

Источники мощного терагерцевого излучения для спектроскопии и диагностики различных сред

М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, В.Е. Запелов,
М.А. Кошелев, М.Ю. Третьяков, А.И. Цветков

Представлены данные по разработке источников излучения и наиболее яркие примеры использования гиротронов для задач спектроскопии и диагностики различных сред. Описаны основные особенности гиротронов терагерцевого диапазона. Приведены наиболее яркие примеры современных непрерывных и импульсных гиротронов в указанном частотном диапазоне, а также освещён ряд актуальных приложений и сформулированы ближайшие перспективы развития высокочастотных гиротронов.

Ключевые слова: гиротрон, терагерцевое излучение, мощность, спектроскопия

PACS numbers: 07.57. – c, 41.60. – m, 84.40. Ik

DOI: 10.3367/UFNr.2016.02.037801

Содержание

1. Введение (667).
2. Особенности гиротронов в терагерцевом диапазоне частот (668).
3. Примеры реализации терагерцевых гиротронов (670).
4. Некоторые приложения терагерцевых гиротронов (674).
5. Заключение (676).

Список литературы (676).

1. Введение

Терагерцевый диапазон частот (0,1–10 ТГц) обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. Терагерцевые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения [1,2]. Мощное терагерцевое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управления её параметрами (управляемый термоядерный синтез, "точечные" плазменные источники рентгеновского излучения, дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения) [2], а также

для ряда технологических и медицинских приложений (см., например, [3]). Создание мощных источников излучения в этом диапазоне связано с принципиальными физическими ограничениями: традиционные электровакуумные приборы (клистроны, лампы обратной или бегущей волны) содержат элементы с размерами, близкими к длине волны, что приводит к перегреву или пробоем при высоком уровне мощности, а лазеры в указанном диапазоне имеют низкую эффективность. Хотя мощность электровакуумных источников значительно превосходит мощности твердотельных генераторов [4, 5] (типичная выходная мощность ламп обратной волны [6] на частоте около 1 ТГц не превышает 10 мВт, мощность клистронов с распределённым взаимодействием [7] доходит до 100 мВт), этого недостаточно для ряда актуальных приложений. Естественным решением указанных проблем представляется переход к электровакуумным приборам, не имеющим замедляющих систем (т.е. работающим с "быстрыми" волнами), а именно лазерам на свободных электронах (ЛСЭ) и гиротронам.

При всех несомненных достоинствах: возможности плавной широкополосной перестройки частоты, высоких пиковой и средней мощности излучения [8] — ЛСЭ являются уникальными крупными и дорогостоящими установками и не всегда доступны широкому кругу пользователей. В связи с этим одними из наиболее перспективных приборов в терагерцевом (и субтерагерцевом) диапазоне представляются гиротроны — устройства, основанные на взаимодействии электронов, вращающихся во внешнем магнитном поле, и электромагнитной волны в условиях циклотронного резонанса [9]. Основным отличием гиротрона от других мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) является использование

М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, В.Е. Запелов, М.А. Кошелев,
М.Ю. Третьяков, А.И. Цветков. Институт прикладной физики РАН,
ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
Тел. (831) 416-46-27. Факс (831) 416-06-16
E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

Статья поступила 30 марта 2016 г.

адиабатической магнетронно-инжекторной пушки (МИП) с сильной компрессией электронного потока и открытого высокоселективного резонатора с дифракционным выводом энергии. Гиротроны намного более компактны, чем ЛСЭ, и для их работы требуются относительно невысокие ускоряющие напряжения — как правило, несколько десятков киловольт.

Состояние исследований по ТГц-гиротронам достаточно подробно представлено в ряде публикаций (см, например, [3, 10–12]), и данная статья ставит целью свести воедино данные по разработке источников излучения и привести наиболее яркие примеры использования гиротронов для задач спектроскопии и диагностики различных сред. Статья структурирована следующим образом: в разделе 2 описаны основные особенности, присущие гиротронам ТГц-диапазона, в разделе 3 приведены наиболее яркие примеры современных непрерывных и импульсных гиротронов в указанном частотном диапазоне; раздел 4 посвящён актуальным приложениям; в заключении сформулированы ближайшие перспективы развития высокочастотных гиротронов.

2. Особенности гиротронов в терагерцевом диапазоне частот

Механизм излучения, на котором основаны МЦР, описан во многих работах (см., например, [13–15]). Общая схема гиротрона приведена на рис. 1. Основными подсистемами прибора являются: электронно-оптическая система, формирующая винтовой электронный пучок с высокой долей вращательной энергии и малым разбросом скоростей; электродинамическая система, в которой происходит взаимодействие пучка с одной из собственных мод; коллектор электронного пучка; система вывода, включающая в себя согласованное выходное окно, и во многих случаях квазиоптический преобразователь рабочей моды в узконаправленный волновой пучок [16]. Важным элементом является магнитная система (обычно в субтерагерцевом и терагерцевом диапазоне используются криомагниты или импульсные магниты), создающая аксиально-симметричное магнитное поле, требуемое для формирования электронного потока и резонансного взаимодействия электронов с высокочастотным полем.

В гиротроне энергия вращения электронов в сильном магнитном поле переходит в высокочастотное (ВЧ) излучение, частота этого излучения в условиях циклотронного резонанса $\omega \approx n\omega_H + h\nu_{\parallel}$ (ω_H — циклотронная частота, или гирочастота, пропорциональная индукции магнитного поля, ν_{\parallel} — дрейфовая скорость электронов,

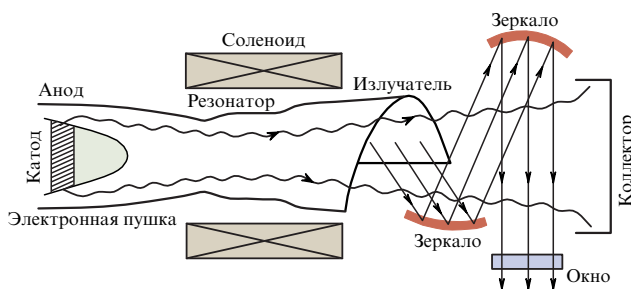


Рис. 1. Общая схема гиротрона со встроенным квазиоптическим преобразователем и радиальным выводом мощности.

n — номер циклотронной гармоники, h — продольное волновое число). Взаимодействие электронного пучка с одной из собственных мод круглого волновода $TE_{m,p}$ происходит около частоты отсечки ($h \approx 0$). Поскольку взаимодействие электронного пучка происходит с быстрой волной, распространяющейся практически поперёк поступательного движения электронов, отсутствует необходимость в мелкомасштабных элементах замедляющих систем, принципиально необходимых для классических приборов вакуумной электроники, и обеспечивается слабая чувствительность к скоростному разбросу электронов.

Отметим, что с повышением рабочей частоты практически все величины, определяющие мощность и эффективность гиротрона [13, 15], в той или иной мере снижаются и требуются серьёзные усилия для поддержания характеристик гиротрона на приемлемом уровне. В результате многолетних исследований, конструкторских и технологических разработок в гиротронах были реализованы высокие уровни коэффициента полезного действия (к.п.д.) (до 70 % в системах с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов [16–18]) и мощности (2 МВт на частоте 0,17 ТГц [19, 20], 200 кВт на частоте 0,67 ТГц [2, 21], 5 кВт на частоте 1 ТГц [22]). На рисунке 2, подготовленном на основании материалов, представленных в работе [23], показаны достигнутые уровни мощности различных электронных приборов.

Продвижение гиротронов в субмиллиметровый и терагерцевый диапазоны связано с успехами в создании достаточно сильных магнитных полей, а также с развитием методов селекции рабочего типа колебаний в режимах циклотронного резонанса на высоких гармониках. Достижение относительно высоких мощности и эффективности в этом диапазоне сопряжено с дополнительными трудностями как принципиального, так и технического характера. Первые обусловлены снижением предельного тока электронного пучка, формируемого МИП, и увеличением омических потерь в стенках резонатора. Вторые — возможностями приближения реального прибора к его расчётной модели в связи с повышенными требованиями к точности изготовления, взаимного расположения и юстировки в магнитном поле элементов электронно-оптической и электродинамической систем, чистоте обработки поверхности резонатора, эффективности системы охлаждения и т.д.

Решение указанных технологических проблем может быть достигнуто несколькими путями. Во-первых, желательно работать на модах высокого порядка, что позволяет увеличить поперечный размер резонатора. Неизбежной расплатой за увеличение поперечного сечения рабочей и паразитных мод вследствие сгущения спектра собственных частот, нередко требующего разработки специальных методов электронной или электродинамической селекции. Не рассматривая эти методы подробно в данном обзоре, заметим лишь, что электронная селекция осуществляется подбором радиуса электронного пучка (или нескольких электронных пучков), обеспечивающего наибольший импеданс связи электронов с полем рабочей моды при относительно слабой связи с паразитными модами. В настоящее время наиболее эффективно это удаётся реализовать в так называемых гиротронах с большой орбитой, использующих приосевые электронные пучки, эффективно взаимодействующую

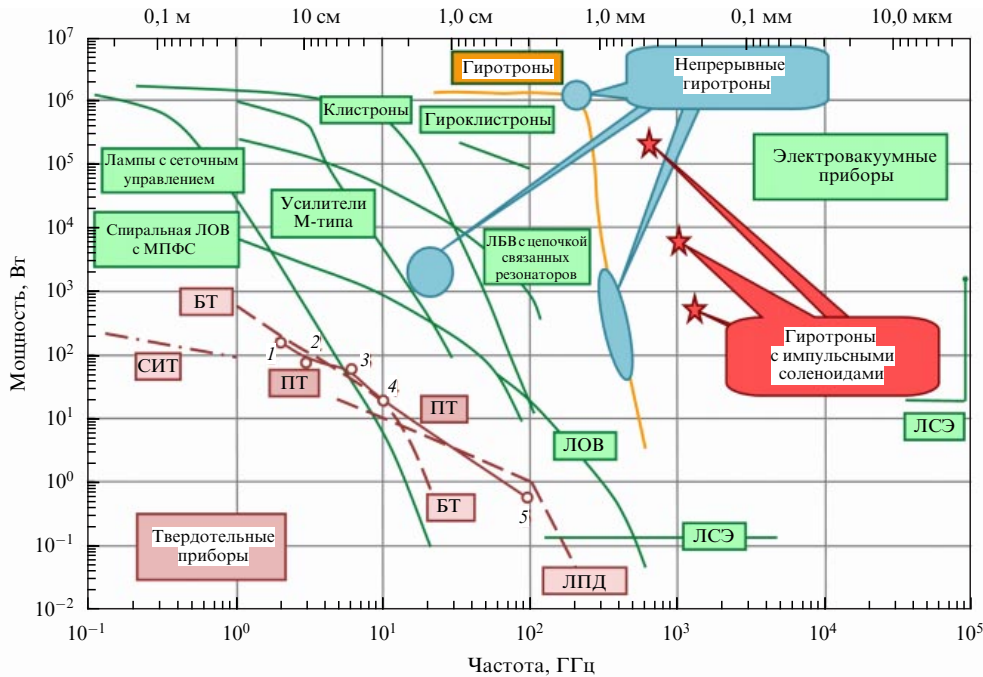


Рис. 2. Достигнутые уровни мощности электронных приборов (по материалам [23]). ЛПД — устройства на лавиннопролётных диодах, БТ — устройства на биполярных транзисторах, ПТ — устройства на полевых транзисторах, СИТ — устройства на статических индукционных транзисторах, МПФС — магнитная периодическая фокусирующая система; 1 — устройства на полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ) на основе GaAs (производитель Fujitsu, Япония), 2 — устройства на ПТШ на основе SiC (производитель Cree, США), 3 — устройства на ПТШ на основе GaAs (производитель Toshiba, Япония), 4 — устройства на псевдоморфных транзисторах с высокой подвижностью электронов (пТВПЭ) на основе GaAs (производитель Raytheon, США), 5 — устройства на пТВПЭ (производитель TRW, США).

щие только с модами, у которых азимутальный индекс равен номеру циклотронной гармоники [24]. Электродинамическая селекция, как правило, предусматривает использование резонаторов сложного профиля, например ступенчатого, в которых селекция осуществляется благодаря эффективной связи двух различных типов собственных колебаний в соседних секциях [25].

Рабочие поля в 35 Тл и более, необходимые для генерации частоты 1 ТГц и выше в условиях основного циклотронного ($n = 1$) резонанса могут быть достаточно просто реализованы в импульсных соленоидах. Опыт экспериментов с гиротронами, работающими в импульсных магнитных полях, показал, что при разработке гиротронов с импульсными соленоидами должен учитываться целый ряд специфических требований, связанных с обеспечением достаточно высокой механической прочности конструкции, повторяемостью амплитуды магнитного поля от импульса к импульсу, при этом проводимость резонатора должна быть, с одной стороны, достаточно низкой, чтобы уменьшить скин-эффект переменного магнитного поля (по этой же причине резонатор, разумеется, должен быть тонкостенным), а с другой стороны, во избежание падения к.п.д. гиротрона достаточно высокой, чтобы омическая добротность резонатора существенно превосходила его дифракционную добротность.

В течение длительного времени практически единственными типами магнитных систем для гироприборов являлись криомагниты на основе катушек из ниобий-титанового кабеля (реже с добавлениями ниобий-оловянного кабеля), погружённых в жидкий гелий для обеспечения требуемой рабочей температуры. К недостаткам указанных систем следует отнести необходи-

мость затратной по времени и стоимости процедуры регулярного подлива в криостат дорогостоящего жидкого гелия. В настоящее время всё более широкое распространение получают криомагнитные системы со встроенным охладителем на замкнутом цикле, не требующие использования криогенных жидкостей, — "сухие" криомагниты. Такие магнитные системы промышленно изготавливаются многими зарубежными фирмами, например JASTEC (Japan Superconducting Technology) (Япония), Sumitomo (Япония), Cryomagetics (США), Oxford Instruments (Англия) и др. Для "сухих" криомагнитов с максимальным реализованным полем 13–15 Тл диаметр проходного отверстия не превышает 110 мм [26], что ограничивает частоту на уровне 350–420 ГГц при работе гиротрона на первой гармонике ($n = 1$) и мощность, по оценкам, на уровне около 300 кВт. Следует отметить появление в 2015 г. отечественного варианта сухого криомагнита с полем до 10 Тл и проходным отверстием 80 мм. Этот магнит, разработанный и изготовленный криомагнитным отделом Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) совместно с компанией "РТИ, Криомагнитные системы", соответствует современному мировому уровню, что позволяет надеяться на успешное развитие этого научно-технического направления в России в ближайшем будущем.

Поля в диапазоне 35–40 Тл в настоящее время реализованы в "гибридных" магнитных системах, состоящих из соленоида с водяным охлаждением и криомагнита. Такие магниты реализованы, например, в лабораториях сильных магнитных полей Европы (Гренобль) и США (Талахасси), но эти системы имеют относительно небольшой (порядка 50 мм) диаметр проходного отверстия, большие размеры (длина магнита

около 3 м) и колоссальное энергопотребление — 20 МВт [27]. Ввиду перечисленных причин такие системы не могут рассматриваться в качестве перспективных для разработки гироприборов.

Определённый оптимизм существует в отношении использования импульсных соленоидов для тех задач, в которых допустим импульсный режим генерации. В конце первого десятилетия XXI в. практически одновременно лабораториями в Дрездене и Лос-Аламосе были достигнуты рекордно высокие значения импульсного магнитного поля — 97 Тл [28]. Относительно компактные соленоиды с азотным охлаждением, позволяющие достигать полей до 50 Тл в объёме, достаточном для размещения электродинамической системы высокочастотных гиротронов при частоте следования импульсов 1 раз в несколько минут, созданы в Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН) [29].

В течение длительного времени основными задачами, стоявшими перед разработчиками и исследователями гиротронов, были повышение частоты, к.п.д., мощности и длительности импульса излучения. С развитием новых приложений к вышеперечисленным задачам добавились следующие: достижение высокой стабильности частоты и мощности, расширение полосы плавной перестройки частоты, увеличение срока службы прибора, обеспечение простоты и удобства работы персонала при использовании гиротронных комплексов.

Ниже приводятся краткий обзор современных работ по созданию терагерцевых гиротронов и наиболее яркие примеры прикладных исследований, выполненных с использованием мощных источников терагерцевого излучения.

3. Примеры реализации терагерцевых гиротронов

Оптимизация высокочастотных гиротронов заключается в основном в выборе таких параметров электродинамической системы и электронного пучка, при которых достигается высокий к.п.д. и осуществляется селекция паразитных мод, особенно в гиротронах, работающих на гармониках гирочастоты.

Наиболее регулярно в настоящее время такие работы ведутся в следующих организациях: исследовательском центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU) (Фукуи, Япония) [30, 31], Массачусетском технологическом институте (MIT) (США) [32, 33], Университете Мэриленда (UMD) (США) [34], научно-исследовательской компании CCR (Calabasas Creek Research, Inc.) (США) [35], Терагерцевом научном центре (THz RC) (Ченду, Китай) [36], Федеральной политехнической школе Лозанны (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne — EPFL) [37]. Созданы коммерческие фирмы (например, Bridge12 [38], подразделение компании Bruker Biospin (совместно с фирмой CPI (Communications & Power Industries) [39])), основной деятельностью которых является создание гиротронов и гиротронных комплексов для спектроскопии высокого разрешения.

В MIT создан целый ряд относительно маломощных (несколько десятков ватт) субтерагерцевых гиротронов, в том числе на гармониках гирочастоты. В гиротроне с частотой генерации 0,46 ТГц удалось получить сравнительно плавную перестройку частоты в полосе шириной 1 ГГц [40]. Продемонстрирована возможность стабиль-

ной работы в течение 21 дня [41], а также генерация при низких рабочих напряжениях (вплоть до 3,5 кВ) на частоте 0,233 ТГц [42].

Фирмой CPI совместно с компанией Bruker Biospin (США) ведутся уже мелкосерийные разработки субтерагерцевых гиротронов. На базе гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц впервые был реализован коммерчески доступный вариант ЯМР-спектрометра высокого разрешения с динамической поляризацией ядер (ДПЯ) (Dynamic nuclear polarization, DNP) [39]. Затем аналогичные спектрометры были разработаны с ДПЯ-системами на 395 и 527 ГГц. Для этих спектрометров компанией Bruker-CPI разработаны и серийно выпускаются гиротроны мощностью около 50 Вт с частотами 263 ГГц, 395 ГГц и 527 ГГц для ЯМР/ДПЯ-систем фирмы Bruker с частотами 400, 600 и 800 МГц соответственно.

В центре разработки приборов дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU) создан ряд непрерывных гиротронов с осевым выводом мощности, в том числе гиротрон, работающий на частоте 0,89 ТГц в условиях синхронизма с третьей гармоникой циклотронной частоты, и гиротроны на первой и второй гармониках в диапазоне 0,2–0,4 ТГц со встроенным квазиоптическим преобразователем [43]. Эти впечатляющие результаты получены во многом благодаря применению уникальных криомагнитов с величинами индукции магнитного поля до 20 Тл.

В Центре исследований физики плазмы при EPFL недавно был реализован непрерывный гиротрон с частотой 0,26 ТГц на первой гармонике гирочастоты с "сухим" криомагнитом, максимальная мощность которого составила 200 Вт. Результаты экспериментальных исследований этого гиротрона были сопоставлены с расчётными данными, в том числе для сложных нестационарных режимов генерации [38], и между ними было обнаружено хорошее соответствие.

Говоря о гиротронах, создаваемых в ИПФ РАН, следует отметить, что первые эксперименты по генерации субмиллиметрового излучения были проведены сотрудниками института в 1970–1980-х годах [44, 45]. Все эти гиротроны строились по простейшей схеме с выводом излучения на рабочем типе колебаний. После первых успехов интенсивность работ по данному направлению снизилась, поскольку на первый план выдвинулась задача создания мегаваттных гиротронов для электронно-циклотронного нагрева плазмы и управления током в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). В начале 2000-х годов работы по освоению гиротронами ТГц-диапазона получили новый импульс, инициированный ростом числа перспективных приложений, в частности в спектроскопии высокого разрешения. В 2009 г. в ИПФ РАН совместно с Научно-производственным предприятием (НПП) "Гиком", был разработан гиротрон для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии на второй гармонике гирочастоты с частотой генерации 0,258 ТГц и мощностью до 200 Вт при стабильности частоты и мощности генерации за 12 ч работы не хуже 3×10^{-6} и 10^{-2} соответственно [46]. Эксперименты с использованием этого генератора в Институте биофизической химии Университета им. И.В. Гёте (Франкфурт-на-Майне, Германия) позволили в 80 раз повысить чувствительность и разрешающую способность ЯМР-спектрометра [47]. К недостаткам указанного комплекса следует отнести наличие заливного криомагнита, требующего подливки жидкого гелия раз в несколько дней, недостаточно

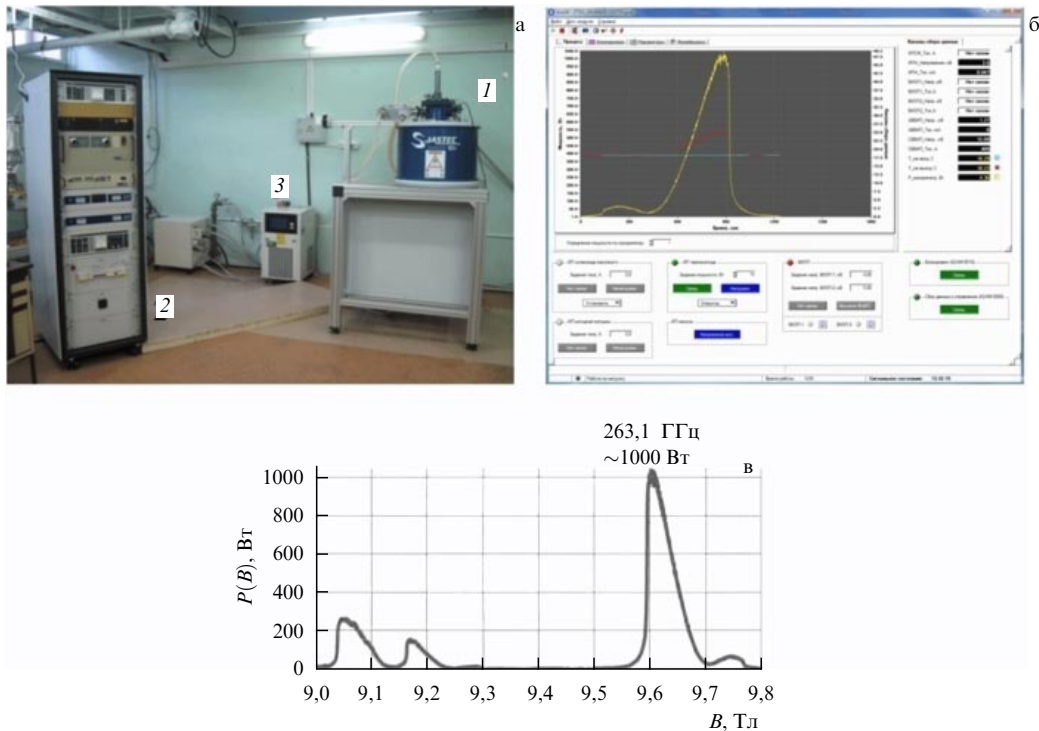


Рис. 3. (а) Фотография автоматизированного комплекса для спектроскопии на базе $0,26 \text{ ТГц}/1 \text{ кВт}/\text{CW}$ -гиротрона ($n = 1$) (ИПФ РАН – НПП "Гиком"): 1 — гиروتрон в "сухом" криомагните, 2 — стойка с источниками питания, системой управления, сбора данных и защитных блокировок, 3 — компрессор-холодильник для стабилизации температуры жидкости в контуре охлаждения резонатора. (б) Диалоговое окно программного обеспечения управления комплексом. (в) Зависимость выходной мощности от магнитного поля.

высокую эффективность квазиоптического внешнего преобразователя и отсутствие автоматизированной системы управления, что снижало его потребительскую привлекательность.

С целью устранения отмеченных недостатков и дальнейшего усовершенствования подобного рода систем был разработан новый гиروتронный комплекс, ориентированный на "сухой" (не требующий заливки жидким гелием) криомагнит JMTD 10T100 японской фирмы JASTEC с максимальным уровнем индукции поля 10 Тл и диаметром проходного отверстия 100 мм [48–50]. Были проведены оптимизация узлов, проектирование, и в результате был изготовлен гиروتрон с частотой $0,263 \text{ ТГц}$, работающий на первой гармонике гирочастоты, для автоматизированного комплекса. На рисунке 3 приведены общий вид этого комплекса, интерфейс системы управления и график зависимости выходной мощности от величины магнитного поля. Выходная мощность на рабочей моде TE_{53} , преобразованной внутри лампы в гауссов пучок, достигала уровня 1 кВт (при к.п.д. = 17%), что более чем достаточно для всех планируемых приложений этого комплекса. Содержание гауссовой компоненты в выходном излучении гиротрона составило 93% [50]. Частота генерации может в небольших пределах перестраиваться изменением магнитного поля, ускоряющего напряжения и температуры резонатора, что было успешно использовано для применения комплекса к задачам спектроскопии [51].

Российскими и американскими разработчиками независимо была предложена оригинальная идея по радикальному упрощению гиروتронного комплекса [52, 53]. Суть её состоит в использовании магнитной системы ЯМР-спектрометра одновременно в качестве магнита

для гиротрона. Эта разновидность гиротрона названа "гиротрино". При таком конструктивном решении весь комплекс становится очень компактным, упрощается линия передачи излучения и уменьшаются соответствующие потери. Разумеется, оптимизация таких совмещённых систем сложнее, чем отдельных, поскольку существенно ограничивается число степеней свободы. Эти системы находятся только в самом начале своего развития, и проблемы, с которыми встретятся их разработчики, ещё не до конца выяснены.

Первые успешные эксперименты с гиротронами на базе импульсных соленоидов в 1980-х годах были выполнены в ИПФ РАН под руководством Г.С. Нусиновича, А.Г. Лучинина и М.М. Офицера [54]. На основном циклотронном резонансе в этих экспериментах были достигнуты частоты до $0,65 \text{ ТГц}$ при мощности генерации до 40 кВт и эффективности в несколько процентов. В 2006–2007 гг., во многом благодаря сотрудничеству между ИПФ РАН и FIR FU, гиротронами был преодолен рубеж в 1 ТГц [55]. В японском варианте соленоида использовалась оригинальная система охлаждения жидким азотом, в которой дополнительная прочность конструкции обеспечивалась замораживанием влажного порошка, заполняющего корпус соленоида. Сам соленоид реализовывался по классической схеме с проходным отверстием, что в итоге привело к значительному энергопотреблению (300 кДж) и крайне низкой частоте следования импульсов — один импульс в 20 мин . Тем не менее в этих экспериментах на частоте 1 ТГц , соответствующей второй гармонике гирочастоты ($n = 2$), была продемонстрирована мощность в несколько десятков ватт при длительности импульса излучения до 1 мс . Практически одновременно в ИПФ РАН на базе им-

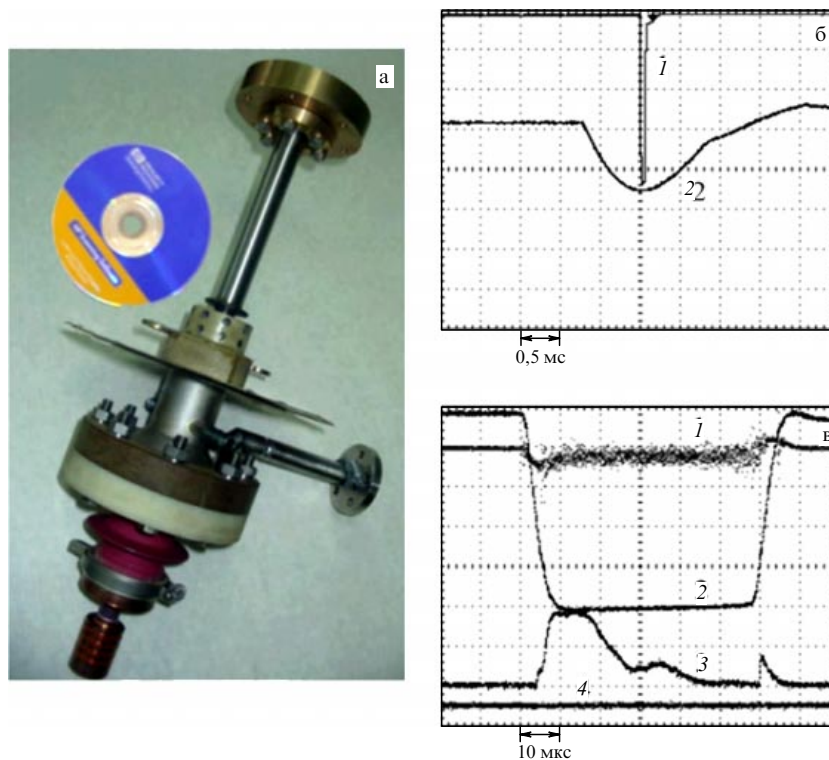


Рис. 4. (а) Терагерцевый гиротрон с импульсным соленоидом. (б) Сигнал на экране осциллографа: 1 — напряжение на катоде гиротрона, 2 — ток соленоида (магнитное поле). (в) Аналогичные зависимости в увеличенном в два раза масштабе: 1 и 2 — ток и напряжение электронного пучка соответственно, 3 — сверхвысокочастотная (СВЧ) мощность (сигнал с детектора); 4 — ток соленоида (магнитное поле).

пульсного магнита был создан гиротрон (рис. 4), обладающий рядом конструктивных особенностей, а именно:

- с целью достижения максимальной энергетической эффективности (уменьшения объема магнитного поля) токопроводящая жила соленоида наматывалась непосредственно на корпус гиротрона;

- для повышения механической прочности конструкции намотка осуществлялась композитным кабелем. Центральная жила из сплава Nb–60% Ti механически армирует наружную медную оболочку кабеля;

- для уменьшения омических потерь, увеличения механической прочности и термостабилизации в качестве пассивного хладагента применяется жидкий азот. Использование жидкого азота позволило снизить омическое сопротивление соленоида в семь раз по сравнению со значением, измеренным при комнатной температуре;

- геометрические размеры соленоида, имеющего прямоугольное сечение, подбирались таким образом, чтобы реализовать оптимальное продольное распределение магнитного поля, рассчитанное численными методами.

Соленоид запитывался от специально разработанного источника питания, накопителем энергии в котором являлась батарея конденсаторов с энергией до 5,6 кДж (максимальное напряжение до 3,5 кВ, максимальный ток до 6 кА). Схема стабилизации обеспечивала повторяемость амплитуды магнитного поля с точностью 99,95%, что позволяло поддерживать работу гиротрона в режиме разовых импульсов в оптимальных по к.п.д. условиях на протяжении многих импульсов. В процессе испытаний соленоид выдержал несколько тысяч импульсов, что никак не отразилось на его характери-

стиках. Частота импульсов излучения ограничивалась временем, необходимым для охлаждения соленоида до температуры жидкого азота и составляла один "выстрел" в минуту. Терагерцевое излучение регистрировалось с помощью точечно-контактного диода и калориметрической нагрузки, имеющей чувствительность около 10 мДж в одном импульсе. При изменении магнитного поля (тока соленоида) наблюдалось возбуждение последовательности мод с частотами, близкими к 1 ТГц, и уровнем мощности до 5 кВт. Для магнитного поля 38,5 Тл и электронного пучка с параметрами 24 кВ и 3 А возбуждалась мода $TE_{17,4}$ на частоте 1,022 ТГц с энергией излучения 100 мДж при длительности импульса 20 мкс (рис. 4в) [56]. Относительно низкая эффективность генерации (2–3%) обусловлена в основном большой длиной резонатора, которая была выбрана в два раза большей, чем оптимальная, для надёжного возбуждения рабочей моды. Для измерения частоты в одиночных импульсах использовалась гетеродинная схема со смешиванием сигналов от гиротрона и гармоники опорного микроволнового синтезатора. Измеренная частота (1,022 ТГц) близка к частоте циклотронного резонанса (1,024 ТГц), рассчитанной по величине магнитного поля. В дальнейшем при повышении тока соленоида в этом же приборе удалось достичь рекордно высокого на сегодня значения частоты генерации гиротрона 1,3 ТГц при мощности 1,5 кВт [22].

Продолжением работ с импульсным соленоидом явилось создание мощного гиротрона (рис. 5), предназначенного для инициации точечного газового разряда. Реализованный на известной и хорошо себя зарекомендовавшей в экспериментах с гиротронами для УТС-приложений рабочей моде $TE_{31,8}$ гиротрон позволил

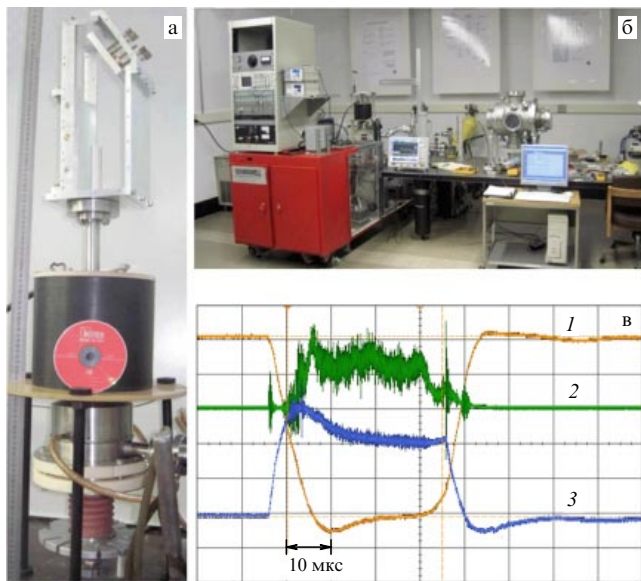


Рис. 5. (а) Мощный гиротрон с импульсным соленоидом и квазиоптическим преобразователем. (б) Экспериментальный стенд [21]. (в) Визуализация сигналов на экране осциллографа: 1 — ускоряющее напряжение, 2 — ток электронного пучка, 3 — СВЧ-мощность (сигнал с детектора).

получить мощность до 200 кВт в разовом импульсе длительностью 20–30 мкс на частоте 0,7 ТГц [21, 57].

Вопрос о возможности повышения частоты следования импульсов в подобных системах остаётся открытым. Теоретический анализ, представленный в работе [58], показывает принципиальную возможность достижения частоты следования импульсов до 2 Гц при полях около 40 Тл, для чего предлагается конструкция с улучшенным теплоотводом от соленоида благодаря пространственно развитым рёбрам и намотке соленоида фольгированным проводником. К сожалению, первые эксперименты по реализации этой конструкции завершились разрушением соленоида при полях, составлявших примерно половину от номинального значения. Тем не менее продолжаются работы по созданию соленоидов с прокачкой хладагента между обмотками, что в перспективе должно обеспечить повышение частоты следования импульсов.

Отметим интересную особенность гиротронов с импульсными соленоидными, представляющую несомненный практический интерес. При изменении магнитного поля происходит возбуждение последовательности близких по собственным числам мод в достаточно широкой (10–15%) полосе частот. За счёт этого можно достаточно просто изменять частоту генерации от импульса к импульсу, изменяя напряжение накопителя энергии либо время задержки высоковольтного импульса на катоде гиротрона относительно импульса тока соленоида (и, соответственно, ток соленоида в момент подачи импульса высокого напряжения). Кроме того, можно подавать высоковольтный импульс не на вершине, а на фронте импульса тока соленоида, получая в результате генерацию серии коротких импульсов с различными частотами.

Работа на высоких гармониках циклотронной частоты в канонических гиротронах практически невозможна по причине конкуренции этих гармоник с низшими гармониками, если не применять эффективных методов модовой селекции. Электродинамические ме-

тоды селекции, основанные на использовании резонаторов сложного профиля, в частности связанных резонаторов с трансформацией мод [59, 60], в которых селекция основана на возбуждении связки мод на одной частоте, с одинаковым азимутальным и близкими радиальными индексами, представляются трудно реализуемыми ввиду требования микрометровой точности при изготовлении цилиндрических резонаторов радиусом 1,5–2,0 мм и длиной в несколько (в отдельных случаях до десяти) миллиметров. Ещё одним обсуждаемым методом является использование секционированных электронных потоков в одном гироприборе (многолучевые гиротроны) [61, 62]. При этом дополнительный электронный пучок может использоваться для того, чтобы способствовать более эффективному возбуждению рабочей моды, — активный дополнительный пучок (тогда доля вращательной энергии электронов в этом пучке будет достаточно велика — примерно 0,6–0,7 от полной энергии), либо для того, чтобы поглощать энергию паразитных колебаний (в этом случае на входе в пространство взаимодействия доля вращательной энергии будет мала). В настоящий момент ведётся разработка гиротрона с двумя генерирующими пучками, рассчитанного на генерацию мощности около 100 Вт на частоте 0,79 ТГц при возбуждении рабочего типа колебаний $TE_{8,5}$ на второй гармонике гирочастоты [63].

Группой под руководством В.Л. Братмана в гиротроне с большой орбитой (ГБО) в ИПФ РАН была получена генерация в ТГц-диапазоне частот на второй и третьей гармониках гирочастоты. При магнитных полях около 15 Тл и напряжении электронного пучка 80 кВ на второй гармонике получена генерация на частоте 0,6 ТГц при мощности до 2 кВт, а на третьей — на частоте 1 ТГц при мощности 0,3 кВт и длительности импульса 10 мкс [64]. В этих экспериментах использовался биттеровский магнит с эффективным водяным охлаждением, что позволило довести частоту следования импульсов до 0,1 Гц.

Успешная реализация гиротрона с большой орбитой на базе импульсного соленоида и относительно низкое значение магнитного поля послужили основой для старта проекта по созданию ГБО в криомагните, что позволяет в перспективе перейти к непрерывному режиму генерации. Основной проблемой на пути широкого распространения ГБО была и остаётся сложность реализации электронно-оптических систем (ЭОС), формирующих приосевые электронные пучки. Как правило, такие ЭОС требуют магнитной системы с реверсом магнитного поля, что обуславливает необходимость разработки специфических соленоидов, с одной стороны, и требует высокой точности продольной юстировки гиротрона в магнитном поле, с другой.

Тем не менее имеются все основания для оптимизма, поскольку известен ряд успешных реализаций подобных систем, из которых, кроме уже упомянутого ГБО терагерцевого диапазона, хотелось бы выделить ГБО в постоянном магните, продемонстрировавший возможность селективного возбуждения серии мод вплоть до 5-й гармоники включительно [65]. На 5-й циклотронной гармонике получена частота 0,15 ТГц и, хотя эксперимент проводился в импульсном режиме, конструкция гиротрона (при наличии соответствующих источников питания) в принципе позволяла реализовать непрерывный режим работы.

4. Некоторые приложения терагерцевых гиротронов

Оставляя за рамками хорошо известные "классические" области применения гиротронов, такие как нагрев плазмы и управление током в установках УТС и использование гиротронов в микроволновых технологиях (в частности, для синтеза керамических материалов или выращивания алмазных плёнок и дисков методом химического осаждения из газовой фазы), попробуем дать краткий обзор новых приложений, возникших благодаря появлению гиротронов ТГц-диапазона и в свою очередь послуживших стимулом для развития таких гиротронов.

Наиболее интенсивно сейчас развиваются спектроскопические приложения, особенно ЯМР/ДПЯ-спектроскопия высокого разрешения (см., например, обзор [66]). Наличие достаточно интенсивного микроволнового излучения позволяет на один-два порядка увеличить отношение сигнала к шуму и, соответственно, существенно снизить время, необходимое для накопления информации (в докладе Р. Гриффина [67] дана впечатляющая оценка — от более чем четырёх лет до одного дня). В настоящее время существует стандартный набор опорных спектроскопических частот, кратный частотам, используемым для ЯМР (200 МГц, 400 МГц, ..., 1200 МГц), соответствующих им магнитных полей (от 9,4 Тл до 23,5 Тл) и требуемых частот излучения (от 0,26 ТГц до 0,79 ТГц). Указанное обстоятельство и обуславливает выбор частот разработчиками непрерывных гиротронов ТГц-диапазона.

Следующим интересным приложением является использование ТГц-излучения для медико-биологических задач. В ряде публикаций (см., например, [68]) описано различие поглощающей способности здоровых и больных (раковых) клеток (обусловленное, скорее всего, разницей в содержании ими жидкости), достигающее 3–5 раз в диапазоне частот 0,3–0,5 ТГц. Тем самым демонстрируется возможность селективного воздействия на раковые клетки. Даже если подвергать сомнению возможность такого селективного воздействия, то остаётся возможность локального (благодаря малости длины волны излучения и итоговой апертуры засветки) воздействия на поражённые области. Примеры такой локальной терагерцевой терапии приведены, например, в работе [69]. Размер раковой опухоли у крыс под воздействием излучения гиротрона с частотой 0,2 ТГц неуклонно уменьшался, вплоть до исчезновения, тогда как в контрольной группе за три недели размер опухоли увеличивался на порядок.

Ещё одна задача — локализованное воздействие на биологические ткани, расположенные относительно неглубоко под кожей человека (на расстояниях, сопоставимых с глубиной проникновения поля). В частности, в работе [69] описано воздействие излучения с частотами 0,2–0,4 ТГц, стимулирующее регенерацию волосяного покрова человека. Естественно, подобные методы требуют тщательных проверок, но представляются, безусловно, интересными.

Наконец, говоря о длинноимпульсных, или непрерывных, гиротронах, необходимо упомянуть "терапидение" — получение контрастных изображений в ТГц-излучении, ориентированных на обнаружение различного рода веществ и разработку систем досмотра, визуализации

скрытых для обычных методов объектов и примесей [70, 71]. За редким исключением все указанные приложения требуют относительно невысоких уровней мощности — порядка нескольких десятков или, как максимум, нескольких сотен ватт.

Существенно более высокие мощности необходимы для диагностики плотной плазмы или инициации локализованных газовых разрядов. Исходя из оценок отношения сигнала к шуму и достижимых на сегодня мощностей излучения гиротронов можно предположить, что, например, для диагностики плазмы в стеллараторе LHD (Large Helical Device) (Япония) в интересующем плазменном диапазоне интервале температур электронов наилучшие результаты могут быть получены при использовании мощных гиротронов с частотами 0,6–0,7 ТГц, которые сегодня реализованы на базе импульсных магнитов. К сожалению, приходится констатировать, что импульсные магниты пока не обеспечивают достаточной для задач спектроскопии и диагностики стабильности частоты излучения, в связи с этим ведётся разработка гиротронов относительно низкого (несколько сотен киловатт) уровня мощности на частотах около 0,3 ТГц в криомагнитах [72, 73].

Мощное импульсное ТГц-излучение позволяет создавать высокие напряжённости электрического поля в локализованных объёмах, что может быть использовано для инициации точечного газового разряда. При естественном ионизационном фоне вероятность нахождения свободного электрона в таком объёме достаточно мала и возникновение разряда маловероятно. Тем самым развитие разряда при серии импульсов служит индикатором превышения естественного ионизационного фона, и оно может быть использовано для выявления скрытых радиоактивных источников с расстояния в несколько десятков метров. Подобный подход был предложен Г.С. Нусиновичем и В. Гранатштейном [74] и исследован в совместном проекте ИПФ РАН и Университета Мэриленда [75] с использованием мощного импульсного гиротрона на частоте 0,67 ТГц [21].

Этот же гиротрон, генерирующий излучение мощностью до 100 кВт, успешно использовался в ИПФ РАН для инициации точечного разряда в неоднородной газовой струе в широком диапазоне давлений, что позволило впервые реализовать интенсивный точечный источник излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. При размере излучающей области менее 1 мм мощность излучения в диапазоне длин волн 10–100 нм в полный телесный угол составляет до 10 кВт [76]. Подобный разряд в перспективе может быть использован для создания точечного источника экстремального УФ-излучения в задачах нанолитографии.

Среди спектроскопических приложений гиротронов нельзя не упомянуть имеющее большое фундаментальное значение экспериментальное исследование спектра самого лёгкого в природе атома — позитрония (см. [77, 78]). Для решения этой задачи в FIR FU (Япония) был создан гиротрон, в котором предусмотрена возможность использования нескольких резонаторов с немного различающимися размерами. При этом благодаря набору резонаторов, а также возможности изменения магнитного поля удалось практически непрерывно перекрыть диапазон частот 201–205 ГГц [77]. Кроме того, при изменении рабочей моды тот же гиротрон мог работать на частоте около 180,6 ГГц [78]. Мощное когерентное

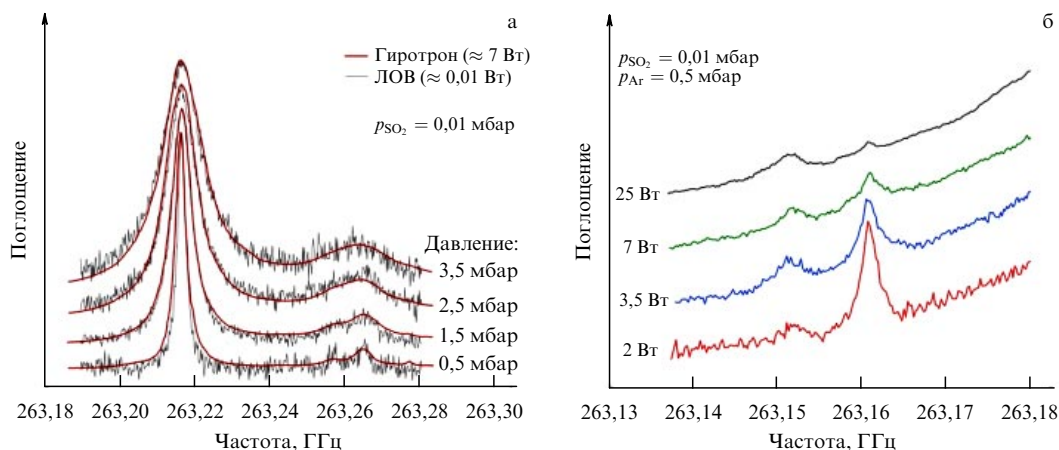


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Примеры экспериментальных спектров смеси SO_2 и аргона, полученных с помощью РАД-спектрометра с гиротроном при комнатной температуре: (а) для различных давлений газа, указанных на рисунке, в ячейке при постоянном уровне мощности излучения; (б) при постоянном давлении для различных уровней мощности излучения, указанных на рисунке. Парциальное давление p_{SO_2} в смеси 0,01 мбар. Для наглядности каждый спектр сдвинут по вертикали относительно предыдущего на постоянную величину. На рисунке а серыми ломаными линиями показаны спектры, полученные с помощью излучения ЛОВ мощностью порядка 0,01 Вт, красными плавными кривыми показаны спектры, полученные с помощью излучения гиротрона мощностью порядка 7 Вт. Постоянная времени синхронного детектирования 1 с.

излучение должно стимулировать магнитодипольный переход, который соответствует изменению взаимной ориентации спинов электрона и позитрона и фактически является переходом из орто-состояния позитрония (суммарный спин 1) в пара-состояние (суммарный спин 0). Вероятность такого перехода очень мала. Ввиду малости времени жизни позитрония (орто-состояние может существовать в вакууме около 140 нс) для наблюдения такого перехода требуется мощное (более 20 кВт) резонансное с частотой перехода излучение, что в настоящее время может быть обеспечено только применением гиротрона. В результате измерений на семи частотах в теоретически предсказанной области спектра удалось наблюдать поглощение с отношением сигнала к шуму около 10, соответствующее линии позитрония, и продемонстрировать отсутствие сигнала при значительной отстройке частоты. Положение линии в спектре соответствует величине сверхтонкого расщепления атома позитрония в основном "электронном" состоянии, а её ширина — времени распада парапозитрония. Эти параметры впервые были определены из прямого спектроскопического эксперимента. Данные исследования классической простейшей квантово-механической системы, которой является позитроний, имеют особое значение для проверки предсказаний квантовой электродинамики.

В завершение проведённого выше краткого обзора упомянем ещё одно направление, в котором применение мощного излучения гиротрона представляется перспективным, — это классическая молекулярная газовая спектроскопия высокого разрешения. В этой хорошо развитой к настоящему времени области науки по-прежнему есть много фундаментальных и прикладных задач, решение которых требует повышения чувствительности спектрометров. Однако предел чувствительности, определяемый фундаментальными физическими принципами, уже достигнут для большинства инструментов, использующих классические спектроскопические методы исследований в миллиметровом–субмиллиметровом диапазоне длин волн (анализ просвечивающего газ излучения или регистрация переизлучённого газом элект-

ромагнитного поля). Единственный метод, который в принципе позволяет продвинуться в направлении повышения чувствительности, давно известен как оптоакустическое детектирование поглощения. Излучение, поглощаемое газом, приводит к его разогреву и, как следствие, к возникновению звуковой волны, которая может быть зарегистрирована, например, с помощью микрофона. Выходной сигнал при этом прямо пропорционален поглощённой мощности. Чувствительность метода к поглощению возрастает с увеличением мощности излучения. Этот принцип используется в разработанном, созданном и успешно применяющемся в ИПФ РАН в течение нескольких десятилетий спектрометре с радиоакустическим детектированием (РАД) поглощения [79].

Первая попытка повышения чувствительности РАД-спектрометра при применении гиротрона в качестве источника излучения была предпринята более 40 лет назад [80]. Было продемонстрировано десятикратное возрастание выходного РАД-сигнала при соответствующем увеличении мощности излучения. Однако применявшийся в работе [80] гиротрон не имел плавной перестройки частоты, и полноценная запись спектров была невозможна. Вследствие этого интерпретация полученных результатов не может считаться однозначной из-за возможного присутствия паразитных сигналов, связанных с поглощением излучения не только в самом газе, но и в элементах газовой ячейки. Поэтому работа [80] не имела продолжения вплоть до недавнего времени.

Следующий шаг в этом направлении связан с созданием в ИПФ РАН гиротронного комплекса [50], параметры которого позволили впервые для таких источников излучения получать характерные для молекулярной газовой спектроскопии высокого разрешения непрерывные записи спектров. В первых экспериментах в качестве исследуемого газа применялась смесь оксида серы (SO_2) с непоглощающим "буферным" газом — аргоном. Типичные записи спектра поглощения, полученные с помощью современной версии РАД-спектрометра [81] с гиротронным комплексом [50], представлены на рис. 6 вместе с аналогичными записями, сделанными

с традиционно используемыми в этом спектрометре лампами обратной волны (ЛОВ). Существенное улучшение качества спектров при увеличении мощности излучения от нескольких долей ватта до нескольких ватт позволило наблюдать (рис. 6б) теоретически предсказанные ранее переходы в молекуле SO_2 на частотах 263,151 и 263,161 ГГц. Чувствительность спектрометра по коэффициенту поглощения, соответствующая записям с ЛОВ, составляет примерно $5 \times 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ при постоянной времени синхронного детектирования 1 с. При использовании гиротронного комплекса с мощностью излучения около 7 Вт была достигнута чувствительность $6 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, на основании анализа профиля поглощения известных спектральных линий впервые было продемонстрировано, что повышение мощности излучения примерно на три порядка приводит к пропорциональному увеличению чувствительности РАД-спектрометра. Отметим, что достигнутая чувствительность спектрометра не является пределом. Применение гиротрона не исключает возможности традиционного способа достижения высокой чувствительности РАД-спектрометра за счёт увеличения эффективной длины взаимодействия излучения с газом, применение которого, как показали предшествующие исследования [82, 83], позволяет достигать чувствительности по поглощению $10^{-9} - 10^{-11} \text{ см}^{-1}$ при использовании ЛОВ. Это позволяет надеяться на достижение рекордно высокой чувствительности, порядка 10^{-13} см^{-1} , при одновременном применении обоих методов, что открыло бы колоссальные перспективы использования в области количественного и качественного газоанализа.

Фундаментальным ограничением на пути дальнейшего повышения чувствительности является даже не мощность излучения гиротрона, которую можно было бы ещё увеличить даже в первых экспериментах, а выравнивание заселённости вращательных уровней молекул, между которыми происходит переход (так называемое насыщение спектральных линий и связанный с этим эффект просветления среды). Под действием резонансного поля заселённость уровней может выравниваться быстрее, чем происходит столкновительная релаксация соответствующих состояний. По этой причине молекула SO_2 , обладающая большим дипольным моментом (примерно 1,6 Д), является не самым оптимальным объектом для достижения рекордно высокой чувствительности. Даже при значительном разбавлении SO_2 буферным газом эффект насыщения сказывается достаточно сильно. Проявление эффекта с увеличением мощности излучения хорошо видно, например, на рис. 6б по изменению профиля линии вблизи частоты 263,161 ГГц. Влияние эффекта может быть минимизировано выбором типа перехода (с меньшей величиной матричного элемента дипольного момента) и оптимизацией условий его наблюдения (уширение линий давлением буферного газа).

5. Заключение

Повышение рабочей частоты гиротронов во многом лимитируется возможностями создания магнитных полей в несколько десятков Тл в объёмах, достаточных для размещения электродинамической системы гироприборов в неразрушающихся соленоидах. Отчасти такое

ограничение можно ослабить, перейдя к работе на циклотронных гармониках, однако при этом предъявляются повышенные требования к селективности рабочего типа колебаний. Сложность задачи усугубляется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь. Несмотря на указанные трудности, успешно реализованы терагерцевые гиротроны, значительно превосходящие по мощности другие источники излучения в этом диапазоне. Исходя из тепловых нагрузок на элементы конструкции в гиротронах мегаваттного уровня мощности, работающих на частоте 0,17 ТГц, можно предположить, что близкие тепловые нагрузки (при сохранении существующей сверхразмерности резонаторов, т.е. при использовании похожих рабочих типов колебаний) должны примерно соответствовать уровням мощности порядка 250–1000 кВт на частотах 0,3 ТГц и 10 кВт на частотах порядка 1 ТГц в непрерывном режиме генерации.

Таким образом, возможности совершенствования гироприборов далеко не исчерпаны, и в ближайшем будущем возможны как дальнейшее повышение мощности, так и достижение рабочих частот вплоть до 2 ТГц. Создание таких относительно компактных источников будет способствовать развитию многочисленных приложений, требующих высоких уровней мощности ТГц-излучения.

Работы по созданию гиротронов терагерцевого диапазона в ИПФ РАН с 2014 г. ведутся при поддержке проектами 14-12-00887 и 14-29-00192 Российского научного фонда.

Список литературы

- Blank M, Rosay M, Engelke F J. *Magn. Reson.* **264** 88 (2016)
- Глявин М Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **54** 666 (2011); Glyavin M Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **54** 600 (2011)
- Bratman V L et al. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **33** 715 (2012)
- Lewis R A J. *Phys. D* **47** 374001 (2014)
- Siegel P H *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** 910 (2002)
- Негирев А А, в сб. *Вакуумная СВЧ электроника* (Под ред. М И Петелина) (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2002) с. 93
- Communications & Power Industries (дата обращения: 21.03.2016), <http://www.cpii.com/product.cfm/7/40/2218>
- Винокуров Н А, Кулипанов Г Н, Скиринский А Н *Вестник РАН* **81** 6 520 (2011); Vinokurov N A, Kulipanov G N, Skrinkii A N *Herald Russ. Acad. Sci.* **81** 229 (2011)
- Гапонов А В, Петелин М И, Юлпатов В К *Изв. вузов. Радиофизика* **10** 1414 (1967); Gaponov A V, Petelin M I, Yulpatov V K *Radiophys. Quantum Electron.* **10** 794 (1967)
- Bratman V et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 36 (2009)
- Глявин М Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **52** 557 (2009); Glyavin M Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **52** 500 (2009)
- Manuilov V et al. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **31** 912 (2010)
- Nusinovich G S *Introduction to the Physics of Gyrotrons* (Baltimore: The Johns Hopkins Univ. Press, 2004)
- Kartikyan M V, Borie E, Thumm M K A *Gyrotrons. High Power Microwave and Millimeter Wave Technology* (Berlin: Springer, 2004)
- Tsimring Sh E *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics* (Hoboken, NJ: Wiley-Intersci., 2007)
- Денисов Г Г и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **46** 845 (2003); Denisov G G et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **46** 757 (2003)
- Glyavin M Yu et al. *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **18** 2129 (1997)
- Sakamoto K et al. *Phys. Rev. Lett.* **73** 3532 (1994)
- Tumm M "State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers", KIT Scientific Reports 7662 (Karlsruhe: Karlsruhe Institut für Technologie, 2013)
- Litvak A G et al., in *Proc. of 8th Intern. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications"*, Nizhny Novgorod, Russia, July 9–16, 2011, p. 13
- Glyavin M Yu et al. *Appl. Phys. Lett.* **101** 153503 (2012)
- Glyavin M Yu, Luchinin A G *Int. J. Terahertz Sci. Technol.* **2** 150 (2009)

23. Temkin R, in *Proc. of the 39th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Tucson, AZ, USA, September 14–19, 2014* (Piscataway, NJ: IEEE, 2014) p. 1
24. Братман В Л, Калынов Ю К, Федотов А Е *ЖТФ* **68** (10) 91 (1998); Bratman V L, Kalynov Yu K, Fedotov A E *Tech. Phys.* **43** 1219 (1998)
25. Павельев В Г, Цимринг Ш Е "Открытый резонатор", Авт. свид. № 661664 с приоритетом от 15.08.1977; *Официальный бюл. Комитета по делам изобретений и открытий Совета министров СССР* (17) 234 (1977)
26. JASTEC Japan Superconductor Technology, Inc.: Products, дата обращения: 21.03.2016, http://www.jastec-inc.com/e_products_sruogen/index.html
27. Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses — Grenoble, дата обращения: 20.03.2016, <http://lncmi-g.grenoble.cnrs.fr/spip.php?rubrique105&lang=en>
28. New and Emerging Technology News. 2012, дата обращения: 20.03.2016, <http://www.gizmag.com/100-tesla-pulsed-magnet/21946>
29. Глявин М Ю и др. *ПТЭ* (1) 84 (2011); Glyavin M Yu et al. *Instrum. Exp. Tech.* **54** 77 (2011)
30. Idehara T, Sabchevski S P *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **33** 667 (2012)
31. Idehara T et al. *Thin Solid Films* **517** 1503 (2008)
32. Torrezan A C et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1150 (2010)
33. Jawla S et al., in *Proc. of the 36th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Houston, TX, USA, 2–7 October 2011* (Piscataway, NJ: IEEE, 2011)
34. Dumbrajs O, Nusinovich G S *Phys. Plasmas* **19** 103112 (2012)
35. Read M et al., in *Proc. of the 8th IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf. IVEC'07, Kitakyushu, Japan, May 15–17, 2007* (Piscataway, NJ: IEEE, 2007) p. 347
36. Yan Y et al. *Chin. J. Electron.* **22** (2) 415 (2013)
37. Alberti S et al. *Phys. Plasmas* **19** 123102 (2012)
38. Dynamic Nuclear Polarization. Terahertz Technology. Bridge12. 2016, дата обращения: 21.03.2016, <http://www.bridge12.com/>
39. Blank M et al., in *Proc. of the 15th IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf. IVEC 2014, Monterey, Calif., USA, April 22–24, 2014* (Piscataway, NJ: IEEE, 2014) p. 7
40. Hornstein M K et al. *IEEE Trans. Electron Devices* **52** 798 (2005)
41. Bajaj V S et al. *J. Magn. Reson.* **160** 85 (2003)
42. Hornstein M K et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 27 (2007)
43. Idehara T et al. *Vacuum* **62** 123 (2001)
44. Zaytsev N I et al. *Radio Eng. Electron Phys.* **19** 103 (1974)
45. Глявин М Ю и др., в сб. *Гиротроны* (Отв. ред. В А Флягин) (Горький: ИПФ АН СССР, 1989) с. 73
46. Венедиктов Н П и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **53** 260 (2010); Venediktov N P et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **53** 237 (2010)
47. Denysenkov V et al. *Phys. Chem. Phys.* **20** 5786 (2010)
48. Глявин М Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **58** 709 (2015); Glyavin M Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **58** 639 (2015)
49. Глявин М Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **58** 720 (2015); Glyavin M Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **58** 649 (2015)
50. Glyavin M Yu et al. *Rev. Sci. Instrum.* **86** 054705 (2015)
51. Chirkov A et al., in *Proc. of the 4th Russia–Japan–USA Symp. on Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies, RJUS TeraTech-2015, June 9–12, 2015 IMT RAS, Chernogolovka, Russia* (2015)
52. Братман В Л и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **56** 589 (2013); Bratman V L et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **56** 532 (2014)
53. Grantome: The entirety of funding information, дата обращения: 20.03.2016, <http://grantome.com/grant/NIH/R44-GM108179-03>
54. Flyagin V, Luchinin A, Nusinovich G *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **4** 629 (1983)
55. Idehara T et al. *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **27** 319 (2006)
56. Glyavin M Yu, Luchinin A G, Golubiatnikov G Yu *Phys. Rev. Lett.* **100** 015101 (2008)
57. Глявин М Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **56** 550 (2013); Glyavin M Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **56** 497 (2014)
58. Read M et al., in *Strong Microwaves: Sources and Applications: Proc. of the 7th Intern. Workshop, Nizhny Novgorod, July 27–August 2, 2008*
59. Запелалов В Е и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **27** 1194 (1984); Zapevalov V E et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **27** 846 (1984)
60. Pavelyev V G, Tsimring S E, Zapevalov V E *Int. J. Electron.* **63** 379 (1987)
61. Запелалов В Е, Цимринг Ш Е *Изв. вузов. Радиофизика* **33** 1288 (1990); Zapevalov V E, Tsimring Sh E *Radiophys. Quantum Electron.* **33** 954 (1990)
62. Запелалов В Е, Мануилов В Н, Цимринг Ш Е *Изв. вузов. Радиофизика* **34** 205 (1991); Zapevalov V E, Manuilov V N, Tsimring Sh E *Radiophys. Quantum Electron.* **34** 174 (1991)
63. Manuilov V N et al. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **36** 1164 (2015)
64. Bratman V L, Kalynov Yu K, Manuilov V N *Phys. Rev. Lett.* **102** 245101 (2009)
65. Idehara T et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 903 (2004)
66. Booske J H et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **1** 54 (2011)
67. Griffin R G "High frequency dynamic nuclear polarization", in *Intern. Symp. on Development of Terahertz Gyrotrons and Applications, Univ. of Fukui, FIR-FU, 2013*
68. Wallace W P et al. *Appl. Spectrosc.* **60** 1127 (2006)
69. Miyoshi N et al., in *Proc. of the 34th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Busan, South Korea, 21–25 September 2009*
70. Nusinovich G S et al. *J. Appl. Phys.* **109** 083303 (2011)
71. Han S T et al., in *Proc. of 40th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Hong Kong, China, 23–28 August 2015*
72. Oda Y et al., in *Proc. of 40th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Hong Kong, China, 23–28 August 2015*
73. Saito T et al., in *Proc. of 40th Intern. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Hong Kong, China, 23–28 August 2015*
74. Granatstein V L, Nusinovich G S *J. Appl. Phys.* **108** 063304 (2010)
75. Nusinovich G S et al. *J. Appl. Phys.* **111** 124912 (2012)
76. Glyavin M Yu et al. *Appl. Phys. Lett.* **105** 174101 (2014)
77. Miyazaki A et al. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **35** 91 (2014)
78. Miyazaki A et al. *Prog. Theor. Exp. Phys.* 011C01 (2015)
79. Krupnov A F, in *Modern Aspects of Microwave Spectroscopy* (Ed. G W Chantry) (London: Academic Press, 1979) p. 217
80. Антаков И И и др. *Письма в ЖЭТФ* **19** 634 (1974); Antakov I I et al. *JETP Lett.* **19** 329 (1974)
81. Третьяков М Ю и др. *ПТЭ* (1) 87 (2008); Tretyakov M Yu et al. *Instrum. Exp. Tech.* **51** 78 (2008)
82. Казаков В П *Изв. вузов. Радиофизика* **23** 7877 (1980); Kazakov V P *Radiophys. Quantum Electron.* **23** 533 (1980)
83. Казаков В П, Паршин В В, Дрягин Ю А *Изв. вузов. Радиофизика* **29** 240 (1986)

High power terahertz sources for spectroscopy and material diagnostics

M.Yu. Glyavin, G.G. Denisov, V.E. Zapevalov, M.A. Koshelev, M.Yu. Tretyakov, A.I. Tsvetkov

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation
Tel. +7 (831) 416 46 27. Fax +7 (831) 416 06 16. E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

This paper reviews the development of radiation sources and presents the most notable examples of the use of gyrotrons in spectroscopy and material diagnostics. The paper describes the main features of terahertz gyrotrons. It presents the most prominent examples of modern CW and pulsed gyrotrons for a specified frequency range, examines a number of topical applications, and discusses near-term development prospects for high frequency gyrotrons.

Keywords: gyrotron, terahertz radiation, power, spectroscopy

PACS numbers: **07.57.–c, 41.60.–m, 84.40.Ik**

Bibliography — 83 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (6) 667–677 (2016)

DOI: 10.3367/UFNr.2016.02.037801

Received 30 March 2016

Physics – Uspekhi **59** (6) (2016)

DOI: 10.3367/UFNe.2016.02.037801