
ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.385.69.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ НЕСКОЛЬКИХ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ГИРОТРОНА ПРИ ПЕРЕСТРОЙКЕ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ

© 2022 г. А. А. Ананичев^а, А. С. Седов^{а,*}, А. И. Цветков^{а,б}, Н. В. Чекмарев^а

^а *Федеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики РАН”
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*

^б *Волжский государственный университет водного транспорта
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5*

**e-mail: sedov@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 01.11.2021 г.

После доработки 12.11.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение долговременной стабильности мощности субтерагерцового гиротрона при перестройке частоты генерации. Стабилизация мощности реализована за счет согласованного изменения технических параметров режима генерации. Рассмотрены две пары таких параметров: ускоряющее напряжение и температура охлаждающей жидкости резонатора или магнитное поле и температура охлаждающей жидкости резонатора. В результате экспериментов, выполненных с субтерагерцовым гиротроном киловаттного уровня мощности, была продемонстрирована стабильность мощности на уровне нескольких процентов при диапазоне перестройки частоты более 100 МГц, что подтверждает правильность предложенных подходов

DOI: 10.31857/S0032816222020094

ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны терагерцового диапазона [1, 2] являются уникальными источниками электромагнитного излучения, поскольку, будучи относительно компактными установками, обеспечивают сравнительно высокие (вплоть до 1 кВт) уровни непрерывной и импульсной мощности на частотах вплоть до 1.5 ТГц. Такие источники востребованы для решения целого ряда задач, в частности: для спектроскопии высокого разрешения, диагностики плотной плазмы, инициации точечного газового разряда в источниках экстремально-го ультрафиолета, дистанционной диагностики источников ионизирующих излучений и медицины [3]. Для целого ряда приложений, особенно спектроскопических, важным условием является возможность плавной перестройки частоты генерации при стабильном уровне мощности генерируемого излучения [4, 5]. Основная проблема в реализации такого режима заключается в том, что изменение одного из управляющих параметров (магнитного поля основного или катодного соленаоида, тока и энергии электронного пучка, температуры резонатора и т.д.) приводит к измене-

нию всех выходных характеристик: мощности, эффективности, частоты генерируемого излучения [6–8].

Для осуществления данного режима работы известны два подхода, один из которых основан на реализации системы обратной связи, управляющей электродинамическими элементами волноводного тракта (вращатели Фарадея или поляризаторы) [9, 10]. Данный подход имеет ряд достоинств и недостатков. К последним можно отнести наличие дополнительных конструктивных элементов, включая системы питания, защиты от рассеянного излучения, устройства индикации, хранения и обработки данных. Другим важным недостатком применения данного подхода является ограничение на возможный уровень выходной мощности, превышение которого может привести к нарушениям или выходу из строя самого прибора или его модулей. Второй подход к стабилизации мощности предполагает согласованное изменение нескольких управляющих параметров [11].

В данной работе исследуется возможность стабилизации генерируемой мощности субтерагер-

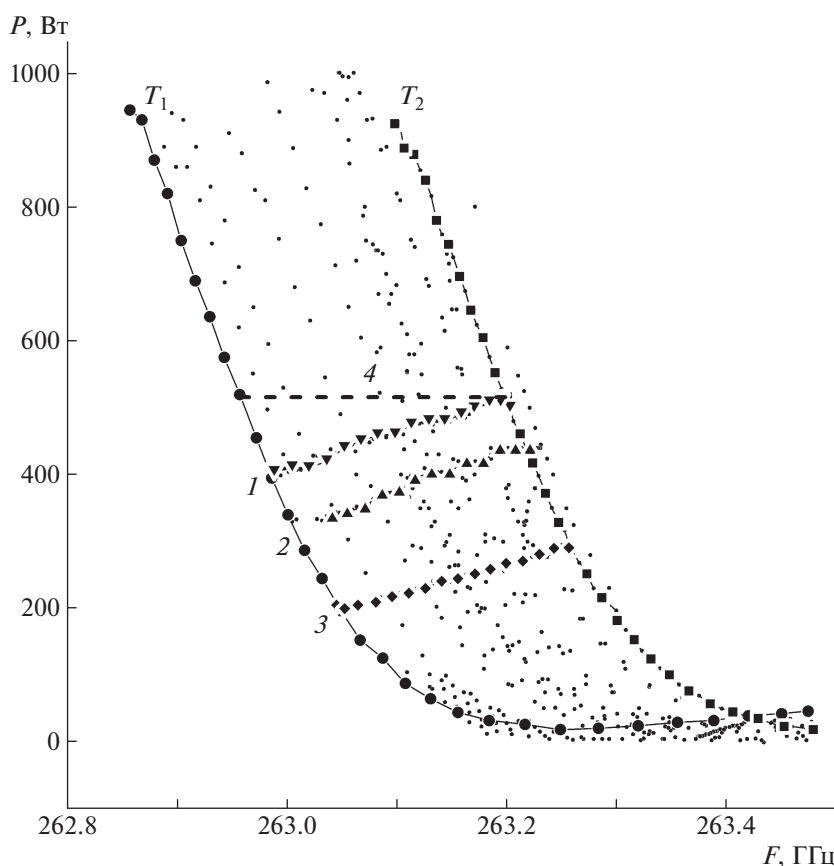


Рис. 1. Изменение мощности излучения от частоты генерации для гиротрона с частотой 263 ГГц: T_1 , T_2 — при перестройке по магнитному полю при фиксированной температуре охлаждающей жидкости (5 и 65°C соответственно); 1, 2, 3 — при перестройке по температуре охлаждающей жидкости при фиксированном магнитном поле (9.64, 9.65, 9.66 Тл соответственно); 4 — пример желательного режима перестройки частоты при стабилизации напряжения.

цового гиротрона при перестройке частоты путем одновременного изменения двух управляющих параметров.

ОПИСАНИЕ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА И АНАЛИЗ РАНЕЕ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эксперименты выполнены на автоматизированном комплексе с гиротроном мощностью 1 кВт и частотой 263 ГГц [12] в номинальном режиме. Комплекс разработан ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП “Гиком” [12–14]. На рис. 1 представлено полученное в эксперименте множество точек на плоскости выходных параметров “частота–мощность”. В частности, на плоскости можно выделить две группы режимов (кривые T_1 и T_2), полученных при фиксированных (5 и 65°C соответственно) температурах охлаждающей жидкости и при изменении магнитного поля соленоида. В области, ограниченной кривыми T_1 и T_2 , мощность может меняться от 20 до 950 Вт, а изменение частоты составляет 250 МГц. Стоит отметить

и другие последовательности режимов (1, 2 и 3), полученных при фиксированных значениях индукции магнитного поля (9.64, 9.65, 9.66 Тл) и изменяющейся температуре охлаждающей жидкости. Движение вдоль траекторий 1, 2, 3 приводит к изменению мощности на 20–30%. Подобное подмножество данных можно построить и для изменения других технических параметров, в частности ускоряющего напряжения электронного пучка.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СОГЛАСОВАННОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ДВУХ ПАРАМЕТРОВ

Для реализации режима с перестройкой частоты при сохранении выходной мощности необходимо применять сценарий с согласованным изменением нескольких управляющих параметров (не менее двух). Конкретный выбор данных параметров зависит от нескольких факторов, связанных как непосредственно с характеристиками гиротронного комплекса, так и со спецификой ре-

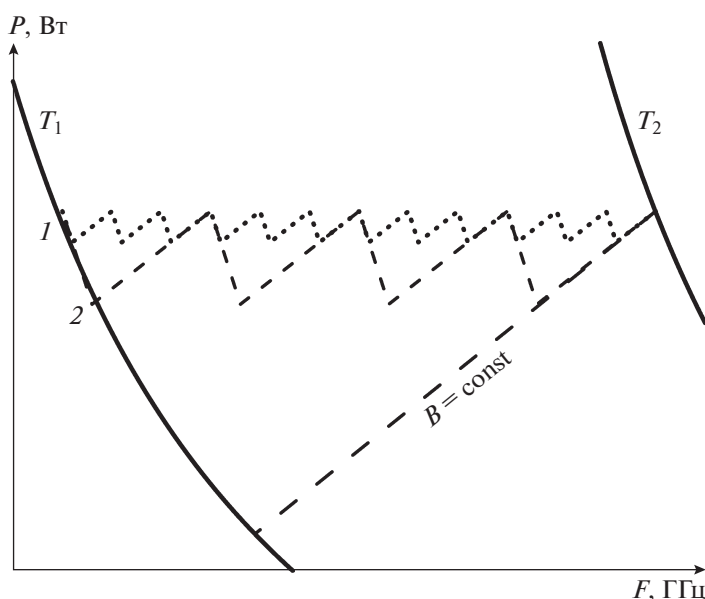


Рис. 2. Способы стабилизации мощности при перестройке частоты двумя параметрами: 1 — одновременное изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и индукции ведущего магнитного поля; 2 — одновременное изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и ускоряющего напряжения.

шаемой задачи. К основным факторам можно отнести желаемый уровень перестройки частоты, возможности источников питания гиротронных подсистем (возможный диапазон и минимальный шаг перестройки), а также характерную скорость установления необходимых параметров [15]. В силу того что данные исследования в основном направлены на эксперименты по спектроскопии высокого разрешения с использованием радиоакустического детектора, последний фактор не является критически важным, поскольку характерные времена записи одной спектроскопической линии составляют десятки минут. В случае же потребности в быстрой перестройке частоты из возможных управляющих параметров стоит исключить температуру охлаждающей жидкости, характерное время установления которой составляет порядка нескольких минут. В этом случае наиболее быстрой является перестройка с использованием анодного напряжения [9], однако такой подход обеспечивает существенно меньший диапазон перестройки частоты.

Таким образом, по результатам детального анализа экспериментальных данных, теоретических расчетов и специфики решаемой задачи было предложено два способа стабилизации мощности при перестройке частоты (рис. 2):

1) одновременное изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и индукции ведущего магнитного поля;

2) одновременное изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и ускоряющего напряжения.

Исходя из характеристик, используемых в гиротронном комплексе источников питания, более перспективным выглядит второй из предложенных вариантов, поскольку чувствительность при изменении напряжения составляет 0.02 Вт/В с минимально возможным шагом 100 В, а при изменении магнитного поля (силы тока через магнит) — порядка 1000 Вт/А с минимально возможным шагом 10 мА.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Общая схема эксперимента представлена на рис. 3. Микроволновое излучение поступает на направленный ответвитель, малая часть (доли процента) общей мощности излучения подается на вход гетеродинного смесителя и, далее, на анализатор спектра Keysight N9010A. Основная часть излучения поступает в калориметрическую нагрузку, позволяющую по разнице температур воды на входе и выходе при известном расходе определить генерируемую мощность.

Полученные в эксперименте зависимости мощности излучения от частоты генерации при изменении различных управляющих параметров представлены на рис. 4. Кривая 1 получена при изменении температуры охлаждающей жидкости и фиксированном магнитном поле и соответствует кривой с таким же номером на рис. 1. Кривые, соответствующие режимам с одновременным из-

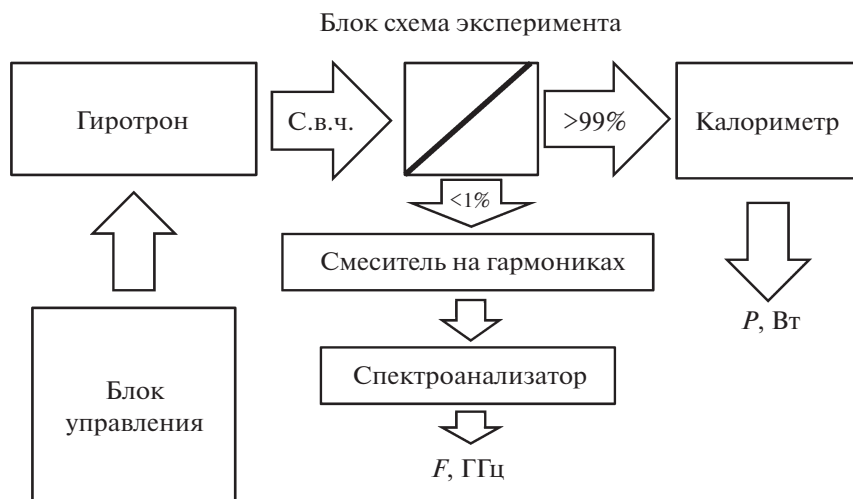


Рис. 3. Общая схема экспериментальной установки.

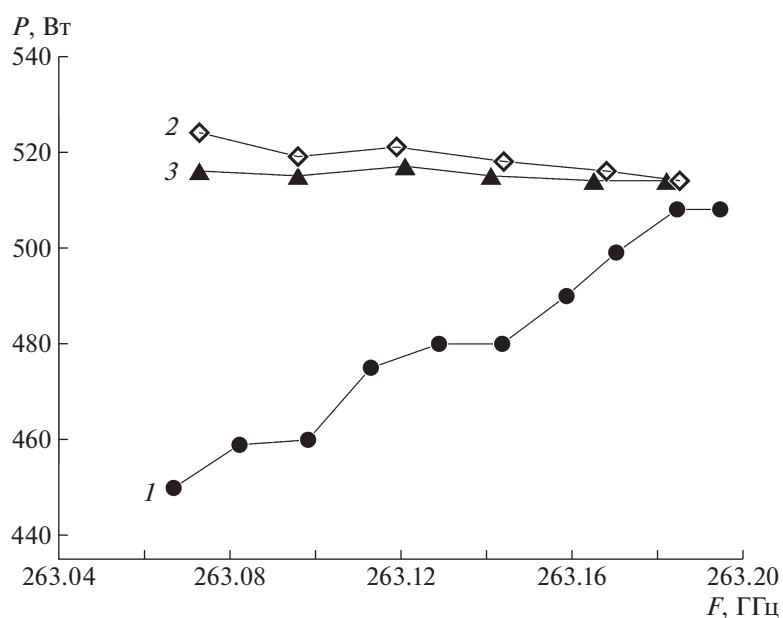


Рис. 4. Результаты эксперимента в сравнении с данными прежних экспериментов: 1 – изменение магнитного поля при остальных фиксированных параметрах; 2 – согласованное изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и ускоряющего напряжения; 3 – согласованное изменение температуры охлаждающей жидкости резонатора и индукции ведущего магнитного поля.

менением двух управляющих параметров, обозначены цифрами 2 (подстройка ускоряющего напряжения и температуры охлаждающей резонатор жидкости) и 3 (подстройка магнитного поля и температуры).

Можно видеть, что оба предложенных способа обеспечивают стабилизацию выходной мощности с точностью не хуже погрешности используемой измерительной калориметрической нагрузки (10 Вт), т.е. вариации мощности составляют менее 2.5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гиротроне с центральной частотой 263 ГГц экспериментально реализована стабилизация мощности излучения при перестройке частоты генерации с использованием одновременного согласованного изменения двух технических параметров режима работы. Предложенные методы могут быть использованы для решения задач молекулярной спектроскопии высокого разрешения, требующей стабильного (с вариациями не-

сколько процентов) долговременного уровня мощности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-19-01602.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thumm M.* // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2020. V. 41. P. 1.
<https://doi.org/10.1007/s10762-019-00631-y>
2. *Idehara T., Sabchevski S., Glyavin M.* // Appl. Sciences. 2020. V. 10. № 3. P. 980.
<https://doi.org/10.3390/app10030980>
3. *Sabchevski S., Glyavin M., Mitsudo S., Tatematsu Y., Idehara T.* // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2021. V. 42. № 7. P. 715.
<https://doi.org/10.1007/s10762-021-00804-8>
4. *Torrezan A.C., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J., Griffin R.G.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 2011. V. 58. № 8. P. 2777.
<https://doi.org/10.1109/TED.2011.2148721>
5. *Denysenkov V.P., Prandolini M.J., Gafurov M., Sezer D., Endeward B., Prisner T.F.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. № 22. P. 5786.
<https://doi.org/10.1039/c003697h>
6. *Pereyaslavets M., Idehara T., Nishida N., Yoshida K., Ogawa I.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 1999. V. 27. № 2. P. 363.
<https://doi.org/10.1023/A:1022616221713>
7. *Fokin A.P., Tsvetkov A.I., Manuilov V.N., Sedov A.S., Bozhkov V.G., Genneberg V.A., Movshevich B.Z., Glyavin M.Yu.* // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. Issue 12. P. 124705.
<https://doi.org/10.1063/1.5132831>
8. *Antakov I., Zasyrkin E., Sokolov E.* // J. Infrared and Millimeter Waves. 1993. V. 14. № 5. P. 1001.
<https://doi.org/10.1007/bf02084576>
9. *Мовшевский Б.З., Цветков А.И., Глявин М.Ю., Фокин А.П.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 40.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220060142>
10. *Каменский М.В., Кошелев М.А., Седов А.С., Скороходов С.А., Цветков А.И.* // Сб. докладов X Всероссийской научно-технической конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ” (Санкт-Петербург, 31 мая–4 июня 2021) СПб.: СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2021. С. 252.
11. *Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Лучинин А.Г., Морозкин М.В., Фокин А.П., Холопцев В.В., Цветков А.И.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 2. С. 89.
12. *Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. № 5. P. 054705.
<https://doi.org/10.1063/1.4921322>
13. *Golubiatnikov G.Yu., Koshelev M.A., Tsvetkov A.I., Fokin A.P., Glyavin M.Yu.* // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2020. V. 10. Issue 5. P. 502.
<https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2984459>
14. *Tsvetkov A.I., Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A., Fokin A.P.* // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. 2019. V. 40. № 10. P. 991.
<https://doi.org/10.1007/s10762-019-00622-z>
15. *Завольский Н.А., Запечалов В.Е., Малигин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 12. С. 972.