

УДК 537.862+621.385

НОВЫЕ ВАРИАНТЫ ИСТОЧНИКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР В СПЕКТРОСКОПИИ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

В. Л. Братман, Ю. К. Калынов, П. Б. Махалов, А. Э. Федотов

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Для динамической поляризации ядер в высокополевой спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) необходимо терагерцовое излучение средней мощности, для получения которого в настоящее время почти исключительно используются обычные гиротроны. В данном обзоре рассмотрены альтернативные варианты электронных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов, требующие для своей работы значительно более слабого магнитного поля, а именно гиротроны с большой орбитой на высоких гармониках циклотронной частоты и приборы черенковского типа — лампа обратной волны и клистронный умножитель частоты с трубчатыми электронными пучками. Кроме того, рассмотрена возможность использования для работы как гиротрона, так и лампы обратной волны магнитного поля, создаваемого непосредственно соленоидом ЯМР-спектрометра. Расположение генератора в магните спектрометра делает ненужным создающий сильное поле дополнительный сверхпроводящий магнит, значительно сокращает длину линии передачи излучения, а в случае черенковских приборов позволяет также существенно повысить мощность выходного сигнала. Согласно расчётам все рассмотренные электронные приборы способны обеспечить требуемую для динамической поляризации ядер мощность (10 Вт и более) на частоте 260 ГГц, в то время как на более высоких частотах гиротроны, включая предложенные в статье их разновидности, остаются практически безальтернативными вариантами.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с работы [1], одним из наиболее популярных приложений источников когерентного терагерцового излучения средней мощности становятся спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения [2]. Использование таких источников в спектроскопии ЯМР связано с применением методов повышения её чувствительности за счёт динамической поляризации ядер. Эти методы позволяют путём насыщения ЭПР-переходов и поляризации электронной подсистемы образца передать состояние поляризации исследуемой ядерной подсистеме и тем самым во много раз увеличить её отклик. Магнитные поля в криомагнитах современных спектрометров высокого разрешения меняются от считающегося теперь в этой области довольно скромным значения 9,4 Тл до 21 и даже 23,5 Тл. При этом необходимые для облучения образцов частоты излучения близки к частотам электронных парамагнитных переходов и равны соответственно $260 \div 650$ ГГц, а требуемые довольно большие мощности для различных типов образцов, конструкций электродинамических систем и режимов работы лежат в широком диапазоне $10^{-1} \div 10^3$ Вт. В связи с недостаточной мощностью других терагерцовых источников практически во всех экспериментах в настоящее время используются обычные гиротроны, работающие в режиме непрерывной генерации на основном циклотронном резонансе или второй циклотронной гармонике [1–8]. Такие приборы позволяют удовлетворить практически всем необходимым требованиям и в том числе обеспечить высокую долгосрочную стабильность излучения. Однако для их работы необходимы криомагниты с таким же или всего лишь вдвое меньшим магнитным полем, чем рабочее поле спектрометра, а также довольно длинные и сложные линии передачи терагерцового излучения. Это обстоятельство делает их дорогими источниками и значительно затрудняет их широкое использование в спектроскопии.

В. Л. Братман, Ю. К. Калынов, П. Б. Махалов, А. Э. Федотов

589

В настоящей работе обсуждаются несколько альтернативных источников для высокоразрешающей терагерцевой ЭПР-спектроскопии и спектроскопии ЯМР с динамической поляризацией ядер. Раздел 1 посвящён описанию универсального генератора — гиротрона с большой орбитой, предназначенного для работы в сравнительно слабом поле недорогого криомагнита не только на второй, но и на третьей и четвёртой циклотронных гармониках в широком диапазоне частот $260 \div 520$ ГГц. В разделе 2 описан гиротрон с очень низким напряжением, способный, согласно расчётам, работать в непрерывном режиме без специального криомагнита прямо в магните спектрометра и, соответственно, имеющий короткую линию передачи терагерцевого излучения. Такая же и другие возможности исследованы в разделе 3 для лампы обратной волны (ЛОВ) и других черенковских приборов. В разделе 4 подведены результаты работы.

1. ГИРОТРОНЫ С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ

Работа на второй циклотронной гармонике позволяет вдвое снизить индукцию магнитного поля в обычном гиротроне. Однако попытки использовать резонансное взаимодействие электронов с полем резонатора на более высокой гармонике наталкиваются для слабoreлятивистских гиротронов на серьёзные трудности. Они связаны со сложностью подавления намного более сильно связанных с электронами низкочастотных мод, которые взаимодействуют с ними на низких циклотронных гармониках. Эта проблема существенно упрощается в так называемом гиротроне с большой орбитой [9–12], в котором, в отличие от обычного гиротрона, используется не трубчатый полиосевой, а близкий к одноосному электронный пучок. В одноосном пучке частицы движутся по винтовым траекториям, оси которых близки к оси аксиально-симметричного резонатора (приосевой пучок). Такой пучок способен резонансным образом возбуждать только бегущие по азимуту моды TE_{mp} , для которых азимутальный индекс m равен номеру циклотронной гармоники s . Благодаря близости поперечных структур полей моды TE_{mp} вблизи оси резонатора и резонансно вращающегося полевого мультиполя ($2s$ -поля), необходимого для взаимодействия на s -й циклотронной гармонике, импеданс взаимодействия имеет максимальное возможное для выбранных моды и гармоники значение. Указанные условия обеспечивают значительное прореживание спектра потенциально возбуждимых мод и даже при сравнительно низких энергиях электронов делают возможной одномодовую генерацию не только на основной и второй, но также на третьей и четвёртой циклотронных гармониках [12–16].

Следует отметить, что метод увеличения импеданса взаимодействия и повышения селективности за счёт использования приосевых пучков в течение долгого времени применялся главным образом в системах с релятивистскими электронными пучками и/или недостаточно эффективными электронно-оптическими системами [11–13]. Переход в гиротроне с большой орбитой к слабoreлятивистским пучкам и развитие для них эффективной электронно-оптической системы в виде аксиально-симметричной пушки с резким каспом (реверсом) магнитного поля [14], а также использование в качестве рабочих сравнительно высоких радиальных мод традиционных гиротронных резонаторов [15] позволили добиться уверенной селективной генерации в импульсном режиме на третьей циклотронной гармонике на частотах до 1 ТГц [16]. Впоследствии этот гиротрон с большой орбитой в течение долгого времени успешно использовался для исследований биологических объектов [17] и терагерцевого разряда в газах [18].

Теоретический анализ и экспериментальный опыт позволяют утверждать, что для систем со средней мощностью излучения гиротроны с большой орбитой являются простым и во многих случаях оптимальным решением. В частности, они могут быть эффективно использованы для высокополевой спектроскопии. Важно, что конфигурация гиротрона с большой орбитой даёт возможность работать на нескольких гармониках с одной и той же электронной пушкой, магнитной

системой и коллектором для генерации излучения в широком диапазоне частот, изменяя лишь резонаторный блок и подстраивая под частоту излучения окно вывода.

1.1. Работающий в непрерывном режиме гиротрон с большой орбитой на частоты 260 ÷ 520 ГГц

В развитие этого направления в ИПФ РАН недавно был разработан первый непрерывный гиротрон с большой орбитой, работающий в непрерывном режиме (рис. 1). Этот прототип уни-

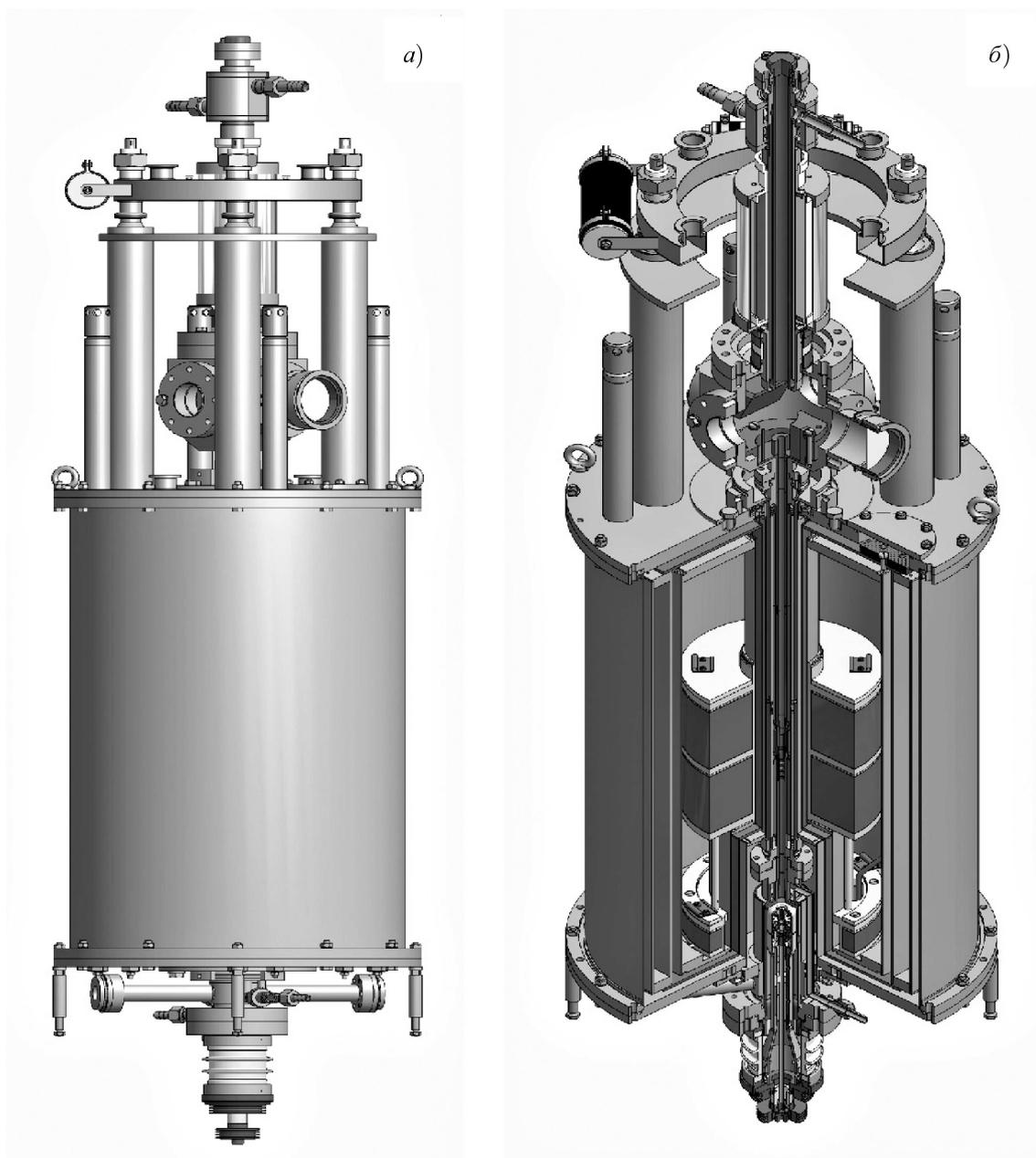


Рис. 1. Внешний вид (а) и вид в разрезе (б) прототипа универсального гиротрона с большой орбитой непрерывного действия на частоты 0,26 ÷ 0,52 ТГц

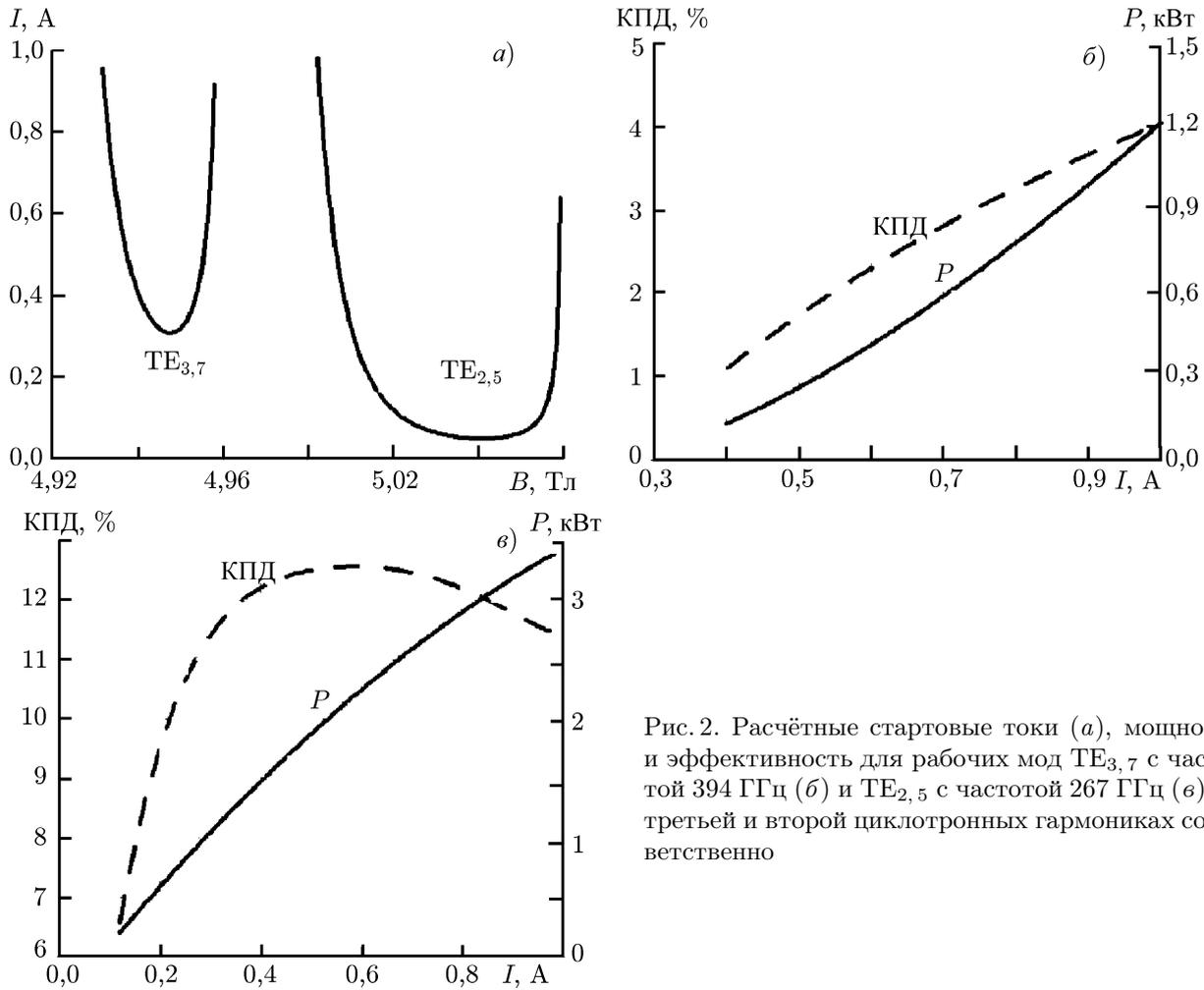


Рис. 2. Расчётные стартовые токи (а), мощность и эффективность для рабочих мод $TE_{3,7}$ с частотой 394 ГГц (б) и $TE_{2,5}$ с частотой 267 ГГц (в) на третьей и второй циклотронных гармониках соответственно

версального генератора рассчитан на сравнительно небольшую для высоких гармоник энергию частиц 30 кэВ, максимальный ток до 1 А, питч-фактор частиц $\alpha = 1,5 \div 2$ и предназначен для получения мощного излучения на второй, третьей и четвёртой циклотронных гармониках при сравнительно низком магнитном поле до 5 Тл. При работе на фиксированных частотах в трёх диапазонах около 0,26, 0,39 и 0,52 ТГц в этом генераторе используются одна и та же магнитная и электронно-оптическая системы.

Следует подчеркнуть, что приосевой электронный пучок принципиально не может быть получен в традиционной для гиротронов магнетронно-инжекторной пушке. Поэтому в описываемом гиротроне с большой орбитой используется хорошо исследованная в экспериментах пушка с каспом (реверсом) магнитного поля. Для создания каспа магнитная система генератора содержит в одном кристате главный соленоид и катодную катушку с противоположным направлением поля (рис. 1б), которые вместе создают между катодом и анодом область с резким изменением направления продольного магнитного поля.

Как и в предыдущих экспериментах [13–16], в работающем в непрерывном режиме гиротроне с большой орбитой для получения излучения на фиксированных частотах в диапазонах около 0,26 и 0,39 ТГц используется обычный гиротронный резонатор в виде отрезка слабонерегулярного цилиндрического волновода. В резонаторе, рассчитанном на взаимодействие электронов с электромагнитным полем на третьей циклотронной гармонике на частоте 0,394 ТГц, при неболь-

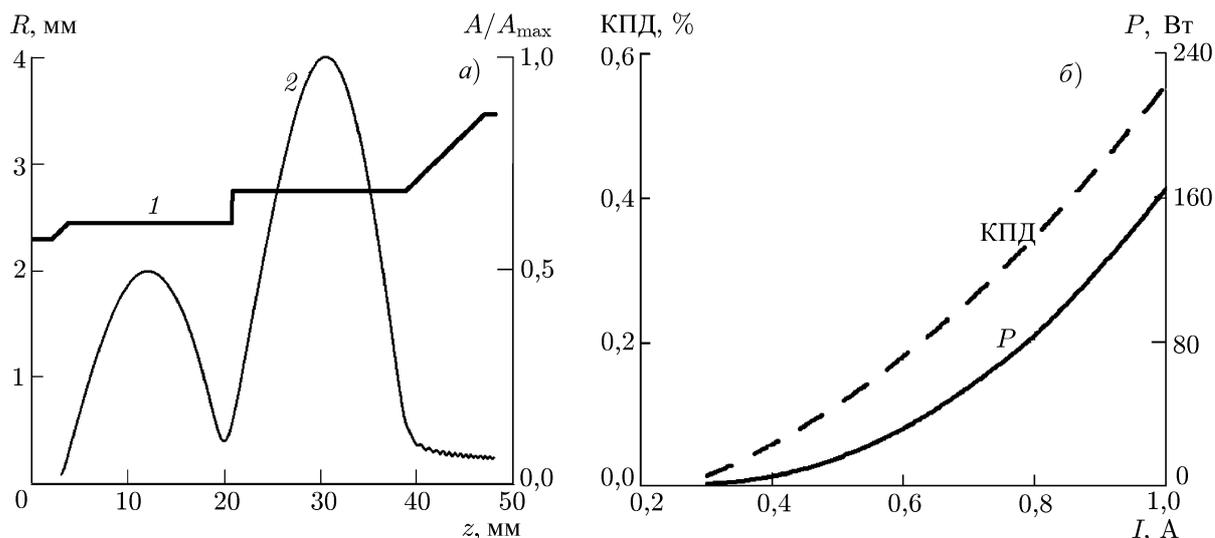


Рис. 3. Гиротрон с большой орбитой с рабочей частотой 520 ГГц: (а) продольные профили связанных резонаторов с трансформацией мод (кривая 1) и электромагнитного поля (кривая 2), (б) расчётные мощность и эффективность на четвёртой циклотронной гармонике

шом изменении магнитного поля может быть получена также генерация на второй циклотронной гармонике на частоте 0,267 ТГц (рис. 2). Получение генерации на частоте 0,52 ТГц возможно при работе на четвёртой циклотронной гармонике, чего, однако, сложно добиться в обычном гиротронном резонаторе из-за его слишком большой длины в этом случае и, как следствие, высоких омических потерь и конкуренции мод. Однако генерация становится возможной в более сложной селективной системе в виде двух связанных резонаторов с трансформацией мод, в которых используются моды с одинаковыми азимутальными и различными радиальными индексами [19] (рис. 3).

1.2. Специализированный гиротрон с большой орбитой на частоту 260 ГГц

Более низковольтный вариант генератора на третьей гармонике рассчитан на пучок с энергией электронов 15 кэВ и силой тока 0,3 А и сравнительно слабое магнитное поле с индукцией 3,2 Тл, получаемое в «сухом» (без необходимости заливки жидкого гелия) рефрижераторном криомагните. При низком напряжении для работы на третьей гармонике необходим большой питч-фактор частиц $\alpha \geq 2$. Расчёты показывают, что пушка с каспом способна сформировать пучок с необходимыми параметрами, включая достаточно малый разброс по скорости. Соответственно, как и в предыдущем варианте, магнитная система генератора состоит из соленоида и катодной катушки, помещаемых в один криостат. Согласно расчётам, при использовании в качестве рабочей моды $TE_{3,4}$ обычного гиротронного резонатора с длиной 34,5 мм стартовый ток составляет 0,1 А, а при токе 0,3 А достигается мощность излучения 80 Вт.

2. НИЗКОВОЛЬТНЫЙ ГИРОТРОН (ГИРОТРИНО) В МАГНИТЕ СПЕКТРОМЕТРА

Другая возможность значительного упрощения системы облучения образцов терагерцовым электромагнитным полем заключается в помещении гиротрона прямо в магнитное поле ЯМР-спектрометра. Эта возможность основана на близости в одном и том же магнитном поле B цик-

лотронной частоты свободного электрона

$$\omega_c = \Omega/[1 + eU/(mc^2)] \quad (1)$$

и парамагнитной частоты электронов

$$\omega_e = g\Omega/2. \quad (2)$$

Здесь $\Omega = eV/(mc)$, e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, U — рабочее напряжение в гиротроне, $g \approx 2,0023$ — фактор Ланде. Из сравнения формул (1) и (2) ясно, что релятивистская циклотронная частота меньше парамагнитной частоты: $\omega_c < \omega_e$. В то же время при близости полей в резонаторе гиротрона и в области исследуемого образца при очень низком рабочем напряжении частота генерации гиротрона может быть близкой или равной парамагнитной частоте:

$$\omega \approx \omega_e, \quad (3)$$

что является необходимым условием для спектроскопии ЯМР с динамической поляризацией ядер при использовании эффекта Оверхаузера. В случае солид-эффекта, электронно-ядерной кроссрелаксации или теплового смешивания условие динамической поляризации ядер (3) изменяется на $\omega \approx \omega_e \pm \omega_N$, где ω_N — частота магнитного резонанса для ядер (в случае протонов $\omega_N \approx \omega_e/660$). Дело в том, что в гиротроне частота рабочей моды превышает начальную циклотронную частоту электронов на величину расстройки резонанса

$$\omega - \omega_c \approx \vartheta v_{\parallel}/L, \quad (4)$$

что необходимо для азимутальной группировки электронов в тормозящей фазе поля. Здесь величина оптимального угла пролёта частиц ϑ близка к 2π , v_{\parallel} — продольная скорость частиц, L — длина резонатора. Условие (4) может быть выполнено при очень малом напряжении $1 \div 3$ кВ (будем называть такой низковольтный генератор «гиротрино») и длине резонатора порядка $(10 \div 20) \lambda$, где $\lambda = 2\pi/\omega$ — длина волны излучения. В таких условиях уже при питч-факторе $\alpha = 1 \div 1,5$ параметр инерционной группировки частиц достаточно велик. Поэтому даже с учётом значительных омических потерь в стенках резонатора гиротрино на основном циклотронном резонансе может быть достигнут сравнительно высокий коэффициент полезного действия (КПД), см. табл. 1.

При токе 0,15 А мощность излучения равна 12 Вт, но при этом магнитное поле в резонаторе должно быть на 3 мТл больше, чем на образце, расположенном в центре соленоида. Следует отметить, что примерно такое повышение поля часто имеет место в криомагнитах спектрометров на расстояниях порядка $10 \div 15$ см от их центров. Для возможности размещения генератора на указанном малом расстоянии от центра можно использовать вывод излучения из резонатора назад (рис. 4) подобно тому, как это обычно делается в черенковских лампах обратной волны и недавно было предложено для расширения полосы перестройки частоты в гиротронах [20].

Для точной подстройки частоты генерации в гиротрино в случае необходимости может быть использована дополнительная катушка со слабым полем, которая, однако, должна включать встречные обмотки для компенсации возможного возмущения поля в области образца. В то же время использование дополнительной катушки значительно расширяет возможности этого прибора. Согласно расчётам, катушка с полем с индукцией менее 1 % от поля соленоида позволяет создать гиротрон с ускоряющим напряжением 2 кВ и выходной мощностью 26 Вт при КПД 13 %.

Помещение гиротрино или другого терагерцового электровакуумного генератора в магнит спектрометра является довольно очевидной идеей. Она была, в частности, независимо предложена в конференционных выступлениях [21, 22] и в заявке на патент [23]. Помимо возможности избавиться от дополнительного криомагнита, это позволяет радикально сократить длину линии

Таблица 1. Расчётные параметры гиротрино

Частота излучения, ГГц	263,4
Напряжение, кВ	1,4
Питч-фактор	1,2
Магнитное поле в резонаторе, Тл	9,403
Диаметр резонатора, мм	4,25
Длина резонатора, мм	16
Поперечная мода	TE _{6,2}
Омическая добротность	5 800
Полная добротность	2 800
Рабочий ток, мА	150
КПД, %	6
Выходная мощность, Вт	12

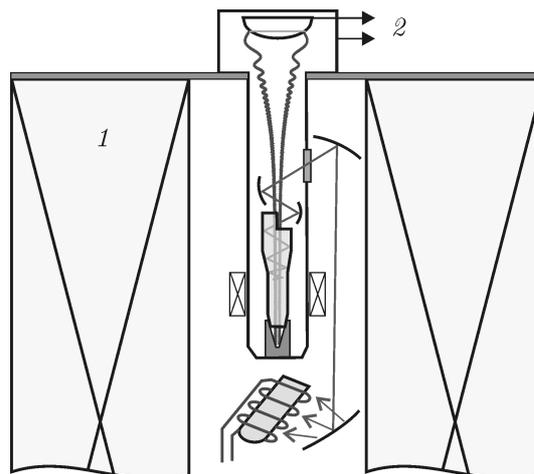


Рис. 4. Гиротрино внутри магнита спектрометра (вывод излучения из резонатора осуществляется в направлении катода): 1 — ЯМР-магнит, 2 — источник питания

передачи терагерцового излучения и снизить связанные с ней потери мощности. Следует также отметить, что совмещение спектрометра и микроволнового вакуумного генератора было успешно осуществлено ранее во внутррезонаторном молекулярном спектрометре, где струя анализируемого газа инжектируется прямо в низковакуумную часть оротронного резонатора [24].

При размещении гиротрино внутри соленоида спектрометра коллектор генератора находится в области сильного однородного магнитного поля, где, как и в резонаторе, трубчатый электронный пучок имеет очень малые радиус и толщину стенки. В таких условиях тепловая нагрузка на поверхность коллектора может быть уменьшена при использовании одноступенчатой системы рекуперации энергии продольного движения частиц при сохранении энергии их поперечного движения. В то же время следует отметить, что, по сравнению с обычным гиротроном, на коллекторе гиротрино след пучка получается значительно более тонким и, следовательно, тепловая нагрузка значительно снижается за счёт потока тепла не только поперёк, но и вдоль стенок коллектора. Поэтому даже в непрерывном режиме осаждение тонкого полого пучка с исходной мощностью 200 Вт на коническую поверхность представляется вполне реализуемым.

3. ЧЕРЕНКОВСКИЕ ПРИБОРЫ

3.1. Лампа обратной волны в магните спектрометра

Требующие намного меньшего магнитного поля, чем гиротроны, и более компактные приборы с прямолинейными электронными пучками и медленными рабочими волнами уже успешно осваивают диапазон частот вблизи 260 ГГц на уровне средней мощности порядка сотен милливатт и импульсной мощности до 10 Вт [25–30]. Новые возможности получения в черенковских приборах значительной мощности излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов появляются при помещении их — подобно гиротрино — в сверхсильные поля спектрометров. Важно отметить, что, в отличие от гиротрино, индукция магнитного поля слабо влияет на частоту генерации черенковских приборов, поэтому их значительно проще разместить в спектрометре и для их работы не требуется дополнительная катушка. В то же время использование для транспортировки частиц сверхсильного магнитного поля позволяет даже для очень коротких волн провести частицы

Таблица 2. Результаты расчёта лампы обратной волны, помещённой в магнит спектрометра

Частота излучения, ГГц	260
Ускоряющее напряжение, кВ	15
Период замедляющей структуры, мм	0,23
Внешний диаметр волновода, мм	1,2
Внутренний диаметр волновода, мм	0,86
Внешний диаметр пучка, мм	0,84
Толщина стенки пучка, мм	0,03

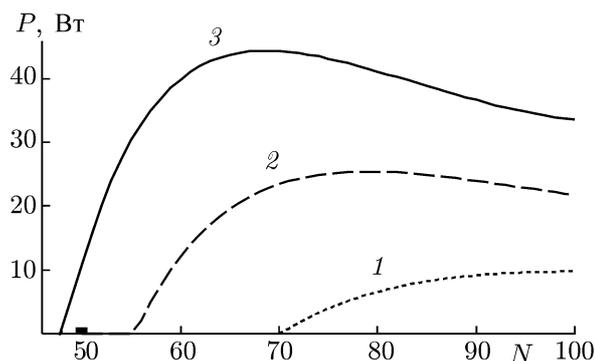


Рис. 5. Зависимость мощности лампы обратной волны от длины пространства взаимодействия (в периодах гофрировки) при токах 0,1 (кривая 1), 0,2 (кривая 2) и 0,3 А (кривая 3)

на расстояниях от электродинамических структур порядка характерного масштаба поперечного спада медленной волны

$$\Lambda = \beta\lambda/(2\pi), \quad (5)$$

но без значительного токоосаждения на структуру. Здесь $\beta = v/c$ — скорость электронов, нормированная на скорость света. В таких условиях значительно возрастают эффективность взаимодействия электронов с медленной волной и мощность выходного излучения прибора.

Для динамической поляризации ядер представляются перспективными разновидности слабоборелятивистских приборов, основанные на использовании полых цилиндрических пучков и осесимметричных гофрированных электродинамических структур [31]. В качестве примера рассмотрим лампу обратной волны с рабочей частотой 260 ГГц с полым пучком с энергией электронов 15 кэВ (для которой $\Lambda \approx 40$ мкм) и волноводом с глубокой гофрировкой внутренней поверхности (табл. 2). Согласно прямому численному моделированию, в сильном поле соленоида 9,4 Тл пучок с током 0,2 А и толщиной 0,03 мм может быть проведён на расстоянии 0,02 мм от гофрировки. В этом случае при работе на низшей симметричной поперечно-магнитной моде $TM_{0,1}$ расчётная мощность излучения составит 10–30 Вт в зависимости от длины пространства взаимодействия (рис. 5). Благодаря использованию трубчатого пучка, даже без его компрессии, требуемая для генерации плотность тока равна 250 А/см², что не превышает значения, достигнутого в современных субмиллиметровых лампах обратной волны.

В сильном магнитном поле траектории частиц близки к прямолинейным, и результаты расчётов лампы обратной волны по усреднённым уравнениям хорошо совпадают с вычислениями на основе РС-кода, что необычно для существующих черенковских приборов терагерцового диапазона, работа которых сильно зависит от паразитного поперечного движения частиц и их осаждения на электродинамическую структуру. Для прямолинейного пучка легко осуществить достаточно глубокую рекуперацию энергии частиц. Это обстоятельство позволяет при полой форме пучка даже в непрерывном режиме снизить нагрузку на коллектор до приемлемого значения. Для случая нитевидного электронного пучка создание коллектора, расположенного в области однородного магнитного поля, представляется практически невозможным.

Исследуемая лампа обратной волны с трубчатым пучком остаётся достаточно эффективной даже при значительно более слабом магнитном поле 1 Тл. Согласно расчётам, при токе 0,3 А, разбросе скоростей электронов по углам 4° и расстоянии между пучком и гофрированной стенкой волновода 0,03 мм выходная мощность такого прибора превышает 10 Вт.

3.2. Клистрон с распределённым взаимодействием и умножением частоты

Для ряда методов динамической поляризации ядер, в частности для пока ещё не реализованной высокополевой импульсной спектроскопии, требуются источники излучения с контролируемой длительностью импульсов и частотой и фазой излучения. Ещё недавно такие приборы с требуемым уровнем мощности отсутствовали, но за последний год две исследовательские группы продемонстрировали усилители с требуемыми параметрами: клистрон с распределённым взаимодействием с рабочей частотой 263 ГГц [26] и гиролампу бегущей волны с частотой генерации 250 ГГц [32]. Альтернативой терагерцовому усилителю может служить умножитель частоты циклотронного [33] либо черенковского типа. В отличие от усилителя, для умножителя можно использовать существующие значительно более мощные источники входного сигнала. Так, например, на частоте 260 ГГц перспективным источником представляется черенковский утроитель частоты клистронного типа с трубчатым электронным пучком, а именно двухрезонаторный клистрон с распределённым взаимодействием, выходной резонатор которого настроен на третью гармонику высокочастотного тока. Резонаторы такого умножителя представляют собой отрезки круглых волноводов с глубокой прямоугольной гофрировкой стенок. В низкочастотном резонаторе с рабочей модой $TM_{0,1,1}$, возбуждаемой внешним сигналом с мощностью 1 Вт на частоте 86,7 ГГц, электроны полого трубчатого пучка модулируются по скорости, и после секции дрейфа сгруппированный пучок передаёт энергию излучению в выходном резонаторе с модой $TM_{0,2,1}$ на частоте 260 ГГц. Для ускоряющего напряжения 15 кВ период гофрировки составляет 0,84 мм в первом резонаторе и втрое меньше в выходном резонаторе. Глубина и форма гофрировки определяются требованием максимума электронно-волнового взаимодействия в выходном резонаторе, который достигается при внутреннем радиусе гофрировки около 0,75 мм. Для пучка с толщиной 0,07 мм, движущегося на расстоянии 0,07 мм от гофрированной поверхности резонаторов, и электронного тока 0,3 А максимальная выходная мощность составляет около 25 Вт при 20–25 периодах гофрировки низкочастотного резонатора (рис. 6). При увеличении толщины пучка и расстояния до стенки до 0,1 мм мощность снижается до 3–5 Вт. Отметим, что в умножителе требования к толщине пучка и расстоянию до гофрировки оказываются значительно менее жёсткими, чем в генераторе. Это связано с предварительной модуляцией скоростей частиц в поле менее прижатой к электродинамической структуре низкочастотной волны.

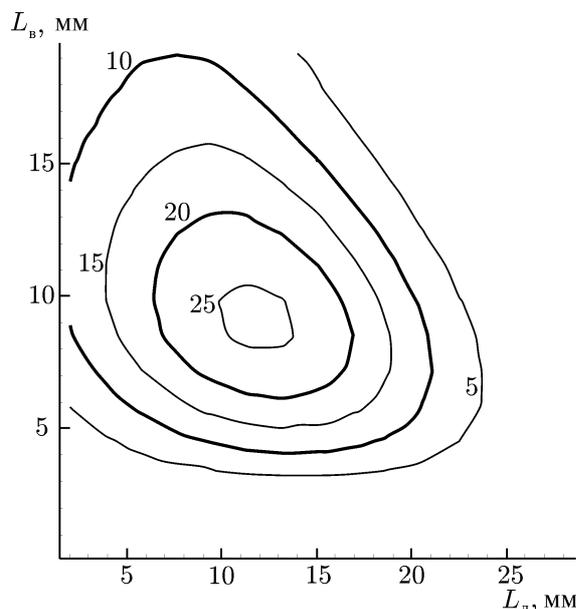


Рис. 6. Клистронный умножитель частоты на 260 ГГц; линии уровня зависимости выходной мощности от длин секции дрейфа L_d и выходной секции L_b

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре описано несколько вариантов электровакуумных терагерцовых приборов для облучения образцов при высокополевой спектроскопии ЯМР с динамической поляризацией ядер, которые могут оказаться значительно проще используемых в настоящее время обычных гиро-

тронов. Наибольшей степенью готовности среди этих вариантов обладают гиротроны с большой орбитой для диапазона рабочих частот $0,26 \div 0,52$ ТГц. Согласно расчётам и успешным экспериментам, проведённым ранее с их прототипом в импульсном режиме, они способны работать на третьей и, возможно, на четвёртой циклотронной гармониках. Создание этих приборов позволит снизить индукцию рабочего магнитного поля в $1,5 \div 4$ раза и тем самым намного упростить магнитную систему гиротрона. При увеличении рабочего магнитного поля до 12 Тл возможно создание гиротрона с большой орбитой на третьей циклотронной гармонике с мощностью излучения в сотни ватт в непрерывном режиме на частотах до 1 ТГц и выше.

Среди рассмотренных вариантов приборов достаточно привлекательными представляются также низковольтный гиротрон (гиротрино) на основном циклотронном резонансе и черенковская лампа обратной волны с трубчатым электронным пучком и аксиально-симметричной электродинамической системой с глубокой гофрировкой внутренней поверхности, рассчитанные на работу в магните ЯМР-спектрометра. Кроме значительного упрощения магнитной системы, для таких приборов требуются намного более короткие линии передачи терагерцового излучения. Следует отметить, что помещение генератора в магнит спектрометра вызывает несколько дополнительных проблем. Они связаны с осаждением электронов на коллектор в сильном поле, необходимостью исключить вызванные генератором возможных искажений магнитного поля в области исследуемого образца и усложнением вывода излучения. В настоящей статье указаны возможные пути решения этих проблем. Важно отметить, что теоретически исследованные лампы обратной волны и клистронный умножитель на частоту 260 ГГц могут обеспечить приемлемый уровень мощности излучения не только в сверхсильном поле спектрометра, но и в сравнительно скромном поле 1 Тл.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты 12–03–31722, 13–02–01048 и 13–02–01176).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Becerra L. R., Gerfer G. J., Temkin R. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 3562.
2. Griffin R. G., Prisner T. F. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. P. 5737.
3. Nanni E. A., Barnes A. B., Griffin R. G., Temkin R. J. // IEEE Trans. on THz Science and Technology. 2011. V. 1. P. 145.
4. Griesinger C., Bennati M., Vieth H. M., et al. // Progress in NMR Spectr. 2012. V. 64. P. 4.
5. Bajaj V. S., Farrar C. T., Hornstein M. K., et al. // J. Magn. Resonance. 2011. V. 213. P. 404.
6. Idehara T., Saito T., Ogawa I., et al. // Appl. Magn. Resonance. 2008. V. 34. P. 265.
7. Denisenkov V., Prandolini M. J., Gafurov M., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. P. 5786.
8. Запевалов В. Е., Корнишин С. Ю., Котов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 251.
9. Jory H. R&D technical report ECOM-01873-F. Palo Alto: Varian Associates, 1968.
10. McDermott D. B., Luhmann N. C., Jr., Kupiszewski A., Jory H. R. // Phys. Fluids. 1983. V. 26, No. 7. P. 1936.
11. Lawson W., Destler W. W., Striffler C. D. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13. P. 444.
12. Bratman V. L., Fedotov A. E., Kalynov Yu. K., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27, No. 2. P. 456.
13. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н., Самсонов С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 823.

14. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 4. С. 537.
15. Братман В. Л., Калынов Ю. К., Мануилов В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 7. С. 525.
16. Bratman V. L., Kalynov Y. K., Manuilov V. N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102, No. 24. Art. no. 245101.
17. Фёдоров В. И., Погодин А. С., Калынов Ю. К. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2011. № 3 (63). С. 27.
18. Bratman V. L., Zorin V. G., Kalynov Y. K., et al. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. Art. no. 083507.
19. Запевалов В. Е., Малыгин С. А., Павельев В. Г., Цимринг Ш. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 9. С. 1194.
20. Zapevalov V. E., Kuftin A. N., Manuilov V. N., et al. // Proc. 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” (SMP-2011), Nizhny Novgorod—St. Petersburg, Russia, July 9–16, 2011. P. 143.
21. Bratman V. L., Glyavin M. Yu., Zapevalov V. E., et al. // II Dynamic Nuclear Polarization Symposium: Theory, Hardware, Applications, Radicals, Koenigstein, Germany, Sept. 2–4, 2009. P. 5.
22. Bratman V. L., Fedotov A. E., Kalynov Yu. K. // 8th Int. Workshop “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” (SMP-2011), Nizhny Novgorod—St. Petersburg, Russia, July 9-16, 2011. P. 9.
23. Patent Application No. US 2012/0176133 A1. Integrated high-frequency generator system utilizing the magnetic field of the target application / J. R. Sirigiri, T. Maly. July. 12, 2012.
24. Surin L. A., Dumesh B. S., Lewen F., et al. // Rev. Sci. Instr. 2001. V. 72, No. 6. P. 2535.
25. Chernin D., Burke A., Chernyavskiy I., et al. // Proc. 11th Int. Vacuum Electronics Conf., Monterey, California, May 18–20, 2010. P. 217.
26. Roitman A., Horoski P., Steer B., Berry D. // Proc. 14th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf., 21–23 May 2013, Paris, France. <http://www.cpii.com/product.cfm/7/40/158>.
27. Ponomarenko S. S., Kishko S. A., Zavertanniy V. V., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, No. 1. P. 82.
28. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В. П. Шестопалова. Киев: Наукова думка, 1991. 320 с.
29. Bratman V. L., Dumesh B. S., Fedotov A. E., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. P. 1466.
30. Братман В. Л., Гинцбург В. А., Гришин Ю. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 11. С. 958.
31. Bratman V. L., Fedotov A. E., Makhalov P. B. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. Art. no. 020704.
32. Nanni E. A., Lewis S. M., Shapiro M. A., Temkin R. J. // Proc. 14th IEEE Int. Vocuum Electronics Conf., Paris, France, May 21–23, 2013. doi: 10.1109/IVEC.2013.6571109
33. Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kalynov Y. K., et al. // Proc. 33rd IEEE Int. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008.

Поступила в редакцию 3 июля 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

NEW VERSIONS OF TERAHERTZ WAVE SOURCES FOR DYNAMIC NUCLEAR POLARIZATION IN NMR SPECTROSCOPY

V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, P. B. Makhalov, and A. E. Fedotov

Dynamic polarization of nuclei in strong-field nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR spectroscopy) requires terahertz waves with average power levels. Nowadays, conventional gyrotrons are used almost exclusively to generate such radiation. In this paper, we review alternative variants of electronic microwave oscillators, which require much weaker magnetic fields for their operation, specifically, large-orbit gyrotrons operated at high cyclotron-frequency harmonics and Čerenkov-type devices, namely, backward-wave oscillators and klystron frequency multipliers with tubular electron beams. Additionally, we consider the possibility to use the magnetic field, which is generated by the solenoid of the NMR spectrometer directly, for operation of both the gyrotron, and the backward-wave oscillator. Positioning of the oscillator in the spectrometer magnet eliminates the necessity of using an additional superconducting magnet, which generates a strong field, reduces the length of the radiation transmission line significantly, and, in the case of Čerenkov-type devices, allows increasing the power of the output signal considerably. According to our calculations, all the electronic devices that have been considered are capable of ensuring the power, which is required for dynamic nuclear polarization (10 W and more) at a frequency of 260 GHz whereas at higher frequencies the gyrotrons including their versions proposed in this paper remain the single option.