

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ГИРОТРОНАХ И ГИРОКЛИСТРОНАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН
ВОЛН»**

Аспирант: Гузнов Юрий Михайлович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Абубакиров Эдуард
Булатович, доктор физико-математических наук, в.н.с.
ИПФ РАН

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Как известно, одним из ведущих направлений развития современной СВЧ-электроники является продвижение в диапазон миллиметровых волн. Нарастивание частоты и переход в данный диапазон ведёт к более активному использованию вакуумных приборов в их традиционных сферах и расширяет применимость в новых областях. В радиолокации, уменьшение длины волны позволяет повысить разрешающие способности РЛС и уменьшить размеры передающих и принимающих устройств. Например, у дальнедействующих РЛС [1], при увеличении используемых частот, возможно существенно обуздить диаграмму направленности, и тем самым нарастить точность измерения угловых координат. Так же, миллиметровые волны крайне перспективны в области науки и используются для электронно-циклотронного нагрева плазмы (ЭЦРН) в исследованиях направленных на реализацию управляемой термоядерной экзотермической реакции [2,3]. А, в перспективе, возможно их применение для высокотемпературной обработки материалов, производства порошков для аддитивных приложений и сельскохозяйственных нужд[4].

Развитие вышеуказанных направлений определяется наличием в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн мощных и высокоэффективных источников СВЧ излучения. Однако, реализация эффективных генераторов и усилителей с высокой выходной мощностью, основанных на использовании переходного и черенковского механизмов излучения в этом диапазоне частот наталкивается на серьезные трудности [5]. Вследствие присутствия в их электродинамических системах мелкомасштабных элементов, с размерами соизмеримыми с длиной волны, их мощность и эффективность быстро спадает по мере продвижения в диапазон миллиметровых волн. Также, не представляется возможным и эффективная генерация миллиметрового излучения с применением методов квантовой электроники, максимальные мощности которых ограничиваются уровнями в единицы ватт[6]. Еще одним впечатляющим прибором, покрывающим миллиметровый диапазон является лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Например, в ЛСЭ на частоте около 75 ГГц получена мощность выходного излучения около 100 МВт при КПД 4% [7]. Но при этом, размеры, чрезмерная дороговизна и невысокий КПД приборов данного типа не способствуют их применимости для большинства из указанных выше приложений. Ввиду вышеуказанных доводов наиболее эффективным типом источников миллиметрового диапазона длин волн оказываются генераторы и усилители гирорезонансного типа, наиболее мощными и изученными представителями из которых являются гиротроны и гироклистроны [8-10]. Отсутствие в их электродинамических системах мелкомасштабных, по сравнению с длиной волны элементов, снимает необходимость общей миниатюризации пространства взаимодействия при уменьшении длины волны, что позволяет избежать сложностей с электрической прочностью и отводом тепла при нарастивании мощностных

характеристик приборов. Данные достоинства гиротронов и гироклистронов делают их наиболее перспективными и мощными источниками миллиметрового излучения как импульсных режимах (при длительностях от сотен *нс*) так и в непрерывных режимах работы. Но, несмотря на указанные достоинства гирорезонансных приборов, развитие уже существующих и возникновение новых приложений актуализует как задачи по продвижению в области больших частот и мощностей, так и задачи по управлению параметрами их излучения. Например, для задач ускорения частиц в современных коллайдерах и радиолокации высокого разрешения, крайне перспективными выглядят мощные импульсные источники миллиметрового диапазона длин волн с возможностью управления частотой и фазой выходного излучения [11-13]. По сочетанию параметров излучения с возможностью управления частотой и фазой в качестве подобных источников наиболее подходящими оказываются импульсные гироклистроны. При этом основные трудности повышения мощностных характеристик данных гиросилителей заключаются в реализации одномовового режима при увеличении сверхразмерности как выходного так и входного резонаторов. Также в последнее время высокий интерес представляет задача по взаимной синхронизации мощных гиротронов [14]. Подобные комплексы, состоящие из некоторого числа синхронизированных гиротронов, могут быть перспективны для задач нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза [15]. Например, в проекте ITER предполагается применение 26 гиротронов с частотой около 170 ГГц и мощностью 1 МВт. Трудности создания таких схем синхронизации заключаются в отсутствии принципов реализации эффективного ввода внешнего сигнала в резонатор гиротрона и обеспечения достаточного уровня развязки волновых пучков выходного излучения и управляющего сигнала. Ко всему прочему, обеспечение когерентности выходного излучения нескольких автогенераторов, является перспективной альтернативой повышению мощности отдельно взятого источника. Это особенно актуально, когда речь идёт о мощных гиротронах, где дальнейшее наращивание мощности отдельного прибора представляется проблематичным, как по причинам фундаментального характера, так и по техническим. Например, для наращивания мощности гиротрона необходимо увеличение сверхразмерности его электродинамических систем, что приводит к значительным трудностям с обеспечением одномодовой генерации. Проблемы технического характера заключаются в необходимости высокой энергии как систем питания так других вспомогательных систем.

В этой связи становится очевидным, что исследования и разработка мультимегаваттных источников излучения миллиметрового диапазона длин волн в управляемой частотой и фазой выходного сигнала представляют собой актуальную задачу современного этапа развития электроники больших мощностей.

Цели диссертации

1. Развитие возможностей повышения мощностных и частотных характеристик мощных импульсных гироклистронов.
2. Экспериментальное исследование методов стабилизации параметров излучения мощных гиротронов.
3. Экспериментальное исследование методов управления режимами излучения мощных импульсных гироклистронов

Научная новизна результатов

1. Экспериментально реализован импульсный релятивистский гироклистрон миллиметрового диапазона длин волн с рекордным значением выходной мощности 15МВт.
2. Предложена и экспериментально исследована новая концепция квазиоптического входного резонатора перспективная в гироклистромах на последовательности мод высокого порядка.
3. Для гиротрона миллиметрового диапазона длин с мегаваттным уровнем мощности впервые экспериментально исследован захват частоты излучения внешним сигналом.
4. Впервые в гироклистроне миллиметрового диапазона длин волн с мегаваттным уровнем мощности экспериментально реализована идея применения запаздывающей обратной связи для селективного возбуждения заданной моды выходного резонатора.

Практическая значимость и использование результатов работы

Практическая значимость данной работы, во-первых, predeterminedена ее ориентированностью на экспериментальную реализацию макета импульсного гироклистрома миллиметрового диапазона волн с передовыми параметрами. Во-вторых, использование предложенных концепций способствует увеличению мощностных и частотных характеристик мультимегаваттных усилителей электромагнитного излучения, а реализуемые схемы направлены на расширение возможностей управления режимами работы мощных гиротронов и гироклистронов.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальная реализация импульсного релятивистского гироклистрома миллиметрового диапазона длин волн с рекордным сочетанием выходной мощности и КПД
2. Применение квазиоптического многозеркального входного резонатора с селективными отверстиями в гироклистроне миллиметрового диапазона длин волн позволяет реализовать систему ввода внешнего сигнала, перспективную для повышения мощности и частоты данных усилителей.

3. Захват частоты и фазы излучения мегаваттного гиротрона экспериментально осуществим с помощью внешнего источника с выходной мощностью, составляющий всего 0.5 - 2.8% от мощности излучения данного гиротрона в автономном режиме.
4. Применение внешней обратной связи с временной задержкой в гироклистроне миллиметрового диапазона длин волн позволяет улучшить селективность при работе на высоких волноводных модах, а также обеспечивает в мощных мультимегаваттных источниках возможность быстрой перестройки рабочей частоты в интервале 1-2 ГГц.

Апробация результатов работы

Наиболее важные результаты работы были опубликованы в рецензируемых зарубежных и российских журналах [A1 – A5], таких как: «Известия высших учебных заведений. Радиофизика», «Applied Physics Letters», «Письма в журнал технической физики » и «Transactions on Microwave Theory and Techniques». А также докладывались на: международной конференции по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2013), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2014, 2017), Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2013, 2014), IX Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, (Н. Новгород, 2013). Также часть результатов представленных в работе вошла в отчет о научной и научно-организационной деятельности Института прикладной физики за 2014 г.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Все экспериментальные исследования проведены при непосредственном участии автора в составе узкой группы состоящей из научного руководителя, автора и инженерного персонала. Теоретические исследования проводились совместно в формате заседаний коллектива состоящего из соавторов научных работ. Вклад соискателя состоял в подготовке и проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов и статей. Обсуждение и интерпретация результатов проводилась либо лично автором, либо совместно с научным руководителем и соавторами. Представленные результаты, вошедшие в список трудов автора по теме диссертации [A1 – A14] получены также при личном участии автора.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, две главы, заключение, список трудов автора по теме диссертации и список цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 55 страниц, включая 29 иллюстраций, 2 таблицы и список литературы из 78 ссылок. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 14 ссылки.

Краткое содержание работы

Во введении приведены доводы об актуальности темы работы, выставлены цели диссертационной работы, подчёркивается научная новизна выполненных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также кратко описано содержание диссертации.

В первой главе посвящена методам повышения частотных и мощностных характеристик импульсных релятивистских гироклистронов мегаваттного уровня мощности.

В пункте 1.1. рассказано об экспериментальной реализации нового релятивистского гироклистрона диапазона миллиметровых волн с использованием последовательности мод более высокого порядка. Кратко описана его конструкция, полученная на основе проведённых расчётов. Приведена общая информация об экспериментальном стенде - микросекундном ускорителе «Сатурн-Ф», на базе которого был реализован макет нового гироклистрона. Описывается методика измерений и детали проведения экспериментальных исследований. Особое внимание уделяется режимам работы гироклистрона. Реализованный прибор был экспериментально протестирован в широком диапазоне рабочих параметров. Характерные параметры режимов и полученные характеристики приведены в таблица 1.

Напряжение, кВ	Ток, А	Мощность, МВт	КПД, %	Δf , МГц	Коэффициент усиления, дБ	Магнитное поле, Тл
120	70	2,5	30	50	20	1,465
140	80	3,8	34	50	24	1,552
190	95	5,7	31	50	26	1,638
320	140	15	33	50	30	1,892

Таблица 1. Параметры гироклистрона на модах $TE_{7,1,1}$ и $TE_{7,3,1}$ с рабочей частотой 35,4 ГГц

В пункте 1.2. приведены экспериментальные испытания нового входного резонатора мультимегаваттного гироклистрона. Описана концепция, основанная на применении квазицилиндрического резонатора с небольшой гофрировкой стенки и отверстиями для улучшения селективных свойств. Достаточно большая часть посвящена теории и расчётам геометрии резонатора. Холодным электродинамическим испытаниям готового макета входного резонатора так же уделено немалое внимание. Проведены стендовые испытания входного резонатора в составе гироклистрона. Гироклистронный усилитель с использованием вышеуказанного резонатора показал мощность выходного излучения 4,2 МВт и шириной полосы около 50 МГц при коэффициенте усиления 24 дБ. На рисунке 1 приведены характерные осциллограммы работы прибора в режиме усиления.

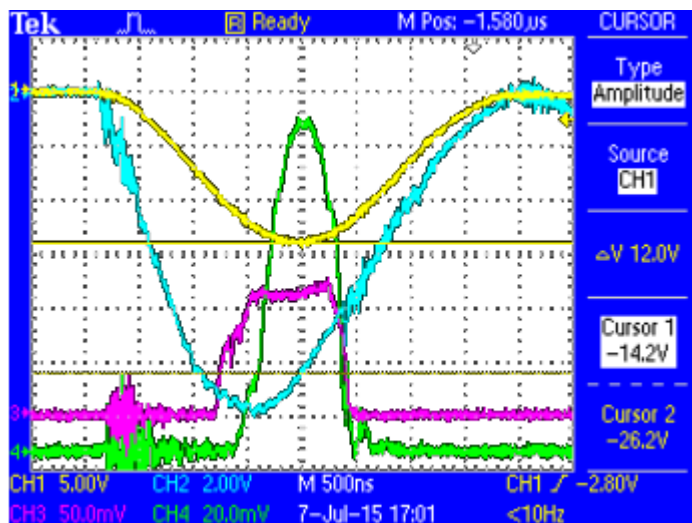


Рисунок 1. Осциллограммы напряжения (желтая кривая), тока (голубая кривая) и огибающей микроволновых импульсов входного СВЧ сигнала с магнетрона (красная кривая) и выходного (зеленая кривая) СВЧ сигналов.

Во вторая глава сосредоточена на методах управления режимами излучения мощных импульсных гиротронов и гироклистронов. В частности описываются эксперименты теоретическая возможность проведения которых обсуждалась достаточно давно, но при этом экспериментальной реализации не было.

В пункте 2.1. показана экспериментальная реализация идеи захвата частоты и фазы излучения мегаваттного гиротрона внешним источником с выходной мощностью составляющей единицы процентов относительно выходной мощности гиротрона. Приведены численные расчёты процесса захвата с входными параметрами приближенными к экспериментальным. Условия эксперимента и экспериментальный стенд описаны кратко, так как ранее уже упоминались в данной работе. При этом достаточно подробно сообщается непосредственно о проведении самого эксперимента и обсуждении полученных результатов. Экспериментально найдена область захвата на плоскости двух параметров – мощности и частоты магнетрона также получена соответствующая расчётная область, данные области представлены на рисунке 2.

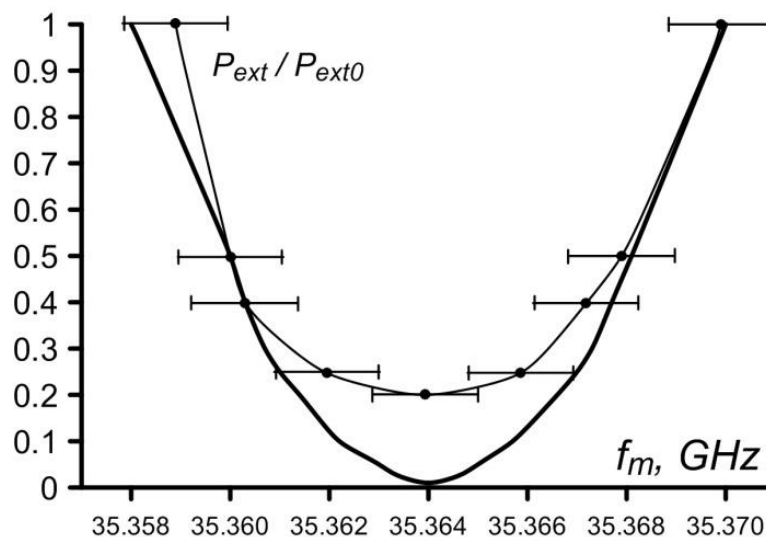


Рисунок 2. Граница зоны захвата на плоскости двух параметров: уровня мощности и частоты магнетрона. P_{ex} - мощность излучения магнетрона, P_{ext0} - ее максимальное значение. Тонкая линия соответствует эксперименту, толстая – расчетам. На экспериментальной кривой горизонтальными отрезками отмечены границы погрешности измерения частоты магнетрона.

В пункте 2.2. описан эксперимент в котором исследованы режимы работы импульсного мощного гироклистрона описанного в пункте 1.1. с введённой в его схему положительной обратной связи. Основное внимание в разделе уделено описанию эксперимента, характеристикам стенда и гироклистрона на базе которого выполнены исследования. Но также приводятся теоретические модели и численные расчёты режимов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Использование резонаторов на последовательности несимметричных мод более высокого порядка даёт возможность нарастить сверхразмерность электродинамических систем при сохранении достаточного уровня селекции мод. Данный метод позволил в диапазоне миллиметровых волн разработать и экспериментально реализовать импульсный релятивистский гироклистрон с выходной мощностью 15 МВт на более высокой по сравнению с предшественником частоте, при КПД 33%, коэффициенте усиления 30 дБ, полосе усиления 50 МГц и длительности импульса около 0.5 мкс.
2. Предложена концепция квазиоптического входного резонатора, основанная на использовании слабо гофрированного в продольном направлении резонатора с селективными отверстиями, которая наиболее перспективна в гироклистронах, использующих последовательности мод более высокого порядка и работающих в миллиметровом или субмиллиметровом диапазоне длин волн. На основе данной концепции разработан и экспериментально протестирован новый входной резонатор

- импульсного гироклистрона миллиметрового диапазона длин волн, демонстрирующий ширину полосы около 50 МГц при коэффициенте усиления 24 дБ.
3. Экспериментально продемонстрирована возможность воздействия на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности с помощью относительно небольшого внешнего сигнала, составляющего несколько процентов от мощности выходного излучения автогенератора. В эксперименте наблюдался захват частоты и фазы излучения гиротрона миллиметрового диапазона длин волн и выходной мощностью 0,9 МВт с помощью внешнего источника, составляющего 0.5 - 2.8% от мощности излучения автономного гиротрона.
 4. На базе гироклистрона Ka-диапазона длин волн введением в его схему внешней положительной обратной связи, экспериментально реализован гироклистронный импульсный генератор и исследованы режимы его генерации. Выявлено, что введение внешней обратной связи с задержкой, позволяет, эффективно управлять его режимом генерации, с одной стороны, позволяя обеспечить дополнительную селективность расчётной моды $TE_{7,3}$, а с другой стороны, демонстрируя возможность реализации мощного мультимегаваттного источника с быстрым переключением частоты в диапазоне 1-2 ГГц.

Список трудов автора по теме диссертации

- A1 Y. M. Guznov, Y.Y. Danilov, N.I. Zaitsev S.V. Kuzikov, Y.V. Novozhilova, A.S. Shevchenko, N.M. Ryskin, Megawatt-power ka-band gyrokystron oscillator with external feedback, Applied Physics Letters, 2013, Vol.103, Issue 17.
- A2 Ю. М. Гузнов, Н.И.Зайцев, С.В. Кузиков, М.А. Моисеев, М.Е. Плоткин, Е.М.Тай, А.С.Шевченко, Экспериментальное исследование релятивистского гироклистрона миллиметрового диапазона длин волн, Известия высших учебных заведений. Радиофизика, т.LVI, N 8-9, 2013, стр. 544-549.
- A3 Edward B. Abubakirov, Yuriy M. Guznov, Sergey V. Kuzikov, A. S. Shevchenko, Alexander A. Vikharev , and S. A. Zapevalov, Quasi-Optical Input Mode Coupler for a Ka-Band Multimegawatt Gyrokystron, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. V.66, issue 3. P. 1273-1278.
- A4 Бакунин В.Л., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г., Зайцев Н.И., Запевалов С.А., Куфтин А.Н., Новожилова Ю.В., Фокин А.П., Чирков А.В., Шевченко А.С., «Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности», «Письма в журнал технической физики » год 2018, том 44, выпуск 11 » стр. 38-44
- A5 В.Л.Бакунин, Ю.М.Гузнов, Г.Г.Денисов, Н.И.Зайцев, С.А.Запевалов, А.Н.Куфтин,

Ю.В.Новожилова, А.П.Фокин, А.В.Чирков, А.С.Шевченко, Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности, Известия высших учебных заведений. Радиофизика. Том 62, N 7-8, стр. 539-548, 2019 г.

- A6 Ю. М. Гузнов, Н.И.Зайцев, Данилов Ю. Ю., Кузиков С. В., Новожилова Ю. В., Шевченко А. С., Рыскин Н. М, Селективное возбуждение заданной моды в мощном импульсном гироклистроне диапазона миллиметровых волн с внешней запаздывающей обратной связью. Труды 23 международной конференции КрыМиКо, Севастополь, сентябрь 8-14, 2013, стр.894-895.
- A7 Ю. М. Гузнов, Н.И.Зайцев, Кузиков С. В., Моисеев М. А., Петелин М. И., Плоткин М. Е., Тай Е. М., Шевченко А. С., Мощный импульсный гироклистрон диапазона миллиметровых волн на последовательности мод $TE_{711} - TE_{731}$. Труды 23 международной конференции КрыМиКо, Севастополь, сентябрь 8-14, 2013, стр.912-914
- A8 Yu. M. Guznov, N. Zaitsev, M. Petelin, High-order mode relativistic gyrokystrons, Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications. 9th International Workshop Nizhny Novgorod – Perm – Nizhny Novgorod, Russia July 24 – 30, 2014, p 174
- A9 Yu. V. Novozhilova, V. L. Bandurkin, A V. Chirkov, Yu. M. Guznov, G. G. Denisov, A. P. Fokin, A.S. Shevchenko, N.I. Zaitsev, S. A. Zapevalov. Influence of mode competition and external wave frequency modulation on gyrotron frequency locking. Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications.10th International Workshop Nizhny Novgorod – Moscow, Russia July 17 – 22, 2017, p 233, 234.
- A10 Новожилова Ю. В., Рыскин Н. М., Зайцев Н. И., Ю. М. Гузнов, Управление режимом биений в мощном импульсном гироклистроне диапазона миллиметровых волн.Труды 24 международной конференции КрыМиКо, Севастополь, сентябрь 7-13, 2014, с.847-848.
- A11 Guznov, Y.M., Danilov, Y.Y., Kuzikov, S.V., Novozhilova, Y.V., Shevchenko, A.S., Zaitsev, N.I., Rozhnev, A.G., Ryskin, N.M. , High-power Ka-band gyrokystron oscillator with time-delayed feedback, 14th IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2013; Paris; France; 21-23 May 2013, 99049
- A12 Гузнов Ю. М., Новожилова Ю. В., Рыскин Н. М., Зайцев Н. И..Управление режимом биений в мощном импульсном гироклистроне диапазона миллиметровых волн//Труды 24 международной конференции КрыМиКо, Севастополь, сентябрь 7-13, 2014, с.847-848.
- A13 Ю.М. Гузнов, Ю.Ю. Данилов, Н.И. Зайцев, С.В. Кузиков, Ю.В. Новожилова, А.С. Шевченко, Рыскин Н.М., Мощный импульсный гиротрон-гироклистрон диапазона миллиметровых волн с внешней обратной связью, IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 26 февраля – 1 марта 2013 года, Нижний Новгород, стр. 62,63.

A14 Н.И. Зайцев, Ю.М. Гузнов, С.А. Запевалов, С.В. Кузиков, М.А. Моисеев, М.И. Петелин, М.Е. Плоткин, Е.М. Тай, А.С. Шевченко, Мощный импульсный гироклистрон диапазона миллиметровых волн на последовательности мод TE_{711} - TE_{731} , IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 26 февраля – 1 марта 2013 года, Нижний Новгород, стр. 44,45.

Список литературы

1. Толкачев А.А., Егоров Е.Н., Шишлов А.В. О некоторых тенденциях развития радиолокационных и связных систем // «Радиотехника», 2006, №4, С. 5–11
2. Belov Y.N. et al. Completion phase of Russian gyrotron system development for ITER // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2016. P. 1–2.
3. Jelonnek J. et al. Developments of fusion gyrotrons for W7-X, ITER and EU DEMO: Ongoing activities and future plans of KIT // 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2017. P. 1–3.
4. Zapevalov V.E., High-power microwaves against locusts and other harmful animals, 3rd International Conference "Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications", TERA 2018, 22 October 2018 - 25 October 2018
5. Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбуждённых классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике, Известия вузов, Радиофизика, 1967, Т. 10, № 9-10, стр. 1414
6. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nature photonics, 2007, V. 1, 97-105
7. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Калинин П.В., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Сеницкий С.Л., Степанов В.Д., Тумм М. Генерация мощного узкополосного излучения 75 GHz в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью // Письма в ЖТФ, 2013, Т. 39, в. 18, С.8-16
8. Flyagin V.A., Garonov A.V., Petelin M.I., Yulpatov V.K. The Gyrotron // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1977. Vol.25, Iss. 6, P. 514–521.
9. Antakov, I.I., Moiseev, M.A., Sokolov, E.V., Zasytkin, E.V., 1994, Theoretical and experimental investigation of X-band two-cavity gyrokystron. Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, 15, 873-887.
10. Zasytkin, E.V., Gachev, I.G., Antakov, I.I., Moiseev, M.A., Lygin, V.K., Sokolov, E.V., 1998, Development of a W-band 120 kW gyrokystron at IAP. Conf. Digest 23rd Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Colchester, UK, 183.
11. Kuzikov, S.V., Savilov, A.V. Free Electron Laser Based on a Multi-Stage System of RF Wigglers //43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz Volume 2018-September, 25 October 2018, Paper No. 8509928.
12. Vodopyanov, A.V., Glyavin, M.Y., Golubev, S.V., et al. Plasma density in discharge sustained in inhomogeneous gas flow by high-power radiation in the terahertz frequency range // Technical Physics Letters, Volume 43, Issue 2, 1 February 2017, Pages 186-189. DOI: 10.1134/S1063785017020286

13. J. Benford, J. A. Swegle, and E. Schamiloglu, High Power Microwaves. 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
14. Rozental R.M., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Sergeev A.S., Zotova I.V. Mutual synchronization of weakly coupled
15. Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and