

- [5] Рудько В. Н. // Тез. докл. XVII Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 53.
 [6] Рудько В. Н. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. Вып. 5. С. 1676—1684.
 [7] Rudko V. N. // Radiat. Eff. 1986. Vol. 88. N 3—4. P. 257—271.
 [8] Азиезер А. И., Болдышев В. Ф., Шульга Н. Ф. // Физика элементар. частиц и атом. ядра. 1979. Т. 10. Вып. 1. С. 52—89.
 [9] Шульга Н. Ф., Трутень В. И., Фомин С. П. // Письма ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 10. С. 1037—1040.
 [10] Азиезер А. И., Шульга Н. Ф. // УФН. 1982. Т. 137. Вып. 4. С. 561—604.
 [11] Белошицкий В. В., Кумахов М. А. // ДАН СССР. 1980. Т. 251. № 2. С. 331—335.
 [12] Ведринский Р. В., Малышевский В. С. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. Вып. 3. С. 899—907.
 [13] Базылев В. А., Головизнин В. В., Демура А. В. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 4. С. 855—858.
 [14] Кумахов М. А., Комаров Ф. Ф. Излучение заряженных частиц в твердых телах. Минск, 1985. 384 с.
 [15] Базылев В. А., Жеваго Н. К. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987. 272 с.

Поступило в Редакцию
11 мая 1988 г.

Институт ядерных исследований
АН УССР
Киев

04; 09; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 8, 1989

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ГИРОТРОНА

Т. Б. Панкратова, Г. С. Нушинович

В последние годы усилился интерес к изучению возможностей применения гиротронов субмиллиметрового и коротковолновой части миллиметрового диапазонов для активной диагностики плазмы (см., например [1, 2]). В частности, гиротроны, способные работать

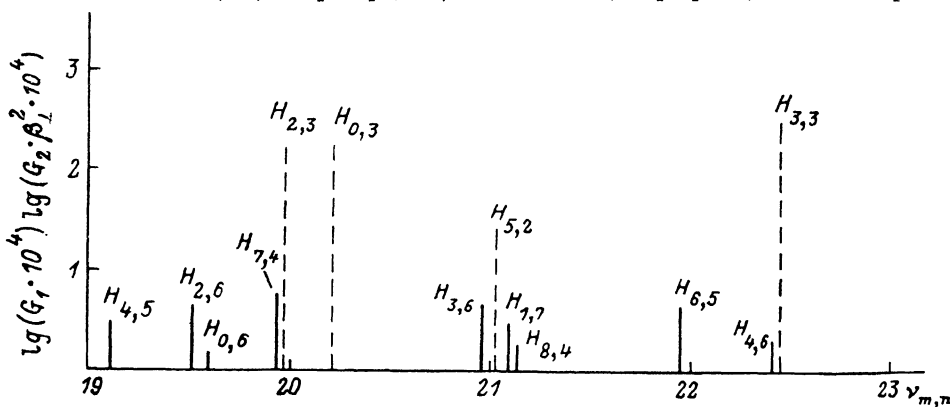


Рис. 1.

в режиме непрерывной генерации с уровнем мощности порядка и более 100 Вт при достаточно стабильных выходных параметрах излучения, представляют интерес для зондирования плазмы с целью изучения дрейфовых неустойчивостей и для многоканальной интерферометрии. Ниже описан разработанный для этой цели диагностический гиротрон, рассчитанный на генерацию излучения с длиной волны 1.2 мм в условиях циклотронного резонанса высокочастотного поля со второй гармоникой циклотронной частоты электронов.

Для того чтобы исследовать возможность получения генерации на второй гармонике циклотронной частоты ω_H в гиротроне с развитым пространством взаимодействия, в качестве рабочей была выбрана мода $H_{6,5}$ обычного цилиндрического резонатора с дифракционным выводом мощности. Радиус центров циклотронного вращения электронов тонкого трубчатого пучка R_0 соответствовал внутреннему максимуму функции $J_{\frac{1}{2}}^2(k_{\perp 6,5} R_0)$, описываю-

щей импеданс связи электронов с модой $H_{6,5}$, вращающейся по азимуту в том же направлении, что и электроны во внешнем магнитном поле (k_{\perp} — поперечное волновое число). Спектр критических частот $\omega_{m,p}^{KP}$ мод, соседних с $H_{6,5}$, показан на рис. 1, где собственные числа

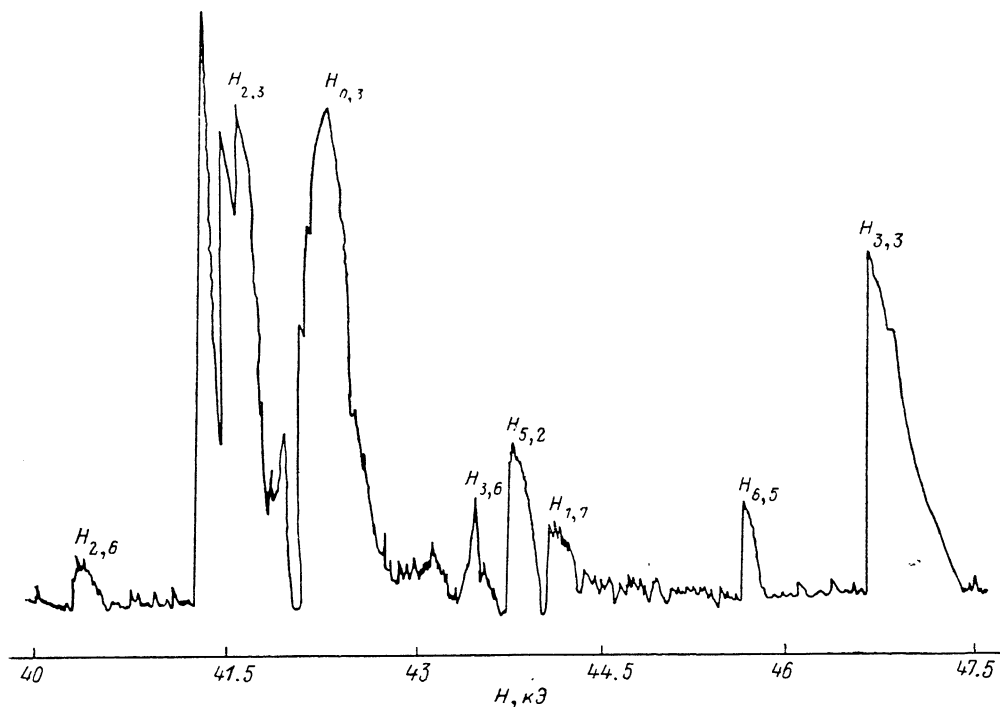


Рис. 2.

$\nu_{m,p} = \omega_{m,p}^{KP} R c$ (R — радиус резонатора) определяются граничным условием на стенке резонатора $J'_m(\nu_{m,p}) = 0$. Сплошными линиями показаны моды, резонансные со второй гармоникой ω_H , штриховыми — моды, возбуждающиеся на основном циклотронном резонансе (их положение на рис. 1 соответствует $2\nu_{m,p}$). Амплитуды отрезков на рис. 1 характеризуют импедансы связи электронов с полями мод

$$G_{m,p} = \frac{J_{m \pm n}^2(k_{\perp m,p} R_0)}{(\nu_{m,p}^2 - m^2) J_m^2(\nu_{m,p})},$$

индекс 1 у величины G на рис. 1 соответствует основному циклотронному резонансу ($n = \omega/\omega_H = 1$), индекс 2 — модам, возбуждающимся на второй гармонике ω_H . Ввиду того, что из-за различий в мультипольном характере взаимодействия электронов с высокочастотным полем в условиях резонанса с разными гармониками ω_H стартовые токи мод обратно пропорциональны произведению $G_n \beta_{\perp}^{2n}$ [$\beta_{\perp} = v_{\perp}/c$ — отношение поперечной скорости электронов к скорости света], на рис. 1 для мод, резонансных с $2\omega_H$, импедансы связи даны домноженными на β_{\perp}^2 , что позволяет непосредственно по данным этого рисунка анализировать отношение стартовых токов конкурирующих мод. Величина β_{\perp}^2 при построении рис. 1 принята равной 0.045, что соответствует описанным ниже условиям эксперимента.

Гиротрон был рассчитан на работу в режиме непрерывной генерации при раздельной подаче напряжения на анод и резонатор. Стабилизированное анодное напряжение (пульса-

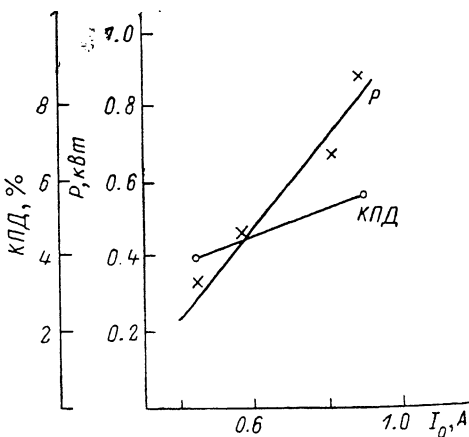


Рис. 3.

ции $\sim 0.1\%$ не превышало 6, а резонаторное (пульсации $\sim 4 \cdot 10^{-3}\%$) — 20 кВ. Ток пучка не превышал 1 А при пульсациях питания в цепи накала не более 15%. Питание сверхпроводящего соленоида осуществлялось от источника, имеющего долговременную нестабильность 0.01%. Дифракционная добротность резонатора по оценкам составляла около 5.6×10^3 , омическая — $14 \cdot 10^3$, что давало полную добротность около $4 \cdot 10^3$.

Результаты измерений зависимости выходной мощности гиротрона от величины внешнего магнитного поля представлены на рис. 2. Идентификация возбуждавшихся мод дана в соответствии с рис. 1. Мощность излучения паразитных мод, резонансных с основной гармоникой циклотронной частоты, составляла 5–6 кВт. График зависимостей выходной мощности и КПД рабочей моды $H_{6,5}$ от тока пучка при анодном напряжении $U_A = 5.3$ кВ и резонаторном напряжении $U_P = 18$ кВ представлен на рис. 3. Относительно низкий выходной КПД (не более 5%) объясняется тем, что при данных значениях напряжения и тока пучка генератор находился в «слабо надпороговом» режиме: как следует из рис. 3, ток пучка превышал стартовый в 3–4 раза, в то время как оптимальный по КПД ток, согласно [4], должен быть примерно на порядок больше.

При помощи резонансного волномера [5] были измерены длины волн излучения различных мод, которые оказались в хорошем соответствии с представленным на рис. 1 участком спектра критических частот. Рассчитанные по формуле $\lambda_{c,p} = 2\pi R / \nu_{m,p}$ критические длины волн и измеренные в эксперименте длины волн приведены в таблице. Были проведены измерения ширины линии излучения моды $H_{6,5}$. Она составила 200, ~ 300 и ~ 400 кГц на уровнях -3 , -10 и -20 дБ соответственно. Проведенный на основе развитой в [6] теории флуктуаций колебаний в гиротроне анализ показал, что основной причиной относительно широкой (ср. [7]) линии излучения являются недостаточная стабильность цепи накала катода и источника анодного напряжения.

Таким образом, в результате проведенных исследований в гиротроне на частоте около 250 ГГц в режиме непрерывной генерации получена СВЧ мощность до 900 Вт при ширине линии излучения, позволяющей использовать этот гиротрон (по крайней мере при гомодинной схеме приема) в качестве источника зондирующего излучения в экспериментах по активной диагностике плазмы. Следует отметить, что в данном эксперименте была получена устойчивая генерация на высокой рабочей моде ($H_{6,5}$) в условиях циклотронного резонанса со второй гармоникой ω_H , что позволяет рассчитывать на освоение подобными гиротронами диапазона субмиллиметровых волн.

Авторы признательны В. В. Паршину и Б. В. Шипкину за помощь в проведении измерений.

Список литературы

[1] *Woskoboinikow P., Cohn D. R., Temkin R. J.* // Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1983. Vol. 4. N 2. P. 205–231.

[2] *Лучинин А. Г., Нусинович Г. С., Флягин В. А., Шипкин Б. В.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 16. С. 993–996.

[3] *Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В. К.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414–1453.

[4] *Нусинович Г. С., Эрм Р. Э.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1972. № 8. С. 55–60.

[5] *Дрягин Ю. А., Паршин В. В.* // ПТЭ. 1982. № 8. С. 55–57.

[6] *Ергаков В. С., Шапошников А. А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 8. С. 1209–1217.

[7] *Terumichi Y., Kubo S., Ando A. et al.* // 9th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Takarazuka, Japan, 1984. P. 411–412.

Институт прикладной физики АН СССР
Горький

Поступило в Редакцию
31 мая 1988 г.