

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ НА ВЫСОКИХ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ

*И.В. Бандуркин, В.Л. Братман, Ю.К. Калынов,
В.Н. Мануилов, А.В. Савилов и С.В. Самсонов*

Обсуждаются результаты первых экспериментов и перспективы освоения субтерагерцового и терагерцового частотного диапазона автогенераторами, излучающими на высоких циклотронных гармониках, а также гироумножителями. Для обеих разновидностей гиротронов селективное возбуждение высоких гармоник упрощается при использовании пучков электронов, движущихся по винтовым траекториям с ведущими центрами вблизи оси резонатора (конфигурация гиротрона с большой орбитой). В гироумножителях дополнительные селективные свойства обеспечиваются навязыванием частоты и структуры поля либо входным низкочастотным сигналом, либо – в случае самовозбуждающегося умножителя – сигналом, возбуждаемым тем же самым электронным пучком, который используется в качестве нелинейной среды для умножения частоты. В последнем случае для терагерцового диапазона привлекательны схемы, в которых возбуждение низкочастотного и высокочастотного излучения происходит в одном объеме.

Введение

Гиротроны [1–3] являются наиболее распространенной и эффективной разновидностью широкого класса электровакуумных приборов – мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [1]. Действие этих приборов основано на использовании индуцированного циклотронного излучения пучков электронов, движущихся в однородном магнитостатическом поле. Отличительной особенностью гиротронов является то, что в них для уменьшения влияния скоростного разброса частиц на доплеровское уширение линии циклотронного резонанса используется взаимодействие электронов с волнами, распространяющимися почти поперек поступательного движения частиц. Благодаря сильной связи с такими волнами на основном циклотронном резонансе в гиротронах удается селективно работать в открытых резонаторах очень большого объема. В результате, в миллиметровом диапазоне длин волн гиротроны обеспечивают намного большие выходные мощности, чем любые другие приборы.

Переход в субмиллиметровый и терагерцовый диапазоны приводит к необходимости обеспечения в гиротронах очень сильных магнитных полей: например, при частоте генерации 1 ТГц – более 36 Тл при работе на основном циклотронном резонансе и более 18 Тл на второй циклотронной гармонике. Лучшие (и довольно

дорогие) современные криомагниты обеспечивают в необходимом объеме магнитные поля с индукцией примерно до 20 Тл (до 10–15 Тл в «сухих» криомагнитах), а импульсные соленоиды – более 40 Тл в разовых импульсах. Первый субмиллиметровый гиротрон был реализован еще в начале 1970-х годов [4]. Этот генератор на второй гармонике на базе криомагнита обеспечивал на частоте 330 ГГц мощность 1.5 кВт в непрерывном режиме генерации. Затем субмиллиметровые гиротроны с криомагнитами и импульсными солеоидами развивались в ряде лабораторий России, США, Японии и Австралии [5–7]. Недавно в гиротроне на основном циклотронном резонансе с импульсным соленоидом [8] и в гиротроне на второй гармонике с криомагнитом [9] был преодолен частотный рубеж 1 ТГц. Однако из-за необходимости использования очень сильных магнитных полей субмиллиметровые гиротроны до сих пор являются уникальными устройствами. Ситуация могла бы существенно упроститься, если бы удалось создать приборы на высоких ($s > 2$, s – номер гармоники) циклотронных гармониках, для которых требуются более низкие поля. Однако в традиционных гиротронах работа на высоких гармониках практически невозможна из-за густого спектра мод и возникающей вследствие этого конкуренции со стороны низких гармоник [10, 11]. Ситуация усугубляется тем, что для приемлемых напряжений гиротронов 10–100 кВ и достижимых при этом вращательных скоростях частиц связь электронов с модами резонатора довольно быстро ослабляется с номером циклотронной гармоники [1–3]. Поэтому возбуждение высоких гармоник затруднительно и само по себе и требует, по крайней мере, высокой добротности резонатора; тем более им трудно выиграть соревнование у низких гармоник. Следует также иметь в виду осложняющее обстоятельство в виде значительного увеличения роли омических потерь и снижения добротности резонаторов в субмиллиметровом диапазоне [12].

Из сказанного ясно, что для ослабления указанных факторов и получения терагерцовой генерации на высоких гармониках необходимы дополнительные меры электродинамической и/или электронной селекции мод. В качестве более селективных систем в данной статье обсуждаются два известных, но недостаточно развитых типа приборов: гиротроны с большой орбитой (ГБО) [13–16] и гироумножители [1, 13, 17– 22]. В ГБО благодаря использованию пучка электронов, движущихся по винтовым траекториям с осями, охватывающими ось электродинамической системы (приосевой пучок), удастся повысить связь электронов с волнами на высоких гармониках, а также значительно проредить спектр потенциально возбуждаемых мод. В гироумножителях навязывание электронам частоты модулирующего низкочастотного сигнала позволяет добиться селективности на высокой гармонике этого сигнала, которая резонансно взаимодействует с электронами на высокой циклотронной гармонике. Для повышения селективности гироумножителей в них также целесообразно использовать приосевые электронные пучки.

1. Резонанс на циклотронных гармониках

Пусть электрон вращается с циклотронной частотой $\omega_B = eB_0/m_e\gamma$ по ларморовской окружности $x = r \cos \omega_B t$, $y = r \sin \omega_B t$ в однородном магнитном поле B_0 (рис. 1, а). Здесь e , m_e , $r = v/\omega_B$ и $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ – заряд, масса, ларморовский радиус и Лоренц-фактор электрона; $v = \beta c$ – его вращательная скорость; c – ско-

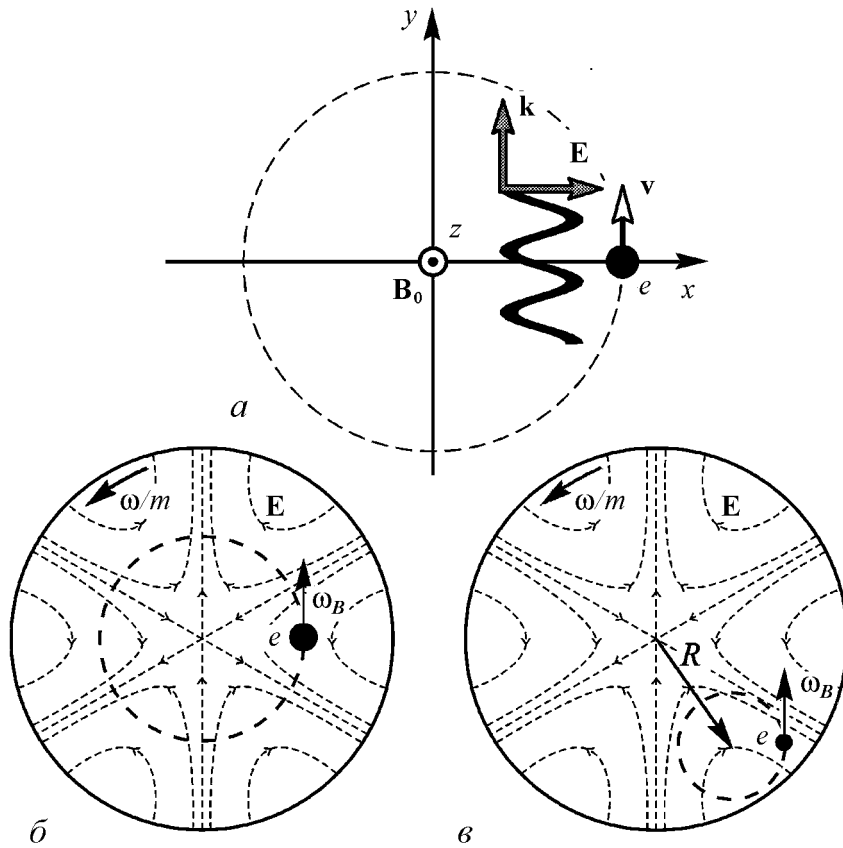


Рис. 1. Взаимодействие вращающегося электрона с СВЧ-волной на высокой циклотронной гармонике: неоднородное на траектории частицы поле плоской волны (а); мода $TE_{3,1}$ круглого волновода – синхронно вращающийся полевой секступоль (излучение только на третьей гармонике) для электрона, вращающегося вокруг оси волновода (б); весь набор полевых мультиполей (излучение на любой гармонике) для смещенного от оси центра вращения электрона (в)

рость света. Рассмотрим воздействие на электрон слабой монохроматической волны, распространяющейся в плоскости вращения частицы с вектором электрического поля $iE_x e^{i(\omega t - ky)}$, лежащем в этой же плоскости. Пространственная неоднородность волны e^{-iky} на траектории колеблющегося электрона приводит к появлению в силе гармоник, кратных циклотронной частоте,

$$E_x = iE e^{i\omega t} \sum J_s(kr) e^{-is\omega_B t}, \quad (1)$$

где J_s – функция Бесселя s -го порядка. Вследствие этого резонансное воздействие возможно не только при совпадении частот волны и вращения электрона (основной циклотронный резонанс), но и на всех циклотронных гармониках

$$\omega = s\omega_B, \quad s = 1, 2, \dots \quad (2)$$

При резонансе на s -й гармонике работа поля над частицей за период ее обращения $T = 2\pi/\omega_B$ равна $eEvJ'_s T$, где $J'_s(kr)$ – производная функции Бесселя. Таким образом, для амплитуды вращающегося полевого мультиполя, резонансно воздействующего на частицу на s -й гармонике, имеем $E_s = EJ'_s(s\beta)$, где учтено также,

что $kr = s\beta$. При малой скорости частицы ($\beta \ll 1$) эта величина быстро убывает с ростом номера гармоники

$$E_s \approx \frac{(s\beta)^{s-1}}{2^s s!}. \quad (3)$$

Для взаимодействия электрона не с плоской, а с бегущей по азимуту поперечно-электрической волной $TE_{m,p}$ ($m \neq 0$) цилиндрического резонатора гиротрона (рис. 1, б) поле вблизи оси совпадает с полем единственного $2m$ -поля, вращающегося с угловой частотой $\Omega = \omega/m$. Поэтому при вращении частицы точно вокруг оси волновода резонансное взаимодействие возможно лишь с волной попутного вращения и на единственной циклотронной гармонике $s = m$. Электрическое поле резонансного мультиполя имеет такую же зависимость от расстояния до центра вращения, что и в случае плоской волны: $E_\varphi \sim J'_m(m\beta)$ (ρ, φ – полярные координаты с центром на оси волновода).

Если центр вращения электрона отстоит от оси резонатора на расстояние R (рис. 1, в), то, как и в плоской волне, в волне $TE_{m,p}$ содержится весь ряд полевых мультиполей, вращающихся вокруг центра вращения электрона. Действительно, с помощью теоремы сложения для бесселевых функций мембранная функция $\Pi_{m,p}(\rho, \varphi) = J_m(v_p \rho/a) e^{im\varphi}$, описывающая поперечную структуру моды, может быть представлена в виде

$$\Pi_{m,p}(\rho, \varphi) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} C_s \Pi_{s,p}(\rho_e, \varphi_e), \quad (4)$$

где ρ_e, φ_e – полярные координаты с началом в центре электронной орбиты,

$$C_s = (-1)^m J_{m-s}(v_p R/a) e^{i(m-s)\psi}, \quad (5)$$

ψ – азимут ведущего центра электрона в координатах ρ, φ ; v_p – p -й положительный корень функции Бесселя J_m ; a – радиус волновода. Из (4), (5) ясно, что при $R \neq 0$ электрон может резонансно взаимодействовать на гармонике s с модой, имеющей любой азимутальный индекс m , если только отличен от нуля структурный фактор C_s (знак m определяет направление вращения мультиполя). Для вращающейся точно вокруг оси волновода ($R = 0$) частицы, как и ранее, убеждаемся, что резонансное взаимодействие возможно только при совпадении номера циклотронной гармоники с азимутальным индексом моды. Это правило запрещает возбуждение большого числа мод в гиротроне с приосевым пучком (электронная селекция мод). Ясно также, что для такого пучка достигается максимальная связь с гармоникой. Эти свойства следовали уже из работы [23], а затем были независимо использованы в гиротронах с большой орбитой [13].

2. Гиротроны с большой орбитой

В традиционных гиротронах на основной и второй циклотронных гармониках, как правило, используются развитые в поперечном направлении пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям, оси которых смещены относительно

оси цилиндрического резонатора (поливинтовые, а точнее, – полиосевые пучки). Такие пучки формируются сравнительно простыми и хорошо развитыми магнетронно-инжекторными пушками [24]. При резонансном магнитном поле полиосевой пучок, в принципе, способен возбуждать на любой гармонике любую моду резонатора гиротрона. Однако, поскольку связь с гармониками убывает с ростом их номера, для возбуждения высоких гармоник требуются большие токи. Поэтому вплоть до очень больших размеров пучка и резонатора удастся обеспечивать селективное возбуждение мод на основном резонансе и получать высокие мощности выходного излучения и КПД. При меньших поперечных сечениях и более редком спектре мод полиосевой пучок обеспечивает также селективное и эффективное возбуждение на второй гармонике. Однако при попытке возбуждения таким пучком третьей гармоники из-за ослабления связи и густого спектра паразитных мод, резонансных с электронами на низких гармониках, ситуация становится сложной даже на миллиметровых волнах, где для сужения полосы циклотронного резонанса и увеличения добротности относительно просто изготовить длинный резонатор. Тем более это сложно в субмиллиметровом диапазоне, где велики требования к точности изготовления и где к тому же добротность резонатора существенно ограничена омическими потерями. Использование приосевых пучков позволяет существенно проредить спектр резонансных мод и добиться селективного возбуждения высоких гармоник.

Взаимодействие приосевого пучка с модой $TE_{m,p}$ в условиях резонанса на m -й гармонике происходит аналогично тому, как это имеет место в обычном гиротроне. На входе в пространство взаимодействия электроны равномерно распределены на ларморовской окружности по фазам вращения. При этом равное число частиц находится в тормозящих и ускоряющих фазах вращающегося $2m$ -поля, соответствующего рабочей моде (рис. 2, *а*). Поле волны модулирует энергии частиц, после чего, вследствие релятивистской зависимости циклотронной частоты электрона от его энергии, частицы, находящиеся в тормозящих (ускоряющих) фазах волны, начинают вращаться быстрее (медленнее). В результате происходит азимутальная группировка частиц и на ларморовской окружности образуется m электронных сгустков (рис. 2, *б*). Для того, чтобы сгустки эффективно отдавали энергию волне, они должны образовываться недалеко от центров тормозящих фаз. Это достигается, когда частота вращения мультиполя слегка превышает циклотронную частоту: $\omega_B \leq \Omega$ (рис. 2, *в*). В этом случае оптимальное смещение сгустков относительно волны на длине взаимодействия L определяется оценкой

$$\frac{(\Omega - \omega_B)L}{v_z} \sim \frac{\pi}{s}, \quad (6)$$

где v_z – скорость электронов вдоль оси резонатора. Это соотношение определяет также и ширину линии циклотронного резонанса

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \sim \frac{1}{sN}, \quad (7)$$

где $N = \omega_B L / 2\pi v_z$ – число вращений электрона в пространстве взаимодействия.

Согласно расчетам, эффективность гиротронов на высоких гармониках, в принципе, может быть сравнимой с эффективностью гиротронов на основном резонансе, но реализация подобных систем, как правило, сопряжена с более значительными

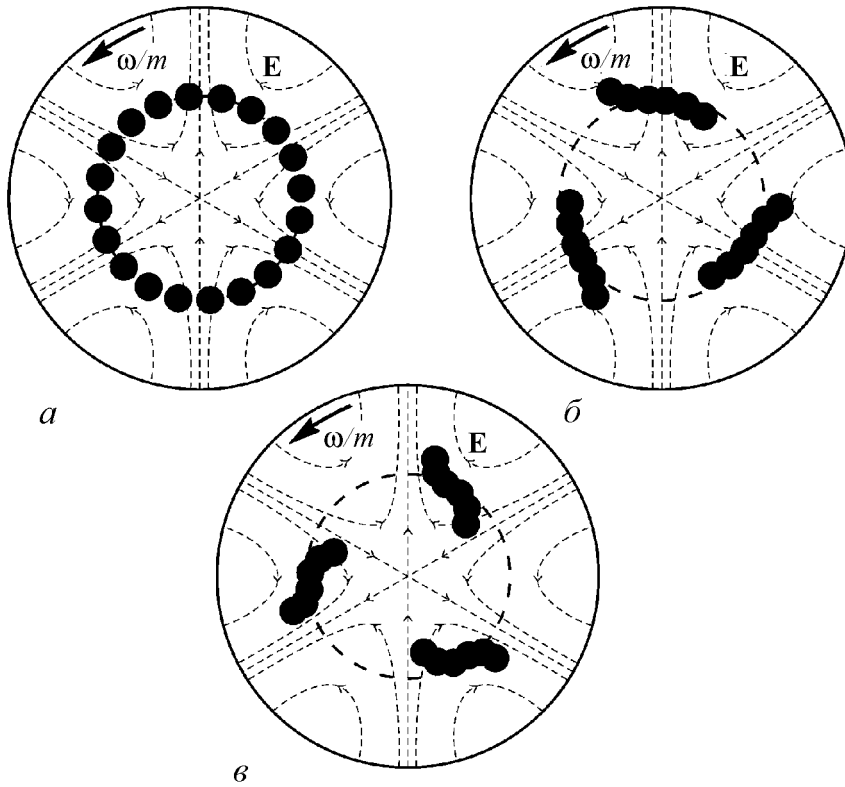


Рис. 2. Фазовая группировка приосевого электронного пучка в ГБО на третьей циклотронной гармонике: равномерное распределение электронов по фазам относительно волны на входе (а), образование электронных сгустков на границе ускоряющей и тормозящей фаз (б), смещение сгустков в тормозящую фазу волны (в)

трудностями. Как уже отмечалось, для возбуждения гармоник требуются более высокие добротности резонаторов и большие электронные токи. Действительно, с учетом формулы (3) для амплитуды полевого мультиполя, а также выражения для электронного КПД в приближении малого сигнала (см., например, [2, 3]) из уравнения баланса мощностей получаем следующую функциональную зависимость стартового тока гиротрона на произвольной циклотронной гармонике от основных параметров:

$$I_{st} \propto \frac{1}{G_{m,s} \beta_{\perp}^{2s} (L/\lambda)^2 Q}. \quad (8)$$

Здесь L и Q – длина и полная добротность резонатора (с учетом дифракционных и омических потерь),

$$G_{m,s} = \frac{J_{m-s}^2(v_p R/a)}{(v_p^2 - m^2) J_m^2(v_p)} \quad (9)$$

– фактор возбуждения моды $TE_{m,p}$ пучком с радиусом R на s -й циклотронной гармонике. Возрастание тока (8) из-за убывания амплитуды мультиполя (3) с ростом номера гармоники может частично компенсироваться ростом дифракционной добротности резонатора фиксированного размера. Эта возможность ограничена, однако, омическими потерями, некоторого уменьшения которых можно добиться при работе на модах резонатора с высокими радиальными индексами p .

Используя приосевые пучки, мы получили в ГБО на третьей циклотронной гармонике излучение на наиболее высоких частотах 0.37–0.41 ТГц с мощностью 10–20 кВт в импульсах микросекундной длительности [25]. При этом в качестве электродинамической системы использовался традиционный гиротронный резонатор в виде участка слабонерегулярного цилиндрического волновода, ограниченного с катодного конца запердельным для рабочей волны сужением и с коллекторного конца – плавным расширением в сторону выходного волновода (рис. 3, а). Поскольку приосевые пучки не могут быть получены в аксиально-симметричных магнетронно-инжекторных пушках традиционных гиротронов, при реализации ГБО центр тяжести проблемы перемещается на создание электронно-оптических систем, способных формировать приосевые пучки с достаточно большими токами и вращательными скоростями частиц при малом разбросе их скоростей и ведущих центров. В предыдущих, сравнительно длинноволновых и высоковольтных ГБО [25, 26], для этой цели использовались квазипирсовская пушка, формирующая тонкий прямолинейный пучок электронов, и кикер в виде токовых катушек, помещенных в область относительно слабого поля основного соленоида и создающих поперечное магнитное поле, которое сообщает электронам первоначальную вращательную скорость. Затем вращательная скорость частиц адиабатически увеличивалась до рабочего значения при их движении в нарастающем магнитном поле. В идеале подобная система формирует пучок в виде ларморовской спирали малой толщины, но из-за разброса скоростей частиц пучок принимает в рабочем пространстве не менее приемлемую для работы ГБО форму ларморовской трубки.

Описанная выше система (Pierce-kicker gun) обладает очевидными недостатками, связанными с отсутствием аксиальной симметрии поля кикера и излишней первоначальной плотностью пучка, что приводит к дополнительному разбросу ча-

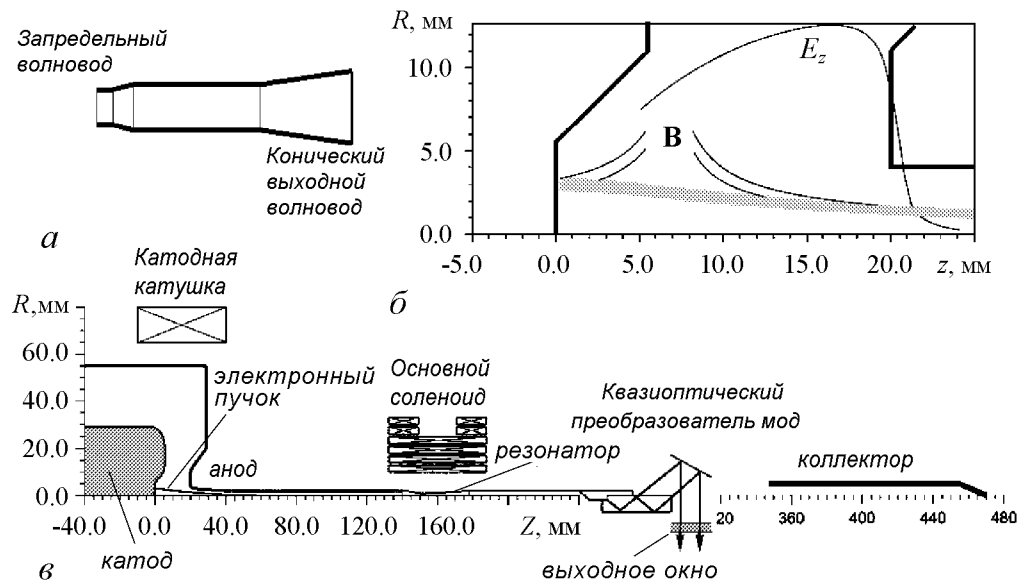


Рис. 3. Терагерцевый ГБО на третьей циклотронной гармонике: резонатор (а); пушка с каспом магнитного поля – профиль продольного электрического поля, магнитные силовые линии и электронные траектории (б); общая схема генератора (в)

стиц. Такую систему трудно реализовать в непрерывном режиме и, кроме того, в силу трехмерности она сложна для расчета. Указанные проблемы усугубляются по мере увеличения частоты и снижения напряжения. Поэтому в исследуемом в настоящее время новом, сравнительно низковольтном (80 кВ) ГБО на третьей гармонике, рассчитанном на достижение частоты 1 ТГц, использован другой тип электронно-оптической системы, а именно, пушка с каспом магнитного поля в прикатодной области [27, 28]. В такой системе диодная пушка с кольцевым эмиттером, помещенным в продольное магнитное поле, формирует тонкий полый пучок (рис. 3, б). Затем электроны попадают в расположенную вблизи катода область каспа, где поле резко спадает до нуля и затем меняет свое направление на противоположное. Проходя через касп, частицы приобретают азимутальные скорости и начинают вращаться вокруг общей оси. Тем самым сразу формируется пучок в виде соосного резонатору цилиндра, состоящего из многих спиралей. При дальнейшем движении частиц к резонатору в нарастающем магнитном поле их вращательная скорость адиабатически увеличивается, а радиус вращения уменьшается.

Исследуемый в настоящее время терагерцовый ГБО на третьей гармонике (рис. 3, в) рассчитан на работу при напряжении 80 кВ, токе пучка 0.7 А, длительности импульсов 10 мкс и частоте повторения импульсов до 1 Гц. Магнитное поле в резонаторе равно 13.7 Тл, а на катоде 4.5 мТл. Таким образом, перемагничивание достигает величины 3000, что позволяет при сравнительно невысокой плотности эмиссии 4 А/см² получать необходимую для терагерцового диапазона очень высокую плотность тока в резонаторе. Для уменьшения омических потерь выбрана рабочая мода TE_{3,7} с большим радиальным индексом, для которой диаметр резонатора равен 2.3 мм. Для возбуждения выбранной моды необходимы достаточно большие питч-фактор 1.5 и длина резонатора 7.2 мм, когда число вращений электронов в резонаторе $N = 30$ в три раза больше, а полоса циклотронного резонанса уже, чем в эксперименте [25]. Благодаря этому мода TE_{3,7} не должна подавляться модой TE_{2,5} (рис. 4). Следует отметить, что изготовление резонатора с необходимой точностью, особенно когда использование импульсного магнитного поля ограничивает допустимую толщину стенки, представляет значительные сложности. Расчет показывает, что на рабочей моде возможно достижение на частоте 1 ТГц довольно высокого электронного КПД 10%, что с учетом омических потерь дает, однако, для полного КПД лишь 1.3% и для мощности выходного излучения около 0.7 кВт.

К настоящему времени электронно-оптическая система ГБО испытана в моделирующем режиме с очень малым током. В зависимости от величины и полярности магнитного поля на катоде и соответствующего его распределения в анодно-

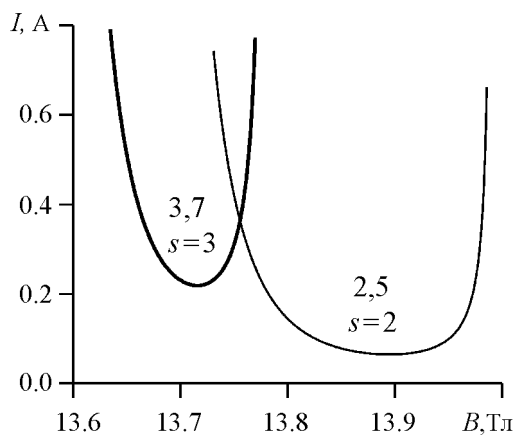


Рис. 4. Расчетные стартовые токи терагерцового ГБО для рабочей моды TE_{3,7} на 3-й гармонике и паразитной моды TE_{2,5} на 2-й гармонике (питч-фактор $g = 1.5$, скоростной разброс $\Delta V_{\perp}/V_{\perp} = 0.25$)

катодном промежутке в эксперименте наблюдались три режима с характерными структурами свечения на люминофоре, нанесенном на кварцевую мишень (рис. 5). В соответствии с теоремой Буша, ларморовский радиус электрона после прохождения резкого скачка магнитного поля определяется в одноэлектронном приближении выражением

$$r = r_c \frac{B_2 - B_1}{2B_2}, \quad (10)$$

где r_c – радиус точки старта электрона с эмиттера, $B_{1,2}$ – поля на катоде и в области после скачка. В первом режиме, когда поле катодной катушки сонаправлено полю соленоида и касп отсутствует, на мишени наблюдается след в виде кольца. В этом режиме формируется полиосевой трубчатый пучок. Уменьшение поля B_1 ведет к увеличению ларморовских радиусов и приближению ведущих центров к центру пучка, что сопровождается уменьшением внутреннего просвета на изображении пучка. При нулевом поле на катоде наблюдается второй режим с большими вращательными скоростями частиц и ведущими центрами, находящимися примерно на расстоянии ларморовского радиуса от центра пучка; орбиты заполняют все сечение, а след пучка представляет собой сплошной круг. В третьем режиме (с каспом), когда B_1 отрицательно, при увеличении $|B_1|$ ларморовский радиус за каспом увеличивается, а радиус ведущего центра уменьшается. Соосный оси винтовой пучок получается при симметричном каспе: $|B_1| = B_2$. В реальной системе с размытым скачком поля это условие выполняется лишь приближенно. В эксперименте смещение ведущих центров с оси почти вдвое меньше ларморовского радиуса частиц. Проведенные измерения хорошо совпадают с расчетами и позволяют рассчитывать на получение в рабочем режиме пучка с необходимыми параметрами.

Расчеты и эксперименты в миллиметровом диапазоне показывают, что при повышении питч-фактора электронов напряжение ГБО может быть значительно умень-

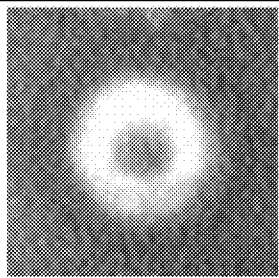
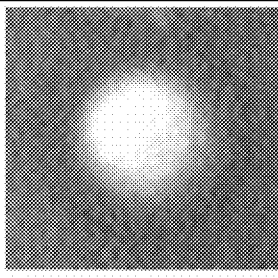
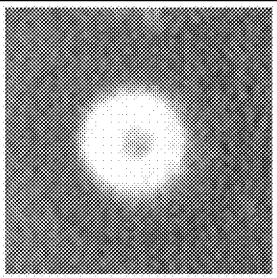
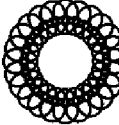
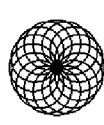
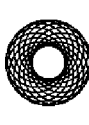
магнитное поле на катоде	$B_1 > 0$	$B_1 = 0$	$B_1 < 0$
след на мишени			
расчет			

Рис. 5. Следы пучка на сцинтиляторе (диаметр темной окружности 1 мм) и расчетные электронные траектории для положительного, нулевого и отрицательного (касп) магнитных полей на катоде

шено. Так, например, весьма привлекательно выглядит ГБО на третьей гармонике с напряжением 30 кВ и током 1 А, рассчитанный на генерацию на частоте 0.4 ТГц в непрерывном режиме при использовании компактного криомагнита с полем 4.5 Тл. В качестве рабочей может быть выбрана та же мода $TE_{3,7}$, которая при низком напряжении еще более изолирована от моды $TE_{2,5}$. Согласно расчетам [29], пушка с каспом способна сформировать пучок с необходимыми параметрами. При длине резонатора 15 мм расчетная выходная мощность ГБО составляет 1 кВт при эффективности 3.5%.

3. Гирумножители на высоких гармониках

Дополнительным способом повышения селективности на высоких гармониках может быть синхронизация излучения низкочастотным источником. В гирумножителе для этого используется модуляция электронов на низкой циклотронной гармонике. При этом из-за нелинейности восприимчивости пучок группируется не только на частоте модуляции, но и на всех ее гармониках, а излучению вблизи высокой циклотронной гармоники навязывается частота ω , точно кратная частоте сигнала ω_1 ,

$$\omega = n\omega_1. \quad (11)$$

Высокая селективность умножителя связана не только с жесткой синхронизацией частот, но и с навязыванием волне определенной пространственной структуры, при которой излучение от электронов, колеблющихся на частоте ω , складывается в фазе (конструктивная интерференция). Так, в аксиально-симметричной системе азимутальные индексы и номера резонансных циклотронных гармоник связаны соотношениями

$$m = nm_1, \quad s = ns_1. \quad (12)$$

Используя (11) и (12) и общие условия циклотронного резонанса электронов с волнами, имеющими произвольные групповые скорости $\beta_g = h/k$ и $\beta_{g1} = h_1/k_1$, когда в отличие от (2), вообще говоря, важна доплеровская поправка к частоте

$$\omega \approx s\omega_B + hv_z, \quad \omega_1 \approx s_1\omega_B + h_1v_z, \quad (13)$$

можно получить также соотношение и для продольных волновых чисел h и h_1 . Неточное выполнение условия резонанса в (13) связано с ограниченностью длины взаимодействия (в автогенераторе этому соответствует ненулевая отстройка резонанса (6)). Для постоянного вдоль резонатора магнитного поля имеем

$$h \approx nh_1. \quad (14)$$

Отсюда следует, например, что для близкого к отсечке ($h_1 \ll k_1$) модулирующего сигнала взаимодействие на гармонике также должно происходить с квазикритической волной ($h \ll k$). Это условие может быть нарушено в неоднородном поле.

Модуляция пучка в гирумножителе может осуществляться внешним сигналом (который, в принципе, способен сообщать электронам и вращательную скорость [13, 19]) или сигналом, возбуждаемым тем же пучком, что и поле на высокой гармонике. В первом случае гирумножитель близок к обычному гироклистрону. Согласно

расчетам [18], по сравнению с автогенератором на гармонике, в гирумножителе с внешним сигналом возможно достижение более высокой селективности и КПД. Однако оптимальный ток близок к стартовому току автогенератора, и поэтому достижение такого режима на высоких частотах и при низких рабочих напряжениях возможно лишь при сравнительно небольших коэффициентах умножения. Если же, как это обычно имеет место на высоких частотах, доступный электронный ток значительно меньше оптимального, то КПД умножителя пропорционален току и значительно меньше, чем в автогенераторе.

Несмотря на привлекательность, гирумножители исследовались до сих пор лишь в небольшом количестве экспериментальных работ. Их реализации мешает, в частности, паразитное возбуждение выходного резонатора на частоте внешнего сигнала, возникающее даже при большой отстройке от собственной частоты выходного резонатора. Дело в том, что для таких колебаний из-за предварительной группировки пучка отсутствует стартовый ток, а амплитуда тока больше, чем на высокой гармонике. Использование полиосевого пучка в экспериментально реализованных умножителях приводило к слабой связи с высокой гармоникой и к большому радиусу участка дрейфа, что делало возможным возбуждение паразитных низкочастотных колебаний не только в коротких отдельных резонаторах, но и на всей большой длине взаимодействия.

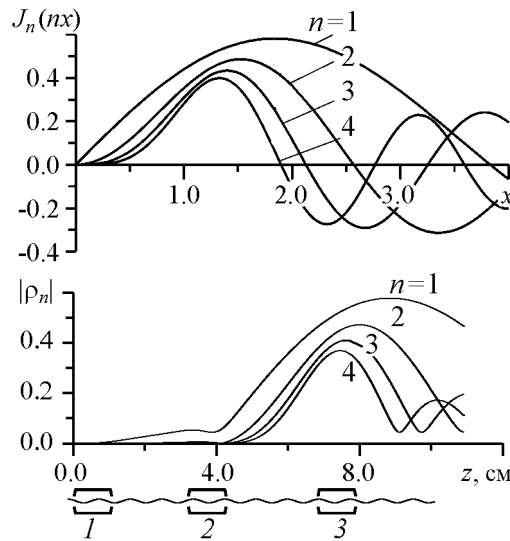


Рис. 6. Гирумножители клистронного типа: *a* – зависимость гармоник тока от продольной координаты в пространстве дрейфа в приближении короткого входного резонатора; *b* – результаты расчета трехрезонаторной схемы – показано расположение резонаторов и распределение гармоник тока; положение последнего резонатора соответствует максимуму 4-й гармоники тока

Для подавления паразитной генерации в ряде теоретических работ [21, 30, 31] исследуются возможности повышения амплитуды тока

$$\rho_n = \langle e^{in\theta} \rangle \quad (15)$$

на высокой гармонике и подавления группировки на низких гармониках. В (15) θ – фаза электрона относительно модулирующего сигнала, а угловыми скобками обозначено усреднение по всему электронному ансамблю. Для равномерного распределения частиц по фазам на интервале $[0, 2\pi]$ $\rho_n = 0$, а максимально компактному сгустку соответствует $|\rho_n| = 1$. При коротком модулирующем резонаторе показатели группировки гармоник ведут себя в пространстве дрейфа в соответствии с клистронной формулой

$$|\rho_n(z)| = J_n(n\chi z), \quad (16)$$

где параметр χ пропорционален амплитуде модулирующего сигнала (рис. 6, *a*). Как и в обычном клистроне, в выходном резонаторе плотность тока на гармонике может быть увеличена путем введения в пространство дрейфа дополнительных резонаторов, настроенных на высокую или на одну из низких гармоник и корректирующих

модуляцию пучка [21, 30]. При соответствующей настройке можно увеличить амплитуду высокой гармоники при сильном подавлении группировки на частоте модуляции [30]. В [31] предложен способ создания такой продольной структуры поля в первом резонаторе, которая без дополнительных резонаторов приводит к группировке только на выделенных гармониках.

В гирумножителях, как и в ГБО, дополнительные преимущества дает использование приосевого электронного пучка, одновременно максимизирующее связь с сигналом и с его гармоникой и, кроме того, позволяющее сильно сузить пространство дрейфа и электродинамически изолировать резонаторы в рабочем диапазоне частот. По сравнению с ГБО в гирумножителе облегчается также формирование приосевого пучка с малым скоростным разбросом, поскольку сгруппированный пучок возбуждает настроенный выходной резонатор при сколь угодно малом токе.

Рассмотрим пример субтерагерцового трехрезонаторного гирумножителя (рис. 6, б) со слаботочным (0.1 А) слаборелятивистским (30 кВ) пучком с питч-фактором 1.2 и непрерывным маломощным источником входного сигнала с частотой 150 ГГц и мощностью 100 мВт (например, оротроном [32]). Возбуждающаяся в первом резонаторе мода $TE_{1,3,1}$ модулирует пучок на основном циклотронном резонансе. Во втором (промежуточном) резонаторе частично сгруппированный пучок возбуждает такую же моду $TE_{1,3,1}$, которая дополнительно модулирует частицы, ускоряет их группировку и тем самым позволяет сократить длину дрейфового пространства. Выходной резонатор возбуждается одной из гармоник высокочастотного тока. Согласно расчетам, такая схема может обеспечить достаточную для значительного числа приложений мощность 1.0 и 0.1 Вт при умножении частоты в 4 и 5 раз – до 0.6 и 0.75 ТГц, соответственно.

Другой схемой, особенно привлекательной в терагерцовом диапазоне, является самовозбуждающийся гирумножитель, в котором низкочастотный сигнал возбуждается тем же пучком, что и сигнал на высокой гармонике. В подобной системе модулирующий резонатор заменен на автогенератор (например, на гиротрон или гиру-ЛОВ). Важно, что подобная схема может работать лишь при небольшом превышении над стартовым током входного резонатора, так как в ней, аналогично тому, как это происходит в клистроне (см. рис. 6, а), высокие гармоники быстрее, чем низкие, нарастают по длине системы и, достигнув насыщения в первом резонаторе, имеют слишком малую амплитуду во втором резонаторе. Эксперимент с самовозбуждающимся гирумножителем был проведен в ИПФ РАН [33]. Поливинтовой электронный пучок с параметрами 24 кВ и 0.3 А возбуждал два гиротронных резонатора, взаимодействуя с их полями на первой и на третьей циклотронных гармониках, соответственно. При этом для возбуждения второго резонатора было необходимо наличие первого резонатора. Выходная мощность составляла около 30 Вт на частоте 285 ГГц. Сравнительно низкий КПД, возможно, связан с невысоким качеством группировки электронов во втором резонаторе.

Кроме проблем с группировкой во втором резонаторе, схема с двумя гиротронами требует очень высокой точности согласования частот высокодобротных резонаторов

$$\frac{\omega - n\omega_1}{\omega} < \frac{1}{Q} + \frac{1}{Q_1},$$

где Q_1 и Q – добротности первого и второго резонаторов. Ситуация осложняется

еще и тем, что необходимо совмещать «горячие» частоты, которые из-за влияния электронного пучка отличаются от «холодных» собственных частот резонаторов.

Одним из решений описанных проблем может быть совмещение областей низкочастотной и высокочастотной генерации в одном резонаторе [34]. Это позволяет, во-первых, использовать для генерации гармоники оптимально сгруппированный пучок. Во-вторых, соотношение резонансных частот в одном резонаторе более устойчиво к погрешностям изготовления. В этом случае задача сводится к созданию условий, при которых в одном объеме возможно резонансное возбуждение двух мод с кратными частотами. В однородном магнитном поле при этом должны быть выполнены все условия (11)–(13), что накладывает довольно жесткие ограничения на выбор рабочих мод. Так, например, неэквидистантность спектра критических частот наиболее удобного волновода круглого сечения приводит к тому, что работа на паре гиротронных мод или на модах с небольшим числом продольных вариаций в резонаторе возможна только для выделенных коэффициентов умножения n . Если оба резонатора работают в режиме гиротрона, минимальным коэффициентом является довольно большое число $n = 5$ [35]. Для сближения «холодных» частот мод длина резонатора должна быть близкой к стартовой для низкочастотных колебаний, а совмещение «горячих» частот возможно лишь в очень узком (доли процента) диапазоне значений магнитного поля.

Несколько проще преобразовать гиротронную моду в волну, имеющую небольшую групповую скорость. Такая возможность возникает, во-первых, благодаря возможности отстройки от точного резонанса в условии (14) (электронные ступки на гармонике имеют ограниченную длину вдоль оси), а также в связи с тем, что при самовозбуждении низкочастотного гиротрона группирующиеся частицы должны испытывать кинематическое смещение по фазе, из-за чего их пространственная структура (спираль, а не прямолинейный отрезок) соответствует излучению бегущей волны на гармонике. В соответствии с (6) это тем более верно, чем меньше длина резонатора. В то же время разница в групповых скоростях волн позволяет запереть низкочастотную волну, слегка сузив выход из резонатора, так что в выходном волноводе будет присутствовать только сигнал на умноженной частоте. Этот прием позволяет также нагрузить низкочастотную волну на омические потери и значительно сократить длину резонатора без увеличения стартового тока. В такой схеме возможны коэффициенты умножения $n = 2$ и $n = 6$, причем случай удвоения частоты более привлекателен, чем в схеме с внешним источником, поскольку и низкочастотный гиротрон можно возбудить на высокой – по крайней мере, на второй гармонике ($s_1 = 2$). При этом выходной сигнал излучается на циклотронной гармонике с номером $2s_1$. Преимуществом этой схемы является более простая настройка, связанная с меньшей эффективной добротностью секции с бегущей волной, а недостатком – более сильная чувствительность к скоростному разбросу частиц.

Профилирование магнитного поля позволяет отказаться от условия (14) и получить умножение в произвольное число раз [34]. Меняя поле вдоль пространства взаимодействия, можно попеременно создавать резонансные условия то для одной, то для другой волны. В частности, используя двухступенчатый профиль, согласно расчетам, можно реализовать «клистронное» взаимодействие для низкочастотной волны, когда она находится в резонансе с пучком только в начале и конце резонатора (рис. 7). Первый участок соответствует модулирующему резонатору клистрона,

а на втором происходит отбор энергии у электронов. При этом средний участок, соответствующий пространству дрейфа клистрона, может служить для генерации гармоники.

Другим методом, позволяющим получить произвольный коэффициент умножения, является деформация поперечного сечения резонатора, например, в виде периодической $2m$ -заходной азимутальной гофрировки стенок. Подбирая глубину гофра, можно добиться выполнения условий (11)–(13) для низкочастотной и одной из расщепившихся высокочастотных волн (правда, это достигается ценой двукратного ослабления связи электронов с полем на гармонике). Используя разницу критических частот круглого и гофрированного волноводов, легко запретить низкочастотный сигнал внутри резонатора и выводить только высокочастотное излучение.

Таким образом можно модифицировать описанную выше схему удвоения частоты, чтобы взаимодействие на высокой гармонике происходило не с бегущей, а с квазикритической волной, что позволяет повысить эффективность генерации. В ИПФ РАН в настоящее время проводится моделирующий эксперимент с подобным умножителем, в котором рабочими являются вторая и четвертая циклотронные гармоники (длины волн 8 и 4 мм). Восьмизаходная азимутальная гофрировка резонатора не затрагивает структуру низкочастотной вращающейся моды $TE_{2,2}$, но снимает частотное вырождение двух поляризаций высокочастотной рабочей моды $TE_{4,3}$ (рис. 8, а). Радиус выходного круглого волновода подобран так, что в него излучается только

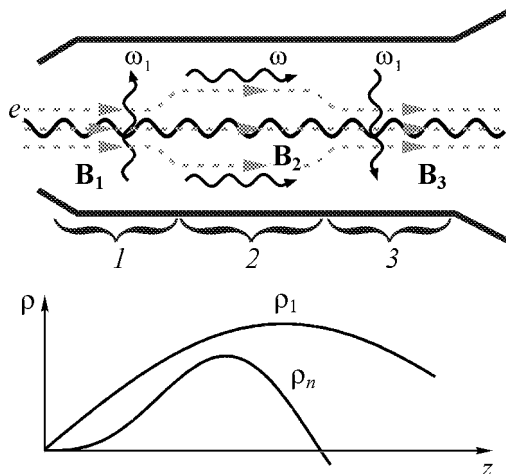


Рис. 7. Схема однорезонаторного гироумножителя с профилированным магнитным полем

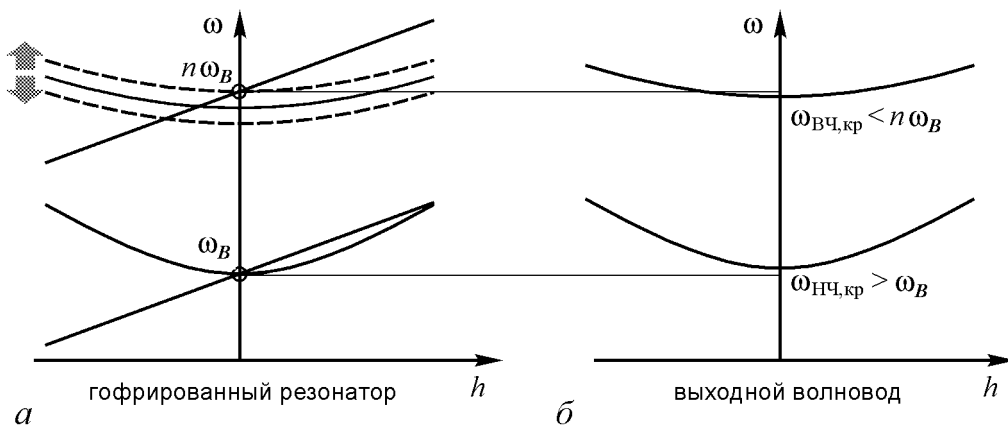


Рис. 8. Дисперсионные диаграммы для самовозбуждающегося однорезонаторного гироумножителя с $2m$ -заходной гофрировкой стенки: расщепление моды $TE_{m,p}$ делает возможным резонансное излучение модулированного пучка на высокой циклотронной гармонике (а); выбор радиуса выходного волновода позволяет запретить низкочастотную волну внутри резонатора (б)

высокочастотная волна (рис. 8, б). В эксперименте в пушке с каспом получен приосевой электронный пучок с параметрами 60 кВ и 5 А, питч-фактором 1, который эффективно возбуждает круглый резонатор на второй циклотронной гармонике. Согласно расчетам, в гофрированном резонаторе совместная генерация двух мод должна обеспечить мощность 5 кВт на четвертой гармонике.

В случае успеха принцип совместной генерации гармоник в одном объеме будет использован на более высоких частотах. Например, для пучка терагерцового ГБО, описанного в разделе 2, подходит резонатор шестиугольного сечения, в котором в качестве рабочей моды на третьей циклотронной гармонике используется одна из расщепившихся мод $TE_{3,7}$. При такой форме сечения удастся подобрать длину резонатора (5 мм), при которой частота моды $TE_{3,7,1}$ точно в три раза превышает частоту моды $TE_{1,3,2}$ с двумя продольными вариациями поля. Небольшой стартовый ток низкочастотной моды (менее 0.1 А) позволяет рассчитывать на ее стабильное возбуждение. Преимуществами такого самовозбуждающегося гироумножителя перед ГБО являются более низкий ток и меньшая критичность к качеству и юстировке пучка.

Заключение

Попытки снижения величины магнитного поля в гиротроне при работе на высоких ($s > 2$) циклотронных гармониках показали, что получение селективного возбуждения в этом случае возможно, как правило, только при использовании дополнительных мер электродинамической и/или электронной селекции мод по сравнению с методами, используемыми в традиционных гиротронах на основной и второй гармониках. В настоящей работе обсуждается возможность улучшения связи электронов с волнами на высоких гармониках при использовании приосевых электронных пучков в гиротронах с большой орбитой. Для получения таких пучков требуются новые конструкции электронно-оптических систем. В терагерцовом диапазоне и особенно при работе в непрерывном режиме генерации для этой цели наиболее адекватной представляется осесимметричная пушка с каспом. Такие пушки были ранее реализованы в миллиметровом диапазоне, а недавно подобная система, но со много раз более высокой степенью последующей компрессии пучка (до 3000) успешно испытана в моделирующем режиме для импульсного ГБО с частотой генерации 1 ТГц. Расчеты показывают, что ГБО со сравнительно низковольтными электронными пучками и сравнительно доступными магнитными полями 4–15 Тл, работающие на третьей или даже, возможно, на четвертой гармонике могут обеспечить в терагерцовом диапазоне мощность порядка $10\text{--}10^3$ Вт.

Большей селективности, чем в ГБО, можно добиться в гироумножителях, если решить для них такие традиционные проблемы, как возбуждение выходного резонатора на частоте модулирующего сигнала и точная подстройка частот. Использование приосевых пучков позволяет и в этом случае добиться еще большей селективности, увеличивает связь электронов с гармониками и позволяет электродинамически развязать резонаторы умножителя. В терагерцовом диапазоне, где возникают проблемы с источниками модулирующего сигнала, привлекательны самовозбуждающиеся гироумножители, особенно такие, в которых и низкочастотный, и высокочастотный

сигналы возбуждаются одним и тем же электронным пучком. При близких токах гироумножители способны обеспечить тот же уровень мощности, что и автогенераторы, но в отличие от последних из-за отсутствия стартового тока для высокочастотной моды они способны работать и при значительно меньших электронных токах и мощностях высоковольтных источников.

Следует иметь в виду, что из-за омических потерь и конкуренции со стороны низких гармоник без использования специальных мер эффективность терагерцовых автогенераторов и умножителей, работающих на высоких циклотронных гармониках, значительно ниже, чем эффективность традиционных гиротронов на основной и второй гармониках. Однако это обстоятельство не фатально для многих приложений терагерцового излучения – таких, например, как спектроскопия и диагностика различных сред. Важно подчеркнуть, что, как и в случае ряда других электронных генераторов с малым электронным КПД, для гиротронов на гармониках довольно эффективна рекуперация неистраченной энергии электронного пучка, которая позволит значительно ослабить коллекторные проблемы и использовать высоковольтные источники с меньшими напряжениями. Анализ показывает, что рассмотренные гироприборы являются перспективными источниками когерентного терагерцового излучения, которые могут быть доступными многим лабораториям.

Авторы благодарны И.Г. Гачеву, М.Ю. Глявину, Г.Г. Денисову, Т. Идехаре и Г.С. Нусиновичу за обсуждение проблем, изложенных в статье.

Работа по данной тематике поддержана грантами РФФИ 05-02-16852, 06-02-91176, 06-02-16782 и 08-02-0068, а также Программой Президиума РАН «Электромагнитные волны терагерцового диапазона».

Библиографический список

1. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1414.
2. Гиротрон. Сборник статей / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
3. *Nusinovich G.S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004.
4. *Zaitsev N.I., Pankratova T.P., Petelin M.I., Flyagin V.A.* Millimeter- and submillimeter-wave gyrotrons // Radio Eng. and Electronic Phys. 1974. Vol. 19, № 5. P. 103.
5. *Flyagin V.A., Luchinin A.G., Nusinovich G.S.* A submillimeter-wave gyrotrons – theory and experiment // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1983. Vol. 4. P. 629.
6. *Spira-Hakkarainen S., Kreischer K.E., Temkin R.J.* Submillimeter-wave harmonic gyrotron experiment // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. Vol. 18. P. 334.
7. *Idehara T., Brand G.F.* Submillimeter wave gyrotron development and applications. Fucui University, printed by EXIT Co., LTD, 1995.
8. *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G. and Golubiatnikov G.Yu.* Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 100. P. 015101.

9. *Idehara T., Saito T., Mori H. et al.* Long pulse operation of the THz gyrotron with a pulse magnet // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 2008. Vol. 29. P. 131.
10. *Запевалов В.Е., Зарницына И.Г., Нусинович Г.С.* О возбуждении паразитных мод, резонансных с первой гармоникой циклотронной частоты, в гиротроне, работающем на моде, резонансной со второй гармоникой // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1979. Т. 22, № 3. С. 367.
11. *Антаков И.И., Запевалов В.Е., Панкратова Т.Б., Цимринг Ш.Е.* Гиротроны на гармониках гирочастоты // *Гиротрон. Сборник статей / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова*. Горький: ИПФ АН СССР. 1981. С. 192.
12. *Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б.* Теория гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн // *Гиротрон. Сборник статей / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова*. Горький: ИПФ АН СССР. 1981. С. 169.
13. *Jory H.* Investigation of electronic interaction with optical resonators for microwave generation and amplification // *R&D Tech. Report, Varian Associates, Paolo Alto, CA, ECOM-01873-F*, 1968.
14. *McDermott D.B., Luhmann N.C., Kupiszewski A.Jr. and Jory H.R.* Small-signal theory of a large-orbit cyclotron resonance harmonic maser // *Phys. Fluids*. 1983. Vol. 26. P. 1936.
15. *Lawson W., Destler W.W., and Striffler C.D.* High-power microwave generation from a large-orbit gyrotron in vane and hole-and-slot conducting wall geometries // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1985. Vol. 13. P. 444.
16. *Bratman V.L., Fedotov A.E., Kalynov Y.K. et al.* Moderately relativistic high-harmonic gyrotrons for millimeter/submillimeter wavelength band // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1999. Vol. 27. P. 456.
17. *Жураховский В.А.* Нелинейные колебания электронов в магнитонаправляемых потоках. Киев: Наук. думка, 1972. С. 303.
18. *Белоусов В.И., Ергаков В.С., Мусеев М.А.* Двухрезонаторный МЦР на гармониках циклотронной частоты электронов // *Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ*. 1978. № 9. С. 41.
19. *Hirshfield J.L.* Coherent radiation from spatiotemporally modulated gyrating electron beams // *Phys. Rev. A*. 1991. Vol. 44. P. 6845.
20. *Guo H., Chen S.H., Granatstein V.L. et al.* Operation of highly overmoded harmonic-multiplying gyrotron amplifier // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 79. P. 515.
21. *Nusinovich G.S., Dumbrajs O.* Two-harmonic prebunching of electrons in multicavity gyrodevices // *Phys. of Plasmas*. 1995. Vol. 2. P. 568.
22. *Александров А.Ф., Власов А.Н., Галузо С.Ю. и др.* Релятивистские доплеровские СВЧ-умножители частоты // *Релятивистская высокочастотная электроника: Вып. 3*. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. С. 96.
23. *Антаков И.И., Гапонов А.В., Юлпатов В.К.* // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника*. 1965. № 12. С. 33.
24. *Гольденберг А.Л., Петелин М.И.* Формирование винтовых электронных пучков в адиабатической пушке // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1973. Т. 16, № 1. С. 141.
25. *Братман В.Л., Калынов Ю.К., Мануилов В.Н., Самсонов С.В.* Субмиллиметро-

- вый гиротрон с большой орбитой // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. № 10–11. С. 823.
26. *Братман В.Л., Калынов Ю.К., Мануилов В.Н., Самсонов С.В.* Электронно-оптическая система гиротрона с большой орбитой // ЖТФ. 2005. Т. 75, № 12. С. 76.
 27. *Rhee M.J. and Destler W.W.* Relativistic electron dynamics in a cusped magnetic field // The Physics and Fluids. 1974. Vol. 17. P. 1574.
 28. *Gallagher D., Barsanti M., Scafuri F., Armstrong C.* High-power cusp gun for harmonic gyro-device applications // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28, № 3. P. 695.
 29. *Bratman V.L., Idehara T., Kalynov Yu.K. et al.* Design of a powerful and compact THz oscillator // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2006. Vol. 27, № 8. P. 1063.
 30. *Бандуркин И.В., Савилов А.В.* Подавление группировки на низких гармониках в гироумножителях частоты клистронного типа // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 18. С. 76.
 31. *Bandurkin I.V., Savilov A.V.* High-harmonic electron bunching in the field of a signal wave and the use of this effect in cyclotron masers with frequency multiplication // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2005. Vol. 8. P. 010702.
 32. *Братман В.Л., Гинцбург В.А., Гришин Ю.А. и др.* Импульсные широкодиапазонные оротроны миллиметровых и субмиллиметровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 11. С. 958.
 33. *Antakov I.I., Gachev I.G., Denisov G.G. et al.* Development and experimental study of a two-cavity 285 GHz CW gyrotron-multiplier // Proc. 6th Int. Workshop "Strong Microwave in Plasmas", N. Novgorod, 2006, P. 162.
 34. *Бандуркин И.В., Братман В.Л., Савилов А.В.* Умножение частоты в автогенераторах гиротронного типа // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 2. С. 72.
 35. *Bandurkin I.V., Bratman V.L., Denisov G.G., Savilov A.V.* Frequency multiplication in gyro-oscillators // Proc. 6th Int. Workshop «Strong Microwave in Plasmas». N. Novgorod, 2006. P. 156.

*Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского
Институт прикладной физики РАН*

Поступила в редакцию 6.05.2008

TERAHERTZ GYROTRONS AT HIGH CYCLOTRON HARMONICS

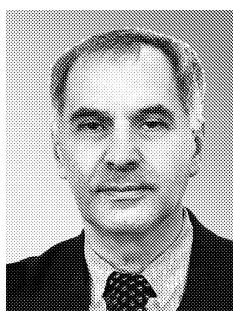
*I.V. Bandurkin, V.L. Bratman, Yu.K. Kalynov,
V.N. Manuilov, A.V. Savilov, and S.V. Samsonov*

The results of first experiments and future trends in advancing to sub-THz and THz frequency ranges with self-oscillators working at high cyclotron harmonics and gyromultipliers are discussed. In both varieties of gyrotrons, selective excitation of high harmonics can be simplified by the use of electron beams describing helical trajectories

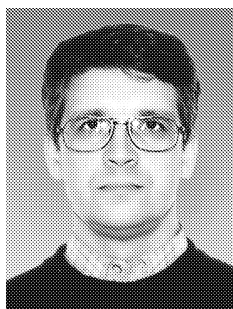
whose centers are close to the cavity axis (the configuration of Large Orbit Gyrotron). In gyromultipliers, the additional selective properties are provided due to obtrusion of frequency and spatial field structure from the relatively low-frequency signal, which may be either inserted from the outside, or excited by the same electron beam used for nonlinear frequency conversion. In the latter case, the most attractive schemes for THz range are those where excitation of low- and high-frequency radiation takes place in a single volume.



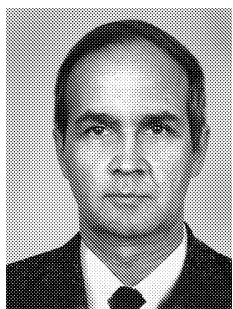
Бандуркин Илья Владимирович – родился в 1980 году в Горьком, окончил Нижегородский государственный университет (Высшая школа общей и прикладной физики) в 2003 году. После окончания университета работает в ИПФ РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИПФ РАН (2007) в области физической электроники. Соавтор около десяти научных статей по данному направлению.



Братман Владимир Львович – родился в 1945 году, окончил Горьковский (ныне Нижегородский) государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1967). После окончания аспирантуры работал в НИИ «Салют», Научно-исследовательском радиофизическом институте и с 1977 года – в ИПФ РАН. Защитил кандидатскую (1977) и докторскую (1992) диссертации в области электроники. В настоящее время заведует отделом высокочастотной релятивистской электроники ИПФ РАН, профессор Нижегородского университета. Соросовский профессор, Лауреат Государственной премии РФ. Член редакционной коллегии журнала «Известия вузов. Радиофизика».



Калынов Юрий Константинович – родился в 1963 году в Горьком, окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1985). После окончания работал в Горьковском НИИ «Салют», с 1993 года работает в ИПФ РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ИПФ РАН, 2001) в области физической электроники. Опубликовал около 40 научных работ по указанному направлению.



Мануилов Владимир Николаевич – родился в 1952 году, окончил Горьковский (ныне Нижегородский) государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1974). После окончания университета работает на кафедре электроники радиофизического факультета ННГУ. Защитил кандидатскую (1985) и докторскую (2000) диссертации в области электроники. В настоящее время – профессор Нижегородского университета. Соросовский доцент.



Савилов Андрей Владимирович – родился в 1968 году в Рязанской обл., окончил с отличием Нижегородский государственный университет (Высшая школа общей и прикладной физики) в 1992 году. После окончания университета работает в ИПФ РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИПФ РАН (1997) и доктора физико-математических наук (2005) в области физической электроники, физики плазмы и релятивистских электронных пучков. Опубликовал более 100 научных статей по направлениям, указанным выше. Лауреат Премии и Медали РАН для молодых ученых (2000).



Самсонов Сергей Викторович – родился в 1966 году в Арзамасе-16 (Саров). Окончил Горьковский политехнический институт (1989), защитил диссертации на соискание кандидата (1996) и доктора (2007) физико-математических наук по специальности физическая электроника. С 1989 года работает в Институте прикладной физики РАН в области вакуумной СВЧ-электроники больших мощностей. В 2000 году удостоен Медали РАН с премией для молодых ученых (в области общей физики и астрономии) за цикл работ «Теоретическое и экспериментальное исследование мощных мазеров на свободных электронах».