УДК 621.385.69.01

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО ГИРОТРОНА НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ДИНАМИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЯДЕР

Н. П. Венедиктов, В. В. Дубров, В. Е. Запевалов, С. Ю. Корнишин, А. В. Котов, А. Н. Куфтин, О. В. Малыгин, А. С. Седов, А. Ш. Фикс, В. И. Цалолихин

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В статье приводятся результаты экспериментов на непрерывном гиротроне с выходной частотой около 260 ГГц, разработанном для задач динамической поляризации ядер и работающем на второй гармонике циклотронной частоты. При ускоряющем напряжении 16 кВ и токе пучка 0,3 А была получена максимальная непрерывная мощность излучения около 200 Вт. Измерение тепловой нагрузки на резонатор позволило оценить его реальную омическую добротность. Зафиксировано также излучение гиротрона на других частотах и модах, исследованы их зоны генерации и структура выходного излучения. Определена долговременная стабильность параметров гиротрона.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время заметно усилился интерес к источникам когерентного излучения в диапазоне частот 200÷400 ГГц с выходной мощностью 10÷100 Вт, используемым в различных научнотехнических приложениях [1–3]. Одними из наиболее перспективных источников такого диапазона частот и уровня мощности являются гиротроны [4, 5]. В связи со сложностью создания сильных постоянных магнитных полей большинство гиротронов этого диапазона проектируются на гармониках циклотронной частоты.

В работе [6] обсуждались вопросы проектирования и оптимизации резонатора одного из таких приборов — непрерывного гиротрона для задач динамической поляризации ядер на частоте 258,6 ГГц (с точностью 0,5 ГГц по отношению к заданной частоте), работающего на второй гармонике циклотронной частоты. Основными требованиями к данному прибору были обеспечение выходной мощности порядка 100 Вт, а также поддержание высокой стабильности частоты на уровне  $10^{-5}$  в течение достаточно долгого времени (около 12 часов). Такой прибор должен работать в составе гиротронного комплекса совместно со спектрометром ядерного магнитного резонанса, быть простым и надёжным в эксплуатации.

В качестве рабочей моды для данного гиротрона была выбрана мода TE<sub>-23</sub>, где знак минус обозначает вращение электронов, противоположное вращению высокочастотного (BЧ) поля. В частности, было показано, что при ускоряющем напряжении 13÷15 кВ и токе электронного пучка 0,2÷0,5 А выходная мощность может достигать 0,1÷0,3 кВт. В работе [7] обсуждались вопросы обеспечения высокой стабильности такого гиротрона, а в [8] излагались методика и результаты разработки системы формирования винтового электронного пучка. Ниже излагаются основные результаты экспериментов, проведённых на данном гиротроне.

## 1. ОБЩАЯ СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведена блок-схема экспериментального гиротронного комплекса с указанием марок используемых приборов (за исключением тех, которые были сделаны в ИПФ РАН). На

Н. П. Венедиктов, В. В. Дубров, В. Е. Запевалов и др.

260



Рис. 1. Блок-схема гиротронного комплекса



Рис. 2. Схема гиротронной лампы: 1 — катод, 2 — эмиттер, 3 — анод, 4 — резонатор, 5 — коллектор, 6 — выходное окно, 7 — выходной фланец, 8 — охлаждение резонатора, 9 — охлаждение коллектора, 10 — криомагнит

рис. 2 приведена схема экспериментального гиротрона. Гиротрон выполнен отпаянным, в виде вакуумной лампы металлокерамической конструкции с осевым выводом энергии. Для поддержания вакуума использован встроенный магниторазрядный насос. Электронно-оптическая система гиротрона с эмиттером на основе гексаборида лантана обеспечивает формирование винтового электронного пучка с требуемыми параметрами [8]. Схема включения триодной магнетронноинжекторной электронной пушки для простоты эксплуатации системы была выбрана квазидиод-

Н. П. Венедиктов, В. В. Дубров, В. Е. Запевалов и др.

261



Рис. 3. Внешний вид гиротронной лампы



Рис. 4. Гиротронная лампа, вставленная в криомагнит

ной — анод был заземлён через высокоомный резистор. Использовался высокостабильный источник высокого напряжения марки НСН20000-20000, изготовленный фирмой «FUG Electronik» (ФРГ), с максимальным напряжением 20 кВ и током 1 А. Резонатор гиротрона был выполнен из меди по специальной технологии и имеет профиль, наименее критичный к изменениям параметров электронного пучка [6]. Резонатор сопряжён с выходным волноводом с диаметром 20 мм с помощью перехода плавного профиля, обеспечивающего достаточно малую паразитную трансформацию рабочей моды. Резонатор термически изолирован от коллектора и имеет отдельную систему водяного охлаждения для обеспечения требуемой температурной стабильности [7]. Коллектор электронного пучка гиротрона с диаметром 20 мм совмещён с выходным волноводом и имеет водяное охлаждение. Вывод энергии осуществлялся через согласованное окно с диаметром 20 мм, изготовленное из нитрида бора. Окно име-

ет независимую систему водяного охлаждения, что, в принципе, при обеспечении стабильного потока воды и соответствующей калибровке позволяет контролировать выходную мощность, поскольку потери в окне пропорциональны проходящей мощности и составляют около 20%. На участке между коллектором и выходным окном располагался внешний постоянный магнит, формирующий поперечное магнитное поле для отклонения приосевых электронов на стенки коллектора.

На рис. 3 приведена фотография гиротронной лампы. Для формирования требуемого магнитного поля использовался специально разработанный криомагнит. Расход жидкого гелия состав-

лял 0,14 л/ч при выключенном токе соленоида и 0,26 л/ч при токе, обеспечивающем рабочий уровень магнитного поля в резонаторе. Расход жидкого азота составил 0,16 л/час вне зависимости от режима работы. Для тонкой подстройки параметров электронного пучка была изготовлена специальная катодная катушка. Однако уже первые эксперименты показали нецелесообразность её использования по причине излишнего усложнения управления системой. В предварительно отъюстированный криомагнит (рис. 4) лампа вставлялась коллектором вверх. Оптимальные параметры электронного пучка в экспериментах подстраивались

Таблица 1. Расход воды в системе охлаждения для различных узлов гиротронного комплекса

Узел	Расход воды, л/мин
калориметр	1,88
анод	2,8
резонатор	6
OKHO	3
коллектор	9

малыми вертикальными перемещениями лампы в криомагните. Анод, резонатор, коллектор и выходное окно гиротрона имеют раздельные контуры охлаждения проточной дистиллированной водой. Расход воды для рабочего режима, когда номинальное входное давление равно 3 атм, но не превышает 4 атм, приведены в табл. 1.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ КПД ОТ ТОКА ПУЧКА И МОДУЛЯЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выходная мощность гиротрона определялась с помощью водяного калориметра. На рис. 5*a* для рабочей моды приведена зависимость мощности и КПД гиротрона от тока пучка при фиксированном ускоряющем напряжении 14 кВ и оптимизированном значении магнитного поля. Кроме максимальной мощности, в каждом режиме были также сняты зависимости мощности излучения



Рис. 5. Зависимости КПД (сплошная кривая) и мощности (штриховая кривая) излучения рабочей моды  $TE_{23}$  от тока электронного пучка (*a*), а также зоны генерации (*б*) для токов пучка 200 мА (*1*), 300 мА (*2*) и 400 мА (*3*) при фиксированном ускоряющем напряжении U = 14 кВ и частоте f = 258 ГГц



Рис. 6. Модуляционная характеристика для рабочей моды  ${\rm TE}_{-2\,3}$ при токе пучка, близком к $0,\!45$  A, и частоте f=258ГГц

от тока в сверхпроводящем соленоиде, пропорционального магнитному полю в резонаторе, т. е. так называемые зоны генерации гиротрона. На рис. 56 приведены несколько таких зон генерации, наложенных друг на друга. Эти зоны были построены с помощью двухкоординатного самописца при фиксированном ускоряющем напряжении и различном токе пучка для одного и того же интервала токов в соленоиде  $53,5 \div 54,2$  А. Рисунок 56 показывает также возможность генерации моды с одной продольной вариацией ВЧ поля при меньших магнитных полях и с двумя продольными вариациями ВЧ поля при бо́льших магнитных полях. Стоит отметить, что наиболее просто и быстро управлять мощностью гиротронного комплекса можно путём изменения ускоряющего на-

пряжения. На рис. 6 приведена зависимость мощности излучения от напряжения, т. е. модуляционная характеристика, при фиксированном токе накала, соответствующем току пучка 0,45 A при ускоряющем напряжении 13 кВ. Видно, что сравнительно малые изменения ускоряющего напряжения позволяют эффективно управлять выходной мощностью.

#### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В РЕЗОНАТОРЕ

При проектировании и оптимизации маломощных гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн одним из важных вопросов является правильный расчёт омической добротности, т. к. омические потери в приборах такого класса зачастую достигают  $60 \div 90\%$  [8]. Обычно добротность реального резонатора для моды  $TE_{mp}$  оценивают при помощи формулы, следующей из хорошо известного выражения для добротности резонатора из идеальной меди [9, 10]:

$$Q_{\rm ohm} = \frac{1\,360}{\alpha} \,\nu_{mp} \left(1 - m^2 / \nu_{mp}^2\right) \sqrt{\lambda \,\left[\text{MM}\right]} = \frac{\hat{Q}_{\rm ohm}}{\alpha} \,. \tag{1}$$

Здесь  $\hat{Q}_{ohm}$  — омическая добротность резонатора с идеально гладкими стенками,  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, учитывающий неидеальность материала и шероховатость поверхности стенки резонатора,  $\nu_{mp}$  — p-й корень уравнения  $J'_m(\nu_{mp} = 0)$ ,  $J_m(x)$  — функция Бесселя m-го порядка,  $\lambda$  — длина волны выходного излучения в мм. Для численных расчётов принималось  $\alpha = 2$  [6]. Проверка правильности этого предположения и уточнение  $\alpha$  были одной из основных задач проведённых экспериментов.

Мощность потерь на стенке Plos связана с выходной мощностью Pout соотношением

$$P_{\rm los} = \frac{Q_{\rm dif} \alpha P_{\rm out}}{\hat{Q}_{\rm ohm}} \,, \tag{2}$$

где  $Q_{\rm dif}$  — дифракционная добротность резонатора. В процессе экспериментов одновременно измерялась мощность потерь в резонаторе, т. е. тепловая нагрузка, и выходная мощность гиротрона. Тепловая нагрузка на резонаторе была измерена по изменению температуры воды в системе охлаждения резонатора гиротрона при возникновении генерации. Здесь не учитывалось изменение проводимости меди из-за омического нагрева, т. к. изменение температуры резонатора

Н. П. Венедиктов, В. В. Дубров, В. Е. Запевалов и др.

264

незначительно: для охлаждаемой стенки оно не превышало 10 °C, а для вакуумной стенки — 30 °C.

Результаты экспериментов приведены на рис. 7, где пунктирная линия обозначает зависимость, используемую для расчётов при  $\alpha = 2$ , а сплошная линия — результат усреднения экспериментальных данных, соответствующий  $\alpha =$ = 1,5. Как видно из графика, погрешность данных измерений была достаточно велика, однако, полученные результаты позволяют уверенно использовать коэффициент  $\alpha = 2$  в качестве оценки сверху при проектировании будущих гиротронов.

### 4. ГЕНЕРАЦИЯ ДРУГИХ МОД

Как известно, в гиротронах со сверхразмерными резонаторами возможно возбуждение не-



Рис. 7. Зависимость мощности омических потерь в резонаторе  $P_{\rm los}$  от выходной мощности  $P_{\rm out}$  (сплошная кривая,  $\alpha = 1,5$ ); пунктирной линией показан результат теоретического расчета для случая  $\alpha = 2$ 

скольких мод [5]. В ходе экспериментов были сняты зоны генерации гиротрона в широких пределах по магнитному полю. На рис. 8 приведены две такие зависимости при различных ускоряющих напряжениях, т. е. представлены зоны генерации двух мод: левая соответствует рабочей моде  $TE_{-23}$ , а правая — моде  $TE_{03}$ , которая, в принципе, также может использоваться в качестве рабочей. Мощности излучения на обеих модах примерно одинаковы: 150÷200 Вт при напряжении 15÷16 кВ и токах 0,3÷0,4 А, а частоты отличаются примерно на 2%. Как видно из рисунков, на обеих модах можно возбудить колебания с несколькими продольными вариациями поля, причём при увеличении ускоряющего напряжения, т. е. при уменьшении стартового тока, количество вариаций увеличивается. Данный механизм можно использовать для перестройки рабочей частоты, однако в этом случае процесс оптимизации конструкции такого гиротрона должен несколько отличаться от рассмотренного. А именно, оптимизация будет заключаться в достижении наиболее низкого стартового тока мод с большим числом продольных вариаций, что приведёт к увеличению дифракционной добротности и снижению мощности основной моды с одной продольной вариацией.

В рассматриваемом гиротроне в процессе проведения экспериментов при изменении режимов также фиксировалась генерация на модах  $TE_{42}$  и  $TE_{52}$  с уровнями мощности, достаточными для их использования в качестве рабочих.



Рис. 8. Зоны генерации по магнитному полю при ускоряющем напряжении 15 кВ (*a*) и 16 кВ (*б*); ток пучка составляет 0,3 А



Рис. 9. Поперечная структура поля на выходе из окна гиротрона для моды  $TE_{-23}$  (a),  $TE_{42}$  (б) и  $TE_{03}$  (в)

### 5. СТРУКТУРА ПОЛЯ ВЫХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В ходе эксперимента была получена поперечная структура ВЧ поля на выходе из окна гиротрона. На рис. 9 приведены зарегистрированные на термобумаге поперечные структуры полей мод  $TE_{-23}$ ,  $TE_{42}$  и  $TE_{03}$ . Как видно из рис. 9, указанные структуры в азимутальном направлении имеют вид стоячей волны. Это означает, в частности, что рабочая мода является суперпозицией волн  $TE_{-23}$  и  $TE_{23}$  с противоположными направлениями вращения. При этом остаётся открытым вопрос, генерируется ли стоячая мода непосредственно в резонаторе, например, из-за несоосности электронного пучка и резонатора [11] и (или) порождается нарушением аксиальной симметрии резонатора [5, 12, 13]. С другой стороны, не исключено, что мода с противоположным направлением вращения возникает на участке после резонатора в результате переизлучения основной моды. К переизлучению, в частности, может приводить отличие поперечного сечения резонатора и выходного перехода от резонатора к волноводу от круглого профиля.

Частотные измерения, выполненные с помощью измерительной линии и гетеродинным методом в ИПФ РАН, показали близость частоты генерации к проектному значению. Уточнённые измерения частоты проводились методом электронно-спинового резонанса на ядерном магнитном резонансном спектрометре в Институте биофизической химии университета Франкфурта-на-Майне и показали значение 258,9205 ГГц Измерения долговременной относительной нестабильности мощности и частоты гиротрона, проведённые там же, показали, что они не превышают 1% и  $5 \cdot 10^{-6}$  соответственно. Экспериментально было установлено, что изменение температуры резонатора с помощью регулировки температуры охлаждающей воды позволяет в некоторых пределах перестраивать частоту генерации со скоростью 4 МГц/°С. Это хорошо согласуется с теоретическими оценками [7].

#### выводы

В статье приведены результаты экспериментов, проводившихся на непрерывном гиротроне на второй гармонике с расчётной рабочей частотой 258,6 ГГц. В ходе экспериментов были найдены зоны генерации при различных токах пучка и ускоряющих напряжениях. Максимальная мощность излучения достигала 180 Вт при КПД 3,7%. Также были измерены частота генерации и омические потери в резонаторе. Были зафиксирована генерация соседних мод и найдены их зоны генерации. Получена генерация мод с различным числом продольных вариаций поля в резонаторе, что показывает возможности расширения диапазона электронной перестройки частоты. Были получены изображения поперечной структуры выходного излучения, которые показывают, что

из окна гиротрона выходит стоячая по азимуту волна. Анализ полученных данных и сравнение их с теорией будут изложены в отдельной работе.

Авторы признательны М.И. Петелину за интерес к работе и А.А. Богдашову, Л.В. Лубяко, Г.Ю. Голубятникову (ИПФ РАН), В. Денисенкову и М. Прандолини (Институт биофизической химии университета Франкфурта-на-Майне) за помощь в измерении мощности и частоты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и регионального конкурса Поволжье (грант 09– 02–97098), а также Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Bykov Yu., Eremeev A., Glyavin M., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 1, P. 67.
- 2. Idehara T., Ogawa I., Agusu La, et al. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28. P. 433.
- Hornstein M. K., Bajaj V. S., Griffin R. G., Temkin R. J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V. 35, No. 1. P. 27.
- 4. Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В. К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1 414.
- 5. Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore, London: The Johns Hopkins University Press, 2004.
- Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Малыгин О. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 5–6. С. 541.
- 7. Завольский Н. А., Запевалов В. Е., Малыгин О. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 12. С. 972.
- Запевалов В. Е., Корнишин С. Ю., Котов А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 251.
- 9. Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 5–6. С. 408.
- Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Григорьев Д.П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 13, № 2. С. 280.
- 11. Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б. // Гиротроны. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 169.
- Idehara T., Shibutani K., Nojima H., et al. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1998. V. 19, No. 10. P. 1 303.
- 13. Нусинович Г. С. // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 8. С. 1788.

Поступила в редакцию 29 апреля 2010 г.; принята в печать 28 мая 2010 г.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A CW HIGH-STABILITY SECOND-HARMONIC GYROTRON FOR SPECTROSCOPY OF DYNAMICALLY POLARIZED NUCLEI

N. P. Venediktov, V. V. Dubrov, V. E. Zapevalov, S. Yu. Kornishin, A. V. Kotov, A. N. Kuftin, O. V. Malygin, A. S. Sedov, A. Sh. Fiks, and V. I. Tsalolikhin

We present the results of the experiments on a continuous-wave gyrotron having an output frequence of about 260 GHz, which was developed for dynamic nuclei polarization and is operated at the second cyclotron-frequency harmonic. For an accelerating voltage of 16 kV and a beam current of 0.3 A, a

maximum CW radiation power of about 200 W has been obtained. Measurements of the thermal load on the resonator cavity allowed evaluating the real ohmic Q-factor of the latter. Gyrotron radiation was also registered at other frequencies and modes. Their generation zones and the structure of the output radiation have been studied. Long-term stability of gyrotron parameters has been determined.