

УДК 621.385.69

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ С ПРИОСЕВЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

© 2023 г. И. В. Бандуркин¹, Ю. К. Калынов¹, И. В. Ошарин¹, А. В. Савилов¹, *,
Е. С. Семенов¹, Д. Ю. Щегольков¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”,
Нижний Новгород, России

*E-mail: savilov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Выполнен обзор работ на двух экспериментальных установках, на которых реализуются гиротроны с большой орбитой (ГБО), работающие в суб-терагерцовом частотном диапазоне на высоких гармониках электронной циклотронной частоты. На установке импульсного ГБО (80–100 кэВ/0.7–1.0 А) разрабатывается источник излучения с частотой 1 ТГц с киловаттным уровнем выходной мощности, который планируется использовать в плазменных приложениях. Непрерывный суб-терагерцовый ГБО (30 кэВ/0.7 А) создается как прототип универсального многочастотного источника для спектроскопических приложений. Описаны также сложные электродинамические системы, призванные повысить селективность и эффективность возбуждения высоких циклотронных гармоник в этих приборах, а также обеспечить перестройку частоты генерации.

DOI: 10.31857/S0367676522701125, EDN: KVNAFM

ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны являются наиболее мощными длинноимпульсными источниками излучения суб-терагерцового частотного диапазона. Поскольку рабочая частота гиротронов совпадает с электронной циклотронной частотой (или с гармоникой этой частоты), продвижение гиротронов в суб-терагерцовый и терагерцовый частотные диапазоны во многом связан с переходом к работе на гармониках циклотронной частоты. Естественно, с увеличением номера гармоники происходит резкое ослабление интенсивности электронно-волнового взаимодействия, что приводит к проблеме конкуренции рабочего колебания на высокой циклотронной гармонике с паразитными колебаниями, возбуждаемыми на основном циклотронном резонансе. Эта проблема особенно актуальна в субтерагерцовом диапазоне частот, когда спектр мод плотный из-за неизбежного использования сверхразмерных резонаторов, поэтому для реализации гиротронов на высоких гармониках требуются специальные методы повышения селективности.

Мощным электронным методом повышения селективности гиротрона является использование конфигурации гиротрона с большой орбитой

(ГБО) [1–7], основанного на использовании тонкого приосевого электронного пучка. В ГБО электроны взаимодействуют только с той поперечной модой резонатора, азимутальный индекс которой совпадает с номером циклотронной гармоники.

Такой подход позволил реализовать ГБО мощностью в сотни ватт, работающий на третьей циклотронной гармонике на частотах 1 ТГц (импульсный режим) и около 0.4 ТГц (непрерывный режим генерации) [5–7]. Эти работы были выполнены в ИПФ РАН на базе двух экспериментальных установок терагерцовых ГБО, а именно – установка “импульсный ГБО”, направленная на создание мощных (сотни ватт–киловатты) источников излучения с частотами до 1 ТГц для различных приложений (в частности, создание плазменного разряда ТГц диапазона как точечного источника мощного УФ-излучения), а также установка “универсальный непрерывный ГБО”, который разрабатывается как прототип многочастотного источника субтерагерцового излучения для спектроскопических приложений. В данной статье мы даем обзор современного состояния работ на этих двух установках.

ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГБО

Эта система работает в импульсном (~ 10 мкс) режиме при магнитных полях 10–14 Тл. В первых экспериментах [5] на основе приосевого электронного пучка с током до 0.7 А при напряжениях 50–80 кВ было достигнуто селективное возбуждение моды $TE_{3,7}$ на третьей циклотронной гармонике на частоте 1 ТГц при выходной мощности ~ 400 Вт и волновом КПД $\sim 1\%$. Относительно низкий КПД был вызван слабостью электронно-волнового взаимодействия на высокой циклотронной гармонике, что привело к необходимости использовать весьма протяженный (свыше 25 длин волн) рабочий резонатор с очень высокой дифракционной добротностью. В результате большая часть ($\sim 85\%$) мощности, отдаваемой пучком мощности рабочей волне, рассеивалась из-за омических потерь в стенках резонатора.

В настоящее время поставлена цель увеличения мощности этого ГБО до уровня в несколько кВт с целью его использования в качестве источника мощных импульсов, обеспечивающих разряд в газовой среде, что может быть способом реализации точечного источника мощного УФ-излучения [8, 9]. В качестве основного пути повышения мощности этого ГБО решено повысить мощность рабочего электронного пучка с ($80 \text{ кэВ} \cdot 0.7 \text{ А}$) до ($100 \text{ кэВ} \cdot 1.2 \text{ А}$). Проведены соответствующие расчеты формирующей такой пучок электронно-оптической системы. В такой конфигурации рабочего пучка, помимо двукратного увеличения его мощности, за счет роста осцилляторной скорости частиц происходит также и повышение интенсивности электронно-волнового взаимодействия. Последнее обеспечивает не только рост эффективности отбора энергии электронов рабочей волной, но также приводит и к сокращению длины рабочего резонатора до 16–18 длин волн. Соответствующее уменьшение дифракционной добротности рабочей волны снижает омические потери до 50%. В результате совокупный эффект этих трех факторов приводит к увеличению мощности такого ГБО на порядок.

Последнее утверждение, однако, верно лишь в том случае, когда обеспечена одномодовая генерация рабочей волны на третьей циклотронной гармонике. В то же время повышение мощности рабочего электронного пучка приводит к проблеме обеспечения одночастотной генерации рабочей моды $TE_{3,7}$ на третьей гармонике. Моделирование (проведенное на основе формализма, подробно описанного в [10]) показало, что в случае использования традиционного регулярного гиротронного резонатора (рис. 1а) имеет место конкуренция между рабочей модой $TE_{3,7}$ на третьей гармонике и паразитной модой $TE_{2,5}$, возбуждаемой на второй циклотронной гармонике. В результате хотя в рабочей точке (выбранной на плоскости

“магнитное поле–ток пучка”) стартовый ток для паразитной моды не превышен, в установленном режиме данного ГБО мы видим совместную генерацию двух мод на второй и третьей циклотронных гармониках (рис. 1а). При этом мощность генерации рабочей волны на третьей циклотронной гармонике оказывается примерно вдвое меньше уровня 4 кВт, который предсказывали расчеты для случая одномодовой генерации этой волны.

В качестве одного из возможных путей обеспечения селективности генерации на третьей циклотронной гармонике мы воспользовались подходом, основанном на использовании квазирегулярных резонаторов с продольными селективирующими неоднородностями [10–12]. В этом подходе используется резонатор со специальной резонансной неоднородностью (фазовым корректором), которая не возмущает рабочую волну, но обеспечивает значительные потери для квазикритических паразитных волн за счет их перераспределения в низкодобротные далекие от отсечки волны. Расчеты (рис. 1б) демонстрируют в таком резонаторе в одном фазовом корректоре достижение селективной одномодовой генерации волны на третьей циклотронной гармонике с уровнем выходной мощности, превышающим 4 кВт.

В работе [13] был предложен другой (хотя и в какой-то мере – аналогичный упомянутому выше) метод повышения селективности гиротронов на высоких циклотронных гармониках, основанный на использовании резонаторов с азимутальными селективирующими элементами (рис. 2). Принцип работы таких азимутальных неоднородностей – тот же, а именно – они являются резонансными для рабочей моды (и, соответственно, не искажают ее поперечную структуру и не останавливают ее вращение вокруг оси резонатора), но при этом существенным образом возмущают все паразитные моды. В работе [13] было показано, что использование резонатора с двумя азимутальными селективными элементами в описываемом здесь ГБО способно в несколько раз повысить стартовый ток паразитной моды $TE_{2,5}$, возбуждаемой на второй циклотронной гармонике, без какого-либо заметного влияния на возбуждение рабочей волны $TE_{3,7}$ на третьей гармонике.

Проведенное в дальнейшем моделирование данной сложной несимметричной системой на основе кода CST в рамках как “холодного” (чисто электродинамического), так и “горячего” (т.е. моделирование возбуждения системы реальным электронным пучком гиротрона) подходов, подтвердило селективные свойства этой системы. В частности, “горячее” моделирование (рис. 2) продемонстрировало селективное возбуждение приосевым электронным пучком рабочей волны $TE_{3,7}$. При этом азимутально несимметричное сечение ра-

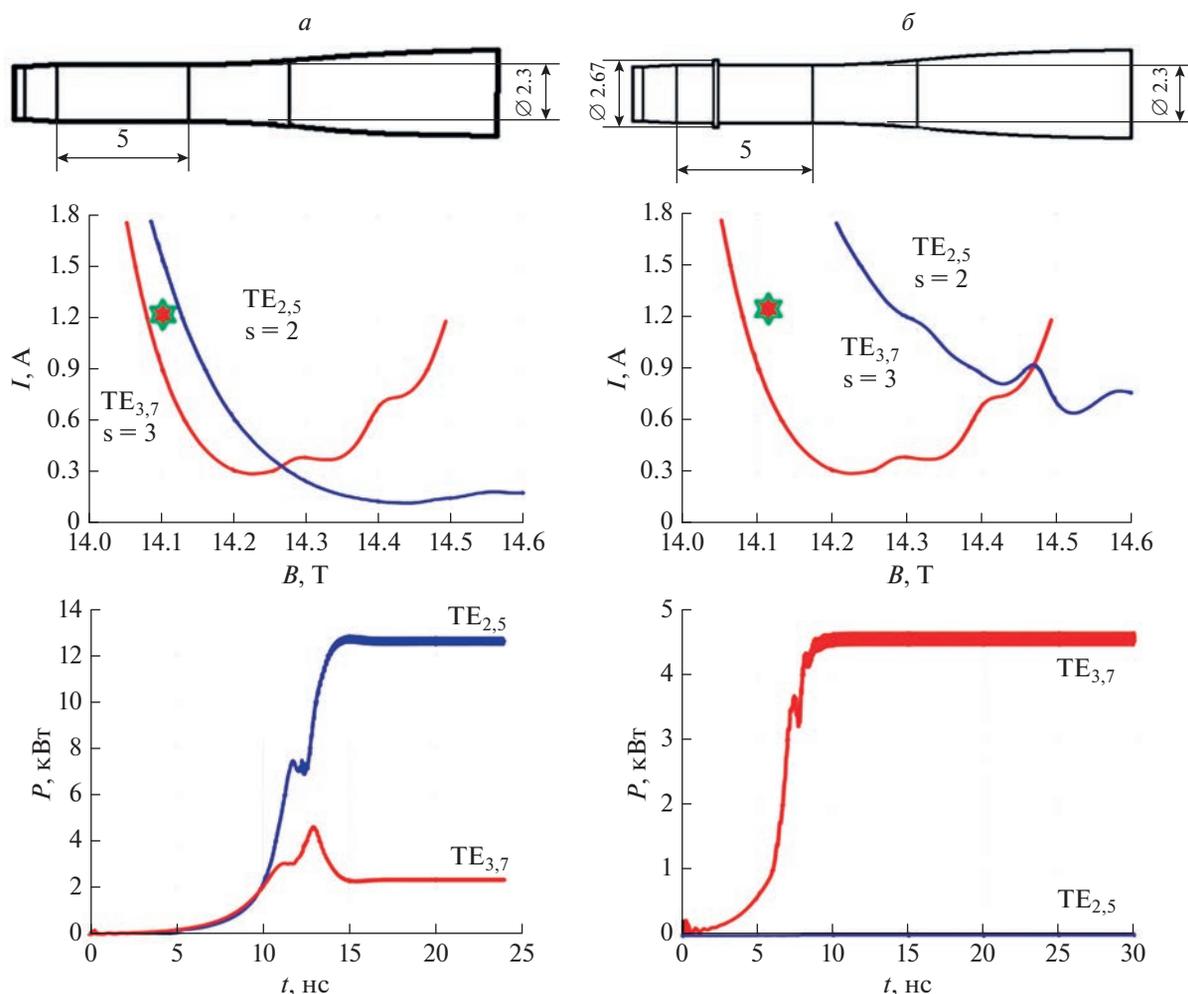


Рис. 1. Импульсный терагерцовый гиротрон киловаттного уровня мощности. Профиль резонатора, зависимости стартового тока рабочей моды $TE_{3,7}$ на третьей гармонике и паразитной модой $TE_{2,5}$, на второй циклотронной гармонике от магнитного поля, расчетные зависимости выходной мощности излучения каждой из мод от времени в процессе возбуждения гиротрона. Случай традиционного гиротронного квазирегулярного резонатора (а) и резонатора с селективной неоднородностью (б).

бочего резонатора не приводило к остановке вращения этой волны (рис. 2б). Структура группировки электронного пучка в поле возбуждаемой им волны соответствовала взаимодействию на третьей циклотронной гармонике (рис. 2в). Полученный в моделировании выходной волновой сигнал (рис. 2г) соответствовал стационарной генерации на частоте около 1 ТГц (рис. 2д) с мощностью около 3.6 кВт, что примерно совпадало мощности рабочей волны, предсказываемой моделированием в рамках более простой квазианалитической модели (см. рис. 1б).

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ НЕПРЕРЫВНЫЙ ГБО

Установка “непрерывный универсальный гиротрон” основана на использовании криомагнита 5 Тл и электронной пушки, формирующей

приосевой электронный пучок с ускоряющим напряжением 30 кэВ, током до 0.7 А и с пич-фактором 1.3–1.5 [6, 7]. Под универсальностью установки подразумевается то, что при использовании одной и той же электронно-оптической системы простой сменой рабочих резонаторов в этой установке должна быть обеспечена работа гиротрона на второй, третьей и четвертой циклотронных гармониках на привлекательных для спектроскопических приложений частотах 0.26, 0.39 и 0.52 ТГц соответственно с уровнем выходной мощности в сотни Вт.

В настоящее время селективная работа этого ГБО в непрерывном режиме на частотах 0.26 и 0.39 ТГц достигнута на основе использования простейшего, традиционного для гиротронов квазирегулярного резонатора [7]. Один и тот же резонатор использовался для селективного воз-

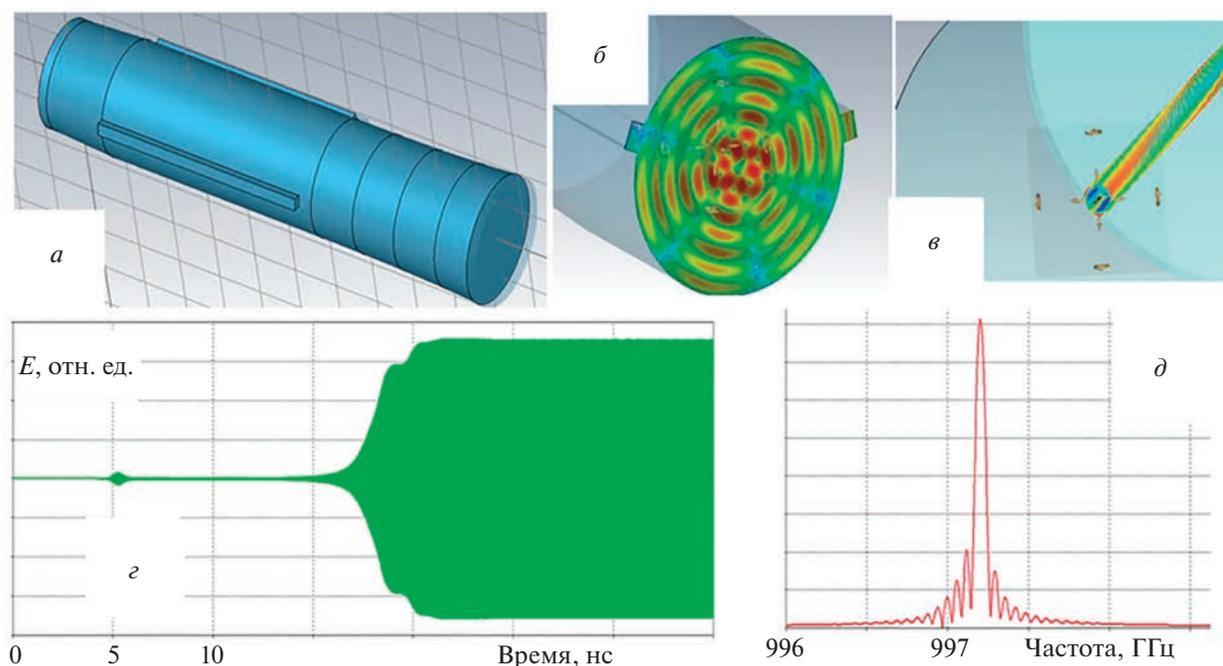


Рис. 2. Импульсный терагерцовый гиротрон киловаттного уровня мощности с азимутально-несимметричным поперечным сечением резонатора – “горячее” CST моделирование. Профиль резонатора (а), рассчитанная поперечная структура поля внутри рабочего резонатора (б), пространственная структура группировки в электронном пучке (в), зависимость электрического поля выходной волны от времени в процессе возбуждения гиротрона (г), а также частотный спектр выходного излучения в установившемся режиме (д).

буждения моды $TE_{2,5}$ на второй циклотронной гармонике (0.267 ТГц) и моды $TE_{3,7}$ на третьей гармонике (0.394 ТГц). При этом переключение номера рабочей гармоники достигалось небольшим изменением рабочего магнитного поля, так что волна на третьей гармонике возбуждалась при магнитных полях ниже 4.97 Тл, тогда как оптимальный режим генерации второй гармоники наблюдался при полях свыше 5.00 Тл. В обоих режимах был зарегистрирован уровень выходной мощности в сотни ватт в режиме стабильной непрерывной генерации.

Интересно, что в промежуточной области магнитных полей, соответствующей переходу от генерации на третьей гармонике к одномодовой генерации на второй гармонике, в эксперименте наблюдались сложные режимы конкуренции и совместной генерации двух волн на второй и третьей гармонике, в том числе и автомодуляционные режимы [14].

Ближайшая цель работ на этой экспериментальной установке – обеспечить работу ГБО на четвертой циклотронной гармонике на частоте 0.52 ТГц с мощностью на уровне 100 Вт. Использование в этом случае традиционного для гиротронов квазирегулярного резонатора затруднено тем, что вследствие слабости электронно-волнового взаимодействия на столь высокой гармонике для старта такого колебания требуется протяжен-

ный (50–60 длин волн) рабочий резонатор, в котором из-за огромной (на уровне 10^5) дифракционной добротности доля омических потерь составляет более 95%.

В такой ситуации требуются специальные резонаторы, совмещающие в себе протяженное пространство электронно-волнового взаимодействия и относительно низкую дифракционную добротность. В работе [15] был предложен метод решения такой проблемы, который основан на возбуждении высокой (многовариационной) продольной моды в “гиротронном” режиме (т.е. при гиротронном резонансе электронов с волной $\omega \approx N\Omega_c$ без доплеровского сдвига гармоники электронной циклотронной частоты $N\Omega_c$) в секционированном резонаторе с периодическими фазовыми корректорами. Чтобы обеспечить возбуждение четвертой циклотронной гармоники в этом режиме, был разработан протяженный резонатор на основе возбуждения моды $TE_{4,5}$ с пятью продольными вариациями. Расчеты показывают, что секционирование снижает дифракционную добротность рабочей волны со значения более 100000 до ~ 30000 [10, 15]. Благодаря этому доля омических потерь снижается до 85%, что соответствует увеличению КПД выходной волны в 3 раза (по сравнению с использованием регулярного резонатора).

Другой проект, который ведется в настоящее время на установке непрерывного универсально-гиротрона, направлен на создание суб-терагерцового генератора с плавной непрерывной перестройкой частоты генерации в широкой (около 10%) полосе рабочих частот. Уникальность цели этого проекта состоит в том, что в нем предлагается решить одну из ключевых проблем гиротронов. В этих автогенераторах, реализованных по традиционным схемам, перестройка частоты может осуществляться либо в очень узкой полосе (доли процентов, что определяется типичными добротностями рабочих мод гиротронов $\sim 10^3 - 10^4$), либо дискретным образом за счет перехода с одной рабочей поперечной моды на другую. Попытки обеспечить квазинепрерывную и относительно широкополосную (с полосой хотя бы порядка 1%) перестройку частоты генерации за счет перехода в режим гиро-лампы обратной волны приводят к резкому падению эффективности генерации. При этом, однако, важными требованиями, которые предъявляют к спектроскопическим источникам современные приложения, являются, с одной стороны, стабильность и частотная узкополосность выходного излучения, а с другой стороны, возможность перестройки частоты генерации в широкой (проценты) полосе частот, что существенно повысило бы информативность спектрального исследования различных сред и объектов.

Идея предлагаемого нами гиротрона с широкополосной частотной перестройкой родилась в процессе анализа результатов одной из серий экспериментов с универсальным гиротроном, в которой был в очередной раз воспроизведен режим непрерывной генерации на третьей циклотронной гармонике на частоте около 400 ГГц [16]. Целью этих работ было тестирование квазиоптической системы фокусировки выходного волнового пучка гиротрона до поперечного размера порядка нескольких длин волн. При этом использовалась система визуализации распределения поля в поперечном пятне волнового пучка, основанная на реализации плазменного СВЧ-пробоя в газовой струе, подаваемой в область фокусировки. В плазменном разряде легко можно было различить точки пучности волнового поля, которые соответствовали структуре стоячей волны (рис. 3). Очевидно, формирование стоячей волны произошло за счет отражения излучения от металлической системы ввода газового потока. По расстоянию между точками пучности легко было измерить длину волны, генерируемой гиротроном. Оказалось, что если без отражающей нагрузки в гиротроне уверенно и стабильно возбуждалась волна на третьей циклотронной гармонике на длине волны около 0.77 мм, то отражение части выходного сигнала гиротрона назад в рабочий резонатор приводило к переходу к генерации на

приблизительно втрое большей длине волны (около 2.5 мм), что должно было соответствовать генерации на основной гармонике электронной циклотронной частоты.

С учетом того, что в резонаторе с круглым поперечным сечением приосевой электронный пучок на основной циклотронной гармонике может возбуждать только поперечные моды с азимутальным индексом, равным единице, единственным кандидатом на роль возбуждающегося низкочастотного “паразита” стала мода $TE_{1,3}$. Однако для наблюдавшейся в эксперименте длины волны генерации этой моды циклотронный электронно-волновой резонанс обеспечивался не в регулярной части резонатора, а в его выходной секции с конусным расширением, предназначенной для вывода волны, возбуждаемой электронами в регулярной части резонатора. Это наше предположение подтвердилось результатами численного моделирования взаимодействия электронного пучка с модой $TE_{1,3}$ в нерегулярной части использовавшемся в эксперименте резонатора [16]. Как показало наше моделирование, наличие отражения части выходного излучения обратно в резонатор приводило к тому, что в его конусной части возбуждалась волна $TE_{1,3}$ со сложной многовариационной продольной структурой (рис. 3). При этом стартовые токи оказались превышены для разных продольных мод (обладающих разными частотами), которые могли возбуждаться с высокой (десятки процентов) эффективностью. Важно, что в отсутствие отражения такого типа генерация оказывалась невозможной.

Из результатов этого эксперимента мы сделали следующие выводы. Во-первых, за счет отражения части выходного волнового сигнала от удаленного (расстояние до него от резонатора – сотни длин волн) рефлектора может быть обеспечено возбуждение сложной волновой структуры в нерегулярном резонаторе в режиме стабильной одночастотной генерации. Во-вторых, согласно расчетам, такие волновые структуры могут возбуждаться в широком диапазоне рабочих частот с высокой эффективностью даже в ситуации, когда электронный пучок обладает большим скоростным разбросом.

На основе этих выводов нами была предложена схема гиротрона с широкополосной частотной перестройкой, основанная на нерегулярный низкодобротный резонатор, а также узкополосного зеркала, расположенного за окном гиротрона (рис. 4). Профиль резонатора должен быть столь неоднороден, чтобы в нем не существовало близких к отсечке высокодобротным мод, так что возбуждение такого резонатора (по крайней мере, в области рабочих магнитных полей) должно осуществляться только за счет отражения рабочей волны от внешнего удаленного рефлектора. Как

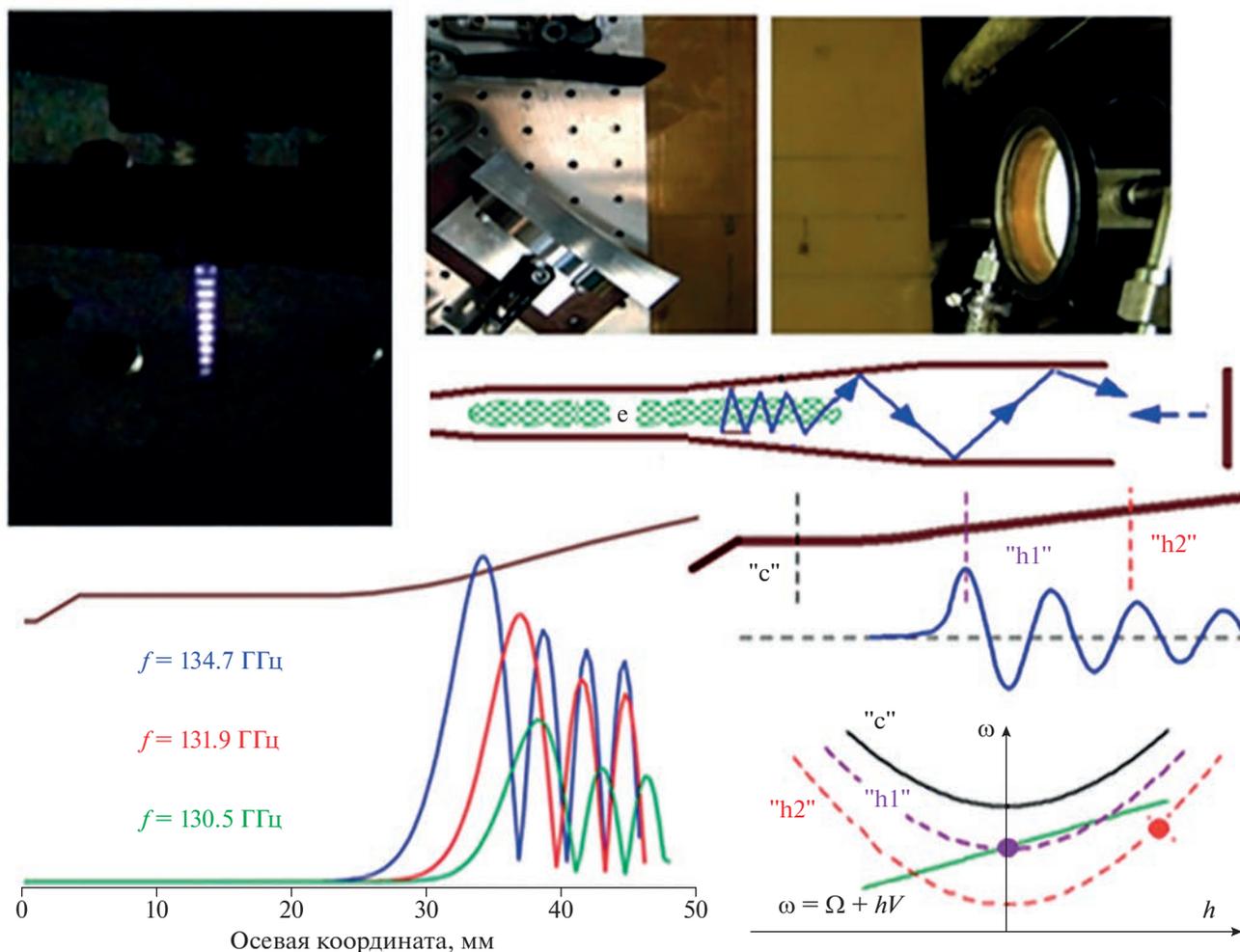


Рис. 3. Эксперимент, в котором наблюдалось возбуждение волны на первой циклотронной гармонике в выходной конусной секции резонатора. Фото пробоя в области внешнего отражателя. Дисперсионные характеристики возбуждаемой поперечной моды в регулярной и конусной частях резонатора, а также расчетные структуры волн, возбуждаемых на различных частотах.

следствие, рабочая частота рефлектора фактически “диктует” системе частоту возбуждаемых в ней электромагнитных колебаний. Соответственно, перестройка частоты генерации в такой системе может быть реализована или изменением рабочей частоты рефлектора, или просто заменой одного рефлектора другим. Такие манипуляции с внешних рефлекторов могут осуществляться легко, поскольку он располагается вне зоны вакуума гиротрона. В проведенная нами серия предварительных численных расчетов найдены оптимальный профиль резонатора, удовлетворяющий описанным выше условиям. Эти расчеты демонстрируют возможность реализации суб-терагерцового гиротрона, работающего в непрерывном режиме генерации и обладающего 10-процентной полосой частотной перестройки (125–137 ГГц). В пределах этой полосы эффективность генерации падает от 40 (на меньших частотах) до 10% (на

больших частотах). Для рабочего электронного пучка 0.5 А/30 кэВ это соответствует мощности в несколько кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно утверждать, что гиротроны с большой электронной орбитой, основанные на использовании относительно маломощных электронных пучков, представляют собой интересные с точки зрения самых разных приложений, требующих стабильное узкополосное суб-терагерцовое излучение. Привлекательны их относительная компактность и простота, умеренные величины рабочих магнитных полей, которые требуются для достижения суб-терагерцовых частот, а также уникальные (стабильность, узкополосность) свойства выходного излучения. Кроме того, использование

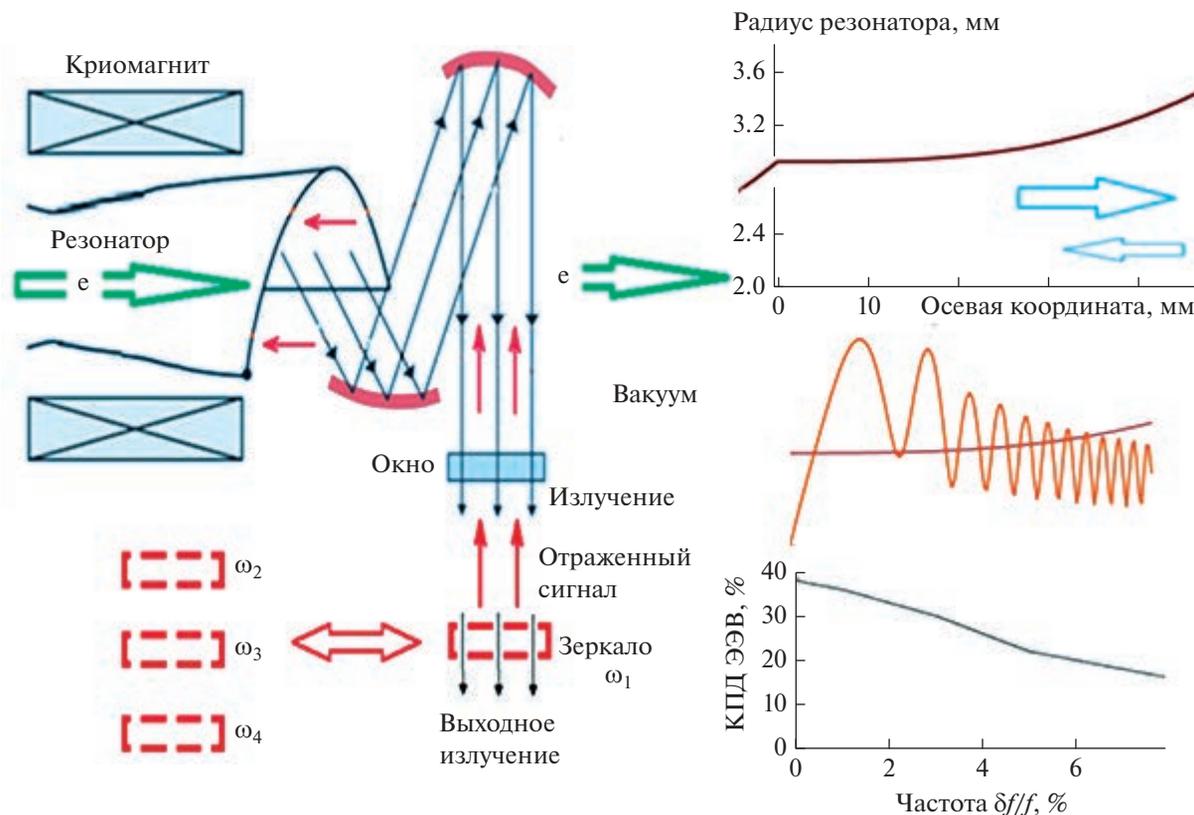


Рис. 4. Иллюстрация схемы гиротрона с частотно-перестраиваемыми зеркалами, профиль резонатора, характерная продольные структура волны, а также зависимость КПД электронно-волнового взаимодействия от частоты (идет отсчет от частоты f_0 , соответствующей частоте отсечки в самой узкой области резонатора).

сложных электродинамических систем в этих приборах открывает богатые возможности с точки зрения повышения селективности возбуждения высоких циклотронных гармоник (что дает возможность или повысить мощность генерации в уже освоенных частотных диапазонах, или выйти на более высокие уровни рабочих частот), а также открывает пути к реализации новых схем гиротронов с уникальными свойствами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты № 19-19-00599 – раздел “Импульсный терагерцовый ГБО” и № 22-19-00490 – раздел “Универсальный непрерывный ГБО”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jory H. Research and development technical report ecom-01873-f. Technical Report ECOM-01873-F. Palo Alto: Varian Associates, 1968.
2. McDermott D.B., Luhmann N.C. Jr., Kupiszewski A., Jory H.R. // Phys. Fluids. 1983. V. 26. P. 1936.
3. Lawson W., Destler W.W., Striffler C.D. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. PS-13. P. 444.
4. Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Y.K. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 456.

5. Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Manuilov V.N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. No. 245101.
6. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.K. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65. P. 2287.
7. Kalynov Yu.K., Manuilov V.N., Fiks A.Sh., Zavolysky N.A. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114. Art. No. 213502.
8. Shalashov A., Gospodchikov E. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 64. P. 3960.
9. Abramov I.S., Gospodchikov E.D., Shalashov A.G. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 10. Art. No. 034065.
10. Bandurkin I.V., Kalynov Y.K., Makhalov P.B. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64. P. 300.
11. Kalynov Yu.K., Osharin I.V., Savilov A.V. // Phys. Plasm. 2016. V. 23. Art. No. 053116.
12. Bandurkin I.V., Fokin A.P., Glyavin M.Y. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2020. V. 41. P. 1412.
13. Bandurkin I.V., Kalynova G.I., Kalynov Yu.K. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2021. V. 68. P. 347.
14. Kalynov Y.K., Osharin I.V., Savilov A.V. // IEEE Trans. Electron Devices. 2020. V. 67. P. 3795.
15. Bandurkin I.V., Kalynov Y. K., Osharin I.V., Savilov A.V. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. Art. No. 013113.
16. Guznov Yu.M., Kalynov Y.K., Osharin I.V., Savilov A.V. // IEEE Trans. Electron Devices. 2021. V. 69. P. 325.

High-harmonic large-orbit terahertz gyrotrons for physical applications

I. V. Bandurkin^a, Yu. K. Kalynov^a, I. V. Osharin^a, A. V. Savilov^{a, *},
E. S. Semenov^a, D. Yu. Shchegolkov^a

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

**e-mail: savilov@ipfran.ru*

An overview is given of works on two experimental installations that implement large-orbit gyrotrons (LOG) operating in the sub-terahertz frequency range at high harmonics of the electronic cyclotron frequency. At the installation of a pulsed LOG (80–100 keV/0.7–1.0 A), a radiation source with a frequency of 1 THz with a kilowatt output power level is being developed, which is planned to be used in plasma applications. A continuous subterahertz LOG (30 keV/0.7 A) is being created as a prototype of a universal multi-frequency source for spectroscopic applications. Complex electrodynamic systems are also described, designed to increase the selectivity and efficiency of excitation of high cyclotron harmonics in these devices, as well as to ensure the tuning of the generation frequency.