

Исследовательский гиротронный комплекс для изучения свойств электронных пучков и вторичной электронной эмиссии в гиросприборах

М.В. Морозкин¹, М.Д. Проявин¹, В.Н. Мануилов^{2,1}, В.Е. Котомина¹, М.В. Каменский¹,
А.А. Орловский¹, П.Д. Лихтерова^{2,1}

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: в работе представлен созданный в ИПФ РАН исследовательский гиротронный комплекс, предназначенный для экспериментального изучения свойств винтовых электронных пучков, используемых в гиросприборах, а также влияния вторичной электронной эмиссии на след электронного пучка в коллекторной области. Макет гиротрона, входящий в состав комплекса, создан с применением аддитивных технологий и технологии металлизации фотополимерных структур. Выполнены численные исследования вторичной эмиссии при осаждении пучка на коллектор гиротрона и влияния геометрии анализатора винтового электронного пучка, основанного на методе тормозящего электрического поля, на измеряемые им параметры.

Ключевые слова: вторичная эмиссия, гиротрон, электронно-оптическая система, винтовой электронный пучок, 3D-печать металлических элементов, аддитивные технологии, анализатор электронного пучка

1. Введение

В настоящее время гиротронные комплексы являются уникальным инструментом в различных областях науки и технологии. СВЧ-комплексы мегаваттного уровня мощности успешно используются для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) [1], технологические гиротроны средней мощности – для ионных источников [2] и высокотемпературной обработки материалов [3], а высокочастотные маломощные гиротроны применяются в области спектроскопии [4]. Вместе с развитием приложений растут и требования к выходным параметрам данных СВЧ-генераторов, главным образом, к повышению мощности и частоты генерации.

Однако при продвижении в область больших мощностей физические эффекты, роль которых ранее была незначительна, могут начать существенным образом сказываться на работе прибора. Актуальной является задача уточнения и улучшения используемых расчетных моделей для поиска новых возможностей по улучшению рабочих характеристик прибора. Для решения этой задачи необходимы новые экспериментальные данные о параметрах винтового электронного пучка (ВЭП) в гиросприборах и процессе осаждения ВЭП на коллектор.

В ИПФ РАН разработан исследовательский гиротронный комплекс, основанный на разборном макете гиротрона. Данный макет не предполагает взаимодействия ВЭП с электромагнитным полем, т.е. генерации СВЧ-мощности, и предназначен для измерения параметров электронного пучка, создаваемого классической магнетронно-инжекторной пушкой, и экспериментального изучения осаждения электронов на коллектор.

Большая часть лампы выполнена по новой аддитивной технологии CMPS (Chemical Metallization of Photopolymer-based Structures) создания элементов микроволновой электроники со сложной формой поверхности [5]. Технология предусматривает покрытие медью исходных полимерных заготовок с возможностью

последующего удаления химически стойкой смолы. Такой подход на порядок сокращает временные и финансовые издержки на изготовление деталей, позволяет создавать медные изделия сложной формы, что открывает большие возможности для создания исследовательских установок вакуумных СВЧ-комплексов.

2. Анализ вторичной эмиссии электронов в коллекторных системах современных гироприборов

Вторичная эмиссия электронов в процессе осаждения ВЭП на коллектор гиротрона может иметь существенное значение для разработки данного класса приборов. Численные расчёты показывают, что учёт вторичной эмиссии на коллекторе существенно снижает максимальную плотность мощности, осаждаемой потоком электронов, а также приводит к удлинению следа пучка [6], [7]. В прошлогоднем докладе мы описывали простую модель вторичной эмиссии, в которой каждый падающий на коллектор электрон рождает «веер» вторичных электронов, основным направлением которого является вектор, соответствующий геометро-оптическому отражению [7]. В настоящей работе представлена новая модель, основанная на результатах экспериментальных исследований вторичной эмиссии.

В данной работе мы отказались от подхода, когда каждый электрон рождает несколько вторичных частиц в пользу метода Монте-Карло, когда электрон отражается случайным образом в соответствии с заданными распределениями вероятностей. Коэффициент отражения R , задающий вероятность того, что электрон отразится, может зависеть от его энергии и различных параметров, однако пока мы приняли $R = 0.5$ для всех частиц, чтобы ограничить объёмы вычислений. Мы также исключили из рассмотрения механизм истинной вторичной эмиссии, т.к. интересующие нас энергии электронов лежат в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков кэВ.

Для определения правил, по которым в модель добавляются вторичные электроны, рассмотрим падение одного электрона на поверхность коллектора. Введём следующие вектора: \vec{e}_i – единичный вектор, сонаправленный с вектором скорости падающего электрона \vec{v}_i ; \vec{n} – единичный вектор внутренней нормали к поверхности коллектора в точке падения электрона; \vec{e}_r – единичный вектор, сонаправленный со скоростью вторичного электрона. В плоскости S_1 , задаваемой векторами \vec{e}_i и \vec{n} , мы задаём угол отражения θ_r между нормалью и проекцией \vec{e}_r на эту плоскость, а в плоскости S_2 , проходящей через \vec{n} перпендикулярно плоскости S_1 – аналогичный угол отражения ψ , характеризующий отражение электрона «вбок». Величины углов θ_r и ψ задаются в соответствии с экспериментальными данными, описанными в [8] (см. рис. 1а), при этом данные для меди были выбраны средними между Al и Au, указанными в статье. Энергия вторичного электрона также определяется случайным образом, распределение вероятности соответствует экспериментальному распределению отраженных электронов по энергиям для энергии первичного электрона $E_p = 10\text{--}20$ кэВ (см. рис. 1б), взятым из [9].

Для того, чтобы ограничить процесс образования вторичных электронов и не учитывать электроны с малыми энергиями, мы предполагаем, что электрон полностью высаживается на поверхность, как только мощность в его трубке тока становится меньше задаваемой величины P_{\min} .

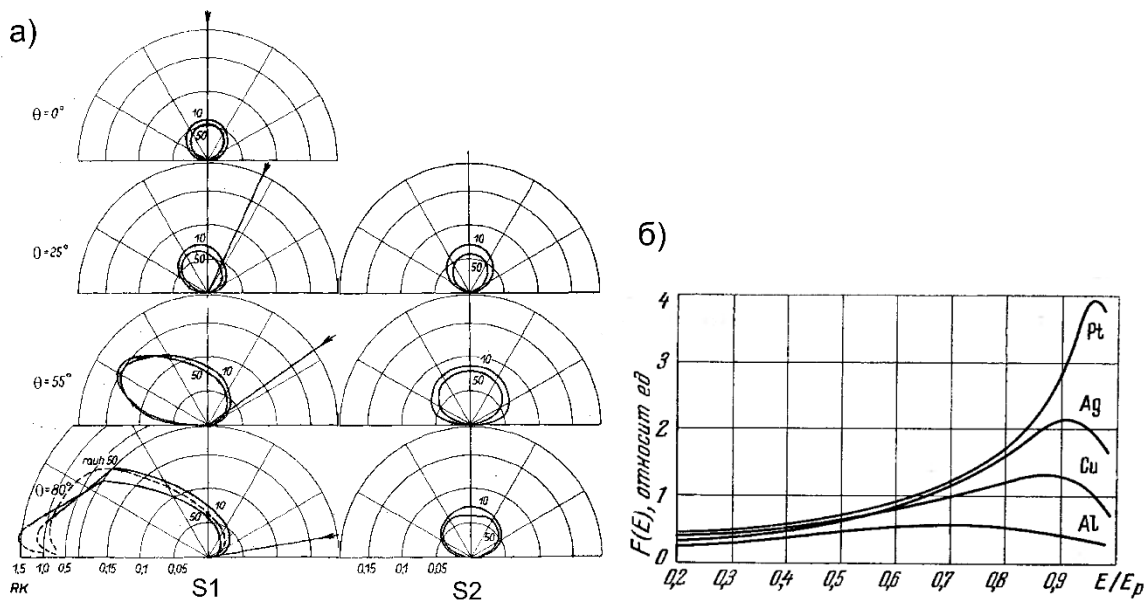


Рисунок 1. Экспериментальные распределения отраженных электронов: а) по углу отражения в плоскостях S_1 и S_2 в зависимости от угла падения для Al [8]; б) по энергиям [9].

3. Результаты расчетов коллектора исследовательского гиротронного комплекса

Расчеты тепловой нагрузки коллектора производились с использованием собственного трехмерного программного кода, основанного на библиотеке IBSimu [10]. Результаты расчетов для разработанного макета технологического гиротрона (режим 23 кВ / 1 А) показаны на рис. 2. При учете вторичных электронов существенно удлиняется след электронного пучка за счёт «хвостов» с относительно небольшой общей энергией, причём часть вторичных электронов в результате садится до начала основной зоны оседания. Также присутствует небольшое количество электронов, которые летят далеко по z и могут в результате высадиться на окно гиротрона. Всё это требуется учитывать при проектировании гироприборов. Также заметно (примерно на 30%) снижается пиковая тепловая нагрузка на коллектор, что открывает возможность использования коллекторов меньшего диаметра в гироприборах.

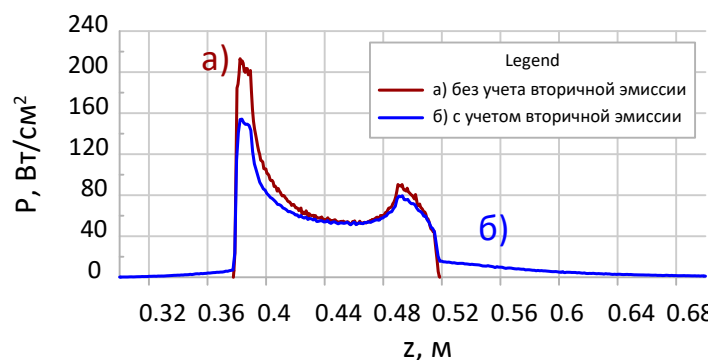


Рисунок 2. Плотность мощности, рассеиваемой на коллекторе: а) без учета вторичной эмиссии, б) с учетом вторичной эмиссии.

Для дальнейшего развития модели вторичной эмиссии необходима экспериментальная проверка и уточнение полученных в расчетах результатов. Это позволит создать модель для получения более точных результатов для различных гироприборов.

4. Экспериментальная установка с применением технологии CMPS

При создании исследовательского гиротрона использована готовая магнетронно-инжекторная пушка (МИП). Область транспортировки электронного пучка и самого коллектора гиротрона изготовлена по технологии CMPS, при этом термически ненагруженные части разборного макета сделаны фотополимерными с медным покрытием (толщиной около 0.5 мм), а коллектор – цельномедным.

Для получения данных о распределении плотности мощности ВЭП при осаждении на коллектор в последний интегрирован массив точных и быстрых термодатчиков. Датчики расположены в непосредственной близости к внутренней стенке коллектора. Таким образом решается задача получения экспериментальных данных из вакуумного объема коллектора гиротрона, доступ в который ограничен как требованием к качеству вакуума, так и наличием рубашки охлаждения. Для тепловой изоляции от последней термодатчики установлены в напечатанные полимерные гильзы.

Датчики на поверхности коллектора расположены по винтовой линии, при этом размер между ними составляет около 3 см как вдоль оси z, так и по азимуту. Такое расположение позволяет снимать полное двумерное распределение плотности мощности, в частности, для юстировки прибора в магнитном поле. При условии осесимметричного пучка датчики, расположенные на различных азимутальных углах, не дублируют друг друга и позволяют повысить разрешение по оси z в семь раз, до примерно 4 мм. Таким образом, расчетное распределение мощности (см. рис. 2) может быть проверено экспериментально с достаточным разрешением. Схема изготовленного макета гиротрона и коллектор показаны на рис. 3.

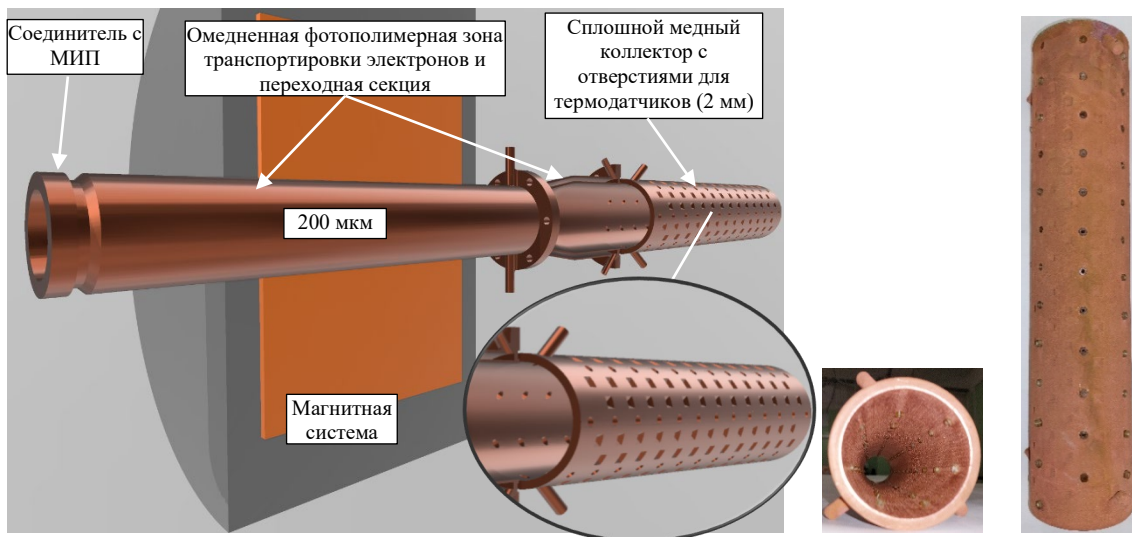


Рисунок 3. Схема разборного исследовательского макета гиротрона и фотографии 3D-печатного омеднённого коллектора (справа).

Разборный макет гиротрона позволяет также установить в область однородного магнитного поля анализатор винтового электронного пучка, основанный на методе тормозящего электрического поля [11]. Авторами произведён расчет искажений функции распределения электронов по поперечным скоростям, вносимых в измеряемые данные тангенциальными компонентами электрического поля, возникающими из-за конструкции анализатора. Экспериментальные измерения параметров пучка (питч-фактор, скоростной разброс, распределение по поперечным скоростям) с учетом рассчитанных искажений, вносимых анализатором, могут быть использованы для улучшения современных программ моделирования электронной оптики гиротронов.

5. Заключение

В рамках предложенной модели вторичной эмиссии проведено численное моделирование распределения плотности мощности в коллекторе гиротрона для режима работы 23 кВ / 1 А. Сравнение результатов расчета с учетом вторичной эмиссии и без показало значительное различие профилей плотности мощности, осаждаемой электронным пучком. Для экспериментального исследования данного эффекта и уточнения расчетной модели предложена схема установки на базе МИП технологического гиротрона. Область транспортировки и сам коллектор гиротрона изготовлены по технологии CMPS. Коллектор выполнен цельномедным с каналами охлаждения и отверстиями под термодатчики. Для самих датчиков изготовлены теплоизоляционные гильзы, позволяющие избежать охлаждения датчика и при этом получать данные температуры в заданной координате на стенке коллектора. Успешное применение данной технологии позволяет на несколько порядков сократить временные и финансовые расходы на создание медных элементов со сложной геометрией, а качество получаемых деталей позволяет рассчитывать на успешную реализацию всего исследовательского комплекса и получения уникальных экспериментальных данных для уточнения численных моделей.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00884)**.

Список литературы

1. Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // *Nucl. Fusion*, vol. 59, no. 7, p. 73001, 2019, doi: 10.1088/1741-4326/ab2005.
2. Skalyga V. A. et al. Status of the gasdynamic ion source for multipurpose operation (GISMO) development at IAP RAS // *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 12, 2019, doi: 10.1063/1.5128489.
3. Выков Y. V. et al. Millimeter-Wave Gyrotron System for Research and Application Development. Part 2. High-Temperature Processes in Polycrystalline Dielectric Materials // *Radiophys. Quantum Electron.* 2019 6111, vol. 61, no. 11, pp. 787–796, Jun. 2019, doi: 10.1007/S11141-019-09936-3.
4. Glyavin M. Y., Denisov G. G., Zapevalov V. E., Koshelev M. A., Tretyakov M. Y., Tsvetkov A. I. High power terahertz sources for spectroscopy and material diagnostics // *Uspekhi Fiz. Nauk*, vol. 186, no. 6, pp. 667–677, 2016, doi: 10.3367/UFNr.2016.02.037801.
5. Proyavin M. D. et al. Development of Electrodynamic Components for Microwave Electronic Devices Using the Technology of 3D Photopolymer Printing with Chemical Surface Metallization // *Radiophys. Quantum Electron.*, vol. 63, no. 5–6, 2020, doi: 10.1007/s11141-021-10072-0.
6. Зайцев Н. И., Мануилов В. Н., Хрусталёв Р. В. Энергетическая нагрузка коллектора гиротрона с учётом отражённых от его поверхности электронов // *Изв. вузов Радиофизика*, Т. 52, №1, стр. 55–62, 2009.
7. Морозкин М. В., Мануилов В. Н., Проявин М. Д., Котомина В. Е., Каменский М. В., Орловский А. А., Разработка исследовательского комплекса по изучению свойств электронных потоков и модели вторичной эмиссии электронов с применением новой аддитивной технологии CMPS // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*, Т. 1, С. 113–117, 2022.
8. Kanter H. Zur Rückstreuung von Elektronen im Energiebereich von 10 bis 100 keV // *Ann. Phys.*, vol. 455, no. 1–6, 1957, doi: 10.1002/andp.19574550115.
9. Kulenkampff H., Spyra W. Energieverteilung ruckdiffundierter Elektronen // *Z. fur Phys.*, vol. 13, pp. 416–425, 1954.
10. Kalvas T., Tarvainen O., Ropponen T., Steczkiewicz O., Rje J., Clark H. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, vol. 81, no. 2, doi: 10.1063/1.3258608.
11. Kufitn A. N., Lygin V. K., Manuilov V. N., Postnikova A. S., Zapevalov V. E. Advanced Numerical and Experimental Investigation for Gyrotrons Helical Electron Beams // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. 1999. V. 20. No. 3. P. 361.