

# Определение мощности излучения гиротрона с многоострийным полевым эмиттером

Е.П. Тарадаев<sup>1</sup>, Г.Г.Соминский<sup>1</sup>, С.П.Тарадаев<sup>1</sup>, М.Ю.Глявин<sup>2</sup>, А.С. Зувев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого

<sup>2</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

**Аннотация:** Экспериментально исследован гиротрон субтерагерцового диапазона (140 ГГц), в котором применена электронно-оптическая система с многоострийным катодом, имеющим защитное металл-фуллереновое покрытие. Определены условия возникновения генерации: минимальный пусковой ток составил ~21 мА при магнитном поле 5.1 Тл, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Измеренная выходная мощность достигла 13 Вт при токе пучка 100 мА и ускоряющем напряжении 12 кВ.

**Ключевые слова:** полевая эмиссия, многоострийные системы, СВЧ, гиротрон

## 1. Введение

Развитие компактных и эффективных источников субтерагерцового излучения является актуальной задачей современной вакуумной электроники. Гиротроны малой и сверхмалой мощности нашли широкое применение в спектроскопии ЯМР с ДПЯ [1], медицинской диагностике [2], как и большинство приборов СВЧ, традиционно использует термоэмиссионные катоды с подогревом. Однако наличие накальных узлов в компактных приборах усложняют конструкцию, увеличивают время выхода на режим и исключают возможность мгновенного запуска прибора.

Перспективной альтернативой является применение холодных полевых эмиттеров, которые не требуют нагрева и практически безынерционны и могут обеспечить большие плотности тока. Однако применение полевых эмиттеров сталкивается с рядом проблем, таких как обеспечение высоких токов эмиссии, а так же стабильности работы в условиях интенсивной бомбардировки ионами остаточных газов в условиях технического вакуума.

В лаборатории Сильноточной и СВЧ электроники СПбПУ были предложены и испытаны кремниевые многоострийные структуры с защитным металл-фуллереновым покрытием [3], обеспечивающие токи эмиссии до сотни миллиампер при типичном техническом давлении (10<sup>-5</sup> – 10<sup>-6</sup> Торр) в вакуумной камере. Предыдущие работы [4, 5] показали принципиальную возможность работы гиротрона с разработанной электронно-оптической системой (ЭОС) с многоострийным катодом, однако для подтверждения этих результатов и оценки реальных характеристик устройства требовалось проведение натурального эксперимента.

Целью данной работы является экспериментальная апробация возможности генерации субтерагерцового излучения в гиротроне с ЭОС на основе многоострийного полевого эмиттера и анализ условий генерации излучения и оценка устойчивой работы такого устройства.

## 2. Экспериментальные результаты

Исследования проводились на разборном экспериментальном гиротроне, работающем на частоте 140 ГГц в импульсном режиме (длительность импульса ~ 100 мкс). Принципиальной особенностью установки являлось использование неадиабатической ЭОС, оснащенной многоострийным полевым эмиттером, с полной

схемой экспериментального прибора можно ознакомиться в [6]. Эмиттер представлял собой массив кремниевых острий кольцевой формы с плотностью упаковки  $10^5$  шт/см<sup>2</sup>, покрытых защитным Mo-C<sub>60</sub> покрытием.

Магнитная система включала основной и два дополнительных катодных соленоида. Конфигурация позволяла формировать необходимый профиль магнитного поля с плавным нарастанием от 0.35 Тл на катоде до 5.1 Тл в центре резонатора (коэффициент сжатия  $\sim 15$ ). Резонатор, оптимизированный для генерации на частоте 140 ГГц, работал на моде TE<sub>03</sub> с дифракционной добротностью около 36000.

Ток электронного потока задавался разностью тянущего напряжения (до -15 кВ) на катоде и напряжения на управляющем электроде (от -2 до +2 кВ). Измерение мощности излучения проводилось методом интегрирования углового распределения плотности потока мощности, измеряемого с использованием калиброванного диодного детектора. Полная выходная мощность вычислялась в предположении осевой симметрии диаграммы направленности.

### 3. Экспериментальные результаты

В ходе экспериментов было установлено, что устойчивая генерация достигается только при использовании всей системы соленоидов (см. рис. 1), создающих градиент магнитного поля в области катода. При отключении катодных соленоидов возбуждение колебаний не наблюдалось, что подтверждает определяющую роль конфигурации магнитного поля в формировании винтового электронного пучка.



**Рисунок 1.** Типичная осциллограмма при проведении измерений 1 - импульс отрицательного напряжения на катод; 2 – амплитуда СВЧ поля измеренная диодным детектором; 3 – ток эмиссии с катода.

Измерения пусковых токов показали хорошее соответствие проведенным ранее численным моделированием. Минимальный пусковой ток составил  $\sim 21$  мА при магнитном поле 5.1 Тл, что близко к расчетному значению (17.1 мА). На зависимостях пускового тока от магнитного наблюдались характерные особенности, связанные с конкуренцией аксиальных мод резонатора, что также подтверждалось резким спадом

амплитуды сигнала вблизи 5.07 Тл.

Так же была проведена оценка, выходной мощности, которая составила ~ 5 Вт при токе пучка 60 мА, что соответствует КПД ~ 0.7%. Увеличение тока пучка приводило к увеличению амплитуды ВЧ поля и при токе ~ 100 мА выходная мощность составила 13 Вт, при КПД в 1.08%.

### 3. Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований впервые продемонстрирована устойчивая генерация в гиротроне с многоострийным полевым катодом. ЭОС с полевым эмиттером формирует винтовой электронный пучок с током до 100 мА. Экспериментально подтверждена возможность получения выходной мощности на уровне 13 Вт на частоте 140 ГГц. Полученные значения мощности значительно превышают результаты предыдущих работ с полевыми эмиттерами в гиротронных устройствах. И данных мощностей уже достаточно для использования в ряде спектроскопических методик, в том числе и ЯМР с ДПЯ.

#### Список литературы

1. Nowak K. The gyrotron for DNP-NMR spectroscopy: A review //Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2022. – С. e140354-e140354.
2. Sabchevski S. et al. Novel and emerging applications of the gyrotrons worldwide: Current status and prospects //Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2021. – Т. 42. – №. 7. – С. 715-741.
3. Соминский Г. Г. и др. Многоострийные кольцевые полевые эмиттеры с защитными металл-фуллереновыми покрытиями //Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – №. 2. – С. 302-305.
4. Sominskii G. et al. Formation of an annular electron beam for subterahertz gyrotrons using an electron-optical system with a multtip field emitter //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2024. – Т. 71. – №. 11. – С. 7056-7060.
5. Taradaev E., Sominskii G. Characteristics of an annular electron flow formed by an electron gun with a field emitter //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2022. – Т. 69. – №. 5. – С. 2675-2679.
6. Glyavin M. et al. Design of a pulsed 0.5 THz gyrotron and preliminary test of its electron gun with field emitter //Infrared Physics & Technology. – 2020. – Т. 111. – С. 103480.