и рабочий токи гиротрона на третьей циклотронной гармонике обратно пропорциональны шестой степени поперечной скорости, соответствующее увеличение поперечной скорости частиц очень значительно повышает эффективность электронно-волнового взаимодействия. Численное моделирование показывает, что это даёт не только повышение КПД электронно-волнового взаимодействия приблизительно с 10 % до 20 %, но и, что гораздо важнее, значительное снижение требуемой длины резонатора примерно в 1,5 раза и, соответственно, существенное уменьшение омических потерь с 85 % до 50 %. Оценки показывают, что при таком пучке даже при использовании простого регулярного гиротронного резонатора мощность ГБО может составлять $3\div 4$ кВт.

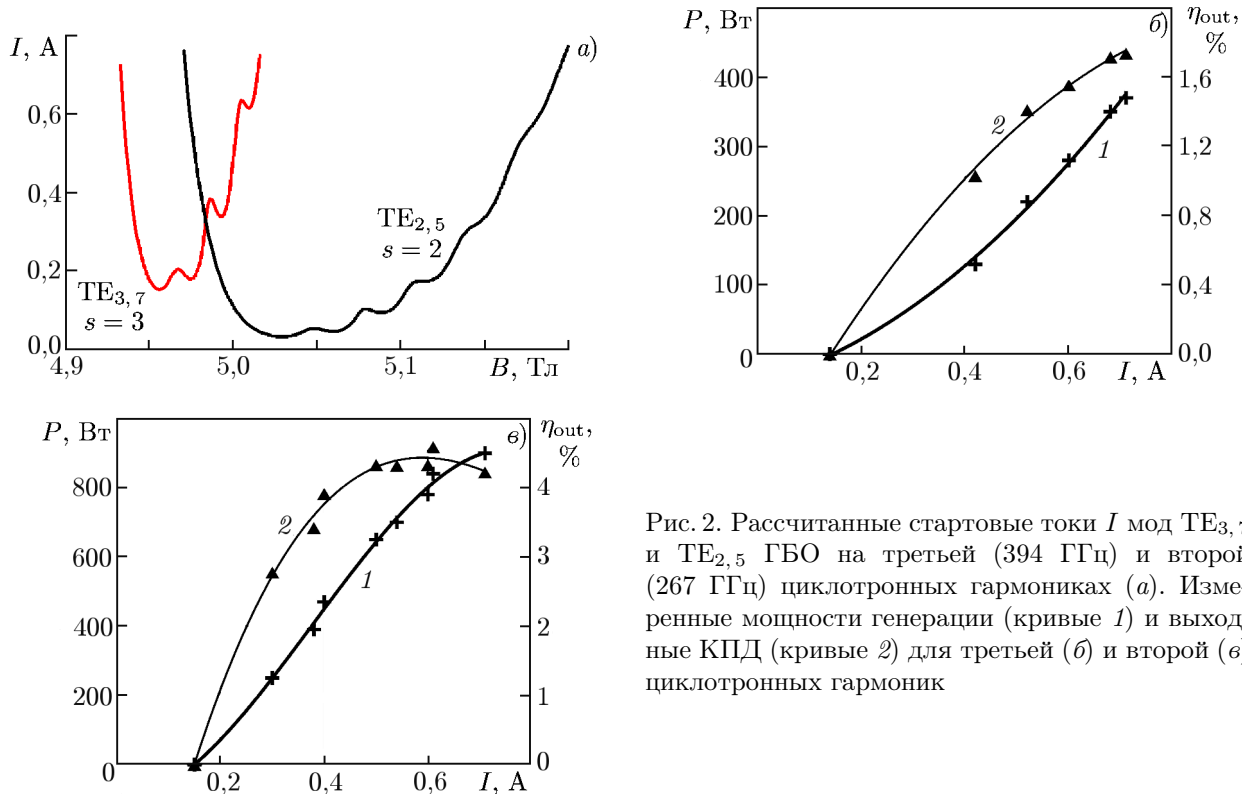


Рис. 2. Рассчитанные стартовые токи I мод $TE_{3,7}$ и $TE_{2,5}$ ГБО на третьей (394 ГГц) и второй (267 ГГц) циклотронных гармониках (а). Измеренные мощности генерации (кривые 1) и выходные КПД (кривые 2) для третьей (б) и второй (в) циклотронных гармоник

3. НЕПРЕРЫВНЫЙ ГИРОТРОН С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ

Разработка непрерывного ГБО с параметрами электронного пучка 30 кэВ и 0,7 А направлена на создание прототипа универсального многочастотного суб-терагерцового источника для спектроскопических приложений (конкретнее, для динамической поляризации ядер в установках ЯМР). В исследуемом ГБО используется криомагнит с индукцией поля около 5 Тл и электронно-оптическая система с каспом магнитного поля, формирующая приосевой электронный пучок со средним питч-фактором частиц в рабочем резонаторе 1,5. Главной задачей для этой установки является достижение стабильной и селективной генерации на второй, третьей и четвёртой циклотронных гармониках на привлекательных с точки зрения ЯМР-спектроскопии частотах 0,26; 0,39 и 0,52 ТГц соответственно при уровне мощности выходного излучения в сотни ватт. Дальнейшие перспективы совершенствования данного ГБО основываются на увеличении ускоряющего напряжения частиц до 45 кВ и повышении рабочего магнитного поля до 6,3 Тл. Это даст возможность достичь на четвёртой гармонике также уже востребованной в ЯМР-спектроскопии частоты 0,65 ТГц.

В первых экспериментах работа непрерывного ГБО на второй и третьей циклотронных гармониках тестировалась в импульсных режимах при длительностях импульсов 10 мкс и 0,1 с [16]. Затем ГБО был исследован в длинноимпульсных режимах с длительностями от 0,1 с до 1 мин и, наконец, выведен в непрерывный режим генерации [18]. При этом для возбуждения второй и третьей гармоник использовался один и тот же регулярный резонатор с длиной 19 мм. Рабочие моды $TE_{2,5}$ с частотой 0,267 ТГц на второй гармонике и $TE_{3,7}$ с частотой 0,394 ТГц на третьей гармонике в соответствии с расчётами возбуждались отдельно при слегка различающихся магнитных полях (см. рис. 2а). Оптимальный режим генерации на второй гармонике наблюдался при поле 5,03 Тл, в то время как третья гармоника возбуждалась при полях менее 4,95 Тл. В длинно-

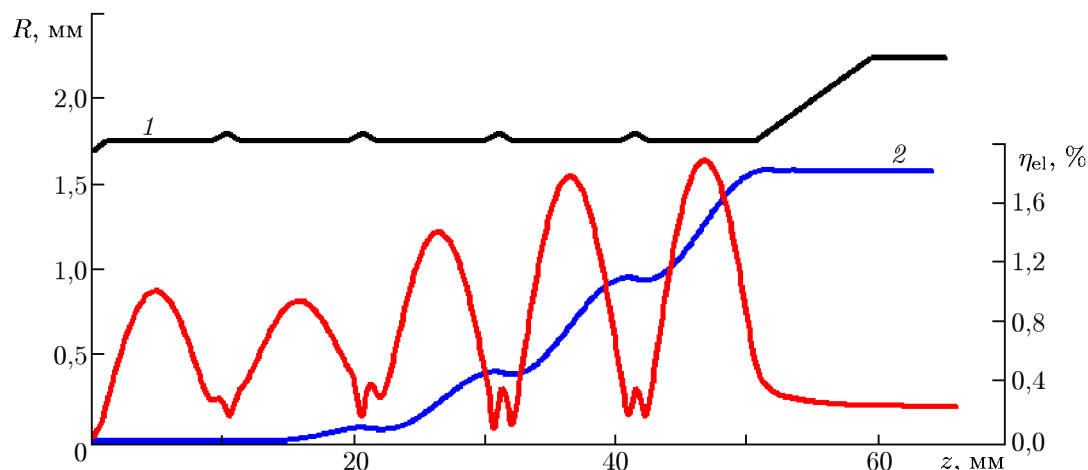


Рис. 3. Гиротрон с секционированным резонатором на четвёртой циклотронной гармонике. Оптимизированный профиль резонатора $R(z)$ (кривая 1), продольная структура поля рабочей моды $TE_{4,5}$ (красная кривая) и рассчитанная зависимость электронного КПД от продольной координаты (кривая 2)

импульсных и непрерывных режимах на обеих гармониках регистрировался стабильный импульс выходного излучения с плоской вершиной. Максимальные мощности составили около 900 и 370 Вт при КПД около 4,2 % и 1,7 % на второй и третьей гармониках соответственно (см. рис. 2б и в).

Низкий КПД генерации на третьей гармонике и в этом ГБО в значительной степени обусловлен большой (около 70 %) долей омических потерь. Этот же фактор является основным препятствием для работы на четвёртой гармонике, т. к. в этом случае необходим резонатор с длиной более 60 длин волн и долей омических потерь более 90 %. Соответственно, численное моделирование предсказывает для четвёртой гармонике низкие значения мощности и КПД, 35 Вт и 0,1 % [16].

Для повышения эффективности работы на третьей гармонике, а также для генерации на четвёртой гармонике разработаны квазирегулярные резонаторы с периодическими фазовыми корректорами, основанные на гиротронном возбуждении далёких от отсечки и, следовательно, обладающих пониженной дифракционной добротностью продольных мод [25, 26]. Для ГБО на четвёртой гармонике разработан резонатор из пяти секций, разделённых фазовыми корректорами (см. рис. 3). В таком резонаторе ожидается возбуждение рабочей моды $TE_{4,5}$ с дифракционной добротностью, близкой к добротности пятой продольной моды $TE_{4,5,5}$ регулярного резонатора. Несмотря на очень большую расчётную длину резонатора, около 90 длин волн, эта добротность относительно невелика (около 30 000); для сравнения, дифракционная добротность низшей продольной моды в такой системе около 200 000. Такой метод позволяет обеспечить приемлемое значение омических потерь, 60÷70 %, и рост эффективности ГБО на четвёртой гармонике с 0,1 % в регулярной системе до 0,5÷0,7 %.

Аналогичный, но трёхсекционный резонатор рассчитан и для повышения эффективности ГБО на третьей гармонике (см. рис. 4). Согласно вычислениям в этом случае использование секционирования снижает долю омических потерь с 65÷70 % в регулярной системе до приблизительно 40 %.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проекты 19–19–00599 (раздел 2) и 17–19–01605 (раздел 3)).

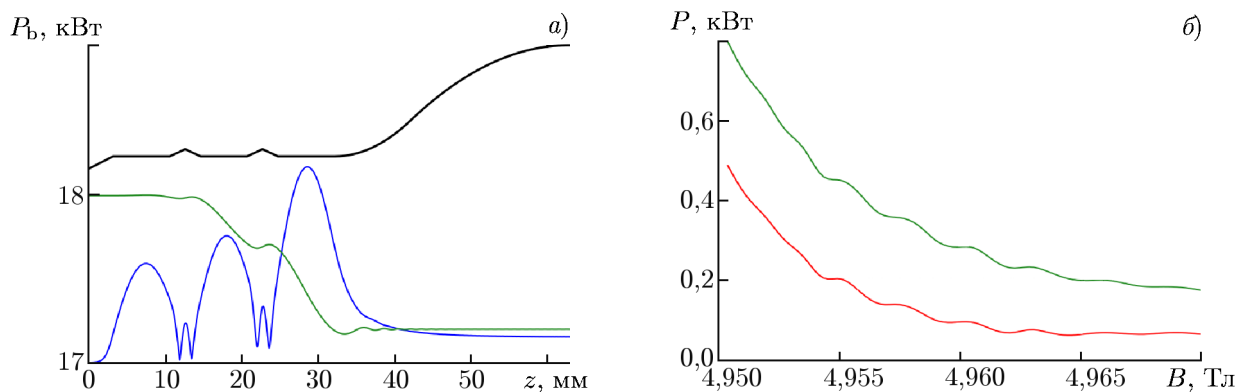


Рис. 4. Гиротрон с секционированным резонатором на третьей циклотронной гармонике. Панель *а*: оптимизированный профиль резонатора (чёрная линия), продольная структура поля рабочей моды (синяя линия), а также рассчитанное изменение энергии электронного пучка с продольной координатой (зелёная линия). Панель *б*: зависимости мощности, отдаваемой электронным пучком волне (зелёная линия), и мощности выходного излучения (красная линия) от магнитного поля

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Idehara T., Tsuchiya H., Watanabe O., et al. // Int. J. Infr. Millim. Waves. 2006. V. 27, No. 3. P. 319.
2. Hornstein M. K., Bajaj V. S., Griffin R. G., Temkin R. J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34, No. 3. P. 524.
3. Glyavin M. Y., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Y. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100, No. 1. Art. no. 015101.
4. Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiri J. R., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2011. V. 58, No. 8. P. 2777.
5. Idehara T., and Sabchevski S. P. // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2012. V. 33, No. 7. P. 667.
6. Glyavin M. Y., Luchinin A. G., Nusinovich G. S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101, No. 15. Art. no. 153503.
7. Alberti S., Braunmueller F., Tran T. M., et al. // Phys. Plasm. 2012. V. 19, No. 12. Art. no. 123102.
8. Idehara T., Glyavin M., Kuleshov A., et al. // Rev. Sci. Instr. 2017. V. 88. Art. no. 094708.
9. Jory H. Investigation of electronic interaction with optical resonators for microwave generation and amplification, R&D Tech. Rep. ECOM-01873-F. Palo Alto: Varian Associates, 1968. 20 p.
10. McDermott D. B., Luhmann N. C., Jr., Kupiszewski A., Jory H. R. // Phys. Fluids. 1983. V. 26, No. 7. P. 1936.
11. Lawson W., Destler W. W., Striffler C. D. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13, No. 6. P. 444.
12. Irwin K., Destler W. W., Lawson W., et al. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69, No. 2. P. 627.
13. Bratman V. L., Fedotov A. E., Kalynov Y. K., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 456.
14. Bandurkin I. V., Kalynov Yu. K., Savilov A. V. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17, No. 8. Art. no. 073101.
15. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н., Самсонов С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 823.
16. Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kalynov Y. K., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65. P. 2287.
17. Bratman V. L., Kalynov Y. K., Manuilov V. N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102, No. 24. Art.

- no. 245101.
18. Kalynov Yu. K., Manuilov V. N., Fiks A. Sh., Zavolskiy N. A. // *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 114. Art. no. 213502.
 19. Bratman V. L., Zorin V. G., Kalynov Yu. K., et al. // *Phys. Plasmas*. 2011. V. 18. Art. no. 083507.
 20. Bratman V. L., Izotov I. V., Kalynov Yu. K., et al. // *Phys. Plasmas*. 2013. V. 20. Art. no. 123512.
 21. Shalashov A. G., Vodopyanov A. V., Abramov I. S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 113. Art. no. 153502.
 22. Shalashov A., Gospodchikov E. // *IEEE Trans. Anten. Propag.* 2016. V. 64, No. 9. P. 3960.
 23. Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. // *Phys. Rev. Appl.* 2018. V. 10. Art. no. 034065.
 24. Bandurkin I. V., Kalynov Yu. K., Savilov A. V. // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2015. V. 62, No. 7. P. 2356.
 25. Bandurkin I. V., Kalynov Y. K., Osharin I. V., Savilov A. V. // *Phys. Plasmas*. 2016. V. 23, No. 1. Art. no. 013113.
 26. Bandurkin I. V., Kalynov Y. K., Makhalov P. B., et al. // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2017. V. 64, No. 1. P. 300.

Поступила в редакцию 26 апреля 2019 г.; принята в печать 29 августа 2019 г.

HIGH-HARMONIC GYROTRONS WITH AXIS-ENCIRCLING ELECTRON BEAMS AT IAP RAS

I. V. Bandurkin, V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, V. N. Manuilov, I. V. Osharin, and A. V. Savilov

The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences has for many years been developing sub-terahertz and terahertz large-orbit gyrotrons that permit selective oscillation at higher cyclotron harmonics than is possible in the conventional gyrotrons. Currently, experimental studies are conducted at two specialized facilities. A prototype universal sub-terahertz source for magnetic resonance spectroscopy is studied using a facility that generates long-pulse and continuous electron beams with particle energies of up to 30 KeV. Continuous selective oscillation at the second and third cyclotron harmonics with frequencies of 0.267 and 0.394 THz was obtained for a radiation power of 900 and 370 W, respectively. New resonators with periodic phase correctors have been developed to increase the efficiency of third-harmonic oscillation and obtain fourth-harmonic oscillation with frequencies of up to 0.65 THz. Using a facility with an electron energy of up to 80 KeV, we study the possibilities of increasing the pulse generation power at the third harmonic at frequencies close to 1 THz to employ in experiments on obtaining a gas discharge in a focused terahertz wave beam and generating high-power extreme ultraviolet radiation.