

# Поляризационный стабилизатор мощности излучения суб-ТГц гиротрона

М.В. Каменский<sup>1</sup>, М.А. Кошелев<sup>1</sup>, А.С. Седов<sup>1</sup>, С.А. Скороходов<sup>2</sup>, А.И. Цветков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>Научное объединение ШЮИ Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в работе описана конструкция стабилизатора мощности линейно поляризованного микроволнового излучения. Управление мощностью осуществляется за счет поворота поляризационной пластины в плоскости перпендикулярной оси распространения микроволнового пучка. Экспериментально продемонстрирована долговременная стабилизация мощности на уровне 4%. Устройство предлагается использовать для радиоакустического спектрометра на базе суб-ТГц гиротронов.

**Ключевые слова:** гиротрон, суб-терагерцовый диапазон, поляризатор, спектроскопия

## 1. Введение

Терагерцовый диапазон частот обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. Терагерцовые волны находят все более широкое применение для неинвазивной и неразрушающей диагностики различных сред, включая методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения [1, 2].

Еще одной областью исследований, в которой необходимо мощное суб-ТГц излучение, является молекулярная газовая спектроскопия высокого разрешения. Для большинства инструментов, использующих в суб-ТГц диапазоне частот классические спектроскопические методы (анализ прошедшего или переизлученного электромагнитного сигнала), на сегодняшний день достигнут предел чувствительности, определяемый фундаментальными физическими принципами. Дальнейшее повышение разрешающей способности спектрометров возможно с использованием опто-акустического метода детектирования газового поглощения, основанного на формировании акустических волн при прохождении через газовую среду излучения с периодической модуляцией мощности [3]. Акустический сигнал прямо пропорционален поглощенной мощности, и чувствительность метода растет с увеличением мощности сканирующего излучения. На основе этого принципа в ИПФ РАН создан радио-акустический спектрометр (РАД-спектрометр) [4] с рекордной чувствительностью [5]. При сканировании частоты источника излучения для записи молекулярных спектров изменяется мощность, что приводит к искажению формы линии. Для устранения этого искажения необходимо поддерживать постоянным уровень мощности излучения, поступающего на вход радио-акустического детектора. Современные гиротроны способны обеспечить очень высокий (сотни Вт на частотах до 1 ТГц) уровень мощности и представляется возможным стабилизировать мощность за счет управляемого аттенюатора. Поскольку узконаправленное излучение гиротрона формируемое квазиоптическим преобразователем [6], является линейно поляризованным, аттенюатор может быть реализован как поляризатор (поляризационная пластина), состоящий из натянутых на равном расстоянии параллельных тонких металлических проволочек. Поворотом пластины в плоскости, перпендикулярной оси распространения пучка, можно плавно регулировать

проходящую через поляризатор мощность излучения. В работе приведено описание автоматизированной системы стабилизации мощности и приводятся экспериментальные результаты.

В качестве источника излучения использовался гиротрон, работающий на основной циклотронной гармонике с частотой 0.26 ТГц с максимальной выходной мощностью 1 кВт (рабочая мода  $TE_{53}$ ) [7]. В качестве магнитной системы использовался не требующий заливки жидким гелием сверхпроводящий магнит JMТD10Т100 (Jastec Inc., Япония) с интенсивностью магнитного поля до 10 Тл и диаметром проходного отверстия 100 мм. Мощность гиротрона может плавно изменяться от нескольких ватт до максимальной путем изменения различных параметров, таких как ведущее магнитное поле, ток пучка и ускоряющее напряжение электронов. Номинальный режим работы обеспечивается при ускоряющем (катодном) напряжении 15 кВ и токе пучка 500 мА.

## 2. Управление поляризатором

Аттенуатор-поляризатор для управления мощностью излучения состоит из нескольких основных конструктивных и программных элементов: корпус, в котором содержится поворотный механизм, шаговый двигатель и датчик микроволнового излучения. Программный код обеспечивает управление и обратную связь между сигналом детектора и шаговым двигателем. Общая схема устройства приведена на рис. 1.

Корпус состоит из трёх пластиковых панелей с центральными отверстиями, соответствующими диаметру поляризационной пластины (две панели располагаются рядом и между ними находится поворотный механизм), четырёх шпилек с резьбой, соединяющей панели, алюминиевой трубки, к которой подключался шаговый двигатель и шестерней для поворота пластины (рис. 2А). Такая конструкция позволяла, меняя длину шпилек варьировать и общую длину установки. Элементы конструкции выполнены из немагнитных материалов, что особенно важно, поскольку некоторые элементы установки могут находиться в поле рассеянного магнитного поля основного соленоида, что может повредить их работе.

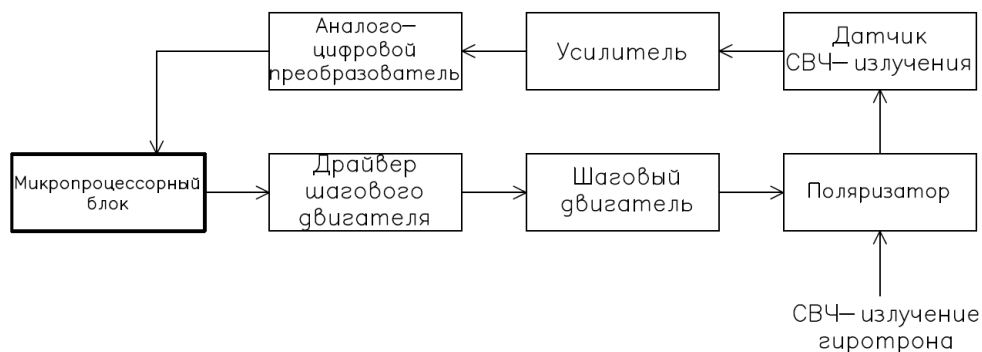


Рисунок 1. Функциональная схема устройства



А)

Б)

**Рисунок 2.** Фотография корпуса устройства А) и блока управления Б)

Шаговый двигатель, присоединённый к конструкции, вращает алюминиевый вал, на котором закреплена малая шестерня. Данная шестерня вращала большую шестерню, закреплённую между двумя пластиковыми панелями, в центральное отверстие которой была вставлена поляризационная пластина. Шестерни и панели изготовлены из пластика с помощью 3D печати. Управление системой и её связь с компьютером осуществлялась с помощью блока управления, состоящего из микропроцессорного устройства, элемента питания и драйвера шагового двигателя (рис. 2Б).

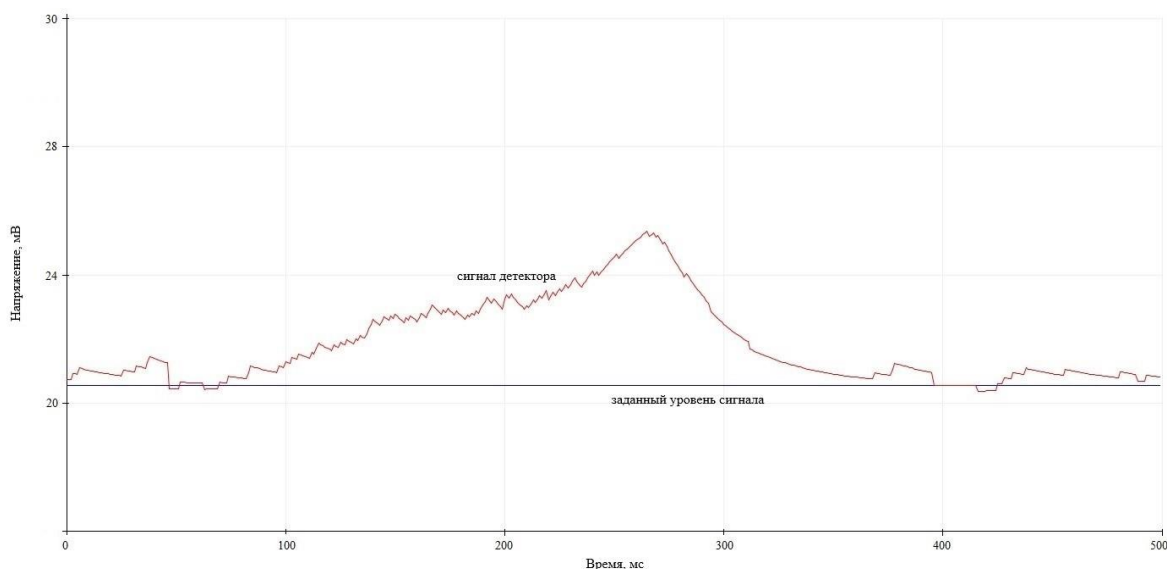
### 3. Экспериментальные результаты

При проведении экспериментов использовался ответвитель выходного излучения гиротрона для возможности одновременной транспортировки части излучения в калориметрическую измерительную нагрузку и к датчику излучения, расположенному за поляризатором и включенному в петлю обратной связи. Сигнал с датчика усиливался и поступал на 10-битный аналого-цифровой преобразователь.

При включении гиротрона на микропроцессорный блок поступает сигнал, зависящий от расположения датчика относительно траектории распространения волнового пучка и расстояния от выхода ответвителя излучения. Стоит отметить, что данный сигнал принимается на фоне помех. Для сглаживания входного сигнала использовался фильтр, построенный на алгоритме «скользящего среднего», реализованный программным способом. Использование фильтра позволило избежать потери полезных данных необходимых для правильной работы алгоритма автоматического управления с использованием цепи обратной связи.

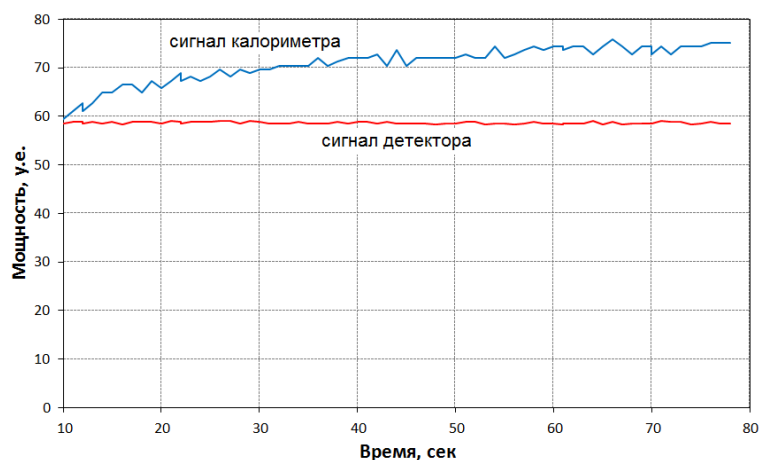
Во время тестирования разработанной системы стабилизации, с помощью различных управляющих параметров изменялась выходная мощность гиротрона. Сигнал с усилителя поступал на ПК управления гиротронным комплексом для наблюдения результатов работы системы на экране и сохранения полученных данных для дальнейшего анализа. Программа управления системой с высокой скоростью измеряла и фильтровала полученный уровень мощности излучения с терагерцового датчика, рассчитывала отклонение от заданного уровня и выдавала соответствующий управляющий сигнал. После этого шаговый двигатель делал необходимое количество шагов в нужном направлении, что приводило к повороту поляризационной пластины и стабилизации уровня мощности излучения, попадающего на датчик. Эффективный угол поворота пластины не превышал  $45^\circ$  относительно среднего положения. Поэтому в программу был встроены счётчик шагов, который не позволял пластине поворачиваться больше заданного угла, и сигнализировал об этом с помощью светодиода. Также программа позволяла в любой момент перезаписать заданный

уровень мощности и вернуть пластину в исходное положение. Обработка системы стабилизации показана на рис. 3. На нём отображаются – данные, поступающие на блок управления. Синим цветом показан заданный уровень мощности, а красным показана динамика изменения уровня мощности, попадающего на датчик СВЧ излучения при работе системы. После превышения входными значениями определённого порога, микропроцессорный блок даёт сигнал на поворот пластины в необходимую сторону для стабилизации мощности излучения на заданном уровне.



**Рисунок 3.** График работы системы стабилизации (синим цветом показан заданный уровень мощности, красным цветом показан измеренный уровень мощности, на оси x отображается время в мс)

На рис. 4 приведены графики сигналов, поступающих с калориметра и детектора. Мощность излучения гиротрона составляла примерно несколько десятков ватт. Синим цветом показано медленное изменение (повышение) выходной мощности гиротрона, измеряемой калориметром комплекса. Красным показан уровень мощности, измеряемый датчиком СВЧ излучения. Можно увидеть, что при медленном изменении уровня мощности гиротрона на несколько ватт уровень мощности излучения поступающего на датчик в среднем остаётся неизменным в пределах 3-4 %.



**Рисунок 4.** Мощность, измеренная калориметром (верхняя кривая) и детектором (нижняя кривая), расположенным после поляризатора (на оси x отображается время в секундах)

#### 4. Заключение

Разработанное устройство стабилизации мощности излучения было протестировано на примере излучения суб-ТГц гиротронного стенда. Продемонстрировано, что выходное излучения гиротрона стабилизировано с приемлемой для спектроскопических задач точностью. Также данное устройство может быть эффективно использовано и в других задачах, которые требуют управления или стабилизации параметров мощного микроволнового излучения. Коллектив авторов выражает благодарность М. Ю. Глявину за ценные замечания при подготовке работы.

Исследование поддержано **грантом Российского научного фонда (проект № 17-19-01602)**.

#### Список литературы

1. Blank M, Rosay M, Engelke F J. *Magn. Reson.* 264, 88 (2016).
2. Глявин М Ю и др. *Изв. ВУЗов. Радиофизика* 54, 666 (2011) [Glyavin M. Yu. et al. *Radiophys. Quantum Electron.* 54 600 (2009)].
3. M. A. Koshelev et al, *J. Mol. Spectrosc.* 331, 9–16 (2017).
4. Krupnov A.F., *Modern Aspects of Microwave Spectroscopy* (L: Academic Press Inc, 1979) p. 217.
5. Golubiatnikov G.Yu., et al. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 10(5) 773-783 (2020).
6. Власов С.Н., Загрядская Л.И., Петелин М.И., *Радиотехника и электроника*, 1975, Т.20, №10, с.2026-2030.
7. Glyavin M.Y. et al, *Rev Sci Instrum.* 2015 May;86(5):054705.