

ХVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗИМНЯЯ ШКОЛА-СЕМИНАР  
ПО РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

---

XVI INTERNATIONAL WINTER SCHOOL ON RADIOPHYSICS AND MICROWAVE  
ELECTRONICS

*Посвящается Дню российской науки*



# МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ

## Организаторы:

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
НОЦ “Сложные системы”

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
имени В.А. Котельникова РАН

## При финансовой поддержке:



Российский фонд фундаментальных исследований



Династия

Фонд некоммерческих программ “Династия”

Саратовское отделение IEEE  
ОАО “НПП “Алмаз”

2 – 7 февраля 2015

С А Р А Т О В

УДК 517.9, 530.1

М34 Материалы XVI Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 2–7 февраля 2015, Саратов. Саратов: ООО “Издательский центр “Наука” ISBN 978-5-9999-2293-9.

**Редакционная коллегия:**

Д.И. Трубецков, А.А. Короновский, Ю.И. Левин,  
А.Е. Храмов

Ответственный за выпуск – доцент Е.Н. Егоров

Оригинал–макет подготовлен в пакете  $\text{\LaTeX}$   
Е.Н. Егоров, А.О. Сельский

---

**ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

---

- Трубецков Д.И., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, СГУ, Саратов (председатель)
- Блиох Ю.П., д.ф.-м.н., Технион, Хайфа, Израиль;
- Братман В.Л., д.ф.-м.н., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород;
- Бушуев Н.А., к.ф.-м.н., д.э.н., директор ФГУП “НПП “Алмаз”, Саратов;
- Галдецкий А.В., к.ф.-м.н., ФГУП “ГНПП Исток”, Фрязино;
- Гапонов-Грехов А.В., академик, научный руководитель ИПФ РАН, Нижний Новгород;
- Гуляев Ю.В., академик, директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва;
- Ерчма В.Д., к.ф.-м.н., ИРЭ НАН Украины, Харьков, Украина;
- Калинин Ю.А., д.т.н., профессор, СГУ, Саратов;
- Клеев А.И., д.ф.-м.н., ИФП РАН, Москва;
- Кураев А. А., д.ф.-м.н., проф., БГУИР, Минск, Беларусь;
- Магда И. И., д. ф.-м. н., проф. ННЦ “ХФТИ”, Харьков, Украина;
- Морев С.П., д.ф.-м.н., ФГУП “ГНПП Торий”, Москва;
- Некоркин В.И., д.ф.-м.н., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород;
- Никитов С.А., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва;
- Петелин М.И., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород;
- Солнцев В.А., д.ф.-м.н., профессор, МИЭМ, Москва;
- Соминский Г.Г., д.ф.-м.н., профессор, СПбГПУ, Санкт-Петербург;
- Стрелков П.С., д.ф.-м.н., профессор, ИОФ РАН, Москва;
- Стриханов М.Н., д.ф.-м.н., профессор, ректор, Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва;
- Филимонов Ю.А., д.ф.-м.н., директор СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов;
- Шалфеев В.Д., д.ф.-м.н., профессор, ННГУ, Нижний Новгород.

---

---

**ПРОГРАММА**  
**XVI МЕЖДУНАРОДНОЙ ЗИМНЕЙ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА**  
**ПО РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**  
(Саратов, пансионат “Волжские Дали”, 2 – 7 февраля 2015 года)

---

---

2 февраля 2015 г., понедельник

---

---

09.00 – 13.00    **Регистрация участников**

---

15.00 – 15.45    **Открытие школы**

*Пленарное заседание:*

**Общие вопросы теории и разработки классических вакуумных приборов СВЧ**

---

- 16.00 – 16.45    **Еремка В.Д.** (ИРЭ им. А.Я. Усикова НАНУ, Харьков, Украина)    15  
Вакуумные генераторы и усилители электромагнитного излучения терагерцового диапазона с пространственно развитым электронным потоком.
- 17.00 – 17.45    **Мясин Е.А.** (ФИРЭ РАН, Фрязино) История изобретения, создания и исследования работы оротрона в см и мм диапазоне длин волн.
- 19.00 – 20.00    **Ужин**

---

---

3 февраля 2015 г., вторник

---

---

8.00 – 9.00      **Завтрак**

*Пленарное заседание:*

**Перспективы продвижения микроволновых приборов и устройств в суб-ТГц и ТГц диапазоны**

---

- 09.00 – 09.45    **Григорьев А.Д.** (СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург) ПТ-лучи: от идеи к реальности.    16
- 10.00 – 10.45    **Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.** (ФИРЭ РАН, Фрязино) Оротрон и другие приборы с открытым резонатором терагерцового диапазона. Современное состояние исследований.
- 11.00 – 11.45    **Галдецкий А.В.** (НПП “Исток”, Фрязино) Вакуумные источники ТГц излучения.
- 12.00 – 12.45    **Черепенин В.А.** (ИРЭ РАН, Москва) Мощные источники микроволнового излучения.

13.00 – 14.00 **Обед**

14.30 – 16.45 **Устные доклады**

**Перспективы продвижения микроволновых приборов и устройств в суб-ТГц и ТГц диапазоны**

- |    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | <b>Бенедик А.И., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Торгашов Г.В.</b> (СГУ, Саратов) Расчет электродинамических характеристик планарной замедляющей системы для приборов вакуумной микроэлектроники терагерцевого диапазона частот.                                 | 17 |
| 2. | <b>Бенедик А.И., Рыскин Н.М.</b> (СГУ, Саратов) Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора.  | 18 |
| 3. | <b>Андреев В.Г., Вдовин В.А.</b> (МГУ, Москва) Термоакустический метод регистрации импульсов СВЧ и ТГц диапазонов.   | 19 |
| 4. | <b>Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Григорьев Ю.А., Бушуев Н.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д.</b> (СГУ, Саратов) Исследование и разработка усилителя О-типа субтерагерцевого диапазона с ленточным электронным пучком. | 20 |
| 5. | <b>Краснова Г.М., Трубецков Д.И.</b> (СГУ, Саратов) К линейной теории взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны (шумовые явления, фото-ЛБВ, карсинотрод).  | 21 |
| 6. | <b>Давидович М.В., Бушуев Н.А.</b> (СГУ, Саратов) Автоэмиссионная электронная пушка с ленточным пучком для терагерцевых ЛБВ.   | 23 |
| 7. | <b>Канаков В.А., Чуркин С.С.</b> (ННГУ, Нижний Новгород) Фазометрический комплекс КВЧ диапазона.   | 24 |
| 8. | <b>Шампоров В.А., Мясников А.С., Панкратова Е.В., Панкратов А.Л.</b> (ННГУ, Нижний Новгород) Параметрическая оптимизация условий узкополосной генерации терагерцевых частот в параллельных цепочках джозефсоновских контактов.                             | 25 |
| 9. | <b>Азов Г.А., Ефремова М.В., Хриткин С.А.</b> (ОАО "Плутон Москва) Результаты моделирования основных узлов импульсной ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 30-50 Вт.   | 26 |

**Пленарное заседание:**

**Из истории науки**

- |               |   |    |
|---------------|---|----|
| 17.00 – 17.45 | <b>Трубецков Д.И.</b> (СГУ, Саратов) Две лекции о великих уравнениях. Ч. 1. | 27 |
| 18.00 – 18.45 | <b>Левин Ю.И., Гусякова О.И.</b> (СГУ, Саратов) Кавендишская лаборатория.   |    |

---



---

4 февраля 2015 г., среда

---



---

8.00 – 9.00      **Завтрак**

*Пленарное заседание:*

**Теория СВЧ усилителей и генераторов.**

**Из истории науки.**

---

- 09.00 – 09.45    **Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М.** (СГУ, Саратов) Теория взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной вблизи границы полосы пропускания. Волновая теория.
- 10.00 – 10.45    **Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М.** (СГУ, Саратов) Теория взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной вблизи границы полосы пропускания. Дискретная теория.
- 11.00 – 11.45    **Григорьев А.Д., Джалилов Б.О.** (СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург) Многозазорные резонаторы для клистронов миллиметрового диапазона длин волн. 28
- 12.00 – 12.45    **Комаров Д.А.** (ФГУП “НПП Торий НИЯУ МИФИ, Москва) Конкуренция “многоствольности” и “многолучевости”: пути развития сверхмощных и сверхширокополосных клистронов. 29

13.00 – 14.00    **Обед**

*Пленарное заседание:*

**Теория СВЧ усилителей и генераторов.**

**Из истории науки.**

---

- 14.30 – 14.50    **Петелин М.И.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Относительность по древнегречески.
- 15.00 – 15.45    **Трубецков Д.И.** (СГУ, Саратов) Две лекции о великих уравнениях. Ч. 2.
- 16.00 – 16.45    **Рыскин Н.М.** (СГУ, Саратов) Синхронизация многомодовых электронных генераторов.

17.30 – 19.00    **Стендовые доклады**

---

1.                    **Антонец И.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И.** (СыктГУ, Сыктывкар) Механизм внутригранулярных токов как условие формирования динамической СВЧ проводимости аморфных наногранулированных пленок “металл-диэлектрик”. 30

2. **Антонец И.В., Котов Л.Н., Кирпичева О.А., Голубев Е.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И.** (СыктГУ, Сыктывкар) Отражение и прохождение СВЧ электромагнитных волн через тонкие пленки гранулированных аморфных металл-диэлектрических нанокомпозитов. 31
3. **Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И.** (СыктГУ, Сыктывкар) Деление частоты ферромагнитного резонанса на основе нелинейного СВЧ магнитострикционного преобразователя. 32
4. **Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И.** (СыктГУ, Сыктывкар) Умножение частоты ферромагнитного резонанса на основе нелинейного СВЧ магнитострикционного преобразователя. 33
5. **Власов В.С., Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И.** (СыктГУ, Сыктывкар) Применение модели связанных осцилляторов для анализа нелинейного возбуждения СВЧ гиперзвука при ферромагнитном резонансе. 34
6. **Власов В.С., Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И.** (СыктГУ, Сыктывкар) Нелинейные явления при возбуждении СВЧ гиперзвука в условиях ферромагнитного резонанса. 35
7. **Зверев В.В., Филиппов Б.Н., Дубовик М.Н.** (УФУ, Екатеринбург) Трехмерное микромагнитное моделирование локализованных топологических структур в тонких магнитных пленках. 36
8. **Калякулина А.И., Панкратов А.Л.** (ННГУ, Нижний Новгород) Среднее время индуцированной шумом генерации импульсов напряжения в джозефсоновских контактах. 37
9. **Мыльников В.М., Панкратов А.Л., Панкратова Е.В.** (ННГУ, Нижний Новгород) Оптимизация отклика неавтономных систем джозефсоновских контактов с малым затуханием. 38
10. **Мантуров А.О., Глуховская Е.Е.** (СГТУ, Саратов) Исследование устойчивости и анализ бифуркационных диаграмм SPICE-моделей электронных схем. 39
11. **Стародубова Е.Н., Усачева С.А., Рыскин Н.М.** (СГУ, Саратов) К теории синхронизации двухмодового электронного генератора с близкими собственными частотами. 40
12. **Одинцов С.А., Садовников А.В., Шешукова С.Е.** (СГУ, Саратов) Исследование модового состава магнитостатических волн в решетке связанных ЖИГ. 41
13. **Грачев А.А., Садовников А.В., Шешукова С.Е.** (СГУ, Саратов) Исследование эффектов гибридизации ЭМСВ в системе связанных ферритовых волноводов с сегнетоэлектрической нагрузкой. 42
14. **Садовников А.В., Лисицын Е.А.** (СГУ, Саратов) Генерация целевых солитонов в наклонной брэгговской решетке. 43
15. **Шихматова В.В., Рожнев А.Г.** (СГУ, Саратов) Моделирование электромагнитных волн в открытых слоистых структурах из метаматериалов методом точных конечных разностей. 44

- 
16. **Гришин С.В., Скороходов В.Н.** (СГУ, Саратов) Генерация диссипативных временных солитонов в активном кольцевом резонаторе с клистроном-усилителем. 45
  17. **Морозова М.А., Шараевская А.Ю.** (СГУ, Саратов) Дисперсионные характеристики магнитостатических волн в слоистых структурах на основе магнетонных кристаллов. 46
  18. **Голова Т.М., Романенко Д.В., Сысоев И.В., Гришин С.В.** (СГУ, Саратов) Оценка старшего ляпуновского показателя по экспериментальным временным рядам кольцевых автоколебательных систем с ферромагнитными плёнками. 47
  19. **Исаева О.Б., Савин Д.В., Селезнев Е.П.** (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Грубая синхронизация грубых хаотических систем и скрытая коммуникация с помощью генераторов гиперборлического хаоса, гиперхаоса, консервативного хаоса. 48
  20. **Исаева О.Б., Обычев М.А.** (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Стадийная волновая система с феноменами комплексной аналитической динамики и гиперболическим аттрактором. 49
  21. **Ткаченко Д.А., Садовников А.В., Рожнев А.Г.** (СГУ, Саратов) Программа расчета электродинамических характеристик периодических ферритовых волноводов конечной ширины на основе метода конечных элементов. 50
  22. **Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.** (СГУ, Саратов) Дискретная дифракция спиновых волн в системе латерально связанных ЖИГ волноводов. 51
  23. **Игангалиев А.Н., Садовников А.В., Бегинин Е.Н.** (СГУ, Саратов) Распространение магнитостатической волны в нерегулярном ферритовом сужающемся волноводе. 52
  24. **Суровцев В.В., Садовников А.В., Романенко Д.В.** (СГУ, Саратов) Распространение магнитостатической волны в нерегулярном Г-образном ферритовом волноводе. 53
  25. **Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е.** (СГУ, Саратов) Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом. 54
  26. **Баланов А.Г., Короновский А.А., Москаленко О.И., Сельский А.О., Храмов А.Е.** (СГУ, Саратов) Механизм смены режима генерации колебаний тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку. 55
  27. **Андреев А.В., Баланов А.Г., Храмов А.Е.** (СГУ, Саратов) Хаос и управление им в системе двух ридберговских атомов. 56
  28. **Мельникова М.М., Рыскин Н.М.** (СГУ, Саратов) Численное моделирование влияния отражений на динамику многомодового гиротрона. 57
  29. **Гиревой Р.А., Емельянов В.В., Рыскин Н.М.** (СГУ, Саратов) Численное моделирование многорезонаторного клистроу-силителя с двухзачерными резонаторами на основе нестационарной теории. 58



- 
30. **Рыскин Н.М., Белов К.В.** (СГУ, Саратов) Численное моделирование нелинейных нестационарных процессов в генераторе на основе связанных пролетных клистронов. 59
31. **Новожилова Ю.В.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Стабилизация частоты гиротрона отражением от нагрузки. 60
32. **Гурневич Е.А., Молчанов П.В.** (ИЯП БГУ, Минск, Беларусь) Влияние разброса параметров сильноточного релятивистского электронного пучка на процессы генерации СВЧ излучения в трехсекционном аксиальном виркаторе. 60
33. **Тихонов В.В., Литвиненко А.Н., Садовников А.В., Никитов С.А.** (СГУ, Саратов) Манделъштам-Бриллюэновская спектроскопия магнитоакустических резонансов в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ. 61
34. **Петрик А.Г., Егоров Е.Н., Храмов А.Е.** (СГТУ, СГУ, Саратов) Трехмерное моделирование формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в составной трубе дрейфа. 62
35. **Золотых Д.Н., Роговин В.И.** (ОАО "НПП "Алмаз", Саратов) Расчет ЛБВ с рабочей частотой 0.2 ТГц на основе замедляющей системы типа "гребенка" с пятью цилиндрическими электронными потоками. 63

5 февраля 2015 г., четверг

---

8.00 – 9.00 **Завтрак**

*Пленарное заседание:*  
**Гиротроны, гиро-усилители.**

---

- 09.00 – 09.45 **Лукша О.И., Архипов А.В., Дворецкая Н.В., Колмакова Н.Г., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Трофимов П.А.** (СПбГПУ, Санкт-Петербург) Новые методы диагностики и повышения качества винтового электронного потока в гиротронах. 64
- 10.00 – 10.45 **Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А., Илькив И.В., Задиранов Ю.М., Корнишин С.Ю., Степанова А.Н.** (СПбГПУ, Санкт-Петербург) Перспективные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных устройств. 65
- 11.00 – 11.45 **Глявин М.Ю.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы. 66
- 12.00 – 12.45 **Запевалов В.Е.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Современные тенденции развития гиротронов. 67
- 13.00 – 14.00 **Обед**

14.30 – 16.30 *Устные доклады*

**Релятивистская и плазменная электроника больших мощностей.**

**Применения приборов СВЧ в телекоммуникационных системах, медицине, ускорительной технике, радарх, системах безопасности**

- 
- |    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | <b>Корниенко В.Н., Черепенин В.А.</b> (ИРЭ РАН, Москва) Особенности сверхизлучения поливинтового электронного потока в статических электрическом и магнитном полях.                                   | 68 |
| 2. | <b>Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е.</b> (СГУ, СГТУ, Саратов) Исследование процессов генерации в релятивистском виркаторе на высших гармониках основной частоты осцилляций виртуального катода.  | 69 |
| 3. | <b>Фролов Н.С., Куркин С.А., Бадарин А.А., Храмов А.Е., Короновский А.А.</b> (СГУ, СГТУ, Саратов) Источник излучения субмиллиметрового диапазона на основе электронного потока с виртуальным катодом. | 70 |
| 4. | <b>Мещеряков В.В., Воробьев С.И., Семенов С.Н.</b> (ООО "Apstec Labs СПбГЭТУ, Санкт-Петербург) Микроволновая система дистанционного досмотра.   | 71 |
| 5. | <b>Соболев Д.И., Денисов Г.Г.</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Увеличение углового диапазона системы дистанционного управления направлением пучка.  |    |
| 6. | <b>Дмитриев А.С., Емельянов Р.Ю., Герасимов М.Ю.</b> (ИРЭ РАН, Москва) Экспериментальное исследование динамики ансамбля осцилляторов Курамото в активных беспроводных сетях.                          | 72 |
| 7. | <b>Садовников А.В., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Никитов С.А., Davies C.S., Kruglyak V.V.</b> (СГУ, Саратов) Ответвление магнитостатических спиновых волн в ферромагнитных микроволноводах.          | 73 |

17.00 – 18.30 *Устные доклады*

**Гиротроны, giro-усилители.**

- 
- |    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | <b>Рожнев А.Г.</b> (ОФНС НИИ ЕН СГУ, Саратов) Простой способ расчета комплексных мод резонатора гиротрона.   | 74 |
| 2. | <b>Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Лещева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С.</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Влияние азимутальной несимметрии электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона. | 75 |
| 3. | <b>Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Нусинович Г.С., Петелин М.И., Седов А.С.</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Оптимизация параметров маломощных терагерцовых гиротронов.                      | 76 |

- 
- 
4. **Глявин М.Ю., Морозкин М.В., Цветков А.И., Фокин А.П., Холопцев В.В.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Разработка микроволнового комплекса для медико-биологических исследований. 77
5. **Планкин О.П., Розенталь Р.М., Семенов Е.С.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии. 78
6. **Абубакиров Э.Б., Денисов Г.Г., Гузнов Ю.М., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Запевалов С.А., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С., Шевченко А.С.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Проект 100 ГГц релятивистского гиротрона с выходной мощностью 5 МВт. 79

---

6 февраля 2015 г., пятница

---



---

8.00 – 9.00      **Завтрак**

*Пленарное заседание:*

**Специальные вопросы СВЧ электроники.**

---

- 09.00 – 09.45    **Морев С.П.** (ФГУП "НПП Торий НИЯУ МИФИ, Москва) Возможности промышленного применения углеродных наноразмерных структур с полевой эмиссией в качестве катодов мощных СВЧ приборов: состояние дел, перспективы. 80
- 10.00 – 10.45    **Гинзбург Н.С.** (ИПФ РАН, Нижний Новгород) Квазиоптическая теория стимулированного черенковского излучения релятивистских электронных пучков и сгустков, движущихся над периодически гофрированными поверхностями.

*Пленарное заседание:*

**Магнитоэлектроника.**

---

- 11.00 – 11.45    **Гришин С.В., Морозова М.А., Романенко Д.В., Шаревский Ю.П.** (ОФНС НИИ ЕН СГУ, Саратов) Диссипативные структуры и хаос в кольцевых автоколебательных системах при трехволновом взаимодействии спиновых волн. 81
- 12.00 – 12.45    **Никитов С.А., Хивинцев Ю.В., Филимонов Ю.А.** (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Разработка элементной базы электроники СВЧ на принципах магноники.
- 13.00 – 14.00    **Обед**

14.30 – 17.00 *Устные доклады***Теория и разработка классических вакуумных приборов СВЧ.**

- 
- |    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | <b>Комаров Д.А.</b> (ФГУП "НПП Торий НИЯУ МИФИ, Москва) Принципиальные ограничения использования автоэмиссионных структур с минимальным уровнем управляющих напряжений в мощных импульсных ЭВП СВЧ. |    |
| 2. | <b>Гамюнов Ю.Г., Патрушева Е.В.</b> (СГУ, Саратов) О клинотронном эффекте.  | 82 |
| 3. | <b>Накрап И.А., Савин А.Н.</b> (СГУ, Саратов) Условие выполнения теоремы Флоке для почти периодических волноведущих систем в режиме вынужденных колебаний.  | 83 |
| 4. | <b>Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.</b> (СГУ, Саратов) Экспериментальное исследование генератора с многоскоростным электронным пучком.   | 84 |
| 5. | <b>Кудряшов А.Г., Сивяков Б.К.</b> (СГТУ, Саратов) Уменьшение фазовой чувствительности лампы с бегущей волной.  | 85 |
| 6. | <b>Нестеров Д.А., Царев В.А.</b> (СГТУ, Саратов) Синтез многоканального двухзазорного резонатора с кратными резонансными частотами, нагруженного индуктивными стержнями.                            | 86 |
| 7. | <b>Иванов А.А., Дармаев А.Н., Морев С.П.</b> (ОАО "ФГУП "НПП "Салют Нижний Новгород) Разработка электронно-оптической системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона.                    | 87 |
| 8. | <b>Иванов А.А.</b> (ОАО "ФГУП "НПП "Салют Нижний Новгород) Разработка замедляющей системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона.  | 88 |
| 9. | <b>Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С.П.</b> (ФГУП "НПП Торий Москва) Об одной возможности ввода магнитного поля на катод ЭОС с высокой компрессией интенсивного электронного потока.              | 89 |

14.30 – 16.00 *Устные доклады***Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики.**

- 
- |    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | <b>Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Прохоров М.Д., Пономаренко В.И.</b> (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Широкополосная система передачи информации на основе генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки. | 90 |
| 2. | <b>Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А., Скороходов В.Н.</b> (СГУ, Саратов) Мощные СВЧ генераторы широкополосных и сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов.  | 91 |
| 3. | <b>Сафин А.Р., Устинов А.Б.</b> (НИУ "МЭИ Москва) Теоретическое исследование релаксационного механизма ограничения нелинейного сдвига частоты колебаний.   | 92 |

4.	<b>Санин А.Л., Смирновский А.А.</b> (СПбПУ, Санкт-Петербург) Квантовый диссипативный осциллятор с пространственно-временным потенциалом четвертой степени.	93
5.	<b>Титов А.В.</b> (СГУ, Саратов) Приближенная линейная теория двухлучевого оротрона с различной структурой поля в открытом резонаторе.	
6.	<b>Максименко В.А., Макаров В.В., Короновский А.А., Храмов А.Е., Баланов А.Г.</b> (СГУ, СГТУ, Саратов) Влияние параметров контакта коллектора на характеристики высокочастотной генерации в полупроводниковой сверхрешетке.	94
7.	<b>Макаров В.В., Максименко В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Баланов А.Г.</b> (СГУ, СГТУ, Саратов) Исследование механизмов перехода к хаотической генерации в полупроводниковой наноструктуре, помещенной во внешнюю резонансную систему.	95
16.30 – 18.30 <i>Устные доклады</i>		
<b>Магнитоэлектроника.</b>		
1.	<b>Байкенов Е.Ж., Изможеров И.М., Зверев В.В., Филиппов Б.Н.</b> (УФУ, Екатеринбург) Трехмерное микромагнитное моделирование периодических цепочек переходных областей в асимметричных вихревых доменных стенках.	96
2.	<b>Бегинин Е.Н., Садовников А.В., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е.</b> (СГУ, Саратов) Генерация и распространение коротких спиновых волн в нерегулярных ферритовых волноводах.	97
3.	<b>Бубликов К.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.</b> (СГУ, Саратов) Трансформация модового состава электромагнитных спиновых волн в структуре феррит-сегнетоэлектрик конечной ширины.	98
4.	<b>Устинов А.Б., Никитин А.А., Кондрашов А.В., Черкасский М.А., Калиникос Б.А.</b> (СПбГЭУ, Санкт-Петербург) Автогенерация солитонов огибающей и динамического хаоса электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидных осцилляторах.	99
5.	<b>Устинов А.Б., Кондрашов А.В.</b> (СПбГЭУ, Санкт-Петербург) Хаотическая динамика спин-волновых солитонов в ферромагнитных пленках.	100
6.	<b>Романенко Д.В., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Садовников А.В.</b> (СГУ, Саратов) Особенности формирования временных диссипативных структур в неавтономной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной плёнкой.	101
7.	<b>Матвеев О.В., Морозова М.А.</b> (СГУ, Саратов) Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в мультиферроидных структурах.	102
8.	<b>Тихонов В.В., Литвиненко А.Н.</b> (СГУ, Саратов) Магнитоакустический генератор с низким уровнем фазового шума.	103

---

---

7 февраля 2015 г., суббота

---

---

8.00 – 9.00      **Завтрак**

*Пленарное заседание:*

**Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики.**

---

09.00 – 09.45    **Храмов А.Е., Короновский А.А., Куркин С.А., Магда И.И., Фролов Н.С.** (СГУ, СГТУ, Саратов) Схемы управления электронным потоком с виртуальным катодом с использованием обратной связи: перспективные генераторы и усилители мощного электромагнитного излучения виртодного типа.

10.00 – 10.45    **Кузнецов А.П., Станкевич Н.В.** (СГТУ, Саратов) Автономные системы с квазипериодической динамикой: примеры и свойства (обзор). 104

---

14.00 – 15.00    **Заккрытие школы**

---

---

**Вакуумные генераторы и усилители электромагнитного излучения терагерцового диапазона с пространственно развитым электронным потоком****Еремка В.Д.***Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины*

**Аннотация** - Сообщение посвящается 60-летию Института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ИРЭ НАНУ). Рассмотрены направления исследований и разработок в области вакуумной терагерцовой электроники и терагерцовой радиофизики, которые проводятся в ИРЭ НАНУ с момента его основания 30.09.1955 года. В хронологическом порядке представлены результаты исследований, разработок и применения магнетронов на пространственных гармониках терагерцового диапазона (магнетронов с харьковским режимом работы) импульсного и непрерывного действия, отражательных клистронов и наноклистронов терагерцового диапазона непрерывного и импульсного действия, генераторных клинотронов терагерцового диапазона непрерывного и импульсного действия, генераторов дифракционного излучения - генераторных оротронов, генераторных и усилительных орбиктронов и клиноорбиктронов терагерцового диапазона, генераторных клистронов с распределенным взаимодействием ленточного электронного потока с высокочастотным полем. Кратко представлены результаты исследований вакуумных источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона на основе гиротронов и пениотронов на высоких ( $\geq 10$ ) гармониках циклотронной частоты, а также гироклинотронов и клинопениотронов за последние 25 лет. Анализируются возможности создания широкополосных ЛБВ с ленточным электронным потоком на частоте 0,22 ТГц. Результаты исследований и разработок в области терагерцовой радиофизики представлены достижениями в развитии пионерского направления квазиоптической радиометрики, предложенного и развиваемого в ИРЭ НАНУ под руководством одного из основателей Института - Евгения Митрофановича Кулешова. За предложение впервые в мире нового направления терагерцовой радиофизики - квазиоптической радиометрики, разработку, создание и широкое применение еџ элементов, узлов и устройств в интервале частот (0,1 - 2,0) ТГц Е.М. Кулешов удостоен в 2002 году высшей награды международного института IEEE - **Pioneer IEEE**.

---

## **T-лучи: от идеи к реальности**

**Григорьев А.Д.**

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург*

Все выше и выше и выше  
стремим мы полет наших  
птиц. . .

За 120 лет своего развития радиоэлектроника прошла путь от ультравысоких до очень низких частот и затем обратно до СВЧ и КВЧ. Следующий (и последний) этап – освоение терагерцевого диапазона, т. е. диапазона частот от 0.3 до 3 ТГц (длины волн от 1 до 0.1 мм). Электромагнитные волны этого диапазона называли T-лучами, что привносит в исследования романтику конца 19-го века с его X-лучами.

Значение ТГц диапазона определяется особенностями взаимодействия электромагнитных колебаний этого диапазона с веществом. К этим особенностям относятся: достаточно малая энергия кванта, недостаточная для ионизации атомов и молекул, но достаточная для возбуждения вращательных и колебательных энергетических уровней; избирательное поглощение излучения веществом, в частности, наличие окон прозрачности и непрозрачности в атмосфере Земли; большая информационная емкость каналов связи, обусловленная высокой несущей частотой (скорость передачи данных до нескольких Гб/с); высокая угловая и дальностная разрешающая способность, определяемая малой длиной волны; малые масса и габариты антенных систем.

Сегодня РЛС ТГц диапазона используются для исследования атмосферы Земли и Марса, а также для точного распознавания целей и наведения. Системы связи, обладающие высокой степенью скрытности и помехозащищенности используются для связи между спутниками, между спутниками и летательными аппаратами. ТГц излучение применяется в системах радиовидения высокой разрешающей способности, в системах безопасности в аэропортах и вокзалах.

Указанные особенности стимулировали исследования по созданию достаточно мощных когерентных источников терагерцевого излучения. Начало им было положено в 1970-х годах, когда были разработаны ЛОВ и отражательные клистроны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, а также лазеры на свободных электронах, релятивистские ЛОВ-ЛБВ, гиротроны и некоторые другие приборы. Однако выходная мощность ЛОВ и отражательных клистронов была слишком мала, а спектр колебаний гиротронов и релятивистских приборов далек от монохроматичности.

В связи с этим в 1990-х годах в США, Канаде и некоторых других странах начались работы по продвижению «обычных» ЭВП СВЧ – многорезонаторных клистронов, ЛБВ, магнетронов в терагерцевый диапазон. В США для этого была организована специальная программа - ТТИ (Teragertz Technology Initiative). В рамках этой программы были разработаны усилительные клистроны с распределенным взаимодействием на 95, 140, 220 и до 700 ГГц с выходной импульсной мощностью от 2 Вт на частоте 700 ГГц до 3 кВт на частоте 95 ГГц. К сожалению, подобные работы в России, насколько известно, не ведутся.

В лекции обсуждаются проблемы, связанные с созданием усилительных клистронов ТГц диапазона и пути их решения, в частности, использование многоазорных резонаторов, ленточных пучков, дифракционных выводов энергии.



## Расчет электродинамических характеристик планарной замедляющей системы для приборов вакуумной микроэлектроники терагерцевого диапазона частот

Бенедик А.И., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Торгашов Г.В.

*Саратовский государственный университет,  
Саратовский филиал ИРЭ РАН*

Одним из наиболее перспективных направлений в современной вакуумной электронике является освоение терагерцевого диапазона частот. Научными коллективами разных стран были предложены модели усилителей и генераторов – миниатюрных аналогов классических приборов вакуумной электроники: ЛБВ и ЛОВ, отражательных клистронов, клистронов бегущей волны, приборов со скрещенными полями и др. При создании таких приборов для повышения выходной мощности целесообразно использовать пространственно-развитые замедляющие системы и электронные пучки с большим поперечным сечением. В частности, интерес представляют приборы с ленточными электронными пучками и планарными замедляющими системами типа металлизированного меандра на диэлектрической подложке.

Настоящий доклад посвящен расчету электродинамических параметров меандровой замедляющей системы. Замедляющая система изготавливается методом травления слоя металла толщиной порядка 1 мкм на поверхности диэлектрика, в результате чего меандр оказывается размещенным на диэлектрическом “пьедестале”, высота которого регулируется временем травления. Предполагается, что наличие “пьедестала” позволит снизить ВЧ потери в диэлектрике. Вся меандровая структура вместе с диэлектрической подложкой помещена в прямоугольный волновод, размеры которого выбраны таким образом, чтобы не оказывать заметного влияния на результаты расчетов.

Расчеты проводились с помощью программы трехмерного численного моделирования HFSS, основанной на методе конечных элементов. В результате расчетов было выяснено, что основными управляющими параметрами в системе являются ширина меандра, ширина металлизированного полоска и глубина подтравы (высота диэлектрического пьедестала). Период замедляющей системы считался постоянным. В ходе моделирования были подобраны геометрические размеры для замедляющей системы диапазона частот 180-230 ГГц, они составили: период ЗС – 50 мкм, ширина меандра – 200 мкм, ширина металлизированного полоска – 15 мкм, глубина подтравы полагалась равной нулю, сечение прямоугольного волновода – 2х0.5 мм. Предполагалось, что ленточный электронный пучок сечением 160х30 мкм летит на расстоянии 30 мкм над поверхностью меандра. Для описанной замедляющей системы были рассчитаны электродинамические характеристики. Представленная планарная замедляющая система обладает нормальной дисперсией, замедление и сопротивление связи, усредненное по сечению пучка, в рабочем диапазоне частот составляют 8-11 и 10-25 Ом соответственно, ускоряющее напряжение меняется в пределах 2-4.5 кВ. На следующем этапе выполнения работы предполагается провести оптимизацию электродинамических параметров в рабочей полосе частот, провести расчет коэффициента стоячей волны волноводного ввода и вывода СВЧ энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-00986).

## Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора

Бенедик А.И., Рыскин Н.М.

*Саратовский государственный университет, Саратов*

В последние годы в связи с развитием технологии вакуумной микроэлектроники и разработкой новых искусственных материалов с необычными электродинамическими свойствами появилась возможность создания приборов вакуумной микроэлектроники – миниатюрных аналогов существующих вакуумных СВЧ-приборов, работающих в терагерцовом диапазоне частот. Представляется перспективным в качестве резонансных и волноведущих систем таких приборов использовать искусственные периодические структуры — фотонные кристаллы. В данном докладе рассматривается модель генератора, представляющего собой диод, помещенный в фотонно-кристаллический (ФК) резонатор. Сам резонатор образован точечным дефектом в периодической прямоугольной 2D структуре из диэлектрических стерженьков. Сверху и снизу ФК структуры расположены анодная и катодная пластины, с торцов фотонный кристалл окружен металлическим экраном. В центре дефекта на катодной пластине расположен автоэммиттер, к достоинствам которого можно отнести компактность, безинерционность и высокое значение крутизны вольт-амперной характеристики в сравнении с термокатодом.

В предыдущих работах была развита линейная теория диодного генератора с автоэмиссионным катодом в приближении малого сигнала и представлены результаты численного моделирования процесса взаимодействия электронного потока с полем диода, основанного на нестационарной теории возбуждения и методе "частиц в ячейке".

В настоящем докладе обсуждается вопрос расчета электродинамических характеристик фотонно-кристаллической структуры методом конечных элементов при помощи программного пакета HFSS. Особый интерес представляет методика расчета собственной и нагруженной добротности ФК резонатора. Тип решения Eigenmode Solver, реализуемый в пакете HFSS, позволяет провести расчет собственных частот и добротности ФК резонатора, однако он не применим для расчета характеристик нагруженного резонатора, т.к. полость вывода энергии и точечный дефект будут восприниматься решающим устройством как два связанных резонатора. Результаты расчета данным методом показали, что собственная добротность резонатора в первую очередь определяется не диэлектрическими потерями в керамических стерженьках, а ВЧ потерями в металле анодной и катодной пластин (до торцевых стенок экрана поле практически не доходит). Исходя из вышесказанного, были определены размеры диэлектрической решетки, которую возможно реализовать технологически — 7x7 стерженьков. Добротность такой структуры составила порядка 1200. При помощи калькулятора поля было рассчитано волновое сопротивление такого резонатора, усредненное по сечению пучка. Оно составило порядка 24.6 Ом.

Нагруженную добротность резонатора можно вычислить по резонансной кривой, полученной при помощи расчета S-параметров. Для проверки результатов рассматривались конструкции резонаторов с одним и с двумя выводами энергии различных конструкций. Внешняя добротность резонаторов с двумя выводами энергии оказалась в два раза меньше добротности резонаторов с одним выводом, что подтверждает правильность расчетов. Результаты расчетов S-параметров показывают, что путем вариации конструкции вывода ВЧ энергии нагруженную добротность можно менять в широких пределах, что дает возможность снизить стартовый ток генератора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-02-00976).

## Термоакустический метод регистрации импульсов СВЧ и ТГц диапазонов

Андреев В.Г., Вдовин В.А.

*физический факультет МГУ, Москва*

В докладе рассматриваются основные принципы построения нового детектора импульсов СВЧ и ТГц диапазона частот. Действие детектора основано на том, что при поглощении электромагнитного излучения в среде возникают механические напряжения, приводящие к возбуждению акустического импульса, форма которого определяется как свойствами поглотителя, так и временным профилем электромагнитного сигнала. Показывается, что термоакустический эффект может быть использован для регистрации импульсов электромагнитного излучения наносекундной длительности, а также определены условия, при которых акустический импульс, возникающий при термоакустическом преобразовании, полностью воспроизводит форму электромагнитного импульса.

Отличительной особенностью детектора ТАД является использование слоистой структуры, состоящей из радиопрозрачного окна, поглощающей среды в виде металлической пленки нанометровой толщины и жидкости. Выбор металлических пленок толщиной порядка нескольких нанометров обусловлен их способностью эффективно поглощать падающее электромагнитное излучение. Нами было экспериментально показано, что при нормальном падении непрерывного СВЧ излучения на структуру кварцевая подложка – алюминиевая пленка – воздух поглощение СВЧ энергии составляло порядка 50% от падающей энергии излучения. Максимум коэффициента поглощения наблюдался при толщине пленки в диапазоне от 2 до 3 нм. Принципиально важным оказалось то, что коэффициент отражения при этом был порядка 40%, в то время как толстый слой алюминия отражает 99.8% падающего излучения. Коэффициент прохождения не превышал 10%, что уменьшало возможность паразитной акустической генерации в граничащей с пленкой жидкости. ТАД применялся для регистрации СВЧ импульсов с длительностью от 2 до 120 нс на частотах 1-30 ГГц. При длительности импульса 120 нс форма сигнала, регистрируемая ТАД, полностью соответствовала сигналу с контрольного детектора СВЧ импульсов. Отклик ТАД на более короткие импульсы (2 и 5 нс) представлял собой импульс длительностью 18 нс, что определялось ограниченной частотной полосой акустического приемника. Приведены также результаты использования ТАД для регистрации мощного импульсного излучения на частотах 0.55, 0.68 и 0.87 ТГц. Преобразование электромагнитной волны в акустическую волну производится в структуре, состоящей из пленки хрома толщиной 10 нм, нанесенной на кварцевую подложку, и слоя иммерсионной жидкости, находящейся в контакте с пленкой. Показано, что при наносекундных (3 - 10 нс) длительностях импульсов форма сигнала, регистрируемая ТАД, с хорошей точностью соответствует производной от профиля принимаемого импульса.

## Исследование и разработка усилителя О-типа субтерагерцового диапазона с ленточным электронным пучком

Каретникова Т.А.<sup>1</sup>, Рожнчв А.Г.<sup>1</sup>, Рыскин Н.М.<sup>1,2</sup>, Торгашов Г.В.<sup>2</sup>, Синицын Н.И.<sup>2</sup>, Григорьев Ю.А.<sup>2,3</sup>, Бушуев Н.А.<sup>3</sup>, Бурцев А.А.<sup>3</sup>, Шалаев П.Д.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, <sup>2</sup>Саратовский филиал ИРЭ РАН имени В.А. Котельникова, Саратов, <sup>3</sup>АО "НПП "Алмаз Саратов

Приборы вакуумной СВЧ электроники коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцового) диапазонов находят широкое применение в радиолокации, спутниковой связи, медицинской технике в качестве миниатюрных источников излучения с относительно высокой мощностью. К таким приборам относятся лампы бегущей и обратной волны с замедляющими системами (ЗС) в виде плоских гребенок и ленточными электронными пучками [1]. В докладе представлены результаты исследований лампы бегущей волны (ЛБВ) диапазона 0.22 ТГц. Разработана методика оперативного расчета ЗС, основанная на методе интегрального уравнения [2], которая полностью согласуется с результатами расчетов по программам COMSOL [3] и HFSS [4], но значительно превосходит их по быстродействию. Проведены расчеты и оптимизация электродинамических характеристик (сопротивления связи, дисперсии, затухания) при различной геометрии гребенки (период, глубина и ширина ламелей, сдвиг гребенок относительно друг друга, ширина пролетного канала). На основании расчетов были выбраны геометрические размеры, обеспечивающие достаточно широкую полосу пропускания (порядка 70 ГГц) и сопротивление связи порядка 1 Ом, что позволяет получить коэффициент усиления примерно 20 дБ.

Также представлены результаты исследований электронно оптической системы усилителя. Разработана электронная пушка с вольфрамовым катодом, эмитирующим плоский электронный пучок сечения 100x700 мкм. Для уменьшения работы выхода катод был покрыт слоем осмия. Рабочая температура катода составила примерно 1200 °С. Максимальная плотность тока в 120 А/см<sup>2</sup> достигается в импульсном режиме при длительности импульса 10 мкс и скважности 2000.

С помощью программы Lorentz-3EM [5] проведено моделирование транспортировки плоского электронного пучка с током 100 мА и напряжением 20 кВ, сфокусированного однородным магнитным полем 1.12 Тл, через пролетный канал сечения 850x200 мкм. Изготовлена ЗС, состоящая из двух гребенок, сдвинутых относительно друг друга на половину периода. В докладе также обсуждается возможность использования автоэмиссионного катода на основе углеродных нанотрубок.

Работа поддержана грантами РФФИ №13-08-00986 и 14-02-00976.

1. Shin Y.-M., Baig A., Barnett L.R. et al. // IEEE Trans. ED, 2012. V. 59. P. 234.
2. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, №8–9. С. 601.
3. COMSOL Multiphysics® Modeling Software. Available: <http://www.comsol.com/>
4. High Frequency Structure Simulator (HFSS) of ANSYS. Available: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
5. LORENTZ 3D beam optics and particle trajectory simulation software. Available: <http://www.integratedsoft.com/Products/Lorentz/>

## **К линейной теории взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны (шумовые явления, фото-ЛБВ, карсинотрод)**

**Краснова Г.М., Трубецков Д.И.**

*СарГУ, Саратов*

В работе в рамках двумерной линейной аналитической теории рассмотрено взаимодействие ленточного электронного потока и электромагнитной волны. За счет влияния пространственного заряда и конечного фокусирующего магнитного поля рассматриваемая модель потока является неустойчивой к высокочастотным (ВЧ) возмущениям. Подробный вывод выражений для компонент поля пространственного заряда бесконечно тонкого электронного потока приведен в монографии [1]. Первоначально исследованы собственные волны в ленточном потоке. Получены дисперсионные соотношения и условие возникновения ВЧ неустойчивости. При анализе использованы метод последовательных приближений и метод дисперсионного уравнения. Предварительная модуляция соответствует автоэмиссии, фотоэмиссии и шумовым флуктуациям на катоде.

На основе метода последовательных приближений выявлено наличие резонансных эффектов при взаимодействии ленточного электронного потока и электромагнитной волны. Для неравновесной системы увеличение параметра пространственного заряда приводит к некоторому улучшению взаимодействия, чего не наблюдается в случае устойчивых электронных потоков. Учет теплового разброса по скоростям в электронном потоке приводит к снижению эффективности взаимодействия и к уменьшению коэффициента усиления. В рамках общей двумерной теории получено и исследовано дисперсионное уравнение пятой степени. Наличие резонансных эффектов использовано для перехода к двухволновому приближению и исследованию режимов усиления, генерации и подавления сигнала при синхронизме волны в линии передачи с циклотронными волнами, возбуждаемыми в электронном потоке.

Развитая двумерная аналитическая теория впервые использована для анализа шумовых явлений в усилителе бегущей волны, предгенерационного режима работы ЛОВО, процессов взаимодействия в фото-ЛБВ и в карсинотроде.

Для дрейфующего неустойчивого ленточного электронного потока с учетом шумовых флуктуаций тока и флуктуаций скорости Рэкса на входе в рамках двумерной теории получена нарастающая зависимость шумового тока от продольной координаты, что может служить возможным объяснением наблюдаемого аномального возрастания шумов в системе.

Для усилителя ЛБВ с учетом флуктуаций тока и флуктуаций скорости Рэкса получены зависимости для коэффициента шума от коэффициента усиления при различных параметрах системы. Уменьшение коэффициента шума возможно за счет увеличения параметра, соответствующего продольному магнитному полю. Увеличение параметра пространственного заряда приводит к росту коэффициента шума. Оказалось, что в общий коэффициент шума наибольший вклад вносят именно флуктуации продольных смещений. В двухволновом приближении, когда учитывается возбуждение только медленной циклотронной волны в устойчивом электронном потоке, увеличение магнитного поля приводит к росту шума. Происходит это в силу того, что с увеличением магнитного поля уменьшаются поперечные ВЧ-смещения электронов, а это, в свою очередь, влечет снижение эффективности взаимодействия и к уменьшению коэффициента усиления, который со-

гласно выражению для коэффициента шума обратно пропорционален ему.

В рамках двумерной теории впервые исследованы волновые процессы, происходящие в ЛБВ с фотокатодом. В приближении заданного тока получена одна из основных характеристик - эквивалентное сопротивление  $R_{eq}$ . Зависит оно от выбранных параметров пространственного заряда и циклотронного угла пролета и от соотношения продольных и поперечных начальных смещений. В целом увеличение циклотронного угла пролета приводит к уменьшению наибольшего  $R_{eq}$ , рассчитанного при оптимальном относительном угле пролета. В случае неустойчивости ленточного электронного потока характер кривых кардинально меняется. Наличие циклотронных эффектов позволило получить аналитические выражения для эквивалентного сопротивления в двухволновом приближении для случаев синхронизма волны в линии передачи с одной из волн потока (с медленной или быстрой циклотронной волной).

Проанализирован предгенерационный режим работы ЛОВ, как усилителя шумовых флуктуаций электронного потока. В кинематическом приближении получена зависимость спектральной плотности мощности шума (СПМШ) от относительного угла пролета. Увеличение продольного фокусирующего магнитного поля влечет за собой уменьшение максимального значения кривой СПМШ. Уже при  $\varphi_c \geq 4\pi$  результаты полностью совпадают с результатами одномерной теории предгенерационного режима ЛОВ при бесконечно большом магнитном поле.

В кинематическом приближении изложена двумерная теория лампы обратной волны с автомодуляцией эмиссии (карсинотрод) с учетом влияния фокусирующего магнитного поля. При использовании метода последовательных приближений и метода дисперсионного уравнения получены пусковые условия карсинотрода в общем случае и в двухволновом приближении (синхронный режим и новый режим циклотронного резонанса). Результаты в общем случае и в двухволновом приближении хорошо согласуются между собой. Фокусирующее магнитное поле оказывает влияние на пусковые величины относительного угла пролета и безразмерной пусковой длины при сравнительно небольших значениях циклотронного угла пролета, которые при больших магнитных полях стремятся к конкретным значениям, соответствующим результатам одномерной теории. Увеличение параметра, соответствующего предварительной модуляции электронного потока, приводит к снижению пусковой величины безразмерной длины и, соответственно, пускового тока пучка. В двухволновом приближении оказалось возможным определить аналитические выражения для пусковых условий в области циклотронного резонанса.

Работа выполнена в рамках Президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ 828.2014.2) и при поддержке грантов РФФИ No 13-02-01209а, No 14-02-00329.

1. Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Советское радио, 1970
2. Pierce J.R. Instability of hollow beams // IRE Trans. Electron Devices. 1956. Vol. 3. No. 4. P. 183

## Автоэмиссионная электронная пушка с ленточным пучком для терагерцовых ЛБВ

Давидович М.В., Бушуев Н.А.

СарГУ, ОАО "НПП "Алмаз Саратов

Для проектирования ЛБВ терагерцового диапазона необходимо создавать тонкие, но достаточно широкие ленточные пучки с высоким значением полного тока, необходимые для работы с такими типами замедляющих систем как гребенка, петляющий волновод, меандровая линия [1,2]. Для миниатюризации, повышения времени готовности и обеспечения большого уровня тока перспективными здесь являются наноразмерные автоэмиссионные пушки с сеточным электродом, требующие применения нанотехнологий при изготовлении. Изготовление сетки требует нанесения диэлектрического или высокоомного полупроводникового покрытия толщиной от десятков до сотни или нескольких сотен нанометров и нанесение на него тонкого сеточного электрода. При этом тянущее напряжение на сетке может составить от десятка до порядка сотни Вольт, обеспечивая даже близкую к предельной поверхностную плотность тока [3]. В качестве покрытия целесообразно рассматривать напыленные наноразмерные алмазные и алмазографитовые структуры, которые являются имитирующими, а также напыление диэлектрических пленок (например, SiO<sub>2</sub>) на эмитирующие поверхности. Указанный имитирующий элемент может быть также катодом Спиндта, выполненным по тонкопленочной технологии и электронно-пучковой микролитографии. Такие катоды имеют обычно радиусы кривизны острий не менее сотни нанометров и большой коэффициент усиления поля, что приводит к разогреву острий [3]. Имитирующие наноалмазные кластеры имеют радиусы порядка 6-10 нанометров и весьма малую работу выхода. В обоих случаях электроны эмитируются почти нормально к поверхности сетки и примерно со скоростью Ферми, что позволяет упростить расчет пушки.

В работе рассмотрена пушка в виде эмитирующей нормально к поверхности с постоянной скоростью Ферми плоской и клиновидной пластины, фокусирующего электрода, ускоряющего электрода (первого анода), анода и коллектора. С целью увеличения полного тока пучка пластина расположена параллельно ему и перпендикулярно коллектору, что позволяет увеличить ее протяженность и эмитирующую поверхность. Малый угол клина позволяет улучшить фокусировку и получить компрессию пучка. Предложен принцип моделирования пушки, основанный на методе вспомогательных источников. Для этого задаются контуры электродов, точки коллокаций на них и контуры расположения вспомогательных источников, представляющих зарядовые нити, сопоставленные точкам коллокаций. Использована функция Грина уравнения Пуассона свободного пространства. Предлагаемый алгоритм позволяет оптимизировать конфигурацию электродов, обеспечивающих хорошее токопрохождение. При расчете можно считать потенциал сетки (эмитирующей поверхности) нулевым, поскольку для терагерцовой ЛБВ необходим потенциал анода порядка 20 КВ.

1. Бушуев Н.А., Давидович М.В., Шиловский П.А. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика*. **12**, **2** (2012) 64.
2. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретников Т.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. *Phys. Rev. E* **56**, **8-9** (2013) 601.
3. Фурсей Г. Н. Автоэлектронная эмиссия. Лань, Москва, 2012.
4. Davidovich M.V., Bushuev N.A. *2014 Tenth International Vacuum electron Sources Conference and Second International Conference on Emission Electronics. Saint-Petersburg* (2014) 58

## Фазометрический комплекс КВЧ диапазона

Канаков В.А., Чуркин С.С.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ООО "АФС 52", Нижний Новгород

Фазометрические комплексы (ФМК) дистанционного зондирования широко применяются для бесконтактных измерений параметров движения (перемещения, скорости, ускорения, вибраций, статических и динамических деформаций) объектов различной природы, включая твердое тело, объем жидкости, облако аэрозоля, низкотемпературную плазму, фронты газодинамических процессов, биологические объекты, а также электрофизических характеристик (диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость, плотность, температура, давление). Лазерные методы дистанционного зондирования имеют ряд существенных ограничений на применимость в непрозрачных средах, при наличии препятствий, в условиях задымленности, запыленности, загрязнении оптических элементов. Однако, к ним устойчивы комплексы микроволнового зондирования крайне высокочастотного (КВЧ) и терагерцового (ТГц) диапазонов.

Принцип работы ФМК состоит в измерении фазы электромагнитного колебания частотой 100 ГГц (длина волны 3 мм), излучаемого и принимаемого комплексом и отражающегося от поверхности зондируемого объекта. Изменение расстояния от ФМК до объекта приводит к пропорциональному изменению фазы отраженного сигнала. Зондирование может осуществляться и на просвет, тогда сдвиг фазы принятого сигнала соответствует изменению оптической толщины просвечиваемого объекта.

Отличительной особенностью предлагаемого ФМК является использование в его устройстве диэлектрической элементной базы [1,2], основным элементом которой является диэлектрический волновод, который в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах имеет ряд преимуществ перед полым металлическим волноводом (меньший уровень погонного затухания, гибкость, простота и относительная дешевизна изготовления), что позволяет существенно упростить фазометрические комплексы, добиться снижения уровня шумов и, как следствие, уменьшить погрешность измерений физических величин. Основные технологические возможности ФМК:

- погрешность измерения перемещения не более 10 мкм;
- диапазон измеряемых скоростей от 0 до  $10^4$  м/с;
- удаление объекта от комплекса до 10 м;
- измерение электрофизических характеристик материалов и сред с относительной погрешностью не более 0,3%

Предлагаемый ФМК применим для широкого класса измерений в области научных исследований и промышленных технологических процессов.

1. Панкратов А.Г., Чуркин С.С. Зондирующие устройства микроволновой РИ на диэлектрических волноводах для исследования объектов на значительных расстояниях. *Межд. конф. XV Харитоновские научные тематические чтения кЭкстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны* Саров, Россия (2013).
2. Взятых В.Ф., Чуркин С.С. Фазометрический комплекс 3-мм диапазона на диэлектрической элементной базе. *24 Межд. конф. к СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии* Севастополь, Крым, Россия (2014).



## Параметрическая оптимизация условий узкополосной генерации терагерцевых частот в параллельных цепочках джозефсоновских контактов

Шампоров В.А., Мясников А.С., Панкратова Е.В., Панкратов А.Л.

ННГУ им. Н. И. Лобачевского, ИФМ РАН, ЛКН НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ВГАВТ, Нижний Новгород

Широко известно, что эффект Джозефсона, возникающий в сверхпроводящих системах со слабой связью, позволяет получать излучение с частотой порядка 0.1–2.5 ТГц. Генераторы на основе джозефсоновских контактов с использованием высокотемпературных сверхпроводников являются недорогими, перестраиваемыми, имеют компактные размеры и массу, не требуют больших магнитных полей и напряжений питания, что позволяет использовать их в самых разных областях человеческой деятельности, от медицины до экологии; к примеру, исследовалось применение джозефсоновских генераторов бегущей волны в гетеродинных приемниках [1]. Важной характеристикой является ширина спектральной линии излучения, определяющая, в частности, возможность фазовой автоподстройки частоты данных генераторов.

В данной работе исследуются типы синхронизации, наблюдаемые в одномерных цепочках параллельно связанных джозефсоновских контактов, и спектральные характеристики излучения в данных режимах. Параметры контактов выбраны нами в соответствии с рабочими параметрами высокотемпературных джозефсоновских переходов. В качестве модели отдельных джозефсоновских контактов используется модель резистивно-шунтированного перехода (RSJ). Применяя данную модель к однородной цепочке индуктивно связанных контактов, можно получить следующее уравнение на джозефсоновские фазы  $\varphi_k$  каждого из  $N$  соединенных параллельно контактов:

$$\varphi_k'' + \alpha \varphi_k' + \sin \varphi_k = i_e + \frac{\varphi_{k+1} - 2\varphi_k + \varphi_{k-1}}{l} + i_{fk}(t), \quad (1)$$

где  $k = 1 \dots N$  – номер контакта,  $\alpha$  – параметр, характеризующий затухание в каждом из контактов,  $i_e$  – ток смещения  $I_e$ , нормированный на величину критического тока контактов  $I_c$ ,  $l = 2\pi I_c L / \Phi_0$  – величина индуктивности,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока,  $i_f$  – нормированный флуктуационный ток гауссовского теплового шума с функцией корреляции  $\langle i_f(t) i_f(t + \tau) \rangle = 2\alpha D \delta(\tau)$ ,  $D$  – безразмерная интенсивность шума,  $t$  – время, нормированное на обратную плазменную частоту контактов.

В результате вычислений было установлено, что при выборе рабочей точки на характерных ступеньках ВАХ, которые возникают даже в случае, когда затухание системы порядка единицы, возможно уменьшение ширины линии генерации цепочки в 5–7 раз по сравнению с точками на омической ветви ВАХ из-за уменьшения дифференциального сопротивления; также наблюдается качественное сходство численных расчетов ширины линии с теоретической формулой [2], однако на ступеньке численное значение в 2 раза меньше теоретического.

Работа поддержана РФФИ (грант 14-02-31727).

1. V. P. Koshelets et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **17**, 336 (2007).
2. K. K. Likharev. *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*. Gordon and Breach, New York (1986) 634 pp.

---

**Результаты моделирования основных узлов импульсной ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 30-50 Вт****Азов Г.А., Ефремова М.В., Хриткин С.А.***ОАО "Плутон" , Москва*

В докладе представлены результаты численного моделирования параметров замедляющей системы и электронно-оптической системы ЛБВ 3-мм диапазона, обеспечивающей выходную импульсную мощность 30-50 Вт при ускоряющем напряжении, не превышающем 20 кВ. В ходе моделирования проведен анализ различных типов замедляющих систем (ЗС), таких как диафрагмированный волновод круглого сечения, прямоугольного сечения типа "миллитрон" и петляющий волновод, по результатам которого выбор остановился на применении системы типа "петляющий волновод". Приведены результаты расчета электродинамических параметров ЗС типа "петляющий волновод" с диаметром пролетного канала  $d=0,5$  мм, направленных с одной стороны на обеспечение условий синхронизма электронного пучка с полем "+1" пространственной гармоники при ускоряющем напряжении 19-20 кВ, а с другой стороны - возможности обеспечения периодического магнитного поля с амплитудой индукции не менее 0,4 Тл, определены конструктивные параметры замедляющей системы. Результаты расчета выходных характеристик прибора, проведенного по 1.5D программе, разработанной на предприятии в рамках метода крупных частиц, показали, что максимальное значение КПД при токе пучка 80 мА достигается при длине системы порядка 60 мм. Рассчитаны несколько вариантов электронно-оптических систем с различными конструктивными параметрами, формирующие электронный пучок с током 80-90 мА при ускоряющем напряжении 19 кВ. Возможность обеспечения необходимой величины индукции магнитного поля, создаваемого МПФС, оценивалась по трехмерной программе моделирования с последующей экспериментальной проверкой результатов расчетов. Полученные результаты моделирования положены в основу разработки конструкции и технологии ЛБВ W - диапазона.

---

## Две лекции о великих уравнениях

Трубецков Д.И.

СарГУ, НИЯУ «МИФИ», Саратов

Лекции посвящены Джеймсу Клерку Максвеллу и его великим уравнениям.

Первая лекция носит название " $\frac{dP}{dT} = JCM$  James Clerque Maxwell". Так подписывал Максвелл свои стихотворные произведения и некоторые статьи. В ней изложена хронология жизни JCM с описанием некоторых подробностей его жизни.

Вторая лекция "Что сделал Максвелл в трех своих знаменитых статьях по электромагнетизму". Речь идет о работах "О фарадеевских силовых линиях" (1855 и 1856 гг.), "О физических силовых линиях" (1861 г.) и "Динамическая теория электромагнитного поля" (1864 г.). Подробно обсуждаются первая и вторая работы. Обращено внимание на трудности, с которыми столкнулся Максвелл, чтобы найти механическую аналогию электродинамическим явлениям (он не мог отказаться от эфира). Он не доволен найденным: кДо сих пор мне еще не удалось разработать идею об электротоническом состоянии настолько, чтобы можно было представить его природу и свойства, не прибегая к символамъ.

Сегодня можно утверждать, что прав был Генрих Герц, который написал: "Теория Максвелла – это его уравнения".

## Многозазорные резонаторы для клистронов миллиметрового диапазона длин волн

Григорьев А.Д., Джалилов Б.О.

*СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург*

Усилительные многорезонаторные клистроны рассматриваются как один из наиболее перспективных источников мощного когерентного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Однако при разработке этих приборов возникает трудностей, связанных с малыми размерами деталей прибора, которые должны быть соизмеримы с длиной волны.

В частности, малый диаметр пролетного канала и, соответственно, электронного луча в сочетании с большим током луча требует использования электронных пушек с большой компрессией. Это практически исключает использование многолучевых электронных потоков. Однолучевые потоки при выходной мощности прибора несколько кВт неизбежно имеют большое ускоряющее напряжение при сравнительно малом токе, т. е. отличаются большим сопротивлением постоянному току  $R_0$ . Для эффективного взаимодействия с такими потоками необходимы резонаторы с большим волновым сопротивлением  $\rho$ , как правило, составляющем 300...500 Ом. Обычные тороидальные резонаторы не могут обеспечить такие значения волнового сопротивления, поэтому в приборах миллиметрового диапазона часто применяются многозазорные резонаторы, выполненные из отрезка замедляющей системы.

В работе приводятся результаты сравнительного исследования многозазорных резонаторов, выполненного с использованием программы компьютерного моделирования RFS. Исследованы резонаторы на основе ЗС типов "гребенка" и "встречные штыри" обладающие достаточно жесткой и технологичной конструкцией, позволяющей изготавливать их с помощью существующих технологий. Показано, что для выравнивания амплитуды поля в зазорах необходимо использовать нерегулярные ЗС. При этом можно получить высокие значения волнового сопротивления (до 100 Ом на зазор).

При конструировании выходных резонаторов необходимо обеспечить требуемую степень связи резонатора с выходным волноводом. Практика показывает, что отверстие (диафрагма) в стенке резонатора, возбуждающая волновод, не обеспечивает достаточной степени связи без заметного ухудшения параметров резонатора. В работе рассматриваются несколько конструкций элементов связи, в том числе с использованием отрезка волновода, заполненного диэлектриком. Такой отрезок может одновременно играть роль пассивного резонатора, расширяющего полосу пропускания прибора, а также вакуумного окна. Другой способ получения требуемой степени связи состоит в использовании нерегулярных ЗС для создания в области связи необходимой величины поля.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что существующие технологии позволяют конструировать и изготавливать многозазорные резонаторы для клистронов с выходной импульсной мощностью до нескольких кВт в диапазоне частот до 100 ГГц.

---

---

## Конкуренция "многоствольности" и "многолучевости": пути развития сверхмощных и сверхширокополосных клистронов

Комаров Д.А.

*Федеральное государственное унитарное предприятие "НПП Торий г. Москва*

В лекции представлены принципиальные возможности создания клистронных усилителей в основных рабочих диапазонах длин волн, таких как L, C, X-диапазонах, с выходной мощностью от 100 кВт и полосой усиления от 6%. Подробно изложен принцип "многоствольных" приборов, предложенный в 80-х годах А.И. Ивановым и Е.П. Якушкиным, а также принцип "многополосности" предложенный В.И. Пасмаником. Проведен анализ разработанных на этих принципах приборов, представлены особенности проектирования, как пространства взаимодействия, так и электродинамики выходных устройств. В качестве примера приведены результаты проектирования мощного клистрона для дальней радиолокации и для систем электромагнитного подавления.

## Отражение и прохождение СВЧ электромагнитных волн через тонкие пленки гранулированных аморфных металл-диэлектрических нанокompозитов

Антонец И.В., Котов Л.Н., Кирпичева О.А., Голубев Е.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

*СыктГУ, Сыктывкар; Инст. геологии КНЦ Уро РАН, Сыктывкар; Воронежский ГТУ, Воронеж; ИРЭ РАН, Москва*

Экспериментально исследовано отражение и прохождение СВЧ электромагнитных волн через тонкие пленки гранулированных аморфных металл-диэлектрических нанокompозитов на основе железа и никеля, в качестве одного из компонентов содержащих цирконий [1]. Обнаружено, что статическая удельная проводимость исследуемых пленок, с изменением концентрации металлической фазы от 0,2 до 0,6 меняется на семь порядков по степенному закону, близкому к экспоненте. Измерены коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн диапазона 8-40 ГГц в зависимости от толщины пленок (70-500 нм). Показано, что определяемая в таких экспериментах динамическая проводимость пленок превышает статическую, измеренную на постоянном токе, более чем на три порядка, принимая такие значения еще задолго до порога перколяции металлической фазы, причем как величина динамической проводимости, так и ее превышение над статической в исследованном диапазоне от частоты не зависят. В качестве возможных причин наблюдаемого в экспериментах значительного превышения динамической проводимости над статической предложены механизмы емкостного шунтирования, эффективной диэлектрической проницаемости, внутригранулярных токов, дипольного излучения. Путем сравнительного качественного анализа перечисленных механизмов высказано предположение о преобладающей роли механизма внутригранулярных токов, причем высокая степень превышения динамической проводимости над статической (на три порядка) интерпретирована как результат значительного превышения проводимости металлической фазы над диэлектрической (на семь порядков). Даны рекомендации в проведении дальнейших экспериментов, направленных на выявление определяющей роли циркония, а также выбора между предложенными механизмами путем повышения частотного диапазона и использования квазиоптических волноведущих линий. В теории рекомендовано развить модели предложенных механизмов превышения динамической проводимости над статической до получения коэффициентов отражения и прохождения в режиме бегущих волн.

1. Антонец И.В., Котов Л.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *ПЖТФ* **40** (2014) 1

## Механизм внутригранулярных токов как условие формирования динамической СВЧ проводимости аморфных наногранулированных пленок "металл-диэлектрик"

Антонец И.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

*СыктГУ, Сыктывкар; ИРЭ РАН, Москва*

Экспериментальное исследование СВЧ свойств наногранулированных пленок "металл-диэлектрик" выполненных на основе железа и никеля с дополнительным содержанием циркония [1], показало, что в таких пленках динамическая проводимость в диапазоне частот до 40 ГГц превышает статическую, измеренную на постоянном токе, на два-четыре порядка, причем степень превышения от частоты не зависит. В качестве вероятной причины такого превышения рассмотрен механизм внутригранулярных (внутрикластерных) токов. Предложена модель планарного распределения гранул внутри пленки, на основе которой показано, что в диапазоне частот, на которых проводились эксперименты, поля вторичных волн, создаваемых волной, падающей на слой гранул, приближаются по величине к полю падающей волны. На основе предложенной модели рассчитан коэффициент отражения волны от одного слоя гранул. В формировании вторичных волн выявлена определяющая роль поверхностных слоев гранул, обусловленная взаимной компенсацией полей соседствующих гранул. Модель обобщена на случай пленки, содержащей значительное количество слоев. Рассмотрены особенности формирования отраженной и проходящей волн в предельных случаях тонкой и толстой пленки. Результаты расчета по предложенной модели сопоставлены с экспериментами по отражению волн от пленок. Выявлено хорошее соответствие как по порядку величины коэффициента отражения, так и по связи его с толщиной пленок. Результаты эксперимента интерпретированы с учетом механизма компенсации вторичных волн. Наблюдаемое в эксперименте критическое значение толщины пленки, соответствующее порогу резкого роста коэффициента отражения, объяснено раскомпенсацией. Даны рекомендации для дальнейших исследований, в том числе более подробного выявления структурного характера пленок, а также механизмов формирования вторичных волн с учетом многослойной структуры и взаимной компенсации волн от отдельных слоев гранул.

1. Антонец И.В., Котов Л.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *ПЖТФ* 40 (2014) 1

---

**Деление частоты ферромагнитного резонанса на основе нелинейного СВЧ магнитоотрицательного преобразователя****Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И.***СыктГУ, Сыктывкар; ИРЭ РАН, Москва*

Рассмотрены связанные колебания намагниченности и упругого смещения в нормально намагниченной ферритовой пластине, обладающей магнитоупругими свойствами, возбуждаемые переменным магнитным полем, частота которого совпадает с частотой ферромагнитного резонанса магнитной подсистемы [1]. Показано, что в случае, когда резонансная частота упругой подсистемы составляет кратную часть резонансной частоты магнитной подсистемы, возможно возбуждение упругих колебаний на частоте, соответствующей частоте упругого резонанса, что представляет собой процесс деления исходной частоты в кратном отношении. Показано, что процесс деления частоты возможен только в сильно нелинейном режиме возбуждения, тогда как в линейном режиме колебания упругой подсистемы происходят только на частоте возбуждения. Рассмотрено деление частоты как в целочисленном, так и в дробном отношении. Показано, что при целочисленном отношении форма колебаний на разделенной частоте при низкой кратности деления близка к синусоидальной, отличаясь от нее тем более, чем больше кратность деления, тогда как при дробном отношении искажения синусоиды наблюдаются уже при небольших степенях кратности. Построены фазовые портреты возбуждаемых упругих колебаний. Показано, что при целочисленной кратности деления портреты имеют вид криволинейных многоугольников с числом вершин на единицу превышающим кратность деления, а при дробной кратности число вершин увеличивается тем сильнее, чем больше кратность отличается от целочисленной. Рассмотрено соотношение процесса деления с временами релаксации магнитных и упругих колебаний. Показано, что устойчивое деление наблюдается только в том случае, когда время релаксации упругих колебаний не менее чем на порядок превышает время релаксации магнитных. Для интерпретации описанных эффектов предложен механизм ударного возбуждения упругих колебаний, имеющего место при большой амплитудой возбуждающего сигнала в сочетании с малым времени релаксации магнитных колебаний.

1. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *РЭ* **54** (2009) 863



## Умножение частоты ферромагнитного резонанса на основе нелинейного СВЧ магнитострикционного преобразователя

Власов В.С., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

*СыктГУ, Сыктывкар; ИРЭ РАН, Москва*

Рассмотрены связанные колебания намагниченности и упругого смещения в нормально намагниченной ферритовой пластине, возбуждаемые СВЧ магнитным полем на частоте ферромагнитного резонанса магнитной подсистемы [1]. Выявлено, что в случае, когда резонансная частота упругой подсистемы в кратное число раз превышает частоту магнитной, возможно возбуждение упругих колебаний на частоте упругого резонанса, то есть умножение исходной частоты в кратном отношении. Процесс умножения частоты возможен только в сильно нелинейном режиме, причем поляризация возбуждающего поля должна быть линейной. Рассмотрено умножение частоты как в целочисленном, так и в дробном отношении. Показано, что при целочисленном отношении форма колебаний на умноженной частоте при низкой кратности умножения близка к синусоидальной, отличаясь от нее за счет вклада на частоте возбуждения тем более, чем кратность умножения больше. При дробном отношении в возбуждаемых колебаниях преобладает составляющая на частоте возбуждения, тогда как составляющая на умноженной частоте составляет единицы или немногие десятки процентов. Построены фазовые портреты возбуждаемых упругих колебаний. Показано, что при целочисленной кратности умножения портреты имеют вид нескольких вложенных друг в друга колец, тогда как при дробной кратности портрет имеет вид одного кольца, соответствующего частоте электромагнитного возбуждения, с небольшими искажениями за счет примеси умноженной частоты. Отмечено, что устойчивое умножение возможно только в том случае, когда время релаксации упругих колебаний не менее чем на порядок превышает время релаксации магнитных, причем условия, требуемые для умножения частоты, являются значительно более критичными, чем аналогичные условия для деления. Для интерпретации умножения частоты привлечен тот же механизм ударного возбуждения, что и для интерпретации деления. Выявлено, что в случае умножения ударное возбуждение является значительно более мягким, чем в случае деления, что и является причиной большей критичности упомянутых условий.

1. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *РЭ* **54** (2009) 863

## Применение модели связанных осцилляторов для анализа нелинейного возбуждения СВЧ гиперзвука при ферромагнитном резонансе

Власов В.С., Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

*СыктГУ, Сыктывкар; ИРЭ РАН, Москва*

В применении к задаче анализа работы магнитострикционного преобразователя СВЧ диапазона на частоте ферромагнитного резонанса рассмотрено возбуждение гиперзвуковых колебаний переменным магнитным полем в геометрии нормально намагниченной ферритовой пластины [1]. С целью упрощения вычислений рассмотрено квадратичное приближение по намагниченности с учетом кругового характера прецессии, в результате чего полная система, содержащая семь уравнений первого порядка и четыре граничных условия, сведена к квадрированной системе четырех уравнений первого порядка без граничных условий, соответствующей модельной системе из двух связанных осцилляторов - магнитного и упругого. Показано, что полученная ранее линеаризованная система является частным случаем полученной здесь квадрированной системы. На основе численного анализа для случая железиттриевого граната (ЖИГ), показано, что главную роль в динамическом поведении системы играют слагаемые, пропорциональные третьей степени по намагниченности и произведению намагниченности на квадрат ее производной по времени. Путем рассмотрения развития колебаний во времени выполнен анализ приближения, обеспечиваемого полученной системой по сравнению с решением исходной нелинейной системы. Показано, что при описании упругих колебаний на уровне точности 20 процентов линеаризованная система является корректной на уровне переменных полей не более 0.05 от намагниченности насыщения при углах прецессии порядка 3 градусов, тогда как квадрированная система сохраняет корректность вплоть до полей, составляющих 0.40 от намагниченности насыщения, что соответствует углам прецессии до 25 градусов. По магнитным колебаниям квадрированная система сохраняет точность 5 процентов до полей, превышающих намагниченность насыщения более чем в три раза, что соответствует углам прецессии до 40 градусов. Таким образом показано, что полученная система, основанная на модели связанных осцилляторов, обеспечивает хорошую точность расчетов сильно нелинейных режимов работы магнитострикционного преобразователя, необходимых для возбуждения СВЧ гиперзвука высокой мощности.

1. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *РЭ* 54 (2009) 863

## Нелинейные явления при возбуждении СВЧ гиперзвука в условиях ферромагнитного резонанса

Власов В.С., Иванов А.П., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

*СыктГУ, Сыктывкар; ИРЭ РАН, Москва*

В применении к задаче анализа работы магнотриксционного преобразователя СВЧ диапазона рассмотрено возбуждения гиперзвуковых колебаний переменным магнитным полем [1] на основе модели связанных осцилляторов, использующей квадратичное приближение. Рассмотрено развитие колебаний во времени. Показано, что в зависимости от величины параметров связи возможны два режима вынужденных колебаний, соответствующие спаду и нарастанию амплитуды во времени, разделенные третьим режимом (точкой бифуркации), в котором амплитуда вынужденных колебаний сохраняет постоянное значение, причем критичность порога перехода от одного режима к другому по константе связи составляет не менее шести значащих цифр. Выполнено аналитическое решение полученной модельной системы в режиме постоянной амплитуды колебаний. Найдены два критерия бифуркации, один из которых определяет критическое значение константы связи, соответствующее переходу между режимами, а другой дает частоту резонансных колебаний системы в точке перехода. Показано, что точка бифуркации между режимами эквивалентна точке переориентации вектора намагниченности. Выявлена роль кубической нелинейности, как главного фактора в ограничении экспоненциального роста амплитуды вынужденных колебаний. Исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) связанных колебаний при различных уровнях возбуждения. Показано, что квадратичное приближение при амплитуде переменного поля до 0.7 от намагниченности насыщения обеспечивает точность описания АЧХ по магнитным колебаниям не менее 2%. Рассмотрена применимость квадратичного приближения для описания самоподдерживающегося процесса автомодуляционного характера. Показано, что модельная система полностью отражает развитие во времени огибающей как регулярных, так и хаотических автомодуляционных колебаний, причем отличие по амплитуде от решения по полной системе не превышает 20%. Показано, что расчет на основе модели связанных осцилляторов в квадратичном приближении приводит к экономии машинных ресурсов (памяти) в два раза и сокращению времени машинного счета на два порядка.

1. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *РЭ* 54 (2009) 863

## Трехмерное микромагнитное моделирование локализованных топологических структур в тонких магнитных пленках

Зверев В.В.\*<sup>1</sup>, Филиппов Б.Н.<sup>1,2</sup>, Дубовик М.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>УрФУ, <sup>2</sup>ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

\*vzvzverev@gmail.com

В последние годы, благодаря росту производительности компьютеров, появилась возможность численного моделирования существенно трехмерных магнитоупорядоченных структур и их динамического поведения. Значительный теоретический и практический интерес представляют хорошо локализованные объекты, стабильность которых связана с наличием у них отличных от нуля топологических зарядов.

В данной работе представлены результаты моделирования объектов, разделяющих участки доменных границ в тонких магнитных пленках – одиночных переходных элементов и кластеров, в состав которых входят вихри (антивихри) и сингулярные (блоховские) точки.

*Статические структуры.* Найдены переходные структуры различного типа в одно-вихревых [1] и двухвихревых [2] доменных стенках, существующих в магнитно-мягких магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией. Показано, что такие структуры, стабилизированные наличием поверхностных вихрей (антивихрей) и блоховских точек, могут образовывать устойчивые кластеры. Также исследованы стенки с перетяжками [3], имеющие периодическую структуру. Найдены конфигурации, минимизирующие энергию при различных толщинах пленки, различных параметрах магнетика.

*Динамические процессы.* Изучены сверхбыстрые динамические процессы в искусственно созданных неравновесных конфигурациях: сближения и перестройки переходных структур, сопровождающиеся аннигиляцией вихрей/антивихрей и эмиссией спиновых волн (обменные взрывы); процессы возникновения блоховских точек при слиянии вихрей/антивихрей; процессы аннигиляции блоховских точек.

*Визуализация топологических перестроек.* Разработан метод визуализации локализованных объектов, имеющих топологический заряд [1-3], основанный на варьировании геометрии замкнутых контуров на поверхности образца (замкнутых граничных поверхностей объемных областей внутри образца) и последующем расчете значений топологического заряда по результатам пробегания этих контуров (поверхностей). Метод позволяет получать "мгновенные снимки" и анимацию топологических перестроек.

При расчетах использовались пакеты микромагнитного моделирования OOMMF [4] и MuMax [5].

1. Зверев В.В., Филиппов Б.Н. *ЖЭТФ* **144** (2013) 126
2. Зверев В.В., Филиппов Б.Н., Дубовик М.Н. *ФТТ* **56** (2014) 1725
3. Дубовик М.Н., Зверев В.В., Филиппов Б.Н. *ФТТ* **55** (2013) 1942
4. Donahue M.J., Porter D.G.. OOMMF User's Guide, Version 1.0 (NISTR, Gaithersburg, 1999)
5. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M. et al *AIP Advances* **4** (2014) 107133

## Среднее время индуцированной шумом генерации импульсов напряжения в джозефсоновских контактах

Калякулина А. И., Панкратов А. Л.

ННГУ им. Н. И. Лобачевского, ИФМ РАН, ЛКН НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород

Джозефсоновские контакты и устройства на их основе [1] являются наиболее перспективными кандидатами для генерации терагерцевого излучения. Генерация диапазона от 0.1 до 2.5 ТГц в слабых контактах между сверхпроводниками возникает вследствие нестационарного эффекта Джозефсона при поддержании постоянного напряжения в системе. Целью данной работы является численное исследование среднего времени индуцированной шумом генерации импульсов напряжения, когда ток через контакт меньше критического, и в отсутствие шума генерация невозможна, и сравнение полученных результатов с существующими аналитическими формулами.

Процессы, происходящие в точечном Джозефсоновском контакте, описываются уравнением Ланжевена:

$$\omega_c^{-1} \frac{d\varphi(t)}{dt} = -\frac{du(\varphi)}{d\varphi} - i_F(t),$$

где  $u(\varphi) = 1 - \cos \varphi - i\varphi$  – потенциальный профиль,  $\varphi$  – разность фаз,  $i = I/I_c$ ,  $I_c$  – критический ток,  $i_F(t) = I_F/I_c$ ,  $I_F$  – случайная компонента тока,  $\omega_c = 2eR_N I_c / \hbar$  – характеристическая частота контакта. Наличие случайной компоненты тока дает возможность разности фаз перескочить из одного потенциального минимума в другой, в результате чего на выходе контакта возникает импульс напряжения.

Точное аналитическое выражение для среднего времени генерации импульса имеет вид [2]:

$$\tau = B \left\{ \int_{\varphi_0}^{\varphi_2} e^{-\frac{\cos \varphi + i\varphi}{\gamma}} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{\frac{\cos \varphi + i\varphi}{\gamma}} d\varphi + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{\frac{\cos \varphi + i\varphi}{\gamma}} d\varphi \cdot \int_{\varphi_2}^{\infty} e^{-\frac{\cos \varphi + i\varphi}{\gamma}} d\varphi \right\},$$

где  $B = 1/\omega_c \gamma$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – левая и правая граница исходного потенциального минимума.

В предельном случае малой интенсивности шума по сравнению с высотой потенциального барьера может быть использована приближенная формула Крамерса:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_c \sqrt{1 - i^2}} e^{\alpha},$$

где  $\alpha = (2\sqrt{1 - i^2} + 2i(\arcsin i - \frac{\pi}{2})) / \gamma$ . Из численных параметров, таких как количество реализаций, шаг по времени, общее количество временных итераций, наибольшее влияние оказывает шаг по времени. Уменьшение шага позволяет добиться большей точности вычислений и более близкого совпадения с теоретическими результатами в области малой интенсивности шума. Найденны пределы применимости приближенной формулы Крамерса при увеличении интенсивности шума путем сравнения с результатами численного моделирования и точной формулы.

Работа поддержана Минобрнауки (контракт 1.115.2014/ К).

1. К.К. Likharev. *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*. Gordon and Breach, New York (1986) 634 pp.
2. A.N. Malakhov, A.L. Pankratov, *Physica C*. **269**, 46 (1996).

## Response Optimization of non-autonomous systems of Josephson Junctions with low attenuation

Mylnikov V.M., Pankratov A.L., Pankratova E.V.

*N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Institute for Physics of Microstructures RAS, NNSTU n.a. R.E. Alekseev*

Using of the Josephson junctions (JJ) in the rapid single flux quantum (RSFQ) [1] - is one of the most perspective applications in superconductive electronics. Here we have a very important problem to solve: response optimization of JJ by changing external parameters. The purpose of the study is to compute the conditions under which we could have the best pulse generation (with minima of timing errors and switching time) in non-autonomous systems such as an array of  $k = 1 \dots N$  JJs.

For a single JJ we used the Resistively Shunted Junction model (RSJ) [1]:

$$\varphi'' + \alpha\varphi' = i(t) - \sin \varphi + i_f(t) \quad (1)$$

where  $i(t) = i_0 + A \sin(\omega t)$  is the driving current normalised to  $I_c$  (the critical current),  $A$ ,  $i_0$ ,  $\omega = \text{const}$ ,  $i_0 < 1$ ,  $t$  is the time normalized to  $\omega_p^{-1}$ ,  $\omega$  is the driving current frequency normalized to  $\omega_p$ ,  $\alpha = \omega_p / \omega_c$  is the attenuation coefficient,  $\omega_p = \sqrt{2eI_c / C\hbar}$ ,  $\omega_c = 2eI_c / \hbar G_N$ ,  $C$  is the junction's capacitance,  $e$  is the electron charge,  $G_N$  is the normal conductance of the JJ,  $\hbar$  is the Planck constant,  $i_f(t)$  is the fluctuation current normalized to  $I_c$ . In the thermal limit the normalized fluctuation current can be treated as a white noise:  $\langle i_f(t) i_f(t + \tau) \rangle = 2\alpha\gamma\delta(\tau)$ ,  $\gamma = 2ekT / (\hbar I_c)$ , here  $\gamma$  is the dimensionless noise intensity,  $T$  is the temperature, and  $k$  is the Boltzmann constant.

In the research [2] was discovered that in single JJ with a big coefficient of attenuation  $\alpha$  we face the noise damping by switching pulse: the mean switching time (MST) and its standard deviation (SD) have minimums as functions of the driving current frequency  $\omega$ . In our study the single JJ and the array of many JJs were analyzed with a small attenuation coefficient. We obtained that the effect of the noise damping exists having several features.

The work has been supported by RFBR (grant 14-02-31727)

1. K.K. Likharev. *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*. Gordon and Breach, New York (1986) 634 pp.
2. A.L. Pankratov, B. Spagnolo. Phys. Rev. Lett. **93**, 177001 (2004).

## Исследование устойчивости и анализ бифуркационных диаграмм SPICE-моделей электронных схем

Мантуров А.О., Глуховская Е.Е.

СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Для исследования сложного поведения нелинейных электронных схем все чаще начинают применяться средства и возможности симуляторов на основе ядра SPICE [1], поскольку для большинства электронных компонентов стали доступны их точные высокореалистичные SPICE-модели. Поскольку вычислительное ядро SPICE содержит встроенные алгоритмы неявного численного интегрирования [2], стало возможным автоматизированное исследование динамики электронных схем, демонстрирующих жесткое поведение.

Однако, подавляющее большинство SPICE-симуляторов электронных схем являются программными продуктами с "закрытой" архитектурой, ориентированной, в первую очередь, на практические задачи разработки электронных схем и устройств. Это исключает применение методов анализа динамических систем, основанных на специфических алгоритмах - бифуркационного анализа, нахождения сечений Пуанкаре, расчета размерностных характеристик и т.д. Как следствие, результаты численных экспериментов по изучению динамики SPICE-моделей подвергаются дополнительной обработке с использованием стороннего программного обеспечения, что весьма осложняет процесс численного моделирования.

В настоящей работе представлены SPICE-реализации алгоритмов построения однопараметрической бифуркационной диаграммы и расчета спектра ляпуновских показателей для произвольной электронной нелинейной схемы, представленной в виде соответствующей SPICE-модели. Указанные алгоритмы реализованы как подключаемые модули в виде подсхем (subcircuit) и могут быть использованы в любом симуляторе электронных схем на основе ядра SPICE, допускающем использование подключаемых модулей типа subcircuit. Представление результатов осуществляется полностью средствами применяемого SPICE-симулятора. В качестве управляющего параметра возможно использовать любой параметр SPICE-модели, допускающий изменение под действием тока или напряжения.

Алгоритм построения одномерных бифуркационных диаграмм реализован на основе построения сечения Пуанкаре для переменных модели (токов и напряжений схемы). Алгоритм расчета спектра показателей Ляпунова реализован в виде подсхем, эмулирующих алгоритмы Бенеттина [3] и расчета условных характеристических показателей, что позволяет использовать анализ устойчивости как в случае автономных, так и неавтономных электронных схем. SPICE-реализации указанных алгоритмов были протестированы на автономной (генератор Колпитца) и неавтономной ("RL-Диод" контур) электронных схемах, продемонстрировав хорошее соответствие результатов известным экспериментальным данным для таких систем.

1. Joel D. Hewlett and Bogdan M. Wilamowski. *Int. Journal of Engineering Education*, **27** (2011) 217
2. L. O. Chua and P. M. Lin. *Computer Aided Analysis of Electronic Circuits*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
3. G. Benettin, L. Galgani, J.M. Strelcyn. *Phys. Rev.*, **A14** (1976) 2338

## К теории синхронизации двухмодового электронного генератора с близкими собственными частотами

Стародубова Е.Н., Усачева С.А., Рыскин Н.М.

*Саратовский государственный университет, Саратов*

В последнее время большое внимание уделяется проблеме повышения мощности генерации и управления спектром колебаний в современных электронных СВЧ генераторах. Ранее нами было исследовано влияние внешнего воздействия на конкуренцию мод в упрощенной квазилинейной модели двухмодового электронного мазера [1]. Для данной модели был выявлен ряд интересных особенностей, таких как асинхронное возбуждение/подавление и мультистабильность в случае сильно связанных мод.

Однако, как правило, в приборах со сверхразмерными резонаторами приходится иметь дело с конкуренцией мод с близкими частотами. Подобная ситуация исследуется в данной работе. В частности, исследуется модель неавтономного генератора с двумя степенями свободы в случае, когда разность частот конкурирующих мод гораздо меньше ширины зоны самовозбуждения. Получены системы укороченных уравнений для мгновенных комплексных амплитуд мод. На ее основе проведено численное моделирование системы и выделены области различных режимов. Отметим, что поведение системы зависит от выбранных начальных условий, т.е. наблюдается мультистабильность синхронных режимов. Существуют области синхронных режимов с доминированием либо первой, либо второй моды. Например, когда частота возбуждения лежит за пределами области синхронизации, наблюдается квазипериодический режим биений. С увеличением частоты система переходит в область, где доминирует первая мода. С дальнейшим увеличением частоты мы переключаемся на режим, где доминирует вторая мода, а затем – в режим биений. Аналогичная картина наблюдается, когда мы движемся в противоположном направлении.

Также в работе исследуется поведение мгновенных фаз колебаний. В режиме синхронизации фаза захватывается внешним сигналом и изменяется в ограниченном диапазоне, в то время как в режиме биений наблюдается бесконечный дрейф фазы.

Представлены результаты изучения динамики системы под воздействием сигнала с изменяющейся частотой. Рассматриваются случаи линейной и синусоидальной частотной модуляции, причем основное внимание уделяется режимам переключения мод. Моделирование подобных ситуаций представляет интерес для ряда приложений, например, для задач микроволнового нагрева плазмы.

1. Перегородова Е.Н., Рыскин Н.М., Усачева С.А. Синхронизация системы двух конкурирующих мод внешним гармоническим сигналом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, в. 3. С. 154-170.



## Исследование модового состава магнитоэлектрических волн в решетке связанных ЖИГ

Одинцов С.А., Садовников А.В., Шешукова С.Е.

СарГУ, Саратов

В настоящее время большой интерес представляет исследование волноведущих слоистых структур на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ). Рассмотрение связанных ферритовых структур представляется достаточно важным, поскольку на их основе возможно создание перестраиваемых магнитным полем СВЧ фазовращателей, ответвителей и линий задержки [1]. В данной работе рассмотрено распространение поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМЭВ) в латерально связанных ферритовых волноводах конечной ширины (рис. 1). С помощью метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии [2] проведено экспериментальное исследование модового состава и процессов перекачки в системе связанных волноводов. Методом конечных элементов проведен расчет электродинамических характеристик ПМЭВ с учетом многомодового характера распространения излучения. Построены картины пространственного распределения первых трех шириных мод в рассматриваемой структуре. Проведено сравнение с результатами экспериментального исследования. Показано, что учет модового состава МЭВ позволяет реализовывать режимы эффективной перекачки энергии из одного волновода в другой в случае возбуждения ПМЭВ.

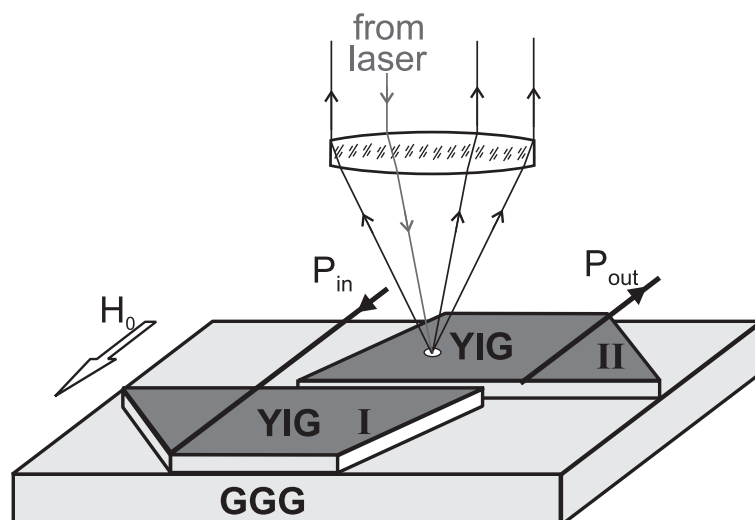


Рис. 1: Схема экспериментального исследования системы латерально связанных ЖИГ волноводов

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (13-07-12409, 14-02-00976) и стипендии Президента РФ (СП-1551.2013.5).*

1. Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S. // *IEEE Magnetics Letters* **5** (2014) Pp. 1-4.
2. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. *Phys. Rep.* **348** (2001) Pp. 441-489.

## Исследование эффектов гибридизации ЭМСВ в системе связанных ферритовых волноводов с сегнетоэлектрической нагрузкой

Грачев А.А., Садовников А.В., Шешукова С.Е.

СарГУ, Саратов

В последнее время большой интерес представляет исследование волноведущих слоистых структур типа феррит-сегнетоэлектрик (ФС), демонстрирующих электронную перестройку [1,2] вследствие наличия одновременно магнитоэлектрического и электродинамического эффектов. Рассмотрение связанных ФС-структур представляется достаточно важным, поскольку на их основе возможно создание перестраиваемых электрическим полем СВЧ фазовращателей, ответвителей и линий задержки [1]. Экспериментально показано, что связь между электрической и магнитной подсистемами дает возможность изменять диэлектрические свойства с помощью магнитного поля для слоистых ФС структур [2], однако связанные ФС структуры в настоящий момент исследованы недостаточно подробно. В данной работе рассмотрено распространение электромагнитных спиновых волн (ЭМСВ) в латерально связанных ферритовых волноводах конечной ширины [4] с проставкой из сегнетоэлектрика толщиной  $d$ . Рассмотрены два случая расположения сегнетоэлектрического слоя – между и над латерально связанными ЖИГ волноводами (рис. 1).

Методом конечных элементов проведен расчет электродинамических характеристик ЭМСВ с учетом многомодового характера распространения излучения. Показана возможность управления спектром собственных мод и дисперсионными характеристиками симметричных и антисимметричных мод с помощью вариации параметров сегнетоэлектрического слоя (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , толщина  $d$ ). Построены картины пространственного распределения первых трех шириных мод в рассматриваемой структуре.

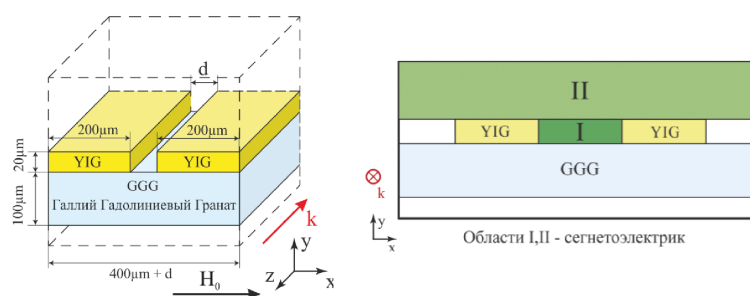


Рис. 1: Схема исследуемой структуры

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (13-07-12409, 14-02-00976) и стипендии Президента РФ (СП-1551.2013.5).

1. Nan Ce-Wen et. al. *J. Appl. Phys.* **103** (2008) 031101.
2. Semenov A.A., Karmanenko S.F., Demidov V.E. et al. *APL* **88** (2006) 033503.
3. Nikitin A.A., Ustinov A.B. et.al. *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 093513.
4. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S.A. *Solid State Phenomena* **215** (2014) 389.

## Генерация щелевых солитонов в наклонной брэгговской решетке

Лисицын Е.А., Садовников А.В.

СарГУ, Саратов

Планарные периодические диэлектрические структуры находят сегодня применение в различных устройствах, работающих в СВЧ и ТГц диапазоне длин волн.

В данной работе рассматривается нелинейная динамика распространения электромагнитного излучения в наклонной брэгговской решетке, схема которой изображена на рис. 1. Особый интерес представляет решение данной задачи путем численного решения системы уравнений Максвелла, поскольку лишь в этом случае удастся проследить в полной мере динамику распространения электромагнитного поля в изучаемой структуре без существенных упрощающих предположений, касающихся геометрии системы, учета нелинейных эффектов и параметров исследуемых типов сигналов. Нелинейность структуры предполагается кубичной и учитывается Керровской моделью – показатели преломления слоев зависят от мощности сигнала, распространяющегося вдоль решетки [1,2]. Численное моделирование процесса распространения электромагнитных волн в такой структуре проводилось методом конечных разностей во временной области (FDTD). Поскольку рассматриваемая система является открытой, граничные условия в численном эксперименте устанавливаются в виде идеально согласованных (поглощающих) слоев. Входной сигнал задавался в области с показателем преломления  $n_0$  в виде, соответствующем первой  $TE$  моде планарного диэлектрического волновода. Показана возможность генерации щелевых солитонов в рассматриваемой структуре на частотах вблизи границы полосы пропускания.

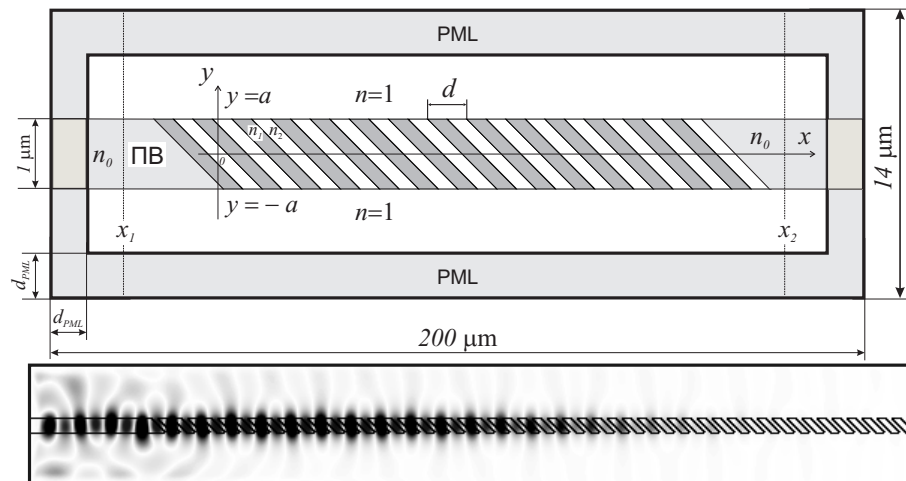


Рис. 1: Схема наклонной брэгговской решетки и результат расчета распространения сигнала с частотой, лежащей в полосе непропускания

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-02-00976).*

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics, 4th ed. Academic Press, San Diego, 2007.
2. Erdogan T. *J. Lightwave Tech.* **15** (1997) Pp. 1277-1294.

## Моделирование электромагнитных волн в открытых слоистых структурах из метаматериалов методом точных конечных разностей

Шихматова В.В., Рожнев А.Г.

*Саратовский государственный университет, Саратов*

В настоящее время в электродинамике и оптике активно изучаются системы на основе многослойных структур. В частности, значительный интерес представляет рассмотрение подобных систем, содержащих отдельные слои, выполненные на основе метаматериалов. Так как параметры многослойной среды можно варьировать, то можно получать различные характеристики волн, распространяющихся в системе. Для анализа таких систем в настоящем докладе развивается подход, основанный на использовании метода точных конечных разностей (МТКР)[1,2].

МТКР применим в случае, когда в пределах каждого отдельного слоя можно записать аналитическое решение уравнений Максвелла. Решение представляется в таком виде, чтобы на границах слоев автоматически выполнялось граничное условие непрерывности существенной компоненты поля (в случае  $TE$ -мод —  $E_y$ -компоненты). Эти формулы используются для записи граничного условия для поля  $H_x$ . В результате получается система линейных однородных уравнений относительно значений поля  $E_y$  на границах между слоями с трехдиагональной матрицей, элементы которой зависят от частоты и продольного волнового числа. Условием существования нетривиального решения линейной системы является равенство нулю детерминанта матрицы. Это условие представляет собой дисперсионное уравнение системы. Аналогичным образом получается дисперсионное уравнение для  $TM$ -моды.

Данный алгоритм реализован в программе, написанной на языке компьютерной системы “Mathematica”. Детерминант трехдиагональной матрицы эффективно рассчитывается с использованием современных методов вычислительной линейной алгебры. Поиск корней дисперсионного уравнения производится итерационно с использованием функции поиска корней нелинейного уравнения программы “Mathematica”.

Предложенный алгоритм и разработанная программа применяются в докладе для исследования волн в пятислойной плоско-слоистой структуре, содержащей центральный слой из метаматериала. Исследуются процессы трансформации симметричных и антисимметричных мод этой структуры, соответствующих связи поверхностных волн, существующих на двух границах между слоем метаматериала и обычным диэлектриком. Результаты полностью согласуются с результатами работы [3].

Кроме этого, рассмотрена более сложная система, состоящая из двух слоев метаматериалов, разделенных буферным диэлектрическим слоем, в которой также могут изучаться различные механизмы трансформации собственных волн.

Работа поддержана грантом РФФИ №13-02-00732а и проектом № 1463 (задание №2014/203 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ)

1. Голант Е. И. // Письма в ЖТФ, том 31, вып.24, 2005, 81.
2. Рожнев А. Г. // Письма в ЖТФ, том 35, вып.6, 2009, 63.
3. Ying He, Jing Zhang, Chunfang Li1 // J. Opt. Soc. Am., Vol. 25, e 12 2008, 2081.

## Генерация диссипативных временных солитонов в активном кольцевом резонаторе с клистроном-усилителем

Гришин С.В., Скороходов В.Н.

СарГУ, Саратов

В последние десятилетия наблюдается неуклонное возрастание интереса к структурам со стационарным профилем, которые формируются в нелинейных диспергирующих средах за счет установления баланса между дисперсией и нелинейностью. Данные структуры, получившие в литературе название солитоны, являются одним из фундаментальных явлений теории нелинейных волн и находят применение в качестве новых носителей информации в оптических линиях связи [1]. В диапазоне сверхвысоких частот солитоны наблюдались, по всей видимости, впервые в ферромагнитных пленках [2], а в последствие и в активных кольцевых резонаторах на их основе [3]. В отличие от оптических солитонов микроволновые магнитные солитоны представляют собой солитоны огибающей и являются результатом установления баланса между пространственной дисперсией спиновых волн и кубической нелинейностью ферромагнитной среды. Недавно теоретически и экспериментально было показано, что солитоны огибающей могут генерироваться в активных кольцевых резонаторах за счет использования в цепи внешней положительной обратной связи многорезонансных элементов [4]. При таком подходе многорезонансный элемент создает в кольце временную дисперсию, которая совместно с кубической нелинейностью (при наличии баланса между усилением и потерями) приводит к формированию диссипативных временных солитонов за много оборотов сигнала по кольцу. В этом случае активный кольцевой резонатор с запаздыванием можно рассматривать как некий аналог среды, обладающей одновременно кубической нелинейностью, временной дисперсией и усилением. В работе [4] в качестве многорезонансных элементов использовались магнетонный квазикристалл или клистроном-усилитель, а кубическая нелинейность создавалась за счет параметрического взаимодействия спиновых волн.

В настоящем докладе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования формирования диссипативных временных солитонов в активном кольцевом резонаторе с клистроном-усилителем, который используется одновременно как многорезонансный и нелинейный элемент. В эксперименте для повышения порядка временной дисперсии используется дополнительный объемный резонатор. Полученные аналитические решения в форме временных солитонов на основе разработанной многоосцилляторной модели с кубической нелинейностью подтверждают возможность формирования в эксперименте солитоноподобных импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (задание №2014/203), Совета по грантам при Президенте РФ (программа поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ 828.2014.2) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00329).

1. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. Физматлит, Москва, 2005.
2. Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н., *Письма в ЖЭТФ* **15**, (1983) 413.
3. Kalinikos B.A., Kovshikov N.G., and Patton C.E., *Phys. Rev. Lett.* **80**, (1998) 4301.
4. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д. и др., *РаЭ* **59**, (2014) 824.

---

**Дисперсионные характеристики магнитостатических волн в слоистых структурах на основе магнетонных кристаллов****Морозова М.А., Шараевская А.Ю.***СарГУ, Саратов*

В последнее время большой интерес вызывает получение кристаллов, подобных фотонным [1], на основе магнитных плочек - магнетонных кристаллов (МК) [2], в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны (магноны). МК имеют определенные преимущества по сравнению с фотонными кристаллами: возможно управление свойствами магнетонных кристаллов внешним магнитным полем; в частности, магнетонной запрещенной зоной, можно создавать кристаллы в диапазоне СВЧ размером порядка нескольких миллиметров.

Настоящая работа посвящена исследованию механизмов формирования брэгговских запрещенных зон в ферромагнитных периодических структурах, представляющих собой два связанных одномерных МК, при наличии и отсутствии в них сдвига относительно друг друга и структуру типа МК-ферритовая пленка, при возбуждении в них магнитостатических волн. Важной особенностью связанных структур является возбуждение на одной частоте двух нормальных мод - быстрой и медленной волн с различными групповыми и фазовыми скоростями. Впервые механизм формирования запрещенных зон в периодической структуре, представляющей собой два связанных одномерных МК с одинаковыми параметрами, рассмотрен авторами в [3]. На частотах фазового синхронизма взаимодействие быстрых прямой и встречной волн, а также медленных прямой и встречной волн приводит к формированию запрещенных зон. В случае двух связанных одинаковых МК-МК формируются две запрещенные зоны. Для связанной структуры в виде МК-пленка и для структуры МК-МК со сдвигом формируются три запрещенные зоны, что обусловлено несимметричностью структур.

На основе результатов численного моделирования показано, что при изменении управляющих параметров таких как, расстояние между связанными периодическими ферромагнитными структурами, глубины канавки в каждой структуре и сдвига между ними можно эффективно управлять шириной и положением запрещенных зон и полос пропускания.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства РФ (ГК №11.G34.31.0030) и РФФИ (№140700273) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (№НШ-828.2014.2).

1. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М.:Физматлит, 2005.
2. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. *J. Phys. D: Appl. Phys* **43** (2010) 264002.
3. Морозова М. А., Шараевская А. Ю. *Гетеромагнитная микроэлектроника* **15** (2013) 82-93.

## Оценка старшего ляпуновского показателя по экспериментальным временным рядам кольцевой автоколебательной системы с ферромагнитной плёнкой

Голова Т.М., Романенко Д.В., Сысоев И.В., Гришин С.В.

СарГУ, Саратов

Известно, что для однозначного определения хаотического режима у исследуемой динамической системы используется старший ляпуновский показатель (СЛП), положительная величина которого указывает на присутствие в системе динамического хаоса [1]. На сегодняшний день расчет СЛП активно используется для определения хаотической динамики в модельных системах. Однако не меньший интерес представляет оценка СЛП для реальных генераторов хаотических сигналов, которые становятся привлекательными для использования в диапазоне СВЧ в качестве источников шумоподобных сигналов для систем связи и радиолокации [2]. Одним из возможных вариантов генератора динамического хаоса в диапазоне СВЧ является кольцевой генератор с нелинейной спин-волновой линией передачи в цепи обратной связи. В работе [3] был проведен расчет СЛП для хаотического сигнала, который формировался в кольце за счет четырехволновых процессов взаимодействия спиновых волн. В настоящем докладе приводятся результаты расчета СЛП для хаотического сигнала, который генерируется в указанной автоколебательной системе за счет трехволнового параметрического взаимодействия спиновых волн.

Расчет СЛП проводился с помощью метода, который адаптирован для коротких временных реализаций в присутствии шума и подробно описан в [4]. Вначале данный метод был применен для временных рядов, полученных от эталонных нелинейных систем, и только после получения корректной оценки СЛП использовался для расчета СЛП по измеренным временным рядам. В результате проведенных расчетов была исследована зависимость оценки СЛП от длины временного ряда и показано, что реализации длиной в 40 тысяч точек, содержащие от 100 до 200 характерных периодов, являются достаточными для адекватной оценки СЛП, поскольку значение оценки СЛП перестают меняться с ростом длины ряда. Используемый метод предполагает реконструкцию фазового пространства и слабую зависимость СЛП от размерности вложения. По экспериментальным временным рядам, снятым с частотой дискретизации 0.25 МГц, была исследована зависимость оценки СЛП от величины коэффициента усиления кольца. Показано, что увеличение усиления кольца приводит к увеличению как величины СЛП, так и размерности вложения, что не противоречит уже известным результатам, полученным при другом виде нелинейности спин-волнового генератора.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 14-02-00492, 14-07-00273) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации, НШ-1726.2014.2.

1. Кузнецов С.П. Динамический хаос. Физматлит, Москва, 2001.
2. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. Физматлит, Москва, 2002.
3. Wang Z., Hagerstrom A., Anderson J.Q., et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, (2011) 114102.
4. Rosenstein M.T., Collins J.J. and Deluca C.J., *Phys. D* **65** (1993), 117.

## Грубая синхронизация грубых хаотических систем и скрытая коммуникация с помощью генераторов гиперболического хаоса, гиперхаоса, консервативного хаоса

Исаева О.Б., Савин Д.В., Селезнев Е.П.

*СФирЭ им.В.А. Котельникова РАН, Саратов  
СарГУ, Саратов*

Целый ряд технических приложений явления хаотической синхронизации (например, телекоммуникационных) зачастую оказывается затрудненным из-за чувствительности генераторов хаоса к даже малым возмущениям и вариациям управляющих параметров. В математической теории динамических систем известен феномен так называемого гиперболического хаоса, обладающего необходимой для приложений грубостью. Физически и радиотехнически реализуемые аналоги генераторов такого хаоса появились, однако, сравнительно недавно [1,2]. Синхронизация же математических моделей с гиперболическим хаосом, вообще и конкретных радиотехнических генераторов в частности изучена не в достаточной мере. Например, можно назвать лишь одну работу [3], в которой представлены численные результаты исследования связанных генераторов грубого хаоса, но на базе его укороченных уравнений для медленных амплитуд и лишь для случая идентичных подсистем.

В настоящей работе на базе численного моделирования и радиотехнического эксперимента проведено изучение особенностей процесса наступления обобщенной синхронизации симметрично и однонаправлено диссипативно связанных неидентичных генераторов грубого гиперболического хаоса Кузнецова. Для синхронного хаотического аттрактора проведены исследования для подтверждения его структурной устойчивости: расчет ляпуновских показателей, анализ статистики распределения локальных показателей Ляпунова, анализ распределения углов между устойчивыми и неустойчивыми многообразиями аттрактора. На основе синхронизации связанных генераторов гиперболического хаоса, ассоциирующегося с аттрактором Смейла–Вильямса, а также генераторов с гиперхаотическим грубым аттрактором и консервативной динамикой по типу отображения "кот Арнольда" предложены схемы скрытой и широкополосной коммуникации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 14-02-00085, 14-02-31067 и Гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-1726.2014.2.*

1. Kuznetsov S.P. *PRE* **95** (2005) 144101.
2. Kuznetsov S.P., Seleznev E.P. *J. Exper. Theor. Phys.* **102**, No. 2 (2006) 355.
3. Купцов П.В., Кузнецов С.П. *Нелинейная динамика* **2**, е 3 (2006) 307.



## Стадийная волновая система с феноменами комплексной аналитической динамики и гиперболическим аттрактором

Исаева О.Б., Обычев М.А.

*СФирЭ им.В.А. Котельникова РАН, Саратов  
СарГУ, Саратов*

Классической в теории колебаний и волн является нелинейная модель параметрического возбуждения волн с резонансным соотношением 2 : 1 частот и волновых чисел (двухволнового взаимодействия) [1]. В настоящей работе на основе нелинейных элементов, описываемых данной моделью, с помощью методики "манипулирования" фазами и медленными комплексными амплитудами [2] предложена схема кольцевой стадийной системы с динамикой комплексного отображения Мандельброта

$$Z_{n+1} = C + Z_n^2 \quad (1)$$

(см. подробнее в [3]). Комбинация 2-х нелинейных элементов, 2-х фильтров и 2-х внешних сигналов накачки в схеме позволяет передавать "затравку" для комплексной амплитуды от одной волны второй и обратно так, чтобы в стробоскопическом сечении наблюдалась динамика квадратичного отображения для амплитуды одной из волн.

Путем введения в предложенную схему аттенюатора, можно добиться реализации в ней в стробоскопическом сечении гиперболического хаотического режима, ассоциирующегося с аттрактором Смейла–Вильямса и динамикой отображения Бернулли

$$\varphi_{n+1} = 2\varphi_n \pmod{2\pi} \quad (2)$$

для фазы колебаний одной из волн.

Представляет интерес возможность осуществления плавного перехода от комплексной аналитической динамики к хаотической динамике гиперболического типа путем изменения параметра (например, характеризующего аттенюатор). Подобный переход ранее упоминался в недавних работах [4,5], в которых продемонстрирована трансформация множества Жю-лиа в некое неустойчивое хаотическое множество, топологически эквивалентное соленоиду типа Смейла–Вильямса, и возможность существования аналогичного ему устойчивого соленоида-партнера.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 14-02-31067 и Гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-1726.2014.2.*

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. Наука, Москва, 1984.
2. Кузнецов С.П. Динамический хаос и гиперболические аттракторы. От математики к физике. ИКИ, Москва-Ижевск, 2013.
3. Обычев М.А. *Изв. вузов. ПНД*, е3 (2013) (в печати).
4. Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Sataev I.R. *CHAOS* **22**, No. 4 (2012) 043111.
5. Исаева О.Б., Кузнецов С.П., Сатаев И.Р., Пиковский А. *Нелинейная Динамика* **9**, е 2 (2013) 267-294.

## Программа расчета электродинамических характеристик периодических ферритовых волноводов конечной ширины на основе метода конечных элементов

Ткаченко Д.А., Садовников А.В., Рожнев А.Г.

*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского*

В настоящей работе проведено исследование процессов распространения электромагнитных волн в планарных ферритовых волноводах конечной ширины с помощью численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) [1-4]. Имеющиеся реализации МКЭ (например, Comsol и Matlab) не позволяют эффективно решать задачи о распространении волны в периодически неоднородных анизотропных средах. Подходы к анализу свойств спиновых и магнитоэлектрических волн (МСВ) в периодических структурах, основанные на решении уравнений связанных волн, не учитывают влияния конечной ширины волновода на динамику распространения волн. Целью данной работы является создание программы численного расчета электродинамических характеристик периодических ферритовых волноводов конечной ширины. Таким образом, представляется возможным учет модового состава МСВ в волноводах конечной ширины с периодически изменяющимися параметрами вдоль направления распространения волны.

Реализация МКЭ сделана на языке ++ (g++ 4.9.2). Для разбиения расчетной области на конечные элементы треугольной формы использован генератор сетки программы Comsol. На основе разбиения расчетной области программа генерирует разреженные матрицы жесткости (DMS) и масс (DMM), которые передаются в Matlab для решения системы матричных уравнений и поиска собственных чисел. Модуль визуализации решения разработан в среде Matlab. Программа предназначена для расчета электродинамических характеристик (распределение полей и дисперсии) структуры со свойствами ферритовой среды, периодически изменяющимися в пространстве (магнитные кристаллы).

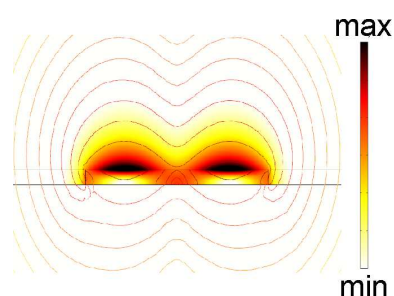


Рис. 1: Пример расчета второй моды в ферритовом волноводе

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-02-00976, 13-02-00732).*

1. O. Zienkiewicz, K. Morgan - Finite elements and approximation, 1983.
2. P.P. Silvester, R.L. Ferrari - Finite elements for electrical engineers, 1986.
3. E. Suli - Finite Element Methods for Partial Differential Equations, 2011.
4. K.-J. Bathe, E.L. Wilson - Numerical methods in finite element analysis, 1976.

## Дискретная дифракция спиновых волн в системе латерально связанных ЖИГ волноводов

Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

Система латерально связанных волноведущих структур на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей [1]. Перестройка рабочих частот таких устройств внешним магнитным полем и путем изменения коэффициента связи между ферритовыми волноводами, разнообразие типов дисперсии и характера связи распространяющихся спиновых волн (СВ), проявление различных нелинейных эффектов (солитонное распространение волн, автомодуляция) позволяют изменять их характеристики и режимы работы в широких пределах.

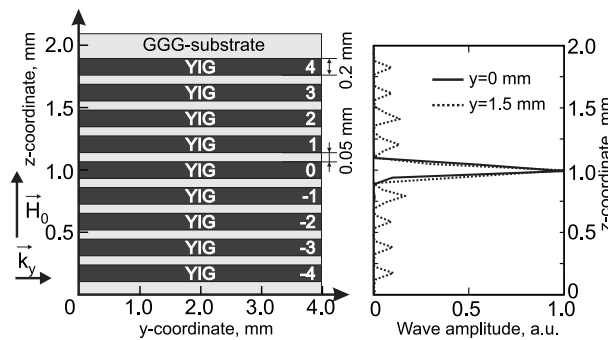


Рис. 1: Схема исследуемой структуры и распределение квадрата намагниченности вдоль оси  $z$

В данной работе проведено исследование процессов дискретной дифракции поверхностных СВ в системе латерально связанных ферритовых волноводов (рис. 1) методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии [2]. Показано, что экспериментально полученные дифракционные картины существенно образом зависят от мощности и волнового числа СВ, возбуждаемых в волноводе с  $n = 0$ . Например, для фиксированного значения волнового числа  $k$  при малых значениях входной мощности ( $P < -10$  dBm) наблюдалось волноводное распространение СВ в центральном волноводе с  $n = 0$ . С увеличением мощности режим волноводного распространения сменялся режимом дискретной дифракции СВ с перекачкой энергии в боковые волноводы (с номерами  $|n| > 0$ ). Методом конечных элементов и конечных разностей во временной области проведен расчет электродинамических характеристик, определен спектр и построены распределения полей и дисперсионные характеристики волноводных мод такой структуры при возбуждении в ней поверхностной СВ.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-07-00273, 13-07-12409).*

1. Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Munzenberg M. *Phys. Rep.* **507** (2011) Pp. 107-136.
2. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. *Phys. Rep.* **348** (2001) Pp. 441-489.

## Распространение магнитоэлектрической волны в нерегулярном ферритовом сужающемся волноводе

Игангалиев А.Н., Садовников А.В., Бегинин Е.Н.

СарГУ, Саратов

Исследование нерегулярных планарных ферритовых волноводов представляет большой интерес в настоящее время, поскольку такая топология волноведущих структур обеспечивает как управление фазовыми характеристиками спиновых волн, так и локализацию энергии волны по мере ее распространения вдоль структуры. Последняя особенность представляет интерес для нелинейных приложений на основе нерегулярных структур, изготовленных из тонких пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ). Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, фазовращателей, мультиплексоров, фильтров и ответвителей [1,2].

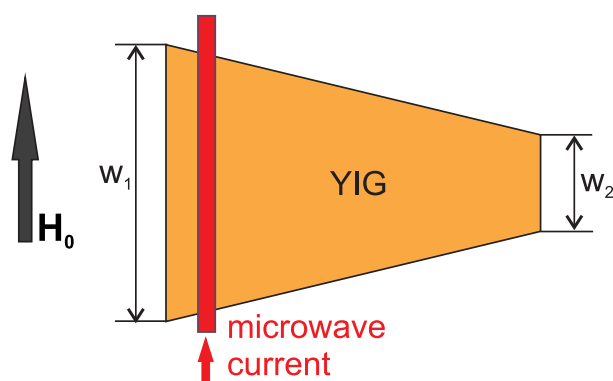


Рис. 1: Схема исследуемой структуры

В данной работе исследована динамика распространения МСВ в нерегулярном сужающемся ЖИГ волноводе микронных размеров (рис. 1). Рассмотрено влияние анизотропии формы на направление распространения МСВ при различных направлениях внешнего магнитного поля. Проведено численное моделирование методом конечных разностей во временной области [3]. Продемонстрирована возможность трансформации модового состава МСВ, распространяющейся в волноводе. Проведено экспериментальное исследование распространения МСВ в нерегулярном сужающемся ЖИГ волноводе методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии [4]. Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с данными экспериментального исследования.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-02-00976, 13-07-12409).*

1. Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Munzenberg M. *Phys. Rep.* **507** (2011) 107.
2. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2010) **43** 264001.
3. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. *AIP Advances* (2014) **4** 107133.
4. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. *Phys. Rep.* **348** (2001) 441.

## Распространение магнитоэлектрических волн в Г-образном ферритовом волноводе

Суровцев В.В., Садовников А.В., Романенко Д.В.

СарГУ, Саратов

В настоящее время нерегулярные планарные ферритовые волноведущие структуры представляют в настоящее время большой интерес [1,2]. Такие структуры могут быть использованы как базовые элементы для создания различных устройств функциональной магнитоэлектроники: волноводов, интерферометров, мультиплексоров, фильтров и ответвителей [3]. Вследствие анизотропии тонкопленочных ферритовых структур становится возможным управлять направлением распространения магнитоэлектрических волн (МЭВ) путем структурирования магнитного материала на подложке [2].

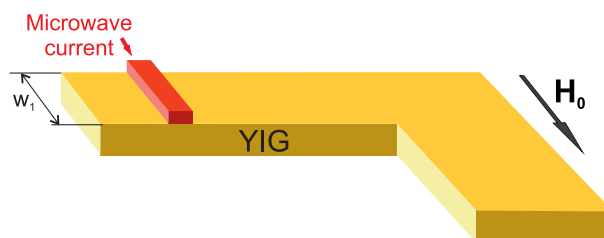


Рис. 1: Схема исследуемой структуры

В данной работе исследована динамика распространения МЭВ в нерегулярном Г-образном волноводе микронных размеров (рис. 1), изготовленном из железо-иттриевого граната (ЖИГ). Рассмотрено влияние анизотропии формы на направление распространения МЭВ при различных направлениях внешнего магнитного поля. Показана возможность управления модовым составом распространяющихся МЭВ. Проведено численное моделирование методом конечных разностей во временной области [4]. Продемонстрирована возможность ответвления МЭВ, распространяющейся в Г-образном волноводе. Проведено экспериментальное исследование распространения МЭВ в рассматриваемой структуре методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии [4]. Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с данными экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-07-00273, 13-07-12409, 14-07-31142).

1. Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S. *IEEE Magn. Lett.* (2014) **5**.
2. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S.A. *Solid State Phenomena* (2014) **215** 389.
3. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2010) **43** 264001.
4. Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B. *AIP Advances* (2014) **4** 107133.
5. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. *Phys. Rep.* **348** (2001) Pp. 441-489.

## Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом

Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е.

*СарГУ, Саратов*

Продвижение пучково-плазменных генераторов в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн и увеличение мощности выходного излучения, являются важными и актуальными проблемами СВЧ электроники больших мощностей. В качестве одного из перспективных направлений решения данной проблемы можно указать разработку и создание новых модификаций пучково-плазменных генераторов, использующих новые эффекты, обнаруженные при изучении нелинейной динамики релятивистских электронных потоков (РЭП) со сверхкритическим током в пространстве дрейфа виркатора [1]. Среди важных задач в этом направлении можно отметить изучение влияния потерь в электродинамической системе на динамику РЭП и на выходные характеристики генерации виркатора.

В качестве исследуемой системы была рассмотрена простая модель, представляющая собой пространство дрейфа, окруженное материалом с проводимостью  $\sigma$ , в виде отрезка цилиндрического волновода, с одного торца которого располагается кольцевой источник заряженных частиц, инжектирующий моноскоростной поток, а с другого – коаксиальный вывод мощности, моделируемый с помощью волноводного порта. Импульс тока имеет форму гладкой ступенчатой функции со временем нарастания  $\tau$ , длительностью  $T$  и амплитудой  $I_0$ . К системе прикладывается внешнее продольное однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией  $B_0$  [1]. Величины силы тока и внешнего магнитного поля, при которых проводилось данное исследование, выбирались такими, что в предположении идеально проводящих стенок (при  $\sigma \rightarrow \infty$ ) токовые осцилляции виртуального катода демонстрируют максимальную амплитуду.

В ходе исследования было обнаружено, что для динамики РЭП характерен эффект бистабильности. Было выявлено два характерных режима динамики релятивистского электронного потока. Первый режим характеризуется образованием двух минимумов потенциала (двух “виртуальных катодов”) в азимутальном направлении, вращающихся вместе с пучком вокруг оси пространства дрейфа и формирующих двухзаходную вихревую структуру в пролетном промежутке. Второй сосуществующий режим характеризуется образованием трех виртуальных катодов и, как следствие, трехзаходного вихря. Данные режимы характеризуются различной мощностью выходного сигнала. Образование вихревых структур связано с развитием неустойчивости, обусловленных неоднородностью поля скорости электронов. В данном случае трубчатого пучка формирование вихревых структур обусловлено диокотронной неустойчивостью [2]. В ходе исследования было проведено детальное исследование влияния проводимости стенок рабочей камеры виркатора на поведение выходных характеристик системы для двух обнаруженных режимов колебаний ВК.

1. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode. *Physics of Plasmas*. 21, 9 (2014) 093105
2. Ю.Я. Голубь, М. Г. Никулин, Н.Е. Розанов . Вихри в неоднородных некомпенсированных электронных пучках. *Журнал технической физики*, 1990, том 60, №9, стр. 78-82

## Механизм смены режима генерации колебаний тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку

Баланов А.Г., Короновский А.А., Москаленко О.И., Сельский А.О., Храмов А.Е.

СарГУ, Саратов

Полупроводниковые сверхрешетки являются перспективным прибором для генерации и управления СВЧ-колебаниями. Сами сверхрешетки представляют собой сложные наноструктуры, состоящие из нескольких чередующихся тонких ( $10\text{ nm}$ ) слоев различных полупроводниковых материалов [1]. Приложение к данным гетероструктурам электрического поля приводит к образованию электронных доменов [2] и, соответственно, к возникновению колебаний тока, протекающего через структуру. В настоящий момент все больше внимания уделяется рассмотрению транспорта электронов через полупроводниковую сверхрешетку с позиций нелинейной динамики, что позволяет выявлять и объяснять эффекты, наблюдающиеся в исследуемой системе [3]. К числу вопросов, связанных с такими эффектами, относится вопрос о смене характерных динамических режимов.

В работе показано, что сразу после возникновения генерации, колебания тока в полупроводниковой сверхрешетке имеют вид, близкий к гармоническим. Затем, с увеличением напряжения, приложенного к сверхрешетке, происходит быстрая смена характера колебаний, при этом форма колебаний существенно усложняется. Исходя из вида фазовых портретов можно сделать вывод о том, что данная смена режима колебаний осуществляется через бифуркацию удвоения периода. Данный переход с соответствующей ему бифуркацией можно наблюдать в широком диапазоне значений температуры,  $T \in (0; 200)$ .

Для высоких значений температуры,  $T > 200\text{K}$ , характер смены режима несколько иной. Так, можно наблюдать подавление генерации колебаний тока в некотором диапазоне значений напряжения [4]. Режимы генерации до подавления и после повторного возникновения генерации существенно отличаются. Таким образом, можно сделать вывод, что в полупроводниковых сверхрешетках в присутствии наклонного магнитного поля для различных температур можно наблюдать разные варианты переходов между режимами генерации колебаний тока с ростом напряжения. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (задания 3.23.2014/К), фонда некоммерческих программ "Династия".

1. Wacker A. *Phys. Rep.* **357** (2002) 1-111
2. Eisele H., Khanna S. P., Lineld E. H. *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010) 072101
3. Greenaway M. T., Balanov A. G., Scholl E. et al. *Phys. Rev B.* **80** (2009) 205318
4. Баланов А.Г., Гринавей М.Т., Короновский А.А. и др. *ЖЭТФ* **141** (2012) 960-965

---

**Хаос и управлением им в системе двух ридберговских атомов.****Андреев А.А., Баланов А.Г., Храмов А.Е.***СарГУ, Саратов*

В настоящее время значительный интерес вызывают задачи управления квантовыми системами с ридберговскими атомами. С точки зрения практики подобные задачи очень тесно связаны с проблемой создания квантовых компьютеров. Представляет значительный фундаментальный интерес задача возникновения хаотической динамики в квантовой системе, которая имеет также большое прикладное значение для решения проблемы квантовых вычислений в массиве атомов, включенных в твердое тело (полупроводник), принимающих ридберговские состояния. [1]

Ридберговские атомы - это водородоподобные атомы, у которых внешний электрон находится в высоковозбужденном состоянии (вплоть до уровней  $n$  порядка 1000). Их размеры могут превышать размер находящегося в основном состоянии того же самого атома почти в  $10^6$  раз для  $n = 1000$ . [2]

В представленной работе исследуется динамика системы двух связанных ридберговских атомов, ранее рассмотренная в работе [3]. В работе [3] было показано, что в связанной системе двух ридберговских атомов наблюдаются три характерных режима: однородный, антиферромагнитный и колебательный. Нами было впервые показано, что в области колебательной динамики наблюдаются режимы хаотических колебаний. Были изучены сценарии перехода к хаосу и показано, что переход к хаосу имеет место по сценарию удвоений периода.

Следующим этапом исследовалась возможность управления динамикой двух ридберговских атомов путем параметрического воздействия на систему. В этом случае периодически модулировалась частота Раби, что возможно реализовать на практике с использованием модуляции интенсивности излучения лазера, управляющего системой. Были построены карты режимов на плоскости управляющих параметров частота - амплитуда модуляции частоты Раби. Было показано, что при определенных условиях в системе возможно подавление и наоборот инициация хаотических колебаний при внешнем периодическом параметрическом воздействии.

1. Greenland P. T. et al. Coherent control of Rydberg states in silicon. *Nature*. 465 (2010) 1057-1061.
2. M. Saffman and T. G. Walker. Quantum information with Rydberg atoms. *Reviews of Modern Physics*, 82 (2010) 2313.
3. T. E. Lee, H. Haffner, M. C. Cross, *Phys. Rev.* A84, 031402(R) (2011).



---

**Численное моделирование влияния отражений на динамику многомодового гиротрона****Мельникова М.М., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г.***Саратовский ГУ, Саратов*

Отражения от удаленной нагрузки могут оказывать сильное влияние на спектр выходного излучения различных генераторов (см., например, [1,2]). При конструировании гиротронов толщина выходного окна подбирается таким образом, чтобы минимизировать отражения на рабочей моде. Однако в этом случае ненулевые отражения для паразитной моды с близкой частотой могут вызвать ее возбуждение. В данной работе рассматривается влияние отражений на конкуренцию мод в ряде упрощенных моделей гиротрона с двумя и тремя взаимодействующими модами. В основном исследуется случай конкуренции близких по частоте мод вблизи центра зоны генерации. Аналитически и численно исследуется характер смены режимов колебаний при увеличении коэффициента отражения паразитной моды и при различных значениях времени запаздывания. Анализ основан на уравнениях так называемой квазилинейной теории, которая позволяет описать процессы конкуренции мод в гиротроне, а также в ряде других резонансных генераторов [3].

Исследования двухмодовой и трехмодовой моделей показали, что с ростом отражений режим генерации рабочей моды сменяется многомодовыми режимами или режимами мультистабильности, когда в зависимости от начальных условий в процессе конкуренции побеждает либо одна, либо другая мода. При больших отражениях устанавливается режим генерации паразитной моды. Отметим, что частота паразитной моды подстраивается таким образом, что ее возбуждение облегчается.

Таким образом, можно отметить, что отражения заметно влияют на работу, как двухмодовой модели, так и трехмодовой.

1. Antonsen T.M., Cai S.Y., Nusinovich G.S. *Phys. Fluids B*. **4** (1992) 4131-4139.
2. Dumbrajs O., Glyavin M.Yu., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** (2000) 588-596.
3. Нусинович Г.С. сб. "Гиротрон". Горький: ИПФ АН СССР, 1981.
4. Чумакова М.М. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. **21** (2013) 62-71.

## Численное моделирование многорезонаторного усилительного клистрона с двухзачорными резонаторами на основе нестационарной теории

Гиревой Р.А., Емельянов В.В., Рыскин Н.М.

*СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов*

Исследование нелинейных нестационарных процессов в различных приборах СВЧ электроники остается одной из важных проблем радиофизики. Очевидное фундаментальное и прикладное значение имеют такие задачи как изучение паразитного самовозбуждения усилителей, генерация хаотических колебаний, усиление многочастотных сигналов и др. Моделирование подобных процессов в приборах на основе пролетных клистронов особенно актуально, например, для задач усиления и искажения сигналов со сложным спектральным составом, что представляет очевидный интерес для телекоммуникационных и радиолокационных систем [1]. Основным интерес к многозачорным резонаторам обусловлен тем, что они обладают повышенным значением эффективного характеристического сопротивления и меньшими размерами по сравнению с однозачорными. В данной работе изучаются основные закономерности усиления одночастотного и многочастотного сигналов в многорезонаторном пролетном клистроне с двухзачорными объемными резонаторами. Численное моделирование нестационарных процессов осуществляется на основе методики [2].

Моделирование усиления одночастотного сигнала в многорезонаторном клистроне-усилителе средней мощности десятисантиметрового диапазона показало, что выходная мощность и коэффициент усиления у клистрона с двухзачорными резонаторами больше по сравнению с клистроном с однозачорными резонаторами. Обнаружено, что АЧХ имеет сильно неравномерную форму, а именно имеется максимум в области собственной частоты второго резонатора. Подавить максимум на частоте второго резонатора и обеспечить достаточно равномерную АЧХ удастся, уменьшая добротность второго резонатора, в то время как отстройка частоты второго резонатора в область более низких частот не принесла желаемых результатов.

Также были проведены расчеты усиления полигармонических сигналов с большим числом спектральных составляющих ( $n=2...4$ ). Частоты спектральных составляющих выбирались таким образом, чтобы отстройка ближайших составляющих равнялась 10 МГц. Мощности всех спектральных составляющих входного сигнала во всех расчетах принимались идентичными. Моделирование показало, что при увеличении амплитуды входного сигнала происходит рост уровня интермодуляционных искажений. Это объясняется тем, что с ростом входной мощности начинают сказываться процессы нелинейного взаимодействия различных спектральных составляющих, приводящие к искажениям выходного сигнала. Полученные количественные закономерности хорошо согласуются с результатами работы [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 14-02-31410

1. Calame J.P., Levush B. Impact of nonlinear memory effects on digital communications in a klystron // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, No. 5. P. 855-863.
2. Emelyanov V.V., Girevoy R.A., Yakovlev A.V., Ryskin N.M. Time-domain particle-in-cell modeling of delayed feedback klystron oscillators // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61. No. 6. P. 1842-1847.
3. Якушкин Е.П. // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31, No 10. С. 46-49.

## Численное моделирование двухкаскадного генератора миллиметрового диапазона на основе связанных пролетных клистронов

Белов К.В., Емельянов В.В., Яковлев А.В., Рыскин Н.М.

*Саратовский государственный университет, Саратов*

В последнее время значительные усилия исследователей направлены на разработку миниатюрных источников колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, изготавливаемых при помощи современных технологий вакуумной микроэлектроники. Недавние технологические успехи вакуумной микроэлектроники открыли пути создания миниатюрных аналогов классических вакуумных электронных приборов, таких как отражательный клистрон, лампы бегущей и обратной волны, клистроны с распределенным взаимодействием др. Они будут иметь огромное значение для систем связи, радиолокации, спектроскопии и т.д.

Характерной трудностью, возникающей при конструировании приборов вакуумной микроэлектроники, является необходимость использования электронных пучков с весьма малыми поперечными размерами и, соответственно, с чрезвычайно большой плотностью тока. Естественным способом преодолеть эти трудности является переход к многолучевым конструкциям. В работах [1,2] предложена модель двухкаскадного генератора, который состоит из двух пролетных двухрезонаторных клистронов.

В работе [3] было проведено численное моделирование генератора диапазона 95 ГГц с параметрами, соответствующими резонаторам, изготовленным при помощи LIGA-технологии [2]. Было показано, что при токе пучка 500 мА выходная мощность генератора 400 Вт. Однако волновое сопротивление резонаторов, изготавливаемых при помощи технологии LIGA, достаточно низкое (менее 40 Ом), что не позволяет обеспечить эффективное взаимодействие электронного пучка и поля. Поэтому в данной работе рассматривается прибор с традиционными для приборов клистронного типа тороидальными резонаторами, параметры которых взяты из работы [4].

В работе развита линейная теория генератора, которая позволяет построить зоны генерации на плоскости ток — напряжение пучка. Собственная частота резонаторов составляет 94.28 ГГц, холодная добротность — 1179.33, волновое сопротивление — 127.98 Ом, эффективная ширина зазора резонатора — 410 мкм. Проведено численное моделирование генератора на основе программы, разработанной в [3], определены оптимальные параметры. Обнаружено, что при токах пучка около 500 мА можно получить выходную мощность свыше 1 кВт. Также проведено моделирование для генератора, состоящего из клистронов с большим количеством резонаторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-02-31410).

1. Shin Y.-M., So J.-K., Han S.-T., et al. // 6th International Vacuum Electronics Conference IVEC 2005. Noordwijk, The Netherlands, 2005. P. 151-152.
2. Shin Y.-M., So J.-K., Han S.-T. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 091916.
3. В.В. Емельянов, А.В. Яковлев, Н.М. Рыскин // *ЖТФ* **83** (2013) е 7, 129.
4. А. И. Тореев, В. К. Фчдоров // *Прикладная физика* (2011) е 4, 109.

## Влияние разброса параметров сильноточного релятивистского электронного пучка на процессы генерации СВЧ излучения в трехсекционном аксиальном виркаторе

Гурневич Е.А., Молчанов П.В.

*Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь*

Среди достоинств виркаторов – генераторов СВЧ-излучения на виртуальном катоде (ВК), – можно выделить высокий уровень мощности излучения, возможность работы без внешних фокусирующих магнитных полей и компактные размеры. Однако существенным недостатком таких генераторов является низкая эффективность преобразования энергии электронного пучка в энергию излучения ( $1 \div 2\%$ ). Один из способов увеличения КПД виркатора заключается в использовании резонансных электродинамических систем, размещаемых в области формирования ВК [1]. Примером такого подхода является трехсекционный аксиальный виркатор: в работах [2-4] показано, что в такой системе можно повысить эффективность генерации до  $5 \div 6\%$ .

В реальных экспериментах с виркатором электронный пучок генерируется в сильноточном диоде со взрывоэмиссионным катодом. При этом за время импульса существенно меняются как абсолютные значения энергии пучка и его тока, так и соотношение между ними – импеданс пучка; изменяется также и радиус пучка. Кроме того, исходный пучок всегда имеет некоторый разброс по энергиям. Соответственно для нужд практики важно знать, как влияет такая неидельность пучка и/или небольшое изменение его параметров на эффективность генерации и на её спектр.

В настоящей работе при помощи электромагнитного PIC-кода XOOPIC [5] проведено численное моделирование генерации излучения в трехсекционном аксиальном виркаторе для трех вариантов геометрий резонатора [3], с энергией электронного пучка 450 кэВ и частотой в диапазоне  $3 \div 4$  ГГц. Исследована зависимость эффективности и спектра излучения от радиуса инжектируемого в резонатор пучка, от его импеданса и от наличия разброса электронов пучка по энергиям. Полученные зависимости позволяют сделать вывод о резонансном характере процессов генерации СВЧ излучения в рассматриваемом типе виркатора. Установлено, что для каждой геометрии трехсекционного резонатора существует вполне определенный оптимальный радиус электронного пучка, при котором эффективность генерации наибольшая (порядка 5% и более), и при отклонении радиуса инжектируемого пучка от оптимального уже на 10% эффективность может радикально снизиться (вплоть до 1%). Определен оптимальный диапазон значений импеданса электронного пучка для трехсекционного виркатора ( $30 \div 35$  Ом). Установлено также, что при увеличении энергетического разброса электронов в пучке эффективность генерации быстро уменьшается, и падает в несколько раз при разбросе всего в 5%.

1. Benford J., et al *Journal of Applied Physics*, **61** (1987) 2098.
2. Li Z., Zhong H., et al *Chinese Physics Letters*, **25** (2008) 2566.
3. Tikhomirov V.V., et al, *LANL e-print acc-ph/1408.1824*.
4. Gurnevich E.A., Molchanov P.V., *LANL e-print acc-ph/1407.8441* (submitted to *IEEE Trans. Plasma Sci.*).
5. Verboncoeur J.P., Langdon A.B., Gladd N.T. *Computer Physics Communications*, **87** (1995) 199.

## Мандельштам-Бриллюэновская спектроскопия магнитоакустических резонансов в пленочной структуре ЖИГ-ГГГ

Тихонов В.В., Литвиненко А.Н., Садовников А.В., Никитов С.А.

*Саратовский Государственный Университет, Саратов*

Среди известных методов диагностики конденсированных сред особо выделяется метод комбинационного рассеяния, который послужил основой мандельштам-бриллюэновской спектроскопии (БМС). Методика БМС использовалась для визуализации процессов трехмагнонного распада магнитостатических волн (МСВ) [1], параметрического возбуждения обменных спиновых волн [2] и в других многочисленных исследованиях. Однако в существующих работах исследовался только один тип возбуждений  $\Pi$  магнонный, хотя известно, что в ферритах могут существовать и другие типы волн  $\Pi$  электромагнитные, акустические [3].

В задачу данной работы входило раздельное измерение пространственного распределения интенсивностей связанных магнитных и акустических колебаний на частотах возбуждения магнитоакустических резонансов в пленочных плоскопараллельных резонаторах ЖИГ-ГГГ квадратной формы. Резонаторы имели размеры  $1 \times 1$  мм, толщина пленки ЖИГ составляла 13 мкм, толщина структуры ЖИГ-ГГГ 371 мкм, намагниченность насыщения пленки ЖИГ 1750 Гс. Величина поля подмагничивания была выбрана 3200 Э.

Для послойной визуализации пространственной структуры магнитоакустических резонансов использовалась методика МБС в конфигурации обратного рассеяния. Для визуализации магнитостатических колебаний луч лазера фокусировался на поверхности пленки ЖИГ со стороны прозрачной подложки ГГГ, а для визуализации акустических колебаний  $\Pi$  на поверхности подложки ГГГ. Проводилась фильтрация отраженного светового потока по поляризации для измерений интенсивности исключительно неупругого рассеяния света в точках фокусировки лазерного луча. По точкам измерений строился трехмерный график нормированной интенсивности рассеянного потока света, который адекватно отражал распределение интенсивности магнитостатических и упругих колебаний в заданной плоскости измерений.

Нами было обнаружено, что на частоте акустического резонанса 2362 МГц распределение интенсивности возбуждения магнитостатических и акустических колебаний имели несимметричный характер. При этом область акустических резонансов оказалась примерно на порядок уже области магнитных резонансов. Для сравнения были проведены аналогичные измерения на соседней частоте 2364 МГц вне полосы частот акустического резонанса. Как и ожидалось, акустические резонансы в подложке ГГГ полностью исчезли. При этом на графике распределения магнитных колебаний возникали незначительные изменения. Данная особенность позволяет существенно снизить влияние объемных неоднородностей в подложках ГГГ, что крайне важно для продвижения высокооборотных магнитоакустических резонаторов в область более высоких частот.

1. Mathieu C., Synogatch V. T., Patton C. E. *Phys. Rev. B.* **67** (2003) 104402.
2. Edwards E.R.J., Ulrichs H., Demidov V. E., Demokritov S. O., Urazhdin S. *Phys. Rev. B* **86** (2012) 134420.
3. Казаков Г.Т., Тихонов В.В., Зильберман П.Е. *ФТТ* **8** (1983) 2307

## Трехмерное моделирование формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в составной трубе дрейфа

Петрик А.Г.<sup>1</sup>, Егоров Е.Н.<sup>2</sup>, Храмов А.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет, Саратов;

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет, Саратов

Исследования, направленные на изучение образования и динамики виртуального катода (ВК) в интенсивных электронных потоках, представляют большой интерес и являются важной задачей в области современной вакуумной и плазменной электроники больших мощностей [1 - 4]. Данный интерес обусловлен фундаментальной важностью исследований и прикладным значением.

В работе исследуется так называемое сжатое состояние пучка (ССП). Данное состояние характеризуется малой скоростью и большой плотностью электронов, а также развитой турбулентностью встречных потоков. СПП можно назвать распределенным в пространстве дрейфа ВК, который легко обнаружить по специфическому профилю фазового портрета, когда встречные пучки на некотором участке смыкаются вдоль оси скоростей, образуя область сильно нагретого электронного облака.

Типичной моделью для получения СПП является модель, имеющая составное пространство дрейфа из труб разного радиуса. Данная модель использовалась в работе [5], в секции с меньшим диаметром размещены катод и анод, ток пучка в ней ниже критического тока возникновения ВК, а во второй трубе дрейфа ток превышает критический и реализуется СПП.

Однако детали механизмы образования и нелинейной динамики сжатого состояния потоков до конца не изучены, в частности, не проведены детальные исследования поведения системы с изменением тока пучка, что например, можно достичь меняя расстояние катод-анод источника потока. Поэтому целью работы стало рассмотрение и анализ механизма установления сжатого состояния сильноточного электронного потока в составной трубе дрейфа при изменении расстояния “катод-анод” источника электронов.

Вычисления проводились на программном комплексе CST Studio Suite. Данный продукт представляет собой специализированный инструмент для моделирования динамики заряженных частиц в 3D электромагнитных полях. При расчетах используется Particle-in-cell (PIC) вычислитель, предназначенный для моделирования самосогласованной задачи распространения электромагнитных полей и заряженных частиц во временной области. При этом электромагнитные поля вычисляются в дискретных узлах по схеме с перешагиванием (метод сеток), тогда как частицы движутся в непрерывном фазовом пространстве.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №14-02-31149). Исследования проводились в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России (задание №3.59.2014/К)*

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1. М.: Физматлит, 2003.
2. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
3. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002, Т.47, №6, С.575.
4. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю. и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004, Т.35, №2, С.462.
5. Дубинов А.Е. // Письма в ЖТФ, 1997, Т.23, №22, С.29.

## Расчет ЛБВ с рабочей частотой 0.2 ТГц на основе замедляющей системы типа “гребенка” с пятью цилиндрическими электронными потоками

Золотых Д.Н., Роговин В.И.

ОАО “НПП “Алмаз”, Саратов

В настоящее время активно осваиваются терагерцовый и субтерагерцовый частотные диапазоны. Наиболее широкое применение в ЛБВ-усилителях таких диапазонов нашли замедляющие системы лестничного типа и их модификации. В статье рассмотрен вариант реализации ЛБВ-усилителя для работы в диапазоне 0.2 ТГц. Замедляющая система – типа “гребенка”, рассчитанная для работы с пятью цилиндрическими электронными потоками. Оси симметрии электронных потоков лежат в одной плоскости, перпендикулярной к плоскости “гребней” замедляющей системы. Электронные потоки располагаются эквидистантно. Для повышения эффективности взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы в плоскости “гребня” имеются пять цилиндрических углублений. Схематично замедляющая система представлена на рис. 1.

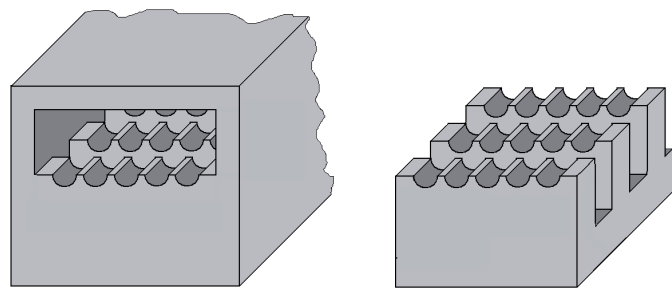


Рис. 1: Схематичное изображение замедляющей системы.

Электродинамические характеристики замедляющей системы определялись при помощи программы “HFSS”. Выходная мощность ЛБВ рассчитывалась по программе, основанной на нелинейной теории взаимодействия в одномерном приближении [1]. Так как значение продольной компоненты электрического поля замедляющей системы изменяется в плоскости поперечного сечения электронного потока, то в расчете использовалось усредненное значение сопротивления связи. Кроме того, значение сопротивления связи усреднялись по значениям для каждого отдельного электронного потока, что необходимо при применении одномерной модели взаимодействия с одним электронным потоком. Оптимальное ускоряющее напряжение составило 15 кВ при силе тока парциального электронного потока 30 мА. Показано, что при данных условиях и электрической длине замедляющей системы, равной 7.5, выходная мощность ЛБВ составляет не менее 40 Вт. Коэффициент усиления  $\Pi$  не менее 36 дБ при КПД равном 3.9%.

1. Кац А.М. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием / А.М. Кац, Е.М. Ильина, И.А. Манькин. М.: Советское радио, 1975, 296 с.

---

**Новые методы диагностики и повышения качества винтового электронного потока в гиротронах**

Лукша О.И., Архипов А.В., Дворецкая Н.В., Колмакова Н.Г., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Трофимов П.А.

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Санкт-Петербург, Россия*

В настоящее время гиротроны занимают лидирующее положение среди источников мощного СВЧ излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Эффективность и предельные достижимые параметры этих приборов в значительной мере определяются качеством формируемого в них винтового электронного потока (ВЭП). В результате оптимизации распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП можно добиться повышения его качества за счет снижения скоростного разброса электронов, подавления паразитных колебаний пространственного заряда, повышения рабочего пичч-фактора (например, [1]). Важная роль в таких исследованиях отводится физическому эксперименту, успех которого зависит от выбора методов измерения требуемых параметров ВЭП. Недостатки существующих методов диагностики электронного пучка в гиротронах делают актуальным разработку и внедрение новых слабовозмущающих методик, позволяющих получать информацию о таких его параметрах, как распределения электронов по компонентам скорости и по энергии.

В докладе обобщаются результаты исследований новых методов диагностики ВЭП и способов повышения его качества, выполненных на кафедре физической электроники СПбПУ. Теоретически и экспериментально показана возможность снижения скоростного разброса и повышения рабочего пичч-фактора электронов в результате оптимизации распределения электрического поля в области магнетронно-инжекторной пушки, в частности, за счет компенсации негативного влияния неоднородности эмиссии с катода. Реализация оптимизированных распределений электрического поля в сочетании с применением других методов повышения качества ВЭП позволила обеспечить работу экспериментального гиротрона (рабочая частота 74.2 ГГц, выходная мощность 100 кВт) в режимах с высоким пичч-фактором в отсутствие паразитных низкочастотных колебаний и добиться таким образом повышения КПД прибора до 46

1. Лукша О.И., Пиосчик Б., Соминский Г.Г., Тумм М., Самсонов Д.Б. *Известия РАН. Энергетика* № 5 (2006) 131



## Перспективные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных устройств.

Соминский Г.Г.<sup>1</sup>, Сезонов В.Е.<sup>1</sup>, Тарадаев Е.П.<sup>1</sup>, Тумарева Т.А.<sup>1</sup>, Илькив И.В.<sup>1</sup>, Задиранов Ю.М.<sup>2</sup>, Корнишин С.Ю.<sup>3</sup>, Степанова А.Н.<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, <sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, <sup>3</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, <sup>4</sup>Институт кристаллографии РАН, Москва.

Холодные полевые эмиттеры привлекательны для использования во многих электронных устройствах. Однако широкому их применению препятствует невысокая долговечность при отборе больших токов в техническом вакууме. В последние годы интерес к полевым эмиттерам существенно возрос в связи с созданием гиротронов и других вакуумных СВЧ приборов коротковолнового миллиметрового и терагерцового диапазона. Миниатюрные полевые эмиттеры больше подходят для коротковолновых СВЧ устройств, чем термокатоды. Но трудности использования полевых эмиттеров в таких приборах усугубляются тем, что в них необходимо обеспечить токи эмиссии порядка 20-30 мА или даже более. Одна из основных причин выхода из строя полевых эмиттеров - их разрушение под действием ионной бомбардировки. Авторами разработаны специальные покрытия [1], позволяющие снизить вредное действие ионной бомбардировки. В данной лекции будут представлены материалы нашей работы, нацеленной на создание двух типов многоострийных эмиттеров с защитными покрытиями, а также оригинальных многослойных эмиттеров.

Перспективны для практического использования многоострийные полупроводниковые эмиттеры с разработанными нами двухслойными покрытиями нового типа. Напыление слоя молибдена толщиной 20-30 нм на поверхность полевого эмиттера позволяет повысить его проводимость и прочность. Нанесенное поверх металлизации фуллереновое покрытие защищает его от разрушающего действия ионной бомбардировки. Многоострийные катоды с двухслойными покрытиями долговечно работают при давлениях порядка  $10^{-7}$  Торр и обеспечивают среднюю по поверхности плотность тока эмиссии приблизительно до  $0.5 \text{ А/см}^2$ . К сожалению, для создания этих и других существующих многоострийных катодов приходится использовать довольно сложные технологии. В настоящей работе опробована возможность создания многоострийных катодов с помощью достаточно простой электроэрозионной обработки молибдена. Для защиты от ионной бомбардировки использовалось фуллереновое покрытие. В техническом вакууме со структуры удавалось получать средние по поверхности плотности тока до  $30 \text{ мА/см}^2$ .

Наряду с описанными выше многоострийными системами, в лекции описаны разработанные авторами катоды нового типа. Катоды приготовлены из набора приведенных в контакт нано-слоев материалов с разной работой выхода. Автоэмиссия таких катодов определяется полями контактной разности потенциалов слоев с разной работой выхода. Проведенные эксперименты и расчеты свидетельствуют, что многослойные катоды могут обеспечить токи электронов порядка 10 мкА с набора из 40 пар слоев толщиной 290 нм.

1. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г. *ЖТФ*. **83** (2013), №7, с.121-124.

## Терагерцовые гиротроны: состояние, перспективы и приложения

Глявин М.Ю.

*ИПФ РАН, Нижний Новгород*

Терагерцевый диапазон, занимающий промежуточное положение между микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитных волн, оставался в течение долгого времени наименее освоенным и казался слишком коротковолновым для методов классической вакуумной электроники и слишком низкочастотным для методов квантовой электроники. В последнее десятилетие активизировалось освоение ТГц диапазона гиротронами, способными обеспечивать в нем мощности на несколько порядков превосходящие уровень твердотельных и "классических" вакуумных приборов (в частности ЛОВ), оставаясь существенно более компактными по сравнению с лазерами на свободных электронах. Актуальность освоения ТГц диапазона обусловлена многочисленными приложениями в области физики, химии, биологии и медицины. С использованием относительно мощных (десятки Вт) источников излучения бурно развивается ДПЯ/ЯМР спектроскопия высокого разрешения. Обсуждаются перспективы ТГц диагностики плотной плазмы и создание локализованных плазменных объектов для задач нанолитографии и дистанционного обнаружения источников ионизирующих излучений. Ряд работ направлен на создание систем контроля качества продуктов и лекарств, селективное воздействие на биологические объекты (в частности, раковые опухоли), разработку систем радиовидения. . .

Начиная с 2006 года, когда гиротронами на базе импульсных соленоидов был впервые преодолен барьер в 1 ТГц, в ряде лабораторий США, Японии, Европы, Китая, Кореи и России создано семейство как непрерывных, так и импульсных гироприборов. В непрерывном режиме генерации на частотах от 0.2 ТГц до 0.5 ТГц как правило реализуются мощности порядка 100 Вт, а рекордные значения составляют более 1 кВт. В импульсных режимах с длительностью десятки микросекунд получены мощности до 200 кВт на частоте около 0.7 ТГц, 5 кВт на частоте 1 ТГц и 0.5 кВт на частоте 1.3 ТГц.

Как представляется, возможности гироприборов далеко не исчерпаны приведенными значениями. Использование прогрессивных электронных (многолучевые и приосевые электронно-оптические системы) и электродинамических (ступенчатые, планарные и эшеллетные резонаторы) систем позволяет рассчитывать на устойчивое одномодовое возбуждение гармоник гирочастоты, что позволит осуществить дальнейшее продвижение по частоте. Развитие криомагнитных систем открывает возможность создания нового поколения гиротронов на основном циклотронном резонансе для нагрева плазмы, и в 2014 году JAЕА (Япония) был продемонстрирован 0.3 ТГц гиротрон с мощностью 300 кВт, в перспективе способный работать в квазинепрерывном режиме.

В ИПФ РАН разрабатываются как непрерывные, так и импульсные источники ТГц излучения. В 2015 году планируется испытать непрерывный гиротрон на второй гармонике гирочастоты с мощностью 200 Вт, ориентированный на спектроскопические задачи, и импульсные гиротроны – 0.3 ТГц/0.5 МВт с импульсным магнитом и 0.25 ТГц/0.2 МВт с криомагнитной системой.

ТГц гиротроны в ИПФ РАН разрабатываются в рамках проекта РНФ 14-12-00887.

---

**Современные тенденции развития гиротронов****Запевалов В.Е.***Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

Научный поиск в 60-х годах минувшего века привел к созданию гиротрона и целого ряда других гирорезонансных устройств, принцип действия которых основан на синхронном взаимодействии криволинейного электронного пучка и электромагнитной волны: совокупное действие релятивистских эффектов и неоднородности высокочастотного поля на траекториях электронов в магнитном поле приводят к вынужденному циклотронному излучению на гирочастоте и ее гармониках [1]. За минувшие годы в ряде ведущих исследовательских и промышленных организаций ряда стран (Россия, США, Япония, Германия, Франция и др.) созданы высокоэффективные гиротроны высокого уровня мощности от сантиметрового до субмиллиметрового диапазонов [1-3]. Сформировался ряд фундаментальных научных направлений, успешное развитие которых прямо обусловлено наличием указанных источников (нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), получение новых материалов, спектроскопии (ЭПР и динамической ядерной поляризации в ЯМР) и др.). Каждое из приложений диктует свои направления развития гироприборов, которые проанализированы в данной работе.

В мощных гиротронах для плазменных приложений, на частотах до 170 ГГц реализованы квазинепрерывные (порядка 1000с) высокоэффективные (КПД более 50%) режимы мегаваттного уровня мощности, в том числе и со ступенчатой перестройкой частоты в широких пределах, а также модуляцией выходной мощности. Конструкция мощного гиротрона обычно включает в себя встроенный квазиоптический преобразователь и коллектор электронов с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка, окно вывода излучения выполнено, как правило, из синтетического алмаза [2, 3]. Продолжаются разработки гиротронов с мощностью до 2 МВт и более.

Для гиротронов средней мощности для технологических приложений желательны повышение эффективности и перестройка частоты. Для гиротронов малой мощности для спектроскопии крайне востребованы долговременная стабильность работы и перестройка частоты, повышение КПД, но сложность задачи обостряется проблемой конкуренции мод и высоким уровнем омических потерь, особенно в гиротронах, работающих на гармониках циклотронной частоты в субмиллиметровом диапазоне [2-4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 14-29-00192.

1. Nusinovich G., Introduction to the physics of gyrotrons *The Johns Hopkins University Press*, Baltimore and London, 2004
2. Thumm M., State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. KIT Scientific Publishing, 2013
3. Запевалов В.Е., Эволюция гиротронов, Изв. вузов. Радиофизика, 2011, т. LIV, №8-9 стр. 559-572
4. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В., Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения // УФН, 2011, 181, 867-874

## Особенности сверхизлучения поливинтового электронного потока в статических электрическом и магнитном полях

Корниенко В.Н., Черепенин В.А.

*ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, Москва*

Возможность сверхизлучения в ансамбле классических нелинейных осцилляторов впервые была показана в работе [1]. Было установлено, что длительность формируемого импульса излучения зависит от плотности частиц и величины нелинейности, а время его формирования - от степени начальной модуляции плотности по фазе колебаний. Следует отметить, что для максимального проявления эффекта сверхизлучения ансамбль должен занимать в пространстве объем, линейный размер которого много меньше характерной длины волны излучения, которая однозначно связана с исходной частотой колебаний осцилляторов. Кроме того, радиационная неустойчивость развивается в этом случае при сколь угодно малой плотности частиц, т.е. для наблюдения эффекта наличие цепи внешней обратной связи не требуется.

Практическое применение сверхизлучения в классических системах связано, прежде всего, с проблемой генерации коротких импульсов электромагнитного излучения [2].

Цель данной работы состояла в теоретическом исследовании возможности управления параметрами импульса сверхизлучения без изменения характеристик ансамбля нелинейных осцилляторов.

Была рассмотрена следующая задача. Пусть в двумерной области пространства существует статическое однородное магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны этой области. Кроме того, перпендикулярно плоскости проходит бесконечная равномерно заряженная нить. Электроны, обладающие одинаковой начальной кинетической энергией и равномерно распределенные по фазе вращения, движутся по ларморовской окружности, центр которой совпадает с точкой пересечения нити с рассматриваемой областью. Исследуем зависимость длительности и максимальной амплитуды импульса сверхизлучения, формируемого в такой системе, от величины статического электрического поля, создаваемого нитью.

Для решения данной задачи была использована численная модель, основанная на самосогласованной системе уравнений поля и уравнений движения заряженных частиц [3].

Было показано, что положительный заряд нити приводит к укорочению импульса сверхизлучения и незначительному снижению пикового значения СВЧ поля. Отрицательный заряд обеспечивает уширение формируемого импульса и увеличение его амплитуды. Эти параметры изменяются непрерывно с изменением статического электрического поля, что позволяет осуществить управление характеристиками излучения.

1. Канавец В.И., Стабинис А.Ю. *Вест. МГУ. Сер.3. Физика, астрономия* **14** (1973) №2 С.186 .
2. Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Ульмаскулов М.Р., Яландин М.И. *ЖТФ* **72** (2002) Вып.1. С.83.
3. Корниенко В.Н., Черепенин В.А. *Радиотехника и электроника* **48** (2003) №.6. С.758.

## Исследование процессов генерации в релятивистском виркаторе на высших гармониках основной частоты осцилляций виртуального катода

Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е.

СарГУ, СГТУ, Саратов

Релятивистские системы электроники больших мощностей, использующие для генерации электромагнитного излучения колебания электронного потока с виртуальным катодом (виркаторы, редитроны, виртоды и др.), являются перспективным классом приборов и активно исследуются в настоящее время как источники импульсов сверхмощного СВЧ излучения и устройства ускорения ионных потоков [1]. Одновременно, для практических целей возникает необходимость дальнейшего увеличения мощности и частоты генерации подобных СВЧ устройств электроники больших мощностей. Перспективным способом повышения частоты излучения виркаторных систем и их продвижения в субтерагерцовый и терагерцовый диапазон при сохранении характерно высокого уровня мощности представляется использование высших гармоник основной частоты колебаний виртуального катода (ВК) [1]. В связи с этим представляет значительный интерес создание схем виркаторов, работающих на высших гармониках основной частоты ВК, что может позволить эффективно перейти данным приборам в миллиметровый диапазон длин волн.

В данной работе проведено изучение сложных колебательных процессов в релятивистском электронном потоке с ВК в цилиндрической камере дрейфа (модели релятивистского виркатора) в зависимости от величины внешнего однородного магнитного поля, тока и начальной энергии инжектируемых электронов релятивистского потока. Особое внимание уделено анализу поведения высших гармоник основной частоты колебаний ВК при изменении управляющих параметров системы. Численное моделирование проводилось с помощью лицензионного программного пакета трехмерного электромагнитного моделирования CST Particle Studio. Была выявлена сложная динамика ВК в релятивистском электронном потоке. В частности, на плоскости управляющих параметров “ток пучка – внешнее магнитное поле” были выделены области, где максимальной в реализациях токовых осцилляций и выходного сигнала является первая/вторая/третья гармоники основной частоты колебаний ВК (вплоть до 150-200 ГГц).

Так, при малых токах потока, близких к стартовому значению, спектр выходного сигнала демонстрирует, что в системе возникают широкополосные шумоподобные колебания малой мощности. С увеличением величины инжектируемого тока спектр анализируемого сигнала перестраивается, возникают ярко выраженные спектральные составляющие на фоне шумовых колебаний, в первую очередь, основная гармоника осцилляций ВК, которая пропорциональна плазменной частоте электронного потока. Дальнейшее увеличение тока пучка ведет к тому, что амплитуды высших гармоник возрастают, причём, начиная с некоторого тока пучка, амплитуда второй гармоники начинает превышать амплитуду первой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №14-12-00222).

1. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. *Physics of Plasmas* **21** 9 (2014) 093105

---

**Источник излучения миллиметрового диапазона длин волн на основе электронного потока с виртуальным катодом****Фролов Н.С., Куркин С.А., Бадарин А.А., Храмов А.Е., Короновский А.А.**

СГУ, Саратов

СГТУ, Саратов

Актуальной задачей современной электроники микроволн является разработка новых источников и модификация уже существующих приборов для эффективного получения СВЧ излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн [1]. В частности, в настоящий момент в данном направлении активно ведется проектирование так называемых наноклистронов для работы в терагерцовом диапазоне [2,3]. Похожую идею, основанную на уменьшении характерных геометрических размеров прибора до микрометровых, можно использовать для продвижения в суб-ТГц и ТГц диапазон другого перспективного класса генераторов СВЧ диапазона – виркаторов.

Генератор на виртуальном катоде (виркатор) – перспективное устройство вакуумной СВЧ электроники для генерации мощного СВЧ излучения [4]. Ключевыми особенностями работы данного прибора, которые выделяют его среди остальных вакуумных СВЧ устройств, являются: простота конструкции, возможность работы без приложения внешнего магнитного поля, легкость в перестройке частоты и колебательного режима выходного сигнала, а также высокий уровень выходной мощности. При этом большинство проведенных теоретических и экспериментальных работ показывают, что частота генерации виркаторов является сравнительно небольшой и в ряде случаев не превышает 20 ГГц [4,5]. Поэтому вопрос о повышении частоты генерации и продвижение приборов с виртуальным катодом в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн является важной и актуальной задачей современной плазменной и СВЧ электроники.

В данной работе предложена прототипная модель генератора на виртуальном катоде с микрометровыми характерными размерами ("нановиркатор"), которая позволяет генерировать СВЧ излучение на частоте до 100 ГГц. Проведены численные исследования данной модели, а также математическая численная оптимизация геометрических параметров прибора с целью достижения оптимальных характеристик выходного сигнала.

1. Booske J.H. *Physics of Plasmas* **15** (2008) 055502
2. Siegel P.H., et al. *12th International Symposium on Space and Terahertz Technology* (2001) P. 82-90
3. Balucani M., et al. *Millimeter Waves and THz Technology Workshop (UCMMT)* (2013) P. 1-2
4. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. *High Power Microwaves*. Taylor and Francis, NY, 2007.
5. Shlapakovski A.S., et al. *IEEE Transactions on Plasma Science* **40** (2012) P. 1607-1617

---

## Микроволновая система дистанционного досмотра

Мещеряков В.В., Воробьев С.И., Семенов С.Н.

*ООО «Apstec Labs», Санкт-Петербург*

С появлением в последние годы высокопроизводительных и доступных микросхем обработки информации, таких как ПЛИС и графические процессоры, а также расширением элементной базы радиоэлектронных компонентов зарубежных производителей, стало возможным проведение большого объема вычислений в режиме реального времени, и как следствие создание многопозиционных СВЧ-систем микроволнового зондирования (МСМЗ). В числе направлений развития МСМЗ есть и гражданское: создание систем досмотра тела человека, на наличие скрытых опасных объектов под его одеждой или в багаже.

В разных странах ведутся работы по созданию устройств досмотра тела человека, основанных на различных физических принципах. Но все современные досмотровые устройства не обладают необходимым набором важных свойств. Они не обладают возможностью дистанционного и скрытного досмотра, не позволяют заблаговременно обнаружить опасный объект. Другим крайне важным недостатком существующих систем является отсутствие возможности автоматического определения степени опасности обнаруженного предмета и высокий уровень ложных тревог, поэтому их применение малоэффективно в реальных условиях досмотра больших потоков людей. Но при создании многопозиционной СВЧ системы, мы избежали этих недостатков, что делает разработку весьма актуальной.

Установка работает в сантиметровом диапазоне длин волн, а уровень излучаемой мощности удовлетворяет европейским и российским стандартам безопасности. Установка позволяет:

- дистанционно выявить и локализовать опасные объекты, скрытые под одеждой,
- обнаруживать опасные объекты в режиме реального времени,
- автоматически классифицировать обнаруженные объекты по степени опасности,
- не нарушать тайну личной жизни, а также безопасна для здоровья человека,
- обладает низким уровнем ложных тревог и высоким уровнем обнаружения опасных объектов.

Совокупность уникальных характеристик созданной МСМЗ позволяет делать вывод о возможности их установки в местах массового скопления людей.

1. Valery Averianov, Alexey Evsenin, Igor Gorshkov, Viktor Meshcheryakov, Semen Semenov, Stanislav Vorobyev and others, AUTOMATIC STANDOFF DETECTION OF THREATS IN CROWDED AREAS, BERLIN, 16Ц18.09.14, ISBN 978-3-8396-0778-7, p. 319-326
2. Мещеряков В.В. Оптимизация рабочих параметров установки многопозиционной системы микроволнового зондирования. Сборник трудов 68-й НТК, посвященной Дню Радио. - СПб, ЛЭТИ, 18-26.04.13, с. 299-300.

## Экспериментальное исследование динамики ансамбля осцилляторов Курамото в активных беспроводных сетях

Дмитриев А.С., Емельянов Р.Ю., Герасимов М.Ю.

*ИРЭ им В.А. Котельникова РАН, Москва*

Беспроводная сенсорная сеть в классическом исполнении состоит из набора узлов с датчиками, объединенными в ансамбль посредством радиоканалов. В докладе описываются беспроводные сенсорные сети, узлы в которой способны не только выполнять сбор и передачу данных с сенсоров, но и совершать активные действия: управление, обработку и визуальное отображение информации. Назовем такие обобщенные сенсорные сети активными беспроводными сетями.

Каждый узел в активной беспроводной сети (активный узел) реализован в виде пары беспроводной приемопередатчик – актуатор. Актуаторы – специальные управляющие устройства, способные влиять каким-либо образом на окружающую среду. В данном случае это платы, оснащенные микроконтроллерами, как вычислительным средством, и многоцветными светодиодами, как средством визуализации. Актуаторы способны взаимодействовать с приемопередатчиками посредством специального интерфейса.

Современный уровень вычислительной мощности микроконтроллеров позволяет использовать активную беспроводную сеть как аппаратную базу для моделирования процесса эволюции динамических систем. Наличие на актуаторах светодиодов позволяет наглядно наблюдать за динамикой развития динамических систем.

Связь между динамическими системами на разных узлах активной беспроводной сети осуществляется посредством радиоканала. Передача данных пакетная, при этом данный подход позволяет обеспечить произвольную заданную топологию ансамбля. Это важное свойство достигается за счет соответствующей адресации передаваемых пакетов. В качестве приемопередатчиков в эксперименте используются сверхширокополосные беспроводные приемопередатчики ППС-43 на хаотических радиоимпульсах в СВЧ диапазоне.

В качестве исследуемой динамической системы выбрана модель Курамото, представляющая собой полностью связанный ансамбль фазовых осцилляторов. В зависимости от величины силы связи между узлами ансамбля возможно наблюдение различных режимов поведения ансамбля: независимый режим, синхронизация, хаотический режим.

В докладе рассматривается методика моделирования при помощи активной беспроводной сети динамических систем и связей между ними, экспериментальные результаты и их анализ.

1. Y. Kuramoto, *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*, Springer, Berlin, 1984.
2. V. Popovych, Yu. Maistrenko, and P. Tass, Phase chaos in coupled oscillators, *Phys. Rev. E* **71** (2005) 065201



## Ответвление магнитостатических спиновых волн в ферромагнитных микроволноводах

Садовников А.В., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Никитов С.А., Davies C.S., Kruglyak V.V.

СарГУ, Саратов, Россия; School of Physics, University of Exeter, United Kingdom

В настоящее время большой интерес представляет исследование волноведущих структур на основе магнитных тонких пленок. Рассмотрение таких структур представляется достаточно важным, поскольку на их основе возможно создание перестраиваемых магнитным полем СВЧ фазовращателей, ответвителей, линий задержки и других устройств магноники [1]. В работе экспериментально исследован Т-образный ферромагнитный волновод, изготовленный из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) с использованием технологии лазерного скрайбирования. Пленка ЖИГ, выращенная на подложке гадолиний галлиевого граната (ГГГ) методом жидкофазной эпитаксии, имеет толщину  $d=10$  мкм, намагниченность насыщения  $4\pi M_0 = 1750$  Гс и ширину линии ферромагнитного резонанса  $H_l=0.5$  Э, измеренную на частоте 5 ГГц. Для возбуждения в пленке ЖИГ спиновых волн используется микрополосковый преобразователь шириной  $t=30$  мкм, один конец которого закорочен на землю, а другой подсоединен к генератору сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Т-образный ЖИГ волновод помещается между полюсами электромагнита, который создает однородное в пространстве постоянное магнитное поле  $H_0$ , напряженность которого составляла 1150 Э. С помощью экспериментального исследования методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии изучена пространственно-временная динамика распространения и ответвления МСВ (см. рис. 1) в узких ферритовых ЖИГ волноводах [3] и в области Т-образного сочленения ЖИГ-волноводов.

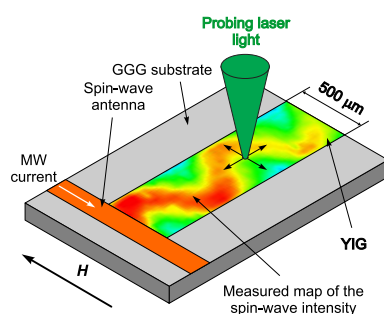


Рис. 1: Схема части исследуемой структуры и распределение квадрата намагниченности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (14-07-00273, 13-07-12409).

1. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2010) **43** 264001.
2. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. *Phys. Rep.* **348** (2001) Pp. 441-489.
3. O'Keeffe T.W., R.W.Patterson *J. Appl. Phys.* **67** (1978) Pp. 4868-4895.

## Простой способ расчета комплексных мод резонатора гиротрона

Рожнев А.Г.

*Саратовский государственный университет, Саратов*

Резонатор гиротрона в большинстве случаев представляет собой отрезок однородного гладкого круглого волновода, нагруженного на пушечном конце сужающимся, а на коллекторном конце — расширяющимся рупором. Вывод энергии производится дифракционным способом через второй рупор, поэтому такая структура представляет собой открытый резонатор, обладающий набором мод колебаний, с собственными частотами и соответствующими дифракционными добротностями. Знание этих параметров, а также распределения поля рабочего типа колебаний в резонаторе необходимо для анализа режимов работы гиротрона с использованием резонаторной формы уравнений возбуждения.

Наиболее простой и, одновременно, эффективный метод расчета подобных резонаторов предложен в [1]. Он основан совместном решении уравнения неоднородной струны для комплексной амплитуды поля в неоднородном волноводе, образном резонатором вместе с рупорами, и граничных условий (ГУ) излучения [1]. ГУ ставятся в таких сечениях неоднородного волновода для которых критическая частота рабочей моды лежит достаточно далеко от собственной частоты колебаний резонатора. Несмотря на относительную простоту метода [1], для его реализации необходимо численно решать одномерную краевую задачу, например, методом стрельбы.

В настоящем докладе предлагается простой метод расчета комплексных мод резонатора гиротрона, основанный на использовании ГУ для поля рабочей моды, сформулированных непосредственно в плоскостях перехода однородного участка резонатора в расширяющийся и сужающийся рупора [2]. Условие для расчета комплексных собственных частот резонатора получается при этом в виде уравнения для нулей явно записанной аналитической функции комплексной переменной. Эти нули могут быть эффективно найдены численно с использованием, например, принципа аргумента.

В таблице приведены результаты расчета собственных частот и дифракционных добротностей первых трех продольных типов колебаний резонатора, параметры которого взяты из статьи [3]. Здесь же приведено сравнение этих расчетов с данными, полученными при решении краевой задачи для уравнения неоднородной струны методом стрельбы.

Работа поддержана грантом РФФИ №14-02-00976а и проектом № 1463 (задание №2014/203 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ).

Номер моды	$f$ , ГГц (Ур-е неоднородной струны)	$f$ , ГГц (Предлагаемая методика)	$Q_d$ , (Ур-е неоднородной струны)	$Q_d$ (Предлагаемая методика)
1	460.171	460.171	89224.4	91682.1
2	460.243	460.243	22266.0	22891.5
3	460.363	460.362	9887.8	10156.1

1. Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М. и др. // Радиофизика, 1969. Т.12, №8 С. 1236.
2. Rozhnev A. G. // J. Comm. Thech. and Electron., 2000. V. 45, Suppl. 1. P. S95.
3. Torrezan A. C., Han S.-T. et al. // IEEE Trans. on PS. 2010. Vol. 38, P. 1150.

## Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона

Седов А.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Лещева К.А., Розенталь Р.М.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород*

Освоение гиротронами субтерагерцового и терагерцового диапазона вплотную приближает значения рабочих длин волн к пределам за которыми кардинально повышается роль возмущающих факторов: точности технологической сборки и юстировки силовых полей, неоднородностям эмитирующей поверхности катода и т.д. К настоящему моменту уже реализованы импульсные гиротроны с частотой выше 0,5 ТГц с уровнем мощности сотни киловатт, а также высокостабильные субтерагерцовые гиротроны непрерывного излучения [1-4]. При этом заметно возрастает актуальность обеспечения реализуемости, воспроизводимости и устойчивости проектных оптимальных режимов таких приборов.

В теории гиротронов, базирующейся на усредненных по высокочастотным колебаниям системах уравнений, накоплен большой опыт учета влияния тех или иных видов возмущения симметрии на характеристики выходного излучения. В то же время большой теоретический и практический интерес представляет сравнение полученных данных с результатами прямого численного моделирования методами крупных частиц (PIC-коды KARAT, CST и др.).

В данной работе подобное моделирование осуществлено применительно к экспериментально реализованным в ИПФ РАН гиротронам диапазона 260 ГГц [3,4]. Продемонстрирована высокая степень устойчивости колебаний в гиротроне к смещению оси инжекции пучка и перекоосу магнитного поля. Сделаны оценки величины снижения максимального КПД генерации. Проведено сравнение результатов PIC-моделирования и расчетов на основе многомодовой нестационарной модели с самосогласованной нефиксированной структурой ВЧ-поля [5], обобщенной на случай несоосности пучка и резонатора.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-12-00887.

1. Глявин М.Ю. и др. *Известия ВУЗов. Радиофизика* **56** (2013) с.550
2. Jawla S., Nanni E., Shapiro M. et al. 36 th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Houston. 2-7 Oct. 2011.
3. Idehara T., Sabchevski S.P. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* **33** (2012) p. 667
4. Цветков А.И. и др. II Московская микроволновая неделя, Москва, 24-28 ноября 2014. с. 73
5. Ginzburg N.S. et al. *Int. J. Electronics* **61** (1986) p. 881

## Оптимизация параметров маломощных терагерцовых гиротронов

М.Ю. Глявин<sup>1</sup>, Н.А. Завольский<sup>1</sup>, В.Е. Запевалов<sup>1</sup>, Г.С. Нусинович<sup>2</sup>, М.И. Петелин<sup>1</sup>, А.С. Седов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Университет Мэриленда, США

Долгое время доминирующим направлением развития гиротронов было достижение высоких уровней мощностей и КПД. Главным образом, это было связано с решением задачи по нагреву плазмы в установках по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и технологических приложений. Однако в последнее время круг научных и технических приложений гиротронов существенно расширился и включает их использование для таких задач, как нелинейная динамическая поляризация ядер и молекул, диагностика плотной плазмы в установках УТС, изучение свойств и создание новых материалов, обнаружения радиоактивных источников и многих других [1].

В процессе повышения рабочих частот естественным образом происходит миниатюризация приборов, сопровождающаяся уменьшением токов и напряжений. В условиях ограничения тока пучка и ускоряющего напряжения уже не удается достичь максимального уровня КПД. При этом на процесс оптимизации накладываются дополнительные ограничения, связанные со значительной долей омических потерь в резонаторе [2], которая растет как с повышением частоты прибора, так и при использовании более низких рабочих мод.

В результате была решена задача по определению оптимального КПД в условиях наличия существенных омических потерь в стенках резонатора гиротрона. При этом были построены плоскости Изо-КПД в зависимости от параметров приведенный ток и комические потери для случая работы гиротрона на первых трех гармониках циклотронной частоты. Рассмотрены примеры использования получившихся плоскостей для расчета разработанных и реально существующих или проектируемых гиротронов [3-4]. В результате сделаны выводы о хорошем соответствии результатов оптимизации данных гиротронов полученным разными методами. Для случая большой величины омических потерь и малого КПД была получена аналитическая формула для оценки КПД прибора. Проанализирована проблематичность создания гиротрона на третьей гармонике с напряжением ниже 20 кВ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-00334.

1. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. *УФН* **181** (2011) с. 867
2. Нусинович Г.С., Панкратова Т.Б. В сб. Гиротроны, Горький 1981, с. 181
3. T. Idehara, I. Ogawa, La Agusu et al. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves* **28** (2007) p. 433
4. M. K. Hornstein; V. S. Bajaj, R. G. Griffin; and R. J. Temkin. *IEEE Transactions on Plasma Science* **35** (2007) p. 27

## Разработка микроволнового комплекса для медико-биологических исследований

Глявин М.Ю., Морозкин М.В., Цветков А.И., Фокин А.П., Холопцев В.В.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

В последнее время все более привлекательной становится возможность использования терагерцового излучения в биологических исследованиях. В этом диапазоне находится большое число сильных линий характерных переходов больших молекул, в том числе органических, что открывает возможности, как для их исследования, так и для селективного воздействия на них [1]. Кроме того, неоднородности размером менее 0,1 мм, приводящие к сильному рассеянию в видимой и ближней ИК областях спектра, не дают значительного рассеяния в терагерцовом диапазоне. Неионизирующий характер взаимодействия и относительно большая глубина проникновения делают ТГц излучение привлекательным для медицинских приложений.

Для медико-биологических исследований в области ТГц диапазона предполагается создание специализированных комплексов, включающих в себя источник излучения и систему автоматизированного управления, которая обеспечит безопасность работы и удобство пользователя, не имеющего специальных знаний об устройстве и принципах работы системы. Перспективным генератором для указанных приложений представляется гиротрон, на несколько порядков превосходящий по мощности традиционные вакуумные лампы обратной волны и полупроводниковые источники, и имеющий стоимость, габариты и рабочие напряжения значительно ниже, чем у лазеров на свободных электронах [2].

В докладе описан комплекс для медицинских, биологических и спектроскопических исследований на базе разработанного в ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП "Гиком" гиротрона, имеющего частоту излучения на основной гармонике гирочастоты 263,1 ГГц при мощности до 1 кВт. Прибор установлен в сверхпроводящий "сухой" криомагнит компании Jastec, Inc. (Япония), обеспечивающий напряженность магнитного поля до 10 Т в теплом отверстии диаметром 100 мм. Гиротрон оснащен встроенным квазиоптическим преобразователем, который трансформирует рабочую моду  $TE_{5,3}$  в узконаправленный гауссов волновой пучок с эффективностью 93%.

Созданный комплекс обеспечивает возможность регулировки мощности в широком диапазоне: от нескольких ватт до 1 кВт, как в импульсном, так и в непрерывном режиме. При этом работа с малой мощностью требует низких токов пучка (десятки миллиампер при напряжении около 15 кВ), что позволяет использовать для этих режимов сравнительно простой источник питания. Плавная перестройка частоты за счет изменения магнитного поля, а также за счет теплового изменения радиуса резонатора при контролируемом изменении температуры хладагента в независимом контуре охлаждения, возможна в полосе 0,8 ГГц. При этом ширина спектра  $df/f \sim 10^{-6}$ , а уход частоты при долговременной (несколько часов) работе  $\Delta f$  около 2 МГц.

В рамках развития созданного комплекса разрабатывается гиротрон на второй гармонике с рабочей частотой 527 ГГц, экспериментальное исследование которого планируется в 2015 году.

1. Nanni E.A., Barnes A.B., and Griffin R.G. *IEEE T. THz Sci. Tech.* **1** (2007) p. 145
2. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. *УФН* **181** (2011) с. 867

## Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии

Семенов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

Электронно-оптические системы (ЭОС) формирования винтовых электронных пучков являются ключевым компонентом гиротронов, которые до настоящего времени остаются на передовых позициях с точки зрения мощности излучения вплоть до терагерцового диапазона. Повышение требований к эффективности и надежности работы гиротронов определяет необходимость учета в расчетах ЭОС таких явлений как неоднородность эмиссии, несоосность и перекося силовых полей и др.

Традиционные алгоритмы анализа ЭОС на базе методов трубок тока и дискретных источников легли в основу программного комплекса ANGEL (ANalyzer of a Gyrating Electrons), разработка которого началась в ИПФ РАН несколько лет назад [1]. После подтверждения работоспособности нового кода в двумерных расчетах технологических систем [2], были разработаны алгоритмы трехмерного моделирования. На первом этапе реализован учет азимутально-несимметричного пространственного заряда, обусловленного зависящими от азимутальной координаты точками старта траекторий и распределения начальных скоростей в этих точках; внешние силовые поля при этом предполагаются азимутально-симметричными.

Поток частиц, вылетающих с эмиттера, разбивается в каждом из азимутальных секторов на  $N$  трубок тока, что позволяет задавать неоднородность эмиссии по азимутальной координате. Поскольку геометрия электродной системы считается осесимметричной, влияние пространственного заряда на граничные условия учитывается усредненно по азимуту, что оправданно в случае умеренных значений неоднородности эмиссии. Также реализован алгоритм моделирования ЭОС с несоосностью электродной и магнитной подсистем. При этом сами подсистемы остаются азимутально-симметричными, но формируемые такой системой электронный пучок и пространственный заряд оказываются несимметричными.

На основе реализованных алгоритмов сделан ряд оценок влияния азимутальных неоднородностей ЭОС гиротрона диапазона 260 ГГц [3] на качество формируемого винтового пучка. Следующим шагом развития программного комплекса ANGEL будет являться модификация метода дискретных источников для адекватного моделирования конфигураций со значительной несимметрией пространственного заряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No15-41-02608.

1. Планкин О. П., Семенов Е. С. Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона. Инструкция для пользователя. // *Методическая разработка. Н. Новгород: ИПФ РАН (2011) 32 с.*
2. Планкин О. П., Семенов Е. С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона. // *Вестник НГУ, серия "Физика". Т. 8, No 2 (2013) с. 44-54.*
3. Н.П. Венедиктов и др. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер. // *Известия ВУЗов. Радиофизика. Т. 53, No4 (2010) с.260-268.*

## Проект 100 ГГц релятивистского гиротрона с выходной мощностью 5 МВт

Абубакиров Э.Б., Денисов Г.Г., Гузнов Ю.М., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Запезалов С.А., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С., Шевченко А.С.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

Успешная реализация в ИПФ РАН релятивистских гиротронов диапазонов 3гсм, 1гсм и 8мм с рекордными значениями уровня мощности ( $\sim 10$  МВт) и КПД ( $\sim 50\%$ ) [1], создала предпосылки для разработки источника с подобными характеристиками на длине волны 3мм, представляющего очевидный интерес для перспективных ускорительных и радиолокационных приложений [2].

Гиротрон предполагается реализовать на базе сильноточного ускорителя Сатурн-Ф с частотой повторения импульсов до 10 Гц, с сохранением концепции магнетронно-инжекторной электронной пушки триодного типа и осевым выводом энергии на рабочей моде.

Проектные параметры гиротрона:

Ускоряющее напряжение 300 кВ Напряжение анод-катод 120-170 кВ Ток пучка 70-80 А Длительность импульса  $\sim 1$  мкс Рабочая частота 100 ГГц Рабочая мода TE<sub>12,7</sub> Оптимальное магнитное поле 5,15 Т Электронный КПД 25-28 % Импульсная выходная мощность 6-7 МВт

Предварительные результаты расчетов демонстрируют реализацию приемлемого качества винтового электронного пучка (ВЭП) до токов около 80 А. Отметим, что формирование интенсивных релятивистских ВЭП с высокой компрессией для гиротронов такого диапазона частот ранее не проводилось. В целом, проведенные расчеты показывают возможность создания прибора с требуемой совокупностью параметров. На следующих этапах работы предполагается провести анализ переходных процессов и возмущающих факторов, параллельно с проектированием основных подсистем и гиротрона в целом.

С точки зрения повышения КПД заметный потенциал заложен в оптимизации профиля резонатора гиротрона. Данную задачу предполагается решать как на основе усредненных уравнений, так и с использованием трехмерных PIC-кодов, успешно освоенных для моделирования гиротронов на высоких модах [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №14-29-00192.

1. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers/ by Manfred Thumm. – *KIT Scientific Publishing*(2013)
2. N. Kumar et al. A Review on the Applications of High Power, High Frequency Microwave Source: Gyrotron // *J Fusion Energ* **30** (2011) pp.257-276.
3. Zaslavsky V.Y. et al. Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and planar configurations of the interaction space. // *Phys Plasmas* (2013) 20(4): 043103.

---

**Возможности промышленного применения углеродных наноразмерных структур с полевой эмиссией в качестве катодов мощных СВЧ приборов: состояние дел, перспективы****Морев С.П.***Федеральное государственное унитарное предприятие “НПП Торий”, г. Москва*

В лекции рассмотрены возможности промышленного использования матричных автоэмиссионных структур на основе углеродсодержащих материалов в качестве источников интенсивных электронных потоков в вакуумных СВЧ усилителях О-типа, таких как клистроны или лампы бегущей волны. Представлен анализ наиболее перспективных, в настоящее время, автоэмиссионных структур, предназначенных для работы в качестве катодно-сеточных узлов электронных пушек вакуумных СВЧ приборов средней и высокой мощности, таких как структуры на основе ячеек Абаньшина-Горфинкеля и их модификаций, так и структуры на основе ячеек Григорьева-Шестеркина. Проведена оценка выходных параметров клистронов и ЛБВ, использующих рассмотренные структуры.



**Диссипативные структуры и хаос в кольцевых автоколебательных системах при трехволновом взаимодействии спиновых волн**

Гришин С.В., Морозова М.А., Романенко Д.В., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

Диссипативные солитоны и хаос представляют собой новую парадигму, которая активно развивается в последние десятилетия, благодаря новым представлениям о формировании структур за счет потоков энергии и детерминированной природе хаоса, порождаемого динамическими системами. На сегодняшний день оба этих фундаментальных явления активно исследуются в различных областях знаний (биологии, химии, физике и др.) и имеют практические приложения, связанные, например, с передачей и обработкой информации как в оптических линиях связи [1], так и в передающих системах микроволнового диапазона [2]. В микроволновом диапазоне наиболее удобным объектом для исследования указанных нелинейных явлений являются ферромагнитные пленки, в которых в отличие от оптических систем нелинейные процессы наблюдаются при рекордно низких уровнях мощности - порядка десятков микроватт. Помимо этого, распространяющиеся в таких пленках магнитостатические спиновые волны (МСВ) обладают различными законами дисперсии, которые зависят как от направления внешнего постоянного магнитного поля, так и граничных условий. В кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками наиболее изученными являются диссипативные структуры и хаос, формирующиеся за счет четырехволновых процессов взаимодействия спиновых волн. Генерируемые здесь диссипативные солитоны есть результат установления баланса между усилением и потерями, а также между пространственной дисперсией МСВ и кубической нелинейностью. Развитие хаотической динамики при уровнях мощности, соответствующих солитонным режимам, может приводить к хаотизации огибающей и генерации хаотических солитонов [3].

Помимо четырехволновых взаимодействий в ферромагнитных пленках существуют трехволновые параметрические взаимодействия. Данные процессы развиваются при гораздо меньших уровнях мощности и могут приводить к возникновению кубической нелинейности за счет параметрической связи спиновых волн. В докладе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования генерации диссипативных структур за счет трехволнового взаимодействия и наличия в кольце резонансных элементов различного типа. Помимо этого рассматриваются вопросы, связанные с генерацией хаоса и хаотических параметрических солитонов [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (задание №2014/203), Совета по грантам при Президенте РФ (программа поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ 828.2014.2) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00577).

1. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. Физматлит, Москва, 2005.
2. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. Физматлит, Москва, 2002.
3. Wang Z., Hagerstrom A., Anderson J.Q., et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, (2011) 114102.
4. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., *Письма в ЖЭТФ* **88**, (2008) 743.

## О клинотронном эффекте

Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В

*СарГУ, Саратов*

В источниках излучения типа ЦО миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов - клинотронах [1] используются толстые электронные пучки (поперечные размеры пучка соизмеримы с длиной замедленной волны), падающие под малым углом на поверхность замедляющей системы. В условиях сильно выраженного поверхностного характера высокочастотного поля этим обеспечивается более равномерное группирование всех слоев пучка, поскольку все они проходят область вблизи системы, где в основном локализовано поле, что существенно улучшает эффективность взаимодействия такого пучка с полем. В этом состоит суть клинотронного эффекта. Однако природа клинотронного эффекта более сложная, чем описано выше, и она зависит от того, в каком режиме работает прибор и какая структура электронного пучка в пространстве взаимодействия. Поэтому в настоящей докладе этому вопросу уделено определенное внимание, применительно к модели клинотрона, в которой учтены начальный зазор между границей электронного пучка и замедляющей системой и статические траектории электронов в пространстве взаимодействия. В результате проведенных расчетов по уравнениям стационарной и нестационарной теорий клинотрона [2] было показано, что в режиме слабых амплитуд (старт) необходимость наклона пучка к замедляющей системе связана только с устранением начального зазора между пучком и системой, вследствие чего угловые зависимости стартового тока имеют минимум. Но наименьший стартовый ток достигается при отсутствии зазора, когда пучок распространяется непосредственно вдоль системы (угол наклона нулевой). Иначе говоря, в этом случае клинотронный эффект связан с оптимизацией угла ввода пучка в пространство взаимодействия, т.е. с оптикой пучка. В режиме больших амплитуд (максимального КПД) оптика пучка не является определяющей для наклона пучка. Наклон пучка в этом случае необходим для уменьшения нелинейных, эффектов, приводящих к ухудшению эффективности взаимодействия пучка и поля, и предотвращения сложной динамики автоколебаний в клинотроне при увеличении тока пучка. Этими процессами объясняется клинотронный эффект в режиме больших амплитуд. Отмеченные особенности клинотронного эффекта проявляются как для модели клинотрона с прямолинейными траекториями электронов (бесконечное фокусирующее магнитное поле), так и при фокусировке пучка полем с конечным уровнем, т.е. при наличии пульсаций пучка. Имеются только принципиальные различия численных значений рассчитываемых величин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (программа государственной поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ 828.2014. 2) и поддержана проектом №1463, проводимым в рамках базовой части государственного задания №2014/203 Минобрнауки РФ на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности"

1. 1. Левин Г. Я., Бородкин А.И., Кириченко А.Я. и др. Клинотрон. Киев: Наукова думка, 1992.
2. 2. Андрушкевич В.С., Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В // Р.Э. 2011. Т.56. №4. С.493.

## Условие выполнения теоремы Флоке для почти периодических волнонведущих систем в режиме вынужденных колебаний

Накрап И.А., Савин А.Н.,

*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов*

Электромагнитные поля в одномерно-периодических структурах (ПС) в соответствии с теоремой Флоке отличаются при трансляции на величину пространственного периода только постоянным множителем (комплексным в общем случае).

В отличие от бесконечной ПС с идентичными ячейками (или их аналогов — короткозамкнутых по плоскостям симметрии отрезков ПС), в реальной системе конечной длины с переходными согласующими устройствами (выводами энергии) условие Флоке при нарушении симметрии не должно выполняться.

В докладе приведены результаты исследования дисперсионных характеристик и распределения полей вынужденных волн ПС различного типа с выводами энергии, устанавливающие выполнение теоремы Флоке при условии равенства частот вынужденных колебаний ПС собственным частотам исследуемых структур.

Собственные частоты и соответствующие сдвиги фазы на период ПС определялись методом резонансного возмущения. Частоты вынужденных колебаний и сдвиги фаз поля ПС с выводами энергии определялись с использованием метода нерезонансных возмущений, а также данных спектрального анализа распределения полей систем на соответствующих частотах.

Как следует из результатов экспериментального исследования характеристик ПС различного типа амплитуда поля падающей волны и сдвиг фазы на период системы почти периодических систем на частотах вынужденных колебаний, равных собственным частотам ПС, практически постоянны от ячейки к ячейке. Продольные распределения суммарного поля ПС с выводами энергии на частотах возбуждения, равных собственным частотам колебаний, с достаточной точностью соответствуют распределениям поля собственных колебаний. Это подтверждает возбуждение в согласованной периодической системе конечной длины только нормальных волн, т.е. с достаточной степенью приближения выполнение условия Флоке. Незначительные флуктуации поля падающей волны около среднего значения объясняются отклонением размеров резонаторов от номинальных и влиянием конечных ячеек.

На частотах вынужденных колебаний, не равных собственным частотам, распределение амплитуды поля также постоянно по длине ПС. Но при этом распределение набега фазы поля падающей волны в почти периодической системе (условие согласования с выводами энергии) не только флуктуирует по длине системы, но в некоторых случаях может иметь выбросы в отдельных ячейках.

Таким образом, при оценке эффективности взаимодействия электронного потока с полем ПС конечной длины с переходными согласующими устройствами необходимо учитывать характер и величину изменения амплитуды и фазы поля по длине системы при распространении в ней волн на частотах, не равных собственным частотам нормальных волн. Экспериментально установлено выполнение условия Флоке в периодических системах с выводами энергии на частотах вынужденных колебаний, равных собственным частотам ПС. Это дает возможность использования электродинамических характеристик ПС, определяемых из распределения полей вынужденных волн систем с согласованными выводами энергии.

## Экспериментальное исследование генератора с многоскоростным электронным пучком

Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.

*СарГУ, Саратов*

Перспективным направлением современной электроники является использование устройств, в основе действия которых лежат процессы, связанные со сложной динамикой электронного пучка, обладающего непрерывным или дискретным распределением по скоростям. Одной из разновидностей таких пучков являются так называемые турбулентные пучки, которые можно рассматривать в качестве источника широкополосных СВЧ-колебаний. В турбулентном пучке возникают интенсивные собственные колебания, вызванные колебаниями сгустков пространственного заряда. В данной работе рассмотрены результаты экспериментального исследования лабораторного макета низковольтного виркатора [1]. Питание лабораторного макета осуществлялось в импульсном и непрерывном режимах при напряжении  $U_0=4-8$  кВ для импульсного режима и  $U_0=0.8$  кВ для непрерывного и токах пучка  $I=200-300$  мА и  $I=20-50$  мА, соответственно, для обеспечения первеанса в рассмотренных режимах  $P=9 \cdot 10^{-7}$  А/ $V^{3/2}$ . Длительность импульса составляла  $t = 50$  мкс, скважность  $Q = 1000$ . Электронная пушка сформировала аксиально симметричный пучок, который далее проходил по трубе диаметром  $d = 20$  мм. Для фокусировки пучка использовалось неоднородное магнитное поле амплитудой  $B=0.05$  Тл и периодом  $b = 25$  мм. Исследовалось влияние на характеристики выходного сигнала различных факторов, таких как величина и распределение магнитного поля, а также величина тормозящего потенциала, определяемого как разность ускоряющего напряжения  $U_0$  и напряжения коллектора  $U_{col}$ . При напряжениях  $U_{col}=3.5$  кВ и  $U_0=4.5$  кВ были выявлены исключительно режимы соответствующие квазипериодическому выходному сигналу, а спектр выходного сигнала имел ярко выраженный дискретный характер. Однако при уменьшении напряжений до  $U_{col}=0.7$  кВ,  $U_0=0.8$  кВ и переходе в непрерывный режим спектр выходного сигнала зашумляется. При этом детальное рассмотрение изменения спектра выходного сигнала, позволило выявить один из классических сценариев перехода к хаосу через каскад удвоений периода [2]. Подобный переход можно объяснить постепенной турбулизацией электронного пучка при уменьшении его торможения, когда источником широкополосного излучения становятся не осцилляции электронного сгустка в области минимума потенциала, а постепенно возникающие в нем электронные структуры различных пространственно-временных масштабов. Полученные результаты позволяют рассматривать низковольтный виркатор как перспективный прибор при разработке компактных генераторов хаоса, а также как удобную систему для исследования явления турбулентности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №13-02-00129, №14-02-00329), а также Совета по грантам при Президенте РФ (программы поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ-828.2014.2 и молодых ученых - кандидатов наук МК-1373.2014.2)

- 1 Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е., Егоров Е.Н. Калинин Ю.А. Изв. РАН. Сер. Физ., Т.69(12):С.1274, 2005.
- 2 Фокин А.С., Стародубов А.В., Кузнецов Н.Н., Калинин Ю.А. Изв. РАН. Сер. Физ., Т.76(12):С.1489, 2012.

---

**Уменьшение фазовой чувствительности лампы с бегущей волной****Кудряшов А.Г., Сивяков Б.К.***СГТУ им. Ю.А.Гагарина, Саратов*

Одним из основных недостатков лампы с бегущей волной (ЛБВ), прежде всего при использовании в радиолокационных системах, является ее высокая фазовая чувствительность к изменению напряжения пучка. Для решения этой проблемы предлагается использовать во входной части прибора секцию несинхронного режима, которая характеризуется аномальной зависимостью фазы от напряжения пучка (фаза сигнала увеличивается при увеличении напряжения пучка). Аномальная зависимость фазы от напряжения наблюдается при отрицательных (т.н. режим подавления) и больших положительных (т.н. крестатронный режим) значениях параметра несинхронности ЛБВ.

Для создания фазостабильной ЛБВ часть входной секции серийной лампы, разработанной в ОАО кНПП кАлмазь, была изменена с целью выполнения функции компенсирующей секции и состояла из несинхронного участка и обычного усилительного участка. В качестве критериев выбора длины несинхронной секции следует рассматривать величину минимальной фазовой чувствительности ЛБВ и максимально возможного коэффициента усиления (при ограниченной длине) или минимальной длины (при заданном коэффициенте усиления). На основании проведенных расчетов в ОАО кНПП кАлмазь были разработаны и сконструированы экспериментальные образцы фазостабильных ЛБВ с секцией крестатронного режима и секцией подавления. Расчеты и экспериментальные результаты показывают, что эффект компенсации фазы ЛБВ достигается как при использовании секции крестатронного режима, так и секции подавления, однако параметры полученных приборов несколько отличаются, и выбор между вариантами исполнения должен осуществляться исходя из требований, предъявляемых к прибору в конкретном случае его разработки.

## **Синтез многоканального двухзазорного резонатора с кратными резонансными частотами, нагруженного индуктивными стержнями**

**Нестеров Д.А., Царев В.А.**

*СГТУ им. Ю.А.Гагарина, Саратов*

Для расширения полосы рабочих частот многолучевых приборов используются двухзазорные цилиндрические резонаторы, работающие на частоте  $f_1$  основного (противофазного)  $\pi$ -вида колебаний и высшего (синфазного)  $2\pi$ -вида колебаний. Одним из способов изменения частоты  $2\pi$ -вида является введение в резонатор между втулкой и цилиндрической стенкой индуктивных металлических стержней, ориентированных вдоль линий ВЧ тока. Такие резонаторы и являются объектом настоящего исследования.

Целью работы является исследование с помощью программы 3-D компьютерного моделирования REZON двухмодового режима работы такого устройства и поиск путей снижения неоднородности ВЧ электрического поля по радиусу пролетной трубы.

Исследованный многоканальный двухзазорный резонатор выполнен таким образом, чтобы на противофазном виде колебаний он был настроен на рабочую частоту  $f_1$ , а в синфазном виде на удвоенную частоту  $f_2 = 2f_1$ .

Такая конструкция резонатора позволяет:

- Ц сделать многолучевой высокоэффективный клистрон более компактным;
- Ц обеспечить равномерное электрическое поле в области взаимодействия и высокое эффективное характеристическое сопротивление;
- Ц получить высокое характеристическое сопротивление, как на основной, так и на высшей рабочих частотах.

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 8.1065.2014/К.

1. Пугнин, В.И. Оценка предельной мощности многолучевых клистронов с резонаторами на основном виде колебаний для современных РЛС. Радиотехника. - 2000 - с 2. - С. 43-50.
2. Nusinovich, G. A Review of the Development of Multiple-Beam Klystrons and TWTs / G. Nusinovich, B. Levush, D. Abe. - USA, McLean: Naval Research Laboratory, 2003. - 45 p.

## Разработка электронно-оптической системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона

Иванов А.А.<sup>1</sup>, Дармаев А.Н.<sup>2</sup>, Морев С.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО "НПП "Салют", Нижний Новгород, <sup>2</sup> ФГУП "НПП "Торий", Москва

Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований электронно-оптической системы (ЭОС) и магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) для ЛБВ W-диапазона с ускоряющим напряжением менее 9 кВ, током пучка более 50 мА, диаметром пролетного канала 0,4 мм, длиной канала 60 мм.

При выбранных размерах диаметра катода электронной пушки, равного 0,8 мм, толщине бокового экрана катода - 0,1 мм и напряжении  $U_a=8500$  В, ток пучка составил  $I_p=52$  мА. Диаметр пучка в плоскости электростатического кроссовера составил 0,15 мм (компрессия пучка по площади 29). Транспортировка пучка через пролетный канал осуществлялась с помощью МПФС (сплав КС-25 ДЦ 240) с амплитудой магнитного поля на оси канала  $B_z=3900$  Гс. Для уменьшения пульсаций пучка в пролетном канале подбирались требуемая намагниченность отдельных магнитов. При расчетах формирования и транспортировки электронного потока учитывалось влияние разброса поперечных скоростей электронов в потоке [1].

Экспериментальное исследование изготовленных макетов ЛБВ (табл. 1) показало увеличение тока пучка на 33% по сравнению с расчетом, что, в свою очередь привело к уменьшению токопрохождения на 25% (расчетное токопрохождение Ц 100%).

Таблица 1

Образец $\epsilon$	Ускоряющее напряжение, В	Ток пучка, мА	Токопрохождение, %
1	8500	67,5	78
2	8500	65,3	81
3	8500	69,2	75

Была произведена проверка предположения, что увеличение тока эмиссии может быть обусловлено процессом миграции активного вещества (Ва) с поверхности катода на торцевую поверхность бокового экрана (Мо)[2]. При расчетах электронных пушек с большими диаметрами катодов этот процесс вносит незначительную погрешность. В данном случае площадь поверхности экрана составила 56% от площади эмитирующей поверхности катода и это должно быть учтено в расчете ЭОС. Расчеты, моделирующие эту ситуацию для катода диаметром 0,9 мм без бокового экрана и неизменной конструкции пушки и МПФС, показали токопрохождение 85% при токе пучка 63 мА, что подтвердило сделанное выше предположение. На изготовленных после расчетной корректировки ЭОС двух макетах ЛБВ были получены экспериментальные результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Образец $\epsilon$	Ускоряющее напряжение, В	Ток пучка, мА	Токопрохождение, %
1	8500	55,2	95
2	8500	53,8	97

1. Морев С.П., Пензяков В.В. Проектирование аксиально-симметричных ЭОС с учетом поперечных скоростей/IX Зимняя школа-семинар по СВЧ электронике. Саратов, 1993.- С.140-152.
2. Г.А. Кудинцева Термоэлектронные катоды. Издательство "Энергия"М.1966г.

## Разработка замедляющей системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона

Иванов А.А.

ОАО "НПП "Салют", Нижний Новгород

В данной работе представлена замедляющая система (ЗС) для ЛБВ W-диапазона с рабочим напряжением не более 10 кВ и повышенным значением сопротивления связи.

Обычные проблемы изготовления ЛБВ, связанные с токопрохождением, теплоотводом, согласованием замедляющей системы в W-диапазоне проявляются особенно остро и обусловлены малыми размерами СВЧ узлов прибора. Цельнометаллические медные ЗС обладают повышенной теплостойкостью. Установлено ([1-3]), что наиболее полно предъявляемым требованиям отвечает ЗС типа "петляющий волновод" (ПВ), изображенная на рис. 1.

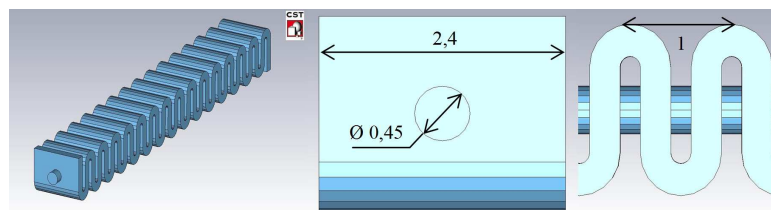


Рис. 1: Замедляющая система типа "петляющий волновод". Размеры указаны в миллиметрах.

Данная система обладает замедлением основной +1-й гармоники  $n=(5,5 - 6)$ , соответствующим рабочему напряжению 8 - 10 кВ.

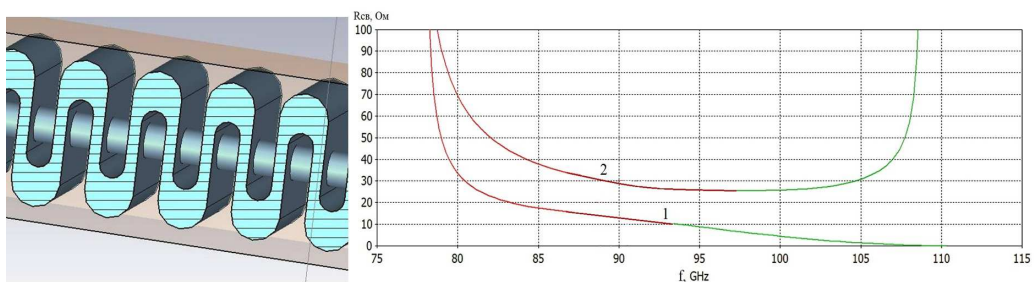


Рис. 2: Модифицированная ЗС ПВ и сопротивление связи рабочей +1-й гармоники. 1-ПВ регулярного сечения, 2-модифицированный ПВ.



Предварительные расчеты показали, что +1-я гармоника данной ЗС обладает невысоким значением сопротивления связи (5-15 Ом). Поэтому была изменена структура "петляющего волновода" (рис. 2), благодаря чему удалось поднять значение сопротивления связи до 25-40 Ом и снизить его неравномерность в широкой полосе частот.

Из рис. 2. видно, что данная конструкция представляет собой волновод с переменным поперечным сечением. Зауженные области расположены вблизи пролетного канала, что позволяет электронному пучку эффективнее взаимодействовать с полем бегущей волны. Использование данной модифицированной ЗС ПВ позволит увеличить электронный КПД и выходную мощность ЛБВ W-диапазона.

1. Ю.Л. Кацман, Приборы СВЧ, М. 1983г.
2. Р.А. Силин, Периодические волноводы. Издательство ФАЗИС, М. 2002г.
3. Ю.Г. Альтшулер, А.С. Татаренко, Лампы малой мощности с обратной волной, изд. кСоветское радио, М. 1963г.

## **Об одной возможности ввода магнитного поля на катод ЭОС с высокой компрессией интенсивного электронного потока**

**Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С. П.**

*Федеральное государственное унитарное предприятие "НПП Торий г. Москва*

В докладе рассмотрены электронно-оптические системы (ЭОС), формирующие интенсивные электронные потоки с высокой компрессией пучка по площади, предназначенные для мощных приборов миллиметрового диапазона. При проектировании подобных ЭОС зачастую возникают трудности в обеспечении согласования сформированного электронной пушкой электронного потока с профилем осевой компоненты индукции магнитного поля магнитной фокусирующей системы. Эти трудности могут существенно нарастать при необходимости использования многолучевых ЭОС. Приведен анализ возможностей обеспечения согласования электронных потоков с однородным магнитным полем в области пролетного канала. В качестве примеров рассмотрены ЭОС, предназначенные для мощных одно- и многолучевых приборов сантиметровой и миллиметровой части СВЧ диапазона, в том числе и с планарным расположением осей парциальных аксиально-симметричных потоков. Показана возможность применения реверса магнитного поля в области электронной пушки, которая обеспечивает уменьшение амплитуды пульсаций или поперечное смещение электронного потока относительно оси пролетного канала.

## Широкополосная система передачи информации на основе генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки

<sup>1,2</sup>Кульминский Д.Д., <sup>1,2</sup>Караваяев А.С., <sup>1</sup>Проخورов М.Д., <sup>1,2</sup>Пономаренко В.И.

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН, Саратов

<sup>2</sup>Саратовский государственный университет, Саратов

Нами разработана и экспериментально реализована система скрытой передачи информации, основанная на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов и имеющая аналоговый канал связи. Система передачи информации использует принцип хаотической синхронизации и основана на схеме с переключением хаотических режимов. Управляющий параметр, в качестве которого используется время запаздывания передающего генератора, подвергается модуляции бинарным информационным сигналом. Все элементы передатчика и приемника предложенной системы связи реализованы в цифровом виде на базе программируемого микроконтроллера. Использование цифровых элементов обеспечивает идентичность параметров приемника и передатчика и повышает качество выделения информационного сигнала на выходе приемника. Предложенная схема позволяет существенно улучшить устойчивость системы передачи информации к шумам и затуханию сигнала в канале связи за счет введения дополнительных элементов (детекторов и компаратора) в приемник и дополнительной обработки сигнала.

Для исследования устойчивости к шумам и амплитудным искажениям сигнала в канале связи мы разработали специализированную электронную схему, позволяющую добавлять в канал связи шум заданной интенсивности, формируемый генератором шума. Построены экспериментальные зависимости вероятности ошибки на бит при передаче бинарного информационного сигнала от отношения сигнал/шум, от величины амплитудных искажений сигнала в канале связи и от длины временного интервала, в течение которого передается каждый бит. Определены предельно допустимые отношения сигнал/шум, при которых исследуемая система связи остается работоспособной. Определены допустимые значения амплитудных искажений сигнала в канале связи, ниже которых информационный сигнал на выходе приемника выделяется без ошибок. Полученные результаты свидетельствуют, что разработанная нами экспериментальная система передачи информации обеспечивает более высокую устойчивость к шуму в канале связи и к изменению амплитуды несущего сигнала, чем другие системы передачи информации, основанные на полной хаотической синхронизации.

Показано, что скорость передачи информации в предложенной системе связи может быть увеличена при уменьшении характерных временных масштабов системы или при уменьшении временного интервала, в течение которого передается каждый бит.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №14-12-00324.*

## Мощные СВЧ генераторы широкополосных и сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов

Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А., Скороходов В.Н.

*СарГУ, Саратов*

В работе приведены описания СВЧ электронных автогенераторов с задерживающей обратной связью широкополосных и сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов, основанных на эффекте полного подавления хаотического сигнала радиоимпульсом с гармонической несущей при внешней модуляции.

Широкополосный генератор хаотических радиоимпульсов реализован в виде клистронного каскадного автогенератора с параллельно включенными парциальными клистрономми, с единой цепью обратной связи. Для существенного расширения полосы частот хаотических колебаний резонансные частоты промежуточных резонаторов подбираются так, чтобы частотные диапазоны парциальных многорезонаторных клистронов перекрывались. В применяемых клистронах использовались двухзачорные объемные резонаторы, работающие на противофазном типе колебаний. Резонансные частоты резонаторов изменялись за счет механической подстройки, а контроль этих частот проводился с помощью анализатора СВЧ цепей Agilent при малом токе электронного пучка клистрона. Наряду с расширением полосы частот уделялось внимание повышению уровня высокочастотной мощности хаотического сигнала за счет увеличения электронного тока в клистронах и выбора ускоряющих напряжений. Созданный клистронный автогенератор характеризуется полосой частот 100 МГц и уровнем мощности 10 Вт, при ускоряющем напряжении 1500-2500 В и токах пучка 50-70 мА. При внешней модуляции была получена последовательность хаотических радиоимпульсов длительностью 0,5-5 мкс с регулируемой скважностью.

Сверхширокополосный генератор хаотических колебаний создан на промышленной ЛБВ среднего уровня мощности в диапазоне частот 1-8 ГГц, перспективном для сверхширокополосных средств связи. Управляющими параметрами такого автогенератора являются ускоряющее напряжение электронного потока (2-3 кВ), ток пучка (до 100 мА), затухание в цепи обратной связи (0-80 дБ). Изменение этих параметров позволяет просто реализовать разнообразные регулярные и хаотические режимы генерации. В указанном диапазоне мощность хаотических колебаний составила 2 Вт.

Отметим, что эффект подавления сверхширокополосных хаотических сигналов, необходимый для реализации последовательности хаотических импульсов, ранее не изучался. В проведенных экспериментах для получения радиоимпульсов подобранная частота внешнего гармонического сигнала составляла 2,94 ГГц при мощности воздействия 200 мВт. Длительность хаотических радиоимпульсов изменялась в пределах 0,5-15 мкс.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 14-02-00329) и Программа по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (НШ-828.2014.2).

## Теоретическое исследование релаксационного механизма ограничения нелинейного сдвига частоты колебаний

<sup>1</sup>Сафин А.Р., <sup>2</sup>Устинов А.Б.

<sup>1</sup>НИУ “МЭИ”, Москва; <sup>2</sup>СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург

Резонаторы на основе ферромагнитных пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) находят на сегодняшнее время различные применения в микроволновой электронике [1]. Известно [2], что увеличение мощности входного СВЧ-сигнала, подаваемого на вход ЖИГ-резонатора, приводит к возрастанию амплитуды колебаний намагниченности и, как следствие, к возрастанию нелинейного сдвига частоты колебаний, что в ряде случаев является нежелательным. Вместе с тем, возрастание входной мощности, приводит и к возрастанию нелинейных положительных потерь, которые могут ограничивать негативное влияние нелинейного сдвига частоты. Количественному теоретическому исследованию возможности такого ограничения и соответствующему математическому моделированию посвящена данная работа.

В качестве математической модели ЖИГ-резонатора под внешним воздействием примем простейшую модель [1,2] для комплексной амплитуды спиновой волны  $u(t)$  в следующем виде:

$$\frac{du}{dt} + i(\omega_0 + N|u|^2)u + \omega_{r0}(1 + \nu_1|u|^2 + \nu_2|u|^4)u = A(P_{inc})e^{-i\omega_{ex}t}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  - резонансная частота пленки,  $N$  - нелинейный сдвиг частоты колебаний,  $\omega_{r0}$  - частота релаксации при нулевой амплитуде,  $\nu_{1,2}$  - параметры, характеризующие нелинейное затухание пленки,  $A(P_{inc})$  - параметр внешнего воздействия, зависящий от подводимой СВЧ-мощности  $P_{inc}$ ,  $\omega_{ex}$  - частота внешнего воздействия.

От уравнения (1) путем применения метода медленно меняющихся амплитуд были получены уравнения для амплитуды  $U(t)$  и фазы  $\phi(t)$  спиновой волны. Далее были найдены стационарные режимы системы и проанализирована их устойчивость при варьировании основных физических параметров ( $N, \nu_{1,2}, P_{inc}$ ). В результате исследования показано, что наличие нелинейного затухания (параметры  $\nu_{1,2}$ ) при достаточно больших мощностях  $P_{inc}$  существенно ограничивает влияние нелинейного сдвига частоты колебаний, что приводит с одной стороны к уменьшению сдвига резонансной частоты, а с другой к уменьшению ширины резонансной кривой (уменьшению добротности), что подтверждается проведенными ранее экспериментами [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №14-32-50277.

1. Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Радиотехника, Москва, 2013.
2. Дроздовский А.В., Устинов А.Б. *Письма в ЖТФ* **36,18** (2010) с.10-18.

## Квантовый диссипативный осциллятор с пространственно-временным потенциалом четвертой степени

Санин А.Л.<sup>1</sup>, Смирновский А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ, <sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург

Переход к квантовому режиму движения для наномеханических систем при низких температурах и реализация квантовых волновых закономерностей в разработках сверхвысокочастотных приборов является фундаментальной проблемой, которой уделяется существенное внимание. Особый интерес для обобщения в квантовую область представляют классические нелинейные осцилляторы, как консервативные, так и диссипативные. С другой стороны, наряду с возможными приложениями, существует интригующая проблема квантовой самоорганизации. В настоящем докладе, с позиций уравнения Шредингера-Ланжевена-Костина обсуждается динамика квантового осциллятора с классическим пространственно-временным потенциалом, который состоит из двух слагаемых четвертой степени, причём одно из них зависит от времени. Вынужденная классическая сила представляет произведение временного гармонического множителя на пространственный, зависящий от куба расстояния. В частном случае, когда вынужденная сила не зависит от расстояния, ангармонический осциллятор подробно рассматривался нами в статье [1]. Для более сложной зависимости силы от времени и расстояния возможны два режима колебаний: в первом, средняя координата волнового пакета, т.е. центр и его скорость равны нулю в процессе временной эволюции системы; во-втором, при одиночном импульсном возбуждении временная эволюция волнового пакета происходит с изменением средних значений координаты и скорости. Это согласуется с характером симметрии и теоремой Эренфеста.

Для первого режима колебаний подробно исследованы карта плотности вероятности, реализации средне-квадратичных значений координаты и скорости как функции времени. Во втором режиме при импульсном возбуждении основного состояния проведено численное моделирование временных реализаций для средней координаты и анализ частотных спектров, а также произведений неопределённости как функций времени. Если диссипация отсутствует, а частота перехода из основного состояния в первое возбуждённое в четыре раза выше частоты внешнего воздействия, то при малой амплитуде импульса возбуждения временная реализация средней координаты будет простой. Частотный спектр еч состоит из основной частоты перехода и комбинационных частот. При увеличении амплитуды возбуждения или внешнего воздействия реализации и спектры усложняются. При введении диссипации характер поведения сходен с классическим аналогом осциллятора. Средняя координата квантового осциллятора стремится к нулю, а произведение стандартных отклонений уменьшается и продолжает осциллировать с некоторой амплитудой, минимальное значение произведения выше некоторой величины.

1. Санин А.Л., Смирновский А.А. *Изв вузов. ПНД* **22**, N2, 2014, с.103-115

## Влияние параметров контакта коллектора на характеристики высокочастотной генерации в полупроводниковой сверхрешетке

Максименко В.А., Макаров В.В., Короновский А.А., Храмов А.Е., Баланов А.Г.

СГУ им. Н.Г. Чернышевского, СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов

Разработка компактных устройств для генерации, усиления и детектирования ТГц излучения является актуальной задачей современной радиофизики и электроники [1]. В контексте ее решения, исследование полупроводниковых периодических наноструктур (сверхрешеток) представляет большой интерес [2].

Известно, что в подобных структурах рассеяние носителей заряда и блоховские колебания обуславливают наличие участка отрицательной дифференциальной проводимости, который в свою очередь, приводит в ряде случаев к возникновению пространственно-временной неустойчивости [3]. В результате развития неустойчивости в полупроводниковой структуре образуются области повышенной концентрации носителей заряда (домены), дрейфующие от эмиттера к коллектору структуры и обуславливающие колебания тока, текущего через нее. Согласно результатам экспериментальных и теоретических работ скорость движения доменов и их амплитуда (и, соответственно, частота и мощность колебаний тока) могут быть увеличены при помощи внешних электрических и магнитных полей. Кроме того, в результате исследований была показана возможность управления типом колебательного режима при помощи параметров внешнего воздействия [4].

Однако, в реальных устройствах СВЧ электроники влияние внешних факторов, обусловленных взаимодействием исследуемой системы с внешними электродинамическими структурами и контактами, остается слабо изученным. В особенности, это касается влияния параметров коллекторного контакта. В большинстве работ коллектор полупроводниковой сверхрешетки учитывается в рамках приближенной модели [5], не учитывающей его распределенную структуру. В тоже самое время, в режиме нестационарной динамики, процессы перехода домена, образовавшегося в полупроводнике, в область коллектора могут оказывать существенное влияние на характеристики генерации.

В настоящей работе проведено исследование особенностей транспорта заряда в полупроводниковой сверхрешетке с протяженными омическими контактами эмиттера и коллектора. Для описания пространственно-временной динамики заряда в исследуемой структуре используется модель, основанная на принципах полуклассического подхода и теории Друде. Показана возможность увеличения мощности колебаний тока при использовании оптимальных параметров коллекторного контакта.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение №14-12-00222)

1. Kashiwagi T., et al. *Appl. Phys. Lett.* 104 (2014) 082603
2. Lu Q. Y., et al. *Appl. Phys. Lett.* 104 (2014) 221105
3. Butiker M. and Thomas H. *Phys. Rev. Lett.* 38 (1977) 275 78
4. Koronovskii A. A., et al. *Phys. Rev. B.* 88 (2013) 278 165304
5. Wacker A. *Phys. Rep.* 357 (2002) 1

## Исследование механизмов перехода к хаотической генерации в полупроводниковой наноструктуре, помещенной во внешнюю резонансную систему

Макаров В.В., Максименко В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Баланов А.Г.

СГУ им. Н.Г. Чернышевского, СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов

Исследование возможности реализации сложных режимов колебаний тока в полупроводниковых наноструктурах является актуальной задачей, важность которой обусловлена перспективой применения таких устройств в системах локации и связи [1,2].

В настоящее время одними из наиболее перспективных полупроводниковых устройств являются периодические наноразмерные структуры (сверхрешетки) [3], в которых транспорт заряда сопровождается многочисленными нелинейными эффектами [4,5]. Наиболее важным из них, с точки зрения практического использования подобной структуры, является наличие участка отрицательной дифференциальной проводимости, являющегося причиной развития неустойчивости и возникновения колебаний тока, текущего через нее [6].

Исследования режимов колебаний тока в полупроводниковых сверхрешетках показали возможность увеличения частоты генерации до нескольких сотен гигагерц [7]. Кроме того, было показано, что влияние внешних факторов, таких, как внешнее магнитное поле и периодическая модуляция приложенного напряжения, в ряде случаев приводят к усложнению режимов колебаний тока [2]. В частности, в экспериментальной работе [8] нами была продемонстрирована возможность генерации хаотических колебаний тока в полупроводниковой сверхрешетке, помещенной во внешний колебательный контур.

Исследование закономерностей, лежащих в основе перехода от периодической динамики к хаотическим колебаниям представляет большой интерес для систем скрытой передачи информации и супербыстрых генераторов случайных чисел.

В настоящей работе исследована динамика полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешнюю добротную резонансную систему. Показано, что при увеличении напряжения питания в исследуемой системе наблюдается переход от периодической динамики к хаотической. При этом, наблюдаемый переход происходит по сценарию перемежаемости типа I, что подтверждено зависимостью средней длительности ламинарных фаз от параметра надкритичности и видом отображения Пуанкаре.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение №14-12-00222)

1. Amann A., Schlesner J., Wacker A., and Scholl E. *Phys. Rev. B* 65 (2002) 193313
2. Koronovskii A. A., et al. *Phys. Rev. B*. 88 (2013) 278 165304
3. Esaki L. and Tsu R. *IBM J. Res. Develop.* 14 (1970) 61
4. Bonilla L.L., Grahn H.T. *Rep. Prog. Phys.* 68 (2005) 577.
5. Fromhold T. M., et al. *Nature* 428 (2004) 726
6. Butiker M. and Thomas H. *Phys. Rev. Lett.* 38 (1977) 275
7. Schomburg E. et al. *Appl. Phys. Lett.* 74 (1999) 2179.
8. Hramov A. E. et al. *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) 116603

## Трехмерное микромагнитное моделирование асимметричных вихревых доменных стенок с периодическими цепочками переходных областей

Байкенов Е.Ж.<sup>1</sup>, Изможеров И.М.<sup>1</sup>, Зверев В.В.<sup>1</sup>, Филиппов Б.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> УрФУ, <sup>2</sup> ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

Многие свойства материалов с магнитным упорядочением, важные с практической точки зрения (магнитные потери, гистерезис и др.) определяются наличием локально неоднородных структур и динамическим поведением этих структур. Обычное перемагничивание магнетика представляет собой процесс видоизменения формы доменов, сопровождающегося движением доменных стенок (ДС). Динамические характеристики стенок определяются, в свою очередь, наличием в них локализованных переходных областей (ПО), разделяющих сегменты стенок с различным типом пространственной ориентации.

Детальное изучение внутренней структуры и динамики ДС экспериментальными методами требует использования сложной уникальной аппаратуры [1]. С учетом этого значительное внимание уделяется развитию метода микромагнитного моделирования (в последние годы стало возможным трехмерное моделирование структуры и динамики ПО).

ПО, разделяющие сегменты доменных стенок, являются разновидностями топологических солитонов, для которых характерны частицеподобное поведение, стабильность внутренней структуры, слабость взаимодействия с другими подобными объектами. В докладе представлены результаты изучения взаимодействия ПО в асимметричных вихревых ДС, возникающих в тонких пленках из пермаллоя. Для каждого из типов ПО А, В и С, найденных в [2], производилась минимизация энергии структуры, содержащей пару одинаковых ПО, с наложением на образец кольцевых граничных условий (такая структура может рассматриваться как бесконечная цепочка ПО). Найденны значения энергий как функции от расстояний между ПО. Полученные результаты позволили установить, при каких значениях расстояний ПО начинают взаимодействовать. Рассмотрено влияние внешнего постоянного магнитного поля.

При расчетах использовался пакет микромагнитного моделирования OOMMF [3].

1. Schafer R., Ho W.K. et al, *IEEE Trans. Magn.* **27** (1991) 3678
2. Zverev V.V., Filippov B.N. *JETP* **117** (2013) 108
3. Donahue M.J., Porter D.G.. OOMMF User's Guide, Version 1.0 (NISTR, Gaithersburg, 1999)



## Генерация и распространение коротких спиновых волн в нерегулярных ферритовых волноводах

Бегинин Е.Н., Садовников А.В., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е.

СарГУ, Саратов

В настоящее время интенсивно проводятся исследования направленные на поиск новых типов носителей и материальных сред для передачи и обработки информационных сигналов СВЧ-диапазона радиоволн. Одно из перспективных направлений связано с исследованием динамики спиновых волн, как носителей информационных сигналов, в магнитоупорядоченных средах и структурах на их основе (тонкие ферромагнитные пленки, волноводы) [1]. Наличие нерегулярных участков в таких структурах, например, областей с вариацией геометрии структур (толщины или ширины волновода) или статических магнитных полей, позволяет существенно расширить функциональные возможности по обработке сигналов [2]. Особый интерес к такого рода структурам связан с современной тенденцией по их масштабированию из области макроскопических пространственных масштабов с характерными миллиметровыми латеральными размерами в область субмикро- и нанопространственных масштабов [3]. В работе экспериментально и теоретически исследуется волноведущая структура на основе пленки железо-иттриевого граната шириной 353 мкм с периодической модуляцией ширины (период модуляции 120 мкм, глубина модуляции 60 мкм). В структуре микрополосковой антенной возбуждалась поверхностная магнитостатическая волна (ПМСВ) с волновыми числами порядка  $100 \text{ см}^{-1}$ . Обнаружено, что распространение ПМСВ сопровождается генерацией коротких спиновых волн, локализованных в областях периодических границ. Методом бриллюэновской спектроскопии проведено исследование динамики, дисперсионных характеристик и пространственного распределения интенсивности спиновых волн. Показано, что распространение спиновых волн происходит в волноводном канале шириной порядка 10 мкм, с групповыми скоростями порядка 0.1 мкм/нс (что в 500 раз меньше скорости ПМСВ) и волновыми числами порядка  $104 \text{ см}^{-1}$ . Решение магнитостатической задачи о распределении внутреннего магнитного поля в структуре показало, что на периодических границах волновода распределение поля имеет вид "седла". Градиент магнитного поля вдоль направления распространения спиновых волн обеспечивает их эффективную генерацию полями распространяющихся ПМСВ [4], а поперечное распределение поля (типа "вал") обеспечивает волноводное распространение объемных спиновых волн [5]. Данный тип волн может быть использован для создания распределенных систем параллельной обработки информационных сигналов во временной и частотной областях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №12-07-31009, 14-02-00577) и стипендии Президента РФ (СП-1551.2013.5).

1. Lenk B. et al. *Physics Reports* **507** (2011) 107-136
2. Chumak A. V. et al. *Journal of Applied Physics* **105** (2009) 083906
3. Neusser S. et al. *Applied Physics Letters* **93** (2008) 122501
4. Schlomann E., Joseph R.I. *Journal of Applied Physics* **35** (1964) 167.
5. Анненков А.Ю., Герус С.В., Ковалев С.И. *ЖТФ* **74** (2004) 1-7.

## Трансформация модового состава электромагнитных спиновых волн в структуре феррит-сегнетоэлектрик конечной ширины

Бубликов К.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

В последнее время большой интерес представляет исследование слоистых структур, свойствами которых можно управлять в заданном частотном диапазоне [1]. Слоистые феррит-сегнетоэлектрические структуры могут демонстрировать электронную перестройку за счет изменения приложенных внешних постоянных электрических и магнитных полей. Развитие технологий изготовления магнитных микроструктур [2] приводит к необходимости развития численных методик расчета характеристик распространения гибридных электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ). Миниатюризация волноведущих структур, выполненных на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ), приводит к возрастанию влияния конечной ширины структур на спектр собственных волн [3]. В данной работе приведены результаты исследования электродинамических характеристик слоистой структуры сегнетоэлектрик-феррит конечной ширины (рис. 1а). С помощью численного моделирования методом конечных элементов проведен расчет спектров собственных мод, распределений полей и дисперсионных характеристик ЭМСВ, распространяющихся в слоистой структуре. Показана возможность управления пространственным распределением ширинных мод и дисперсией ЭМСВ путем вариации внешнего электрического и магнитного поля. На рис. 1б приведен результат расчета смещения частоты ЭМСВ в слоистой структуре для различных значений внешнего магнитного поля. С помощью радиофизического эксперимента и методом Манделштам-Бриллюэновской спектроскопии [4,5] проведено экспериментальное исследование модового состава и эффектов гибридизации волн в слоистой структуре. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (13-07-12409, 14-02-00577).

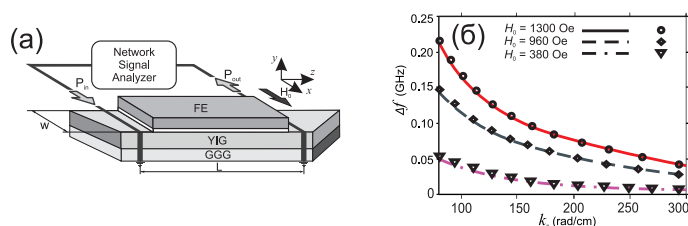


Рис. 1: Схема экспериментальной установки (а) и результат расчета смещения частоты при различных значениях внешнего магнитного поля (б)

1. Nikitin A.A., Ustinov A.B. et.al. *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 093513.
2. Krawczyk M., Grundler D. *J. Phys.: Condens. Matter.* **26** (2014) 123202.
3. O'Keeffe T.W., R.W.Patterson *J. Appl. Phys.* **67** (1978) 4868.
4. Demokritov S.O., Hillebrands B., Slavin A.N. *Phys. Rep.* **348** (2001) Pp. 441-489.
5. Sheshukova S., Beginin E., Sadovnikov A., Sharaevsky Yu.P., Nikitov S. // *IEEE Magnetics Letters* **5** (2014) Pp. 1-4.

## Автогенерация солитонов огибающей и динамического хаоса электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидных осцилляторах

Устинов А.Б., Никитин А.А., Кондрашов А.В., Черкасский М.А., Калиникос Б.А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

На протяжении многих лет исследование различных нелинейных волновых явлений, например, таких, как солитоны огибающей и модуляционная неустойчивость, привлекает большое внимание ученых [1,2]. Солитоны были обнаружены и изучались для волн различной природы. К последним достижениям можно отнести наблюдение автогенерации солитонов в магнитных кристаллах [3] и метаматериалах, изготовленных на основе искусственных линий передачи с отрицательной дисперсией [4].

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию солитонов огибающей и хаоса, формирующихся в процессе автогенерации электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ) в активном кольцевом осцилляторе на основе искусственного мультиферроика. Планарная мультиферроидная структура являлась нелинейной дисперсионной средой. Она состояла из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) и пластины титаната бария-стронция (БСТ). Две микрополосковые антенны использовались для возбуждения и приема волн. Приемная антенна была соединена с возбуждающей антенной цепью обратной связи, состоявшей из широкополосного СВЧ-усилителя и переменного аттенюатора, контролирующего полный коэффициент усиления  $G$  в кольце.

В отличие от активного кольцевого резонатора на основе магнитной пленки [3], мультиферроидный осциллятор обладает свойством двойного управления колебаниями в системе [5]. Это происходит благодаря зависимости групповой скорости и волнового числа ЭСВ от диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости мультиферроидного волновода. Таким образом, собственные моды кольца изменяют свои частоты при изменении магнитного и электрического полей смещения. При этом частотное разделение между модами тоже изменяется.

Как и ожидалось для нелинейной диспергирующей среды с нелинейностью типа коталкивания, увеличение коэффициента усиления кольца вело сначала к образованию "темных" солитонов огибающей ЭСВ, а затем к развитию динамического хаоса. Приложение электрического поля позволяло контролировать свойства солитонов и хаотическую динамику осциллятора. Экспериментальные и теоретические исследования доказывают гибридно-волновую электромагнитно-спиновую природу солитонов и более детально будут представлены на конференции.

1. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973.
2. Zakharov V. E., Ostrovsky L. A. *Physika D* **238** (2009) 540.
3. Grishin S.V., Beginin E.N., Morozova M.A., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. *J. Appl. Phys.* **115** (2014) 053908.
4. Kozurev A.B., Shadrivov I.V., Kivshar Y.S. *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 084105.
5. Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А., Калиникос Б.А. *ЖТФ* **82** (2012) 98.

## Хаотическая динамика спин-волновых солитонов в ферромагнитных пленках

Устинов А.Б., Кондрашов А.А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

В последнее десятилетие наблюдается возрастание интереса к исследованию динамического хаоса и возможного его применения в системах телекоммуникации в качестве несущего сигнала [1]. Солитон как стационарное решение нелинейного уравнения Шредингера в течение долгого времени рассматривался как стабильное образование, поэтому солитоны и хаотические явления долгие годы рассматривали независимо. В последние годы появилась идея о возможности существования хаотической динамики солитонов огибающей. Впервые хаотическая динамика солитонов наблюдалась и была описана в оптике [2,3]. Что касается магнитных пленок, то в них хаотическая динамика солитонов огибающей спиновых волн наблюдалась совсем недавно. Хаотические солитоны формировались как при распространении бегущих волн [4], так и в режиме автогенерации [5,6].

Целью настоящей работы является анализ хаотической динамики солитонов, образующихся при непрерывном возбуждении дипольно-обменных спиновых волн в ферромагнитной пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ). В этом случае хаотическая динамика солитонов появляется за счет развития двух эффектов: собственной модуляционной неустойчивости и цепочки спин-волновых параметрических взаимодействий. В эксперименте использовалась пленка ЖИГ толщиной 3.1 мкм, имевшая закрепленные поверхностные спины. Для возбуждения и приема спиновых волн использовались микрополосковые антенны. В ходе измерений систематически изменялась частота и мощность возбуждаемой спиновой волны. Регистрировались спектры и осциллограммы формировавшегося сигнала. Обработка записанных осциллограмм выполнялась методом задержки. Фрактальная размерность и размерность вложения рассчитывались методом Грассбергера-Прокачиа. Ляпуновские показатели определялись с использованием программы TISEAN. Полученные результаты показывают, что хаотические свойства солитонов являются слабой функцией частоты. Работа поддержана грантами РФФИ, Президента РФ и Минобрнауки РФ (Госзадание).

1. Дмитриев А.С, Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. Bolton S.R., Acton M.R. *Phys. Rev. A* **62** (2000) 063803.
3. Akhmediev N., Soto-Crespo J.M., Town G. *Phys. Rev. E* **63** (2001) 056602.
4. Ustinov A.B., Demidov V.E., Kondrashov A.V., Kalinikos B.A., Demokritov S.O. *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 017201.
5. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П. *Письма в ЖЭТФ* **88** (2009) 743.
6. Wang Z., Hagerstrom A., Anderson J.Q., Tong W., Wu M., Carr L.D., Eykholt R., Kalinikos B.A. *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 114102.

## Особенности формирования временных диссипативных структур в неавтономной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой

Романенко Д.В., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Садовников А.В.

*СарГУ, Саратов*

Как было показано в работах [1-2], параметрические процессы первого порядка могут приводить к генерации в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки хаотической последовательности диссипативных структур в виде релаксационных колебаний. При этом управление динамикой автономной кольцевой системы возможно за счет внесения в систему дополнительных настраиваемых потерь, изменяющих коэффициент усиления кольца [1-2]. Динамикой неавтономной системы можно управлять изменяя амплитуду внешнего воздействия [3]. Однако применительно к кольцевым системам на основе ферромагнитных пленок такой механизм управления хаотической генерацией практически не исследован.

Известно, что в автономном случае в кольцевой системе на магнитостатических (МСВ) волнах может генерироваться узкополосный хаотический сигнал [1-2]. Внешний импульсный СВЧ сигнал приводит к модуляции коэффициента усиления кольца [4], выражающейся в периодическом прерывании генерации на временных интервалах, где присутствует внешнее воздействие, в то время как на временных интервалах, где внешнее воздействие отсутствует наблюдается генерация диссипативных структур. Причем средняя мощность генерируемой последовательности диссипативных структур может превышать среднюю мощность сигнала, генерируемого в автономном режиме. Последнее наблюдается за счет увеличения амплитуды сигнала в переходной области, где параметрические процессы первого порядка еще не успевают развиваться. При увеличении скважности внешних импульсов, длительность генерируемых структур уменьшается и при некотором значении периода внешнего воздействия можно добиться генерации периодической последовательности диссипативных солитоноподобных импульсов.

Пространственно-временное исследование динамики высокочастотной намагниченности проводилось с использованием метода Бриллюэновской спектроскопии [5]. Показано, что генерируемые пространственно-временные структуры на частоте МСВ будут стационарны вдоль направления распространения пленки и нестационарны поперек направления распространения. В то время как пространственно-временные структуры на частоте параметрических спиновых волн нестационарны в обоих направлениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-07-31142)

1. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. ЖТФ. 1999. Т. 69, №8. С. 100.
2. Sergey V. Grishin, Yurii P. Sharaevskii, Sergey A. Nikitov and Dmitrii V. Romanenko IEEE Transaction on magnetic. 2013. VOL. 49, №. 3. P 1047-1054.
3. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.:НАУКА, 1987.
4. A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2002.
5. S. O. Demokritov, B. Hillebrands, and A. N. Slavin, Phys. Rep., 348, 441-489 (2001).

## Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в мультиферроидных структурах

Матвеев О.В., Морозова М.А.

СарГУ, Саратов

Мультиферроики - вещества, одновременно обладающие ферромагнитным и сегнетоэлектрическим упорядочением. Характерное явление в композитных мультиферроиках, состоящих из сегнетоэлектрических (СЭ) и ферромагнитных слоев представляет собой гибридизация электромагнитных (ЭМВ) и магнитостатических (МСВ) волн. При больших значениях диэлектрической проницаемости СЭ, которая зависит от приложенного постоянного электрического поля, электромагнитные волны в СЭ оказываются сильно замедленными, в этом случае в структуре ферромагнитная пленка (ФП)-СЭ на частотах, близких к частоте фазового синхронизма между ЭМВ и МСВ, возникают гибридные электромагнитнооспиновые волны (ГЭМСВ). Первые работы в данном направлении были посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию двухслойных структур ФП-СЭ [1]. Интерес к таким структурам был возобновлен в последние годы [2] в связи с развитием технологий производства керамических сегнетоэлектриков.

В качестве ферромагнитного слоя в мультиферроидной структуре могут быть использованы магнитные кристаллы. Наличие пространственного периода приводит к возникновению в спектре МСВ, распространяющихся в таких структурах, запрещенных зон, характеристики которых (ширина, положение в спектре) зависят от внешнего магнитного поля. Теоретические и экспериментальные работы по исследованию структуры МК-СЭ были проведены в последние несколько лет [4,5], в которых показано существование запрещенных зон для ГЭМСВ, управляемых как магнитным, так и электрическим магнитным полем.

В работе построена модель для исследования дисперсионных характеристик ГЭМСВ в трехслойных структурах ФП-СЭ-ФП и МК-СЭ-МК. Показано, что такие структуры обладают возможностью двойного управления формой дисперсионных кривых посредством внешнего магнитного и электрического поля. Возможность электрического управления позволит уменьшить вес и габариты устройств функциональной обработки СВЧ-сигналов, поскольку не будет необходимости в использовании электромагнитов, а также быстродействие этих устройств. Помимо этого исследованы нелинейные свойства дисперсионных характеристик и влияние на спектр ГЭМСВ амплитуды входного сигнала. Учитывалась магнитная нелинейность в виде нелинейной зависимости магнитного момента от величины намагниченности, электрическая нелинейность представлялась в виде нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №13-07-12409-офи-м, №14-07-00273-а).

1. Анфиногенов В.Б. и др. *Письма в ЖТФ* **12** (8) (1986) 454.
2. Демидов В.Е., Калиникос Б.А., Эденхофер П. *ЖТФ* **72** (3) (2002) 61
3. Морозова М.А., Шараевский Ю. П., Никитов С. А. *Радиотехника и электроника* **59** (5) (2014) 510
4. Устинов А.Б., Калиникос Б.А. *Письма в ЖТФ* **40** (13) (2014) 58

## Магнитоакустический генератор с низким уровнем фазового шума

Тихонов В.В., Литвиненко А.Н.

Саратовский Государственный Университет, Саратов

Уровень фазового шума является одной из ключевых характеристик автогенераторов и синтезаторов частот. В работе [1] рассмотрены текущие решения и новые тренды в области построения синтезаторов частот. На данный момент активно разрабатываются синтезаторы частот на таких ГУН как ЖИГ-генераторы, генераторы на диэлектроческих резонаторах. ЖИГ-генераторы являются лидерами по диапазону перестройки, высокой частоте работы и низкому уровню фазового шума при больших отстройках от несущей. Однако они обладают сильной температурной зависимостью и высоким уровнем фазового шума при малых до 1-10кГц отстройках от несущей. Это вынуждает применять системы ФАПЧ, опорными генераторами для которых являются резонаторы на акустических волнах.

В данной работе предлагается использовать плоско-параллельную подложку ГГГ с выщеленными с двух сторон тонкими пленками ЖИГ в качестве гибридного магнитоакустического резонатора в схеме СВЧ-автогенератора. Эксперименты проводились с пленочными резонаторами МСВ квадратной формы, которые были изготовлены методом лазерного скрайбирования. Резонаторы имели размеры 1х1мм, толщина пленки ЖИГ составляла 3мкм, толщина структуры ЖИГ-ГГГ 371мкм, намагниченность насыщения пленки ЖИГ 1750Гс. Для возбуждения резонансов МСВ использовался микрополосковый преобразователь шириной 0.5мм. Пленки ЖИГ в данном резонаторе работают как селекторы акустических мод, которые преобразовывают и связывают за счет магнитострикции акустические и магнитные колебания. Подложка ГГГ является отличным материалом для распространения сдвиговых акустических волн, а благодаря высокому качеству плоскопараллельности значения добротности акустической части гибридного резонатора в эксперименте достигла значений  $10^4$ .

На основе измеренных S-параметров была составлена эквивалентная модель двухпортового резонатора на сосредоточенных элементах. С помощью данной модели была синтезирована схема кольцевого магнитоакустического СВЧ генератора. В качестве усилителя в кольцевой схеме была применена модель низкошумящего СВЧ усилителя MGA-13116 фирмы Avago. Был проведен временной и частотный анализ, посчитан уровень фазовых шумов. Фазовый шум магнитоакустического генератора составил -140дБц/Гц при отстройке 10кГц с несущей 800МГц. Генератор перестраивался в широкой полосе частот, работая на частотах акустических мод, которые шли с интервалом 4.8МГц.

Предложенный генератор обладает несколькими преимуществами. Благодаря хорошей термостабильности акустических резонансов в ГГГ, предложенный генератор не нуждается в применении системы ФАПЧ. Частота работы может быть увеличена до 5ГГц и выше. Уровень фазового шума в полосе отстроек 1кГц-10МГц ниже, а частота работы выше, чем у синтезаторов на ПАВ и кварцевых резонаторах. С помощью МСВ резонаторов можно селективировать акустические моды и перестраивать частоту с шагом 4.8МГц в широком гигагерцовом диапазоне частот.

1. Chenakin A. *Microwave Journal* (2007) p. 256-266.

## Автономные системы с квазипериодической динамикой: примеры и свойства (обзор)

Кузнецов А.П., Станкевич Н.В.

СФ ИРЭ РАН, Саратов,  
СарГТУ, Саратов

Традиционными примерами систем с квазипериодической динамикой являются неавтономные системы. Однако возможна и автономная квазипериодичность, которая наблюдается в генераторах квазипериодических колебаний. Одним из первых примеров такого поведения служит версия схемы Чуа [1]. Еще одним примером, для которого характерно возникновение инвариантного тора на основе цикла периода 2, является модификация системы Лоренца Ц Лоренц-84 [2, 3]. Анищенко с соавторами предложили четырехмерную систему в виде модифицированного генератора квазипериодических колебаний [4, 5]. Эта система демонстрирует также бифуркацию удвоения инвариантного тора. Наиболее детально обсуждается оригинальная модель квазипериодического генератора с трехмерным фазовым пространством на основе осциллятора с жестким возбуждением и ее модификации [6-8]. Представлены карты режимов и ляпуновские карты для автономной системы, обсуждается возможность hidden-аттракторов и сценарии разрушения торов. Рассмотрена картина возбуждения генератора внешним сигналом, в частности, обнаружена резонансная паутина Арнольда. Обсуждается устройство пространства параметров связанных квазипериодических генераторов. Представлены результаты экспериментов с квазипериодическим генератором.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№14-02-31064) и гранта государственной поддержки ведущих научных школ НШ-1726.2014.2

1. Мацумото Т. *ТИИЭР* **75** (1987) 66-87.
2. Lorenz E.N. *Tellus* **36A** (1984) 98Ц110.
3. Shil'nikov A., Nicolis G., Nicolis C. *Int. J. Bif. Chaos* **5** (1995) 1701-1711.
4. Anishchenko V.S., Nikolaev S.M., Kurths J. *Phys. Rev. E* **76** (2007) 046216.
5. Анищенко В.С., Николаев С.М. *Нелинейная динамика* **2** (2006) 267Ц278.
6. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Станкевич Н.В. *Изв. вузов. ПНД* **18** (2010) 51-61.
7. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Stankevich N.V. *Comm. Nonlin. Sci. Num. Sim.* **15** (2010) 1676Ц1681.
8. Stankevich N.V., Kurths J., Kuznetsov A.P. *Comm. Nonlin. Sci. Num. Sim.* **20** (2015) 316-323.



## Алфавитный указатель

- Davies C.S., 10
- Kruglyak V.V., 10
- Абубакиров Э.Б., 11
- Азов Г.А., 5
- Андреев А.В., 8
- Андреев В.Г., 5
- Антонец И.В., 6, 7
- Архипов А.В., 9
- Бадарин А.А., 8, 10
- Байкенов Е.Ж., 13
- Баланов А.Г., 8, 13
- Бегинин Е.Н., 8, 13
- Белов К.В., 9
- Бенедик А.И., 5
- Бубликов К.В., 13
- Бурцев А.А., 5
- Бушуев Н.А., 5
- Вдовин В.А., 5
- Власов В.С., 7
- Воробьев С.И., 10
- Галдецкий А.В., 4
- Гамюнов Ю.Г., 12
- Герасимов М.Ю., 10
- Гинзбург Н.С., 11
- Гиревой Р.А., 8
- Глуховская Е.Е., 7
- Глявин М.Ю., 9–11
- Голова Т.М., 8
- Голубев Е.А., 7
- Грачев А.А., 7
- Григорьев А.Д., 4, 6
- Григорьев Ю.А., 5
- Гришин С.В., 8, 10, 11, 13
- Гузнов Ю.М., 11
- Гурневич Е.А., 9
- Гуслякова О.И., 5
- Давидович М.В., 5
- Дармаев А.Н., 12
- Дворецкая Н.В., 9
- Денисов Г.Г., 10, 11
- Джалилов Б.О., 6
- Дмитриев А.С., 10
- Дмитриев Б.С., 12
- Дубовик М.Н., 7
- Евдокимов В.В., 4
- Егоров Е.Н., 9
- Емельянов В.В., 8
- Емельянов Р.Ю., 10
- Еремка В.Д., 4
- Ефремова М.В., 5
- Жарков Ю.Д., 12
- Завольский Н.А., 10, 11
- Задиранов Ю.М., 9
- Запевалов В.Е., 9–11
- Запевалов С.А., 11
- Зверев В.В., 7, 13
- Золотых Д.Н., 9
- Иванов А.А., 12
- Иванов А.П., 7
- Игангалиев А.Н., 8
- Изможеров И.М., 13
- Ильин А.Ю., 4
- Илькив И.В., 9
- Исаева О.Б., 8
- Калиникос Б.А., 13
- Калинин Ю.А., 12
- Калинин Ю.Е., 7
- Калякулина А.И., 7
- Канаков В.А., 5
- Караваев А.С., 12
- Каретникова Т.А., 5
- Кирпичева О.А., 7
- Колмакова Н.Г., 9
- Комаров Д.А., 6, 12
- Кондрашов А.В., 13
- Корниенко В.Н., 10
- Корнишин С.Ю., 9
- Короновский А.А., 8, 10, 13, 14
- Котов Л.Н., 7
- Краснова Г.М., 5

- Кудряшов А.Г., 12  
Кузнецов А.П., 6, 14  
Кузнецов С.П., 6  
Кульминский Д.Д., 12  
Куркин С.А., 8, 10, 14
- Левин Ю.И., 5  
Лещева К.А., 10  
Лисицын Е.А., 7  
Литвиненко А.Н., 9, 13  
Лукша О.И., 9
- Магда И.И., 14  
Макаров В.В., 13  
Максименко В.А., 13  
Мантуров А.О., 7  
Матвеев О.В., 13  
Мельникова М.М., 8  
Мещеряков В.В., 10  
Молчанов П.В., 9  
Морев С.П., 11, 12  
Морозкин М.В., 11  
Морозова М.А., 8, 11, 13  
Москаленко О.И., 8  
Мыльников В.М., 7  
Мясин Е.А., 4  
Мясников А.С., 5
- Накрап И.А., 12  
Нестеров Д.А., 12  
Никитин А.А., 13  
Никитов С.А., 9–11  
Новожилова Ю.В., 9  
Нусинович Г.С., 10
- Обычев М.А., 8  
Одинцов С.А., 7
- Панкратов А.Л., 5, 7  
Панкратова Е.В., 5, 7  
Патрушева Е.В., 12  
Петелин М.И., 6, 10  
Петрик А.Г., 9  
Планкин О.П., 11  
Пономаренко В.И., 12  
Прохоров М.Д., 12
- Роговин В.И., 9  
Рожнев А.Г., 5–8, 10
- Розенталь Р.М., 10, 11  
Романенко Д.В., 8, 11, 13  
Рыскин Н.М., 5–9
- Савин А.Н., 12  
Савин Д.В., 8  
Садовников А.В., 7–10, 13  
Садовников С.А., 12  
Самсонов Д.Б., 9  
Санин А.Л., 13  
Сафин А.Р., 12  
Седов А.С., 10, 11  
Сезонов В.Е., 9  
Селезнев Е.П., 8  
Сельский А.О., 8  
Семенов Е.С., 11  
Семенов С.Н., 10  
Сивяков Б.К., 12  
Синицын Н.И., 5  
Ситников А.В., 7  
Скороходов В.Н., 8, 12  
Смирновский А.А., 13  
Соболев Д.И., 10  
Соминский Г.Г., 9  
Станкевич Н.В., 14  
Стародубов А.В., 12  
Стародубова Е.Н., 7  
Степанова А.Н., 9  
Суровцев В.В., 8  
Сысоев И.В., 8
- Тарадаев Е.П., 9  
Титов А.В., 13  
Тихонов В.В., 9, 13  
Ткаченко Д.А., 8  
Торгашов Г.В., 5  
Трофимов П.А., 9  
Трубецков Д.И., 5, 6  
Тумарева Т.А., 9
- Усачева С.А., 7  
Устинов А.Б., 12, 13
- Филимонов Ю.А., 11  
Филиппов Б.Н., 7, 13  
Фокин А.П., 11  
Фокин А.С., 12  
Фролов Н.С., 10, 14

- 
- Хивинцев Ю.В., 11  
Холощев В.В. , 11  
Храмов А.Е., 8–10, 13, 14  
Хриткин С.А., 5
- Царев В.А., 12  
Цветков А.И., 11
- Черепенин В.А., 4, 10  
Черкасский М.А., 13  
Чуркин С.С. , 5
- Шавров В.Г., 6, 7  
Шалаев П.Д., 5  
Шампоров В.А., 5  
Шараевская А.Ю., 8  
Шараевский Ю.П., 8, 10, 11, 13  
Шевченко А.С., 11  
Шешукова С.Е., 7, 13  
Шихматова В.В., 7
- Щеглов В.И., 6, 7

Научное издание

XVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗИМНЯЯ ШКОЛА-СЕМИНАР  
ПО РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

**МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ**