

Ключевые элементы гиротрона с рабочей частотой 780 ГГц

А.С. Зуев, О.П. Планкин, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, А.С. Седов, А.П. Фокин, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация. В работе проанализированы особенности построения маломощного гиротрона терагерцового диапазона. Представлены первые результаты моделирования электронно-оптической и электродинамической подсистем гиротрона с рабочей частотой 780 ГГц, предназначенного для спектроскопических приложений. Гиротрон оптимизируется для работы в непрерывном режиме на второй гармонике гирочастоты.

Ключевые слова: ЯМР, ДПЯ, спектроскопия, гиротрон, высокая циклотронная гармоника, терагерцовое излучение, электронные пучки

1. Введение

Сегодня одним из основных направлений развития гиротронов является продвижение в терагерцовый диапазон вплоть до 1 ТГц и далее [1–4]. Условие циклотронного резонанса между электронами и излучением в гиротроне имеет вид

$$\omega \approx n\omega_H, \quad (1)$$

где ω — частота выходного излучения, $n = 1, 2, 3 \dots$ — номер гармоники гирочастоты, синхронной с электромагнитной волной, $\omega_H = e_0 B_0 / \gamma m_0$ — релятивистская циклотронная частота электрона, B_0 — магнитная индукция поля в пространстве взаимодействия, e_0 и m_0 — заряд и масса покоя электрона, $\gamma = 1 + e_0 U_0 / m_0 c^2$ — Лоренц-фактор, U_0 — ускоряющее напряжение, c — скорость света. Для обеспечения условия (1) в терагерцовом диапазоне требуются сильные магнитные поля. В настоящее время существуют магнитные системы, работающие в стационарном режиме с магнитной индукцией до 20 Тл, что позволяет реализовать гиротроны на основном циклотронном резонансе с частотой генерации до 560 ГГц.

Перспективным способом повышения частоты является переход к работе на высоких циклотронных гармониках. Такой подход позволяет значительно (в n раз) снизить требование к величине магнитного поля при работе на заданной частоте или многократно поднять частоту генерации при работе с заданным уровнем магнитного поля. В частности, в случае использования имеющего в ИПФ РАН криомагнита JMTD-15T52 с максимальным полем 15 Тл становится возможной реализация гиротрона с рабочей частотой 780 ГГц на второй гармонике гирочастоты. Указанная частота является востребованной для динамической поляризации ядер в спектроскопии ядерного магнитного резонанса (DNP-NMR) [5–7] в спектрометре с ларморовской частотой (по протонам ^1H) 1200 МГц.

2. Выбор рабочей моды

Проектирование гиротрона, работающего на высокой циклотронной гармонике, как правило, начинается с выбора рабочей моды с учётом конкуренции, особенно, со стороны мод, работающих на более низких гармониках гирочастоты. При этом выбор высокой поперечной моды позволяет снизить тепловую нагрузку на стенки резонатора. С другой стороны, привлекательным является выбор моды с меньшим радиусом каустики, поскольку такие моды имеют хорошую связь с электронным

пучком и позволяют снизить долю омических потерь и, соответственно, поднять мощность выходного излучения по сравнению, например, с модами шепчущей галереи. При этом радиус электронного пучка в пространстве взаимодействия должен быть достаточно велик для построения электронно-оптической системы. Как правило, для эффективного электронно-волнового взаимодействия радиус каустики рабочей моды близок к среднему радиусу пучка в рабочем пространстве.

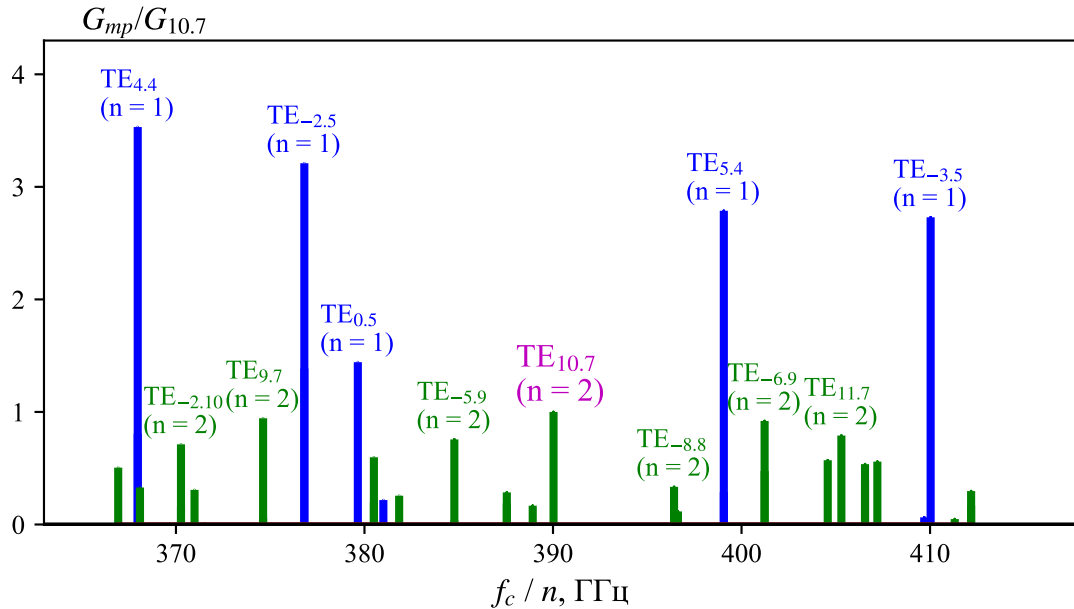


Рисунок 1. Спектр вблизи моды TE_{10,7} ($n = 2$) при радиусе пучка $R_b = 0,59$ мм.

Руководствуясь указанными ограничениями для работы на частоте 780 ГГц на второй циклотронной гармонике выбрана мода TE_{10,7}. Радиус резонатора составил 2,07 мм, радиус встраля — 0,59 мм, рабочая частота — около 780 ГГц. Спектр вблизи моды TE_{10,7} представлен на рисунке 1. У моды TE_{10,7} есть сильный конкурент — TE_{-2,5} на основном циклотронном резонансе, отстоящий по спектру на $-3,4\%$.

Выбор моды определяет дальнейшее построение подсистем гиротрона. Ниже в кратком изложении приведены результаты моделирования электронно-оптической (ЭОС) и электродинамической подсистем гиротрона.

3. Электронно-оптическая система

Численное моделирование электронной оптики выполнено при помощи разработанного в ИПФ РАН комплекса программ ANGEL [8]. Предлагается триодная конфигурация электронной пушки для гибкого управления параметрами пучка в широком диапазоне напряжений. Конфигурация предложенной ЭОС показана на рисунке 2. Форма катода выбрана в виде конуса для простоты изготовления, а форма анода — в виде цилиндра с целью снижения влияния на пучок продольного смещения катода, например, из-за теплового расширения.

Угол наклона образующей эмиттера к оси прибора выбран равным 40 градусов для формирования ламинарного электронного пучка. Радиус эмиттера после оптимизации составил 4,3 мм, а радиус анода — 15 мм. Эмиттер катода расположен на расстоянии 528 мм от центра магнитного поля. Основные параметры спроектированной ЭОС указаны в таблице 1.

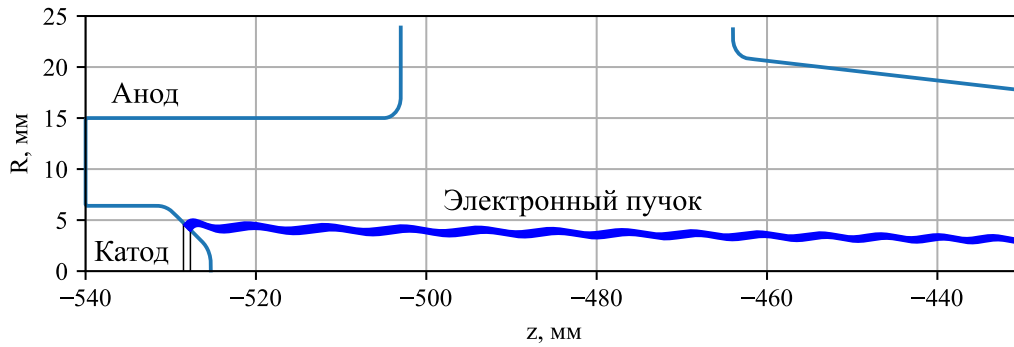


Рисунок 2. Конфигурация электронно-оптической системы.

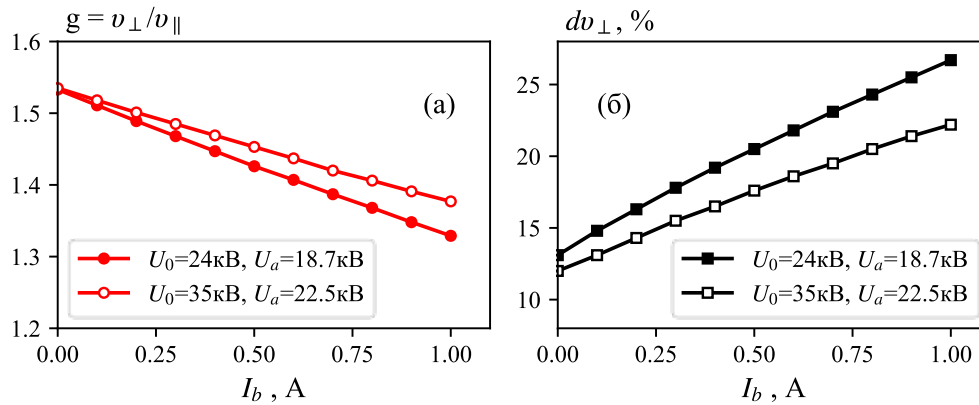


Рисунок 3. Зависимости питч-фактора (а) и разброса осцилляторных скоростей (б) от тока.

Таблица 1. Основные параметры конфигурации ЭОС

Радиус катода R_c , мм	4,3
Радиус анода R_a , мм	15
Угол наклона катода ψ в градусах	40
Перемагничивание B_0/B_c	52,9
Положение эмиттера Z_{em} , мм	528
Ширина эмиттера L_{em} , мм	0,8
Плотность тока эмиссии при токе $I_b = 0,6$ А, А/см ²	2,78

Предполагается, что гиротрон проектируется для работы в двух режимах с разными ускоряющими напряжениями 24 кВ и 35 кВ, анодными напряжениями 18,7 кВ и 22,5 кВ соответственно и рабочим током до 0,6 А. Напряженность электрического поля на эмиттере составила 3,81 кВ/мм и 4,58 кВ/мм соответственно. На рисунке 3 приведены зависимости среднего питч-фактора и разброса осцилляторных скоростей пучка в пространстве взаимодействия для двух рассматриваемых режимов работы.

Для осаждения пучка предлагается использовать коллекторную систему длиной 300 мм конусной формы для уменьшения тепловой нагрузки на стенки, с максимальным диаметром 12,4 мм. Расчет показывает, что тепловая нагрузка при токе 0,6 А и уск. напряжении 35 кВ не превышает 0,6 кВт/см², а средняя составляет 0,3 кВт/см², что является допустимым с учетом водяного охлаждения.

К преимуществам выбранной схемы электронно-оптической системы можно отнести её устойчивость к тепловым сдвигам катода вдоль оси прибора. Параметры пучка слабо не зависят от продольного сдвига. Условным недостатком можно считать

достаточно большую общую длину прибора — около полутора метров, что является следствием распределения поля криомагнита.

4. Результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия

Моделирование электронно-волнового взаимодействия выполнено с учётом имеющегося высоковольтного источника питания катода с ускоряющим напряжением $U_0 = 24$ кВ при рабочих токах 0,3 А и 0,6 А. На рисунке 4 приведены расчётные зависимости мощности выходного излучения от длины резонатора при питч-факторе 1,1, 1,3 и 1,5. Скоростной разброс осцилляторных скоростей был зафиксирован и равен 30%. При питч-факторе 1,3 и токе 0,3 А оптимальная длина резонатора составляет около 14 мм. Как видно на рисунке 4а, выбранная длина резонатора позволяет обеспечить приемлемый уровень мощности и при питч-факторе $g = 1,1$.

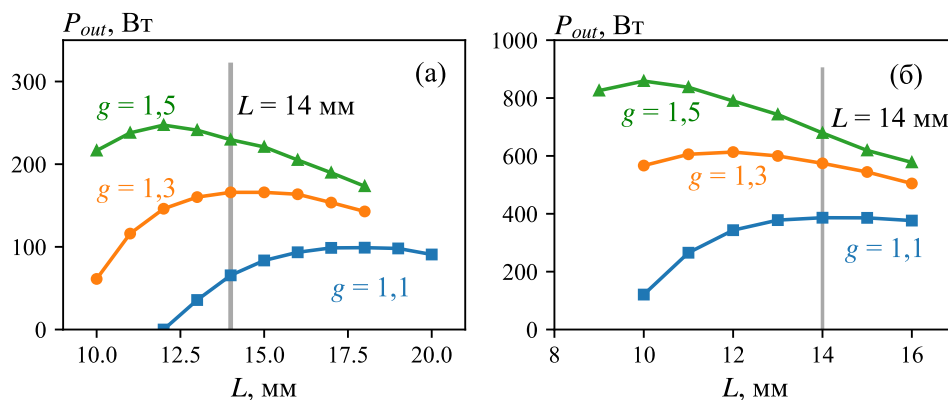


Рисунок 4. Зависимость мощности от длины резонатора при токе 0,3 А (а) и 0,6 А (б).

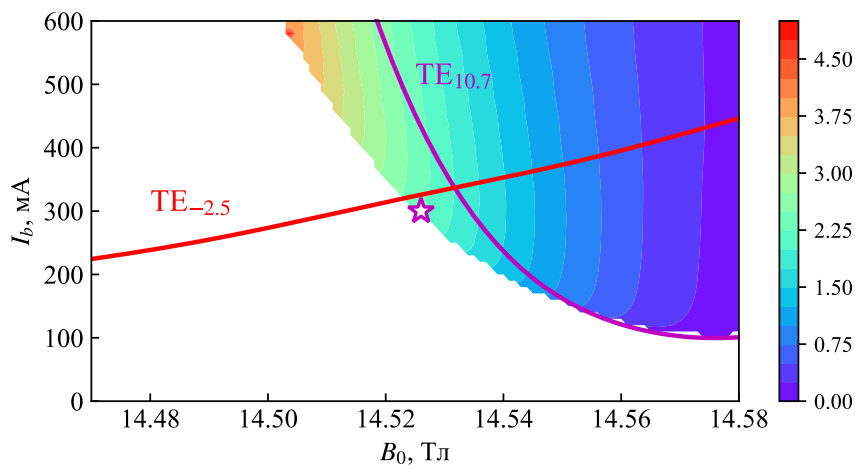


Рисунок 5. Изолинии волнового КПД от магнитного поля и тока пучка для резонатора с длиной 14 мм. Сплошными линиями показаны стартовые токи мод $TE_{-2.5}$ (красная линия) и $TE_{10.7}$ (фиолетовая линия) в зависимости от магнитного поля. Параметры моделирования: $U_0 = 24$ кВ, $g = 1.3$, $dv_{\perp} = 30\%$.

На рисунке 5 показаны области с разными уровнями КПД на плоскости магнитного поля и тока пучка и построены зависимости стартовых токов мод $TE_{-2.5}$ и $TE_{10.7}$ от магнитного поля для резонатора с длиной 14 мм. Анализ спектра мод и исследование паразитных колебаний в рамках линейной теории [9] приводят к выводу, что рабочий режим, свободный от конкуренции со стороны мод на основном циклотронном резонансе, возможен при токе около 0,3 А, при большем токе появляется конкурент — мода $TE_{-2.5}$. Поэтому профиль резонатора оптимизировался

для работы с током 0,3 А. На рисунке звездой указан режим с наибольшим КПД при токе 0,3 А.

Расчётная мощность выходного излучения при питч-факторе 1,3 после оптимизации составила около 165 Вт при волновом КПД 2,3% и электронном КПД 7,8%. При этом максимальная удельная тепловая нагрузка на стенки резонатора составила около 0,45 кВт/см². В случае повышения ускоряющего напряжения с 24 кВ до 35 кВ выходная мощность увеличивается до 230 Вт с волновым и электронным КПД 2,2% и 8,5% соответственно, а максимальная удельная нагрузка составит 0,59 кВт/см², что является приемлемым значением.

Важным фактором, влияющим на работу гиротрона, является качество внутренней поверхности резонатора. В ходе расчётов параметр шероховатости k_{skin} был взят равный двум, что соответствует эффективной проводимости 14,25 См/мкм при табличной проводимости бескислородной меди 57 См/мкм. Ещё одним негативным фактором является возможная конусность регулярной части резонатора. Как показали исследования, даже разница радиусов на концах резонатора в 2 микрона приводит к отсутствию генерации.

5. Заключение

Рассмотрен перспективный проект гиротрона с частотой излучения 780 ГГц. Расчётный уровень мощности выходного излучения с большим запасом покрывает потребности спектроскопических приложений в данном диапазоне. Представленные результаты моделирования подсистем гиротрона имеют предварительный характер. Планируется дальнейшая доработка проекта с целью расширения рабочего диапазона по току электронного пучка и повышения надежности прибора.

Работа выполнена в рамках **проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007.**

Список литературы.

1. Глявин М. Ю. и др. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – №. 6. – С. 667-677.
2. Glyavin M. Y., Kuftin A.N., Morozkin M.V., et al. A 250-Watts, 0.5-THz Continuous-Wave Second-Harmonic Gyrotron // IEEE Electron Device Letters. – 2021. – Т. 42. – №. 11. – С. 1666-1669.
3. Chen X., et al. Experimental Study on Continuous Frequency Tuning of a Second-Harmonic 800-GHz Gyrotron // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2024. – Т. 71. – №. 1. – С. 797–801.
4. Tatematsu Y., et al. First Experiment of a 600-GHz CW Gyrotron Developed as Light Source for EMF Exposure Assessment // IEEE Electron Device Letters. – 2025. – Т. 46. – №. 2. – С. 310-313.
5. Rosay M., et al. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR // Journal of Magnetic Resonance. — 2016. — Vol. 264. — P. 88–98.
6. Nanni E. A., et al. Microwave field distribution in a magic angle spinning dynamic nuclear polarization NMR probe. // Journal of Magnetic Resonance. – 2011. – Т. 210. – №. 1. – С. 16–23.
7. Blank M. and Felch K. Millimeter-wave sources for DNP-NMR. // Handbook of High Field Dynamic Nuclear Polarization, ed. V. K. Michaelis, R. G. Griffin, B. Corzilius, S. Vega. – Chichester : Wiley and Sons, 2020. – С. 155–166.
8. Планкин О. П., Семенов Е. С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона. // Вестник НГУ, серия «Физика». – 2013. – Т. 8. – №. 2. – С. 44-54.
9. Семенов Е. С. и др. Расчёт электродинамических характеристик и электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов на основе комплекса программ ANGEL // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1 (25). С. 35–47.