

УДК 538.56 : 621.385.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИРОТРОНОВ ДИАПАЗОНА САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН

*А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, Д. П. Григорьев, Т. Б. Панкратова,
М. И. Петелин, В. А. Флягин*

Экспериментально исследован гиротрон—мазер на циклотронном резонансе с аксиально-симметричной адиабатической пушкой магнетронного типа и открытым бочкообразным резонатором, имеющим дифракционный вывод мощности. В согласии с теоретическими представлениями показано, что в гиротроне может быть реализована (при использовании комбинированных методов электродинамической и электронной селекции мод) устойчивая одномодовая генерация и что КПД гиротрона может составлять несколько десятков процентов даже при значительном разбросе скоростей электронов

Мазеры на циклотронном резонансе (МЦР)—СВЧ генераторы и усилители, основанные на индуцированном циклотронном излучении электронов, — были предложены в работах [1-3]. Теоретические исследования (см. обзор [4]) показали, что класс электронных приборов типа МЦР весьма широк—каждому прибору с прямолинейным электронным пучком (типа «О») может быть сопоставлен МЦР-аналог и даже (с учетом многообразия систем фокусировки электронных пучков и существования нескольких механизмов группировки электронов в высокочастотном поле) несколько МЦР-аналогов.

Первые экспериментальные исследования МЦР [2, 3, 5] были направлены на изучение принципиальных эффектов, используемых в приборах этого класса, причем наибольшее внимание уделялось взаимодействию винтовых и трохоидальных электронных пучков с бегущими электромагнитными волнами в волноводах. Наибольшую мощность (до киловатта в непрерывном режиме с длиной волны порядка 1 см) вначале имели МЦР-ЛВ и МЦР-ЛОВ с потоками электронов, движущихся по трохоидальным траекториям в скрещенных однородных электрическом E_0 и магнитном H_0 полях [5, 6].

Однако уже в то время было очевидно, что винтовые электронные пучки, направляемые однородным магнитным полем, в энергетическом отношении обладают существенным преимуществом перед трохоидальными. Дело в том, что в трохоидальных электронных пучках имеется жесткое ограничение на поступательную скорость $v_{\text{пост}} = cE_0/H_0$ электронов (поле E_0 ограничено возникновением пробоя, H_0 определяется рабочей частотой), а следовательно, и на электронный ток; в винтовых же пучках поступательная скорость электронов не фиксирована, и поэтому предельный ток имеет большую величину. Тем не менее, к 1965 году в МЦР с винтовыми электронными пучками [2, 3, 7, 8] были достигнуты уровни мощности и КПД существенно более низкие, чем в МЦР с трохоидальными электронными пучками [5, 6], что было обусловлено, главным образом, конструктивными недостатками первых вариантов МЦР с винтовыми пучками и, до некоторой степени, отсутствием достаточно точных методов расчета этих приборов. Так, например,

в [7] (а также в [9]) применялись несовершенные электронно-оптические системы. В [8] для вывода мощности из МЦР-монастрона был использован одномодовый волновод; вследствие низкой эффективности связи волновода с резонатором выходная мощность (200 Вт в непрерывном режиме) составляла лишь около 20% мощности, отбирающейся высокочастотным полем у электронного потока. Для оценки стартовых токов МЦР-монастрона в [8] использовался приближенный метод, основанный на замене электронного потока однородной стационарной плазмой, состоящей из вращающихся электронов с конечным временем жизни; для подбора параметров генератора привлекались также результаты нелинейной теории МЦР-ЛОВ, что, опять-таки, являлось довольно грубым приближением.

Преобразование энергии винтовых электронных пучков в электромагнитное излучение удалось осуществить с достаточной эффективностью лишь в гиротронах—СВЧ генераторах и усилителях с адиабатическими электронными пушками магнетронного типа, способными формировать интенсивные электронные потоки при умеренном разбросе скоростей электронов, и электродинамическими системами в виде слабонерегулярных волноводов, имеющими дифракционный вывод мощности и обладающими высокой степенью селекции мод.

В настоящей статье будут описаны первые эксперименты с гиромонотронами—гиротронами, работающими в режиме автоколебаний (в дальнейшем они называются просто гиротронами).

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ГИРОТРОНА

Гиротрон вместе с магнитным полем, создаваемым соленоидом или системой соленоидов (рис. 1), обладает практически полной аксиальной симметрией. Он состоит из адиабатической электронной пушки, резонатора с дифракционным выводом мощности и выходного волновода, охлаждаемые стенки которого выполняют функции коллектора электронов.

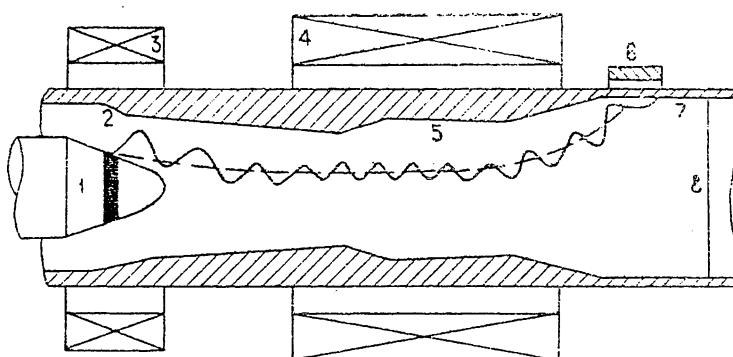


Рис. 1. Принципиальная схема гиротрона:

1—катод, 2—анод, 3—вспомогательный соленоид, 4—основной соленоид, 5—резонатор, 6—магнитный экран, 7—коллектор и выходной волновод, 8—выходное окно; волнообразная линия—траектория электрона, пунктирная—силовая линия магнитного поля.

Электронно-оптическая система гиротрона [10, 11] формирует трубчатый поток электронов, движущихся по винтовым траекториям. Уже в момент вылета с катода электроны начинают вращаться с циклотронной частотой в скрещенных электрических и магнитных полях инжектора; при дальнейшем движении электронов в нарастающем магнитном

поле их вращательные скорости возрастают; на входе в резонатор, расположенный в области однородного магнитного поля, энергия циклотронного вращения электронов в несколько раз превосходит энергию их поступательного движения.

Если ширина эмиттирующего пояска и угол пересечения магнитного поля с поверхностью эмиттера достаточно малы, то связь между параметрами пушки — потенциалом резонатора относительно катода U , радиусом эмиттера R_k , напряженностью электрического поля на эмиттере E_k , отношением $\alpha = H_0/\dot{H}_k$ магнитного поля в резонаторе к магнитному полю в инжекторе — и параметрами электронного потока в резонаторе — радиусом R_0 , током I , допустимым относительным разбросом осцилляторных скоростей электронов $\varepsilon = \Delta v_{\perp}/v_{\perp}$, «продольным» $U_{\parallel 0}$ и «поперечным» $U_{\perp 0}$ напряжениями потока (пропорциональными соответственно энергиям поступательного и орбитального движения электронов) — описывается соотношениями [11]*

$$\alpha E_k^{2/3} = 7,1 U_{\parallel 0}^{1/3} H_0^{2/3}; \quad (1)$$

$$R_k/\sqrt{\alpha} = R_0; \quad (2)$$

$$U = U_{\perp 0} + U_{\parallel 0}; \quad (3)$$

$$\frac{2\varepsilon R_k}{3\sqrt{\alpha}} \geqslant \frac{I}{\sqrt{U_{\perp 0}}}; \quad (4)$$

единицы измерений — сантиметры, амперы, киловольты, килоэрстеды. Соотношение (1) описывает «закрутку» электронов в инжекторе и адиабатическое увеличение их вращательной энергии в промежутке инжектор—резонатор, (2) — компрессию электронного потока в сходящемся магнитном поле, (4) — влияние пространственного заряда электронного потока в инжекторе на разброс скоростей электронов, (3) представляет собой закон сохранения энергии электронов.

Провисание потенциала электронного потока в резонаторе обычно пренебрежимо мало, и поэтому все электроны имеют одинаковую энергию, но она может быть неодинаково распределена между поступательной и вращательной составляющими их движения. Разброс скоростей электронов приводит к ограничению отношения средних значений их «поперечных» и «продольных» энергий:

$$U_{\perp 0}/U_{\parallel 0} \leqslant 1/\varepsilon. \quad (5)$$

В предельном случае $U_{\perp 0}/U_{\parallel 0} = 1/\varepsilon$ энергии поступательного движения электронов распределены в интервале от нуля до $\sqrt{2\varepsilon}eU$.

На выходе из резонатора электроны попадают в спадающее магнитное поле, где происходит декомпрессия электронного потока, благодаря которой облегчается тепловой режим коллектора.

Электродинамическая система гиротрона [13] представляет собой слабонерегулярный волновод, отдельные участки которого выполняют функции резонатора и выходного тракта.

Резонатор в простейшем случае (рис. 2) образован достаточно длинным ($L_p \gg \lambda$) отрезком регулярного волновода, который ограничен с катодного конца сужением, запредельным для волны рабочего типа, а с коллекторного конца — переходом к внешнему волноводу.

* Эти соотношения основаны на адиабатическом приближении. Для более точного анализа формирования электронных потоков в гиротронах в настоящее время привлекаются численным методом [12].

имеющему расширенное сечение. Наименьшим дифракционным излучением в выходной тракт обладают моды с наибольшим (порядка L_p) продольным размером неоднородности поля, т. е. моды с собственными частотами ω , наиболее близкими к критическим частотам регулярной части резонатора $\omega_{kp} = v_{mp} c / R_p$ (R_p — радиус резонатора, c — скорость света, v_{mp} — для поперечно-электрической волны p -й корень уравнения $J'_m(x) = 0$, $J_m(x)$ — функция Бесселя); добротности этих мод — основных мод резонатора — определяются выражением

$$Q_{\text{диф}} = \pi Q_{\text{диф}}^{\min},$$

где $Q_{\text{диф}}^{\min} = 4\pi(L_p/\lambda)^2$, $\lambda = 2\pi c/\omega_s$, π — изображенная на рис. 3 функция параметров l/L_p и $\xi = (\theta/v_{mp})(L_p/\lambda)^2$, остальные обозначения приведены на рис. 2. Те же моды, у которых продольное распределение полей является многогорбым, образованы волнами, имеющими относительно большие групповые скорости и испытывающими сравнительно малые отражения от концов резонатора, а потому существенно уступают основным модам по дифракционной добротности.

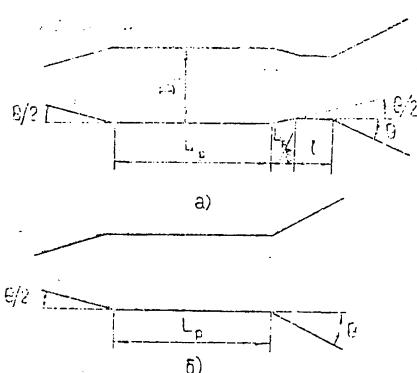


Рис. 2. Профили резонаторов.

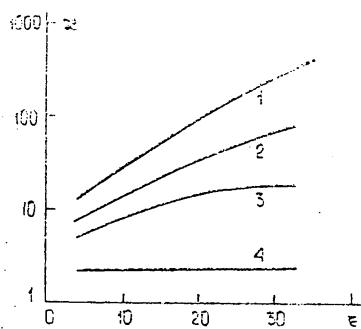


Рис. 3. Графики для определения добротностей резонаторов, изображенных на рис. 2а ($l-l/L_p = 0,23$; 2— $l-L_p = 0,115$; 3— $l/L_p = 0$) и рис. 2б (4).

Потери высокочастотной мощности в стенах резонатора, характеризуемые омической добротностью $Q_{\text{ом}}$, выравнивают между собой добротности различных мод:

$$Q = Q_{\text{ом}} Q_{\text{диф}} / (Q_{\text{ом}} + Q_{\text{диф}}),$$

ухудшая, таким образом, селективные свойства резонатора, однако этим эффектом можно пренебречь; если выполнено условие $Q_{\text{диф}} < Q_{\text{ом}}$.

Кроме резонаторов, изображенных на рис. 2, в гиротронах нередко оказывается целесообразным использовать резонаторы более сложного профиля, рассчитанные на достижение более высокой степени селекции мод [14], а также на повышение КПД гиротронов [15].

Сопряжение между резонатором и выходным волноводом обычно делают достаточно плавным, чтобы исключить перенаправление высокочастотной мощности в паразитные волны, так что моде $T E_{mpq}$ резонатора соответствует совпадающая с ней по поперечной структуре волна $T E_{mp}$ выходного волновода.

Генерация электромагнитных колебаний в гиротроне имеет место

тогда, когда собственная частота одной из высокодобротных ТЕ-мод резонатора оказывается вблизи одной из гармоник гирочастоты электронов ω_H ,

$$\omega_s \approx n \omega_H \quad (n = 1, 2, \dots),$$

внутри полосы

$$\Delta\omega_{\text{ц.} p} \sim \omega (\lambda/L) \beta_{\parallel},$$

а электронный ток превышает минимальное стартовое значение $I_{\text{старт}}$, удовлетворяющее соотношению [4]

$$I_{\text{старт}}(a) (Q \cdot 10^{-3}) \frac{L}{\lambda} \beta_{\parallel}^{-2} \left(\frac{n^n}{n!} \right)^2 \left(\frac{\beta_{\perp}}{2} \right)^{2(n-1)} G e^{-2x^2} (\mu x - n) = 2, 3, \quad (6)$$

где

$$G = \frac{J_m^2(\gamma_{mp} R_0 R_p)}{(\gamma_{mp}^2 - m^2) J_m^2(\gamma_{mp})},$$

$$x = \frac{1}{2} (n/\mu + \sqrt{(n\mu)^2 + 1}),$$

$$\mu = \pi \frac{\beta_{\perp}^2 L}{\beta_{\parallel} \lambda},$$

$\beta_{\perp} = v_{\perp} c$, $\beta_{\parallel} = v_{\parallel} c$, v_{\perp} и v_{\parallel} — орбитальная и поступательная составляющие скорости электронов, R_0 — радиус электронного потока в резонаторе, L — эффективная протяженность высокочастотного поля в направлении оси z , совпадающей с осью гиротрона; предполагается, что зависимость поля от координаты z может быть аппроксимирована гауссовой функцией $\exp[-(2z/L)^2]$.

Из-за аксиальной симметрии резонатора любая из мод с азимутальным индексом m , отличным от нуля, обладает двукратным поляризационным вырождением. Введение в резонатор замагниченного электронного потока, представляющего собой гиротропную среду, снимает вырождение — собственными модами гиротрона становятся моды с полями, врачающимися в противоположные стороны, т. е. моды с зависимостью от азимутальной координаты и времени, описываемой функциями $\cos(\omega t \pm \varphi)$. Эти моды в общем случае имеют разные собственные частоты и разные стартовые токи.

Условию $I > I_{\text{старт}}$ в гиротронах со слаборелятивистскими электронными потоками удается удовлетворить обычно лишь для первых двух ($n = 1, 2$), но иногда и для третьей гармоники циклотронной частоты.

В режимах стационарных автоколебаний относительная доля энергии, которую электроны в среднем отдают высокочастотному полю, определяется выражением

$$\eta_{\text{ст}} = \frac{1}{1 + (\beta_{\parallel} \beta_{\perp})^2} \eta_{\perp}, \quad (7)$$

где η_{\perp} — так называемый «поперечный» КПД — является функцией параметров μ и

$$I_0 = 0,24 I(a) (Q \cdot 10^{-3}) \left(\pi \frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}} \right)^{2(3-n)} \left(\frac{L}{\lambda} \right)^{5-2n} \left[\frac{(n-2)!}{n!} \right]^2 G. \quad (8)$$

Для продольного распределения высокочастотного поля, описываемого

функцией Гаусса*, зависимость η_{\perp} от μ и I_0 показана на рис. 4**. С учетом потерь высокочастотной мощности в стенках резонатора выходной КПД генератора имеет вид

$$\eta = (1 - Q/Q_{\text{ом}}) \eta_{\perp \text{нр.}} \quad (9)$$

В отличие от идеализированной теоретической модели, для которой выведены формулы (6) и (8), электромагнитные колебания в реальных гиротронах возбуждаются электронными потоками с большим разбросом поступательных скоростей. Однако, как следует из теории [18], это обстоятельство не является препятствием для самовозбуждения основных мод резонатора и при достигнутом качестве электронных потоков приводит к относительно небольшому снижению КПД по сравнению с максималь-

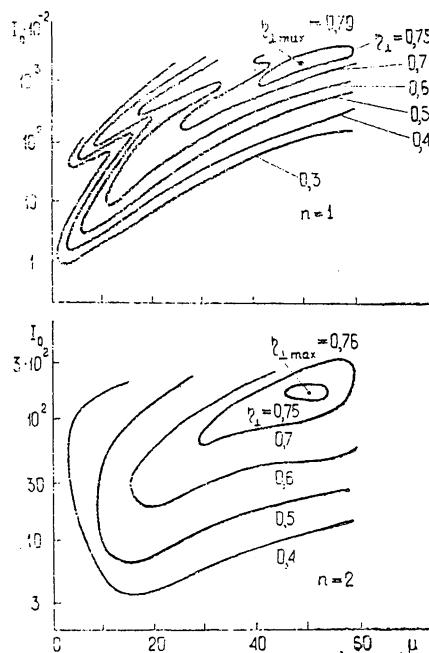


Рис. 4. Линии равного КПД гиротрона на плоскости параметров, пропорциональных току пучка и длине резонатора.

ным теоретическим значением. В то же время разброс скоростей способствует подавлению высших мод резонатора, в том числе бегущих электромагнитных волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальную проверку теоретических предположений об эффективности конструкции гиротрона представлялось целесообразным произвести, в первую очередь, в диапазоне сантиметровых волн, наиболее удобном как с точки зрения простоты создания магнитных полей нужной напряженности, так и с точки зрения простоты изготовления самих генераторов. Здесь будут описаны эксперименты с двумя гиротронами, работавшими в непрерывном режиме. Одна лампа была

* При расчете описываемых ниже гиротронов использовалась аппроксимация продольного распределения высокочастотного поля П-образной функцией [4], однако при использовании гауссовой аппроксимации [6] достигается более точное описание экспериментальных результатов.

** Величина η_{\perp} вычислялась Нусиновичем и Эрм как предел, к которому стремится «поперечный» КПД гиротрона с заданной эффективной длиной поля L , когда участок однородности статического магнитного поля неограниченно возрастает. Найденная таким способом функция $\eta(I_0, \mu)$, изображенная на рис. 4, несколько отличается от приведенной в работе [17], где статическое магнитное поле предполагалось однородным лишь на интервале $-\frac{\sqrt{3}}{2}L < z < \frac{\sqrt{3}}{2}L$. Авторы благодарны Г. С. Нусиновичу и Р. Э. Эрму, разрешившим использовать свои новые результаты при написании данной статьи.

предназначена для работы с модой TE_{011} ($\lambda = 2,0$ см) на основном циклотронном резонансе ($n = 1$), другая—для работы с модой TE_{021} ($\lambda = 1,2$ см) на второй гармонике гирочастоты ($n = 2$)*.

Электронно-оптические системы обоих гиротронов были почти идентичны. Анод, резонатор и коллектор каждого из гиротронов представляли собой единый электрод, находившийся под потенциалом земли, а на катод подавалось постоянное отрицательное напряжение до 20 кВ. Коэффициент перемагничивания пучка не превышал 4. Относительный разброс осцилляторных скоростей электронов, согласно измерениям, выполненным методом задерживающего потенциала [19], составлял 15—20%, т. е. в энергию вращательного движения электронов могло быть преобразовано в среднем не более 80% их полной энергии. В этом предельном случае интервал значений поступательных скоростей простирался от нуля до половины полной скорости электрона.

Электронный ток был ограничен мощностью источника питания и не превышал 1,5 А, при этом, как видно из (4), влияние пространственного заряда электронов в инжекторе на разброс электронных скоростей было незначительным.

Электродинамические системы гиротронов конструировались с таким расчетом, чтобы обеспечить наилучшую электродинамическую и электронную селекции мод. Для этой цели, в частности, соотношения между радиусами резонаторов и радиусом электронного потока были выбраны такими, чтобы факторы возбуждения рабочих мод были близкими к максимальным.

В гиротроне с $\omega \approx \omega_H$ резонатор оптимальной длины ($\mu_{\text{опт}} \sim 50$) имел бы слишком высокую добротность и максимальный КПД достигался бы при небольшом токе пучка — около 100 мА. Поэтому длина резонатора была выбрана меньше оптимальной ($\mu \sim 10$), что позволило путем снижения добротности получить более высокую выходную мощность, хотя и при несколько меньшем КПД, чем в гиротроне с резонатором оптимальной длины.

В гиротроне с $\omega \approx 2\omega_H$ для работы с максимальным электронным КПД при наибольшем токе пучка добротность резонатора должна была иметь величину, сравнимую с величиной омической добротности $Q_{\text{ом}} \approx 20 \cdot 10^3$, но тогда доля мощности, теряемой на нагрев стенок резонатора, была бы слишком велика. Поэтому дифракционную добротность резонатора было решено ограничить величиной, не превышающей $\frac{1}{2} Q_{\text{ом}}$.

Результаты измерений спектров мод резонаторов показали, что, в соответствии с теорией рабочие моды TE_{011} и TE_{021} имели значительно более высокие добротности, чем близкие к ним по частотам моды с продольными индексами $q \geq 2$.

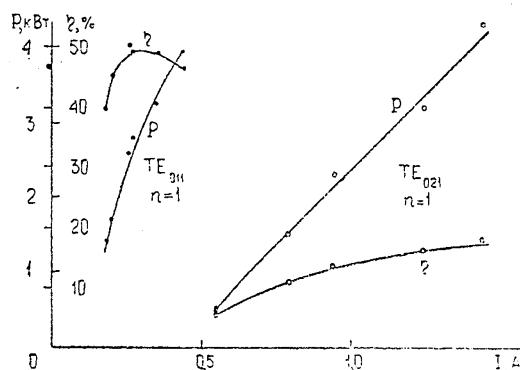
Охлаждение стенок резонаторов первоначально не было предусмотрено, но в ходе экспериментов выяснилось, что из-за омических потерь (особенно в гиротроне с $\omega \approx 2\omega_H$) стенки резонатора нагревались, отчего его добротность падала и выходная мощность на протяжении нескольких секунд после начала генерации снижалась. Это заставило ввести принудительное водяное охлаждение резонаторов.

* Результаты этих экспериментов были доложены на V Межвузовской конференции по электронике СВЧ в Саратове в 1966 году. Гиротрон с $n = 2$ уже тогда имел КПД, превышавший 15%, однако КПД гиротрона с $n = 1$ составлял только 33% и достиг 50% лишь некоторое время спустя, после смены профиля резонатора.

Коэффициент полезного действия представлял собой качественно различные функции тока в гиротронах с $\omega \approx \omega_H$ и $\omega \approx 2\omega_H$ (рис. 5). В гиротроне с рабочей модой TE_{011} , возбуждавшейся на основном циклотронном резонансе, КПД достигал своего максимального уровня при токе 300 мА и составлял 50%, при дальнейшем повышении тока выходная мощность генератора возрастала до 4 кВт, но КПД снижался. Экспериментальные величины КПД и тока в оптимальном режиме были близки к величинам, вычисленным на основе нелинейной теории для гиротрона с гауссовым распределением высокочастотного поля вдоль оси резонатора [17].

Рис. 5. Зависимость мощности и КПД гиротронов от электротокового тока.

Точки—мода TE_{011} ($n=1$), кружки— TE_{021} ($n=2$).



В гиротроне с рабочей модой TE_{021} , КПД и выходная мощность на второй гармонике гирочастоты монотонно возрастали с увеличением тока, хотя при наибольших значениях тока рост КПД замедлялся (рис. 5). Согласно теоретическим оценкам оптимальный ток гиротрона был порядка 5 А, а при токе 1,6 А с учетом омических потерь высокочастотной мощности (см. (9)) выходной КПД должен был составлять не более 30%. В экспериментах при токе 1,4 А КПД был несколько ниже — 18%, а выходная мощность достигала 4,3 кВт.

Таким образом, хотя максимальные «поперечные» КПД для гиротронов на основном циклотронном резонансе и на второй гармонике гирочастоты близки по величине, большие тепловые потери в гиротроне с $\omega \approx 2\omega_H$, в данном случае, привели к существенному снижению выходного КПД.

В последней лампе, кроме колебаний типа TE_{021} на второй гармонике гирочастоты, при других значениях магнитного поля наблюдались интенсивные колебания мод TE_{211} и TE_{011} с $\omega \approx \omega_H$. Поскольку добротности этих мод были слишком велики, то КПД достигал наивысших значений (30—40%) в режимах с относительно невысокими мощностями при токах порядка 100 мА.

Важным обстоятельством является то, что гиротроны имели высокий КПД, хотя разброс поступательных скоростей электронов был сравним с их средней поступательной скоростью. Следует отметить также хорошее согласие экспериментальных значений оптимального тока и КПД с соответствующими теоретическими величинами, вычисленными без учета разброса скоростей электронов.

Определение структуры высокочастотного поля облегчалось тем, что генераторы имели большую непрерывную мощность. Распределение интенсивности поля в поперечном сечении выходного тракта можно было определить по рисунку, выжигаемому высокочастотными токами на листе бумаги, помещенном между фланцами выходного волновода. Симметричные моды TE_{011} и TE_{021} выжигали на бумаге кольца (рис. 6 а, б), число которых совпадало с радиальными индексами мод.

Некоторые нарушения круговой симметрии этих изображений объясняются трансформацией симметричных мод в несимметричные моды выходного тракта. Например, при работе на моде TE_{021} на внешнем кольце отмечалось семь вариаций интенсивности (рис. 6 б), что указы-



Рис. 6. Структура высокочастотного поля в выходном волноводе гиротрона при работе на модах TE_{011} (а), TE_{021} (б), TE_{211} (в).

вало на присутствие в выходном волноводе моды TE_{71} . Эта мода не могла возбуждаться в резонаторе, сечение которого являлось для нее запредельным; появление ее было обусловлено близостью частоты гиротрона к критической частоте волны TE_{71} в выходном волноводе. В силу последнего обстоятельства, относительно малые неоднородности выходного тракта имели большое сопротивление излучения в моде TE_{71} и могли преобразовывать в нее заметную часть мощности. Легко оценить, однако, что мощность, переносимая модой TE_{71} , составляла лишь несколько процентов выходной мощности генератора.

Особый интерес представляет изучение поперечной структуры полей излучения мод с азимутальными индексами, не равными нулю. Хотя мгновенное распределение поля любой из этих мод не обладает аксиальной симметрией, однако азимутальные вариации покрываются бумаги при работе на несимметричных модах, например, на моде TE_{211} (рис. 6 в) были незначительными. Это может быть объяснено тем, что в согласии с теорией гиротрона поперечные структуры полей таких мод, возбуждаемых в аксиально-симметричном резонаторе гиротропным электронным потоком, являются вращающимися.

Эксперимент подтвердил предсказания теории о том, что гиротрон представляет собой одну из наиболее простых и надежных конструкций, пригодных для достижения высоких уровней мощности в коротковолновой части диапазона СВЧ. Адиабатическая магнетронно-инжекторная пушка обеспечивает формирование винтовых электронных пучков большой интенсивности. Открытый резонатор гиротрона при относительно большом (в масштабе λ^2) сечении обладает высокой степенью селекции мод. При работе на основных модах резонатора высокий КПД может быть достигнут даже в тех случаях, когда разброс поступательных скоростей электронов имеет величину порядка их средней поступательной скорости. Дифракционный вывод мощности из резонатора, с одной стороны, является фактором, благоприятствующим селекции мод, а с другой стороны, обеспечивает малую плотность потока мощности через выходное окно генератора. Перечисленные достоинства гиротрона послужили основанием для предположений, что генераторы этого типа могут быть использованы как источники мощного когерентного излучения в диапазоне не только сантиметровых, но также миллиметровых и субмиллиметровых волн. В последующем эти предположения были подтверждены экспериментально [15, 20, 21].

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Schneider, Phys. Rev. Letters, 2, № 12, 504 (1959).
2. R. H. Pantell, Proc. of Symp. on Millimeter Waves, N. Y., 1959, p. 301; Proc. IRE, 47, № 6, 1146 (1959).
3. А. В. Гапонов, Доклад на сессии НТОРиЭ им. А. С. Попова, М., 1959.
4. А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юллатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1414 (1967).
5. И. И. Антаков, В. М. Боков, Р. П. Васильев, А. В. Гапонов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 3, № 6, 1033 (1960).
6. И. И. Антаков, А. В. Гапонов, О. В. Малыгин, В. А. Флягин. Радиотехника и электроника, 11, № 12, 2254 (1966).
7. I. B. Bott, Phys. Letters, 14, № 4, 293 (1965).
8. А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, Д. П. Григорьев, И. И. Орлова, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, Письма в ЖЭТФ, 2, № 9, 430 (1965).
9. B. Kulke, R. W. Wilmarth, Proc. IEEE, 57, № 2, 219 (1969).
10. А. Л. Гольденберг, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, Авт. свид. № 226044 с приоритетом от 16 июня 1967 г., Офиц. бюлл. КДИО при СМ СССР, 1972 г., № 8, 234.
11. А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 1, 141 (1973).
12. В. К. Йыгни, Ш. Е. Цимринг, ЖТФ, 43, № 8, 1695 (1973).
13. С. Н. Власов, Г. М. Жислин, И. М. Орлова, М. И. Петелин, Г. Г. Рогачева, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 12, № 8, 1236 (1969).
14. С. Н. Власов, Л. И. Загрядская, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 11, 1743 (1973).
15. Д. В. Кисель, Г. С. Кораблев, В. Г. Павельев, М. И. Петелин, Ш. Е. Цимринг, Радиотехника и электроника, 19, № 4, 782 (1974).
16. М. А. Монсеев, Г. Г. Рогачева, В. К. Юллатов, Доклад на Всесоюзной сессии НТОРЭиС им. А. С. Попова, М., 1968.
17. Г. С. Нусинович, Р. Э. Эрм, Электронная техника, сер. 1, Электроника СВЧ, № 8, 55 (1972).
18. М. И. Петелин, В. К. Юллатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 18, № 2, 290 (1975).
19. Е. Г. Авдошин, А. Л. Гольденберг, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 10, 1605 (1973).
20. Н. И. Зайцев, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, В. А. Флягин, Радиотехника и электроника, 19, № 5, 1056 (1974).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
22 октября 1973 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CM WAVE GYROTRONS

A. V. Gaponov, A. L. Goldenberg, D. P. Grigor'ev, T. B. Pankratova,
M. I. Petelin, V. A. Flyagin

A cyclotron resonance maser (gyrotron) with an axially-symmetric adiabatic magnetron gun and open barrel-type resonator is experimentally investigated. The diffraction power output is used. In agreement with theoretical assumptions it is shown that in the gyrotron there may be realized (when the combined methods of electrodynamic and electron mode selection are used) a stable single-mode generation and the gyrotron efficiency may amount to some tens of percents even at a considerable electron velocity dispersion.