

УДК 537.862

## МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГИРОТРОН С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Ю. К. Калынов, И. В. Бандуркин, Н. А. Завольский, В. Н. Мануилов,  
Б. З. Мовшевич, И. В. Ошарин\**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Исследуется возможность создания гиротрона с частотой излучения 1 ТГц и мощностью несколько киловатт для использования в перспективных плазменных исследованиях. В 2008 году был успешно реализован импульсный гиротрон с большой орбитой на третьей циклотронной гармонике с мощностью излучения 0,4 кВт на рабочей частоте 1 ТГц. Мы совершенствуем этот прибор для создания плазменного источника экстремального ультрафиолетового излучения. Проведённые ранее эксперименты показали, что для этого потребуется почти в десять раз большая мощность. Модификация гиротрона с большой орбитой позволяет повысить мощность генерации до 4 кВт за счёт увеличения мощности электронного пучка и уменьшения доли омических потерь в резонаторе. Такой гиротрон рассчитан на работу с электронным пучком с током 1,2 А при ускоряющем напряжении 100 кВ в импульсном магнитном поле 14 Тл.

### ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовый диапазон частот занимает промежуточное положение между микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитных волн и характеризуется до сих пор малым числом доступных источников излучения. В то же время этот диапазон обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований. Так, в частности, свечение плотной плазмы терагерцового разряда может служить ярким «точечным» источником излучения в области экстремального ультрафиолета (ЭУФ, длины волн  $13\div 17$  нм), который может использоваться для проекционной литографии высокого разрешения. Выполненные ранее экспериментальные и теоретические работы показали, что концентрация плазмы точечного разряда, возникающего под действием мощного субтерагерцового излучения гиротрона в сильнонеоднородном потоке газа, может превышать критическую, и такой разряд эффективно излучает в диапазоне вакуумного ультрафиолета [1].

В работе [1] проведены измерения концентрации плазмы в «точечном» разряде, который генерируется в неоднородном потоке газа (аргона) под действием мощного терагерцового излучения гиротрона с частотой 0,67 ТГц, мощностью 40 кВт и длительностью импульса 20 мкс. Выполненные расчёты [2] и эксперименты [3] показывают, что для лучшего согласования греющего излучения с плазмой и увеличения степени его конверсии в ЭУФ [4] необходимо увеличить его частоту по крайней мере до 1 ТГц. Наилучшее согласование терагерцового излучения с плазмой достигается в случае, когда характерный размер плазменного образования сравним с длиной облучающей волны, а концентрация электронов в несколько раз превышает критическую [2]. При качественной фокусировке электромагнитного излучения с частотой 1 ТГц возможно формирование волнового пучка с диаметром перетяжки порядка длины волны 0,3 мм. Мощность излучения на уровне нескольких киловатт при плотности потока порядка  $5 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (величина электрического поля 60 кВ/см) должна обеспечить зажигание разряда в широком диапазоне давлений.

\* osharin@appl.sci-nnov.ru

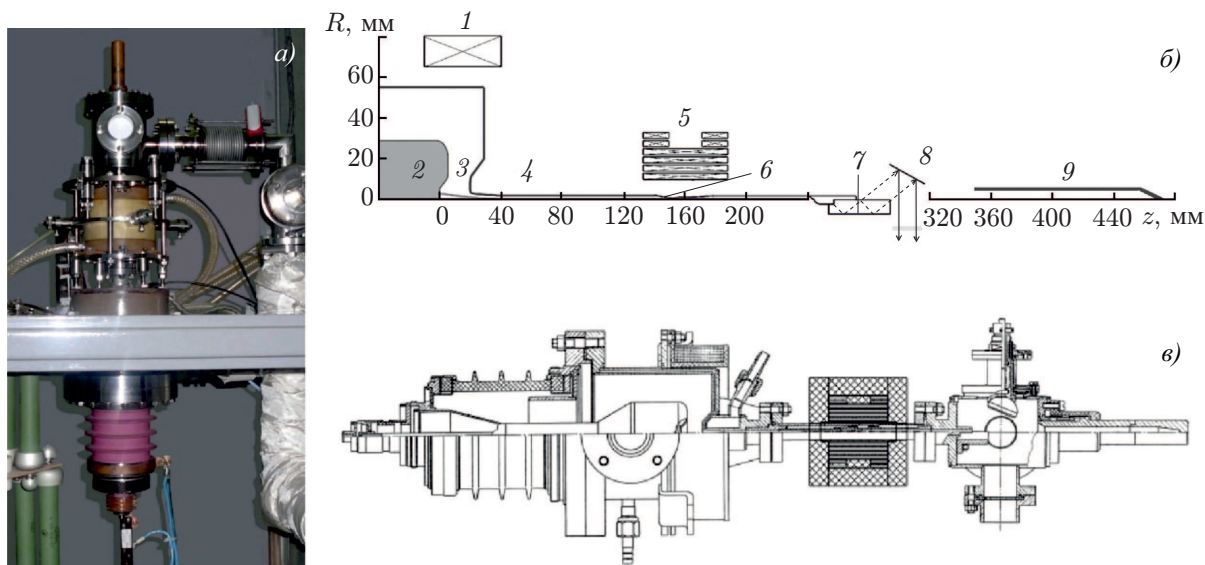


Рис. 1. Фото (а), схема (б) и конструкция (в) импульсного терагерцового ГБО: 1 — отрицательная катодная катушка, 2 — катод, 3 — электронный пучок, 4 — анод, 5 — основной соленоид, 6 — резонатор, 7 — выходное окно, 8 — квазиоптический преобразователь мод, 9 — коллектор

В таких условиях возможно формирование плазменного образования с характерным размером 0,3 мм и с концентрацией намного выше критического значения  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что должно, согласно оценкам, обеспечить существенный нагрев разрядной плазмы и её свечение в диапазоне ЭУФ с мощностью до 100 Вт.

Таким образом, для получения и нагрева разрядной плазмы с целью создания источника экстремального ультрафиолета необходим генератор с мощностью выходного когерентного излучения на уровне нескольких киловатт в относительно длинных (десятки микросекунд) импульсах на частоте 1 ТГц. Излучение из генератора должно выводиться в виде волнового пучка для обеспечения его дальнейшей качественной фокусировки.

Рабочая частота гиротронов в последнее время активно продвигается в терагерцовый диапазон [5, 6]. Основной проблемой является необходимость увеличения магнитного поля. Для получения частоты излучения 1 ТГц при работе на основном циклотронном резонансе в слаборелятивистском гиротроне требуется магнитное поле около 38 Тл [6]. Такие магниты являются сложными в эксплуатации, довольно дорогими системами с ограниченным ресурсом, обеспечивающими лишь разовые импульсы магнитного поля. Это делает традиционные гиротроны, работающие на низших гармониках и использующие трубчатые электронные пучки, непривлекательными для использования в приложениях. В такой ситуации практически неизбежной становится работа на высоких гармониках циклотронной частоты. Селективно работать на высоких циклотронных гармониках способен гиротрон с большой орбитой (ГБО) [7–17]. В 2008 году был успешно реализован импульсный ГБО, работающий на второй (0,55 ТГц/1 кВт<sup>1</sup> и 0,68 ТГц/2 кВт) и третьей (0,87 ТГц/0,3 кВт и 1 ТГц/0,4 кВт) циклотронных гармониках [7]. Следует отметить, что этот гиротрон (см. рис. 1) уже использовался для получения терагерцового разряда в газах в сфокусированном волновом пучке [18, 19]. Эксперименты проводились на частоте 0,55 ТГц, позволяющей получать устойчивый разряд в газе при имеющейся мощности излучения 1 кВт. В работе рассмотрены возможности модификации данного ГБО с целью увеличения мощности излучения на частоте 1 ТГц до уровня в несколько киловатт при работе на третьей циклотронной гармонике.

<sup>1</sup> Приведены частота и мощность выходного излучения гиротрона.

## 1. ПУТИ МОДИФИКАЦИИ ГИРОТРОНОВ С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ

Серьёзной проблемой в реализации гиротронов, работающих на высоких циклотронных гармониках в терагерцовом частотном диапазоне, являются большие омические потери в стенках резонатора. Это связано с тем, что ввиду слабого электронно-волнового взаимодействия слаборелятивистских электронов на высоких циклотронных гармониках для превышения порога самовозбуждения генератора приходится использовать длинные резонаторы с высокой дифракционной добротностью (величиной, связанной с дифракционным выводом излучения и пропорциональной квадрату длины резонатора). В то же время омическая добротность регулярного гиротронного резонатора не зависит от его длины и в терагерцовом диапазоне оказывается значительно меньшей, чем дифракционная добротность. Так, например, в ГБО, работающем на третьей циклотронной гармонике, на частоте 1 ТГц доля омических потерь достигала 85 % [7]. В результате большая часть мощности, отбираемая волной от электронного пучка с параметрами<sup>2</sup> 80 кВ / 0,7 А, несмотря на сравнительно высокий электронный коэффициент полезного действия (10 %), терялась в стенках резонатора и мощность выходного излучения ГБО на частоте 1 ТГц с учётом потерь на транспортировку и преобразование волны в волновой пучок не превысила 0,4 кВт. Применение терагерцового ГБО для создания мощного точечного источника ЭУФ-излучения на плотном разряде в плазме потребует увеличения его мощности при работе на 3-й гармонике до уровня в несколько киловатт. В этой нетривиальной ситуации лучшим способом повышения эффективности и мощности излучения гиротрона является увеличение мощности электронного пучка и уменьшение дифракционной добротности рабочей волны. Следует отметить, что увеличение мощности электронного пучка способствует росту эффективности электронно-волнового взаимодействия и позволяет значительно уменьшить длину и, следовательно, дифракционную добротность резонатора до значений, необходимых для старта колебаний.

Следующим путём решения проблемы увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия является разработка новых электродинамических систем. В связи с этим важным моментом является выбор рабочей моды, которая должна удовлетворять трём условиям. Во-первых, возбуждение должно происходить на рабочей циклотронной гармонике. В конфигурации ГБО этому удовлетворяют моды с азимутальным индексом, равным номеру гармоники. Во-вторых, резонансное магнитное поле рабочей моды должно достаточно сильно отличаться от соответствующих значений магнитного поля для мод, имеющих связь с электронным пучком на низших циклотронных гармониках. В-третьих, рабочая мода должна иметь сравнительно большую омическую добротность, что обеспечивается высоким радиальным индексом.

Суммируя вышесказанное, имеем, что увеличение мощности излучения ГБО может быть достигнуто прежде всего за счёт роста мощности электронного пучка. Это способствует увеличению эффективности электронно-волнового взаимодействия и позволяет существенно уменьшить длину и, следовательно, дифракционную добротность резонатора. Выбор рабочей моды и конфигурации резонатора позволяют дополнительно снизить потери в нём. В результате обеспечивается значительное уменьшение омических потерь, увеличение коэффициента полезного действия и мощности генерации.

## 2. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГИРОТРОНОВ С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ

При конструировании коротковолновых ГБО наиболее сложно создать электронно-оптическую систему, формирующую тонкий и очень плотный моноосевой пучок с достаточно большими скоростями вращательного движения частиц и малой величиной их разброса. В 2008 году успешная

<sup>2</sup> Приведены ускоряющее напряжение и ток электронного пучка.

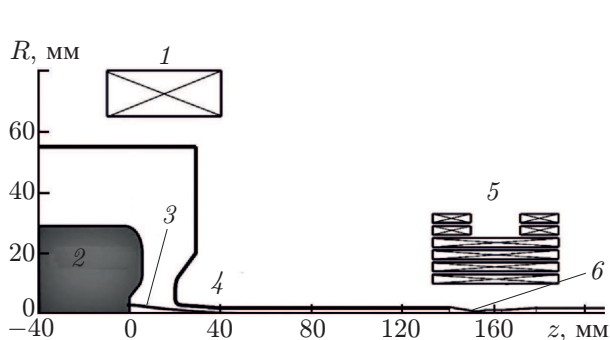


Рис. 2. Схема электронно-оптической системы ГБО с частотой излучения 1 ТГц. Обозначения такие же, как на рис. 1

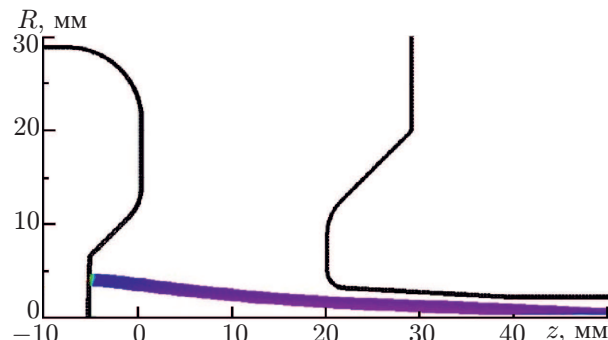


Рис. 3. Конфигурация диодной части пушки с электронным пучком на входе в канал транспортировки

реализация неадиабатической пушки с реверсом магнитного поля (см. рис. 2) позволила создать ГБО на третьей циклотронной гармонике с частотой излучения 1 ТГц [7]. Полученная мощность излучения составила 0,4 кВт. Для создания мощного точечного источника ЭУФ-излучения на плотном разряде в плазме потребуется, по оценкам, почти в десять раз большая мощность.

Мощность приосевого электронного пучка может быть увеличена прежде всего за счёт роста ускоряющего напряжения с 80 до 100 кВ. Такое повышение напряжения потребовало увеличения анодно-катодного зазора на 5 мм, что было достигнуто за счёт изменения конструкции съёмного катода. При этом максимальное электрическое поле на электродах катода не превысило 8 кВ/мм. Оценка работы ГБО на высокой частоте генерации 1 ТГц при ускоряющем напряжении 100 кВ показывает, что для увеличения мощности генерации до  $3\div 4$  кВт электронный питч-фактор должен составлять по крайней мере 1,5 при относительном разбросе скоростей вращательного движения 0,3 и токе пучка порядка 1 А. Здесь относительный разброс скоростей определён как отношение ширины функции распределения скоростей вращения электронов к среднему арифметическому значению скорости вращательного движения.

Повышение ускоряющего напряжения ведёт к увеличению индукции резонансного магнитного поля до 14,2 Тл. Вместе с небольшим уменьшением магнитного поля на катоде это способствует увеличению радиуса эмиттера и значительному увеличению тока электронного пучка. Исходя из оценок требуемых параметров пучка и с учётом характерной плотности тока эмиссии  $4 \text{ А/см}^2$ , на базе теории электронно-оптической системы (ЭОС) с реверсом магнитного поля, подробно изложенной в [20], вычислялись средний радиус 4 мм, ширина эмиттера 1,2 мм и компрессия пучка 4700. Следует отметить, что в исходной ЭОС пучок сжимался лишь в 3000 раз. Затем конфигурация катода (см. рис. 3) уточнялась в процессе траекторного анализа ЭОС.

По данным моделирования, в системе может быть сформирован пучок с током, превышающим 1 А, питч-фактором около 1,6 и разбросом скоростей менее 0,3 (см. рис. 4а). Радиус электронного пучка в резонаторе может быть определён из средних значений радиуса Лармора (0,065 мм) и радиуса ведущего центра (0,03 мм). С учётом позиционного разброса ведущих центров максимальный радиус пучка будет около 0,1 мм. При этом рабочий ток пучка составит примерно 0,04 от предельного тока транспортировки пучка через резонатор.

При моделировании ЭОС для токов от 0,3 до 1,2 А путём изменения глубины реверса магнитного поля (индукции магнитного поля на катоде) определялись предельные параметры электронного пучка до начала отражения электронов от магнитного зеркала (рис. 4б). Полученные предельные параметры пучка позволяют надеяться на успешную реализацию ЭОС с увеличенным напряжением. Таким образом, путём сравнительно небольшого увеличения ускоряющего напряжения (всего в 1,25 раза) удалось удвоить мощность электронного пучка, с 80 кВ / 0,7 А до 100 кВ / 1,2 А.

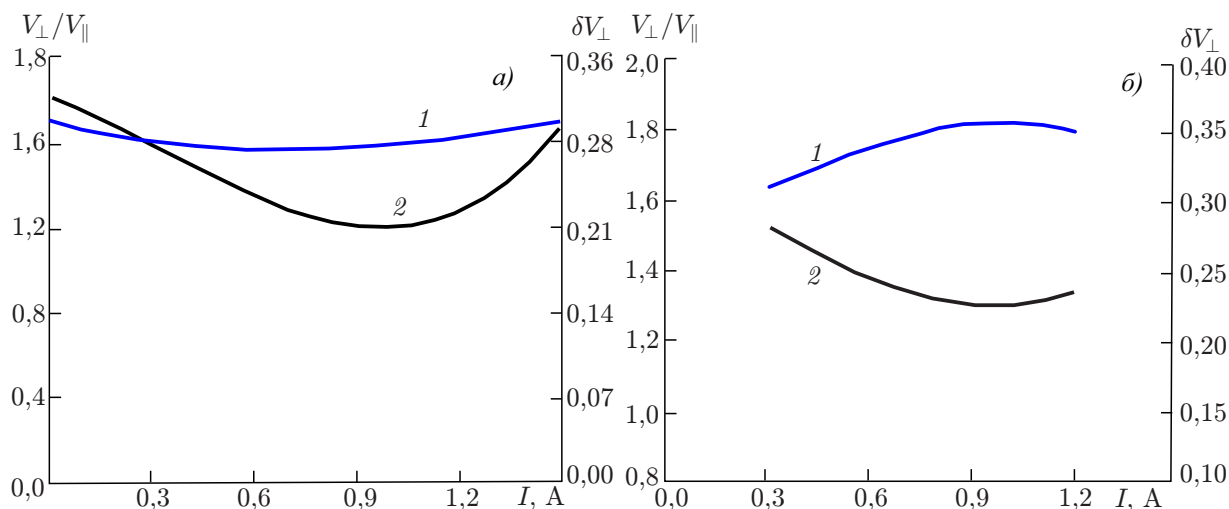


Рис. 4. Рассчитанные питч-фактор (линия 1) и относительный разброс скоростей (линия 2) в зависимости от тока электронного пучка для рабочей индукции поля на эмиттере  $-3$  мТл (а) и для различных (соответствующих току пучка) предельных значений индукции магнитного поля на катоде до начала отражения электронов от магнитного зеркала (б)

Таблица 1. Параметры ЭОС и электронного пучка реализованного (ГБО-П) и модифицированного (ГБО-М) гиротронов

Гиротрон	ГБО-П	ГБО-М
Энергия электронов, кэВ	80	100
Ток пучка, А	0,7	1,2
Радиус катода, мм	3	4
Ширина эмиттера, мм	0,92	1,2
Плотность эмиссии, А/см <sup>2</sup>	4	4
Магнитное поле на катоде, мТл	$-4,5$	$-3,0$
Магнитное поле в резонаторе, Тл	13,7	14,2
Питч-фактор	1,5	1,6
Разброс скоростей	0,25	0,23
Компрессия пучка	3 000	4 700
Ток пучка/ток Ленгмюра	0,3	0,3

В табл. 1 приведены параметры ЭОС и электронного пучка реализованного ГБО (назовём его прототип, ГБО-П) и модифицированного ГБО (ГБО-М).

### 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Не менее важным путём решения проблемы увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия и мощности излучения ГБО является разработка новых электродинамических систем и выбор для них рабочих мод. В терагерцовом ГБО [7] из-за простоты изготовления использовался гиротронный резонатор с коническим дифракционным выводом энергии. Чтобы уменьшить омические потери на высокой частоте 1 ТГц, была выбрана рабочая мода  $TE_{3,7}$ . На частоте 1 ТГц диаметр резонатора для этой моды составляет 2,3 мм. Важно, что мода  $TE_{3,7}$  не имеет никаких соседних паразитных мод, для которых азимутальные индексы и номера гар-

моник отличаются на единицу. Для возбуждения этой моды при имеющихся параметрах электронного пучка 80 кВ/0,7 А с питч-фактором 1,4÷1,5 потребовалась большая длина резонатора (7,2 мм, или 24 длины волны). Большая длина области взаимодействия приводит к сравнительно узкой полосе циклотронного резонанса, что обеспечило достаточное разделение мод так, что рабочая мода  $TE_{3,7}$  не была подавлена самой близкой мешающей модой на второй гармонике  $TE_{2,5}$  с большей индукцией резонансного магнитного поля. В то же время большая длина резонатора привела к высокой (до 85 %) доле омических потерь. В результате, несмотря на сравнительно хороший электронный коэффициент полезного действия (10 %), мощность выходного излучения ГБО на частоте 1 ТГц не превысила 0,4 кВт.

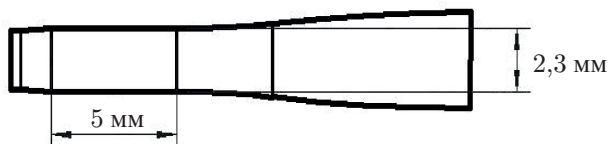


Рис. 5. Профиль слабонерегулярного резонатора со скруглённым дифракционным выводом излучения, рассчитанного для рабочей моды  $TE_{3,7}$  на частоте 1 ТГц

Следует отметить, что применение дифракционного вывода энергии такого типа способствует дополнительному снижению дифракционной добротности и потерь мощности при последующем преобразовании рабочей моды в волновой пучок [21].

За счёт укорочения резонатора и уменьшения дифракционной добротности омические потери рабочей моды были снижены до 50 %. Однако повышение ускоряющего напряжения до 100 кВ усложнило использование этой моды. Согласно моделированию область генерации рабочей моды значительно перекрывается областью генерации близкой паразитной моды на второй гармонике  $TE_{2,5}$  в результате её расширения, вызванного увеличением ускоряющего напряжения (см. рис. 6а). Моделирование на основе двухволнового пространственно-временного численного кода

В соответствии с новыми условиями (мощность электронного пучка увеличена в 2 раза, с 80 кВ/0,7 А до 100 кВ/1,2 А) был модифицирован резонатор с рабочей модой  $TE_{3,7}$ , применённый ранее в терагерцовом ГБО. Для увеличения мощности генерации была значительно укорочена длина цилиндрической части резонатора, и коническое соединение цилиндрической части с выходным волноводом было заменено переходом в виде дуг сопряжённых окружностей (см. рис. 5).

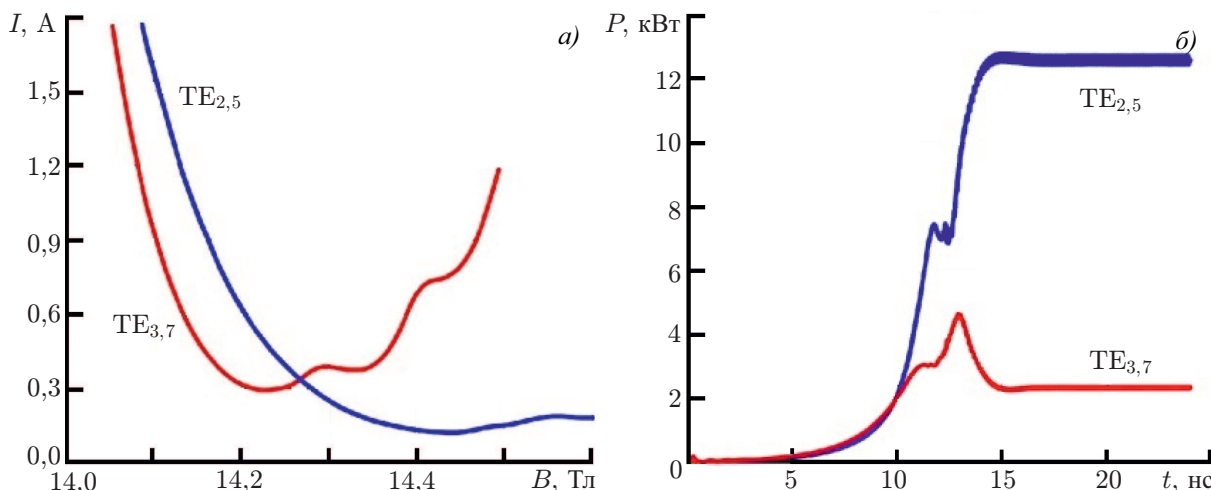


Рис. 6. Зависимости расчётных стартовых токов для рабочей моды  $TE_{3,7}$  на третьей (1 ТГц) и паразитной моды  $TE_{2,5}$  на второй (0,68 ТГц) циклотронных гармониках от магнитного поля (а) и нестационарное моделирование двухмодового взаимодействия ( $TE_{3,7}$  и  $TE_{2,5}$ ) с электронным пучком в режиме 100 кВ/1,2 А с питч-фактором 1,5 при разбросе скоростей 30 % в магнитном поле 14,09 Тл (б) в слабонерегулярном резонаторе ( $P$  — мощность излучения,  $t$  — время)



процесса установления колебаний в слабонерегулярном резонаторе в режиме с магнитным полем 14,09 Тл и током пучка 1,2 А показало, что даже в этом оптимальном для рабочей моды режиме доминирует паразитная мода  $TE_{2,5}$  (см. рис. 6б).

Улучшить селективность рабочей моды позволяет введение в цилиндрическую часть резонатора нерегулярного элемента в виде короткой аксиально-симметричной канавки (см. рис. 7). Радиус канавки близок к критическому радиусу для моды, чей азимутальный индекс совпадает с азимутальным индексом рабочей моды, а радиальный индекс превышает индекс рабочей моды на единицу. Ширина канавки обеспечивает практически полное отсутствие рассеяния рабочей моды на этом элементе. Описанный элемент является резонансным и, следовательно, обеспечивает отсутствие рассеяния только для рабочей моды [22]. Согласно расчётам резонансные свойства канавки сохраняются при изменении её глубины и ширины в пределах 0,01 мм.

В отличие от рабочей моды, паразитная волна  $TE_{2,5}$  на второй циклотронной гармонике испытывает сильное рассеяние на канавке. Это ведёт к снижению её добротности, искажению продольной структуры поля и в конечном итоге увеличению её стартовых токов (см. рис. 8а). В результате генерация на рабочей моде становится селективной и мощность излучения из резонатора, возбуждаемого электронным пучком с параметрами 100 кВ/1,2 А и питч-фактором 1,5, достигает 5 кВт (см. рис. 8б).

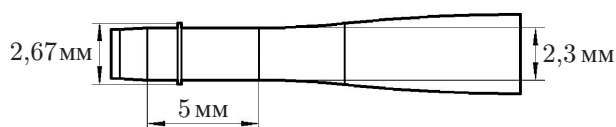


Рис. 7. Профиль слабонерегулярного резонатора со скруглённым дифракционным выводом излучения с селективирующей канавкой, рассчитанный для рабочей моды  $TE_{3,7}$  на частоте 1 ТГц

Также проблема селекции может быть решена путём перехода в гладком слабонерегулярном резонаторе к рабочей моде с более высоким радиальным индексом. Мы планируем использовать моду  $TE_{3,9}$  [23]. В этом случае, соответствующий диаметр резонатора составил 2,91 мм, а длина резонатора 5,4 мм (18 длин волн; см. рис. 9).

Селективная работа на третьей гармонике на новой моде  $TE_{3,9}$  осложняется двумя наиболее важными паразитными волнами на низких гармониках. Прежде всего, потребуется особое внимание к юстировке электронного пучка; это связано с опасной паразитной модой  $TE_{0,3}$ , возбуждаемой на основной циклотронной гармонике. Факторы возбуждения этой моды быстро возрастают при смещении электронного пучка от оси резонатора, превышающем допустимую величину 0,2

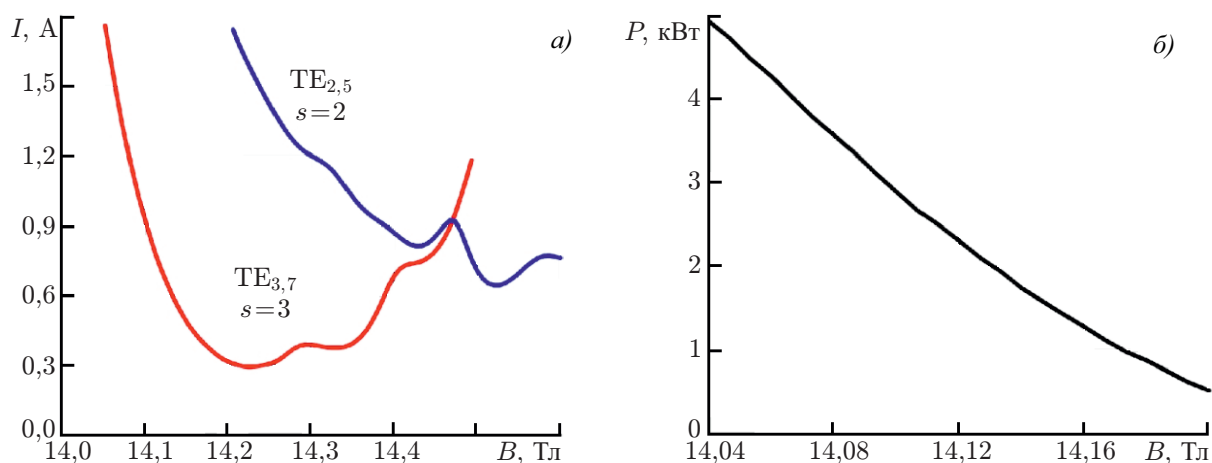


Рис. 8. Стартовые токи рабочей ( $TE_{3,7}$ ) и паразитной ( $TE_{2,5}$ ) мод (а) и мощность генерации на рабочей моде  $TE_{3,7}$  в режиме электронного пучка 100 кВ/1,2 А с питч-фактором 1,5 (б) в слабонерегулярном резонаторе с селективирующей канавкой

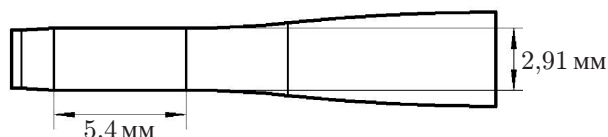


Рис. 9. Профиль слабонерегулярного резонатора со скруглённым дифракционным выводом излучения для рабочей моды  $TE_{3,9}$  на частоте 1 ТГц

модового возбуждения паразитной волны на второй гармонике в режиме лампы обратной волны (см. рис. 10а). В соответствии с моделированием на основе двухволнового пространственно-временного численного кода в этой ситуации мощность выходного излучения формируется в основном волной третьей гармоники гиротронного типа  $TE_{3,9}$  (см. рис. 10б). При этом паразитная волна на второй гармонике  $TE_{2,6}$  не полностью подавлена, но её вклад в общую мощность выходного излучения составляет менее 5 %. Отметим, что небольшая доля паразитной мощности второй гармоники не создаёт проблем для использования такого излучения для генерации разряда в плазме. В данном случае укороченная длина резонатора и выбор рабочей моды  $TE_{3,9}$  приводят к снижению омических потерь в терагерцовом гиротроне на третьей гармонике со слабонерегулярным резонатором до 55 % и увеличению мощности выходного излучения до 4 кВт.

В табл. 2 приведены параметры резонатора, использованного в ГБО-П, и резонаторов, рассчитанных для ГБО-М.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПФ РАН исследуется возможность создания гиротрона с частотой излучения 1 ТГц и выходной мощностью несколько киловатт для реализации плазменного источника экстремального ультрафиолетового излучения. За основу взят созданный в 2008 году импульсный ГБО, работающий на третьей циклотронной гармонике с мощностью выходного излучения на частоте 1 ТГц до 0,4 кВт. Модификация электронно-оптической системы путём сравнительно небольшого увеличения ускоряющего напряжения (с 80 до 100 кВ) позволила удвоить мощность электронного

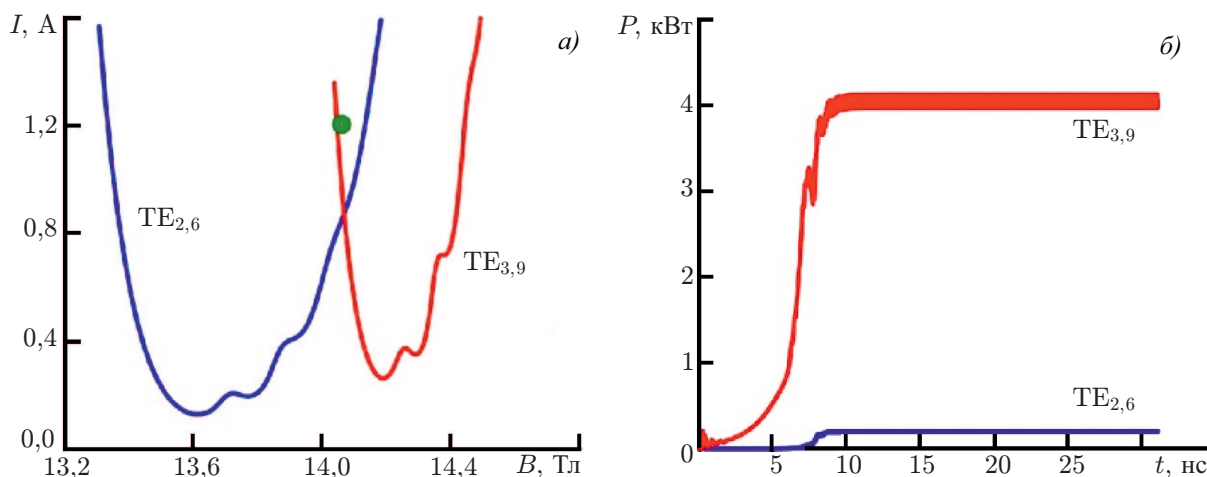


Рис. 10. Расчётные стартовые токи для мод  $TE_{3,9}$  на третьей (1 ТГц) и  $TE_{2,6}$  на второй (0,64 ТГц) циклотронных гармониках (а) и нестационарное моделирование двухмодового взаимодействия ( $TE_{3,9}$  и  $TE_{2,6}$ ) с электронным пучком с током 1,2 А и пич-фактором 1,5 в магнитном поле 14,06 Тл (б) при разбросе скоростей 30 %. Символ • соответствует рабочему режиму



Таблица 2. Параметры резонатора реализованного гиротрона (ГБО-П) и резонаторов, рассчитанных для модифицированного гиротрона (ГБО-М)

Гиротрон	ГБО-П		ГБО-М	
	TE <sub>3,7</sub>		TE <sub>3,7</sub>	TE <sub>3,9</sub>
Мода	TE <sub>3,7</sub>		TE <sub>3,7</sub>	TE <sub>3,9</sub>
Дифракционный вывод	конус с углом полураствора 3°		скруглённый	скруглённый
Длина регулярной части, мм	7,2		5,20	5,4
Диаметр регулярной части, мм	2,30		2,30	2,91
Дифракционная добротность	30 500		8 000	9 700
Омическая добротность	5 600		5 600	7 100

пучка за счёт изменения конструкции катода и увеличения его тока с 0,7 до 1,2 А. Увеличение мощности электронного пучка позволило значительно изменить резонатор традиционной конфигурации с рабочей модой TE<sub>3,7</sub> и снизить омические потери рабочей моды до 50 %. За счёт этого согласно моделированию мощность генерации была увеличена до 5 кВт. Селективность рабочей моды может быть обеспечена введением в цилиндрическую часть резонатора резонансного элемента в виде короткой аксиально-симметричной канавки. Рассмотрен другой путь увеличения мощности генерации — за счёт перехода в гладком слаборегулярном резонаторе к рабочей моде TE<sub>3,9</sub>. В этом случае моделирование предсказывает рост мощности до 4 кВт. Таким образом, за счёт модификации электронно-оптической и электродинамической систем мощность генерации ГБО на частоте 1 ТГц согласно вычислениям может быть увеличена до значений, обеспечивающих получение и нагрев разрядной плазмы для её свечения в диапазоне ЭУФ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00599).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorov A. V., Razin S. V., Golubev S. V., et al. // *Phys. Plasmas*. 2016. V. 23, No. 4. Art. no. 043511. <https://doi.org/10.1063/1.4947219>
2. Shalashov A., Gospodchikov E. // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2016. V. 64, No. 9. P. 3960–3971. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2583487>
3. Shalashov A. G., Vodopyanov A. V., Abramov I. S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 113, No. 15. Art. no. 153502. <https://doi.org/10.1063/1.5049126>
4. Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. // *Phys. Rev. Appl.* 2018. V. 10, No. 3. Art. no. 034065. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.034065>
5. Idehara T., Tsuchiya H., Watanabe O. // *Int. J. Infrared Millim. Waves*. 2006. V. 27, No. 3. P. 319–331. <https://doi.org/10.1007/s10762-006-9084-9>
6. Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Yu. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100, No. 1. Art. no. 015101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101>
7. Bratman V. L., Kalynov Yu. K., Manuilov V. N. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102, No. 24. Art. no. 245101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.245101>
8. McDermott D. B., Luhmann Jr. N. C., Kupiszewski A., Jory H. R. // *Phys. Fluids*. 1983. V. 26, No. 7. P. 1936–1941. <https://doi.org/10.1063/1.864341>
9. Lawson W., Destler W. W., Striffler C. D. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1985. V. 13, No. 6. P. 444–453. <https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316458>
10. Irwin K., Destler W. W., Lawson W., et al. // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 69, No. 2. P. 627–632. <https://doi.org/10.1063/1.347342>

11. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Федотов А. Э. // Журн. техн. физ. 1998. Т. 68, № 10. С. 91–98.
12. Bratman V. L., Fedotov A. E., Kalynov Yu. K., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 456–461. <https://doi.org/10.1109/27.772273>
13. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. и др. // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 6. С. 744–751.
14. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н., Самсонов С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 823–829.
15. Bandurkin I. V., Kalynov Yu. K., Savilov A. V. // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. V. 62, No. 7. P. 2356–2359. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2432858>
16. Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kalynov Yu. K., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65, No. 6. P. 2 287–2 293. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2797311>
17. Kalynov Yu. K., Manuilov V. N., Fiks A. Sh., Zavolskiy N. A. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114, No. 21. Art. no. 213502. <https://doi.org/10.1063/1.5094875>
18. Bratman V. L., Zorin V. G., Kalynov Yu. K., et al. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18, No. 8. Art. no. 083507. <https://doi.org/10.1063/1.3622202>
19. Bratman V. L., Izotov I. V., Kalynov Yu. K., et al. // Phys. Plasmas. 2013. V. 20, No. 12. Art. no. 123512. <https://doi.org/10.1063/1.4853515>
20. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 4. С. 537–544.
21. Заруднева Г. И., Калынов Ю. К., Малыгин С. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 3. С. 343–346.
22. Bandurkin I. V., Fedotov A. E., Fokin A. P., et al. // Proc. 44th Intern. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019). 1–6 September 2019, Paris. Art. no. 8874410. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874410>
23. Kalynov Yu. K., Bandurkin I. V., Manuilov V. N., et al. // Proc. 44th Intern. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019). 1–6 September 2019, Paris. Art. no. 8874254. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874254>

Поступила в редакцию 8 июня 2020 г.; принята в печать 30 июня 2020 г.

## HIGH-POWER PULSED TERAHERTZ-WAVE LARGE-ORBIT GYROTRON FOR A PROMISING SOURCE OF EXTREME ULTRAVIOLET RADIATION

*Yu. K. Kalynov, I. V. Bandurkin, N. A. Zavolskiy,  
V. N. Manuilov, B. Z. Movshevich, and I. V. Osharin*

We study the possibility to make a gyrotron generating a power of several kilowatts at a radiation frequency of 1 THz, which will be used in promising plasma studies. In 2008, a pulsed large-orbit gyrotron (LOG) generating a power of 0.4 kW at the third cyclotron harmonic and an operating frequency of 1 THz was implemented successfully. We update this device to create a plasma source of extreme ultraviolet radiation. Earlier experiments showed that this will require a power that is almost an order of magnitude higher. Updating a large-orbit gyrotron will make it possible to increase the generation power up to 4 kW by raising the power of the electron beams and reducing the share of the Ohmic loss in the cavity. Such a gyrotron is designed to operate with an electron beam with a current of 1.2 A and an accelerating voltage of 100 kV in a pulsed magnetic field of 14 T.