

Ученому секретарю
диссертационного совета 24.1.238.01
при ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова»
Э.Б. Абубакирову

ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертационной работе Зуева Андрея Сергеевича «Исследование методов управления частотными характеристиками гиротронов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.04 – Радиофизика

В настоящее время из большого спектра исследовавшихся ранее мощных электровакуумных приборов миллиметрового диапазона фактически единственным, получившим массовое распространение, оказался гиротрон. Эти приборы широко применяются в промышленности для спекания керамики, в научных исследованиях в биологии, химии и медицине, где требуется большой динамический диапазон спектроскопической установки. С гиротронами связывают прогресс в управляемом термоядерном синтезе. Делаются попытки применить гиротронные приборы в радиолокации. Такой успех связан с комплексом высоких параметров приборов, недостижимым никаким другим способом. Во всех указанных применениях возможность перестройки частоты резко повышает востребованность системы. Дальнейшее развитие приборов направлено на освоение все более высокочастотных (субмиллиметровых) диапазонов, на повышение мощности единичных приборов миллиметрового диапазона, а также на обеспечение возможности отказа от криомагнитов. Работа А.С. Зуева направлена на создание гиротронов с широким диапазоном перестройки частоты для целей спектроскопии, анализа материалов, исследований по динамической поляризации ядер и др. Таким образом, работа является **актуальной** и востребованной как научным сообществом, так и промышленностью.

Цели и задачи работы описаны в диссертации достаточно полно. Расчеты и моделирование сочетаются в работе с экспериментальной проверкой, что в настоящее время встречается нечасто. Фактически, как правило, в рамках работы созданы прототипы приборов, пригодных с минимальными доработками для поставки возможным потребителям. Таким образом, работа является **практически значимой**.

Положения, выносимые на защиту, непосредственно вытекают из результатов эксперимента. При этом экспериментальные проверки проходили на имеющемся штатном испытательном комплексе с поверенным и аттестованным измерительным оборудованием. Следует отметить и хорошее совпадение расчетных значений выходной мощности с измеренными. По этой причине нет оснований сомневаться в **достоверности** полученных результатов и **обоснованности положений**, выносимых на защиту.

Исследования и разработки, направленные на обеспечение перестройки частоты гиротронов, происходят во многих мировых научных центрах. При этом выдвигается достаточно общий круг идей, направленных на принципиальную реализацию такой перестройки. Однако конкретных работ с достижением высоких достигнутых характеристик приборов очень немного и среди них работа А.С. Зуева находится на передовой линии. Комплекс разработанных методик проектирования и полученных характеристик приборов: диапазон перестройки, заполненность, КПД, мощность, позволяет говорить о **новизне полученных результатов**.

Достоинствами диссертационной работы являются следующие результаты:

1. Показана возможность использования селективного поглотителя для дополнительной селекции мод с целью работы с высоким КПД на третьей гармонике циклотронной частоты (в том числе без использования криосоленоида). Это открывает новые возможности для промышленной обработки материалов в миллиметровом диапазоне с помощью недорогих компактных гиротронных установок.
2. Для многоствольных гиротронов предложена методика их построения и рассмотрен целый ряд заранее неочевидных паразитных эффектов, вредящих нормальной работе гиротрона (азимутальный дрейф, токооседание на

фронтах импульса, нарушение юстировки пучка и др.), сделаны количественные оценки и предложены меры по уменьшению или компенсации этих мешающих факторов.

3. Большим достоинством работы является ее направленность на достижение реалистичных конструкций гиротронов и получение числовых оценок характеристик для конкретных конструкций приборов с учетом противоречивых ограничений на параметры узлов.

К тексту диссертации можно высказать и некоторые критические замечания:

1. Во Введении на стр. 6 и далее в тексте говорится о работе гиротронов вблизи квазикритической частоты (и с минимальным числом продольных вариаций ВЧ-поля), поскольку при этом снижается влияние разброса **осцилляторных** скоростей электронного пучка. Но по нашему мнению такой режим выбирается потому, что при этом снижается влияние разброса **продольных, а не осцилляторных**, скоростей электронного пучка, благодаря перпендикулярности волнового вектора и продольной скорости.
2. В Приложении приведены формулы для используемой в работе численной модели, описывающей электронно-волновое взаимодействие. В этих формулах отсутствует учет поля пространственного заряда на вч динамику электронов (динамические поправки). Однако, в режиме хорошей фазовой группировки электронов происходит изменение формы трубки электронного потока, синфазное с полем резонатора и по форме соответствующее азимутальному индексу моды. Это должно обуславливать колебания поля пространственного заряда, особенно на внешней границе пучка. По-видимому, такая динамическая поправка поля пространственного заряда имеет порядок $\sim E_{\text{пз стат}} \frac{r_c}{R_b}$, где $E_{\text{пз стат}}$ – статическое поле пространственного заряда, r_c – радиус циклотронной орбиты, R_b – радиус пучка. Этот эффект, по-видимому, не влияет на стартовые токи, но может сказаться на величине расчетного электронного КПД в режимах с высокой эффективностью. По нашему мнению следовало бы привести доводы в пользу используемого приближения.

3. В указанной модели предполагается использование неоднородного магнитного поля в области взаимодействия. Но учитывается влияние неоднородности поля только на осцилляторное движение. В то же время не поясняется, насколько при этом смещаются радиусы ведущих центров по отношению к оптимальному значению радиуса для рабочей моды, и как это влияет на стартовый ток и мощность.
4. Вызывает определенные сомнения обсуждаемая в работе возможность применения в гиротроне резонаторов, охлажденных до криогенных температур, с целью повышения омической добротности и селекции мод. По нашему мнению это влечет за собой значительные технологические трудности как из-за значительного теплопритока от катода и коллектора на стенку резонатора во время работы лампы, так и вследствие необходимости реализовать в конструкции вакуумные спаи, работающие в диапазоне температур от 80-200 К (во время работы) до 700 К (при откачке и обезгаживании). Поэтому такой подход конечно справедлив, но по нашему мнению пока остается только принципиальной возможностью.

Однако указанные недостатки не уменьшают практической и научной значимости работы. Предлагаемые в работе подходы и методы синтеза конструкций перестраиваемых гиротронов с учетом тепловых и электронно-оптических ограничений, методы селекции колебаний, сценарии включения прибора позволяют сократить время и повысить качество проектирования гиротронов различного назначения. Результаты работы представляют научный и технический интерес для разработчиков электровакуумных СВЧ приборов и систем. Автореферат выполнен в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми к кандидатским диссертациям и достаточно полно отражает содержание работы.

С нашей точки зрения, диссертационная работа А.С. Зуева выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой **завершенную работу** с перспективами дальнейшего развития. Она снабжена впечатляющим списком ссылок на литературу. Судя по публикациям, практически все результаты работы **получены лично автором** либо совместно с его научным руководителем в составе коллектива. Результаты работы весьма полно

апробированы и опубликованы. По содержанию она соответствует специальности 01.04.03 – Радиофизика, и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Анатолий Васильевич Галдецкий  " 26 " января 2024 г.

к.ф.м.н. по специальности «Радиофизика, включая квантовую»

Начальник отделения проектирования СВЧ приборов

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

141190, Московская обл., г. Фрязино

ул. Вокзальная 2а

Тел. +7(495)-465-8620, e-mail: galdetskiy@istokmw.ru

Подпись А.В. Галдецкого заверяю

Ученый секретарь

диссертационного совета

АО «НПП «Исток» им. Шокина»



/И.В. Куликова/

" 26 " января 2024 г.