

# Современные тенденции совершенствования магнитных фокусирующих систем

З. Джихад<sup>1</sup>, А. Швачко, к. т. н.<sup>2</sup>

УДК 621.3.032.26:621.385 | ВАК 2.2.1

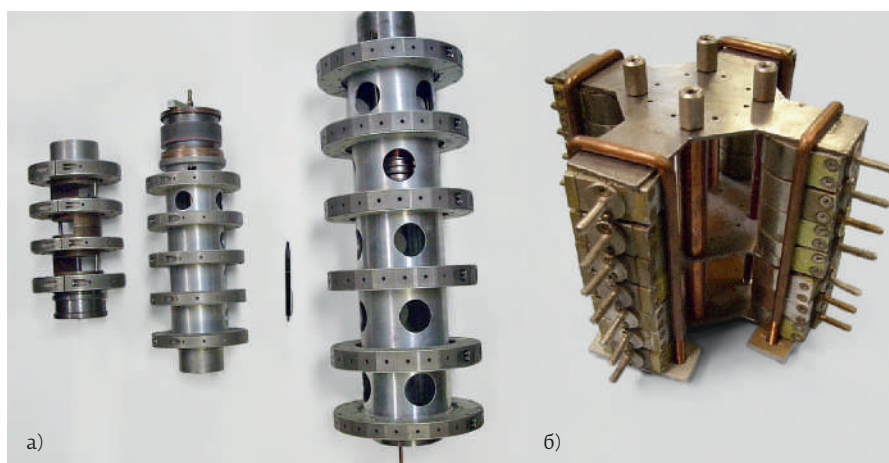
Сегодня ученые и инженеры, работающие в области сверхвысокочастотной усилительной электроники, ищут новые подходы для улучшения параметров имеющихся приборов. Так, в отечественной и зарубежной науке существует интерес к совершенствованию ламп бегущей волны, в том числе за счет использования новых подходов к конструкциям фокусирующих систем. В данной статье рассмотрены основные тенденции развития магнитных реверсивных фокусирующих систем и магнитных периодических фокусирующих систем, описаны конструкции и особенности таких систем.

## КОНСТРУКЦИИ И СВОЙСТВА МРФС

Магнитные реверсивные фокусирующие системы (МРФС) появились как эволюция магнитных фокусирующих систем с однонаправленным полем. Магнитное поле такой системы представляет собой распределение магнитного поля однонаправленной системы, после спада которого наблюдается такое же по форме магнитное поле, но с обратным знаком. Точка перехода называется реверсом магнитного поля. Такой реверс и дал название этому классу фокусирующих систем. Главным преимуществом МРФС является меньшая масса магнитной системы [1]. Сохранение (а иногда и увеличение) значения магнитного поля на оси системы позволило использовать электронные пучки с большими значениями тока, чем в однонаправленных системах, что дало возможность нарастить мощность прибора.

В целом классическая классификация магнитных фокусирующих систем построена на различиях в форме

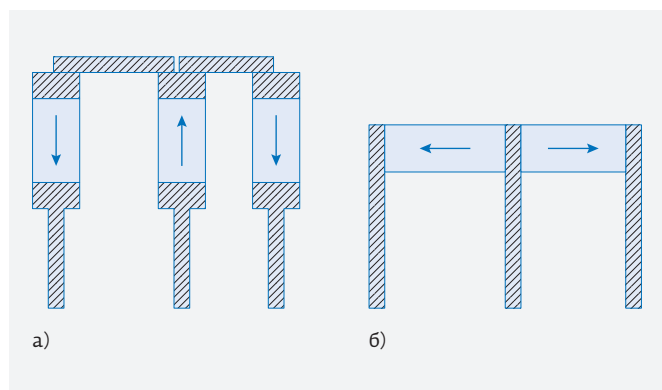
магнитного поля на оси системы. Однако для лучшего понимания различий удобно в такую классификацию внедрить еще один параметр – длину пространства взаимодействия электронного пучка и магнитного поля. В итоге фокусирующие системы можно расставить следующим образом согласно увеличению длины пространства взаимодействия (от короткого к длинному): МФС, МРФС, МПФС. С точки зрения положения в общей классификации магнитных фокусирующих систем МРФС занимают промежуточное положение между магнитными фокусирующими системами с однонаправленным полем (МФС) и магнитными периодическими фокусирующими системами



**Рис. 1.** МРФС клистрона: а – магниты с радиальной намагниченностью, установленные на имитатор клистрона; б – магниты с продольной намагниченностью, установленные на имитатор клистрона

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, кафедра «Электронные приборы и устройства», аспирант, zulfikarsgu@mail.ru.

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, кафедра «Электронные приборы и устройства», доцент, alexandr1899@gmail.com.



**Рис. 2.** Варианты реализации МРФС (стрелками указаны направления намагниченности постоянных магнитов): а – радиальное направление намагниченности; б – продольное направление намагниченности

(МРФС). Такое промежуточное положение обусловлено областью применения системы. Так, МРФС применяют в тех случаях, когда масса МФС уже становится критичным параметром, а применять МПФС невозможно из-за сложностей с амплитудой магнитного поля, требуемой для данного электронного пучка. Основной проблемой при разработке МРФС является процесс динамической расфокусировки электронного пучка при прохождении реверса. Из-за этого максимальное количество реверсов в экспериментальных МРФС достигает пяти (на практике же используется не более трех).

В работе [2] приведены конструкции МРФС на постоянных магнитах с продольным или радиальным

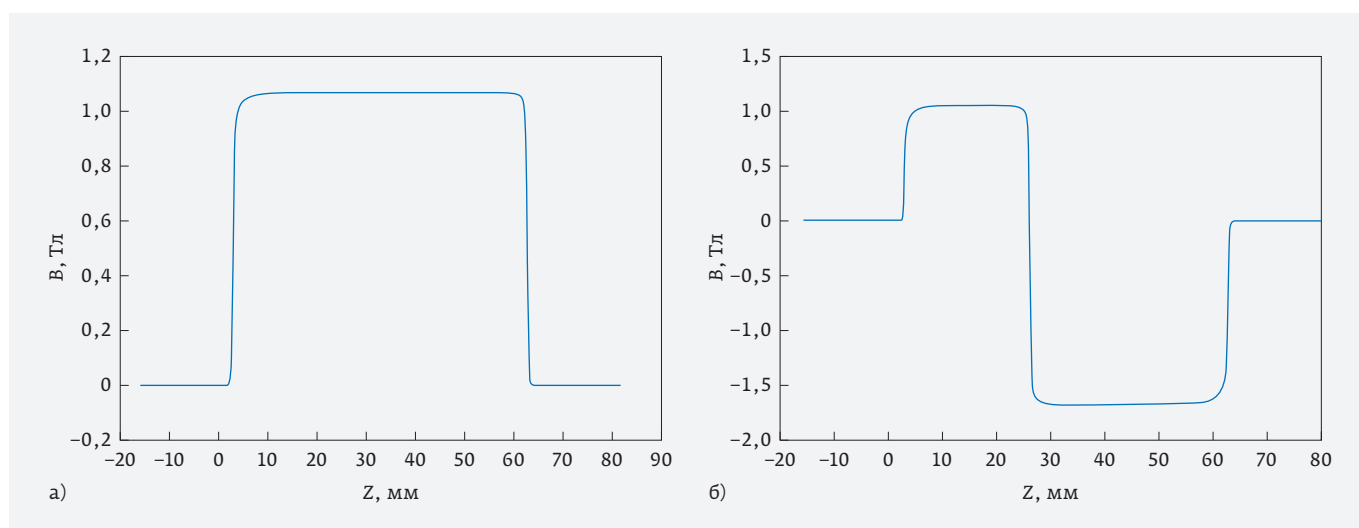
направлением намагниченности (рис. 1), которые используются в современных приборах.

Так, в МРФС, показанных на рис. 2, система с продольно намагниченными магнитами (рис. 2б) имеет меньшие габариты, но проигрывает системе с радиальным направлением намагниченности (рис. 2а) по массе используемого магнитного материала при достижении того же уровня магнитной индукции фокусирующего магнитного поля в рабочем канале устройства.

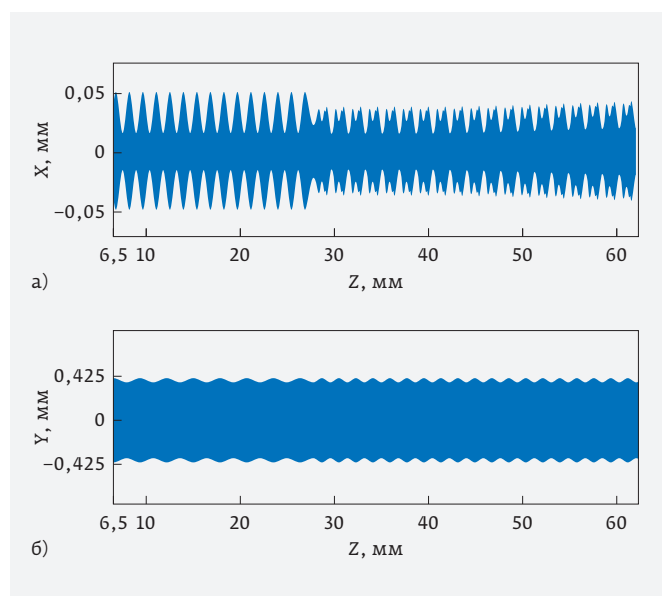
Исследования показали, что более точное размагничивание изготовленных магнитов и повторное размагничивание перед сборкой в сочетании с применением материалов со специальной петлей гистерезиса позволяют снизить радиальную составляющую индукции МРФС с больших значений до приемлемого уровня и не привести к потере мощности в каналах транспортировки парциальных пучков. В конструкциях МРФС с продольной намагниченностью (используемых в многолучевых клистронах с воздушным охлаждением) проблема потери мощности решается путем смещения соответствующих магнитов в направлении, поперечном направлению оси.

Одним из направлений исследований в области развития МРФС является возможность использования многоскоростного электронного пучка, а также изучение вопросов его формирования и сопровождения на протяжении фокусирующей системы. Многоскоростной характер электронного пучка связан с тепловым разбросом скоростей электронов на катоде, а также с абберациями, возникающими из-за сложной конфигурации электрического и магнитного полей.

Также исследуется возможность применения и фокусировки листовых (ленточных) электронных пучков. Для этого в работе [3] были рассмотрены два варианта



**Рис. 3.** Профили магнитного поля для однородной (а) и реверсивной (б) систем фокусировки



**Рис. 4.** Профили электронного пучка, транспортируемого в реверсивном магнитном поле: а – вид сбоку; б – вид сверху

системы магнитной фокусировки из сплава  $Nd_2Fe_{14}B$  с полюсными наконечниками. Первый вариант – магнитная система с однородным магнитным полем 1,1 Тл. Второй вариант – реверсивная магнитная система. Профили магнитного поля вдоль оси системы для обоих случаев показаны на рис. 3.

Результаты моделирования системы с реверсивным полем представлены на рис. 4. После смены направления магнитного поля пучок сжимается и наблюдается небольшое уменьшение периода пульсаций. Это связано с усилением магнитного поля на втором участке реверсивной системы.

В результате при транспортировке электронный пучок условно делится на две части: центральное ядро и разряженную область с малым количеством частиц в области границы пучка. В реверсивном поле после обратного «перехода» пучок сжимается магнитным полем и тем самым подавляется диокотронная неустойчивость. Внутренняя неравномерность распределения частиц сохраняется вблизи реверса и на всем пути транспортировки.

## КОНСТРУКЦИИ И СВОЙСТВА МПФС

Магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС) с точки зрения длины пространства взаимодействия являются самыми протяженными. Магнитное поле на оси такой системы является знакопеременным, а количество перемен знака достигает больше пяти (в среднем от 20 и более). МПФС на данный момент является

самой распространенной. Она используется в большинстве ламп бегущей волны (ЛБВ) О-типа, а также нашла свое применение в пролетных клистродах.

Основное преимущество МПФС – возможность устойчиво фокусировать и удерживать электронный пучок на большой длине пролетного канала. По сравнению с МФС они обладают меньшей массой.

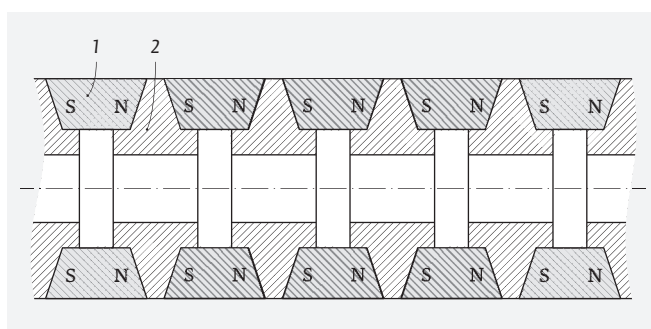
Главная отличительная черта МПФС – высокие значения индукции магнитного поля на оси системы. Данный эффект достигается за счет плотной упаковки магнитов в системе друг к другу, наличия полюсных наконечников из магнитомягкого материала между магнитами, а также знакопеременного магнитного поля. Все три фактора, действуя вместе, усиливают величину магнитного поля в зазоре системы и пиковое значение индукции становится выше (как правило, минимум в 1,5 раза), чем у отдельного магнита.

В качестве примера современной МПФС рассмотрим конструкцию с кольцевыми магнитами и полюсными наконечниками, имеющими трапециевидную форму поперечного сечения [4]. Данная конструкция изображена на рис. 5.

К достоинствам данной модели можно отнести [5]:

- снижение массы фокусирующей системы;
- более эффективное использование магнитного материала за счет трапециевидной формы сечения кольцевого магнита.

Одно из направлений развития ЛБВ О-типа – использование многолучевых конструкций [6]. Основной сложностью в таком случае является подбор необходимых параметров МПФС, а также замедляющей системы. Так, в приведенной на рис. 6 ЛБВ оставили классическую конструкцию магнитной системы, однако решили для каждого луча использовать отдельную замедляющую систему спирального типа. В полюсных наконечниках для лучшей концентрации магнитного поля в отдельных каналах вместо одного отверстия просверлены отдельные



**Рис. 5.** Конструкция МПФС с магнитами трапециевидной формы. 1 – кольцевые магниты, 2 – полюсные наконечники



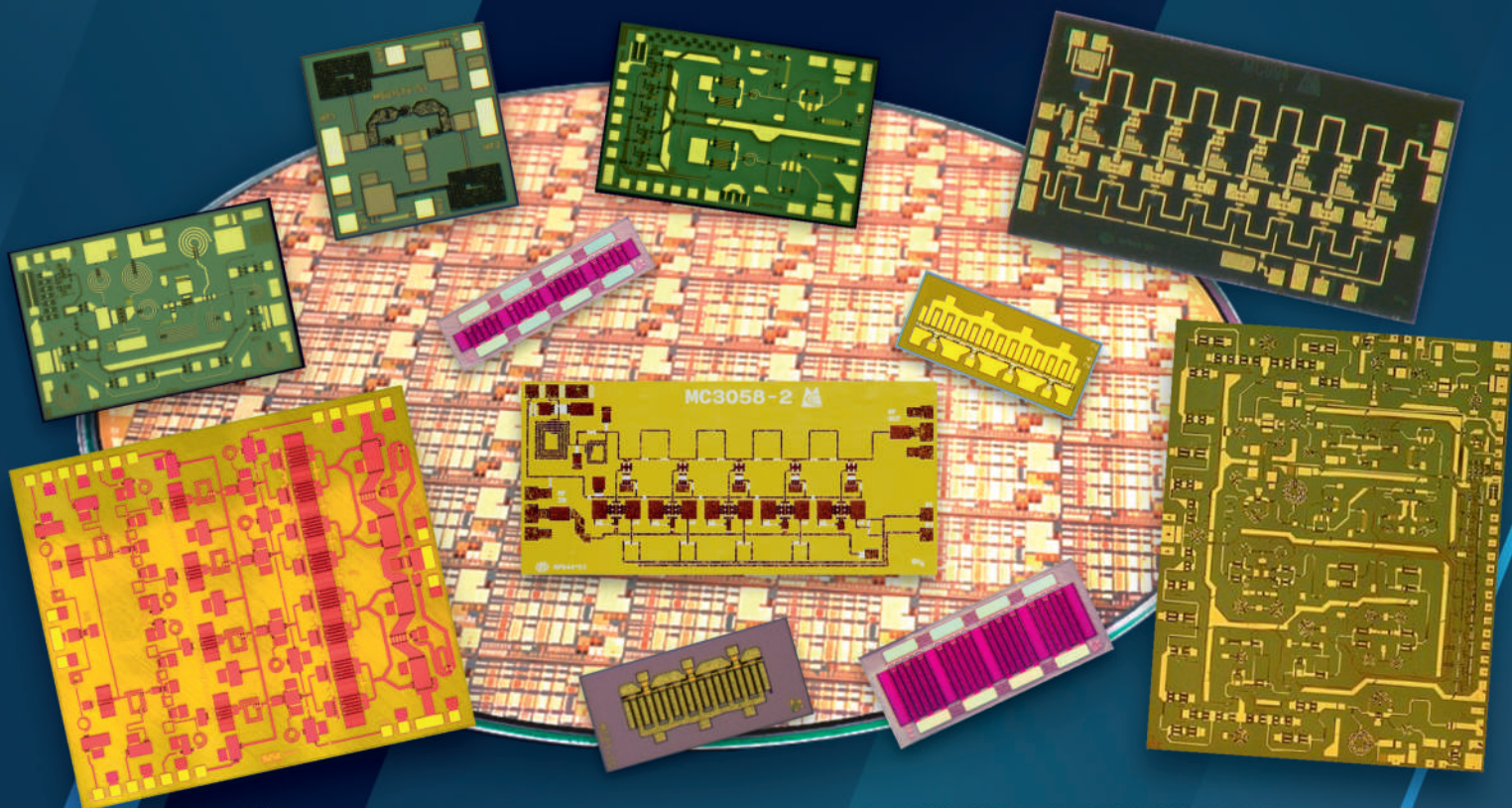
МИКРОВОЛНОВЫЕ  
СИСТЕМЫ

## ИНТЕЛЛЕКТ • КАЧЕСТВО НАДЕЖНОСТЬ

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО СВЧ GaAs и GaN ТРАНЗИСТОРОВ, МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОМОДУЛЕЙ
- СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА
- НАИЛУЧШЕЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА / КАЧЕСТВО / СРОКИ



СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СЕРТИФИЦИРОВАНА НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ИСО9001

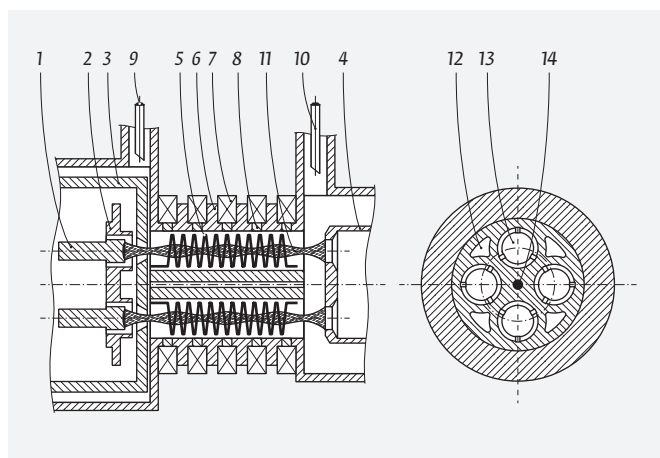


### Область применения

- Широкополосная связь и телекоммуникации
- Контрольно-измерительные приборы
- Радиорелейная и спутниковая связь
- Специальная и космическая аппаратура
- Радиолинии «точка-точка», «точка-многоточка»

### АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

Москва, Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1  
Тел.: +7(499) 644-21-03  
e-mail: [mwsystems@mwsystems.ru](mailto:mwsystems@mwsystems.ru)  
[www.mwsystems.ru](http://www.mwsystems.ru)



**Рис. 6.** Многолучевая лампа бегущей волны:

1 – катоды, 2 – управляющий электрод с центрирующими втулками, 3 – общий анод с отверстиями для прохождения электронных пучков, 4 – общий коллектор; 5 – замедляющая система, отдельная для каждого электронного луча; 6 – наконечники магнитной периодической фокусирующей системы; 7 – магнитная периодическая фокусирующая система; 8 – медные втулки; 9 – общий ввод СВЧ-энергии; 10 – общий вывод СВЧ-энергии; 11 – электронный пучок; 12 – фигурные сквозные отверстия в наконечниках МПФС; 13 – канал для замедляющих систем; 14 – теплоотводящий металлический стержень

для каждого электронного луча. В наконечниках также просверлены отдельные фигурные отверстия, которые никакого функционального назначения, кроме снижения массы, не имеют.

К достоинствам данной конструкции можно отнести обеспечение возможности создания широкополосных ЛБВ с выходной мощностью до 100 Вт при минимизации их габаритов и массы.

Известные замедляющие системы имеют ряд недостатков, среди которых уменьшение рабочей полосы частот и низкий КПД, многочисленная пайка диафрагм и проводящих колец, имеющих размеры единицы миллиметров, которая обеспечивает плохой вакуумно-плотный спай. Следующие изобретения [7–11] призваны устранить эти недостатки.

К достоинствам, которые объединяют данные изобретения, относятся:

- высокий КПД;
- увеличение средней и импульсной выходной мощности прибора при низком рабочем напряжении питания;
- высокая эксплуатационная надежность в непрерывном режиме работы и термостойкость внутренних элементов замедляющей системы.

В итоге можно сделать следующий вывод. МПФС до сих пор являются самыми распространенными фокусирующими системами, однако их положение все чаще начинают «проверять на прочность» МРФС. Нередко разработчики современных клистронов или ЛБВ во время конструкторских изысканий начинают задумываться над переходом к реверсивным фокусирующим системам. Основными недостатками МПФС являются их вес и эффективные значения магнитного поля. Если для борьбы со вторым недостатком нередко разработчики обращают внимание на полигармонические МПФС (работающие на нечетных гармониках магнитного поля), то с первым недостатком пытаются бороться

изменением конструкции полюсных наконечников или кольцевых магнитов.

К мощным вакуумным СВЧ-приборам в миллиметровом диапазоне предъявляются повышенные требования. Поэтому зачастую приходится применять знакопеременное магнитное поле с большим периодом распределения продольной компоненты индукции.

Одной из старейших проблем, обусловленной используемой технологией порошковой металлургии при изготовлении постоянных магнитов, являются поперечные (радиальные) магнитные поля. В работе [12] авторы исследовали методы снижения уровня радиальной составляющей магнитной индукции. Высокие значения поперечной составляющей магнитного поля задает так называемая неравномерная намагниченность постоянного магнита. Она возникает из-за несовершенства технологии изготовления, когда в структуре магнитного материала образуются внутренние дефекты. Авторы предлагают бороться с этим явлением непосредственно на стадии изготовления, внедряя в технологию две ключевые корректировки: более точно размагничивать прессовки секторных магнитов, использовать материалы для магнитов со специальной петлей гистерезиса. В качестве магнитного сплава авторы использовали сплав «неодим – железо – бор» с радиальной (или близкой к ней) текстурой с внешним диаметром до 100 мм.

Помимо совершенствования технологии изготовления постоянных магнитов, авторы проводят работы по поиску оптимального способа измерения параметров магнитного сектора при сохранении удобства использования на производстве [13–15].

\* \* \*

В последние годы в центре внимания ученых находится вопрос совершенствования магнитных фокусирующих систем, а в процессе эволюции они прошли долгий путь. В самом начале в качестве центрального элемента



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Бобков С.Г., Басаев А.С.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

*Рецензент:* Стенин Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, проф. (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 264 с.  
ISBN 978-5-94836-610-4

**Цена 975 руб.**

Важнейшей характеристикой микропроцессорных систем является производительность. Производительность микропроцессора линейно зависит от трех характеристик – его частоты, средней частоты на выполнение инструкций и количества инструкций в выделенной области программы. В свою очередь, эти характеристики определяются технологией изготовления, архитектурой микропроцессора, системой команд и технологией компиляции. В представленной книге рассмотрены проблемы улучшения этих характеристик, а также методы и методики проектирования высокопроизводительных вычислительных систем.

Рассмотрены архитектуры микропроцессоров и коммуникационных систем, ориентированных на создание высокопроизводительных вычислительных комплексов вплоть до супер-ЭВМ. Приводится маршрут и методики проектирования микросхем.

Книга предназначена для студентов старших курсов кафедр электроники и автоматики университетов, аспирантов и специалистов указанной области.

**Бобков С.Г.** (Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

**Басаев А.С.** (Научно-производственный комплекс «Технологический центр»)

### Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: (495) 956-33-46  
E-mail: [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru)  
[sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)

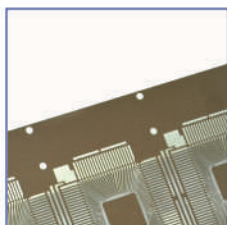
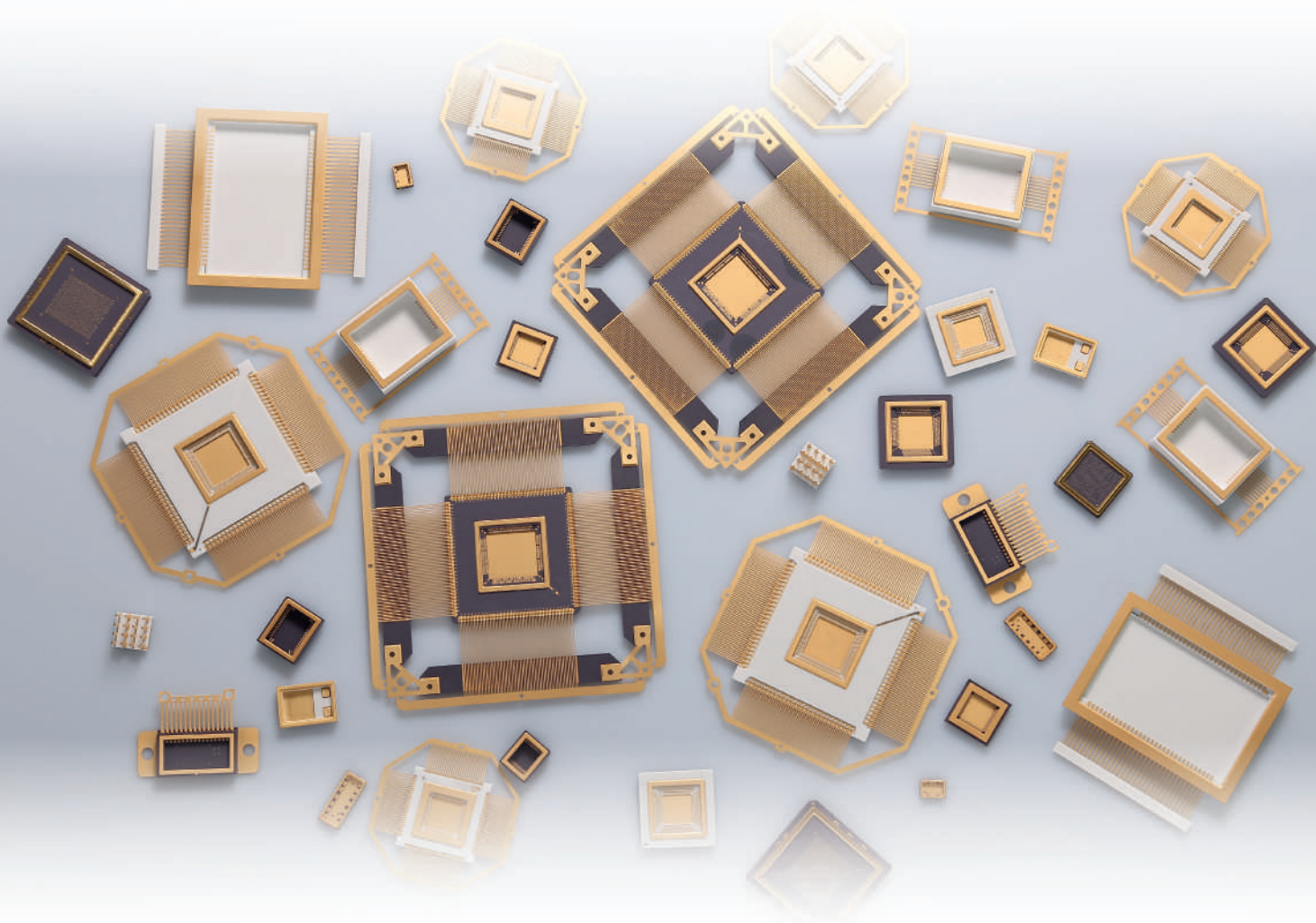
магнитной системы использовались распространенные в те времена подковообразные магниты. В процессе совершенствования конструкторы перешли к магнитам с кольцевой формой, а между магнитами в МПФС стали использовать кольцевые наконечники.

Современные тенденции совершенствования МПФС заключаются, по замыслам конструкторов, в том, чтобы облегчить их массу и удешевить производство, повысить надежность и уменьшить количество бракованных магнитов по параметру поперечного магнитного поля.

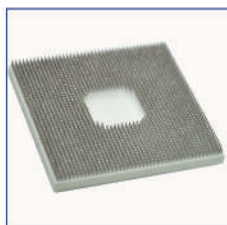
Совершенствование МРФС заключается в решении проблемы расфокусировки электронного пучка при большом количестве реверсов с помощью применения в конструкции магнитомягких элементов различной формы. Еще одним способом совершенствования МРФС является использование более высоких гармоник магнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Швачко А. А., Захаров А. А.** Фокусирующие системы электронных потоков приборов СВЧ: учебное пособие. Саратов, 2019. 84 с.
2. **Akimov P. I., Nikitin A. P., Melnichuk G. V. et al.** Particularities of Reversible Magnetic Focusing System Development for Multi-Beams Klystrons. – 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Paris, France, 2013.
3. **Navrotskiy I. A., Titov V. N., Ryskin N. M.** Study of Multivelocety Sheet-Electron-Beam Transportation in Uniform and Reversal Magnetic Fields. – 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, 2020.
4. Пат. 175441 Российская Федерация, МПК H01J 23/08 2006.01. Магнитная периодическая фокусирующая система / А. А. Швачко, А. А. Захаров; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.». № 2017119681; заявл. 05.06.2017; опубл. 05.12.2017. Бюл. № 34. 5 с.
5. **Shvachko A. A., Zaharov A. A., Kalashnikova E. N.** Search the optimal combination of the geometric parameters of the ring magnet with a trapezoidal cross-section // Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2016, 22–23 September 2016. V. 2, 2016. P. 7878998. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2016.7878998>
6. Пат. 52255 Российская Федерация, МПК H01J 25/00 2006.01. Многолучевая лампа бегущей волны / А. В. Суховерхий, В. И. Гусева; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Салют». № 2005131499/22; заявл. 10.10.2005; опубл. 10.03.2006. 10 с.
7. Пат. 2776993 Российская Федерация, МПК H01J 23/24 2006.01. Лампа бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Галдецкий, Е. А. Богомолова, Н. М. Коломийцева; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Исток» им. Шокина». № 2021119150; заявл. 29.06.2021; опубл. 29.07.2022. Бюл. № 22. 14 с.
8. **Кириченко Д. И., Шалаев П. Д., Роговин В. И.** Направления разработки и производства в АО «НПП «Алмаз» ламп бегущей волны для спутников связи // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 309–311.
9. Пат. 2307421 Российская Федерация, МПК H01J 23/24, H01J 25/34 2006.01. Лампа бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн / Н. Ф. Лямзина, Е. И. Каневский, Н. М. Коломийцева, Л. Д. Смирнова; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». № 2006116838/09; заявл. 16.05.2006; опубл. 27.09.2007. Бюл. № 27. 9 с.
10. Пат. 2352016 Российская Федерация, МПК H01J 25/38, H01J 23/18 2006.01. Лампа бегущей волны с магнитной периодической фокусирующей системой / С. П. Морев, А. В. Архипов, А. Н. Дармаев, Д. А. Комаров, Е. П. Глотов, А. В. Фетисова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Торий». – № 2007127871/09; заявл. 23.07.2007; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. 11 с.
11. Пат. 2352017 Российская Федерация, МПК H01J 25/38, H01J 23/18 2006.01. Лампа бегущей волны с магнитной периодической фокусирующей системой / С. П. Морев, А. В. Архипов, А. Н. Дармаев, Д. А. Комаров; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Торий». № 2007145945/09; заявл. 12.12.2007; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. 11 с.
12. **Сергеев К. Л., Лукин А. А., Акимов П. И., Козырев Д. В.** Методы снижения уровня радиальной составляющей магнитной индукции на оси рабочих каналов магнитных фокусирующих систем электровакуумных приборов // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 79–83.
13. **Akimov P. I., Golovenkov V. F., Kozyrev D. V. et al.** Features of alsifer's using in klystrons with double-gap resonators and reverse focusing. – 2008 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, 2008. PP. 192–196. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2008.4720137>
14. **Akimov P. I., Kozyrev D. V., Lavrentyev J. V., Sergeev K. L.** Magnetic systems on the basis of hardmagnetic alloys niodium with iron and boron. – Proceeding of SPIE. USA. Bellingham, 2008. V. 7121. PP. 137–142.
15. **Akimov P. I., Dormidondov A. G., Drozdov S. S. et al.** Some aspects of application of modern hard magnetic alloys in vacuum tubes. – XVIII Scientific and Technical Conference with the participation of foreign experts, "Vacuum Science and Technology." 2011, September. The conference materials. PP. 379–382.



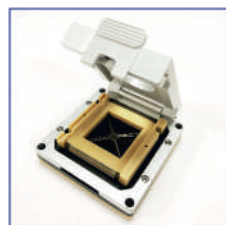
Выводные рамки



Металлокерамические  
корпуса



Нагревательные  
элементы



Контактные  
устройства



Графитовая  
оснастка



Оптоэлектронные  
корпуса

