



ИССЛЕДОВАНИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ ДЛЯ ДПЯ СПЕКТРОСКОПИИ В ИПФ РАН*

Н.А. Завольский, В.Е. Запвалов, М.А. Мусеев, А.С. Седов

В статье представлены результаты исследований, проводимых в ИПФ РАН и направленных на создание непрерывных гиротронов субмиллиметрового диапазона с выходной мощностью порядка нескольких десятков ватт. Подробно изложены результаты экспериментов на гиротроне с частотой 258 ГГц на второй гармонике гирочастоты. В ходе экспериментов была достигнута максимальная выходная мощность 200 Вт и относительная стабильность выходной частоты на уровне $5 \cdot 10^{-6}$ в течение многочасовой непрерывной работы гиротрона. Также обсуждаются меры по дальнейшему улучшению характеристик гиротронов данного класса, в том числе по расширению полосы частот генерации.

Ключевые слова: Гиротрон, терагерцовый диапазон, динамическая поляризация ядер.

Введение

В настоящее время существует потребность в источниках когерентного излучения диапазона частот 0.2...1.0 ТГц с выходной мощностью порядка 10...200 Вт. Данные источники используются для различных научно-технических приложений, таких как диагностика плотной плазмы, спектроскопия атомов и молекул, для медицинских приложений и других [1–3]. Наиболее подходящими источниками в данной области параметров сейчас являются гиротроны. Гиротрон относится к классу мазеров на циклотронном резонансе – приборов, основанных на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле [4]. Первые исследования в области субтерагерцовых гиротронов были проведены в начале 1970-х годов [5], где были достигнуты рекордные уровни непрерывной мощности, однако затем данные работы были временно остановлены из-за отсутствия приложений и появления более актуальных задач.

Самым быстро развивающимся применением для данного типа гиротронов является использование терагерцового излучения в спектроскопических установках,

*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6-11 февраля 2012.

использующих эффект динамической поляризации ядер (ДПЯ) [6]. Динамическая поляризация ядер – это передача поляризации от спинов электронов к ядерным спинам при СВЧ облучении электронных спинов для улучшения чувствительности в экспериментах по спектроскопии с ядерным магнитным резонансом.

Характерные частоты ядерного магнитного резонанса, используемые в ДПЯ-установках, составляют величину 400...1000 МГц, что соответствует частотам электронного магнитного резонанса (то есть частотам работы гиротрона) в диапазоне 260...660 ГГц. Обычно на входе в спектрометр требуется уровень непрерывной мощности порядка 10...20 Вт. Таким образом, учитывая потери в передающей линии (длина которой может составлять несколько десятков метров), выходном окне и другие, в резонаторе гиротронов должно генерироваться порядка 100 Вт. В связи со сложностью создания сильных постоянных магнитных полей, большинство гиротронов этого диапазона проектируются на гармониках гирочастоты. При этом, из-за возрастающей конкуренции со стороны мод на первой гармонике гирочастоты приходится использовать сравнительно низкие рабочие моды. Омические потери при этом составляют довольно существенную величину порядка 60...90% от мощности отбираемой у пучка. В основном гиротроны данного класса работают при ускоряющих напряжениях 10...30 кВ, токах до 1 А и на сравнительно низких модах [2, 3].

1. Разработка непрерывного гиротрона с частотой 258 ГГц на второй гармонике гирочастоты

В ИПФ совместно с НПП «Гиком» был разработан, изготовлен и протестирован непрерывный гиротрон на второй гармонике гирочастоты с частотой 258 ГГц [7,8]. Данный гиротрон в настоящее время является составной частью спектроскопического комплекса исследования динамической поляризации ядер в Институте биохимии М. Планка (Франкфурт-на-Майне, Германия) [9]. В силу специфики использования и характера решаемой задачи ключевыми требованиями для данного гиротрона были:

- 1) рабочая частота 258.6 ± 0.5 ГГц;
- 2) мощность на выходе из линии передачи 20 Вт;
- 3) стабильность частоты и мощности не хуже, чем 0.003% и 10%, соответственно, во время продолжительной работы гиротрона (порядка 12 часов);
- 4) простота в эксплуатации;
- 5) высокая надежность и долговечность.

Рассмотрим более подробно одно из требований к данному гиротрону – стабильность выходной частоты на уровне $\Delta f/f = 10^{-5}$. Было произведено численное моделирование, в котором исследовались отклонения параметров электронного пучка от своих средних значений (рис.1). Выяснилось, что могло привести к уходу частоты или даже к срыву генерации. При этом были определены требования к стабильности источников питания. Расчеты показали, что требуемая стабильность частоты 10^{-5} достигается при относительных флуктуациях параметров не более 0.5% по напряжению, 0.5% по току электронного пучка и 0.02% по величине магнитного поля соленоида.

Кроме флуктуаций параметров источников питания к нестабильности частоты приводит также изменение параметров системы охлаждения резонатора. Нагрев резонатора на 0.5°C означает относительный уход частоты 10^{-5} вследствие увели-

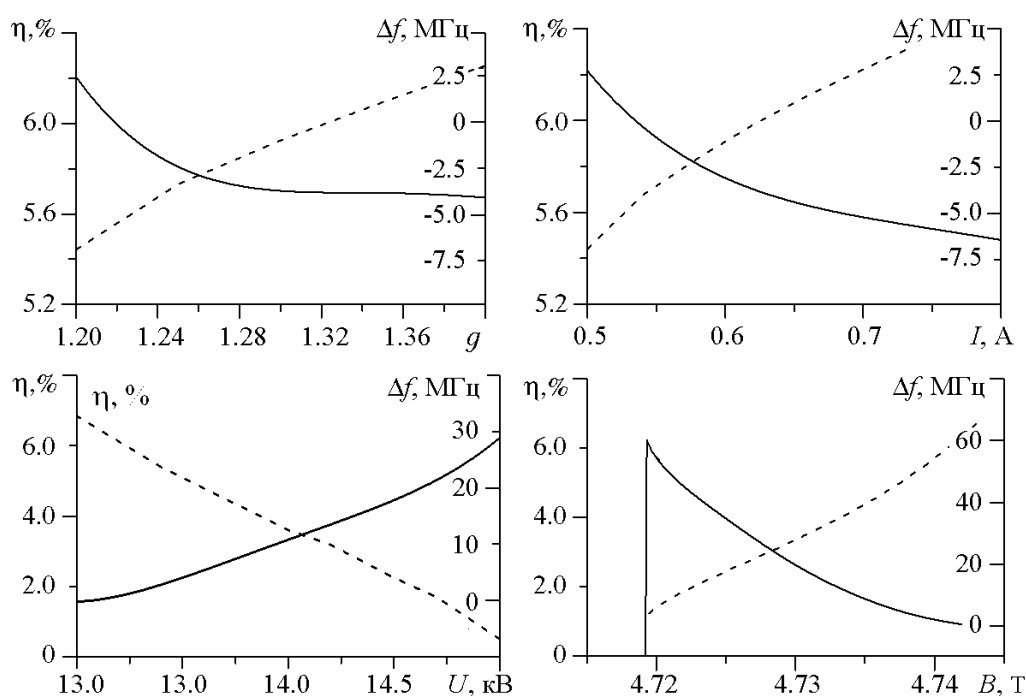


Рис. 1. Зависимости КПД (сплошные линии) и отстройки частоты (штриховые линии) от каждого из параметров (питч-фактор, ток, напряжение, магнитное поле) при фиксированных остальных для 258 ГГц гиротрона на второй гирогармонике

чения диаметра, в соответствии с температурным коэффициентом расширения меди примерно $1.7 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, система охлаждения должна обеспечивать постоянство температуры резонаторного блока с точностью лучше 0.5°C .

2. Основные результаты экспериментов

На рис. 2 приведена фотография гиротронной лампы. В предварительно отъюстированный криомагнит лампа вставлялась коллектором вверх. Оптимальные параметры электронного пучка достигались с помощью малых вертикальных перемещений лампы в криомагните. Анод, резонатор, коллектор и выходное окно гиротрона имеют отдельные контуры охлаждения и охлаждаются проточной дистиллированной водой.

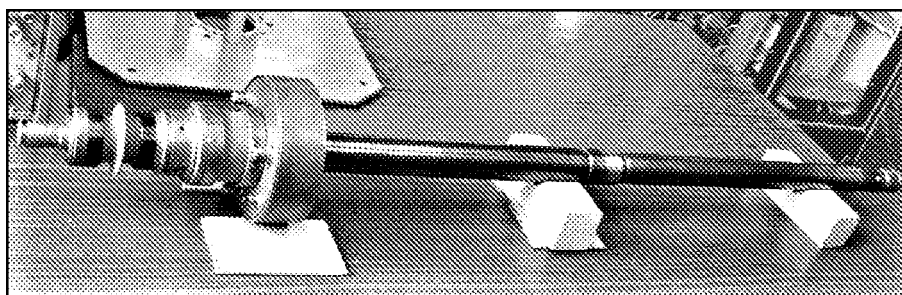


Рис. 2. Внешний вид гиротронной лампы

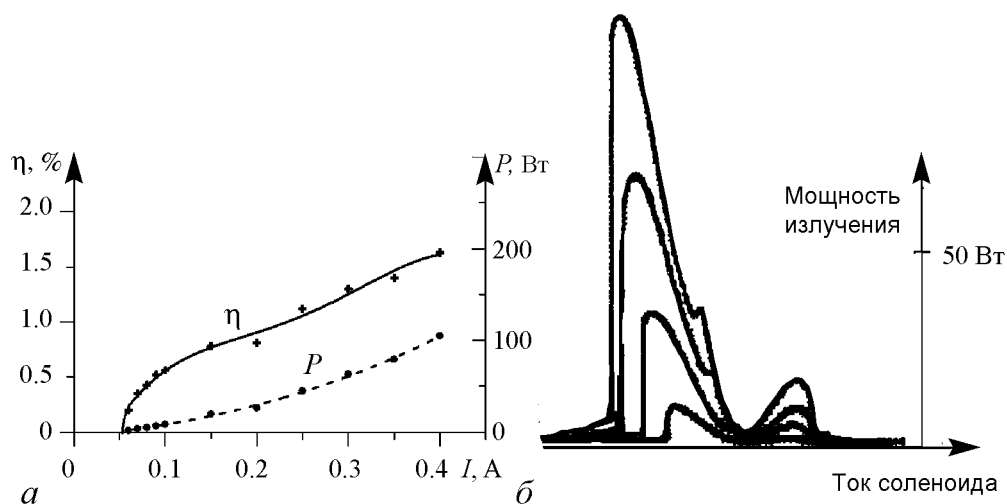


Рис. 3. КПД и мощность излучения рабочей моды $TE_{-2,3}$ при $f = 258$ ГГц (а) а также зоны генерации (б) в зависимости от тока электронного пучка I при фиксированном ускоряющем напряжении $U = 14$ кВ

На рис. 3, а для рабочей моды приведена зависимость мощности и КПД генерации от тока при фиксированном напряжении 14 кВ и оптимизированном значении магнитного поля. Кроме максимальной мощности, в каждом режиме были также сняты зависимости мощности излучения от тока сверхпроводящего соленоида, пропорционального магнитному полю в резонаторе (рис. 3, б). На этих зонах можно отметить генерацию моды с одной продольной вариацией ВЧ-поля (меньшие магнитные поля) и с двумя продольными вариациями ВЧ-поля (большие магнитные поля). Стоит отметить, что наиболее просто и быстро управлять мощностью гиротронного комплекса можно путем изменения ускоряющего напряжения.

Гетеродинные частотные измерения, выполненные с помощью измерительной линии в ИПФ РАН, показали близость частоты генерации к проектному значению. Уточненные измерения частоты проводились методом электронно-спинового резонанса на ЯМР-спектрометре в Институте биофизической химии университета Франкфурта-на-Майне (ИБФХ) и показали значение 258.9205 ГГц. Измерения долговременной относительной нестабильности мощности и частоты гиротрона в ИБФХ 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 на уровне 4 МГц/град. Это хорошо согласуется с теоретическими оценками.

3. Определение омических потерь в резонаторе

Как уже отмечалось, главным отличием маломощных субтерагерцовых гиротронов от технологических гиротронов и гиротронов для управляемого термоядерного синтеза является большая доля омических потерь в резонаторе. При этом в вычисления приходится вводить эмпирический коэффициент, учитывающий неидеальность материала и шероховатость поверхности стенки резонатора α (для численных

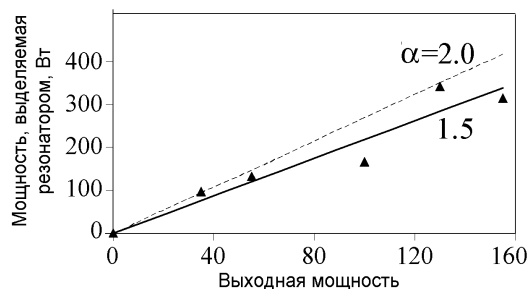


Рис. 4. Зависимость мощности омических потерь в резонаторе от выходной мощности: штриховая линия – теоретический расчет для случая; сплошная линия – усредненные экспериментальные данные

расчетов принималось $\alpha = 2$) [10]. Одной из задач эксперимента была проверка обоснованности введения такого коэффициента и его оценка.

Мощность потерь на стенке P_{los} связана с выходной мощностью P_{out} соотношением

$$P_{los} = \frac{Q_{dif} \alpha P_{out}}{\hat{Q}_{ohm}}, \quad (1)$$

где \hat{Q}_{ohm} – омическая добротность резонатора с идеально гладкими медными стенками, Q_{dif} – дифракционная добротность резонатора.

В процессе экспериментов одновременно измерялась мощность потерь в резонаторе (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, так как изменение температуры резонатора незначительно (охлаждаемой стенки менее или равно 10°C , а вакуумной стенки менее или равно 30°C).

Результаты экспериментов, отмеченные треугольными значками, приведены на рис. 4, где пунктирная линия обозначает зависимость, используемую для расчетов, а сплошная линия – результат усреднения экспериментальных данных. Как видно из графика, погрешность данных измерений была достаточно велика, тем не менее, полученные результаты позволяют уверенно использовать коэффициент $\alpha = 2$ в качестве оценки сверху при проектировании будущих гиротронов.

4. Генерация других мод

В ходе экспериментов были сняты зоны генерации гиротрона в широких пределах по магнитному полю. На рис. 5 приведены две такие кривые при различных напряжениях, где представлены зоны генерации двух мод: левая – рабочая мода

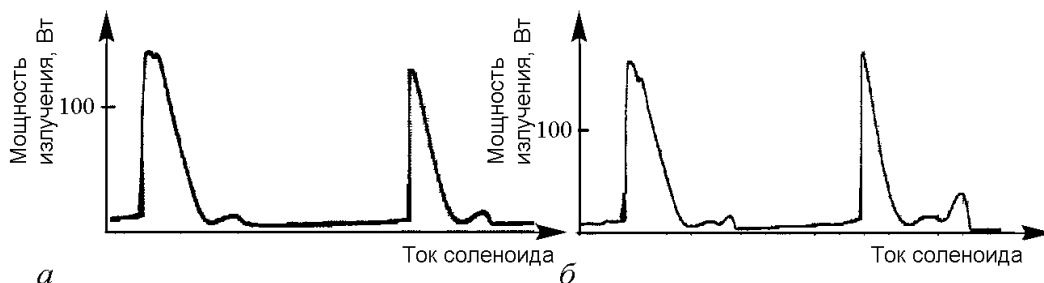


Рис. 5. Зоны генерации по магнитному полю при напряжениях: 15 кВ (а) и 16 кВ (б) и токе электронного пучка 0.3 А

$TE_{-2,3}$, правая мода – $TE_{0,3}$, которая, в принципе, также может использоваться для работы. 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 ВЧ-поля. Причем при увеличении напряжения (то есть при уменьшении стартового тока) количество вариаций увеличивается. Данный механизм можно использовать для перестройки частоты, однако в этом случае процесс оптимизации конструкции такого гиротрона должен несколько отличаться от оптимизации рассматриваемого гиротрона. А именно, оптимизация будет заключаться в достижении наиболее низкого стартового тока мод с большим числом продольных вариаций, что приведет к увеличению дифракционной добротности и снижению мощности основной моды с одной продольной вариацией. Более подробно данная идея рассмотрена в последнем разделе данной статьи.

В рассматриваемом гиротроне в процессе проведения экспериментов при изменении режимов также фиксировалась генерация на модах $TE_{4,2}$ и $TE_{5,2}$ с частотами 241 ГГц и 273 ГГц, соответственно, и уровнями мощности, достаточными для их использования в качестве рабочих.

5. Структура поля выходного излучения

В ходе эксперимента была получена поперечная структура ВЧ-поля на выходе из окна гиротрона. На рис. 6 приведены зарегистрированные на термобумаге поперечные структуры полей мод $TE_{-2,3}$, $TE_{4,2}$ и $TE_{0,3}$. Как видно из рисунка, указанные структуры имеют характер (в азимутальном направлении) стоячей волны. Это означает, в частности, что рабочая мода является суперпозицией волн с противоположным вращением $TE_{-2,3}$ и $TE_{2,3}$. При этом остается 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 [12]? С другой стороны, не исключено, что мода с противоположным вращением возникает на участке после резонатора в результате переизлучения основной моды. К переизлучению, в частности, может приводить отличие от круглого поперечного сечения выходного перехода. Мода $TE_{0,3}$ остается симметричной, так что на нее эти эффекты не действуют.

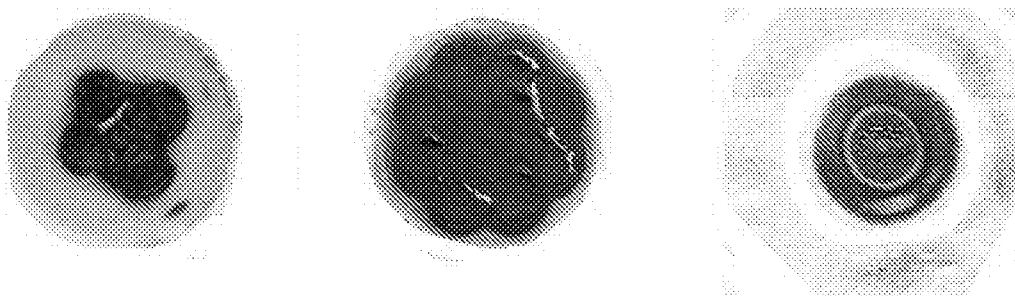


Рис. 6. Поперечная структура поля на выходе из окна гиротрона для некоторых мод

6. Численное моделирование и оптимизация субтерагерцовых гиротронов

В настоящее время работы по созданию субтерагерцовых гиротронов в ИПФ продолжают. Было проведено численное моделирование серии непрерывных гиротронов с частотами 0.26...0.8 ТГц как на первой, так и на второй гармонике гирочастоты. Основные параметры приведены в таблице. Была использована самосоглашенная расчетная модель, учитывающая нефиксированное распределение ВЧ-поля, разброс скоростей электронов, омические потери. Для каждого из этих гиротронов была выбрана рабочая мода, ограниченная, с одной стороны, возможностями формирования высококачественного электронного пучка в магнетронно-инжекторной пушке [13], а с другой стороны, ограниченная плотностью спектра паразитных мод, особенно на первой гармонике гирочастоты. При этом были построены картины стартовых токов рабочей и паразитных мод. Расчетный волновой КПД гиротрона составил величину порядка 1...3 %.

Одним из способов повышения чувствительности экспериментов в установках с ДПЯ-спектроскопией является использование излучения с импульсно-периодической структурой. Реализовать данный режим можно используя трехрезонаторный гироклистрон. Были проведены расчеты для данного типа усилителя на рабочей частоте 395 ГГц и второй гармонике гирочастоты и было показано, что при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка 0.5 А можно получить усиление в 30 дБ. При мощности входного сигнала 0.1 Вт это соответствует выходному излучению с мощностью порядка 100 Вт. Отметим, что такая система требует несколько большей длины однородного участка магнитного поля (порядка 40 мм) по сравнению с автономным гиротроном соответствующей мощности.

Таблица

Результаты расчетов выходных параметров ряда субтерагерцовых гиротронов на второй гармонике гирочастоты

Частота, ТГц	Номер гармоники	Рабочая мода	Ток электронного пучка, А	Ускоряющее напряжение, кВ	Мощность выходного излучения, кВт
0.26	2	TE _{-2,3}	0.5	15	0.2
0.26	1	TE _{0,3}	0.04	15	0.15
0.4	2	TE _{6,5}	0.4	20	0.15
0.8	2	TE _{-10,5}	0.4	20	0.1

7. Гиротрон с обращенной электродинамической системой

Как видно из результатов расчетов и эксперимента, при переходе между модами с различным числом продольных вариаций ВЧ-поля можно перестраивать частоту выходного излучения гиротрона, однако зона генерации получается достаточно изрезана (см. рис. 5, б).

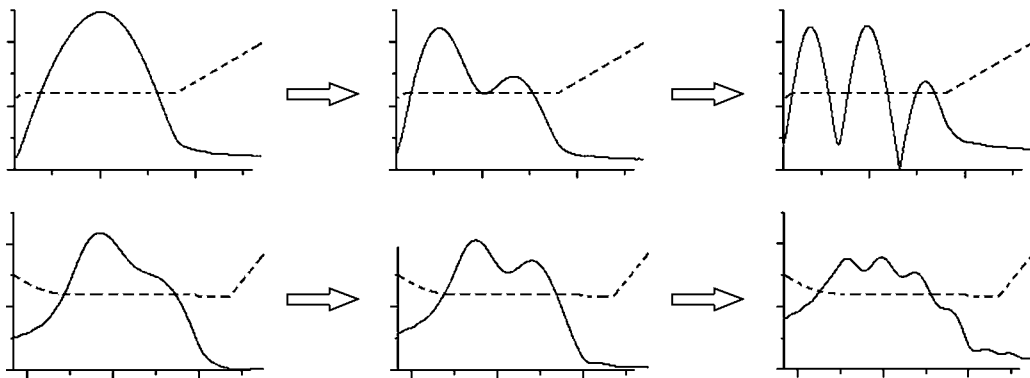


Рис. 7. Эволюция продольной структуры ВЧ-поля в резонаторе при увеличении магнитного поля: верхняя серия рисунков – случай электродинамической системы с излучением в сторону коллектора, нижняя серия – с излучением в сторону катода

Изрезанность зоны генерации можно уменьшить, подобрав такую электродинамическую систему, для которой при увеличении магнитного поля режим гиротронного возбуждения с одной продольной вариацией ВЧ-поля плавно переходит в режим работы гиро-ЛОВ.

Данный режим работы гиротрона можно реализовать, в частности, используя электродинамическую систему с выходным расширением со стороны электронной пушки и закритическим сужением со стороны коллектора. В таком гиротроне вблизи критической частоты режим возбуждения будет эквивалентен гиротрону с обычной электродинамической системой. При этом излучение будет отражаться от коллекторного конца в сторону электронной пушки. При дальнейшем увеличении магнитного поля продольная структура ВЧ-поля становится аналогичной гиро-ЛОВ и, соответственно, возможна сравнительно плавная перестройка частоты (рис. 7).

В качестве примера реализации такого принципа были взята электронная и электронно-динамическая система 258 ГГц гиротрона, описанного в предыдущих разделах.

На первом этапе исследований подбирались параметры инвертированной электродинамической структуры (глубина коллекторного сужения, его длина и т.д.) При этом сравнение производилось с результатами моделирования гиротрона с такими же характеристиками пучка, моды и обыкновенной электродинамической системой с выходным коллекторным расширением и катодным сужением. В дальнейшем будем называть такой прибор – гиротрон с обыкновенной электродинамической системой. При этом длина цилиндрической части в обеих рассматриваемых системах была одинакова и составляла 35 мм и в дальнейшем для сравнения не изменялась. Эффект существенного снижения стартовых токов наблюдается для рабочей моды с достаточно большим числом продольных вариаций ВЧ-поля (порядка 5–6). Однако зависимость стартовых токов, а соответственно, и зона генерации остается достаточно изрезанной.

Сделать зону генерации менее изрезанной можно, используя скругление катодного расширения. При этом уменьшение дифракционной добротности компенсируется увеличением эффективной длины взаимодействия пучка и волны. Стартовый

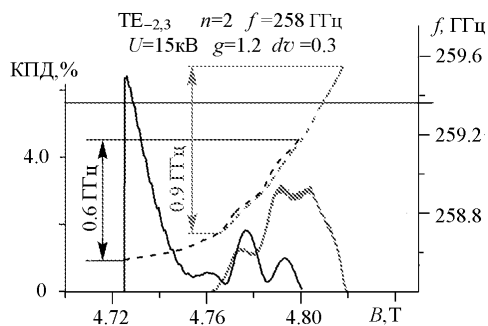


Рис. 8. Зависимости выходного КПД от магнитного поля. Левая линия: гиротрон с обычным резонатором. Правая линия: инвертированный резонатор с закруглением с сторону катода

ток моды с несколькими продольными вариациями в целом остается постоянным при сглаживании зависимости стартового тока от магнитного поля и, как следствие, зависимости от магнитного поля зоны генерации прибора (рис. 8).

При этом ширина полосы в инвертированной системе в полтора раза больше чем в аналогичном обыкновенном резонаторе. КПД в данной системе составляет величину 1...1.5%, что для данных параметров электронного пучка дает мощность порядка 100 Вт.

Заключение

В статье приведены результаты теоретического и экспериментального исследования непрерывного гиротрона с частотой 258.6 ГГц на второй гармонике циклотронной частоты. В ходе экспериментов были сняты зоны генерации при различных токах и напряжениях. Максимальная мощность излучения достигала 180 Вт при КПД 3.7%. Также были измерены частота генерации и омические потери в резонаторе. Была зафиксирована генерация соседних мод и сняты 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. При этом остановка вращения не приводит к существенному уменьшению мощности волны.

Следующим этапом исследований будет создание гиротрона с электродинамической системой, подобной ЛОВ. В данной системе можно будет реализовать достаточно широкую перестройку частоты порядка 1 ГГц.

Библиографический список

1. Bykov Yu, Ereemeev A., Glyavin M., et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. Vol. 32, № 1. P. 67.
2. Idehara T., Mitsudo S., Ui M., Ogawa I., Sato M., and Kawahata K. Development of frequency tunable gyrotrons in millimeter to submillimeter wave range for plasma diagnostics // J. Plasma Fusion Res. Series. 2000. Vol. 3 P. 407.
3. Hornstein M.K., Bajaj V.S., Griffin R.G., and Temkin R.J. Efficient low-voltage operation of a CW gyrotron oscillator at 233 GHz // IEEE Trans. on Plasma Science. Feb. 2007. Vol. 35, № 1. P. 27.
4. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore–London: The Johns Hopkins University Press, 2004.

5. *Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А.* // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 5. С. 1056.
6. *Griffin R.G.* Dipolar recoupling in MAS spectra of biological solids // Nature Struct. Biology. 1998. Vol. 5. P. 508.
7. *Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запезалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолыхин В.И.* Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
8. *Zapevalov V.E., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kornishin S.Yu., Kotov A.V, Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Tsalolikhin V.I., Zavolsky N.A.* Elaboration of 260 GHz Second Harmonic CW Gyrotron with High Stability of Output Parameters for DNP Spectroscopy // 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2010). Rome, Italy, 5–10 September 2010.
9. *Vasyl Denysenkov, Mark J. Prandolini, Marat Gafurov, Deniz Sezer, Burkhard Endeward and Thomas F. Prisner* liquid state DNP using a 260 GHz high power gyrotron // Phys. Chem. Chem. Phys., 2010 DOI: 10.1039/c003697h
10. *Zavolsky N.A., Zapevalov V.E. and Moiseev M.A.* Numerical study of processes in the cavity of the 170 GHz gyrotron for ITER operating at the TE_{25,10} mode // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2000. Vol. 21, № 9. P. 1381.
11. *Idehara T., Shibutani K., Nojima H., Pereyaslavets M., Yoshida K., Ogawa I., Tatsukawa T.* Study of electron beam misalignment in a submillimeter wave gyrotron // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1998. Vol. 19, № 10. P. 1303.
12. *Нусинович Г.С.* Конкуренция мод в гиромонотроне с нарушенной аксиальной симметрией // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19, № 8. С. 1788.
13. *Tsimring Sh.E.* Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Inc., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

Институт прикладной физики РАН

Поступила в редакцию

4.05.2012

THE INVESTIGATION OF SUBTERAHERTZ GYROTRON FOR DNP SPECTROSCOPY IN THE IAP RAS

N.A. Zavolsky, V.E. Zapevalov, M.A. Moiseev, A.S. Sedov

The paper presents the results of research is carried out in the Institute of Applied Physics and is aimed at creating a CW submillimeter gyrotrons with an output power of several tens of watts. Results of experiments on the 258 GHz gyrotron at the second harmonic of the gyrofrequency are presented. In the course of experiments maximum output power of 200 W and the relative stability of the output frequency at $5 \cdot 10^{-6}$ for the hours-long continuous operation of the gyrotron were achieved. Also the paper considers suggestions for further improvement of the gyrotrons' characteristics of this class, including the expansion of the frequency band.

Keywords: Gyrotron, terahertz waves, DNP.



Завольский Николай Александрович – родился в 1956 году в Ворсме (Нижегородская область). Окончил Горьковский государственный университет в 1978 году по специальности математика. После окончания и до настоящего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). Область научных интересов: численные методы и разработка программного обеспечения в решении задач акустики, распространения радиоволн и электронно-волнового и взаимодействия в гиротронах.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: zavolsky@appl.sci-nnov.ru



Запезалов Владимир Евгеньевич – родился в 1949 году в городе Бор (Нижегородская область). Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1972) по специальности радиофизика. Защитил кандидатскую диссертацию (1985) и докторскую (2008). Докторская диссертация посвящена проблемам повышения эффективности генерации мощных гиротронов. После окончания работал в Горьковском государственном университете, а с 1985 и до текущего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). Заведующий лабораторией мощных гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. Область научных интересов: теоретическое и экспериментальное исследование электронно-волновых процессов в мощных электронных приборах, а также разработка гиротронов для управляемого термоядерного синтеза, спектроскопии и технологических приложений. Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники (2011).

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: zapev@appl.sci-nnov.ru



Моисеев Марк Андреевич – родился в Горьком (1943). Окончил Горьковский государственный университет (1966) по специальности радиофизика. После окончания работал в НИРФИ, а затем до настоящего момента в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). Область научных интересов: теоретическое исследование электронно-волновых процессов в мощных гироприборах, распространение радиоволн в квазиоптических системах. Автор более 80 публикаций.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: moiseev@appl.sci-nnov.ru



Седов Антон Сергеевич – родился в 1984 году в Нижнем Новгороде, получил диплом бакалавра физики в 2005 году в ННГУ им. Лобачевского (Нижний Новгород), в 2007 году получил диплом магистра физики того же университета. После окончания ННГУ работает в Институте прикладной физики младшим научным сотрудником.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: anton-sedov@mail.ru