УДК 621.385.69

# УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ ГИРОТРОН С БОЛЬШОЙ ОРБИТОЙ ЭЛЕКТРОНОВ: РАБОТА НА ВТОРОЙ И ТРЕТЬЕЙ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ

Ю. К. Калынов<sup>1</sup>, В. Н. Мануилов<sup>1,2</sup>, И. В. Ошарин<sup>1\*</sup>, А. В. Савилов<sup>1,2</sup>, А. Ш. <math>Φикс<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород; Россия

В гиротроне с большой орбитой, работающем на высокой гармонике циклотронной частоты, получено когерентное субтерагерцовое излучение в непрерывном режиме генерации. Электронно-оптическая система, содержащая пушку с каспом и последующей секцией адиабатической магнитной компрессии с фактором 1 000, обеспечивает формирование винтового приосевого пучка электронов с энергией 30 кэВ, током 0,7 А, допустимыми разбросом скоростей и питч-фактором в магнитном поле 5 Тл. Получена стабильная одномодовая генерация на частотах 0,394 и 0,267 ТГц с мощностью излучения 0,37 и 0,9 кВт на третьей и второй циклотронных гармониках соответственно. Исследованы также перестройка частоты генерации при работе на второй циклотронной гармонике и сложные режимы конкуренции двух волн, возбуждающихся на второй и третьей циклотронных гармониках.

#### ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны [1, 2] являются наиболее распространённой и эффективной разновидностью широкого класса электровакуумных приборов — мазеров на циклотронном резонансе [1, 3]. В настоящее время активно развивается применение этих мощных и высокоэффективных генераторов в субтерагерцовом частотном диапазоне. Действие этих приборов основано на использовании стимулированного циклотронного излучения электронов, описывающих винтовые траектории в однородном магнитном поле и резонансно взаимодействующих с высокочастотным полем резонатора на *s*-й циклотронной гармонике,

$$\omega = s\omega_B,\tag{1}$$

где  $\omega$  — частота рабочей моды,  $\omega_B = eB/(m\gamma)$  — циклотронная частота электронов,  $e, m, \gamma$  — модуль заряда, масса и лоренц-фактор электронов, B — магнитная индукция. Сравнительно низкие энергии электронных пучков, требующиеся для реализации таких электронных генераторов, также как их относительная простота и компактность, делают гиротроны привлекательными в качестве мощных источников когерентного излучения в субтерагерцовом диапазоне частот  $(0,1\div1,0 \text{ } \Gamma\Gamma\mu)$  [4–11].

Начиная с работы [4], одним из наиболее популярных приложений гиротронов указанного диапазона становится их использование для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса [12]. Необходимые часто́ты излучения находятся в диапазоне  $260 \div 650 \Gamma \Gamma$ ц, а требуемые довольно больши́е мощности для различных типов образцов, конструкций электродинамических систем и режимов работы лежат в широком интервале  $10^{-1} \div 10^3$  Вт. В связи с недостаточной мощностью других терагерцовых источников практически во всех экспериментах в настоящее время используются традиционные гиротроны, работающие в режиме непрерывной генерации на основном циклотронном резонансе или второй циклотронной гармонике [3, 12—19].

<sup>\*</sup> osharin@appl.sci-nnov.ru

Одним из эффективных и сравнительно доступных источников субтерагерцового диапазона частот может быть также так называемый гиротрон с большой орбитой (ГБО) [20–26]. Этот генератор представляет собой разновидность гиротрона, в котором используется тонкий пучок электронов, состоящий из частиц, движущихся по винтовым траекториям, оси которых близки к оси аксиально-симметричного резонатора (приосевой пучок). Приосевой пучок способен резонансным образом возбуждать только бегущие по азимуту моды  $TE_{m,p}$ , для которых азимутальный индекс *m* равен номеру циклотронной гармоники *s*, при этом связь электронов с полем резонатора имеет максимально возможное для выбранных моды и гармоники значение. Указанные условия обеспечивают значительное прорежение спектра потенциально опасных 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. Работа на высоких гармониках требует намного меньших магнитных полей, чем на основном циклотронном резонансе, что позволяет использовать более простые и дешёвые источники магнитного поля. Важно, что конфигурация ГБО даёт возможность работать на нескольких гармониках, используя одну и ту же электронную пушку, магнитную систему и коллектор, что дополнительно удешевляет генератор и позволяет работать в широком диапазоне частот, меняя только резонатор и элементы вывода излучения.

В развитие указанного направления в ИПФ РАН разработан и создан первый субтерагерцовый ГБО непрерывного действия [25, 26] (см. рис. 1). Этот прототип универсального генератора рассчитан на малую для высоких гармоник энергию частиц, 30 кэВ и мощность электропитания до 30 кВт. В данном генераторе при работе на второй, третьей и четвёртой циклотронных гармониках в сравнительно слабом магнитном поле до 5 Тл может быть получена генерация излучения на всех востребованных в настоящее время для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса частотах — 0,26, 0,39 и 0,52 ТГц соответственно. В данной работе проведён обзор последних экспериментов, выполненных на этой установке.

# 1. СОСТАВ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГБО СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

В универсальной системе ГБО требуемый приосевой электронный пучок формируется электронно-оптической системой с каспом (реверсом) магнитного поля в анодно-катодном промежутке. В разработанной пушке (см. рис. 2) электроны сначала выходят прямолинейно с кольцевого эмиттера радиуса 3 мм, расположенного в продольном, противоположном по отношению к полю основного соленоида, магнитном поле –4,6 мТл. Поперечная скорость электронам сообщается в области изменения направления магнитного поля на расстоянии около 1,8 мм от катода. Затем поперечная скорость достигает рабочей величины в нарастающем магнитном поле, которое увеличивается более чем в 1 000 раз до рабочего значения. Согласно моделированию [27, 28], в такой системе может быть получен пучок с током 0,7 А, питч-фактором 1,5 и разбросом скоростей 21 %.

Непрерывный режим работы ГБО предполагает наличие сравнительно сильного постоянного магнитного поля, с индукцией до 5 Тл, в области резонатора гиротрона. Постоянное магнитное поле в универсальной системе ГБО создаётся криомагнитом. Для компенсации сравнительно большой составляющей поля соленоида и создания противоположно направленного поля на катоде используется катодная катушка. Основной соленоид и катодная катушка совмещены в одном криостате (см. рис. 16 и 6).

Высокие селективные свойства конфигурации ГБО позволяют использовать традиционный гиротронный резонатор для возбуждения колебаний на третьей циклотронной гармонике. Резонатор рассчитан на генерацию излучения с частотой 0,394 ТГц. В качестве рабочей моды выбра-



Рис. 1. Фото ГБО (*a*), конструкция (*б*) и схема (*b*) ГБО и криомагнита: 1 — катод, 2 — катодная катушка, 3 — электронный пучок, 4 — анод, 5 — основной соленоид, 6 — резонатор, 7 — криостат, 8 — квазиоптический преобразователь мод, 9 — выходное окно, 10 — коллекторная катушка



Рис. 2. Схема электронно-оптической системы с реверсом магнитного поля. Стрелками указаны направления собственных магнитных полей каждого из соленоидов. На вставке приведена конфигурация диодной части пушки перед входом в канал транспортировки. Указаны величины магнитных полей в рабочем пространстве и на эмиттере. Штрихпунктирной и штриховой линиями обозначены реверс магнитного поля и центр соленоида соответственно

на мода  $TE_{3,7}$ . Диаметр рабочего резонатора составляет 5,85 мм. Допуски на размер резонатора и шероховатость стенки оцениваются как  $\pm(1\div2)$  мкм и около 0,4 мкм соответственно. Они обеспечиваются последовательными операциями развёртывания и протягивания. Длина резонатора 19 мм (25 длин волн) выбрана в качестве компромиссной для удовлетворения противоречивых требований уменьшения стартового тока и снижения омических потерь. Дифракционная добротность такого резонатора составляет примерно 23 000, омическая добротность с учётом шероховатости поверхности стенки резонатора 0,4 мкм согласно оценке равняется 9 600. Соответственно, омические потери в таком резонаторе составляют приблизительно 70 %. Моделирование показало довольно высокую (9 %) электронную эффективность на рабочей моде с частотой 0,394 ТГц. Однако омические потери уменьшают полную эффективность примерно до 3 %. При превышении



Рис. 3. График зависимостей расчётных стартовых токов от магнитного поля для мод TE<sub>3,7</sub> на третьей (394 ГГц) и TE<sub>2,5</sub> на второй (267 ГГц) циклотронных гармониках

магнитного поля 5 Тл появляется возможность селективной генерации на второй циклотронной гармонике на моде  $TE_{2,5}$  с частотой 0,267 ТГц в том же резонаторе (см. рис. 3).

В ГБО электронный пучок сильно сконцентрирован около оси, и по этой причине обычные методы его осаждения малоэффективны. В универсальном ГБО применена оригинальная концепция утилизации отработанного электронного пучка. Она заключается в повороте приосевого электронного пучка в поперечном магнитном поле к поверхности коллектора (см. рис. 4a) и осаждении электронов на этой поверхности за счёт вращения поперечной компоненты магнитного поля вокруг оси коллектора [26, 29, 30]. Для

создания вращающейся поперечной компоненты магнитного поля используется система из трёх пар прямоугольных катушек, расположенных одна напротив другой вокруг внешней поверхности цилиндрического коллектора (см. рис. 46) и подключённых к трёхфазному источнику питания. Расчёты траекторий электронов в области коллектора проводились для невозмущённого пучка с учётом разбросов их координат и скоростей. Выбившиеся траектории на рис. 4a соответствуют единичным «неудачно» фазированным электронам. Расчёты показали возможность коллектора обеспечить непрерывный режим работы ГБО в широком диапазоне ведущих магнитных полей  $5\div 6,3$  Тл и рассеяние мощности до 45 кВт (см. рис. 4a).

Гиротрон снабжён встроенным преобразователем рабочей моды в волновой пучок власовского типа (см. рис. 1*6*). Этот преобразователь был оптимизирован для режима работы на моде  $TE_{3,7}$ . Однако моделирование показало примерно одинаковые (около 10 %) дифракционные потери в этом преобразователе внутри гиротрона для обеих мод,  $TE_{3,7}$  и  $TE_{2,5}$ . Это позволило использовать преобразователь в обоих режимах (на третьей и второй гармониках). Преобразованное излучение выводится из гиротрона через окно из нитрида бора с диаметром 66 мм. Толщина 2,2 мм обеспечивает прозрачность оконного диска при рабочей частоте 0,394 ТГц, при этом потери в окне составили согласно оценке 15 %.

Потери на транспортировку излучения, его преобразование и вывод из прибора дополнительно уменьшают полную эффективность генератора на частоте 0,394 ТГц до 2,2 %. Соответственно, расчётная мощность выходного излучения оценивается на уровне 460 Вт.

## 2. ПОЛУЧЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ВТОРОЙ И ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКАХ

Универсальная система ГБО с резонатором, рассчитанным на генерацию излучения с частотами 0,267 и 0,394 ТГц при работе на 2-й и 3-й циклотронных гармониках, была экспериментально протестирована в режиме коротких (с длительностью 10 мкс) [25] и длинных (с длительностью  $0,1\div60$  с) импульсов и затем выведена в непрерывный режим генерации [31]. В эксперименте при энергии частиц 30 кэВ и в диапазоне ведущего магнитного поля  $4,9\div5,1$  Тл была получена устойчивая селективная генерация на расчетных модах  $TE_{2,5}$  и  $TE_{3,7}$ . Следует отметить, что области генерации рабочих мод в целом соответствовали расчётным зонам. В районе пересечения зон генерации наблюдалась конкуренция мод и двухчастотная генерация. По этой причине граница области селективной генерации моды  $TE_{2,5}$  была смещена до магнитного поля 5 Тл



Рис. 4. Траектории частиц в области коллектора в фиксированный момент времени (a), схема системы коллекторных катушек (b), средняя тепловая мощность, выделяемая на внутренней поверхности коллектора (красная линия), и индукция магнитного поля, создаваемого отклоняющими катушками (синяя линия), в зависимости от продольной координаты (b)



Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения (линия 1), тока (линия 2) и сигналов с детекторов, оснащённых волноводными фильтрами с частотами отсечки 0,35 ТГц (линия 3) и 0,25 ТГц (линия 4), в областях селективной генерации моды  $TE_{3,7}$  (*a*), селективной генерации моды  $TE_{2,5}$  (*б*) и при работе ГБО в непрерывном режиме генерации (*в*)

и оптимальные параметры генерации этой моды оказались недоступными (подробнее см. рис. 3).

Идентификация мод проводилась по частоте излучения и величине резонансного магнитного поля. Для этого излучение гиротрона вначале исследовалось набором волноводных фильтров с частотами отсечки 0,25 и 0,35 ТГц (рис. 5*a*,  $\delta$ ). Затем частота уточнялась при анализе сигнала биений между гармониками синтезатора частоты и излучением гиротрона [32]. Измеренные этим методом частоты мод ГБО 0,3938 и 0,26677 ТГц соответствовали расчетным частотам мод резонатора TE<sub>3,7</sub> и TE<sub>2,5</sub>.

Дополнительным средством идентификации мод гиротрона является исследование структуры излучения. Измерение распределения мощности излучения гиротрона на расстоянии 100 мм от окна показало удовлетворительное соответствие результату моделирования преобразователя (см. рис. 6). На расстоянии 250 мм от окна была проведена визуализация выходного излучения на термочувствительной плёнке при работе ГБО на третьей и второй циклотронной гармонике (см. рис. 7).

Мощность выходного излучения измерялась в импульсном режиме специально разработанным калориметром, предназначенным для измерения мощности волновых квазигауссовых пучков в широком диапазоне частот 0,26÷0,65 ТГц. Его принцип действия основан на изменении объёма жидкости при поглощении энергии излучения. Измеренная мощность выходного излучения ГБО при работе на третьей циклотронной гармонике с частотой 0,3938 ТГц составила 370 Вт,



Рис. 6. Измеренная (сплошная линия) и расчётная (штриховая линия) структуры излучения, а также расчётная картина интенсивности поля излучения для рабочей моды  $TE_{3,7}$  с частотой 0,394  $T\Gamma$ ц (*a*) и для рабочей моды  $TE_{2,5}$  с частотой 0,267  $T\Gamma$ ц (*b*) на расстоянии 100 мм от выходного окна (*x* и *y* — декартовы координаты в поперечной плоскости,  $P/P_{\rm max}$  — нормированная на максимум мощность выходного излучения)



Рис. 7. Визуализированная структура излучения, полученная на расстоянии 250 мм от выходного окна при работе ГБО на третьей (a) и второй (b) циклотронной гармонике

что оказалось на 90 Вт меньше расчётной (см. рис. 8*a*). Как показало моделирование, это может быть результатом уменьшения среднего питч-фактора с увеличением тока пучка или продольной нерегулярности, связанной с погрешностями при изготовлении резонатора. Соответствующая

Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов, И.В. Ошарин и др.

362

эффективность генератора составила приблизительно 1,7 %. Также была измерена мощность выходного излучения ГБО при работе на соседней моде резонатора  $TE_{2,5}$  на второй циклотронной гармонике. В этом случае мощность выходного излучения и эффективность генератора составили 900 Вт и 4,2 % соответственно (см. рис. 8 $\delta$ ).

После проведённых измерений ГБО был выведён в режим непрерывной генерации и стабильно работал в течение 30 мин. Осциллограмма момента включения гиротрона и первых 1,5 мин его работы показала стабильный уровень сигналов с датчика тока электронного пучка и с детектора сверхвысоких частот (см. рис. 5*6*). Датчик, измеряющий давление (степень вакуума) в приборе, так же имел стабильные показания в течение всех 30 мин работы, что свидетельствует об отсутствии перегрева элементов прибора.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНКУРЕНЦИИ В ГБО ВОЛН, ВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ НА ВТОРОЙ И ТРЕТЬЕЙ ЦИКЛОТРОННЫХ ГАРМОНИКАХ

Как уже упоминалось выше, в эксперименте с ГБО в одном и том же регулярном резонаторе при слегка разных (около 5 Тл) магнитных полях селективно возбуждались две моды:  $TE_{2,5}$  на второй циклотронной гармонике (частота генерации 0,27 ТГц) и  $TE_{3,7}$  на третьей циклотронной гармонике (частота генерации 0,394 ТГц). Зоны генерации этих двух мод были разнесены по магнитному полю (см. рис. 9). Селективная генерация волны на второй циклотронной гармонике наблюдалась в области ведущего магнитного поля около и выше B = 5,02 Тл. Зона генерации третьей гармоники располагалась в области более низкого поля, т.е. менее B = 4,96 Тл.

В качестве отдельной задачи было проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование процесса смены номера рабочей циклотронной гармоники при работе в области магнитных полей 4,96 Тл < B < 5,02 Тл, когда имеет место конкуренция двух волн, возбуждаемых на разных гармониках. Рисунок 9 иллюстрирует типы режимов, имевших место в численном моделировании процесса конкуренции двух мод. Расчёты гиротрона проводились на основе пространственно-временно́го формализма, подробно описанного в работах [33, 34] и обобщённого на случай конкуренции двух волн, взаимодействующих с пучком на разных циклотронных гармониках. При этом параметры рабочего электронного пучка (включая разброс скоростей и возможное отклонение ведущих центров от оси резонатора) брались из упомянутых выше расчётов электронно-оптической системы данного гиротрона.

В других режимах мы видим совместную генерацию этих двух волн. Процесс конкуренции мод может иметь довольно сложный характер. В частности, в режиме 3+2 (заштрихованная область на рис. 9) имеет место совместная генерация двух волн с автомодуляциями мощностей их выходных сигналов (см. рис. 106). Такие режимы уверенно регистрировались в экспериментах и получались в численных двухмодовых пространственно-временных расчётах. Заметим, что, как правило, автомодуляционные режимы наблюдаются в электронных генераторах (включая генераторы типа лампы обратной волны (ЛОВ)) при рабочих токах, существенно превышающих стартовый порог их возбуждения [33, 35, 36]. В данном случае, однако, автомодуляционные двухволновые режимы регистрируются, когда рабочие токи достаточно близки к стартовым порогам обеих волн.

При увеличении магнитного поля автомодуляционная совместная генерация двух волн переходит в двухволновый режим, но без автомодуляций (режим 3+2, незаштрихованная область на рис. 9). В таком режиме сначала возбуждается третья продольная мода волны на третьей циклотронной гармонике в режиме ЛОВ (см. рис. 106), затем волна на второй гармонике подавляет этого конкурента, однако ещё позже возбуждается более низкая продольная мода волны на третьей гармонике (обладающая более высокой эффективностью электронно-волнового взаимо-

Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов, И.В. Ошарин и др.

363



Рис. 8. Измеренная мощность выходного излучения (кресты) и коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$  (треугольники) при работе ГБО на третьей (a) и на второй (b) циклотронной гармонике



Рис. 9. Результаты моделирования конкуренции волн, возбуждаемых на второй и третьей циклотронных гармониках. Показаны зоны разных типов конкуренции этих волн в плоскости магнитное поле—рабочий ток на фоне диаграмм их стартовых токов: зона 3 — устойчивая генерация третьей циклотронной гармоники, заштрихованная зона 3+2 — нестационарная генерация одновременно двух волн, незаштрихованная зона 3+2 — стационарная двухчастотная генерация, зона 2 — одномодовая генерация второй гармоники. Сплошные синяя и красная линии соответствуют диаграммам стартовых токов для второй и третьей гармоник

действия на нелинейной стадии генерации) и её генерация происходит одновременно с генерацией волны на второй циклотронной гармонике. Даже в режиме 2 (см. рис. 9), где вторая гармоника явно подавляет третью, в установившемся режиме генерации третья гармоника всё же присутствует, хотя и с очень низким уровнем мощности (см. рис. 10г). Заметим, что, согласно численным расчётам, такая картина продолжает иметь место и при дальнейшем повышении рабочего магнитного поля, когда рабочий ток оказывается ниже стартового тока волны на третьей гармонике: даже в такой ситуации небольшая доля мощности третьей гармоники продолжает присутствовать в выходном сигнале.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что в ИПФ РАН разработан и создаётся первый в мире субтерагерцовый гиротрон с большой орбитой электронов непрерывного действия, предназначенный для работы сразу на нескольких (на второй, третьей, четвёртой) циклотронных гармониках. Этот прототип универсального генератора рассчитан на малую для высоких гармоник энергию частиц 30 кэВ и ток до 0,7 A, что соответствует мощности электропитания до 21 кВт. В данном генераторе при работе на второй и третьей циклотронных гармониках в сравнительно слабом



Рис. 10. Результаты численного моделирования конкуренции двух волн (левый столбец:  $\eta_{2,5}$  и  $\eta_{3,7}$  волновые КПД генерации волн TE<sub>2,5</sub> (зелёные линии) и TE<sub>3,7</sub> (фиолетовые линии) соответственно, t — время) и полученные в длинноимпульсном эксперименте осциллограммы, соответствующие сложным двухволновым режимам (правый столбец). Импульсы напряжения (жёлтые линии), электрического тока (синие линии), а также мощностей волн на выходе на второй и третьей (зелёные линии справа) и третьей (фиолетовые линии справа) циклотронных гармониках. Подавление волны на второй циклотронной гармонике (a), автомодуляционная соместная генерация двух волн (b), стабильная совместная генерация двух волн (b), подавление волны на третьей гармонике (z)

магнитном поле (до 5 Тл) уже получена генерация когерентного излучения на частотах 0,27 и 0,39 ТГц соответственно. Следует отметить, что подавляющее большинство современных спектрометров для динамической поляризации ядер используют источники излучения с частотами 0,263; 0,395 и 0,527 ТГц. На мировом рынке эти приборы представлены разработками компании Bruker BioSpin в сотрудничестве с СРІ (США) [19]. Все упомянутые частоты генерируются гиротронами, работающими на 2-й циклотронной гармонике в криомагнитах с полями 5, 7 и 10 Тл

Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов, И.В. Ошарин и др.

365

соответственно. Универсальная система ГБО позволяет объединить генерацию на всех трёх частотах с одними и теми же электронно-оптической системой и коллектором, замены требуют только резонатор (резонансная мода) и система формирования и вывода излучения. Такой ГБО на всех частотах работает в одном криомагните с полем 5 Тл. Объединить генерацию на всех трёх частотах в одной системе ГБО позволяет селективная работа на 2-й, 3-й и 4-й циклотронных гармониках.

Исследования, которые ведутся сегодня с целью подготовки следующих экспериментов на данной установке, можно разделить на два направления. Во-первых, предстоит реализация работы данного гиротрона на четвёртой циклотронной гармонике на частоте 0,52 ТГц. Слабость электронно-волнового взаимодействия на столь высокой гармонике и, как следствие, протяжённость (и высокая дифракционная добротность) рабочего резонатора делают одной из основных проблем в таком генераторе большие омические потери (более 95 % в случае традиционного гиротронного резонатора). Для решения этой проблемы предложен, разработан и детально исследован в численных расчётах секционированный резонатор, обеспечивающий возбуждение относительно далёкой от отсечки и, следовательно, обладающей пониженной дифракционной добротностью продольной моды в эффективном гиротронном режиме. В случае генерации на четвёртой гармонике при длине рабочего резонатора около 50 длин волн полученная в расчётах мощность выходного излучения для пучка с током 0,7 А при ускоряющем напряжении 30 кВ достигала 130 Вт при волновом (выходном) КПД около 0,6 %, электронный КПД в этом случае составлял около 2 %, а доля омических потерь не превышала 60 % [37].

Вторым направлением исследований на данной установке является повышение ускоряющего напряжения рабочего электронного пучка с 30 до  $35 \div 45$  кВ с одновременным увеличением магнитного поля с 5 до 6,3 Тл. Это должно дать возможность расширения частотного диапазона ГБО до 0,65 ТГц. Простейшие оценки и детальные расчёты показывают, что для этого индукция ведущего магнитного поля должна быть увеличена почти до 6,3 Тл при максимальном допустимом для данной системы ускоряющем напряжении 45 кВ. При этом в режиме ускоряющего напряжения 35 кВ и магнитного поля 5,6 Тл возможна реализация генерации на также перспективной для спектроскопии частоте 0,585 ТГц. В результате будет создан прототип универсального, относительно компактного и доступного генератора для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса. Такой генератор обеспечивает непрерывную стабильную работу на нескольких частотах, расположенных в частотном диапазоне 0,26 $\div$ 0,65 ТГц.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17–19–01605). Авторы признательны за помощь в измерениях резонансной частоты выходного окна и частоты генерации В.В. Паршину и М.А. Кошелеву и благодарят И.В. Бандуркина, Н.А. Завольского и А.В. Чиркова за расчёты и анализ экспериментальных результатов. Особая благодарность выражается В.Л. Братману за постоянное внимание и поддержку.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гапонов А. В., Петелин М. И., Юлпатов В. К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1414–1453.
- 2. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 2004. 335 p.
- 3. Chu K. R. // Rev. Modern Phys. 2004. V. 76, No. 2. P. 489–540. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.489

- 4. Becerra L. R., Gerfer G. J., Temkin R. J., et al. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 3561–3564. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.3561
- Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Yu. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. Art. no. 015101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101
- Bratman V. L., Kalynov Yu. K., Manuilov V. N. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. Art. no. 245101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.245101
- Notake T., Saito T., Tatematsu Y., et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. Art. no. 225002. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.225002
- Венедиктов Н. П., Дубров В. В., Запевалов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260–268.
- Alberti S., Braunmueller F., Tran T. M., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. Art. no. 205101. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.205101
- Idehara T., Ogawa I., Mitsudo S., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, No. 3. P. 903–909. https://doi.org/10.1109/TPS.2004.827614
- Denisov G. G., Glyavin M. Yu., Fokin A. P., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. Art. no. 084702. https://doi.org/10.1063/1.5040242
- 12. Griffin R.G., Prisner T.F. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. P. 5737–5740. https://doi.org/10.1039/c0cp90019b
- Idehara T., Saito T., Ogawa I., et al. // Appl. Magn. Resonance. 2008. V. 34. P. 265–275. https://doi.org/10.1007/s00723-008-0132-6
- Denisenkov V., Prandolini M. J., Gafurov M., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. P. 5786–5790. https://doi.org/10.1039/c003697h
- Nanni E. A., Barnes A. B., Griffin R. G., Temkin R. J. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011.
  V. 1, No. 1. P. 145–163. https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159546
- Bajaj V.S., Farrar C.T., Hornstein M.K., et al. // J. Magn. Resonance. 2011. V. 213, No. 2. P. 404–409. https://doi.org/10.1016/j.jmr.2011.09.010
- Torrezan A. C., Shapiro M. A., Sirigiriet J. R., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2011. V. 58, No. 8. P. 2777–2783. https://doi.org/10.1109/TED.2011.2148721
- Griesinger C., Bennati M., Vieth H. M., et al. // Prog. Nucl. Magn. Res. Spectr. 2012. V. 64. P. 4–28. https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2011.10.002
- Blank M., Borchard P., Cauffman C., et al. // Proc. 4th Int. Workshop «Strong Microwaves in Plasmas». 24–30 July 2014, Nizhny Novgorod. P. 13.
- 20. Jory H. Investigation of electronic interaction with optical resonators for microwave generation and amplification : R&D Tech. Rep. ECOM-01873-F. Palo Alto : Varian Associates, 1968. 20 p.
- 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
- 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
- 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
- 24. 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
- Bandurkin I. V., Bratman V. L., Kalynov Yu. K., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018.
  V. 65, No. 6. P. 2287–2293. https://doi.org/10.1109/TED.2018.2797311
- Kalynov Yu. K., Bratman V. L., Manuilov V. N., Fix A. Sh. // Proc. 8th Int. Workshop «Strong Microwaves: Sources and applications». 9–16 July 2011, Nizgny Novgorod. P. 88.
- 27. Kalynov Yu. K., Manuilov V. N. // IEEE Trans. Electron Devices. 2016. V. 63, No. 1. P. 491–496.

https://doi.org/10.1109/TED.2015.2501023

- Kalynov Yu. K., Manuilov V. N., Zaslavsky V. Yu. // Int. J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2018. V. 39. No. 8. P. 738–748. https://doi.org/10.1007/s10762-018-0508-0
- Bratman V. L., Idehara T., Kalynov Yu. K., et al. // Int. J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2006. V. 27, No. 7. P. 1063–1071. https://doi.org/10.1007/s10762-006-9094-7
- Samsonov S. V., Denisov G. G., Gachev I. G., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59, No. 8. P. 2250–2255. https://doi.org/10.1109/TED.2012.2196703
- Kalynov Yu. K., Manuilov V. N., Fiks A. Sh., Zavolskiy N. A. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114. Art. no. 213502. https://doi.org/10.1063/1.5094875
- 32. Третьяков М. Ю., Калынов Ю. К. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 5. С. 74–81.
- 33. Savilov A. V., Bespalov P. A., Ronald K., Phelps A. D. R. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14, No. 11. Art. no. 113104. https://doi.org/10.1063/1.2786059
- Бандуркин И. В., Глявин М. Ю., Завольский Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 729–742.
- Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П. // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький : ИПФ АН СССР, 1981. С. 101–144.
- 36. Гинзбург Н.С., Сергеев А.С. // ЖТФ. 1991. Т. 61, № 6. С. 133–140.
- 37. Bandurkin I. V., Kalynov Y. K., Makhalov P. B., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64, No. 1. P. 300–305. https://doi.org/10.1109/TED.2016.2629029

Поступила в редакцию 8 июня 2020 г.; принята в печать 23 июля 2020 г.

### UNIVERSAL SUBTERAHERTZ LARGE-ORBIT GYROTRON: OPERATION AT THE SECOND AND THIRD CYCLOTRON HARMONICS

Yu. K. Kalynov, V. N. Manuilov, I. V. Osharin, A. V. Savilov, and A. Sh. Fiks

Coherent subterahertz radiation in the continuous-wave regime was obtained in a large-orbit gyrotron (LOG) operated at a high harmonic of the cyclotron frequency. An electron–optical system containing a gun with a cusp followed by a section of adiabatic magnetic compression with a factor of 1000 ensures the formation of a 30 keV/0.7 A helical axis-encircling electron beam with acceptable velocity spread and pitch factor in a magnetic field of 5 T. Stable single-mode operation was obtained at frequencies of 0.394 and 0.267 THz with radiation powers of 0.37 and 0.9 kW at the third and second cyclotron harmonics, respectively. Tuning of the generation frequency in the gyrotron during its operation at the second cyclotron harmonic and complex regimes of competition of two waves excited at the second and third cyclotron harmonics are also studied.