

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ ПРОДОЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИРОТРОНА

© 2021 г. М. Д. Проявин<sup>а,\*</sup>, М. В. Морозкин<sup>а</sup>, А. Г. Лучинин<sup>а</sup>,  
М. Ю. Глявин<sup>а</sup>, Г. Г. Денисов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт прикладной физики РАН  
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

\*e-mail: pmd@ipfran.ru

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 10.06.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Экспериментально исследовано влияние профиля магнитного поля в пространстве взаимодействия гиротрона на эффективность и частоту генерации. Профилированное магнитное поле создавалось системой из нескольких катушек малой индуктивности. Показана возможность в ~1.3 раза повысить эффективность генерации, что сопоставимо с результатами, получаемыми с использованием одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронного пучка. При этом предложенный метод более прост в реализации и может быть использован совместно с рекуперацией. Продемонстрирована также возможность управления частотой генерации в пределах, как минимум вдвое превышающих ширину спектра излучения, и с характерными временами порядка миллисекунд. Это позволяет надеяться на успешную реализацию схемы стабилизации частоты гиротрона с помощью малых изменений магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0032816220060245

### ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны давно зарекомендовали себя в качестве основных источников излучения для нагрева плазмы, они активно используются в технологических процессах микроволновой обработки материалов, расширяется число успешных спектроскопических экспериментов. Тем не менее, гиротроны продолжают оставаться предметом активных исследований. В зависимости от области приложения на первый план может выходить эффективность генерации (при с.в.ч.-нагреве) или управление спектром излучения (в задачах спектроскопии и диагностики).

Поскольку принцип работы гиротрона основан на использовании циклотронного резонанса электронов, движущихся в магнитном поле, с медленной электромагнитной волной, очевидно, что профилирование магнитного поля — изменение резонансных условий по мере изменения энергии электронов — должно оказывать значительное влияние на выходные характеристики: мощность, эффективность и частоту генерации.

Влияние продольного профиля магнитного поля на режим генерации гиротрона исследовалось в ряде работ [1–8], однако число экспери-

ментов, подтверждающих сделанные предположения, явно недостаточно.

Данная работа посвящена оптимизации и экспериментальной верификации влияния профиля магнитного поля на режим генерации гиротрона с рабочей частотой 30 ГГц, предназначенного для технологических приложений.

### ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА К.П.Д. ГИРОТРОНА

Для моделирования изменения профиля магнитного поля при включении дополнительных катушек была использована программная среда ELCUT [9]. На первом этапе был рассчитан профиль основного соленоида с учетом имеющихся данных о параметрах катушки. Результаты совпали с экспериментальными данными, полученными измерителем магнитной индукции Ш1-8 с использованием датчика Холла.

На втором этапе рассчитаны и проанализированы параметры дополнительных катушек, которые могли бы быть намотаны на корпус гиротрона в области резонатора, с учетом технологических ограничений, налагаемых геометрией лампы и проходным отверстием основного соленоида.

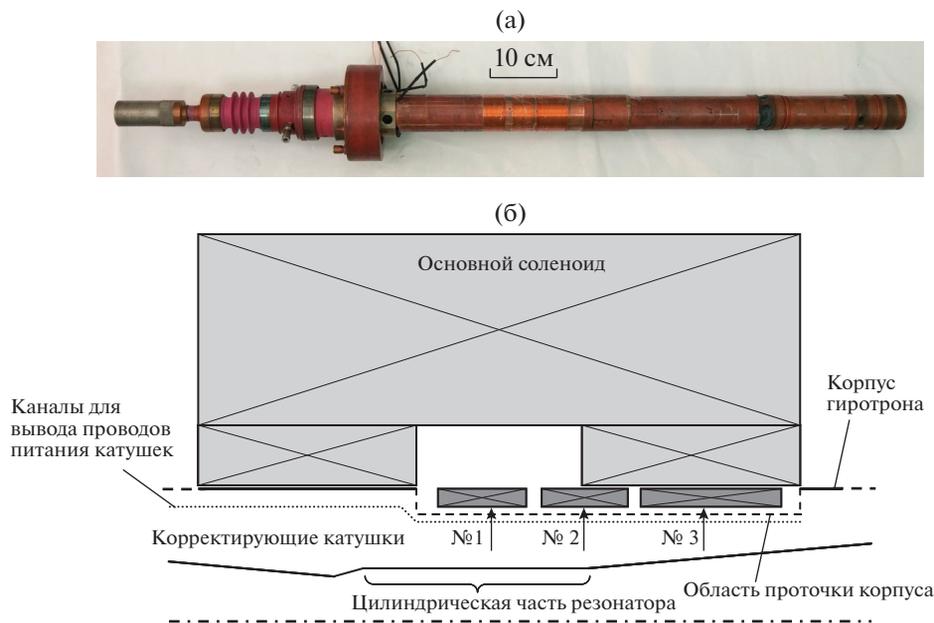


Рис. 1. Схема магнитной системы.

Исходя из полученных данных, было принято решение намотать три независимые катушки, что, с одной стороны, позволило с хорошей точностью создавать требуемое дополнительное магнитное поле, а с другой – минимизировало число дополнительных источников питания.

Диаметр отверстия магнитной системы равен 60 мм, зазор между стенкой соленоида и корпусом лампы первоначально составлял 0.1–0.2 мм. Для установки корректирующей магнитной системы была осуществлена проточка корпуса глубиной 1 мм в области расположения резонатора. Катушки намотаны проводом круглого сечения диаметром 1 мм, а для вывода контактных проводов обмоток в области проточки выполнены более глубокие канавки шириной и глубиной 1.1 мм. Минимальная толщина стенки каркаса в области канавок достаточна для соблюдения условий механической прочности, ток в катушках, требуемый для изменения поля основного соленоида на 1%, равен около 20 А. Схема размещения дополнительных катушек в основной системе показана на рис. 1.

Положение гиротрона относительно основного соленоида оптимизировалось с целью достижения максимального к.п.д. При включении дополнительных катушек положение гиротрона не изменялось, что обеспечивало корректное сравнение данных по эффективности прибора при различных профилях магнитного поля.

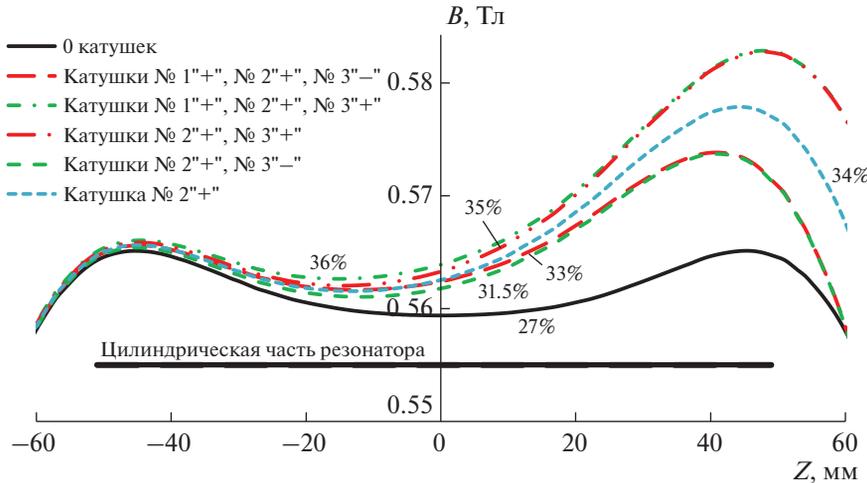
На рис. 2 представлены профили магнитного поля в области пространства взаимодействия при различных вариантах включения дополнительных катушек и для каждого профиля даны значе-

ния максимального достигнутого к.п.д. генерации.

Результаты эксперимента подтверждают ранее сделанные утверждения [4, 7], что к.п.д. может быть значительно увеличен путем коррекции профиля магнитного поля дополнительными катушками с малым энергопотреблением (поле, создаваемое дополнительными катушками, составляет около 1% от поля основного соленоида).

Как известно, в ряде случаев коррекцию магнитного поля можно осуществить за счет ферромагнитных экранов [6], но их использование ограничено относительно низкими (порядка 1 Тл) магнитными полями в силу насыщения ферромагнетиков. С другой стороны, известны случаи использования дополнительного соленоида для коррекции напряженности (но не профиля) магнитного поля в области цилиндрического участка резонатора гиротрона для быстрой подстройки условий циклотронного резонанса (циклотронной частоты электронов) в системах со сверхпроводящими соленоидами, работающими в замкнутом режиме с отключенными токовводами. В этой ситуации использование системы катушек представляет интерес для повышения к.п.д. гиротронов мегаваттного уровня мощности для управляемого термоядерного синтеза, где важную роль играет изменение к.п.д., даже на 1%.

В проведенных экспериментах с технологическим гиротроном эффективность генерации возросла более чем на треть (с 27 до 36%) по сравнению с режимом без дополнительных катушек. Согласно результатам эксперимента, основной вклад в повышение к.п.д. дает включение катуш-



**Рис. 2.** Результаты моделирования распределения магнитного поля при различном режиме работы секции корректирующих катушек. Для каждого профиля магнитного поля приведены экспериментальные значения к.п.д. генерации гиротрона. Продольное положение резонатора гиротрона неизменно. Полярность подключения соответствующих катушек обозначена знаком “+” для сонаправленного и знаком “-” для противоположно направленного включений относительно магнитного поля основного соленоида.

ки № 2, формирующей плавно нарастающее к концу области взаимодействия распределение поля, что согласуется с теоретическими оценками [7]. Эффективное влияние этой катушки наблюдалось во всем диапазоне исследованных режимов (напряжение и ток электронного пучка), в то время как независимое включение катушки № 1 оказывало влияние лишь при малых рабочих токах (не выше 1 А) и вызывало изменение к.п.д. всего на 1–2%.

Следующий наблюдаемый эффект, по-видимому, относится к области послерезонаторного взаимодействия (after cavity interaction). Известными теоретическими оценками [10–12] предсказана возможность снижения к.п.д. прибора в случае, если возникает область циклотронного резонанса в спадающем магнитном поле при соответствующем расширении электродинамического канала в области между резонатором и коллектором. При определенном соотношении расстройки циклотронного резонанса возможна ситуация, когда часть энергии волны перекачивается обратно в электронный пучок.

В силу малой длины участка, на котором выполняется указанное условие, изменение к.п.д., обусловленное этим эффектом, не слишком велико. Однако путем разнонаправленного включения катушек № 2 и № 3 можно организовать более резкое падение магнитного поля и устранить условия паразитного резонанса, что приведет к увеличению к.п.д. (1% при максимально возможных в данном эксперименте токах  $I_2 = 20$  А и  $I_3 = -20$  А в катушках).

Можно утверждать, что плавное нарастание магнитного поля к концу пространства взаимо-

действия даст гораздо более сильный эффект, чем резкий спад магнитного поля после резонатора, специально созданный встречным включением катушек (наличием каспа).

Можно оценить энергетические затраты на профилирование магнитного поля исходя из данных, представленных на рис. 3. Видно, что присутствует момент насыщения, который зависит от многих параметров и должен быть рассчитан для каждого прибора и режима работы отдельно. Вместе с тем требуемая мощность в десятки ватт более чем на два порядка меньше, чем мощность основного соленоида, т.е. обсуждаемый метод не ведет к значительному усложнению или повышению стоимости магнитной системы.

Эффект повышения к.п.д. гиротрона за счет профилирования магнитного поля в области резонатора, продемонстрированный в данной работе, может быть использован и для более мощных и высокочастотных гироприборов. Несмотря на то что мощность дополнительных катушек будет расти с увеличением как поперечных размеров лампы при росте генерируемой мощности, так и дополнительного магнитного поля при росте частоты излучения, исследованная схема представляется перспективной для широкого класса гиротронов, особенно в случае удачной интеграции дополнительных катушек в корпус прибора.

## УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Как известно, эффективным методом управления частотой генерации гиротронов является изменение магнитного поля в области взаимодействия. Управление частотой за счет дополни-

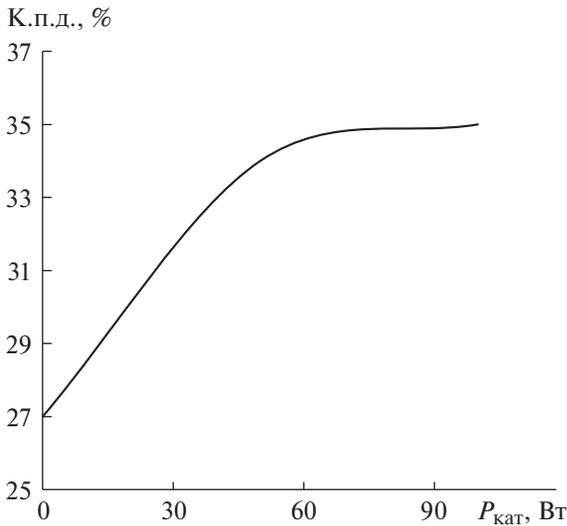


Рис. 3. Зависимость к.п.д. генерации от мощности, потребляемой корректирующими катушками.

тельной катушки, изменяющей магнитное поле по всей длине однородного участка резонатора, было исследовано в работе [13] и успешно применяется в гироприборах, использующих криомагниты [14, 15] или системы на постоянных магнитах [16, 17].

В данной работе экспериментально исследовалась возможность управления частотой за счет изменения магнитного поля на достаточно узком участке в конце области взаимодействия, что позволяет уменьшить индуктивность катушки и характерное время перестройки.

Экспериментальные зависимости, полученные с использованием анализатора спектра Keysight N9010A (от 10 Гц до 44 ГГц), представлены на рис. 4. Как и следовало ожидать, при включении катушки № 1, расположенной в центральной части резонатора, происходило сильное смещение зоны генерации (изменение расстройки циклотронного резонанса), что сопровождалось снижением эффективности генерации. Включение катушек № 2 и/или № 3 слабо сказывалось на выходной мощности и эффективности.

Как следует из анализа рис. 4а, изменение тока катушки № 2 дает большую полосу перестройки частоты. Более детальные данные для вариации тока катушки № 2 представлены на рис. 4б.

В этой серии экспериментов поле основного соленаоида было отстроено от оптимального значения, соответствующего режиму максимального к.п.д. При наблюдаемой ширине спектра излучения 0.2 МГц чувствительность частоты генерации к току дополнительной катушки составила 1 МГц/А. Индуктивность вспомогательной катушки для подстройки частоты равна 70 мкГн, что более чем на порядок меньше аналогичной величины для ка-

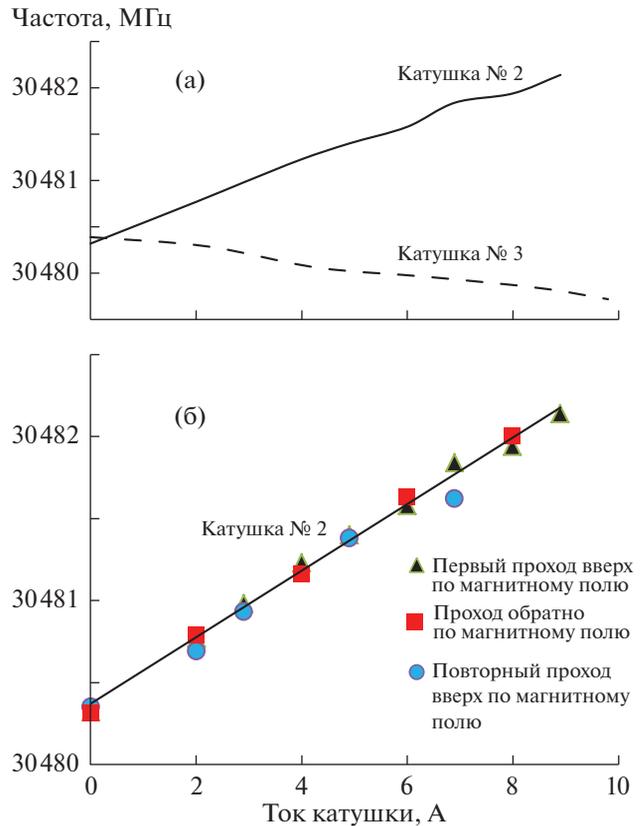


Рис. 4. Зависимость частоты генерации: а – от тока дополнительных катушек № 2 и № 3; б – от тока дополнительной катушки № 2.

тушки, использованной для стабилизации частоты в работе [13].

С учетом ограничений, накладываемых ослаблением переменного магнитного поля корпусом прибора (скин-эффект), характерная частота варьирования поля составила около 10 кГц [18], что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам модуляции (стабилизации) частоты гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. В перспективе возможна реализация схемы фазовой автоподстройки частоты гиротрона с использованием маломощной катушки индуктивности, установленной в выходной области пространства взаимодействия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность значительного увеличения к.п.д. гиротронов за счет коррекции магнитного поля в области резонатора. В технологическом гиротроне на второй гармонике гиро-частоты при выходной мощности 10 кВт на частоте 30 ГГц получено увеличение к.п.д. в 1.3 раза (с 27 до 36%) по сравнению с режимом работы при

однородном магнитном поле. Исследованы возможности перестройки частоты генерации и показано, что для этой цели достаточно изменять поле только на выходном конце резонатора.

Полученные результаты могут представлять интерес для повышения к.п.д. а также управления частотой гиротронов мегаваттного уровня мощности для управляемого термоядерного синтеза, в которых быстрое изменение основного магнитного поля затруднительно в силу большой индуктивности соленоида криомагнита.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 19-79-30071.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keier A.P. // Radiophys Quantum Electron. 1978. V. 21. P. 631.  
<https://doi.org/10.1007/BF01052043>
2. Wang X., Xue Q., Zhang S., Liu G., Zhao G., Zhao D. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2019. V. 47. № 11. P. 5159.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2943684>
3. Dumbrajs O., Nusinovich G.S. // Phys. of Plasmas. 2018. V. 25. P. 1.  
<https://doi.org/10.1063/1.5019974>
4. Gantenbein G., Borie E. // Int. J. Infrared Milli Waves Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 1990. V. 11. P. 837. Doi  
<https://doi.org/10.1007/BF01010136>
5. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. V. 32. № 1. P. 67.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2004.823904>
6. Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A., Flat F., Glyavin M., Gorbachev A., Kalynova G., Kholoptsev V., Kopelovich E., Luchinin A., Plotnikov I., Morozkin M., Vikharev A. // 34st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 17th International Conference on Terahertz Electronics. Busan, Korea, 2009. P. 1.  
<https://doi.org/10.1109/ICIMW.2009.5324962>
7. Nusinovich G.S. // International Journal of Electronics. 1988. V. 64. P. 127.  
<https://doi.org/10.1080/00207218808962789>
8. Pagonakis I.G., Avramidis K.A., Gantenbein G., Samartsev A., Jelonnek J. // Phys. of Plasmas. 2017. V. 24. P. 3.  
<https://doi.org/10.1063/1.4977460>
9. <https://elcut.ru/>
10. Zapevalov V.E., Moiseev M.A. // Radiophys. Quantum Electron. 2004. V. 47. P. 520.  
<https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000047243.18212.1d>
11. Sinitsyn O.V., Nusinovich G.S. // Phys. of Plasmas. 2009. V. 16. P. 2.  
<https://doi.org/10.1063/1.3072978>
12. Avramidis K.A., Ioannidis Z.C., Kern S., Samartsev A., Pagonakis I.G., Tigelis I.G., Jelonnek J. // Phys. of Plasmas. 2015. V. 22. P. 5.  
<https://doi.org/10.1063/1.4919924>
13. Глявин М.Ю., Голубятников Г.Ю., Иванов А.С., Лучинин А.Г., Матросов В.В., Мишагин К.Г., Морозкин М.В. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 2—1. С. 75.
14. Rzesnicki T., Piosczyk B., Kern S., Illy S., Jin J., Samartsev A., Schlaich A., Thumm M. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2010. V. 38. № 6. P. 1141.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2040842>
15. Matsuki Y., Ueda K., Idehara T., Ikeda R. // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2012. V. 33. P. 745.  
<https://doi.org/10.1007/s10762-012-9890-1>
16. Idehara T., Ogawa I., Ohashi K., Iwata Y. // Electrical Engineering in Japan. 2004. V. 149. P. 4.  
<https://doi.org/10.1002/ej.20084>
17. Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A., Kalynova G., Kholoptsev V., Kopelovich E., Kufin A., Lygin V., Pavelyev A., Plotnikov I., Zapevalov V., Zavolsky N. // Infrared and Millimeter Waves. Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics. Karlsruhe, Germany, 2004. P. 191.  
<https://doi.org/10.1109/ICIMW.2004.1422019>
18. Glyavin M., Luchinin A., Morozkin M. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 074706.  
<https://doi.org/10.1063/1.4738644>