

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 629.3.052.4

МАГНИТОБРОНИРОВАННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ТЕПЛЫХ
СОЛЕНОИДОВ ДЛЯ ГИРОПРИБОРОВ К-ДИАПАЗОНА

© 2020 г. М. Д. Проявин^{a,*}, В. Н. Мануилов^{a,b}, И. Г. Гачев^a, В. В. Маслов^a,
М. В. Морозкин^a, А. Н. Куфтин^a, Е. М. Тайс^c, М. Ю. Глявин^a

^aИнститут прикладной физики РАН

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^bНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Гагарина, 23

^cНаучно-производственное предприятие "ГИКОМ"
Россия, 603155, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

*e-mail: pmd@ipfran.ru

Поступила в редакцию 04.08.2019 г.

После доработки 07.08.2019 г.

Принята к публикации 14.08.2019 г.

Создана и экспериментально испытана магнитобронированная система для нового поколения технологических комплексов на основе непрерывных гиротронов К-диапазона (28–50 ГГц), работающих на основном циклотронном резонансе с выходной мощностью ≥ 25 –30 кВт. Продемонстрирована возможность создания однородного (лучше 0.5%) участка магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия длиной несколько десятков миллиметров. Оптимизация конфигурации, форм и используемого материала ферромагнитных экранов для соленоидов с медной обмоткой и диаметром рабочего отверстия несколько десятков миллиметров позволила получить рекордные значения постоянных магнитных полей по отношению к мощности потребления. Для режима работы с однородным участком 65 мм и индукцией магнитного поля 1.03 Тл мощность потребления соленоида составила 12.5 кВт, что дает возможность в случае использования гиротрона с полным к.п.д. излучения около 50% значительно (примерно в 1.5 раза) повысить эффективность комплекса в целом, что заметно превосходит существующие аналоги.

DOI: 10.31857/S0032816220010073

ВВЕДЕНИЕ

Гироприборы К-диапазона используются в качестве источников мощного непрерывного электромагнитного излучения в технологических комплексах для получения алмазных пленок и дисков, синтеза диэлектрических материалов с уникальными физико-техническими свойствами, производства пучков многозарядных ионов [1–3]. Типичная мощность гироприборов, входящих в состав лабораторных комплексов, составляет несколько киловатт. Новые потенциальные применения технологических гиротронов, а также переход к промышленным установкам требуют повышения мощности в несколько раз (до ≥ 25 –30 кВт), что в совокупности с непрерывным режимом работы обуславливает необходимость повышения энергоэффективности комплекса в целом. Подавляющее число современных технологических гиротронов работает на второй гармонике циклотронной частоты [4], что позволяет использовать соленоиды с водяным (или масляным) охлаждением, магнитной индукцией около 0.5 Тл и уме-

ренным (10–15 кВт) энергопотреблением. Полный к.п.д. таких комплексов составляет около 20%.

По мере повышения генерируемой мощности существенным ограничивающим фактором становится обеспечение устойчивой одномодовой генерации рабочего типа колебаний в широком диапазоне технических параметров. При этом в гиротронах на гармониках гирочастоты наибольшую опасность представляет возбуждение паразитных мод [5]. Наиболее просто проблема селекции рабочей моды решается путем перехода к работе на основном циклотронном резонансе. Кроме того, электронно-волновое взаимодействие с первой гармоникой рабочего типа колебаний обеспечивает при выборе соответствующих условий максимально возможный к.п.д. [6]. Однако переход к генерации на основном циклотронном резонансе сопровождается двукратным повышением рабочего магнитного поля, что влечет за собой четырехкратное повышение мощности питания магнитной системы. В связи с этим актуальной задачей является снижение мощности питания

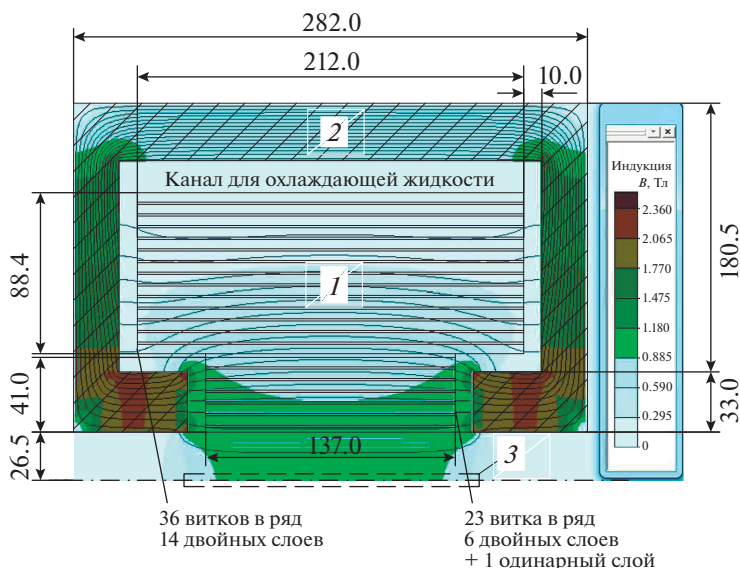


Рис. 1. Общий вид магнитной системы и карта интенсивности магнитного поля в оптимизированной м.б.с. 1 – медная обмотка м.б.с. (шина сечением $5.8 \times 2.8 \text{ мм}^2$ с лаковой изоляцией, сечение медного провода $5.17 \times 2.65 \text{ мм}^2$), 2 – ферромагнитный корпус системы, 3 – характерный масштаб области электронного пучка (штриховая линия). Размеры даны в миллиметрах.

магнитной системы, особенно для долговременных процессов, продолжительность которых может достигать нескольких недель (CVD-технологии).

Эффективным методом снижения энергопотребления магнитной системы является экранирование магнитного поля рассеяния, что позволяет либо радикально уменьшить мощность источников питания при фиксированном значении магнитной индукции, либо обеспечить заметное повышение магнитного поля при фиксированной мощности. В частности, для существующих технологических комплексов рабочие частоты могут быть сдвинуты даже в W-диапазон без использования сложных и дорогостоящих криомагнитов.

В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования магнитобронированной системы (м.б.с.), предназначенной для непрерывных гироприборов, работающих на основном циклотронном резонансе с рабочей частотой 24–50 ГГц.

ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Первые попытки как теоретического, так и экспериментального исследования гиротронов с экранированными магнитными системами были предприняты в работах [7–9]. Целью настоящей работы является создание магнитной системы для технологических комплексов (однородный участок магнитного поля длиной 65 мм, индукция 1.024 Тл), требующей минимальной переделки ис-

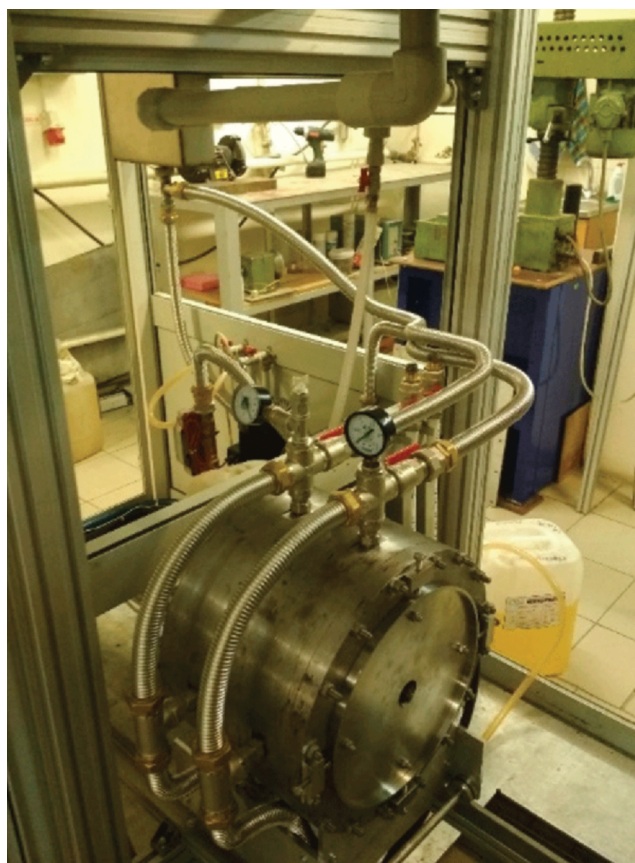


Рис. 2. Фотография м.б.с. в экспериментальном стенде.

I , А	U , В	B , Тл	P , Вт
20	23.0	0.21253	460
30	35.8	0.31750	1074
40	47.9	0.42280	1916
50	60.0	0.52705	3000
60	72.3	0.63235	4338
70	84.7	0.73535	5929
80	97.0	0.83250	7760
90	108.8	0.92210	9792
100	121.1	1.00875	12110
110	134.0	1.09050	14740
120	146.9	1.16890	17628
130	160.1	1.24670	20813
140	173.7	1.32150	24318
150	188.4	1.40420	28260
155	199.4	1.44350	30907
200	250	1.8	50000

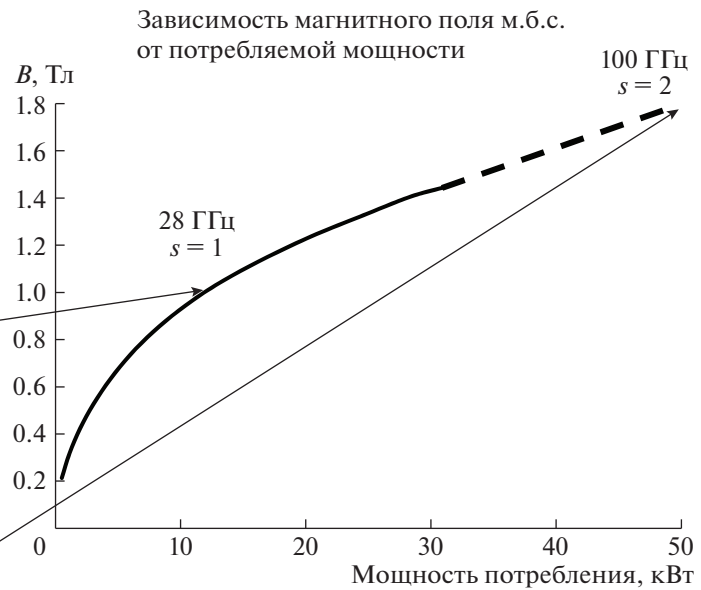


Рис. 3. Экспериментальная зависимость индукции от потребляемой мощности. Указаны соответствующие частоты генерации при работе на первой ($s = 1$) и второй ($s = 2$) гармониках циклотронной частоты. Сплошная линия – экспериментальные данные, штриховая – экстраполяция.

точников питания (энергопотребление < 15 кВт, предельные значения рабочих тока и напряжения 120 А и 120 В соответственно). Простые оценки показывают, что в такой системе энергопотребление снижается более чем в 3 раза по сравнению с аналогичной системой без экранов.

Первоначальная форма экранов выбиралась по аналогии с используемой в бронированных магнитных линзах [10]. Последующая численная оптимизация с помощью программы ELCUT 5.6 [11] по методике, использованной в работе [12], позволила определить форму и размеры катушек и ферромагнитных экранов (рис. 1). В качестве материала для экранов использована сталь АРМКО.

Экспериментальный стенд показан на рис. 2. Для охлаждения соленоида используется полиметилсилоксановая жидкость ПМС-5 и теплообменник ПМС-5–вода. Измерения индукции магнитного поля выполнены датчиком Холла (модель Lake Shore Gaussmeter Model 450) с погрешностью не более $\pm 0.10\%$.

В ходе эксперимента получена зависимость интенсивности поля B в центре соленоида от мощности источников питания P (рис. 3). В эксперименте максимальная мощность составила 31 кВт, что позволило достичь индукции магнитного поля 1.45 Тл. Экстраполяция данных до 50 кВт потребляемой мощности с учетом нелинейной зависимости $B(P)$, связанной с насыщением материала экранов, указывает на возможность генерации колебаний с рабочими частотами до 50 ГГц на первой гармонике гирочастоты (и соответственно до 100 ГГц на второй гармонике).

В режимах м.б.с. демонстрировала долговременную стабильную работу со стационарной температурой корпуса системы не выше 40°C .

В дальнейшем при модернизации м.б.с. могут быть использованы сплавы с другими B – H -характеристиками, что позволяет надеяться на дальнейшее снижение энергопотребления при тех же значениях магнитных полей. Таким образом, например, для с.в.ч.-приборов, работающих в диапазоне 20–40 ГГц на второй гармонике, может быть реализована м.б.с. с еще более эффективным магнитопроводом за счет использования сплава пермаллоя. Данный материал раньше входит в насыщение по сравнению с АРМКО, однако на уровне магнитных полей до 1 Тл некоторые модификации пермаллоя имеют в несколько раз большие значения магнитной проницаемости. Приблизительные оценки мощности потребления подобных систем (в случае АРМКО для 28 ГГц на второй гармонике требуется в 2 раза меньшее магнитное поле и соответственно в 4 раза меньшее энергопотребление (около 3 кВт) и еще меньшее в случае использования пермаллоя) позволяют надеяться на возможность создания м.б.с. без жидкостной системы охлаждения. Применение сплавов с большей индукцией насыщения (пермендюр, суперпермендюр) и утолщение экранов могут обеспечить возможность использования м.б.с. в более высоких магнитных полях. Отметим, что достигнутые в эксперименте значения магнитной индукции позволяют использовать разработанную магнитную систему для широкого класса гироприборов (генераторов и усилителей) диапазона 24–50 ГГц.

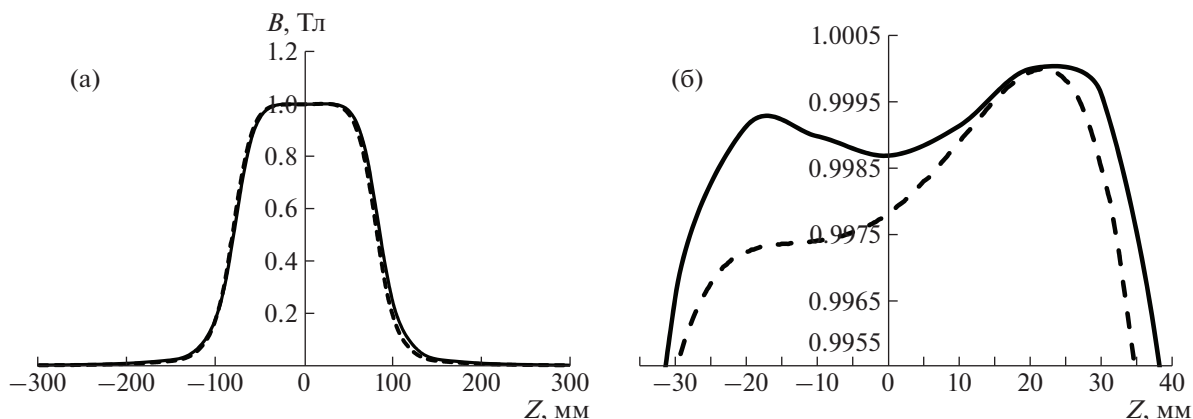


Рис. 4. Расчетное (штриховая кривая) и измеренное (сплошная кривая) распределения осевого магнитного поля, включающего соответственно область формирования электронного потока (а) и пространство взаимодействия в масштабе 0.5% по магнитному полю (нормированные значения полей) (б).

Для режима $I = 100$ А, $U = 121$ В, соответствующего входящим в состав технологических стенов источника питания и позволяющего получить магнитную индукцию 1.024 Тл, необходимую для генерации колебаний с рабочей частотой 28 ГГц, было измерено распределение магнитного поля. Продольное распределение поля на оси симметрии системы представлено на рис. 4а, а более детальный профиль поля в области пространства взаимодействия – на рис. 4б. В ходе экспериментов нарушений аксиальной симметрии магнитного поля не выявлено. Результаты экспериментов согласуются с расчетными данными. Незначительные отличия экспериментальных и расчетных данных связаны с расхождением реальных $B-H$ -характеристик и использованных в расчетной модели и могут быть легко скорректированы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана магнитобронированная система с индукцией поля 1.024 Тл при умеренном энергопотреблении (12.5 кВт), которая будет использована для создания высокоэффективного технологического комплекса на основе гиротрона мощностью до 30 кВт с частотой 28 ГГц. Результаты экспериментальных измерений совпадают с данными расчета. Показана возможность достижения полей до 1.8 Тл, что в перспективе открывает возможность разработки гироприборов в диапазоне частот 28–50 ГГц при работе на первой гармонике циклотронной частоты и вплоть до 100 ГГц – при работе на гармониках гирочастоты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке субсидии на выполнение госзадания ИПФ РАН 0035-2019-0001 и гранта РФФИ 19-32-90102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V., Koldanov V.A., Litvak A.G., Ovechkin N.M., Radishev D.B., Bykov Yu.V., Caplan M.* // *Diam. Relat. Mater.* 2006. V. 15. P. 502.
2. *Bykov Yu.V., Egorov S.V., Ereemeev A.G., Kholoptsev V.V., Rybakov K.I., Sorokin A.A.* // *J. Am. Ceram. Soc.*, 2015. V. 98. Issue 11. (Special Issue: SINTERING 2014) P. 3518. <https://doi.org/10.1111/jace.13809>
3. *Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Razin S., Zorin V., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T.* // *Journal of Instrumentation.* 2012. V. 7. P10010. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10010>
4. *Быков Ю.В., Еремеев А.Г., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Кальнова Г.И., Копелович Е.А., Лучинин А.Г., Плотников И.В., Проявин М.Д., Троицкий М.М., Холотцев В.В.* // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2018. Т. 61. № 10. С. 843.
5. *Nusinovich G.S.* // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2012. V. 27. Issue 2. P. 313. <https://doi.org/10.1109/27.772257>
6. *Bykov Yu., Glyavin M., Goldenberg A., Luchinin A., Lygin V., Zavolsky N.* // *Proc. 4th Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas.* N.Novgorod, 2000. V. 2. P. 747.
7. *Запелалов В.Е., Куфтин А.Н., Мануилов В.Н.* // *Тез. докл. XI Всесоюзн. конф. по электронике СВЧ.* Орджоникидзе. 1986. С. 136.
8. *Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е.* // *Тез. докл. X Всесоюзн. конф. по электронике СВЧ.* Т. 1. Вакуумная электроника СВЧ. Минск. 1983. С. 192.
9. *Куфтин А.Н., Белов С.П.* // *Прикладная физика.* 2000. № 3. С. 76.
10. *Глазер В.* *Основы электронной оптики* / Пер. с немецкого. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1952.
11. <http://elcut.ru>
12. *Проявин М.Д., Глявин М.Ю., Мануилов В.Н.* // *Радиотехника и электроника.* 2017. Т. 62. № 10. С. 1010. <https://doi.org/10.7868/S0033849417100138>