

# Разработка исследовательского комплекса по изучению свойств электронных потоков и модели вторичной эмиссии электронов с применением новой аддитивной технологии CMPS

М.В. Морозкин, В.Н. Мануилов, М.Д. Проявин, В.Е. Котомина, М.В. Каменский, А.А. Орловский

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в данной работе представлена методика теоретических и экспериментальных исследований, направленных на актуальную задачу в области мощных СВЧ-приборов – уточнение модели вторичной эмиссии электронов с поверхности электродов вакуумных источников микроволнового излучения и исследования свойств электронного потока в области электронно-волнового взаимодействия. Необходимая элементная база экспериментальной установки создается на базе новой аддитивной технологии CMPS, позволяющей производить уникальные медные изделия со сложной формой поверхности.

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

## 1. Введение

В настоящее время СВЧ-комплексы являются уникальным инструментом в различных областях науки и технологии. Одним из ярких представителей данного класса приборов является гиротрон, область приложений которого крайне широка и разнообразна за счет возможности создания СВЧ-генератора с частотами от нескольких ГГц до ТГц-диапазона частот с мощностью излучения вплоть до мегаваттного уровня. 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.

На мощность генерации гиротрона напрямую влияют два фактора: мощность электронного потока и его характеристики, а также качество электронно-волнового взаимодействия. В случае полной информации о винтовом электронном пучке (ВЭП), обмен между электронами и модой резонатора может быть качественно оптимизирован в процессе численного моделирования. Очевидное с первого взгляда решение увеличения энергетики ВЭП для повышения мощности генерируемого излучения осложняется проблемой осаждения электронного потока на стенки коллектора гиротрона. Существенно снизить уровень плотности мощности и уширить след ВЭП на коллекторе позволяет эффект возникновения вторичных электронов, образующихся в процессе бомбардировки электрода частицами основного электронного потока. Однако, такое поведение частиц весьма сложно точно описать в процессе численного моделирования. Существует множество моделей учета вторичной эмиссии, однако их достоверность может быть оценена только в процессе экспериментов. При стремлении в область больших мощностей, физические эффекты, роль которых ранее была незначительна, могут существенным образом сказываться на

работе прибора. Соответственно, экспериментальные данные исследования таких эффектов позволят уточнить расчетные модели и найти новые возможности по улучшению рабочих характеристик прибора.

Однако все эти задачи сопряжены с серьезными технологическими сложностями и недостатком экспериментальных данных. В первую очередь это связано с отсутствием доступа в рабочее пространства прибора из-за наличия высокого вакуума. В то же время, гиротрон имеет контуры жидкостного охлаждения вдоль всего прибора. Соответственно, все это серьезно усложняет возможность размещения каких-либо датчиков в рабочем пространстве прибора.

Кроме этого, в настоящее время элементы микроволновой электроники создаются с помощью дорогостоящих станков с ЧПУ. Относительно маленькие детали со сложной формой поверхности делают такой технологический процесс крайне долгим и дорогим. Авторами работы успешно развивается новая аддитивная технология CMPS (Chemical Metallization of Photopolymer-based Structures) по созданию элементов микроволновой электроники со сложной формой поверхности [5]. Технология предусматривает дальнейшее покрытие медью исходных полимерных заготовок с последующим удалением химически стойкой смолы. Такой подход в десятки раз 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

Как отмечалось ранее, учет вторичной эмиссии при расчете режима работы коллектора позволяет существенно снизить плотность мощности, осаждаемой потоком электронов. Однако, в зависимости от выбранной модели профили мощности нагрузки на коллектор могут сильно отличаться. В настоящий момент нами рассматривается следующая модель вторичной эмиссии на коллекторе гиротрона, исходя из полученного опыта в работах с вторичной эмиссии в катодной области [6].

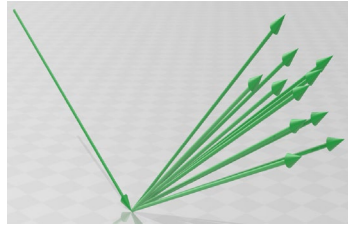
Для определения правил, по которым в модель добавляются вторичные электроны, рассмотрим падение одного электрона на поверхность коллектора. Введём следующие вектора:  $\vec{e}_i$  – единичный вектор, сонаправленный с вектором скорости электрона  $\vec{v}$ ;  $\vec{n}$  – единичный вектор внутренней нормали к поверхности коллектора в точке падения электрона;  $\vec{e}_r = \vec{e}_i - 2\vec{n}(\vec{e}_i, \vec{n})$  – единичный вектор, сонаправленный со скоростью электрона, отраженного по геометро-оптическому закону.

Для удобства в плоскости, проходящей через точку падения электрона перпендикулярно  $\vec{e}_r$  введем два единичных вектора  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , которые образуют локальную правую систему координат  $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{e}_r)$  (1).

$$\vec{a} = \frac{[\vec{n}, \vec{e}_r]}{||[\vec{n}, \vec{e}_r]||}, \vec{b} = [\vec{e}_r, \vec{a}] \quad (1)$$

Зададим  $M \cdot N + 1$  единичных векторов  $\vec{e}_{i,j}$ , задающих направления движения вторичных электронов в виде «веера» (см. рис. 1). Направления отраженных электронов представляют собой  $M + 1$  векторов (включая  $\vec{e}_r$ ), равномерно распределенных по углу относительно  $\vec{e}_r$  в одной плоскости, которые затем размножены в трехмерном пространстве вращением вокруг  $\vec{e}_r$   $N$  раз с равномерным распределением по азимутальному углу. Аналитически этот массив векторов может быть описан, согласно (2):

$$\vec{e}_{i,j} = \vec{e}_r + K_i (\vec{b} \cdot \cos(\beta_j) - \vec{a} \cdot \sin(\beta_j)), \vec{e}_{i,j} = \frac{\vec{e}_{i,j}}{|\vec{e}_{i,j}|}, i = 1, 2 \dots M, j = 0, 1 \dots N - 1 \quad (2)$$



**Рисунок. 1.** Векторы  $\vec{e}_1$  (слева) и  $\vec{e}_{i,j}$  (пучок векторов справа), задающие направления движения падающих и вторичных электронов для  $M = 2, N = 5$

Для задания токов вторичных электронов введем функцию распределения этих частиц по углу относительно  $\vec{e}_r$ :  $f(\varphi_{i,j}) = \cos(k \cdot \varphi_{i,j})$ , где  $\varphi_{i,j} = \text{acos}(\vec{e}_{i,j}, \vec{e}_r)$ , коэффициент  $k$  задает форму «веера» вторичных электронов. В своих расчетах мы исследовали динамику электронного пучка в коллекторной области при  $1 \leq k \leq 4$ . Также необходимо учесть коэффициент отражения  $R$  по току, зависящий от угла падения частицы:  $I_r = I_i \cdot R(\theta)$ , где  $I_i$  – ток падающей большой частицы,  $I_r$  – суммарный ток отраженных частиц. Ток каждой вторичной частицы задается, как (3)

$$I_{i,j} = I_N \cdot f(k \cdot \text{acos}(\vec{e}_{i,j}, \vec{e}_r)) \quad (3)$$

где  $I_N$  – нормировочный коэффициент, вычисляемый из соотношения  $\sum_{i,j} I_{i,j} = I_r$

Электроны отражаются не полностью упруго. Для этого мы ввели коэффициент  $K_v$ , такой, что скорость вторичных электронов  $v_r$  и скорость падающего электрона  $v_i$  связаны соотношением  $v_r = K_v \cdot v_i$ . В общем случае  $K_v$  зависит от энергии электронов.

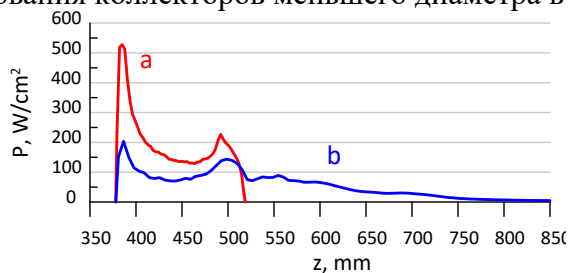
Для того, чтобы прервать процесс образования вторичных электронов, мы предполагаем, что электрон полностью высаживается на поверхность, как только мощность в его трубке тока становится меньше задаваемой величины  $P_{\min}$ .

### 3. Результаты расчетов коллектора исследовательского гиротронного комплекса

Расчеты тепловой нагрузки коллектора производились с использованием собственного трехмерного программного кода, основанного на библиотеке IBSimu [7]. По результатам расчетов системы с учетом вторичных электронов были сделаны следующие выводы по подбору параметров модели: во-первых, минимальная мощность  $P_{\min}$ , необходимая для образования вторичных электронов, не должна быть слишком маленькой, т. к. это приводит к размытию пиков и появлению длинных ненужных «хвостов», а также сильно снижает скорость счета. Во-вторых, нет необходимости задавать много вторичных электронов, вполне достаточно одного в направлении  $\vec{e}_r$  плюс 3-5 электронов под углом к нему. В-третьих, величина  $K_v$  оказывает более существенное влияние на след электронного пучка, хотя и значительно слабее, чем просто учет вторичной эмиссии.

На основании такого подбора параметров модели были получены качественные результаты по изменению плотности мощности вследствие учета вторичной эмиссии электронов с поверхности коллектора, показанные на рис. 3. При учете вторичных электронов в несколько раз удлиняется след электронного пучка. Это требует значительного удлинения как всего коллектора, так и его зоны охлаждения. При этом существенно снижается пиковая тепловая нагрузка на коллектор, что открывает

возможность использования коллекторов меньшего диаметра в гиросприборах.



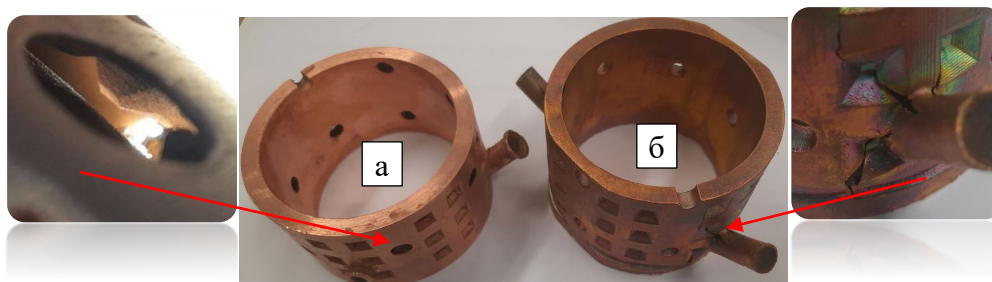
**Рисунок 2.** Плотность мощности, рассеиваемой на коллекторе: а) без учета вторичной эмиссии, б) с учетом вторичной эмиссии.

Для дальнейшего развития модели вторичной эмиссии необходима экспериментальная проверка и уточнение полученных в расчетах результатов. Это позволит создать модель для получения уже количественных результатов для различных гиросприборов.

#### 4. Проект экспериментальной установки с применением технологии CMPS

Для создания исследовательского гиротрона будет использована готовая магнетронно-инжекторная пушка (МИП). Область транспортировки электронного пучка и самого коллектора гиротрона будет изготовлена по технологии CMPS. Самым сложным с точки зрения изготовления является коллектор гиротрона. С одной стороны, сложность заключается в размещении термодатчиков в толще модели при сохранении вакуумной плотности коллектора и отсутствия теплового контакта между хладагентом и корпусом термодатчика. С другой стороны, необходимо обеспечить эффективный теплоотвод от стенки коллектора для случая, рассчитанного в п3. уровня плотности мощности. При такой тепловой нагрузке и крайне малой теплопроводности фотополимерной основы, наличие пластиковой прослойки между медным слоем и каналом охлаждения приведет к расплавлению коллектора. Поэтому необходимо сделать коллектор цельномедным. Для этого была разработана специальная методика извлечения полимера из внутреннего объема сложной формы. Одним из циклов данного процесса является сильный нагрев изделия (выше 300 °С). Однако, тепловые расширения фотополимера гораздо больше, чем у меди. Поэтому, в результате первого эксперимента при нагреве изделия до 240 °С расширение полимера привело к деформации медного слоя толщиной 0.5 мм вплоть до его локального разрушения.

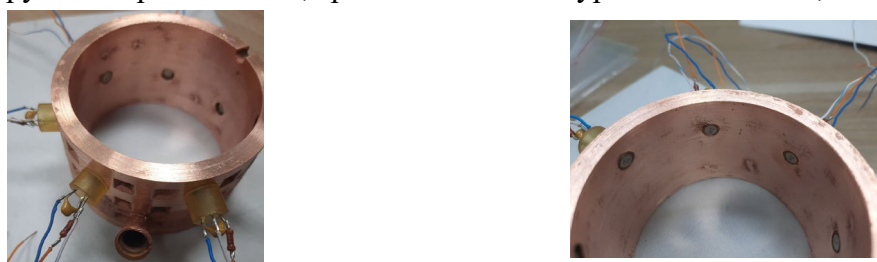
Для уменьшения воздействия разницы коэффициентов теплового расширения (КТР), была модифицирована как сама 3D-модель, так и процесс извлечения фотополимерной основы. В результате получилось изготовить цельнометаллический сектор коллектора гиротрона с отверстиями под термодатчики, каналами охлаждения и профилем для турбулентного движения водяного потока (см. рис. 3).



**Рисунок 3.** Изготовленные секторы коллектора с учетом различия КТР (а) и без (б).

Для тепловой изоляции термодатчики были установлены в напечатанные полимерные гильзы, имеющие геометрию корпуса и плотно устанавливающиеся в

корпус коллектора. Затем произведено дальнейшее гальваническое наращивание. Таким образом получается, что проводящий торец датчиков через слой меди получает информацию о нагреве коллектора в определенной координате. При этом тепловая утечка с других сторон датчика, граничащих с контуром охлаждения, минимальна.



**Рисунок 4.** Участок коллектора с установленными теплоизолированными термодатчиками.

## 5. Заключение

В рамках предложенной модели вторичной эмиссии проведено численное моделирование распределения плотности мощности в коллекторе гиротрона для режима работы 23 кВ / 2.4 А. Сравнение результатов расчета с учетом вторичной эмиссии и без показало сильное различие профилей плотности мощности, осаждаемой электронным пучком. Для экспериментального исследования данного эффекта для уточнения расчетной модели предложена схема установки на базе МИП технологического гиротрона. Область транспортировки и сам коллектор гиротрона будут изготовлены по технологии CMPS. Для проверки возможности изготовления таким методом изготовлен цельно медный сектор коллектора 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 РФ (проект № 21-19-00884)**.

### Список литературы

1. M.K.A. Thumm et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. – 2019. – Т. 59. – №. 7. – С. 073001.
2. V.A. Skalyga et al. Status of the gasdynamic ion source for multipurpose operation (GISMO) development at IAP RAS // Rev. Sci. Instrum. – 2019. Т. 90. – С. 123308.
3. Быков Ю.В. и др. Исследовательский гиротронный комплекс миллиметрового диапазона длин волн. II. Высокотемпературные процессы в поликристаллических диэлектриках // Изв. вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. – №. 11. С. 883–894.
4. Глявин М.Ю. и др. Источники мощного терагерцевого излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // УФН. – 2016. – Т. 186. – №. 6. – С. 667.
5. Proyavin, M.D. et al. Development of Electrodynamics Components for Microwave Electronic Devices Using the Technology of 3D Photopolymer Printing with Chemical Surface Metallization. Radiophys Quantum El 63, 469–478 (2020)
6. Зайцев Н.И., Мануилов В.Н., Хрусталёв Р.В. Энергетическая нагрузка коллектора гиротрона с учётом отражённых от его поверхности электронов // Изв. вузов Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – №. 1. – С. 55-62.
7. T. Kalvas, et. al. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // Rev. Sci. Instrum. – 2010. – Т. 81. – С. 02B703.