

Разработка электронно-оптической системы с полевым эмиттером для использования в гиротроне 140 ГГц

С.П. Тарадаев, Е.П. Тарадаев, Г.Г. Соминский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: в данной работе исследовались скоростные характеристики электронных потоков, формируемые электронно-оптической системой с многоострийным полевым эмиттером с защитным двухслойным металл-фуллереновым покрытием. Методом задерживающего поля определены распределения электронов по поперечной скорости и питч-фактору в винтовом электронном пучке. Полученные данные свидетельствуют о возможности получения интенсивной генерации СВЧ излучения.

Ключевые слова: гиротрон, полевая эмиссия, СВЧ.

1. Введение

В настоящее время гиротроны, как наиболее мощные и эффективные источники субтерагерцового излучения, широко применяются в различных областях науки и техники. Они играют ключевую роль в управляемом термоядерном синтезе для электронного циклотронного нагрева плазмы [1]. Гиротроны умеренной мощности находят применение в перспективных направлениях, таких как, материаловедение и медицина, в спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с динамической поляризации ядер (DNP), что позволяет проводить значительно увеличить ЯМР отклик биологических объектов [2].

В традиционных магнетронно-инжекторных пушках гиротронов для формирования винтовых электронных потоков (ВЭП) используются термокатоды, требующие накала для получения интенсивной электронной эмиссии. Существенные недостатки таких пушек связаны, прежде всего, с паразитным тепловым воздействием на элементы прибора, что негативным образом сказывается на стабильности рабочих и рабочих параметрах излучения. В качестве перспективной альтернативы для СВЧ-устройств умеренной мощности рассматриваются холодные полевые эмиттеры, которые не требуют накала, мгновенный выход на рабочий режим и потенциально более высокая энергоэффективность. Однако их практическое применение сопряжено с серьезными технологическими трудностями, включая проблемы достижения требуемых токов эмиссии (превышающих 20 мА), а также ограниченный ресурс работы в условиях технического вакуума. Последнее обусловлено, в основном, интенсивной ионной бомбардировкой поверхности эмиттера ионами остаточных газов и постепенной деградацией усиливающих электрическое поле структур.

В лаборатории сильноточной и СВЧ электроники ранее были разработаны многоострийные полевые эмиттеры с защитными металл-фуллереновыми покрытиями. Проведенные ранее исследования показали, что такие катоды могут обеспечить достаточно большие полные токи эмиссии до ~110 мА, при плотностях тока 0.1–0.3 А/см² при работе в условиях технического вакуума.

Исследования характеристик электронных потоков, формируемых простейшими электронно-оптическими системами (ЭОС) [3] с использованием разработанных полевых эмиттеров, сделаны ранее [4–7]. Разработанные ЭОС формируют

однородный по азимуту и радиусу ВЭП с разбросом по поперечной скорости до ~60%. Однако исследования проводились в условиях не типичных для работы гиротрона, при относительно малых токах с катода и слабых магнитных полях.

Целью данной работы является определение характеристик ВЭП формируемого ЭОС с многоострийным полевым эмиттером в условиях близких к рабочему режиму гиротрона работающего на частоте 140 ГГц.

2. Методика эксперимента

Источником электронов для ЭОС, схематическое изображение которой показано на рис.1, служил оптимизированный по морфологии многоострийный полевой эмиттер. Средний диаметр эмигрирующего пояска была 14 мм, ширина 0.65 мм, а высота и расстояние между остриями 30 мкм.

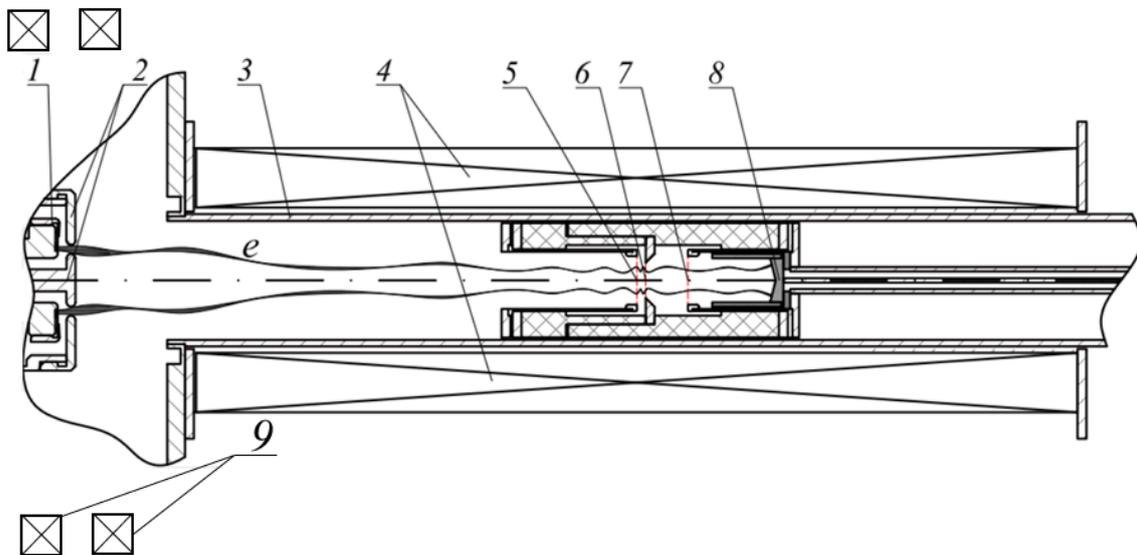


Рисунок 1. Схематическое изображение лабораторной установки, включающий ЭОС с установленным анализатором задерживающего поля: 1 – катод, 2 - управляющий, 3 – канал транспортировки электронного потока, 4 - соленоид, 5, 7 – экранирующие сетки, 6 – тормозящая сетка, 8 – коллектор электронов, 9 – катодные катушки.

Для создания необходимых электрических полей, обеспечивающих возникновение полевой эмиссии, использовалась разность потенциалов между катодом и управляющим электродом. При этом к катоду прикладывалось напряжение $U_c > 13$ кВ, а к управляющему электроду - напряжение $U_g > 10$ кВ. Полная энергия электронов определялась только напряжением на катоде. Эмитированные из катода электроны проходили сквозь кольцевую диафрагму в управляющем электроде, двигались в медленно нарастающем магнитном поле, а затем попадали в анализатор задерживающего поля. Измерялись полный ток катода, ток управляющего электрода, ток коллектора анализатора электронов.

На рис. 2 показана типичная вольт-амперная характеристика катода (тока I_c от разности потенциалов между катодом и управляющим электродом). В экспериментах токи эмиссии достигали значений ~ 60 мА.

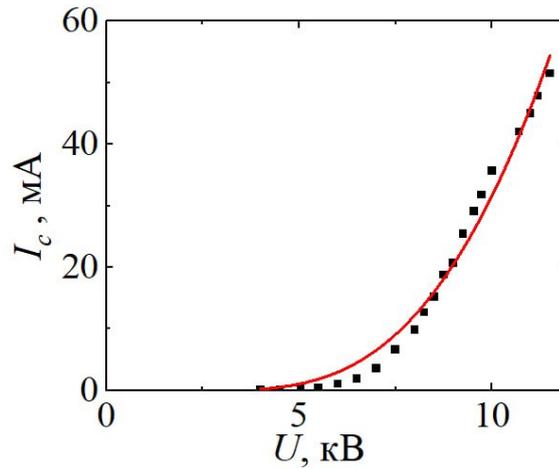


Рисунок 2. Вольт-амперная характеристика многоострийного катода.

Импульсное магнитное поле создавалось основным соленоидом и двумя катодными соленоидами. Катодные соленоиды располагались симметрично относительно катода и включались навстречу друг другу. Такое включение позволяло изменять наклон силовых линий магнитной индукции у поверхности катода. Величина индукции магнитного поля у поверхности катода составляла ~ 0.25 Тл, в центре соленоида ~ 5.1 Тл, тем самым обеспечивался коэффициент перемagnичивания $k \approx 20$.

Контроль скоростных характеристик ВЭП осуществлялся анализатором задерживающего поля. Измерялись зависимости тока анализатора I_a и тормозящего импульса U_r от времени, после чего строились зависимости тока прошедшего на коллектор анализатора I_a от задерживающего потенциала U_r . Анализатор располагался в центральной части основного соленоида, в области однородного магнитного поля. Предполагается, в дальнейшем заменить анализатор на резонатор.

Расчет распределения по продольным скоростям (V_{\parallel}) производился путем дифференцирования измеренной кривой задержки $I_a(U_r)$, а распределение по поперечным скоростям (V_{\perp}) рассчитывалось, исходя из информации о полной энергии электронов. Питч фактор определялся как $\bar{g} = \int gf(g)dg / \int f(g)dg$. В качестве критерия для оценки разброса скоростей и питч-фактора использовалось относительное среднеквадратичное отклонение от соответствующей средней величины.

Экспериментальные исследования скоростных характеристик электронного потока проводились в режиме одиночных импульсов. Длительность импульса магнитного поля составляла около 12 мс, напряжения ~ 100 мкс, интервалом между измерениями 10 мин. Измерения проведены как с одним основным соленоидом, так и дополнительными катодными.

3. Результаты

На рисунке 3 и на рисунке 4 показаны распределения электронов в ВЭП по скорости и питч фактору соответственно. Средний питч-фактор, формируемый ЭОС с многоострийным эмиттером, составил $0.3 - 0.4$ в отсутствии влияния катодных катушек. При этом среднеквадратичный разброс по поперечным скоростям составил от 40 до 50%.

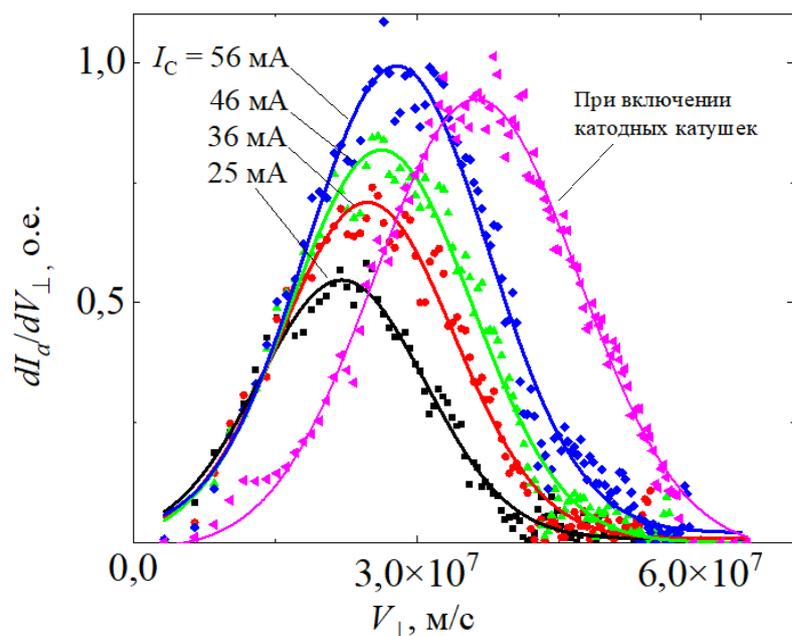


Рисунок 3. Распределение электронов по поперечной скорости в зависимости от тока в пучке.

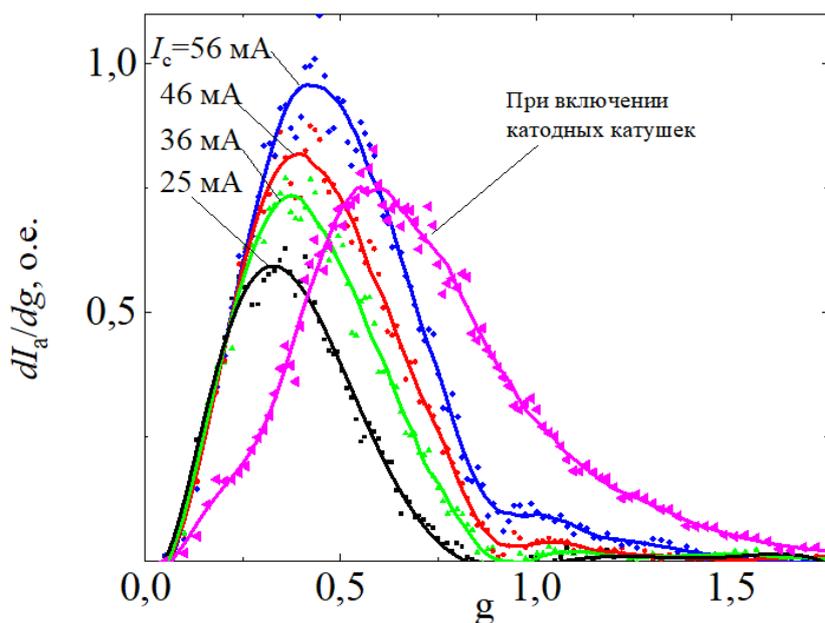


Рисунок 4. Распределение электронов по питч-фактору в зависимости от тока в пучке.

Включение катодных катушек позволяет увеличить питч фактор примерно на 10% с 0.34 до 0.43, а так же уменьшить разброс поперечных скоростей с 39 до 35 %.

4. Заключение

В работе представлены экспериментальные результаты по измерению характеристик ВЭП, формируемого (ЭОС) с многоострийным полевым эмиттером. Полученные токи в ходе эксперимента достигали 60 мА, а питч-фактор составил 0.3-0.4 при этом среднеквадратичный разброс поперечной скорости составил 30-40 %.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Российской Федерации по теме FSEG-2023-0016. Часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФ грант 23-29-00224.

Список литературы

1. Glyavin M. et al. Gyrotron-based technological systems for material processing—Current status and prospects //Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2020. – Т. 41. – С. 1022-1037.
2. Idehara T. et al. A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy //Review of Scientific Instruments. – 2017. – Т. 88. – №. 9.
3. Glyavin M. Y. et al. The concept of an electron-optical system with field emitter for a spectroscopic gyrotron //Infrared Physics & Technology. – 2016. – Т. 78. – С. 185-189.
4. Sominskii G. G. et al. Multitip semiconductor field emitters with new-type bilayer protecting coatings //Technical Physics. – 2015. – Т. 60. – С. 133-136.
5. Sominskii G. G. et al. Field Emitters for Miniature High-Voltage Electronic Devices Operating in Technical Vacuum //Radiophysics & Quantum Electronics. – 2019. – Т. 62.
6. 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.
7. Тарадаев Е. П., Соминский Г. Г., Тарадаев С. П. Токовые и скоростные характеристики электронных потоков, формируемых электронно-оптической системой с многоострийным полевым эмиттером //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2024. – Т. 17. – №. 1. – С. 64-70.