

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

XV INTERNATIONAL WINTER SCHOOL ON MICROWAVE ELECTRONICS AND
RADIOPHYSICS



МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА

Организаторы:

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова РАН
ФГУП “НПП “Алмаз”
ФГУП “НПП “Контакт”

При финансовой поддержке:



Российский фонд фундаментальных исследований



Династия

Фонд некоммерческих программ “Династия”

ФГУП “НПП “Алмаз”
ФГУП “НПП “Контакт”

6 – 11 февраля 2012

С А Р А Т О В

УДК 517.9, 530.1

М34 Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, 6–11 февраля 2012 г. Саратов.

Редакционная коллегия:

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

Подготовка оригинал-макета:

О.И. Москаленко, 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;
- Ерёмка 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;
- Мулин В.В., генеральный директор ФГУП «НПП «Контакт», Саратов;
- 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;
- Сухоруков А.П., д.ф.-м.н., профессор, МГУ, Москва;
- Усанов Д.А., д.ф.-м.н., профессор, СГУ, Саратов;
- 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
XV МЕЖДУНАРОДНОЙ ЗИМНЕЙ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА
ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ
И РАДИОФИЗИКЕ

Саратов, 6 – 11 февраля 2012 года

От прошлого к будущему: история электроники СВЧ и радиофизики, современное состояние и перспективы развития в XXI веке.

6 февраля 2012 г., понедельник

- | | |
|---------------|--|
| 09:00 – 14:00 | Регистрация участников |
| 15:00 – 15:30 | Открытие школы-семинара |
| 15.40 – 17.30 | Трубецков Д.И. (СГУ, Саратов). Магнетрону 90 лет: созвездие магнетронных дат (2 лекции) |
| 17.40 – 18.30 | Гинзбург Н.С. (ИПФ РАН, Н. Новгород). Электроника СВЧ как искусство управления потоками энергии |

7 февраля 2012 г., вторник

08:00 – 09:00 **Завтрак**

Пленарное заседание. Общие вопросы вакуумной СВЧ электроники.

- | | | |
|---------------|---|-----------|
| 09:00 – 09:50 | Соминский Г.Г. , Сезонов В.Е., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П. (СПбГПУ, Санкт-Петербург). Разработка в СПбГПУ полевых эмиттеров для электронных устройств, работающих в техническом вакууме | 13 |
| 10:00 – 10:50 | Дармаев А.Н. , Комаров Д.А., Макеев А.Э., Морев С.П. (Торий, Москва). Проблемы обеспечения транспортировки интенсивных электронных потоков в пространственно-периодических магнитных полях вблизи их “зон непротекания” при продвижении в миллиметровый диапазон и пути их решения. | 14 |
| 11:00 – 11:50 | Комаров Д.А. , Морев С.П. (Торий, Москва). Проблемы усиления электромагнитных колебаний в диспергирующих средах вблизи границ полос пропускания для систем типа черенковских излучателей “активная среда – цепочка связанных резонаторов” и пути их решения (на примере многосекционных ЛБВ с замедляющими системами в виде цепочки связанных резонаторов) | 15 |

12:00 – 12:50 **Мясин Е.А.**, Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. (ФИРЭ РАН, Фрязино). Методы увеличения генерируемой мощности в оротронах терагерцового диапазона с двухрядной периодической структурой. 16 – 19

13:00 – 14:00 **Обед**

14:30 – 16:30 **Устные доклады.**

Секция 1а. Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики.

- 1 **Е.А. Мясин** (ФИРЭ РАН, Фрязино). Механизм генерации хаотических колебаний в автогенераторе на лавинно-пролётном диоде. 20
- 2 **А.В. Садовников**, А.Г. Рожнев (СГУ, Саратов). Генерация щелевых солитонов в наклонной брэгговской решетке. 21
- 3 **О.І. Moskalenko**, А.Е. Hramov, А.А. Koronovskii, V.A. Maximenko, K.N. Alexeev, A.G. Balanov (SSU, Saratov). Influence of titled magnetic field on synchronization of domains of charge in semiconductor superlattices. 22
- 4 **С.Н. Сытова** (НИИ ЯП БГУ, Минск). Различные модели нелинейной динамики пучков заряженных частиц в пространственно-периодических средах. 23
- 5 **С.А. Усачева** (СГУ, Саратов). Нелинейная динамика автоколебательной системы с запаздыванием при воздействии внешнего гармонического сигнала. 24
- 6 **Н.С. Фролов** (СГУ, Саратов). Влияние предварительной модуляции электронного потока на выходную мощность СВЧ генерации виркатора. 25
- 7 Т.И. Арсеньян, **Н.А. Сухарева**, А.П. Сухоруков (МГУ, Москва). Системный нелинейный время-частотный анализ нестационарных сигналов. 26
- 8 **А.О. Сельский**, А.А. Короновский, А.Г. Баланов, А.Е. Храмов (СГУ, Саратов). Нелинейная динамика электронных доменов в полупроводниковой сверхрешетке. 27

17:00 – 19:00 **Устные доклады.**

Секция 1б. Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики.

- 1 **М.В. Давидович**, П.А. Шиловский (СГУ, Саратов). Свойства металлических проволочных фотонных кристаллов. 28
- 2 Н.А. Бушуев, **М.В. Давидович** (СГУ, Саратов). Линейная электродинамическая модель спиральной ЛБВ в цилиндрическом резонаторе в приближении заданного линейного тока пучка. 28
- 3 **В.В. Макаров**, А.А. Короновский, С.А. Куркин, А.Е. Храмов, A.G. Balanov, K.N. Alekseev, M.B. Gaifullin, N. Alexeeva, and F.V. Kusmartsev, M.T. Greenaway, A. Patan'e, and T.M. Fromhold. (СГУ, Саратов; Loughborough University, Loughborough; University of Nottingham, Nottingham). Исследование возникновения хаотических режимов колебаний пространственного заряда в полупроводниковой сверхрешетке во внешнем резонаторе. 30

-
- | | | |
|---|---|----|
| 4 | R.A. Filatov , A.E. Hramov, A.A. Koronovskii (SSU, Saratov). Nonlinear dynamics and chaotic oscillations in the two-stream vircator. | 31 |
| 5 | S.A. Kurkin , I.I. Magda, O.G. Melezhik, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov (SSU, Saratov; KIPT, Kharkov). 3D Electromagnetic Simulation of Virtual Cathode Oscillator with Resonators and External Feedback. | 32 |
| 6 | А.В. Титов (СГУ, Саратов). Приближённая нелинейная теория двухлучевой лампы. | |
| 7 | Д.И. Данилов (СГУ, Саратов). Синхронизация спектральных компонент связанных диодов Пирса в области границы фазовой синхронизации. | 33 |
| 8 | А.Г. Баланов, А.А. Короновский, В.А. Максименко , О.И. Москаленко, А.Е. Храмов (СГУ, Саратов). Расчет спектра показателей Ляпунова и анализ динамических режимов в полупроводниковой сверхрешетке. | 34 |

8 февраля 2012 г., среда

08:00 – 09:00 **Завтрак**

Пленарное заседание: Мощные источники СВЧ излучения.

- | | | |
|---------------|--|----|
| 09:00 – 09:50 | Галдецкий А.В. (ФГУП “НПП Исток”, Москва). Клистрод - классический прибор и его новые возможности. | |
| 10:00 – 10:50 | Стрелков П.С. (ИОФ РАН, Москва). Плазменный релятивистский СВЧ усилитель. | 35 |
| 11:00 – 11:50 | Храмов А.Е. (СГУ, Саратов). Генераторы на виртуальном катоде: перспективные источники мощного электромагнитного излучения. | |
| 12:00 – 12:50 | Презентация радиоизмерительного оборудования компании Rohde&Schwarz “Оборудование и решения компании Rohde&Schwarz для измерительных задач в телекоммуникационных системах”. | |

13:00 – 14:00 **Обед**

Пленарное заседание: Источники микроволнового и ТГц излучения.

- | | | |
|---------------|---|----|
| 15:00 – 15:50 | Запевалов В.Е. (ИПФ РАН, Н. Новгород). Эволюция гиротронов. | 36 |
| 16:00 – 16:50 | Лукша О.И. , Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г. (СПбГТУ, Санкт-Петербург). Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов. | 37 |

17:30 – 19:00 Стендовые доклады.

- 1 **О.В. Астахов**, Д.А. Смирнов, Б.П. Безручко (СГУ, Саратов). Оценка параметра сигнала по временному ряду в присутствии нестационарного шумового воздействия. 38
- 2 **В.С. Власов**, Л.Н. Котов, В.Г. Шавров, В.И. Щеглов (СыктГУ, Сыктывкар). Несимметричное возбуждение прецессии намагниченности второго порядка в присутствии компенсирующего постоянного поля. 39
- 3 **И.В. Антонец**, Л.Н. Котов, В.Г. Шавров, В.И. Щеглов (СыктГУ, Сыктывкар). Алгоритм определения амплитуд внешних и внутренних волн при встречном падении волн на многослойную структуру. 40
- 4 **Е.Е. Глуховская**, А.О. Мантуров (СГТУ, Саратов). Моделирование сложной динамики нелинейного неавтономного контура с учётом влияния ловушек в полупроводниковом диоде. 41
- 5 **В.В. Емельянов**, Н.М. Рыскин (СГУ, Саратов). Стабилизация одночастотных режимов генерации в четырехрезонаторном пролетном клистроне-генераторе. 42
- 6 **В.И. Зубков**, В.И. Щеглов (ИРЭ РАН, Москва). Диаграмма направленности СВЧ излучения, возникающего при распространении магнитостатической волны в периодически неоднородном поле. 43
- 7 **А.С. Караваев**, В.И. Пономаренко, М.Д. Прохоров (СГУ, Саратов). Системы передачи скрытого сообщения на основе генераторов с запаздыванием. 44
- 8 **Т.А. Каретникова**, А.Г. Рожнёв (СГУ, Саратов). Трёхмерное моделирование электродинамических параметров неоднородной спиральной ЛБВ. 45
- 9 **Л.В. Лебедева** (ВГАВТ, Н. Новгород). От фазового цилиндра к фазовому тору. 46
- 10 **А.О. Мантуров**, Е.И. Лейман, Н.Ю. Хороводова (СГТУ, Саратов). Динамика магнетронного диода с автомодуляцией магнитного поля. 47
- 11 **А.О. Мантуров**, Т.В. Данилова (СГТУ, Саратов). Сложная динамика фототока во входных цепях малошумящих усилителей оптических сигналов. 48
- 12 **А.В. Пак**, М.Б. Белоненко, Н.Г. Лебедев (ВГУ, Волгоград). Взаимодействие светового импульса с углеродными наноструктурами. 49
- 13 **И.Л. Пластун**, А.Г. Мисюрин, А.А. Оруджев (СГТУ, Саратов). Анализ динамики протяжённых лазерных пучков, модулированных по частоте, в условиях проявления резонансных нелинейных интерференционных эффектов. 50
- 14 А.П. Кузнецов, **Ю.В. Седова**, Л.В. Тюрюкина (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Дискретные модели трех связанных автогенераторов. 51
- 15 Т.Е. Вадивасова, В.С. Маляев, **В.В. Семенов** (СГУ, Саратов). Экспериментальная оценка параметров динамических систем с изменяющимися параметрами. 51
- 16 А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Е.П. Селезнев, **Н.В. Станкевич** (СГТУ, Саратов). Экспериментальная реализация генератора квазипериодических колебаний; синхронизация связанных генераторов. 53
- 17 **С.А. Усачева**, Е.Н. Перегородова, Н.М. Рыскин (СГУ, Саратов). К теории синхронизации автомодуляционных колебаний внешним сигналом. 54

-
- 18 **А.Б. Устинов** (СПбГЭУ, Санкт-Петербург). Сверхвысокочастотные спин- 55
волновые линии задержки на основе пленок железо-иттриевого граната с
щелевыми антеннами.
- 19 **С.Е. Шешукова**, Е.Н. Бегинин, С.А. Никитов (СГУ, Саратов). Особенно- 56
сти распространения импульсных СВЧ-сигналов в одномерном магнетонном
кристалле.
- 20 В.И. Зубков, **В.И. Щеглов** (ИРЭ РАН, Москва). Отражение электромагнит- 57
ных волн от композиционной среды, содержащей анизотропные ферритовые
элементы.
- 21 С.В. Гришин, **Ю.В. Дулин**, С.А. Никитов, Ю.П. Шараевский (СГУ, Сара- 58
тов). Исследование прохождения двухчастотных сигналов в полосе бреггов-
ского резонанса одномерного магнетонного кристалла.
- 22 С.В. Гришин, Дмитриев Б.С., Ю.Д. Жарков, **Р.А. Манышев**, В.Н. Скоро- 59
ходов (СГУ, Саратов). Генерация хаотических СВЧ импульсов в кольцевом
автогенераторе на основе ЛБВ-усилителя мощности и нелинейной линии пе-
редачи с ферромагнитной пленкой под внешним воздействием.
- 23 А.Б. Данилов, **Е.М. Ильина**, А.Д. Рафалович (ФГУП “НПП “Алмаз”, Сара- 60
тов). Увеличение фазовой скорости волны в ЛБВ постепенным увеличением
зазора между ребрами экрана и спиралью снижает вторую гармонику.
- 24 **Е.Ю. Альтшулер**, Н.А. Бушуев, А.Д. Рафалович (СГТУ, Саратов). Сове- 61
ременные и перспективные тенденции разработки и выпуска широкополосных
ЛБВ.
- 25 **К.Н. Огурцов**, Т.Ю. Дунаева (СГТУ, Саратов). Использование СВЧ ди- 62
электрического нагрева для высокотемпературной обработки материалов.
- 26 **А.А. Васильев**, **С.С. Волощук** (СГУ, Саратов). Сравнительный анализ 63
различных моделей лампы обратной волны.
- 27 **А.А. Фунтов** (СГУ, Саратов). К линейной теории двухлучевой лампы. 64
- 28 С.А. Вяткина, Р.К. Бабичев, В.Н. Иванов (ЮФУ, Ростов-на-Дону). Дифрак- 63
ция магнитостатических волн на щели в структуре, содержащей касательно
намагниченную ферритовую пленку.
- 29 С.А. Вяткина, Р.К. Бабичев, В.Н. Иванов (ЮФУ, Ростов-на-Дону). Дифрак- 64
ция магнитостатических волн на щели в структуре, содержащей нормально
намагниченную ферритовую пленку.
- 30 **Тарасов Е.А.**^{1,2}, Сеницын Н.И.¹, Григорьев Ю.А.¹, Бурцев А.А.² (¹ СФИ- 66
РЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов; ² ФГУП “НПП “Алмаз”, Саратов).
Синтез углеродных нанотрубок на подложках из стеклоуглерода с приме-
нением жидких катализаторов.

9 февраля 2012 г., четверг

08:00 – 09:00 **Завтрак**

Пленарное заседание: Общие вопросы вакуумной СВЧ электроники

- 09:00 – 09:50 **Трубецков Д.И.**, Краснова Г.М. (СГУ, Саратов). Обзор состояния теории и экспериментальных исследований СВЧ приборов с управляемой эмиссией.
- 10:00 – 10:50 **Солнцев В.А.** (МИЭМ, Москва). Пространственный заряд в теории электронных приборов СВЧ (физические аспекты).
- 11:00 – 11:50 **Ерёмка В.Д.** (ИРЭ НАНУ, Харьков). Импульсные магнетроны терагерцевого интервала частот.

13:00 – 14:00 **Обед**

Пленарное заседание: Источники микроволнового и ТГц излучения.

- 15:00 – 15:50 **Короновский А.А.**, Баланов А.Г., Максименко В.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. (СГУ, Саратов). Влияние внешних факторов на динамику полупроводниковой сверхрешётки.
- 17:00 – 19:00 **Устные доклады.**
Секция 2. Теория и разработка классических вакуумных приборов СВЧ (клистроны, все типы ЛБВ, ЛОВ, приборы со скрещенными полями, клистроды)
-

- 1 Б.П. Ефимов, В.В. Завертанный, Л.А. Кириченко, С.А. Кишко, Т.В. Кудинова, **А.Н. Кулешов**, С.С. Пономаренко, А.Ф. Забродский, М.О. Хорунжий, Э.М. Хуторян (ИРЭ НАН, Харьков). Магнитная фокусирующая система интенсивных электронных пучков для клинотронов субмм диапазона. 69
- 2 М.В. Назарова, В.А. Солнцев, Р.П. Колтунов, **Д.С. Шабанов** (МГИЭМ, Москва). Исследование дискретного электронно-волнового взаимодействия в полосах пропускания и запираания замедляющих систем. 70
- 3 **А.И. Шульга** (МГИЭМ, Москва). Анализ подавления нелинейных искажений сигнала в ЛБВ методом “премодуляции” тока электронного пучка при учете фазоамплитудных характеристик. 71
- 4 **А.В. Галдецкий** (ФГУП “НПП Исток”, Москва). О сингулярностях в уравнениях движения частиц в цилиндрических координатах.
- 5 Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, **С.А. Садовников**, В.Н. Скороходов (СГУ, Саратов). Когерентный резонанс и синхронизация колебаний в каскадном клистронном автогенераторе на пороге самовозбуждения. 73
- 6 **В.П. Тараканов** (МФТИ, Москва). Новые модели в коде Карат и результаты.

17:00 – 19:00 Устные доклады.

**Секция 3. Релятивистская и плазменная электроника
больших мощностей**

- 1 **В.Н. Корниенко**, В.А. Черепенин (ИРЭ РАН, Москва). Динамика модового состава электромагнитного поля при развитии генерации в релятивистских черенковских приборах. 74
- 2 **В.Н. Корниенко**, В.В. Кулагин, В.А. Черепенин (ИРЭ РАН, Москва). Дифракционные эффекты, возникающие в процессе взаимодействия мощного импульса излучения с тонким плазменным слоем. 75
- 3 А.П. Веселов, В.Н. Корниенко, **А.П. Привезенцев** (ЧГУ, Челябинск). Широкополосный ансамбль циклотронных осцилляторов в поле короткого импульса. 76
- 4 **А.Э. Макеев**, Д.А. Комаров, С.П. Морев (Торий, Москва). Исследование влияния тормозящего ВЧ поля в зазоре резонатора на структуру сгруппированного электронного потока мощного СВЧ усилителя. 77
- 5 **А.Н. Дармаев**, С.П. Морев (Торий, Москва). Проблемы транспортировки мощных электронных потоков в трехмерных «реверсоподобных» магнитных полях и обеспечение требуемой структуры магнитного поля. 78
- 6 **Д.А. Комаров**, С.П. Морев, Ю.Н. Парамонов (Торий, Москва). Пассивные резонансные структуры для управления полосовыми характеристиками в мощных ЭВП СВЧ. 79
- 7 Н.К. Харчев, Г.М. Батанов, Ю.В. Бондарь, Л.В. Колик, Д.В. Малахов, А.Е. Петров, К.А. Сарксян, Н.Н. Скворцова, М.И. Петелин, **Ю.В. Новожилова**, А. Капша, Ж. Мартинез, А. Толкачев (ИПФ РАН, Н. Новгород). Влияние отражений от удаленной нагрузки на пространственную структуру излучения гиротрона. 80

10 февраля 2012 г., пятница

08:00 – 09:00 **Завтрак**

Пленарное заседание: Магнитоэлектроника

09:00 – 09:50 **Шараевский Ю.П.**, Никитов С.А., Бегинин Е.Н., Гришин С.В. 81
(СГУ, Саратов). Магنونные кристаллы в электронике сверхвысоких частот.

10:00 – 10:50 **Филимонов Ю.А.**, Хивинцев Ю.В., Никитов С.А., Павлов Е.С., Сахаров В.К., Высоцкий С.Л. (СФ ИРЭ РАН, Саратов). Спиновые волны в магنونных кристаллах. 82

11:00 – 11:50 **Устинов А.Б.** (СПбГЭУ, Санкт-Петербург). Нелинейные свойства спиновых волн в магنونных кристаллах. 83

12:00 – 12:50 **Тимошенко П.Е.**, Иванов В.Н., Бабичев Р.К., Шлома А.В. (ЮФУ, Ростов-на-Дону). Угловые диаграммы рассеяния поверхностных и прямых объемных магнитостатических волн углублением, расположенном на поверхности ферромагнитной пленки. 84
13:00 – 14:00 **Обед**16:00 – 19:00 **Устные доклады.**

Секция 4. Применения приборов СВЧ в телекоммуникационных системах, медицине, ускорительной технике, радарх, системах безопасности. Секция 5. Гиротроны, гиро-усилители. Секция 6. Магнитоэлектроника

- 1 Г.М. Батанов, **В.Д. Борзосек**ов, Л.В. Колик, Д.В. Малахов, А.Е. Петров, А.А. Пшеничников, К.А. Сарксян, Н.Н. Скворцова, Н.К. Харчев (ИОФ РАН, Москва). Исследование зависимости характеристик длинноволновых флуктуаций плотности плазмы в стеллараторе Л-2М от магнитной конфигурации и величины поперечного магнитного поля методом малоуглового рассеяния греющего гиротрона. 85
- 2 А.А. Вихарев, **Е.В. Иляков**, С.В. Кузиков, И.С. Кулагин (ИПФ РАН, Н. Новгород). Мультипактор в скрещенных полях в цилиндрическом резонаторе трехсантиметрового диапазона длин волн. 86
- 3 Г.М. Батанов, Л.В. Колик, **Е.М. Кончечков**, Д.В. Малахов, А.Е. Петров, К.А. Сарксян, Н.Н. Скворцова, Н.К. Харчев (ИОФ РАН, Москва). Модуляция излучения гиротрона при электронно-циклотронном нагреве плазмы стелларатора Л-2М. 87

-
- | | | |
|----|--|----|
| 4 | В.Н. Мануилов (ННГУ, Н. Новгород). Возможности численной двумерной модели адиабатической ловушки гиротрона. | 88 |
| 5 | Н.А. Завольский, В.Е. Запечалов, М.А. Моисеев, А.С. Седов (ИПФ РАН, Н. Новгород). Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН. | 90 |
| 6 | С.А. Вяткина, Н.П. Нистратов , Р.К. Бабищев, В.Н. Иванов (ЮФУ, Ростов-на-Дону). Экспериментальное исследование дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн. | 91 |
| 7 | С.В. Гришин , Ю.П. Шараевский (СГУ, Саратов). Генерация одиночных хаотических импульсов в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки под внешним шумовым воздействием. | 92 |
| 8 | Д.В. Романенко , Ю.П. Шараевский, С.В. Гришин (СГУ, Саратов). Генерация хаотических импульсов в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой в условиях трехволнового взаимодействия. | 93 |
| 9 | В.В. Тихонов , А.Н. Литвиненко (СГУ, Саратов). Миниатюрная система намагничивания и термостабилизации СВЧ ферритовых устройств. | 94 |
| 10 | Тарасов Е.А. ^{1,2} , Синицын Н.И. ¹ , Григорьев Ю.А. ¹ , Бурцев А.А. ² (¹ СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов; ² ФГУП "НПП "Алмаз", Саратов). Синтез углеродных нанотрубок на подложках из молибдена с применением тонкопленочных и жидких катализаторов. | 95 |

11 февраля 2012 г., суббота

08:00 – 09:00 **Завтрак**

Пленарное заседание: Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики

- | | | |
|---------------|--|----|
| 09:00 – 09:50 | Кузнецов С.П. (СГУ, Саратов). Генераторы гиперболического хаоса: схемотехническая реализация и моделирование в программной среде Multisim. | 96 |
| 10:00 – 10:50 | Калинин Ю.А. , Стародубов А.В. (НИИ ЕН СГУ, Саратов). Турбулентные электронные пучки - источники широкополосных шумоподобных СВЧ колебаний. | 97 |

13:00 – 14:00 **Обед**

14:30 – 15:30 **Заккрытие школы-семинара**

Разработка в СПбГПУ полевых эмиттеров для электронных устройств, работающих в техническом вакууме

Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П.

СПбГПУ, Санкт-Петербург

Использование полевых эмиттеров представляется привлекательным при построении широкого класса электронных устройств. Однако эмиттеры такого сорта до сих пор с успехом применяются лишь в условиях, когда можно свести к минимуму вредное влияние на их работу ионной бомбардировки. Как показали исследования авторов доклада, повышенной устойчивостью к газовой среде и к воздействию ионной бомбардировки в высоковольтных устройствах, работающих в техническом вакууме, обладают эмиттеры с защитными фуллереновыми покрытиями [1,2]. Использование защитных фуллереновых (как и любых других углеродных или содержащих углерод) покрытий затруднено в связи с тем, что они обладают большой работой выхода (около 5 эВ). Авторами была выявлена возможность активирования эмиттеров с фуллереновыми покрытиями потоком ионов калия. Показано, что обработка фуллеренового покрытия потоком медленных ионов калия с энергиями 40-100 эВ приводит к снижению его работы выхода из-за образования в покрытии устойчивых металлофуллеренов типа эндоэдралов и/или экзоэдралов. По сути дела, впервые была выявлена возможность использования ионной обработки для улучшения характеристик эмиттеров с фуллереновыми покрытиями. В данной работе приводятся новые данные, свидетельствующие о возможности использования обработки потоком ионов калия не только для снижения работы выхода эмиттеров с фуллереновыми покрытиями, но также для оптимизации структуры их поверхности. Кроме того, здесь сообщаются важные для практического использования фуллереновых покрытий сведения о закономерностях их работы при повышенных давлениях в условиях интенсивной ионной бомбардировки. Полученные данные о работе эмиттеров в техническом вакууме позволили выявить неизвестное ранее явление самовоспроизведения структуры активированных фуллереновых покрытий в условиях интенсивной ионной бомбардировки. Продемонстрирована возможность долговечной работы эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в условиях интенсивной ионной бомбардировки. Авторами исследована и другая возможность повышения устойчивости полевых эмиттеров к ионной бомбардировке.

Обычно для реализации работы полевых эмиттеров при умеренных напряжениях на их поверхности формируют структуры усиливающих электрическое поле выступов. Разрушение выступов под действием ионной бомбардировки ведет к падению автоэмиссии. В связи с этим большой практический интерес представляет выявленная нами возможность получения интенсивной полевой эмиссии под действием "полей пятен возникающих на наноразмерных контактах материалов с разной работой выхода. Использование больших по величине полей пятен позволяет в принципе обойтись при создании автоэмиттеров без каких-либо усиливающих поле структур. Впервые данные о возможности использования полей пятен для получения полевой эмиссии были получены нами при исследовании эмиссии композитных катодов из контрастных по работе выхода материалов [3]. К настоящему времени выполнены специальные модельные эксперименты и расчеты, подтверждающие перспективность использования полей пятен для создания долговечных в условиях интенсивной ионной бомбардировки полевых эмиттеров.

Данная работа была поддержана грантами РФФИ №№08-02-00332 и 11-02-00425, а также грантом Министерства образования и науки России №11.G34.31.0041.

1. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н. //ЖТФ. 2008. Т.78. №11. С.119-122.
2. Тумарева Т.А., Соминский Г.Г. //Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т.17. №3. С.17-54.
3. Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Саксеев Д.А., Тумарева Т.А. //ЖТФ. 2011. Т.81. №6. С.104-108.

Проблемы обеспечения транспортировки интенсивных электронных потоков в пространственно-периодических магнитных полях вблизи их “зон непропускания” при продвижении в миллиметровый диапазон и пути их решения.

Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Макеев А.Э., Морев С.П.

ФГУП “НПП Торий”, Москва

Проведен краткий обзор достигнутого уровня зарубежных разработок в области миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Рассмотрены вопросы, связанные с ограничениями в достижении высоких уровней выходной мощности в вакуумных СВЧ приборах О типа при продвижении в область миллиметровых длин волн.

Показано, что при заданном уровне магнитного поля наращивание тока пучка за счет увеличения плотности тока с катода электронной пушки приборов приводит к существенным ограничениям в величине выходной мощности при продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона.

Рассмотрены различные аспекты фокусировки электронных потоков в периодических магнитных полях, распределение которых существенно отличается от синусоидального распределения.

Представлено приближенное аналитическое решение задачи о распределении гармоник магнитного поля, формируемого магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) с произвольным количеством магнитомягких вставок в ячейке МПФС. Найдены зависимости, связывающие геометрические параметры МФС с требуемой структурой распределения магнитного поля в ячейке. Приведены выражения для продольной и радиальной составляющей индукции магнитного поля для уединенной ячейки реверсной МФС с пролетным каналом на оси МФС.

Представлены результаты экспериментальных исследований транспортировки электронного потока в реверсоподобных магнитных полях при параметрах магнитного поля на порядок превышающих критические значения для магнитных полей с синусоидальным распределением.

Проблемы усиления электромагнитных колебаний в диспергирующих средах вблизи границ полос пропускания для систем типа черенковских излучателей “активная среда - цепочка связанных резонаторов” и пути их решения (на примере многосекционных ЛБВ с ЗС в виде ЦСР).

Комаров Д.А., Морев С.П.

ФГУП “НПП Торий”, Москва

Несмотря на появление в последнее время работ, посвященных исследованию взаимодействия за полосой прозрачности замедляющей системы, проблема расширения полосы усиления не решена до последнего времени, что связано, видимо, с отсутствием ясного понимания физического механизма усиления электромагнитных колебаний за границами полосы прозрачности замедляющей системы и с недостаточным экспериментальным анализом данного явления. Это ограничивает, в свою очередь, развитие наиболее перспективного направления в разработке мощных СВЧ усилителей на основе ЛБВ с ЗС типа ЦСР, а именно, ламп с синхронизмом вблизи низкочастотной отсечки полосы прозрачности замедляющей системы, которые позволяют получать рекордные уровни выходной мощности, как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

В представленной лекции рассмотрен электродинамический анализ явлений за границей полосы пропускания, обоснована модель ЛБВ с взаимодействием за границей полосы пропускания замедляющей системы, основные положения которой проверены на экспериментальных образцах мощных ЛБВ.

Показано, что поведение КСВн вблизи полосы пропускания определяется нагруженной добротностью π -вида колебаний и крутизной дисперсионной характеристики. Выявлена возможность возникновения в многосекционных ЛБВ ЦСР эффекта “нулей усиления”, аналогичного эффекту “нулей усиления” в многорезонаторных клистронах, который не позволяет получать значительные полосы усиления при постоянном входном сигнале. Дано объяснение провала амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и способ его устранения в многосекционных ЛБВ с позиций теории взаимодействия электронного потока с полем распределенного резонатора. Предложен метод исследования процессов в системе “электронный поток - ЦСР” за границей полосы пропускания замедляющей системы, основанный на экспериментальном анализе комбинационных (интермодуляционных) составляющих. Представлены результаты экспериментальных исследований мощной четырехсекционной ЛБВ с рекордной 8%-ной шириной полосы усиления при постоянном входном сигнале и минимальном перепаде выходной мощности.

Оротрон с двухрядной периодической структурой терагерцового диапазона с широким электронным потоком. Часть 1.

Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.

ФИРЭ им. В.А Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская область

В настоящее время идёт интенсивное освоение терагерцового диапазона частот. Низкочастотная граница (н.ч.) этого диапазона начинается со 100 ГГц., а заканчивается он на частоте 3000 ГГц. Таким образом, в этот диапазон попадает коротковолновая часть миллиметрового диапазона волн (КВЧММДВ), начиная с 2 мм диапазона (100ГГц-150ГГц), и 1 мм диапазон (150ГГц- 300ГГц). Проблема увеличения генерируемой мощности в этих диапазонах волн является актуальной, и один из возможных путей её решения возможен в оротроне с двухрядной периодической структурой (ДПС) за счёт увеличения ширины плоского электронного потока, который будет рассмотрен в этом докладе.

В работе [1] теоретически было показано, что в оротроне с ДПС с полусферическим открытым резонатором (ОР) сантиметрового диапазона волн ширину электронного потока (2С) можно увеличивать до 2 радиусов каустики (r_k), не уменьшая эффективности электронно-волнового взаимодействия. Объясняется это тем, что в таком ОР распределение амплитуды ВЧ поля основного типа колебания $ТЕМ_{00q}$ является Гауссовым как вдоль, так и поперёк электронного потока. Но, так как в оротроне с ДПС в упомянутых ранее диапазонах, особенно в 1 мм диапазоне, приходится использовать длинные ДПС, использование полусферического ОР не всегда возможно. Поэтому в оротроне 1 мм диапазона необходимо использовать ОР с фокусирующим зеркалом другой формы.

Эта возможность увеличения мощности была нами **впервые** реализована экспериментально в оротроне диапазона 140 ГГц - 300 ГГц со сфероцилиндрическим фокусирующим зеркалом ОР, с образующей цилиндра, параллельной электронному потоку. В связи с тем, что распределение амплитуды ВЧ поля поперёк электронного потока имеет Гауссов вид, то согласно [1] ширину электронного потока можно увеличить до $2r_k$.

Параметры зеркала таковы: радиусы кривизны цилиндра и сферы $R_{cil} = R_{sph} = 65$ мм, $H_{OP} = 10$ мм. Поэтому для $\lambda = 1,5$ мм радиус каустики на плоском зеркале $r_k = 3,34$ мм, а для $\lambda = 1,0$ мм - $r_k = 2,74$ мм. В оротроне с ДПС, имеющей период 0,2 мм и длину 33 мм были проведены измерения диапазона перестройки при 3-х ширинах электронного потока: 5 мм, 7,2 мм, 10 мм. При ширине 7,2 мм мощность генерации возрастает по сравнению с шириной потока при 5 мм практически во всём диапазоне перестройки по частоте. Особенно чётко это видно на частотах двух резонансов 195 ГГц и около 300 ГГц, где она возрастает в два раза. При этом ширина электронного потока на частоте 195 ГГц составляет $2,1 r_k$, а на частоте 300 ГГц - $2,55r_k$. При увеличении ширины потока до 10мм мощность генерации вблизи частоты 195 ГГц возрастает уже в 3раза, но, начиная с частоты 245 ГГц, становится меньше даже мощности генерации при ширине потока в 5мм. При этом ширина электронного потока на частоте 195 ГГц составляет $3,0r_k$, а на частоте 250 ГГц - $3,3r_k$.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ОФН РАН "Современные проблемы радиопизики"

Оротрон с двухрядной периодической структурой терагерцового диапазона с широким электронным потоком. Часть 2.

Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.

ФИРЭ им. В.А Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.

В работе [1] была показана возможность увеличения ширины электронного потока в оротроне с двухрядной периодической структурой (ДПС) до $3 r_k$

Дальнейшее увеличение ширины электронного потока возможно только при условии, что распределение ВЧ поля поперёк электронного потока будет иметь достаточно длинный плоский участок. Как показано в работе [2], в качестве такого ОР может быть использован ОР с фокусирующим сфероцилиндрическим зеркалом, образующая цилиндра которого перпендикулярна направлению движения электронного потока. Но в оротроне с ДПС длиной 33мм, о которой говорилось в [1], необходимо использовать многофокусное сфероцилиндрическое зеркало, образующая цилиндра которого перпендикулярна электронному потоку [3]. Если зеркало установлено так, что она параллельна электронному потоку, то почти плоское распределение ВЧ поля реализуется поперёк него в зависимости от частоты [4]. Для начала было решено остановиться на двухфокусном зеркале, ДПС длиной 20мм и 2мм диапазоне волн.

Была изготовлена ДПС с периодом 0,4 мм длиной 20 мм. Было изготовлено двухфокусное сфероцилиндрическое зеркало с радиусами кривизны цилиндра и сферы $R_{cl} = R_{shp} = 32$ мм, с расстоянием между фокальными осями 5 мм, длиной 22,5 мм вдоль образующей цилиндра и 20 мм поперёк неё.

Эксперименты по исследованию диапазона перестройки оротрона по частоте были проведены для обоих положений зеркала для трёх разных величин связи ОР с нагрузкой при ширине электронного потока 10 мм. Для случая, когда фокусирующее зеркало ориентировано так, что образующая цилиндра направлена поперёк потока, существует оптимальная связь с нагрузкой, при которой мощность в диапазоне перестройки от 110 ГГц до 150 ГГц изменяется не более, чем в 3 раза. При увеличении связи этот диапазон сужается от 115 ГГц до 140 ГГц, хотя максимальная мощность возрастает до 3 Вт. Затем зеркало было повернуто на 90° вокруг оси симметрии ОР, и были проведены те же измерения для 3-х величин связи ОР с нагрузкой. Результаты эксперимента показали, что сохраняется та же тенденция увеличения генерируемой мощности. Это приводит к выравниванию генерируемой мощности по диапазону перестройки, однако наибольшая величина мощности остаётся на частоте четвертьволнового резонанса при всех величинах связи ОР с нагрузкой.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ОФН РАН "Современные проблемы радиофизики"

1. Мясин Е.А., Ильин А.Ю., Евдокимов В.В. Оротрон...с широким электронным потоком (Ч.1).//Тезисы Докладов. XV Меж.юбилейная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике. 2012 г., Саратов.
2. Русин Ф.С. Оротрон. Докторская диссертация.1980г.
3. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю., Соловьев А.Н. Оротрон. Патент РФ на полезную модель №87830, НО1J 25/00, приор. 12.05.2009. Бюл. №29 от 20.10.2009
4. Мясин Е.А. Оротрон. Патент РФ на полезную модель №87829, НО1J 25/00, приор. 12.05.2009. Бюл. №29 от 20.10.2009.

Оротрон с двухрядной периодической структурой терагерцового диапазона с двумя электронными потоками. Часть 1.

Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.

ФИРЭ им. В.А Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская область

В работе [1] была выдвинута гипотеза о возможности увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия при введении в пространство взаимодействия оротрона с двухрядной периодической структурой (ДПС) дополнительного электронного потока над вторым (верхним) рядом ДПС, т.е. на высоте $\approx b_0$ над плоским зеркалом, причём во всей полосе перестройки по частоте. В работе [2] приведены результаты экспериментальной проверки этой гипотезы в оротроне диапазона 140 ГГц-300 ГГц, подтвердившие её правоту. Тем не менее, этот вопрос требует более детального исследования.

Для проведения этих экспериментов была изготовлена ДПС с периодом $l = 0,4$ мм, $L = 20$ мм, $b_1 = 0,3$ мм, $2H = 0,15$ мм, $b_2 = 0,2$ мм, $b_0 = b_1 + 2H + b_2 = 0,65$ мм. Первоначально были проведены эксперименты с одним электронным потоком шириной 10 мм и ОР со сферическим фокусирующим зеркалом, имеющим радиус кривизны сферы $R_{sph} = 65$ мм и апертуру 32 мм, при минимальной связи ОР с нагрузкой, а затем с двумя электронными потоками, шириной 7,2 мм каждый. Суммарный ток их был не больше, чем рабочий ток при работе с одним электронным потоком. Тем не менее, генерируемая мощность с двумя электронными потоками в два раза больше во всей полосе перестройки оротрона по частоте. При большей связи ОР с нагрузкой суммарный ток двух электронных потоков был практически одинаков с рабочим током при работе прибора с одним электронным потоком. При этом генерируемая мощность на частоте $\lambda/4$ резонанса практически не изменилась, но на частотах выше резонансной генерируемая мощность увеличилась приблизительно в два раза. Таким образом, введение дополнительного электронного потока в пространство взаимодействия оротрона с ДПС на высоте b_0 над её вторым рядом приводит к увеличению генерируемой мощности в том случае, если связь ОР с нагрузкой не оптимальна, и величина рабочего тока основного потока недостаточна для получения максимально возможной мощности генерации. В случае оптимальной связи ОР с нагрузкой введение дополнительного электронного потока не приводит к увеличению генерируемой мощности, но позволяет уменьшить суммарную плотность тока потоков.

1. Мясин Е.А., Ильин А.Ю., Евдокимов В.В. Тез. Докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 12-15 марта 2009 г., Нижний Новгород. С.45.
2. Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. Оротрон с двухрядной периодической структурой диапазона 140...300 ГГц. "Радиотехника и электроника" 2011. Т.56, №4, С.454-467

Оротрон с двухрядной периодической структурой терагерцового диапазона с двумя электронными потоками. Часть 2.

Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю.

ФирЭ им. В.А Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская область

В работе [1] были представлены результаты экспериментов по увеличению ширины электронного потока в оротроне с ДПС и ОР, фокусирующим зеркалом которого было двухфокусное сфероцилиндрическое зеркало с $R_{sph} = R_{cil} = 32$ мм, с длиной вдоль образующей цилиндра 22,5 мм и поперёк неё - 20 мм. С этим оротроном были проведены также эксперименты по введению в его пространство взаимодействия дополнительного электронного потока на высоте b_0 над вторым рядом ДПС. Для этого был исследован диапазон перестройки прибора по частоте от 94 ГГц до 150 ГГц.

Эксперименты проводились с обоими положениями фокусирующего зеркала ОР относительно электронного потока: с образующей цилиндра как поперёк, так и вдоль него.

Как показали эксперименты, при минимальной связи ОР с нагрузкой введение второго дополнительного электронного потока для обоих положений фокусирующего зеркала ОР не увеличивает генерируемую мощность в диапазоне перестройки и существенно сужает её диапазон, достигая максимальной мощности практически только на одной частоте.

Обратим внимание на то, что при этом радиусе кривизны $R_{sph} = 32$ мм радиус каустики r_k на плоском зеркале для $\lambda = 3,2$ мм, $\lambda = 2,6$ мм и $\lambda = 2$ мм соответственно равен 3,75 мм, 3,26 мм и 2,90 мм при расстоянии $H_{OP} = 8$ мм (типичном для этих экспериментов) между зеркалами ОР. Отношение $r_k/\lambda = 1,17; 1,25; 1,45$.

В то же время для аналогичных экспериментов, но со сферическим зеркалом ОР [2] при $R_{sph} = 65$ мм радиус каустики r_k на плоском зеркале для $\lambda = 3,2$ мм, $\lambda = 2,6$ мм и $\lambda = 2$ мм соответственно равен 4,9 мм, 4,4 мм, 3,89 мм при расстоянии $H_{OP} = 10$ мм между зеркалами ОР. Отношение $r_k/\lambda = 1,53; 1,7; 1,945$.

Таким образом, введение второго электронного потока в оротроне с ДПС на высоте b_0 над её вторым рядом не может приводить к увеличению генерируемой мощности во всём диапазоне перестройки прибора в том случае, если ОР с Гауссовым распределением ВЧ поля обеспечивает отношение $r_k/\lambda \leq 1,5$. В этом случае такая возможность сохраняется только вблизи одной частоты, при которой дополнительный электронный поток движется в одной и той же фазе ВЧ поля в ОР с основным электронным потоком. В обоих приведенных случаях это частота $\lambda/4$ резонанса ($\lambda = 2,6$ мм). Следовательно, использование дополнительного электронного потока при таком отношении $r_k/\lambda \leq 1,5$ в приборах с широкодиапазонной перестройкой не допустимо, а при необходимости увеличения мощности таким способом на одной частоте при создании ДПС следует учитывать кривизну фронта стоячей волны вдоль оси ОР на высоте b_0 второго ряда от пролётного канала для основного потока.

1. Мясин Е.А., Ильин А.Ю., Евдокимов В.В. Оротрон...с широким электронным потоком (Ч.2).//Тезисы Докладов. XV Меж.юбилейная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике . 2012 г., Саратов. .
2. Мясин Е.А., Ильин А.Ю., Евдокимов В.В. Оротрон ...с двумя электронными потоками.(Ч.1)// Тезисы Докладов. XV Меж.юбилейная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике . 2012 г., Саратов.

Механизм генерации хаотических колебаний в автогенераторе на лавинно-пролётном диоде

Мясин Е.А.

ФирЭ им. В.А Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.

Впервые получены временные реализации хаотических колебаний в автогенераторе на лавинно-пролётном диоде (ГЛПД) 8мм диапазона длин волн, используемом в качестве источника сигнала в макете шумовой РЛС [1].

Как показали наблюдения сигнала на скоростном цифровом осциллографе, генерация широкополосного шумового сигнала ГЛПД 8 миллиметрового диапазона в непрерывном режиме работы реализуется за счёт кратковременных, повторяющихся цугов колебаний со случайными временными паузами между ними. При этом длительность цуга изменяется от 80 до 200нсек. При различных токах диода соответственно при 45мА, 50мА и 55мА. частота повторений этих цугов увеличивается, т.е. временной интервал уменьшается, по мере увеличения тока через диод.

Анализ реализаций сигнала ГЛПД в режиме генерации хаотических колебаний показывает, что процесс генерации реализуется за счёт пролётной неустойчивости в многорезонансной автоколебательной системе и имеет характер релаксационных колебаний

На основании полученных временных реализаций различных режимов генерации хаотических колебаний в ГЛПД можно понять механизм перехода от генерации одночастотного сигнала к генерации шума, используя спектральные измерения перехода ГЛПД в режим генерации шума, приведенные в работе [2].

1. Мясин Е.А. Генерация хаотических колебаний в автогенераторе на лавинно-пролётном диоде. //Письма в ЖТФ. 2012.Т.38.№2.С.87.
2. Мясин Е.А., Котов В.Д. Широкополосные диодные генераторы шума миллиметрового диапазона волн. Радиотехника.2005. №3. С.46-50.

Генерация щелевых солитонов в наклонной брэгговской решетке

Садовников А.В., Рожнев А.Г.

СарГУ, Саратов

Планарные периодические диэлектрические структуры широко находят сегодня применение в устройствах интегральной оптики, в СВЧ и ТГц диапазоне как узкополосные фильтры и волноведущие структуры.

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 кубической и учитывается Керровской моделью – показатели преломления слоев зависят от мощности сигнала, распространяющегося вдоль решетки [1]. 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.

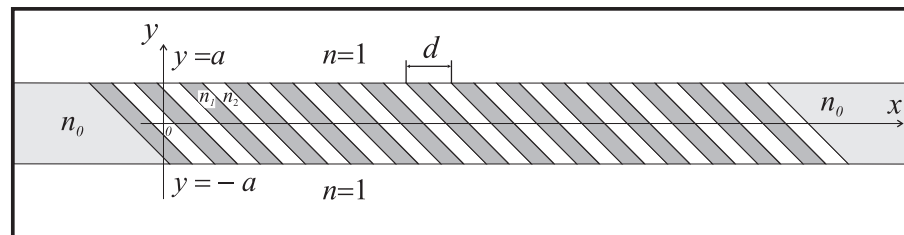


Рис. 1: Схематическое изображение наклонной брэгговской решетки.

Проведено сравнение результатов расчета границ полосы непропускания в брэгговской решетке модифицированным методом эффективного показателя преломления и FDTD методом, с помощью которого был проведен расчет спектров пропускания структуры в линейном режиме. Получено хорошее совпадение критических частот, полученных обоими методами. Обнаружено, что нелинейная зависимость показателя преломления от интенсивности волны приводит к сдвигу критической частоты периодической структуры в более низкочастотную область. В результате становится возможным распространение сигнала в полосе непрозрачности (нелинейное туннелирование), которое происходит в виде последовательности щелевых солитонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-02-01403, 11-02-01280).

1. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics, 4th ed. Academic Press, San Diego, 2007.

Influence of titled magnetic field on synchronization of domains of charge in semiconductor superlattices

Moskalenko O.I.¹, Hramov A.E.¹, Koronovskii A.A.¹, Maximenko V.A.¹, Alexeev K.N.², Balanov A.G.²

¹ *Saratov State University, Saratov, Russia*

² *Loughborough University, Loughborough, United Kingdom*

Semiconductor superlattices (SLs), nanostructures formed from several alternating layers of different semiconductor materials, are capable in the presence of an external electric and a tilted magnetic fields to demonstrate a number of interesting quantum-mechanical effects, such as appearance of THz Bloch oscillations, dynamical electron confinement, negative differential drift velocity, cyclotron-Bloch resonances and dynamical chaos [1]. While autonomous charge dynamics in SLs with an applied DC voltage and a tilted magnetic field recently attracts a significant research interest [2], the effects of external AC electric field on such system is still poorly studied. Here we report on how the parameters of an external periodic field affect AC and DC electric current through SL with applied bias voltage and a tilted magnetic field.

The non-autonomous dynamics of SL being under influence of external periodic force in the absence of magnetic field has been studied by us recently [3]. In particular, we have shown that in this case synchronization of charge domains in SL is observed in a wide frequency range. With this, the width of the synchronization tongues almost does not depend on the ratio between the frequency of the external force and the frequency of the driven current oscillations, which is quite untypical for synchronization of periodic oscillations. We found that the same effect takes place even at the presence of a tilted magnetic field, but in addition, for some parameters, the magnetic field is able to induce chaotic current oscillations. If the value of the external signal amplitude is a great enough, the form of synchronization tongues becomes strongly nonlinear. Such transformation of the form of synchronization tongues can reflect appearance of the chaotic oscillations. In order to check this, the reconstructed attractors of the current oscillations have been analyzed and the spectrum of spatial Lyapunov exponents for SL has been computed.

It has also been shown that, as in the case of the absence of magnetic field, the onset of synchronization manifests itself in the jumps on current-voltage-characteristics and in the sharp increase of absorption.

This work has been supported by President's program (MK-672.2012.2) and Dynasty foundation.

1. Wacker A., Physics Reports 357 (2002) 1; Tsu R., Superlattices to Nanoelectronics (Elsevier, 2005).
2. Fromhold T.M. et al., Nature (London) 428 (2004), 726; Greenaway M.T. et al., *Phys. Rev. B* **80** (2009), 205318
3. Moskalenko O.I. et al., *Izv. Vuzov. Applied Nonlinear Dynamics* **19**, 3 (2011) 143-153

Различные модели нелинейной динамики пучков заряженных частиц в пространственно-периодических средах

Сытова С.Н.

НИИ ЯП БГУ, Минск

Объемный лазер на свободных электронах (ОЛСЭ) представляет собой вакуумный электронный прибор, работающий на излучении релятивистских электронов, движущихся в пространственно-периодической среде (резонаторе) в синхронизме с одной или несколькими сильно связанными электромагнитными волнами в существенно нелинейной геометрии, для которых выполняются условия дифракции Брэгга в резонаторе вблизи области вырождения корней дисперсионного уравнения. В такой области групповая скорость электромагнитной волны резко уменьшается, излучение за счет непрерывного переотражения на периодических плоскостях резонатора задерживается в области взаимодействия электронного пучка (широкого в поперечном сечении или ленточного) с волной. Благодаря этому взаимодействие электронов с электромагнитным полем происходит более эффективно.

Основные принципы функционирования ОЛСЭ были предложены в [1], развиты теоретически [2], [3]. Показано, что эти принципы существенно изменяют пороговые условия генерации и справедливы для всех частотных диапазонов и различных механизмов спонтанного излучения. В 2001 г. впервые получена генерация индуцированного СВЧ-излучения ОЛСЭ в миллиметровом диапазоне [4]. Дальнейшие экспериментальные исследования ОЛСЭ проводятся в этом диапазоне с различного типа сеточными резонаторами.

Методами математического моделирования [5], [6] исследована нелинейная стадия работы ОЛСЭ и получены численно все основные закономерности теории ОЛСЭ, а также совпадение численных данных с результатами экспериментальных исследований. Показано, что ОЛСЭ является динамической хаотической системой.

В данной работе с целью исследования нелинейной динамики пучков заряженных частиц в пространственно-периодических средах в условиях ОЛСЭ проведен обзор различных моделей ОЛСЭ, включая модель с электронным пучком в гидродинамическом приближении, двухмерную модель поверхностного ОЛСЭ с ленточным пучком (моделируемом в виде функций распределения) и различные варианты (включая учет дисперсии электромагнитных волн на сеточном резонаторе) системы с электронным пучком, описываемом с помощью фазы электронов относительно электромагнитной волны. Показана необходимость учета дисперсии в СВЧ-диапазоне для сеточных резонаторов. Получены аналитические решения системы в случае стационарных и некоторых периодических режимов работы ОЛСЭ. Исследованы некоторые механизмы возникновения и подавления осцилляций в системе.

1. Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D. *Physics Let. A* **102** (1984) 141
2. Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya. *J. Phys. D* **24** (1991) 1250
3. Baryshevsky V.G., Gurinovich A.A. *Nucl. Instr. Meth.* **B252** (2006) 92
4. Baryshevsky V. G. et al. *Nucl. Instr. Meth.* **A483** (2002) 21
5. Батраков К. Г., Сытова С. Н. *ЖВМ и МФ* **45** (2005) 690
6. Сытова С. Н. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика* **19** (2011) 93

Нелинейная динамика автоколебательной системы с запаздыванием при воздействии внешнего гармонического сигнала

Усачева С.А.

СарГУ, Саратов

В последнее время изучение процессов синхронизации выходит на передний план в нелинейной динамике, причем особое внимание привлекают распределенные системы с бесконечным числом степеней свободы. Важным классом таких систем являются системы с запаздыванием [1,2,3]. В настоящей работе рассматривается синхронизация автогенератора с кубической нелинейностью и запаздыванием под воздействием внешнего гармонического сигнала

$$\dot{A} + \gamma A = \alpha e^{i\theta} (1 - |A(t-1)|^2) A(t-1) + F e^{i\omega t}. \quad (1)$$

Здесь A — медленно меняющаяся амплитуда колебаний, α — параметр усиления, γ — параметр диссипации, θ — набег фазы в цепи обратной связи, F и ω — амплитуда и частота внешнего воздействия. Время задержки выбрано равным единице.

Теоретически проанализированы языки синхронизации и резонансные кривые системы (1). В области малых амплитуд картина напоминает картину синхронизации системы с одной степенью свободы. Однако с ростом амплитуды внешней силы появляется множество отличий, вызванных возбуждением различных автомодуляционных мод. В частности, резонансные кривые в области больших амплитуд и расстройек имеют многочисленные максимумы на частотах автомодуляционных мод. Моды с достаточно большой амплитудой становятся неустойчивыми, возникает автомодуляция, инициированная внешним сигналом. Соответственно, форма языков синхронизации также значительно усложняется. Они имеют две границы: внешнюю и внутреннюю, и эти границы имеют волнистую форму, что обусловлено резонансами с различными автомодуляционными модами. Когда параметр возбуждения свободного генератора приближается к порогу автомодуляции, языки синхронизации разбиваются на несколько независимых частей. Вблизи границы зон генерации становится возможным одновременное возбуждение двух мод, т.е. появляется бистабильность синхронных режимов.

Проведено также численное моделирование процессов перехода к синхронному режиму при увеличении амплитуды внешней силы, которое выявило очень сложную картину динамических режимов. В частности, процесс захвата частоты, сопровождается возбуждением автомодуляционных мод. Переходу в синхронный режим через подавление собственной частоты предшествует каскад бифуркаций удвоения периода. Когда частота внешней силы близка к частоте второй собственной моды, наблюдается жесткий переход к синхронному режиму, сопровождаемый бистабильностью гистерезисом.

1. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю., “Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление”, (М.: Техносфера), 2003.
2. Рабинович М.И., Трубецков Д.И., “Введение в теорию колебаний и волн”, (М.: Наука), 1984.
3. Ланда П.С. “Нелинейные колебания и волны”, (М.: Физматлит), 1997.

Влияние предварительной модуляции электронного потока на выходную мощность СВЧ генерации виркатора

Фролов Н.С.

Факультет нелинейных процессов, СарГУ, Саратов

В настоящее время проводятся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования источников мощного СВЧ излучения на основе электронных потоков с виртуальным катодом (ВК) – виркаторов [1]. Известно, что генераторы на ВК характеризуются высоким уровнем выходной мощности, простотой конструкции, возможностью работы без внешнего магнитного поля, а так же, как показали различные теоретические и экспериментальные исследования, легкостью управления режимами колебаний за счет различных типов воздействия: либо различных типов обратной связи, либо за счет подачи внешних сигналов [2].

Одной из активно исследуемых модификаций генератора с электронной обратной связью является система, получившая название низковольтный виркатор, рассматриваемая как перспективный источник узкополосного и широкополосного хаотического сигнала в СВЧ-диапазоне. В низковольтном виркаторе, который представляет собой диодный промежуток, пронизываемый электронным потоком, ВК в пучке формируется за счет действия сил пространственного заряда потока и дополнительного торможения электронов путем подачи отрицательного относительно входной сетки напряжения на выходную сетку диодного промежутка.

В представленной работе построена аналитическая теория низковольтного виркатора под внешним воздействием и, основываясь на указанной аналитической модели, показана возможность значительного увеличения выходной мощности неавтономного виркатора. Полученные аналитические результаты сопоставлялись с результатами численного моделирования в рамках 1D модели низковольтного виркатора, также проведенного в рамках данного исследования. Было показано, что аналитические и численные результаты, полученные в рамках данного исследования, сравнивались с результатами проведенного ранее экспериментального исследования [3]. Показано, что полученные теоретические результаты согласуются с экспериментальными исследованиями, которые также показывают рост мощности выходного СВЧ излучения с ростом глубины предварительной модуляции электронного потока. Изучены физические процессы в неавтономном низковольтном виркаторе и выявлены физические механизмы, позволяющие увеличить мощность выходного излучения виркатора.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-02-00345 и 12-02-90022).

1. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E., *High Power Microwaves*. CRC Press, Taylor and Francis (2007)
2. Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е., *Изв. РАН, сер. физич.* **69(12)** (2005) 1736–1740
3. Калинин Ю.А., Храмов А.Е., *Письма в ЖТФ* **32(13)** (2006) 88–94

Системный нелинейный время-частотный анализ нестационарных сигналов

Арсеньян Т.И., Сухарева Н.А., Сухоруков А.П.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Требования к анализу структуры сигналов в современных радиофизических приложениях зачастую содержат принципиально противоречивые условия, слабо совместимые не только с соотношением неопределённости, но и с принципом причинности. Наиболее проблемны для подобных исследований нестационарные сигнальные последовательности, порождаемые при различных нелинейных взаимодействиях, со сложными фазочастотными пространственными неоднородностями.

Предложен расширенный подход к построению время-частотных распределений на базе отображений класса Коэна [1,2]. Отличие от традиционного метода формирования функции распределения состоит во введении сигнал-детектора, выполняющего роль опорного сигнала и задающего начало отсчёта фазовых искажений и шкалы нестационарных частотно-энергетических распределений. Частотно-временной профиль сигнал-детектора может быть создан различными методами, например на основе собственных функций гамильтониана физической системы.

Фактически предлагаемый метод основан на анализе динамической квадратичной интерференции анализируемого и опорного сигналов, считавшейся ранее нежелательным эффектом, исключаемым из результирующих карт распределений наложением специальных временных и частотных фильтров [3]. Особое внимание уделено структуре и обсуждению детектирующего потенциала ядра интегрального квадратичного отображения. Обсуждается работа с ядрами распределений Вигнера-Вилли, Пейджа, Борна-Жордана и их модификациями, правила отбора структуры ядер, обеспечивающие оптимальное разрешение динамических частотных параметров сигналов различных классов. Предложены дополнительные виды ядер для изучения сигналов в переходных или релаксационных процессах.

Программная реализация предложенного метода выполнена на базе исходных открытых текстов время-частотных преобразований Time Frequency Toolbox [4] для пакета Scilab [5] с добавлением компонентов модифицированных ядер, модулей аналитического продолжения сигнала и модулей построения сигнал-детекторов.

Представлен сравнительный анализ видов квадратичного время-частотного отображения ряда нестационарных пространственно-временных структур - сигналов с дислокацией фазы, нелинейных дифракционных явлений, импульсных параметрических процессов. Предложены оценки числа выполняемых операций при построении карты отображения заданной точности, необходимые для проектирования аппаратных решений на базе описанных отображений.

1. Коэн Л. Время-частотные распределения, *ТИИЭР*. 1989. **Т.77**, №10. С.72-121.
2. Grochenig K. Foundations of time-frequency analysis, Birkhauser, 2001
3. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ сигналов: теоретические основы и практическое применение. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2007. **Т. 12** , No2., С. 162-181.
4. <http://tftb.nongnu.org/>
5. <http://www.scilab.org>

Нелинейная динамика электронных доменов в полупроводниковой сверхрешетке

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

СарГУ, Саратов

В данной работе изучается пространственно-временная динамика электронных доменов в полупроводниковой сверхрешетке в наклонном магнитном поле с учетом влияния температуры. Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой сложные наноструктуры, содержащие несколько чередующихся тонких (порядка 10 нм) слоев различных полупроводниковых материалов. Предложенные Л. Эсаки и Р. Тсу в 1969 году [1] для экспериментального исследования разнообразных квантово-механических эффектов, связанных с резонансным туннелированием и блоховскими колебаниями, сверхрешетки являются уникальным полигоном как для изучения и понимания процессов физики твердого тела, так и для исследования явлений нелинейной динамики. Важным пунктом исследований была проблема учета начального температурного распределения электронов. В статье [2] содержатся аналитические результаты по расчету зависимостей дрейфовой скорости от напряженности электрического поля для различных температур. Однако, данные расчеты проводились в отсутствии наклонных магнитных полей, тогда как именно введение наклонного магнитного поля приводит к наиболее интересной динамике электронов в полупроводниковой сверхрешетке.

В одной из предыдущих работ [3] был разработан метод для численного моделирования начального распределения электронов по энергиям с учетом наклонного магнитного поля. С помощью этого методы были получены зависимости дрейфовых скоростей от напряженности электрического поля в присутствии наклонного магнитного поля для различных температур [4]. Получение зависимости дрейфовой скорости от температуры, в свою очередь, позволило с помощью взаимосогласованного решения уравнений непрерывности и Пуассона рассчитать ток, протекающий через сверхрешетку [5]. Помимо этого, была исследована пространственно-временная динамика электронных доменов. Были получены различные режимы, при которых частота следования доменов порой достигает сотен гигагерц. Для высоких температур были учтены так же диффузионные механизмы, приводящие к уширению доменов и снижению частоты их следования.

Учет вышеупомянутых факторов позволил провести детальное изучение поведения доменов заряда с увеличением напряжения и температуры. Найден новый нетривиальный эффект, связанный со срывом колебаний тока, протекающего через сверхрешетку, в некотором диапазоне напряжений и температур. Данный эффект обусловлен увеличением влияния резонансных пиков дрейфовой скорости на динамику электронов с ростом температуры.

1. L. Esaki, R. Tsu *IBM J. Res. Develop.* **14** 61 (1970)
2. F. G. Bass, V. V. Zorchenko, V. I. Shashora *JETP Letters* **31** 314 (1980)
3. А.Г. Баланов, М.О. Журавлев, А.А. Короновский, А.О. Сельский, М.В. Ханенко, А.Е. Храмов, С.А. Шурыгина *Вестник ТГУ.* **15** 2 (2010) 519-523
4. А.Г. Баланов, А.А. Короновский, А.О. Сельский, А.Е. Храмов *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика* **18** 3 (2010) 128-139
5. А.О. Selskii, А.А. Koronovskii, А.Е. Hramov, O.I. Moskalenko, K.N. Alekseev, M.T. Greenaway, F. Wang, T.M. Fromhold, A.V. Shorokhov, N.N. Khvastunov, A.G. Balanov *Physical Review B* **84** (2011) 235311

Свойства металлических проволочных фотонных кристаллов

Давидович М.В., Шиловский П.А.

СарГУ, Саратов

Металлические фотонные кристаллы (МФК) широко исследуются в последние три десятилетия в связи с наличием у них ряда специфических (необычных) для естественных сред свойств, в связи с возможностью получения на их основе искусственных сред (метаматериалов) с магнитными свойствами, с отрицательной диэлектрической проницаемостью или обеими проницаемостями, а также в связи с созданием на их основе фильтрующих, волноведущих, фокусирующих, согласующих и ряда других устройств [1]. К указанным необычным свойствам МФК относятся: сильная пространственная и частотная дисперсии, отрицательная рефракция, бианизотропия, которые проявляются от СВЧ диапазона вплоть до оптических частот. Под МФК мы понимаем любые периодически расположенные металлические объекты или такие объекты, периодически внедренные в диэлектрическую матрицу (основу) с не имеющей дисперсии в рассматриваемом диапазоне (для простоты анализа) диэлектрической проницаемостью. Из объектов, исследованных в большом числе работ по МФК, мы взяли простейшие: линейные непересекающиеся проволочные включения. Соответствующие метаматериалы анизотропные, но бианизотропией и магнитными свойствами не обладают (в приближении тонких проволочек). Такой выбор обусловлен тем, что даже строгий электродинамический анализ подобных объектов весьма не прост. Большинство же исследований по МФК базируется на различных приближенных моделях, или же для этого используются разные пакеты прикладных программ, построенные обычно на методе сеток или на методе конечных элементов. В работе применен подход, базирующийся на методе функций Грина (ФГ) и методе интегродифференциальных уравнений (ИДУ), или интегральных уравнений (ИУ) в приближении тонких проволочек, изложенный в [29,30]. Это приближение означает, что их радиус много меньше всех остальных размеров структуры. При этом поперечными (азимутальными) компонентами тока (и соответственно магнитными свойствами) можно пренебречь и свести задачу к одномерному ИУ. Применен один из трех методов гомогенизации, развитых одним из авторов в [2], что позволило получить эффективные электрофизические параметры рассмотренных структур. В данном случае это тензор эффективной диэлектрической проницаемости (ТЭДП). Сделан упор на получение аналитических результатов. Изложены также строгие методы построения моделей рассматриваемых структур с любой заданной точностью. Результаты сравниваются с данными аналогичных публикаций.

Линейная электродинамическая модель спиральной ЛБВ в цилиндрическом резонаторе в приближении заданного линейного тока пучка

Бушуев Н.А., Давидович М.В.

СарГУ, Саратов

При проектировании широкополосных ЛБВ с повышенным КПД большое значение приобретают учет неоднородной намотки спирали, неоднородностей, потерь, влияние экранов, окон ввода и вывода энергии на работу приборов. Реально спиральная ЛБВ боль-

ше соответствует резонатору, возбуждаемому током пучка и входным сигналом, имеющим выход, т.е. нагрузку. Такие структуры с электродинамической точки зрения являются волноводными трансформаторами. Теория возбуждения волноводных трансформаторов весьма сложна, т.к. это открытые структуры. Применение теории возбуждения ЗС (периодических волноводов) здесь не оправдана, т.к. спираль конечна, неоднородна и помещена в экран. Знание дисперсии и сопротивления связи не позволяет точно моделировать ЛБВ (при этом теория возбуждения периодических ЗС в полном объеме не применяется, а ограничиваются использованием одной синхронной пространственной гармоники). Однако для непериодической спирали такого синхронизма быть не может. Теория возбуждения резонаторов при моделировании спиральных ЛБВ не использовалась. Как правило, эта теория в других случаях также применяется в приближенном варианте.

В данной работе рассмотрено возбуждение цилиндрического резонатора (ЦР) заданным промодулированным осевым линейным током пучка и неоднородным спиральным током, текущим по оси проволоки намотки спирали. На двух поверхностных спиральных линиях, принадлежащий поверхности спирали, наложено нулевое импедансное граничное условие, приводящее к интегродифференциальному уравнению. Входная мощность учтена как согласованный в начале спирали дельта-источник напряжения. Выходная нагрузка учтена, как сосредоточенное (в виде дельта-функции) сопротивление выходной коаксиальной линии на конце спирали. Ток спирали задан в виде бегущей и нарастающей спиральной волны в зависимости от длины дуги спирали. Скорость волны вдоль спирали задается с учетом дисперсии однородной спирали и вводится коэффициент ее уменьшения с уменьшением шага намотки. Фазовая скорость пучка также изменяется в зависимости от длины (вводится отрицательное ускорение, линейно и квадратично зависящее от длины).

Для решения задачи возбуждения были рассмотрены и явно выписаны формулы Л.А. Вайнштейна и Г.Т. Маркова. При численном моделировании использованы формулы Г.Т. Маркова, которые были модифицированы для учета поглощения на торцах ЦР. Указанные формулы основаны на возбуждении цилиндрического волновода. Резонатор учитывается в виде волн обоих направлений и задании граничных условий на торцах. При этом формулы удобны для вычислений. В них явно не входят резонансные частоты, а все компоненты полей для основной моды вычисляются на основе продольной компоненты электрического поля. Последняя определяется линейным и спиральным токами и их векторными производными, что потребовало аналитического введения формы токов и привело к интегродифференциальным уравнениям.

По разработанной программе рассчитаны все поля, излученная пучком и выделенная в нагрузку спирали мощность, а также коэффициент усиления. Параметры тока спирали подбирались путем минимизации невязки граничных условий на спирали. Коэффициент усиления, полученный на основе интегрирования тока пучка с продольной компонентой поля оказался существенно ниже, чем рассчитанного на основе спирального тока, отдаваемого в сосредоточенную нагрузку. Это, по-видимому, связано тем, что было использовано предположение об идеальном согласовании.

Предложенная модель позволяет использовать итерационный подход с использованием решения уравнений движения и последующим уточнением полей ЦР. Она также позволяет итерационно учитывать диэлектрические и магнитные включения как вторичные токи поляризации. Ее достоинство в том, что использованы строгие формулы возбуждения. В расчетах взято 10 азимутальных и 9 радиальных индексов для мод цилиндрического волновода.

Исследование возникновения хаотических режимов колебаний пространственного заряда в полупроводниковой сверхрешетке во внешнем резонаторе

В.В. Макаров¹, А.А. Короновский¹, С.А. Куркин¹, А.Е. Храмов¹, А.G. Balanov², К.N. Alekseev², М.В. Gaifullin², N. Alexeeva², and F.V. Kusmartsev², М.Т. Greenaway³, А. Patanè³, and Т.М. Fromhold³

¹Факультет Нелинейных Процессов, СГУ, Саратов

²Department of Physics, Loughborough University, Loughborough, United Kingdom

³School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom

Исследование различных явлений в полупроводниковых сверхрешетках в настоящее время является важной и активно исследуемой задачей электроники сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов [1,2]. С точки зрения практики представляется важным изучение динамики сверхрешетки во внешней электродинамической структуре. Во-первых, в рассматриваемом диапазоне частот трудно в принципе избавиться от паразитных емкостей и индуктивностей (например, связанных с контактами и подводными проводниками), которые образуют внешние резонансные контура. Во-вторых, изучение сверхрешетки во внешнем резонаторе представляет и самостоятельный интерес для исследования вопросов управления динамикой выходного излучения полупроводниковой сверхрешетки.

Целью настоящей работы было теоретическое и численное исследование режимов колебаний в системе “полупроводниковая решетка — внешняя резонансная электродинамическая система” при изменении параметров внешних резонаторов. Для решения этой задачи были проведены численные расчеты поведения сверхрешетки при изменении частоты и добротности внешнего резонатора. Построены бифуркационные диаграммы колебаний поля в резонаторе при изменении частоты резонатора для различных добротностей. Показано, что увеличение добротности внешнего резонатора приводит к возбуждению хаотических режимов динамики доменов в полупроводниковой сверхрешетке. Для более детального сравнения с экспериментом проводились численные исследования системы с двумя внешними резонаторами, настроенными на различные частоты.

Чтобы проверить теоретические расчеты был проведен ряд экспериментальных измерений. В работе использовался экспериментальный образец сверхрешетки, сигналы с которой регистрировались с помощью ВЧ цифрового осциллографа. Полупроводниковая сверхрешетка находилась в двух резонаторах — один из которых был образован паразитными емкостью и индуктивностью проводов и контактов, подводимых к полупроводниковому образцу, а второй — был внешний перестраиваемый резонатор, собранный на полосковой линии. Были сняты экспериментальные зависимости поведения сверхрешетки при подключении резонаторов различной частоты и добротности, построены экспериментальные вольт-амперные характеристики сверхрешетки во внешнем резонаторе, далее были построены спектры мощности и фазовые портреты колебаний при различных напряжениях на сверхрешетке. Впервые была обнаружена хаотическая динамика выходного излучения сверхрешетки, помещенной во внешние резонаторы. Показано хорошее качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

1. R. Tsu, Superlattices to nanoelectronics, Elsevier, 2005.
2. L. Esaki and R. Tsu, Superlattices and negative differential conductivity in semiconductors., IBM J. Res. Develop. 14, 61 (1970).

Nonlinear dynamics and chaotic oscillations in the two-stream vircator

R.A. Filatov, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii

Saratov State University, Saratov, Russia

One of the important tasks of the plasma physics and high power microwave electronics is the study of physical processes in the counter streaming electron flows. This problem is important due to the various applications, for example, designing of high-power two stream klystrons [1] and from the point of the basic research of astrophysical plasma, in particular, study of the solar wind [2]. At present there are experimental works dealing with study of the virtual cathode (VC) oscillations in the counter streaming electron beams in vircator [3] which is one of the promising sources of high power microwaves [4].

The cylindrical waveguide bounded with the grid electrodes is discussed as a physical model. The electron beams with the equal currents are injected from the opposite faces of the cylindrical drift space. For the invariable geometry of drift space and beams the system has only one main control parameter α (Pierce parameter [5], that is proportional to the beam currents. We have analyzed such system numerically by means of 2.5D PIC-simulation (see, for example, [6]).

We shown for the first time that with the increase of currents of the two counter streaming beams the bifurcation of the symmetry loss are observed which corresponds to the asymmetrical state establishment in the system. In this case there is the difference between both the values of the space charge density in the symmetrical points of the drift space and velocity spectra of the electron beams. We developed the technique to calculate the transversal Lyapunov exponent of the symmetrical state in the two-stream vircator for the precise consideration of the stability of symmetry in the system. We have shown that with increase of α -value the symmetrical beam state loses its stability and transits to the asymmetrical solution.

The non-stationary VC dynamics in the two-stream vircator have been also studied and we have shown that such system demonstrates chaotic output microwave radiation which is confirmed by the largest Lyapunov exponent calculation. For $\alpha > 2.75$ largest Lyapunov exponent becomes positive that corresponds to the chaotic VC oscillations. The physical processes in the two-stream vircator have been also studied by means of plotting of the space-time diagrams and phase portraits of the counter streaming electron beams.

The study has been supported by Russian Foundation of Basic Research (projects 12-02-00345 и 12-02-90022).

1. H. S. Uhm, Phys Fluids B, 5, 3388 (1993).
2. Gaelzer, R. et al. *Astrophys. J.*, 687, 676 (2008).
3. Hendricks K.J. et al *J.Appl.Phys.*, 68, 820 (1990).
4. Benford J. et al *High Power Microwaves*. (Taylor and Francis, 2007).
5. Filatov R.A., Hramov A.E., Bliokh Y.P., Koronovskii A.A., Felsteiner *J. Phys. Plasmas*. 16, 033106 (2009).
6. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Morozov M.Yu., Mushtakov A.V. *Phys. Lett. A*. 372, 876 (2008)

3D Electromagnetic Simulation of Virtual Cathode Oscillator with Resonators and External Feedback

Kurkin S.A.¹, Magda I.I.², Melezhik O.G.², Koronovskii A.A.¹, Hramov A.E.¹

¹*Saratov State University, Saratov, Russia*

²*Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine*

Now devices for generation of high-power microwave signals (including noise-like chaotic oscillations) assume ever greater importance. Perspective sources of such signals are oscillators based on electron beams with VC (vircators) [1]. In this study the important problem of the development of effective methods of vircator generation characteristics control is investigated.

Simultaneously with researches of autonomous vircators [1] the methods of control of vircator radiation are studied. For the first time an experimental study of the external (electromagnetic) and internal (beam) feedback (FB) in vircator was conducted in [2] where strong influence of FB on characteristics of generation was shown. This work continues studying on the vircator dynamics and conditions of control by variations of FB. In the report the results of 3D numerical simulation of the vircator with two cavities and with external electromagnetic FB are presented.

The setup of vircator with external FB under study is following. The electron gun emits a solid electron beam (EB) into a cylindrical accelerating gap between cathode and anode grid with accelerating potential. A gap of the input toroidal resonator is arranged close to the cathode. After traveling through the accelerating gap electrons inject into a cylindrical chamber with the same radius. A gap of the output toroidal resonator is arranged in the region of VC formation. Strong focusing magnetic field with induction $B_0 = 0.5$ T limits the electron lateral dynamics. The EB current exceeds the space-charge limiting current and equals 11 A. Therefore in the drift chamber the VC forms and reflects part of EB back to input resonator. Passed through the VC electrons get on the collector. Input and output resonators coupled by the feedback loop. Resonators are tuned on the frequency of the VC free oscillations (~ 6 GHz).

Analysis of non-stationary processes in this system was carried out by means of 3D electromagnetic PIC numerical simulation. Study of spectra of E_z electric field component oscillations at the VC area has shown significant influence of external FB on vircator output characteristics. In the absence of external FB and resonators VC is formed in the system and excites chaotic output radiation with wideband output spectrum over the range 2 GHz to 6 GHz. Connection of external resonators and FB loop to the vircator leads to the significant simplification of output radiation spectrum. The power spectrum (see Fig. 1b) in this case has only harmonics of VC oscillations (with maximal power on frequencies 6 GHz and 12 GHz) and a weak noise pedestal. The power of these harmonics is greater in comparison with the case without FB loop. Physical cause of such simplification of radiating signal is preliminary modulation of EB on the VC oscillations frequency in the input cavity due to FB loop and formation of the dense electron bunch in the region of output cavity.

The study has been supported by Russian Foundation of Basic Research (projects 12-02-00345 и 12-02-90411).

1. J. Benford, J.A. Swegle, E. Schamiloglu. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
2. N.N. Gadetskii, I.I. Magda, S.I. Naisteter, Yu.V. Prokopenko, V.I. Tchumakov. *Plasma Physics Reports*. 19 (4) (1993) 530

Синхронизация спектральных компонент связанных диодов Пирса в области границы фазовой синхронизации

Данилов Д.И.

Факультет нелинейных процессов, СарГУ, Саратов

Синхронизация колебаний — фундаментальное нелинейное явление, проявляющееся в самых разных областях науки, таких как физика, химия, биология, социология, информатика и др. [1]. Интерес к ее исследованию обусловлен многочисленными применениями синхронизации для решения радиофизических, социологических, физиологических задач, для скрытой передачи информации и так далее.

Обычно выделяют следующие типы синхронизации: фазовая синхронизация, обобщенная синхронизация, лаг-синхронизация и полная хаотическая синхронизация. Весьма интересным представляется вопрос о том, можно ли рассматривать все типы синхронного поведения с единых позиций. Одним из способов для этого является подход синхронизации спектральных компонент [2]. В этом случае каждый тип синхронизации представляется как частное проявление синхронизации спектральных компонент и изучается с точки зрения синхронизации отдельных частотных компонент Фурье-спектров взаимодействующих систем.

В данной работе представлено исследование динамики двух однонаправленно связанных диодов Пирса в области границы фазовой синхронизации с точки зрения синхронизации спектральных компонент. Диод Пирса является простейшей моделью электроники СВЧ, однако он способен демонстрировать многие нелинейные явления, например динамический хаос.

Синхронное поведение с точки зрения спектральных компонент изучено довольно хорошо, однако динамика взаимодействующих систем в области, предшествующей установлению синхронного режима, изучена не в полной мере. Известно, что в данной области в системах, демонстрирующих хаотическое поведение, может наблюдаться режим перемежаемости. Поэтому в настоящей работе рассматривается как синхронное, так и перемежающееся поведение изучаемых систем.

В ходе исследования при помощи преобразования Фурье рассчитаны фазы взаимодействующих систем на основной частоте ведущей системы. Получены распределения разности этих фаз, исследована зависимость их дисперсии от параметра связи, а также от длины временной реализации, по которой производится расчет преобразования Фурье. Обнаружено, что дисперсия таких распределений подчиняется универсальной закономерности при любом значении параметра связи, принадлежащем исследуемой области. Полученные результаты сопоставлены с аналогичными результатами, полученными ранее в работе [3] для связанных систем Ресслера, а также для отображений окружности.

1. Пиковский А.С., Розенблум М.Г., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. Техносфера, Москва, 2003.
2. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Moskalenko O.I. *Phys. Rev. E* **71** (2005) 056204
3. Данилов Д.И., Короновский А.А. *Изв. РАН. Серия физическая.* **75**, 1709 (2011).

Расчет спектра показателей Ляпунова и анализ динамических режимов в полупроводниковой сверхрешетке

Баланов А.Г., Короновский А.А., Максименко В.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е.

СарГУ, Саратов

Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой наноструктуры, состоящие из чередующихся тонких (порядка 10 нм) слоев полупроводниковых материалов с различным уровнем легирования. Предложенные в 1969 году Л. Эсаки и Р. Тсу [1], сверхрешетки являются важным объектом как для изучения и понимания процессов физики твердого тела [2], так и для исследования явлений нелинейной динамики [3].

Известно, что приложенное к сверхрешетке постоянное напряжение при определенном значении вызывает генерацию высокочастотных колебаний. При этом характеристики установившихся колебаний различаются с изменением величины приложенного напряжения. К тому же, воздействие на сверхрешетку периодическим сигналом в совокупности с приложенным наклонным магнитным полем позволяет получить наряду с периодическими, сложные квази-периодические колебания, а так же режимы, которые, на первый взгляд, можно отнести к динамическому хаосу. Очень большую важность представляет детектирование и классификация этих режимов. Однако, проведение такой классификации с помощью анализа фазовых портретов и временных рядов оказывается проблематичным. Дополнительные сложности вносит также тот факт, что исследуемая система относится к классу пространственно-распределенных систем и характеризуется бесконечномерным фазовым пространством.

Целью настоящей работы является исследование динамических режимов, реализующихся в сверхрешетке с помощью спектра показателей Ляпунова. В работе подробно изложен метод расчета показателей Ляпунова для полупроводниковой сверхрешетки и представлены полученные результаты как для автономной системы, так и для случая воздействия на систему гармоническим сигналом. Также, аналитически получен вид зависимости, описывающей распределение электрического поля в предгенерационном режиме и проведена оценка показателей Ляпунова, характеризующих стационарное состояние системы.

Список литературы

- [1] L. Esaki and R. Tsu, *Superlattices and negative differential conductivity in semiconductors.*, IBM J. Res. Develop. **14** (1970), 61.
- [2] А.Я. Шик, *Сверхрешетки-периодические полупроводниковые структуры.*, ФТП **8** (1974), 1841.
- [3] T. M. Fromhold, A. Patanè, S. Bujkiewicz, P. B. Wilkinson, D. Fowler, D. Sherwood, S. P. Stapleton, A. A. Krokhin, L. Eaves, M. Henini, N. S. Sankeshwar, and F. W. Sheard, *Chaotic electron diffusion through stochastic webs enhances current 680 flow in superlattices*, Nature London **428** (2004), 726.

Плазменный релятивистский СВЧ усилитель

П.С.Стрелков, И.Е.Иванов

Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (ИОФ РАН)

Сообщаются результаты последних исследований плазменного релятивистского СВЧ усилителя, отличительной чертой которого по сравнению с вакуумными релятивистскими СВЧ приборами является возможность управления частотой излучения в большом диапазоне. Эксперименты показали, что изменение частоты входного сигнала с одновременным изменением плотности плазмы от одного СВЧ импульса к другому позволяет усиливать входной сигнал на 30 дБ до уровня мощности 50–80 МВт на любой частоте в диапазоне 2.4–3.2 ГГц. Важно, что длительность СВЧ импульса составляет 300 нс, тогда как длительность импульсов большинства релятивистских СВЧ приборов с взрывозмиссионными катодами не превышает 100 нс. Эксперименты опираются на аналитическую теорию взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с пространственно ограниченной плазмой, разработанную в ИОФ РАН, и численное моделирование с помощью отечественного кода «Карат». Эффективный и устойчивый режим усиления был получен после экспериментального обнаружения двух физических эффектов. Первый эффект состоит в подавлении отражённой от выходного устройства плазменной волны быстрой циклотронной волной электронного пучка. Второй эффект состоит в уменьшении абсолютного уровня шумов при высокой величине выходного сигнала, когда происходит переход от линейного режима усиления к нелинейному.

Эволюция гиротронов

Запевалов В.Е.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

На основе ретроспективного анализа отечественных и зарубежных работ по гиротронам для различных применений, выполненных за последние десятилетия [1-12] выяснены основные тенденции развития гиротронов различных частотных диапазонов и разного уровня выходной мощности.

Рассмотрены процессы развития основных подсистем гиротрона: сверхразмерного резонатора, электронно-оптической системы (электронной пушки и коллектора), системы вывода излучения, а также магнитных систем необходимых для его нормального функционирования.

Описаны основные области применения современных гиротронов и специфические требования в каждой области.

Приведен обзор последних достижений, а также основных проблем затрудняющих дальнейшее продвижение гироприборов по частоте и мощности и методы решения указанных проблем ведущими мировыми институтами и фирмами.

1. Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Мазеры на циклотронном резонансе. - В кн.: Наука и человечество, М: Знание, 1980, с.283-298
2. Gaonov-Grekhov A.V., Granatstein V.L. (1994). Applications of High-Power Microwaves, Artech House, Norwood, MA. M. Thumm, "State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers". KIT, Karlsruhe, 2009
3. Thumm M. High power gyro-devices for plasma heating and other applications. Int. J. Infrared. Millim. Waves, 26, 483-503 (2005)
4. Nusinovich G.S. "Introduction to the Physics of Gyrotrons" The Johns Hopkins University Press, Baltimore-London, 2004
5. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М: Физматлит, 2003
6. Tsimring Sh.E. "Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics", Published by John Wiley and Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 2007
7. Edgcombe C.J. (Editor), "Gyrotron Oscillators - Their Principles and Practice" Taylor and Francis, London, 1993
8. Kartikeyan M.V., Borie E., Thumm M.K.A. "Gyrotrons - High Power Microwave and Millimeter Wave Technology" Springer: Berlin, 2004
9. Fix A.Sh., Flyagin V.A., Goldenberg A.L., Khizhnyak V.I., Malygin S.A., Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E. The problems of increase in power, efficiency and frequency of gyrotrons for plasma investigations. Int. J. Electronics, 1984, vol.57, No.6, 821-826
10. Zapevalov V.E., Flyagin V.A., Denisov G.G., Kuftin A.N., Lygin V.K., Moiseev M.A., Fix A.Sh. Development of 1 MW output power level gyrotron for ITER. Plasma Devices and Operation. 1998, Vol. 6, pp.111-117
11. Zapevalov V. E., Denisov G. G., Flyagin V. A., et al. Development of 170 GHz/1 MW Russian gyrotron for ITER. Plasma Engineering and Design. 2001, Vol. 53, pp.377-385
12. Litvak A.G., Denisov G.G., Agapova M.V., et al Recent Results of Development in Russia of 170 GHz Gyrotron for ITER. The 35-th Int. Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2010, Sept.5- Sept.10 Roma, Italy, Conference Digest, p.Tu.-E1.1

Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов

Лукша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Архипов А.В.

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

Высокие уровни мощности современных гиротронов заставляют уделять пристальное внимание их эффективности, которая во многом определяется качеством винтового электронного потока (ВЭП) – "активной среды" этих приборов. Важным фактором, определяющим основные характеристики ВЭП на этапе его формирования перед поступлением в резонатор, являются развивающиеся в электронном пространственном заряде коллективные динамические процессы. Эти процессы являются следствием развития неустойчивостей разного типа – как высокочастотных с частотой, близкой в электронной циклотронной частоте, так и низкочастотных с частотой в диапазоне десятков-сотен мегагерц.

В докладе обобщаются результаты исследований динамических процессов в ВЭП гиро-приборов, выполненных на кафедре физической электроники СПбГПУ. Обсуждаются пороговые условия возбуждения, закономерности развития и характеристики низкочастотных колебаний пространственного заряда разных типов. Основное внимание уделяется колебаниям, связанным с развитием неустойчивости в объемном заряде в ловушке между катодом и пробкой магнитного поля. Представлены теоретические и экспериментальные данные о влиянии низкочастотных колебаний на характеристики ВЭП и о методах управления колебаниями при регулировании распределений электрического и магнитного полей. Обсуждаются также новые методы диагностики ВЭП, направленные на определение энергетических и скоростных распределений электронов и влияния на эти распределения развивающихся в электронном пространственном заряде динамических процессов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 11-02-01442 и Минобрнауки России в рамках договора № 11.G34.31.0041.

Оценка параметра сигнала по временному ряду в присутствии нестационарного шумового воздействия

Астахов О.В.¹, Смирнов Д.А.², Безручко Б.П.¹

1. СарГУ, Саратов

2. СФ ИРЭ РАН, Саратов

Исследование характеристик систем, подверженных шумовому воздействию является актуальной задачей радиофизики и теории колебаний. Данное воздействие можно разделить на две составляющие. Первая – динамический шум, влияющий на динамику исследуемой системы. Вторая – шум наблюдений, обусловленный как несовершенством измерительной техники, так и «помехами» от внешних систем. Существенным препятствием для решения многих задач анализа сигналов по временным рядам является не столько «динамический» («внутренний») шум, сколько шум наблюдений, искажающий получаемые данные об исследуемой динамике [2]. Без учёта влияния последнего оценки интересующих исследователя величин и проверка тех или иных гипотез может дать ошибочные результаты. Существуют традиционные способы учета стационарного шума наблюдений при оценке параметров и состояний по временному ряду. Однако, задача их оценки при наличии нестационарных шумов наблюдений в общем случае не решена и является предметом данной работы.

Нами исследуется оценка параметров и состояний авторегрессионного процесса (1,2), подверженного влиянию нестационарного шума наблюдений с различными характеристиками.

$$X_t = fX_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

$$Y_t = hX_t + \eta_t; \quad (2)$$

где f , h – управляющие параметры; ε_t – динамический шум; η_t – шум наблюдений; X_t – динамическая переменная; Y_t – наблюдаемая переменная. Решение задачи оценки состояния X и параметра f по наблюдаемому ряду Y основывалась на принципах оптимальной фильтрации Калмана. В качестве метода был выбран т.н. Unscented Kalman Filter, представляющий из себя рекурсивный математический алгоритм [1,3].

В ходе исследований была произведена оценка состояний и параметров исследуемой системы при добавлении аддитивного гауссовского шума, дисперсия которого менялась во времени. Рассмотрена эффективность различных способов учёта данной нестационарности с точки зрения минимизации среднеквадратичной ошибки оценки параметра. Проведено сопоставление результатов оценки параметров и состояний при учёте и без учёта нестационарности шума.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 11-02-00599-а, РФФИ № 10-02-00980, гранта У.М.Н.И.К.

1. Julier S., Uhlmann J.. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems // Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls. 1997.
2. Sitz A., Schwarz U., Kurths J. & Voss H.U.. Estimation of parameters and unobserved components for chaotic systems from noisy time series // Phys. Rev. E. 2002, V. 66, p. 016210.
3. Sitz A., Schwarz U. & Kurths J.. The unscented Kalman filter, a powerful tool for data analysis // Int. J. Bif. and Chaos. 2004, V.14, № 6, p. 2093-2105.

Несимметричное возбуждение прецессии намагниченности второго порядка в присутствии компенсирующего постоянного поля

Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

СыктГУ, Сыктывкар, ИРЭ РАН, Москва

В нормально намагниченной ферритовой пластине частота ферромагнитного резонанса приходится на дно спектра обменных волн, поэтому их параметрическое возбуждение исключается и амплитуда прецессии может достигать десятков градусов.

В работе [1] рассмотрена такая высокоамплитудная прецессия намагниченности при постоянном поле, меньшем поля размагничивания. Было показано, что в этом случае переменное поле круговой поляризации вызывает прецессию положения равновесия вектора намагниченности, имеющую синусоидальный характер, причем прецессионный портрет колебаний имеет вид правильного кругового кольца, заполненного малыми кольцами.

Настоящая работа посвящена исследованию прецессии положения равновесия в условиях несимметричного возбуждения, то есть тогда, когда поляризация переменного поля не является круговой. Показано, что в этом случае синусоидальный характер прецессии положения равновесия заменяется импульсным, а прецессионный портрет колебаний, сохраняя вид правильного кругового кольца, заполненного малыми кольцами, приобретает неравномерные сгущения, положение которых определяется характером несимметричности поля. В случае поперечной несимметричности переменного поля на прецессионном портрете наблюдаются два сгущения, расположенные диаметрально противоположно друг другу, в случае продольной несимметричности - только одно сгущение, расположенное на периферии большого кольца. Показано, что приложение продольного постоянного поля позволяет скомпенсировать аномальный характер прецессии при продольной несимметричности переменного поля, приводя к восстановлению синусоидального характер колебаний в сочетании с равномерным заполнением большого кольца малыми кольцами. Отмечена весьма высокая критичность компенсации по постоянному полю, составляющая сотые доли процента от его полной величины. Наблюдаемые явления объяснены на основе динамической векторной модели. Даются рекомендации для наблюдения описанных эффектов в эксперименте и обсуждается возможность их практического применения для конструирования устройств СВЧ диапазона, а также высокоточных датчиков постоянного и переменного полей.

Работа поддержана РФФИ (грант №10-02-01327-а).

1. Власов В.С., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *РЭ* **56** (2011) 84

Алгоритм определения амплитуд внешних и внутренних волн при встречном падении волн на многослойную структуру

Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И.

СыктГУ, Сыктывкар, ИРЭ РАН, Москва

Задачи о распространении волн через слоистые структуры имеют большое фундаментальное и практическое значение [1]. Прямой метод их решения при большом числе слоев требует раскрытия определителей высоких порядков, а методы матрицы и импеданса позволяют определить амплитуды лишь внешних волн, входящих и выходящих из структуры. В то же время, общая структура аналитических выражений для амплитуд волн в слоях структуры, получаемых прямым методом [2], позволяет создать простой алгоритм получения амплитуд внешних волн на основе пошагового преобразования заданных изначально ключевых выражений [3].

В настоящей работе предложен алгоритм получения подобных выражений позволяющий найти амплитуды не только внешних, но и всех внутренних волн многослойной структуры, в том числе при падении двух встречных волн. С его помощью получены амплитуды волн для трех, четырех и пяти слоев. Показана возможность численного решения задачи для произвольного числа N слоев, на основе двух циклов, повторяемых $N-2$ раз.

Работа предложенного алгоритма продемонстрирована на примере численного решения ряда задач. Так, показано, что при линейном увеличении волнового числа по длине структуры амплитуды волн прямого направления по мере увеличения номера слоя монотонно уменьшаются, а амплитуды волн обратного направления меняются осциллирующим образом. Период осцилляций определяется соотношением между полной длиной структуры и половиной средней длины волны. В случае, когда это соотношение намного превышает единицу, характер осцилляций приобретает вид нерегулярных скачков. Выявлена роль степени нарастания волнового числа, рассмотрены случаи линейного убывания волнового числа по слоям структуры, а также локальной неоднородности структуры колоколообразного вида.

Показана возможность применения алгоритма к задачам о распространении электромагнитных волн в многослойной ступенчато-неоднородной структуре для случаев нормального и наклонного падения волны на плоскость структуры.

Работа поддержана РФФИ (грант №10-02-01327-а).

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Nauka, Moscow, 1973.
2. Антонец И.В., Щеглов В.И. Распространение волн через тонкие слои и пленки. ИПО СыктГУ, Сыктывкар, 2010.
3. Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. *РЭ* **56** (2011) в печати.

Моделирование сложной динамики нелинейного полупроводникового осциллятора с учётом наличия центров захвата заряда

Мантуров А.О., Глуховская Е.Е.

СГТУ, Саратов

В работе приведены результаты моделирования сложной динамики нелинейного контура [1,2] с учётом наличия центров захвата неравновесного заряда (далее - ловушек) в р-п-переходе полупроводникового диода. Моделирование выполнено с использованием симулятора электронных схем LT Spice [3].

Согласно результатам моделирования, главной особенностью влияния ловушек на динамику нелинейного полупроводникового осциллятора является подавление хаоса в областях малых значений амплитуды внешнего воздействия. В случае присутствия ловушек с постоянной времени $\tau_S = 10^{-3}$ с, при напряжении воздействия менее 2В, реализуются режимы 1Т и 2Т. В случае отсутствия ловушек, или при малом значении постоянной времени $\tau_S = 10^{-6}$ с, наблюдается структура бифуркационной диаграммы, типичная для нелинейного контура [1]. В то же время, можно обнаружить небольшие различия, в частности, наличие скачков фазы при малых амплитудах внешнего воздействия $E = 0.5-1.3$ В.

Описанные эффекты могут быть объяснены с точки зрения процесса накопления и релаксации заряда на ловушках. При захвате ловушкой неосновных носителей происходит уменьшение заряда в области пространственного заряда (ОПЗ) р-п-перехода. Если время τ_S сопоставимо с $T/2$, где $T = 1/f$, то такая ловушка может быть вовлечена в процессы переноса заряда в диоде. Согласно известной гипотезе о природе сложных колебаний в нелинейном контуре [2], такой заряд может смещать начальные условия (общий накопленный заряд в диоде) в начале следующего периода внешнего воздействия $\varepsilon(t)$. Отрицательное напряжение на ёмкости ОПЗ $C_{b,d}$ при этом суммируется с напряжением внешнего воздействия, что приводит к всплеску тока в контуре. Этот ток приводит к инжекции неосновных носителей в ОПЗ и перезарядке ёмкости $C_{b,d}$ до положительного.

Сохраненный заряд частично рекомбинирует в ОПЗ, а также разряжается через индуктивность, создавая ЭДС индукции с обратным знаком.

Если вышеупомянутый заряд частично «заморожен» в ловушке, то не образуется напряжения смещения р-п-перехода в начале следующего периода воздействия, достаточного для возникновения более сложных колебательных режимов (например, хаотических колебаний). В этом случае реализуются релаксационные режимы с большими периодами (например, нТ). Указанные результаты соответствуют обсуждаемым численным и известным [4] натурным экспериментам.

1. James Testa, Jose Perez, Carson Jeffries «Evidence for Universal Chaotic Behavior of a Driven Nonlinear Oscillator», *Phys.Rev.Letters* v.**48**, №**11** (1982) p. 714-720.
2. J.M. Perez «Mechanism for Global Features of Chaos in a Driven Nonlinear Oscillator», *Physical Letters A* v.**32**, №**4**, (1985), p. 2513-2517.
3. Linear Tehnology [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.linear.com>
4. Ya.G. Fedorenko, V.B. Bayburin, A.O. Manturov «Features of Nonlinear Current Oscillations in MIS-Structure Connected with a Driven RL-Circuit», *Proc.NDES'98* (1998) p. 211-214.

Стабилизация одночастотных режимов генерации в четырехрезонаторном пролетном клистроне–генераторе

Емельянов В.В., Рыскин Н.М.

СарГУ, Саратов

В работах [1-3] предложен способ подавления паразитных колебаний в различных автогенераторах с запаздыванием (клистроны и ЛБВ с внешней обратной связью), являющийся развитием известного метода «управления хаосом» [4]. Основная идея предлагаемого метода состоит в ведении дополнительной цепи обратной связи (ОС) и в подборе времени задержки и фазового сдвига в дополнительной цепи ОС таким образом, чтобы компоненты сигналов на основной частоте после прохождения двух ветвей цепи ОС поступали на вход усилителя в фазе, а компоненты сигналов на автомодуляционных частотах — в противофазе и, таким образом, подавляли бы друг друга. Результаты численного моделирования показали, что метод позволяет значительно повысить максимальный ток электронного пучка, при котором возникает автомодуляция, и, соответственно, увеличить выходную мощность стационарных режимов генерации, а в ряде случаев — и КПД прибора. Однако в данных работах математический анализ базировался на численном интегрировании дифференциальных уравнений с запаздыванием. Исследования показывают, что такие модели качественно верно описывают всю совокупность автоколебательных режимов, наблюдаемых в эксперименте, в частности, переход от периодической генерации к автомодуляции и далее к хаосу. Однако данный подход имеет ряд ограничений и недостатков и не может полностью заменить численное моделирование методами «крупных частиц».

Представляет очевидный интерес рассмотреть задачу стабилизации стационарных режимов генерации в автогенераторах с запаздывающей ОС при использовании более строгих математических моделей. В связи с этим была разработана программа численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в приборах клистронного типа, в которой осуществляется решение самосогласованной задачи о взаимодействии электронного пучка с электромагнитным полем резонаторов. В программе совместно решаются уравнения движения частиц и уравнения возбуждения резонаторов. Уравнения возбуждения резонаторов численно интегрируются методом предиктор-корректор второго порядка точности. Для моделирования динамики электронного потока используется метод «частиц в ячейках». Разработанная программа применяется в задаче подавления режимов автомодуляции в четырехрезонаторном клистроне–генераторе. Использование данной программы позволило получить более достоверные оценки основных характеристик выходных сигналов генератора (мощности, КПД, время установления колебаний и др.) при стабилизации режимов одночастотной стационарной генерации.

1. Емельянов В.В., Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. *Радиотехника и электроника* **54**(6) (2009) 719.
2. Ryskin N.M., Khavroshin O.S. *IEEE Trans. Electron Devices* **55**(2) (2008) 662.
3. Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика* **17**(2) (2009) 66.
4. Pyragas K. *Phys. Lett. A* **170** (1992) 421.

Диаграмма направленности СВЧ излучения, возникающего при распространении магнитостатической волны в периодически неоднородном поле

Зубков В.И., Щеглов В.И.

ИРЭ РАН, Москва

Распространение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в неоднородно намагниченной ферритовой пленке в условиях, когда длина волны в магнитной среде приближается к длине волны в свободном пространстве, сопровождается интенсивным излучением электромагнитных волн (ЭМВ) [1]. В работе [2] наблюдалась диаграмма направленности такого излучения, имеющая два лепестка, наклоненные вперед по ходу распространения волны. В работе [3] такой характер диаграммы направленности был объяснен на основе модели ускоренного движения магнитных зарядов.

В настоящей работе на основе [3] рассмотрено излучение ЭМВ, возникающее при распространении ПМСВ в ферритовой пленке, намагниченной периодически неоднородным полем. Методом Гамильтона-Аулда рассчитаны параметры распространения ПМСВ, выявлена дискретная множественность расположения областей излучения. Определена диаграмма направленности излучения, показано, что дискретизация области излучения приводит к расщеплению диаграммы направленности на отдельные лепестки. Получено аналитическое выражение, описывающее диаграмму направленности для произвольного числа источников. Представлены его частные случаи для двух, трех, четырех и пяти источников.

Рассмотрена деформация диаграммы направленности при изменении количества формирующих ее источников. Показано, что при изменении числа источников количество, относительная амплитуда и угловое расположение главных лепестков сохраняется, а их ширина меняется в 4-5 и более раз. Рассмотрена деформация диаграммы направленности при изменении расстояния между источниками. Выявлено критическое значение расстояния, близкое к половине длины ПМСВ в пленке, при переходе через которое общая структура диаграммы изменяется, а главный лепесток сужается более чем в 6 раз по сравнению с лепестком от одного источника. Рассмотрена деформация диаграммы направленности при изменении затухания ПМСВ. Показано, что уменьшение затухания приводит к уменьшению количества и относительной амплитуды вторичных лепестков, наиболее эффективному при отрицательном затухании, причем в этом случае сужение диаграммы направленности по сравнению с диаграммой от одного источника превышает 4 раза.

1. Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. *РЭ* **38** (1993) 818
2. Вашковский А.В., Локк Э.Г. *РЭ* **40** (1995) 1030
3. Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. *РЭ* **46** (2001) 433

Системы передачи скрытого сообщения на основе генераторов с запаздыванием

Караваев А.С., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д.

СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

В последние годы были предложены различные способы передачи информационного сигнала, использующие хаотическую динамику: хаотическая маскировка, переключение хаотических режимов, нелинейное подмешивание, частотная модуляция хаотическим сигналом и другие [1, 2]. Для того чтобы повысить уровень защиты передаваемой информации, было предложено осуществлять скрытую передачу данных на основе систем с запаздыванием, демонстрирующих хаотическую динамику очень высокой размерности [3, 4]. Такие системы, в частности, распространены в оптике и СВЧ-электронике.

В работе были предложены 2 системы скрытой передачи информации. Одна из них использует нелинейное подмешивание информационного сигнала к хаотическому сигналу генератора с запаздывающей обратной связью передатчика и приемник, синхронизирующийся сигналом в канале связи, параметры которого близки к параметрам передатчика.

Работоспособность предложенной схемы была показана в численном эксперименте. Кроме того, был поставлен радиофизический эксперимент и был создан лабораторный макет такой цифровой передающей системы на основе микроконтроллеров. С помощью созданной лабораторной установки была продемонстрирована возможность скрытой передачи по цифровому каналу связи звукового сигнала.

Была также предложена новая схема передачи информации, основанная на модуляции времени запаздывания передающей системы и выделении информационного сигнала с использованием в приемнике двух систем с запаздыванием с различными управляющими параметрами.

В зависимости от выбора 1 из 2 возможных значений времени запаздывания передатчика сигналом в канале связи синхронизируется либо 1, либо 2 система в приемнике, что позволяет передавать бинарный код.

Работоспособность схемы продемонстрирована в численном эксперименте. Показано, что предложенная схема обеспечивает передачу бинарного сигнала без ошибок даже при высоких уровнях шума, сопоставимого с уровнем хаотической несущей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-02-00980) и президентской программы поддержки научных школ.

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. *УФН*. Т. 179, В. 12 (2009) 1281-1310
3. Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. *Phys. Rev. E*. 66 (2002) 026215
4. Караваев А.С. и др. *Письма в ЖТФ*. Т. 37, В. 14 (2011) 24-31

Трёхмерное моделирование электродинамических параметров неоднородной спиральной ЛБВ

Каретникова Т.А., Рожнев А.Г.

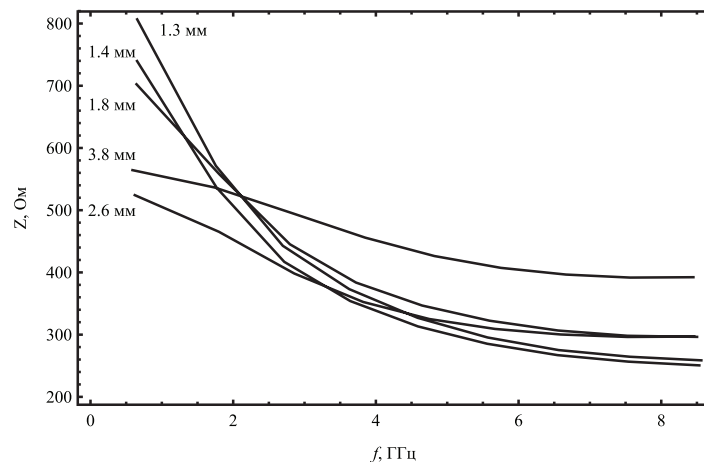
СарГУ, Саратов

Известно, что при расчете условий самовозбуждения в широкополосных спиральных ЛБВ необходимо адекватно учитывать взаимодействие электронного пучка с синхронными ему нулевой гармоникой прямой волны и (-1) -й гармоникой встречной волны. Связь между прямой и встречной волнами в таком случае обеспечивается, во-первых, за счет отражений от концевых и внутренних неоднородностей замедляющей системы (ЗС), и, во-вторых, за счет распределенного взаимодействия между этими волнами на неоднородных участках замедляющей системы. Второй случай реализуется, например, на участке плавного изменения шага спирали, обычно расположенного после локального поглотителя и предназначенного для увеличения эффективности взаимодействия.

Коэффициент связи между прямой и встречной волной, как показано в [1,2], равен $\kappa = Z_c^{-1} dZ_c/dx$, где Z_c — волновое сопротивление передающей линии, определяемое соотношением $Z_c = P/(2|I_0|^2)$, где P — мощность, переносимая вдоль ЗС в режиме бегущей волны, I_0 — амплитуда нулевой пространственной гармоника тока, текущего по спирали. Таким образом, для расчета условий самовозбуждения неоднородной ЛБВ, помимо традиционных электродинамических параметров — дисперсии, сопротивления связи и коэффициента затухания, необходимо также знать зависимость коэффициента связи прямой и встречной волн от частоты в рабочей полосе прибора.

В настоящем докладе развита методика моделирования волнового сопротивления и коэффициента связи прямой и встречной волн в неоднородной спиральной замедляющей системе с использованием трехмерной конечноэлементной программы. В качестве примера на рисунке представлены рассчитанные значения волнового сопротивления для ЛБВ 8537Н [3], работающей в частотном диапазоне 1.4-3.2 ГГц (цифры около кривых означают шаг спирали).

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-02-01280а.



1. Haddad G.I., Bevensee R.M. *IEEE Trans. on ED* (1963) **10** 389.
2. Antonsen T.M., Safier P., Chernin D.P. et al. *IEEE Trans. on PS* (2002) **30** 1089.
3. Abe D.K. , Mai T. Ngô M.T., Levush B. et al. *IEEE Trans. on PS* (2000) **28** 576.

От фазового цилиндра к фазовому тору

Лебедева Л.В.

ВГАВТ, Н. Новгород

Математическая модель ряда физических систем может быть /1,2/ представлена в виде обобщенного стандартного отображения. Фазовые картины этого отображения обладают периодичностью по одной из координат, поэтому отображение можно рассматривать как отображение цилиндра.

При малых значениях параметров в фазовом пространстве существует «притягивающий» слой, содержащий внутри себя все устойчивые аттракторы. Более того, известно соотношение параметров, при котором неподвижная точка – начало координат – является глобально асимптотически устойчивой. Увеличение параметров вызывает /3/ бесконечную последовательность бифуркаций рождения неподвижных точек («вращательного» типа). Устойчивые неподвижные точки, появляющиеся в результате этих бифуркаций, имеют свои области притяжения, на которые «распадается» притягивающий слой (тем не менее все траектории фазового пространства, начинающиеся вне этого слоя, приходят в него и остаются в нем). Общая ширина притягивающего слоя увеличивается.

Последовательность соответствующих бифуркационных значений параметра диссипации ограничена сверху числом «один». Фазовое пространство отображения при предельном значении параметра характеризуется следующим. 1) Притягивающий слой заполняет весь фазовый цилиндр. 2) Существует бесконечное множество устойчивых неподвижных точек. 3) Фазовая картина обладает периодичностью по каждой из двух переменных. 4) Отображение цилиндра может рассматриваться как отображение тора.

Проведено аналитическое и компьютерное исследования описанных процессов.

1. Белых В.Н. Модели дискретных СФС и их исследование.- В кн. Системы фазовой синхронизации./ Под ред. В.В.Шахгильдяна, Л.Н.Белюстиной. М.: Радио и связь, 1982, с.161-162.
2. Chirikov B.V. // Phys. Reports. 1979. Vol.52/ P. 265
3. Л.В.Лебедева Последовательность бифуркаций рождения вращательных циклов диссипативного отображения цилиндра // Межвузов. тематический сборник Моделирование и оптимизация сложных систем. Вып.275 ч.2, ВГАВТ. Н.Новгород, 1998.

Динамика магнетронного диода с автомодуляцией магнитного поля

Мантуров А.О., Лейман Е.И., Хороводова Н.Ю.

СГТУ, Саратов

Особенности движения зарядов в скрещенных электрическом и магнитном полях являются предметом анализа во многих областях математической физики [1,2] - физике замагниченной плазмы, теории электронных приборов и др. Благодаря высокой эффективности энергообмена в системе "электронный сгусток - электромагнитное поле" в скрещенных электрическом и магнитном полях возможно функционирование магнетронных генераторов, обладающих высоким КПД при генерации СВЧ колебаний вплоть до миллиметрового диапазона длин волн.

В то же время, актуальным представляется создание разновидностей генераторов высокочастотных колебаний, использующих взаимодействие движущегося заряда со скрещенными полями и, в то же время, обеспечивающих эффективную генерацию колебаний в низкочастотных диапазонах (сотни мегагерц), где изготовление и использование классических магнетронов оказывается технически неэффективным и экономически неоправданным.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования динамики тока и напряжения в магнетронном диоде с управляемой индукцией магнитного поля. В отличие от классического магнетронного генератора в исследованной конфигурации прибора отсутствует статическое магнитное поле, обычно создаваемое постоянным магнитом. Магнитное поле образуется за счет тока анода, например, при помощи соленоида, включенного во внешнюю цепь, последовательно с магнетронным диодом и источником постоянного (анодного) напряжения. Построена простая сосредоточенная модель, описывающая динамику анодного тока устройства в приближении малой плотности анодного тока. Показана возможность возбуждения автоколебаний, в том числе на низких частотах (порядка десятков - сотен мегагерц). Определены области возбуждения и существования автоколебаний.

1. Ленерт Б. Динамика заряженных частиц: пер. с англ., М.: Атомиздат, 1967, 251 с.
2. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Советское радио, 1973.

Сложная динамика фототока во входных цепях малошумящих усилителей оптических сигналов

Данилова Т.В., Мантуров А.О.

СГТУ, Саратов

Нелинейный полупроводниковый осциллятор (нелинейный контур [1]) является основой различных электронных схем для обработки сигналов. В частности, известны такие применения нелинейного контура как выпрямительные схемы и амплитудные детекторы. В то же время существуют схемотехнические решения, в которых нелинейный контур реализован в неявном виде, - например, за счет наличия паразитных индуктивностей и сопротивлений в цепях, содержащих полупроводниковые р-п-переходы. К таким решениям, в частности, относятся входные каскады твердотельных широкополосных усилителей. В настоящей работе рассмотрено влияние сложной динамики паразитного нелинейного контура во входном каскаде широкополосного малошумящего оптического усилителя, используемого в задачах обработки оптических сигналов, на предельную чувствительность оптического приемника.

Выполнено моделирование схемы широкополосного трансимпедансного усилителя, в качестве источника сигнала которого использован р-п-переход фотодиода. Моделирование изучаемых схем было выполнено с использованием симулятора LT Spice [2]. Для моделирования р-п-перехода фотодиода была использована методика построения модели, предложенная в [3].

Проведен анализ возможности возбуждения сложнопериодических колебаний в нелинейном контуре, образованном р-п-переходом фотодиода, паразитными индуктивностями монтажа схемы и сопротивлением базы р-п-перехода фотодиода. Рассмотрены два основных режима работы схемы фотопреобразования: в режиме фотовольтаической генерации и в режиме обратносмещенного р-п-перехода. В качестве силового внешнего воздействия рассмотрена фотоинжекция неосновных носителей при воздействии на р-п-переход фотодиода оптического сигнала, интенсивность которого изменяется по гармоническому закону.

Показано, что в изучаемых схемах в определенных областях плоскости управляющих параметров "частота силового воздействия - интенсивность оптического сигнала" реализуется сценарий усложнения динамики колебаний фототока "переход к хаосу через каскад удвоения периода". Общая структура разбиения плоскости управляющих параметров для изучаемых систем оказывается близкой к известным для нелинейного контура [1]. В областях возбуждения хаотических колебаний фототока возможно существенное ухудшение отношения "сигнал-шум" и соответствующее уменьшение динамического диапазона фотоприемника.

1. Baxter J.H., Bocko M.F., Douglass D.H. *Phys. Rev. A* **41** (1990) №2, p.619- 625.
2. <http://www.linear.com/designtools/software/>
3. <http://www.spectrum-soft.com/news/summer2004/photodiode.shtm>

Взаимодействие светового импульса с углеродными наноструктурами

Пак А.В., Белоненко М.Б., Лебедев Н.Г.

ВолГУ, Волгоград

В работе исследуется распространение дискретных пространственнолокализованных состояний в системе волноводов в форме примесных графеновых и биграфеновых нанолент, рассматриваемых в периодической модели Андерсона. Для вектор-потенциала электрического поля было получено эффективное уравнение, имеющее вид аналога классического уравнения Синус-Гордона. Изучены эффекты, наблюдаемые при изменении ширины первоначального импульса в примесной графеновой и биграфеновой лентах и зависимости от ширины самой наноленты.

Из проведенного исследования видно, что импульс на центральном волноводе практически не меняет своей формы в зависимости от начальной ширины импульса, в отличие от соседних с центральным волноводов. С удалением от центрального волновода импульс постепенно угасает. Так меняя первоначальную ширину центрального импульса, мы можем управлять амплитудой электромагнитного поля на соседних волноводах. Изучив влияние величины электростатического потенциала на процесс распространения электромагнитного импульса в системе биграфеновых волноводов, можно сделать вывод, что он практически не оказывает никакого воздействия на величину и форму импульса. Это обстоятельство может быть связано с наличием в системе адсорбированного атома водорода.

1. Novoselov K. S. et al. *Nature* Vol. **438** (2005) 197–200.
2. Smirnov E., Stepic M., Ruter C.E. et al. *Opt. Lett* Vol. **31** No.15 (2006) 2338-2340.
3. Belonenko M.B., Popov A.V., Lebedev N.G., Pak A.V., Zhukov A.V. *Phys. Lett. A* Vol. **375** (2011) 946-952.
4. Изюмов Ю.А., Чашин И.И., Алексеев Д.С. Теория сильно коррелированных систем. Метод производящего функционала. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006.
5. Степанов Н.Ф. Квантовая механика и квантовая химия. М.: Мир, 2001.

Анализ динамики протяжённых лазерных пучков, модулированных по частоте, в условиях проявления резонансных нелинейных интерференционных эффектов

Пластун И.Л., Мисюрин А.Г., Оруджев А.А.

СГТУ, Саратов

На основе пространственно-временной численной модели [1] исследуется динамика поведения протяженного лазерного пучка, модулированного по частоте, распространяющегося в трёхуровневой Λ -системе в условиях проявления резонансных нелинейных интерференционных эффектов, таких как когерентное пленение населённостей (КПН) [2] и электромагнитно - индуцированная прозрачность (ЭИП). Численная модель основана на совместном решении волновых уравнений для поля накачки и модулированного пробного сигнала, а также системы кинетических уравнений для матрицы плотности вероятности нахождения частиц среды в определённом состоянии в приближении вращающегося поля с учетом релаксации, характеризующей нелинейный отклик среды. Для численного решения волновых уравнений была использована неявная разностная схема второго порядка, основанная на методе расщепления, с разложением поля по поперечной координате по модам Гаусса-Лагерра [3], совместно с решением системы уравнений для матрицы плотности на основе метода Рунге-Кутты 4 порядка.

Показано, что поскольку период модуляции пробного поля сравним с атомными временами релаксации, возникает задержка отклика среды, вызывающая, в свою очередь, сдвиг и деформацию резонансов КПН и ЭИП, а также появление нестационарных осцилляций населённостей энергетических уровней. В условиях проявления эффектов резонансного самовоздействия, возникающих при достаточно высокой интенсивности излучения в случае, когда частота распространяющегося пучка близка к частоте атомного перехода был обнаружен эффект деления частоты наведённой амплитудной модуляции. На основе анализа временных зависимостей интенсивности и размера пятна на выходе из среды, а также фазовых портретов и спектров мощности, для данной системы были найдены различные динамические режимы.

1. Пластун И.Л., Дербов В.Л. *Компьютерная оптика*. **33** (2009) №3 с.233-239.
2. Агапьев Б.Д., Горный М.Б., Матисов Б.Г., Рождественский Ю.В. *УФН*. **163** (1993) №9 с.1-36
3. Melnikov L.A., Derbov V.L., Veshneva I.V., Konukhov A.I. *Computers Math. Applic.* **34** (1997) № 7/8 881-909

Дискретные модели трех связанных автогенераторов

Кузнецов А.П.^{1,2}, Седова Ю.В.¹, Тюрюкина Л.В.^{1,2}

¹ СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

² СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

Предложена система дискретных моделей, описывающая динамику трех связанных автогенераторов. Рассмотрение ведется в рамках фазового приближения [1,2] с последующей «дискретизацией» фазовых уравнений. Такой подход существенно облегчает возможности компьютерного моделирования, направленного на выявление областей разнообразных периодических режимов, режимов двух- и трехчастотной квазипериодичности и хаоса. Обнаружены такие феномены, как резонансная паутина Арнольда на плоскости относительных собственных частот автогенераторов и др. Обсуждаются сценарии разрушения картины квазипериодических колебаний и структуры основных резонансов при возрастании уровня связи. Особое внимание уделено анализу особенностей картины, определяемых типом связи. Проведено сравнение результатов для системы с диссипативной связью и известного отображения для фаз Кима-Остланда [3,4]. Показано, что физически мотивированное отображение в случае диссипативной связи демонстрирует существенные отличия от формальной модели. Обсуждаются причины таких отличий, в частности, конструируются дифференциальные уравнения по типу осцилляторов Ван-дер-Поля для модели [3,4]. Для автогенераторов с реактивной (емкостной) связью выявлены различные возможности, связанные с синфазной и противофазной синхронизацией. В частности, синфазные колебания трех генераторов, синфазные колебания двух крайних в сочетании с противофазными колебаниями центрального и т.д. Обсуждается фазовая мультистабильность в системе с реактивной связью, когда режимы полной синхронизации разного типа сосуществуют с квазипериодическими колебаниями.

Работа поддержана РФФИ-ННМО (грант № 11-02-91334).

1. Кузнецов А.П., Сатаев И.Р., Тюрюкина Л.В. *Нелинейная динамика* **6** (2010) №4, 693-717.
2. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Феоктистов А.В. *Нелинейная динамика* **5** (2009) №2, 237-252.
3. Baesens C., Guckenheimer J., Kim S., MacKay R.S. *Physica D* **49** (1991) 387-475.
4. Kim S., MacKay R.S., Guckenheimer J. *Nonlinearity* **2** (1989) 391-404.

Экспериментальная оценка параметров динамических систем с изменяющимися параметрами

Семенов В.В., Маляев В.С.

СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

Оценка параметров динамических систем, содержащих источники шума, по реализации динамических (фазовых) переменных является частью глобальной задачи реконструкции динамических систем и, на данный момент, сравнительно мало изучена. Актуальность

задач такого характера связана с использованием методов реконструкции в устройствах защиты и передачи секретной информации. При этом требуется достаточно точная оценка управляющих параметров динамической системы, т.к. передаваемый полезный сигнал должен быть зашифрован в управляющих параметрах системы. Но при работе с натурными системами приходится учитывать наличие шумов, особенности работы АЦП и ЦАП, ограниченную точность измерений и т.д. Все это осложняет задачу и ограничивает применение уже имеющихся методов. Поэтому вызывает особый интерес проблема применения методов реконструкции динамических систем и оценки управляющих параметров на практике.

В рамках работы рассматривается возможность приемлемой оценки параметров динамических систем в натурном эксперименте. Создана экспериментальная установка, представляющая собой генератор Ресслера (с возможностью подключения внешнего шума). Карты режимов колебаний, полученные в численном и натурном эксперименте, свидетельствуют о том, что установка с большой точностью повторяет динамику математической модели, следовательно, возможно ее применение для успешной оценки управляющих параметров в реальных системах. При проведении ряда экспериментов было выявлено: при постоянном значении оцениваемого параметра возможна оценка параметра системы с большой точностью, несмотря на наличие в системе источников шума. Хорошая оценка параметра была получена для различных режимов колебаний системы. Эти результаты свидетельствуют о том, что возможно дальнейшее развитие работы для осуществления шифрования/дешифрования и передачи информации. Для этого необходимо ответить на ряд важных вопросов. 1) Возможна ли приемлемая оценка в случае если параметр изменяется с течением времени (например по синусоидальному закону), ведь задаваемый в параметры системы полезный сигнал может быть каким угодно. 2) Если оценка параметров возможна, то каковы границы применимости разработанных методов (в каких промежутках должна находиться частота передаваемого сигнала для осуществления успешной оценки параметров, как должны соотноситься частота полезного сигнала и частота колебаний исследуемой динамической системы и т.д.). Вопросам данной тематики и посвящена наша работа.

1. В.С. Маляев, Т.Е. Вадивасова. Оценка параметров зашумленных динамических систем. //Нелинейная динамика, 2010, т.6, №2, с. 267-276.
2. Маляев В.С., Вадивасова Т.Е. Возможность оценки параметров зашумленной динамической системы по реализации колебаний // Статистическая физика и информационные технологии. Материалы Международной школы – семинара «Statinfo-2009». Саратов. ООО ИЦ «Наука», ISBN 978-5-91272-957-7, 2009. С.95-98.
3. Павлов А.Н., Янсон Н.Б., Анищенко В.С., Реконструкция динамических систем // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, №9, С. 1075-1092.
4. Timmer J., Parameter estimation in nonlinear stochastic differential equations // Chaos, Solitons & Fractals. 2000. V.11. P.2571-2578.

Экспериментальная реализация генератора квазипериодических колебаний; синхронизация связанных генераторов

Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Селезнев Е.П., Станкевич Н.В.

СФ ИРЭ РАН, Саратов,

СГТУ, Саратов

Квазипериодические колебания широко распространены в природе и технике, включая радиофизику и радиотехнику [1-2]. В работах [3-4] предложена и исследована численно трехмерная динамическая система, характеризующаяся двумя несоизмеримыми временными масштабами и представляющая собой гибрид генератора релаксационных колебаний и генератора с жестким возбуждением. Эта модель демонстрирует автономные квазипериодические колебания, а также сопутствующие явления, такие как бифуркация Неймарка-Саккера, переход к хаосу через разрушение инвариантной кривой.

В настоящей работе предлагается экспериментальная реализация такого автономного генератора квазипериодических колебаний. Создана электронная схема на основе полевого транзистора, которую приближенно можно описать математической моделью, предложенной в [3-4]. В работе представлены основные иллюстрации генератора, построены экспериментальные карты динамических режимов, сопоставлены результаты численного моделирования и радиофизического эксперимента.

Также исследована динамика двух диссипативно связанных генераторов в режиме автономных квазипериодических колебаний:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{1,2} - (\lambda + z_{1,2} + x_{1,2}^2 - \frac{1}{2}x_{1,2}^4)\dot{x}_{1,2} + \omega_{01,02}^2 x_{1,2} + M_C(\dot{x}_{1,2} - \dot{x}_{2,1}) &= 0, \\ \dot{z}_{1,2} &= \mu - x_{1,2}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_{1,2}$ и $z_{1,2}$ - динамические переменные первого и второго генераторов, $\omega_{01} = \omega_0$ и $\omega_{02} = \omega_0 + \Delta$ - собственные частоты генераторов с жестким возбуждением, Δ - частотная расстройка генераторов, μ - частота релаксационного генератора, M_C - коэффициент связи. Обнаружено, что при малых частотных расстройках Δ в системе (1) может наблюдаться фазовая и полная синхронизация. Для генераторов в режиме квазипериодических колебаний были введены мгновенные фазы и средние наблюдаемые частоты каждого генератора, анализ которых позволил обнаружить области фазовой синхронизации квазипериодических колебаний на плоскости параметров (Δ, M_C) . Также для системы построены карты динамических режимов, бифуркационные деревья, фазовые портреты, спектры Фурье. С помощью анализа полного спектра показателей Ляпунова в системе идентифицированы области двух-, трех- и четырехчастотных квазипериодических колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-91334-ННИО)

1. Пиковский А., Розенблум М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
2. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, 1997.
3. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Станкевич Н.В. Автономный генератор квазипериодических колебаний *Изв. ВУЗов. ПНД* **18** №2 (2010) 51.
4. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Stankevich N.V. A simple autonomous quasiperiodic self-oscillator *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations* **15** (2010) 1676.

К теории синхронизации автомодуляционных колебаний внешним сигналом

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

СарГУ, Саратов

Современный этап развития радиоэлектроники характеризуется повышенным интересом к освоению коротковолновых диапазонов электромагнитных волн. При создании подобных источников естественным образом происходит переход к приборам с пространственно развитыми «сверхразмерными» электродинамическими структурами, которые являются принципиально многомодовыми. Обеспечение одномодовой генерации в таких приборах является фундаментальной проблемой, которой уделяется большое внимание. Недавно в работе [1] нами была развита теория синхронизации двухмодовой автоколебательной системы в случае, когда взаимодействие между модами носит чисто энергетический характер (конкуренция мод).

Представляет интерес обобщение этих результатов на более сложные системы взаимодействующих мод. В настоящей работе рассматривается система трех взаимодействующих мод с эквидистантным спектром.

$$\dot{A}_0 + (\gamma + i\omega_0)A_0 = \alpha e^{-i\omega_0} \left((1 - |A_0|^2 - 2|A_+|^2 - 2|A_-|^2) A_0 - 2A_0^* A_+ A_- \right) \quad (1)$$

$$\dot{A}_{\pm} + (\gamma + i\omega_{\pm})A_{\pm} = \alpha e^{-i\omega_{\pm}} \left((1 - |A_{\pm}|^2 - 2|A_0|^2 - 2|A_{\mp}|^2) A_{\pm} - A_0^2 A_{\mp}^* \right) \quad (2)$$

Эти уравнения описывают взаимодействие центральной моды с частотой ω_0 и боковых мод (сателлитов) с частотами $\omega_{\pm}$, которые расположены относительно эквидистантно относительно основной: $\omega_0 \approx (\omega_+ + \omega_-)/2$.

Здесь A_0 , $A_{\pm}$ — медленно меняющиеся амплитуды колебаний соответствующих мод, α — параметр усиления, γ — параметр диссипации. Параметры системы подбираются таким образом, что при α меньше некоторого порога α_{sm} возможно возбуждение только основной моды, а при превышении этого порога возможно возникновение сателлитов. Таким образом данная система описывает возникновение автомодуляции.

В настоящей работе представлены результаты изучения вынужденной синхронизации данной системы внешним гармоническим сигналом. Рассматривались случаи воздействия на основную моды (уравнение (1)) и на частоте одного из сателлитов (уравнение (2)). Теоретически проанализирована устойчивость режимов синхронизации, проведено численное моделирование. Построены резонансные кривые и языки синхронизации для различных случаев. Проведено сопоставление с результатами, полученными при изучении синхронизации автомодуляционных колебаний в распределенной автоколебательной системе с запаздыванием [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-02-01411-а).

1. Перегородова Е.Н., Рыскин Н.М., Усачева С.А. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика* **19**, № 3 (2011).
2. Usacheva S.A., Ryskin N.M. *Physica D*, (2012), **242**, doi:10.1016/j.physd.2011.10.005 (in Press).

Сверхвысокочастотные спин-волновые линии задержки на основе пленок железо-иттриевого граната с щелевыми антеннами

Устинов А.Б.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

Спиновые волны (СВ), распространяющиеся в ферромагнитных пленках, имеют широкие возможности применения для обработки и генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Разнообразие дисперсионных характеристик СВ, а также различные способы изменения их вида, позволили создать линии задержки различных типов [1-4]. Для возбуждения СВ можно использовать антенны, выполненные в виде отрезков одиночных и многоэлементных микрополосковых линий, щелевых линий, копланарных волноводов, а также их комбинаций. В настоящее время наибольшее распространение получили микрополосковые антенны. Целью настоящей работы являлось исследование спин-волновой линии задержки с щелевыми антеннами. Экспериментальный макет устройства был изготовлен на основе пленок феррита железо-иттриевого граната (ЖИГ) с намагниченностью насыщения 1750 Гс и линейным параметром диссипации около 0.5 Э. В экспериментах использовались две пленки с толщинами 18 и 83 мкм. Для возбуждения и приема СВ использовались щелевые антенны шириной 50 мкм, расстояние между которыми составляло 10 мм. Подвод СВЧ мощности к антеннам осуществлялся микрополосковыми линиями с волновым сопротивлением 50 Ом через специально разработанные микрополосково-щелевые переходы. Все элементы были выполнены методом фотолитографии на подложке из поликора толщиной 0.5 мм. Макет устройства помещался в постоянное магнитное поле, направленное в плоскости пленки параллельно антеннам и перпендикулярно направлению распространения СВ. Поле менялось в диапазоне от 900 до 2200 Э. Выбор описанной конструкции был обусловлен двумя факторами. Во-первых, при использовании щелевых антенн одна из сторон пленки оказывается экранированной металлической плоскостью, что приводит к увеличению групповой скорости СВ и расширению области их возбуждения. Во-вторых, такая взаимная ориентация поля и пленки соответствует распространению в ней поверхностных спиновых волн, которые наиболее сильно "чувствуют" близость металла к поверхности пленки. Результаты измерений показали, что полоса пропускания линии задержки на пленке ЖИГ толщиной 83 мкм достигает 1.8 ГГц. При толщине пленки 18 мкм полоса составляла 0.8 ГГц. В пределах полосы пропускания время задержки возрастает от 20 нс до 40 нс для тонкой пленки и от 5 нс до 15 нс для толстой пленки. Таким образом, использование щелевых антенн и сравнительно толстых пленок позволяет существенно расширить полосу пропускания СВЧ сигнала спин-волновых приборов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ.

1. Adam J.D. *IEEE* **76** (1988) 156.
2. Ishak W.S. *IEEE* **76** (1988) 171.
3. Ustinov A.B., Demidov V.E., Kalinikos B.A. *Electronics Letters* **37** (2001) 1161.
4. Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Кожевников А.В. *Письма в ЖТФ* **36** (2006) 45.

Особенности распространения импульсных СВЧ-сигналов в одномерном магнетонном кристалле

Шешукова С.Е., Бегинин Е.Н., Никитов С.А.

СарГУ, Саратов

В последние годы активно исследуются нелинейные явления, связанные с распространением импульсных СВЧ-сигналов в линиях передачи с магнетонными кристаллами (МК) [1]. Особое внимание уделяется изучению щелевых солитонов, которые формируются в запрещенных зонах МК за счет нелинейности среды и дисперсии вносимой пространственной периодичностью параметров МК. Щелевые солитоны наблюдались, например, в оптике при прохождении мощного оптического импульса через световодную брэгговскую решетку [2]. В МК на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) щелевые солитоны магнитостатических волн (МСВ) наблюдались на частотах выше 4 ГГц в условиях четырех-магнетонных (4М) процессов распада [3]. Однако, представляет интерес изучение механизмов и особенностей возбуждения щелевых солитонов в МК в области частот ниже 3 ГГц, где трех-магнетонные (3М) процессы распада разрешены, это обусловлено тем, что пороговые уровни мощности для 3М-процессов на этих частотах существенно меньше пороговых уровней для 4М-процессов.

Для проведения экспериментальных исследований использовался макет линии задержки с микрополосковыми антеннами, разнесенными на расстояние 4 мм. МК был выполнен на основе пленки ЖИГ толщиной 4 мкм с протравленными канавками глубиной - 0.7 мкм и шириной 70 мкм. Период канавок 100 мкм. Макет с МК помещался в однородное магнитное поле, касательное к поверхности и параллельное антеннам. В данной конфигурации в МК возбуждались поверхностные МСВ. На вход линии задержки подавались прямоугольные СВЧ импульсы с мощностью от -20 дБмВт до 10 дБмВт и различной длительности (120-480 нс). Частота несущей импульсов лежала как в запрещенной зоне МК, так и вне нее. Форма входного и выходного сигнала контролировалась на осциллографе. Было получено, что при значении входной мощности импульса больше порогового и частотой несущей находящейся в запрещенной зоне МК, за фронтом выходного сигнала возникает последовательность импульсов. При этом отдельные импульсы за время прохождения через МК успевали сформироваться в щелевой солитон с практически постоянной фазой огибающей. СВЧ- импульсы с частотой несущей лежащей вне запрещенной зоны имели вид характерный для импульсов ПМСВ в однородных ферритовых пленках в условиях 3М процессов распада. Для теоретического исследования щелевых солитонов была построена модель распространения импульса в МК на основе нелинейного уравнения Шредингера с учетом 3М процессов распада ПМСВ.

Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ (проект 11.G34.31.0030) и ФЦП (проекты № 2010-1.2.2-123-019-002, 2011-1.2.2-215-009-055).

1. Дроздовский А.В., Черкасский М.А., Устинов А.Б. и др. *Письма в ЖЭТФ* **91** (2010) 17.
2. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. Пер. с англ. под ред. Розанова Н.Н. Физматлит, Москва, 2005.
3. Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Demidov V.E. et al. *Phys. Rev. B* **81** (2010) 180406.

Отражение электромагнитных волн от композиционной среды, содержащей анизотропные ферритовые элементы

Зубков В.И., Щеглов В.И.

ИРЭ РАН, Москва

В бигиротропной среде в направлении, перпендикулярном приложенному магнитному полю, могут распространяться две независимые волны - гиромагнитная и giroэлектрическая [1]. В настоящей работе найдены поля гиромагнитной волны, показано, что кроме поперечной такая волна имеет также продольную составляющую магнитного поля. Для описания характеристик среды введены понятия линейномагнитного и гиромагнитного импедансов. Рассчитан тензор магнитной проницаемости для композиционной среды, состоящей из вкрапленных в немагнитную матрицу анизотропных ферритовых сфер [2]. Показано, что при равномерном распределении ориентации осей анизотропии по всему пространству тензор проницаемости такой среды принимает чисто гиротропный характер. На основе полученного тензора рассчитан закон дисперсии гиромагнитной волны в композиционной среде. Показано, что дисперсионная кривая содержит две области, где волновое число стремится к бесконечности, между которыми имеется область, где каждому значению волнового числа соответствуют две частоты, причем верхняя ветвь дисперсионной кривой соответствует прямым волнам, а нижняя - обратным. Рассмотрено отражение и прохождение гиромагнитной волны через плоскую границу раздела двух бигиротропных композиционных сред при нормальном падении. Найдены поля распространяющихся волн и коэффициенты отражения и прохождения, выраженные через импедансы обеих сред. Рассмотрены частотные зависимости коэффициентов отражения и прохождения при распространении волны из менее плотной среды в более плотную и обратно. Показано, что в обоих случаях коэффициенты отражения и прохождения резко возрастают (до двух порядков) в области высокочастотных экстремумов восприимчивости, в интервале, где одна из сред обладает гиротропной активностью, а другая такой активности не имеет. Экстремальный характер частотного поведения коэффициентов отражения и прохождения сопоставлен с законом дисперсии гиромагнитных волн в обеих средах. Показано, что отражение максимально в интервале между высокочастотными границами областей гиромагнитных волн в обеих средах, а главный экстремум располагается несколько ниже этого интервала.

1. Зубков В.И., Щеглов В.И. *РЭ* **47** (2002) 1101
2. Зубков В.И., Щеглов В.И. *РЭ* **55** (2010) 488

Исследование прохождения двухчастотных сигналов в полосе брэгговского резонанса одномерного магннного кристалла

Гришин С.В., Дулин Ю.А., Никитов С.А., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

На сегодняшний день большой интерес представляют исследования характеристик периодических структур на основе ферромагнитных пленок, так называемых, магннных кристаллов [1]. Основной особенностью таких структур является возникновение запрещенных зон в полосе возбуждения магннстатических волн (МСВ) за счет явления брэгговского резонанса. Магннные кристаллы по аналогии с оптическими фотонными кристаллами [2] должны демонстрировать более широкий спектр нелинейных явлений по сравнению с однородными ферромагнитными пленками. Однако к настоящему времени нелинейные процессы в таких структурах исследованы недостаточно. Можно указать лишь отдельные работы в этом направлении, в которых исследовались пороги тремагннных (ЗМ) процессов распада магннстатических волн (МСВ) [3] или особенности формирования солитонов огибающей в области частот, где ЗМ процессы распада МСВ запрещены [4].

В работе приводятся результаты экспериментального исследования амплитудных характеристик линии задержки, выполненной на основе одномерного (1D) магннного кристалла, в одночастотном и двухчастотном режимах при уровнях мощности СВЧ сигналов, превышающих порог трехволнового взаимодействия. Показано, что вблизи центральной частоты первой запрещенной зоны при превышении большим сигналом порога ЗМ процессов распада на величину большую, чем 10 дБ, исследуемая линия передачи может работать либо как ограничитель мощности, либо как усилитель отношения сигнал/шум в зависимости от уровня мощности малого сигнала.

В качестве 1D магннного кристалла использовалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) шириной 3.5 мм, длиной 10 мм и толщиной 22 мкм. На поверхности пленки ЖИГ вдоль ее короткой стороны была вырезана микроструктура в виде параллельных канавок, имеющих длину 3.5 мм, ширину 2.8 мкм и глубину 0.2 мкм. Период микроструктуры имел значение 200 мкм, а длина всей периодической структуры была 6.2 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (проект № 11.G34.31.0030) и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (проект № 14.740.11.0612)

1. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., *ДАН* **380**, (2001) 469.
2. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам / Пер. с англ. под ред. Розанова Н.Н. Физматлит, Москва, 2005.
3. Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Казаков Г.Т. и др. *Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика* **15**, (2007) 58.
4. Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Demidov V.E., Demokritov S.O., *Phys. Rev. B* **81**, (2010) 180406.

Генерация хаотических СВЧ импульсов в кольцевом автогенераторе на основе ЛБВ-усилителя мощности и нелинейной линии передачи с ферромагнитной пленкой под внешним воздействием

Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Манышев Р.А., Скороходов В.Н.

СарГУ, Саратов

В работе представлены результаты экспериментального исследования режимов хаотической генерации в кольцевой автоколебательной системе на основе ЛБВ-усилителя мощности и объемного резонатора при использовании в цепи внешней обратной связи нелинейной линии передачи на поверхностной магнитостатической волне (ПМСВ). В исследуемой автоколебательной системе ЛБВ-усилитель мощности работал в режиме малого входного сигнала и использовался, в основном, для компенсации потерь в кольце. ЛБВ-усилитель мощности имел коэффициент усиления в линейном режиме $K > 20$ дБ в полосе частот 1.9-4 ГГц и мощность насыщения $P_{sat} = +33$ дБмВт при токе пучка $I_0 = 60$ мА и ускоряющем напряжении $U_0 = 2500$ В. Компрессия коэффициента усиления на 1 дБ наблюдалась при уровне входной мощности $P_{in} = -2$ дБмВт. Нелинейная линия передачи на ПМСВ представляла собой широкополосную линию задержки, в которой возбуждение ПМСВ наблюдалось на частотах, где параметрические процессы трехволнового взаимодействия спиновых волн разрешены. Генерация хаотического СВЧ сигнала была обусловлена процессами параметрического взаимодействия спиновых волн.

В качестве полосового фильтра использовался микрополосковый полосно-пропускающий фильтр, который имел в полосе пропускания минимальный уровень ослабления $A_0 = 10$ дБ на частоте $f_0 = 1.979$ ГГц, ширину полосы пропускания по уровню 3 дБ $f_{3\text{ дБ}} = 80$ МГц и по уровню 40 дБ $f_{40\text{ дБ}} = 191$ МГц. В автономном режиме автоколебательная система генерировала хаотический сигнал на частотах десяти соседних кольцевых мод. В качестве внешнего воздействия использовались импульсно-модулированный (ИМ) или узкополосный шумовой СВЧ сигналы, которые подавались на вход ЛБВ-усилителя мощности. При этом автогенератор работал в режиме развитого динамического хаоса. При определенной интенсивности внешнего воздействия в системе генерировались хаотические СВЧ импульсы. В случае периодического воздействия такая последовательность была периодической, а в случае шумового воздействия - случайной. Механизм генерации СВЧ импульсов заключается в подавлении хаоса (вынужденная синхронизация) на временных интервалах, на которых внешнее воздействие превышает некоторое пороговое значение. Частота несущей ИМ СВЧ сигнала или центральная частота шумового СВЧ сигнала имела значение $f = 2.9$ ГГц и была отстроена от центральной частоты фильтра, определяющего центральную частоту хаотического СВЧ сигнала, на величину порядка 1 ГГц. При этом частота внешнего воздействия находилась в рабочей полосе частот ЛБВ-усилителя мощности. Исследовано влияние интенсивности ИМ СВЧ сигнала и шумового СВЧ сигнала на величину времени корреляции генерируемого хаотического СВЧ сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00047) и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (проект № 14.740.11.1078)

Увеличение фазовой скорости волны в ЛБВ постепенным увеличением зазора между рёбрами экрана и спиралью снижает вторую гармонику

Данилов А.Б., Ильина Е.М., Рафалович А.Д.

ФГУП НПП «Алмаз», Саратов

В [1] предложено увеличение фазовой скорости по направлению к выводу энергии для повышения КПД ЛБВ. В [2,3] оно применено для уменьшения уровня второй гармоники. Увеличение фазовой скорости достигалось плавным увеличением шага спиральной ЗС. Однако при этом частота минус первой пространственной гармоники приближается к рабочей полосе частот [4], облегчая самовозбуждение ЛБВ на обратной волне. Ф.П. Кузьминым [5] было осуществлено скачкообразное увеличение зазора между ребрами экрана и спиралью, что улучшило полосовые характеристики ЛБВ. В данном докладе рассмотрен вариант с постепенным увеличением зазора (рис. 1а), при котором фазовая скорость волны возрастает (рис. 1б). Расчет дал уменьшение уровня второй гармоники на выходе на 8 дБ (по сравнению с одним скачком зазора) и увеличение КПД в большей части диапазона 8...18 ГГц в 1.05,...1.08 раза.

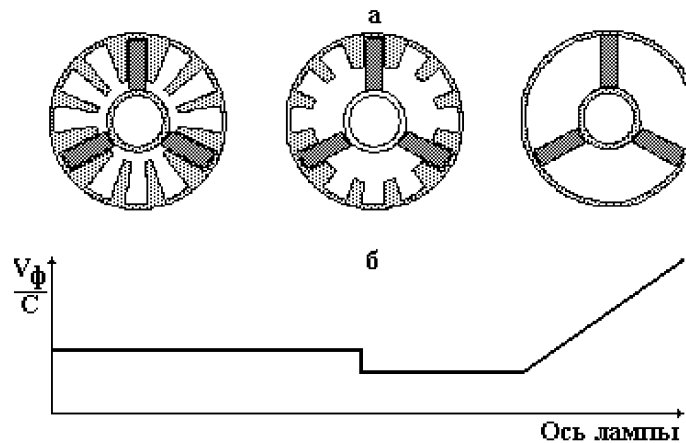


Рис. 1. Схема экрана с возрастающим зазором между ребрами и спиралью (а) и поведение фазовой скорости волны вдоль оси ЛБВ (б)

1. Gerchberg R.W., Niclas K.B. // IEEE Trans. Electron Devices. 1969. V. 16, № 9, p. 827.
2. Jung S.S., Soukhov A.V., Jia B., Park G.S., and Basu B.N. // Jpn. J. Appl. Phys. Jun. 2002. V. 41, pt. 1, No. 6A, p. 4007.
3. Ghosh T.K., Jakob A., Tokeley A. et al. // Dig. 9th IEEE Intern. Vacuum Electron. Conf. (IVEC 2008). Monterey, California, USA. April 22-24, 2008, p. 306.
4. Силян Р.А. Периодические волноводы. М.: ФАЗИС, 2002.
5. Ильина Е.М., Кузьмин Ф.П., Морев С.П. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 7, с. 870.

Современные и перспективные тенденции разработки и выпуска широкополосных ЛБВ

Альтшулер Е.Ю.¹, Бушуев Н.А.², Рафалович А.Д.²

1–Саратовский государственный технический университет, Саратов; 2–ФГУП НПП "Алмаз Саратов

ФГУП НПП "Алмаз" (г. Саратов) более 50 лет занимается разработкой и выпуском спиральных ЛБВ и занимает одно из ведущих мест в России по выпуску приборов, в том числе — сверхширокополосных, этого класса.

Полоса частот ЛБВ, созданных на предприятии к настоящему времени, превысила две октавы при построении замедляющих систем (ЗС) на основе многосекционной спиральной линии передачи с участком аномальной дисперсии на частотной характеристике, причем по крайней мере одна из секций которых имеет область с шагом ЗС, изменяемым вдоль длины спирали.

Большая часть современных широко востребованных ЛБВ — это приборы на средние уровни мощности с уменьшенными по сравнению с аналогичными приборами предыдущего десятилетия напряжением на ЗС, как правило на 15–20% для напряжений порядка 5 кВ, и соответственно — с несколько уменьшенными размерами и массой. Но данные приборы пока уступают по совокупности параметров зарубежным аналогам.

К основным направлениям работы по созданию перспективных ЛБВ сантиметрового диапазона в настоящее время относятся:

1. Совершенствование электронно-оптических систем и МПФС (в частности, уменьшение уровня поперечных составляющих магнитного поля),
2. создание оптимальных по совокупности параметров (КПД, рабочая полоса частот, уровень высших гармоник, фазовые характеристики и др.) и практически реализуемых моделей пространства взаимодействия,
3. отработка параметров ряда функциональных элементов прибора, например локального поглотителя, в том числе и с применением новых материалов, в частности, наноматериалов,
4. обеспечение оптимального теплового режима работы прибора,
5. существенное увеличение надежности и долговечности приборов,
6. решение вопросов серийнопригодности и ремонтнопригодности в условиях ритмичного мелкосерийного производства,
7. полная реализация потребностей разработчиков в современном и перспективном математическом и программном обеспечении, включая программы оптимизации по всем известным функциональным системам ЛБВ наряду с применением современных программных пакетов (HFSS и др.)

Практическая реализация перечисленных направлений позволит в ближайшие несколько лет преодолеть отставание по параметрам ЛБВ от лучших зарубежных аналогов.

В работе представлено, с применением материалов ежегодных конференций по электронике IVEC, сопоставление отечественных широкополосных ЛБВ с приборами ведущих зарубежных фирм: Thales Electron devices (панее Thomson CSF), Communications & Power Industries MPP (CPI), Nec Microwave Tube ltd. Teledyne Vacuum Electronics, TMD Technologies Ltd Boeing Electron Dynamic Devices, Inc.

Использование СВЧ диэлектрического нагрева для высокотемпературной обработки материалов

Огурцов К.Н., Дунаева Т.Ю.

СГТУ, Саратов

Одним из перспективных направлений электротермии является использование СВЧ диэлектрического нагрева для реализации высокотемпературных технологий: выращивание кристаллов из расплавов, получение наноматериалов, спекание керамик, получение композиционных и огнеупорных материалов. Исследования высокотемпературного нагрева различных диэлектриков, как в бытовых камерах со стоячей волной, так и в специализированных СВЧ установках позволил выявить ряд достоинств и недостатков такой термообработки. Наиболее значимыми достоинствами являются быстрый нагрев при наличии теплоизоляции вокруг нагреваемого объекта; возможность подобрать материалы футеровки, не поглощающие СВЧ энергию; увеличение диэлектрических потерь с ростом температуры нагреваемого объекта и возможность создания контролируемой атмосферы в рабочей камере. Среди недостатков можно отметить сильное изменение согласования рабочей камеры с генератором, что требует применения дорогостоящей защитной аппаратуры, а также зажигание плазмы и прекращение нагрева объекта. Проведенные на кафедре АЭУ СГТУ работы по математическому моделированию [1] и экспериментальному исследованию [2] нагрева диэлектриков до достижения температур фазовых переходов говорят о возможности реализации в СВЧ рабочих камерах процессов получения нанопорошков диэлектриков конденсационным методом, выращивания монокристаллов, спекания керамик, керметов и порошков металлов.

Наибольший интерес у исследователей вызывает вопрос о предельных температурах, достигаемых в СВЧ электротермических установках, а так же варианты конструкций СВЧ рабочих камер и способы увеличения температуры нагреваемого объекта при заданной мощности серийных генераторов, поскольку именно от этого зависит сфера применения этих установок. При разработке нового электротермического оборудования следует соблюдать правила безопасности эксплуатации установок. Для электротермических установок это электробезопасность (заземление установки) и теплобезопасность (температура на кожухе печи должна быть ниже 60°). Традиционными для электротермии методами понижения температуры кожуха печей являются: большая толщина теплоизоляционного слоя футеровки, вакуумные экраны, водяное охлаждение стенок печи. В работе [1] рассмотрен вариант охлаждения стен рабочей камеры проточной водой. Анализ результатов математического моделирования нагрева объекта в такой рабочей камере выявил большие тепловые потери и невысокую температуру нагреваемого объекта. Отказ от водяного охлаждения и применение футеровки для уменьшения тепловых потерь позволил при той же мощности СВЧ генератора нагреть объект до температуры на 100° выше. Традиционно в электротермии принято делать футеровку для всей печи (рабочей камеры), однако в случае СВЧ электротермических установок возникает уникальная возможность использовать одно из преимуществ СВЧ диэлектрического нагрева - его избирательность. Существует возможность футеровать не рабочую камеру, а непосредственно нагреваемый объект, причем футеровка должна быть радиопрозрачной. Исследования на кафедре АЭУ СГТУ показали, что вспененные теплоизоляционные материалы на основе доломита имеют очень низкий $tg\delta$ и могут быть использованы для теплоизоляции нагреваемых объектов в СВЧ рабочих камерах.

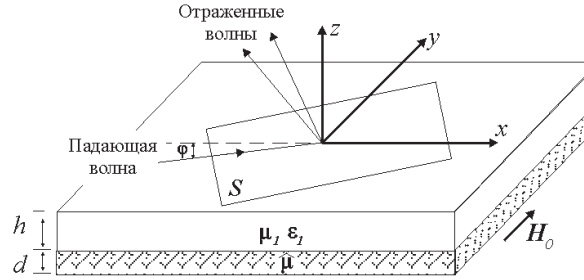
1. Архангельский Ю.С., Огурцов К.Н. Математическое моделирование высокотемпературного нагрева диэлектриков с фазовыми переходами. Вестник сарат. гос. техн. ун-та №3 (47), Саратов 2010. С. 116-119.
2. Огурцов К.Н., Чернецов В.В., Гдалёв А.В. Перспективы метода получения ультрадисперсных порошков в СВЧ установках. Вестник сарат. гос. техн. ун-та № 1(54). Выпуск 3, Саратов. 2011. С. 71-74.

Дифракция магнитостатических волн на щели в структуре, содержащей касательно намагниченную ферритовую плёнку

Вяткина С.А., Иванов В.Н., Бабичев Р.К.

ЮФУ, Ростов-на-Дону

В работе исследована плоскостойкая структура, содержащая касательно намагниченную ферритовую плёнку, слой диэлектрика и металлический экран с щелью. Поперечные размеры щели сравнимы с длиной магнитостатической волны. Определены электромагнитные поля, возникающие при рассеянии на щели поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ).



Используя метод эквивалентных схем [1], получены компоненты магнитного поля исследуемой структуры в областях над металлическим экраном H_y^+ и под ним H_y^- :

$$H_y^+ = \frac{i}{4\pi^2 k_0 W_0} \int_S \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(I_y^M (\kappa_2^2 - \frac{k_0^2}{p^2} \kappa_1^2) + I_x^M \kappa_1 \kappa_2 (1 + \frac{k_0^2}{p^2}) \right) \frac{e^{i\bar{\kappa}(\bar{r}' - \bar{r})}}{p} d\kappa_1 d\kappa_2 dS',$$

$$H_y^- = \frac{i}{4\pi^2 k_1 W_1} \int_S \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(I_y^M (\kappa_2^2 F^h + \frac{k_1^2}{p^2} \kappa_1^2 F^e) + I_x^M \kappa_1 \kappa_2 (F^h - \frac{k_1^2}{p^2} F^e) \right) \frac{e^{i\bar{\kappa}(\bar{r}' - \bar{r})}}{p} d\kappa_1 d\kappa_2 dS',$$

$$F^e = \frac{e^{-ph} ((\varepsilon^2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1) sh(pd) + \varepsilon(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) ch(pd))}{(\varepsilon_0 \varepsilon_1 ch(ph) + \varepsilon^2 sh(ph)) sh(pd) + \varepsilon(\varepsilon_1 ch(ph) + \varepsilon_0 sh(ph)) ch(pd)} + 1,$$

$$F^h = \frac{e^{-ph} ((\mu_a^2 \kappa_1^2 - p_h^2 \mu^2 + p^2 \mu_1 \mu_0 - p \mu_a \kappa_1 (\mu_0 + \mu_1)) sh(phd) - p p_h \mu (\mu_0 - \mu_1) ch(phd))}{A \cdot sh(phd) + B \cdot ch(phd)} - 1,$$

$$A = sh(ph) p \mu_1 (p \mu_0 - \mu_a \kappa_1) + ch(ph) (p \mu_0 \mu_a \kappa_1 - \mu_a^2 \kappa_1^2 + \mu^2 p_h^2), B = p p_h \mu (\mu_1 sh(ph) + \mu_0 ch(ph)),$$

$$\bar{\kappa}(\bar{r}' - \bar{r}) = \kappa_1(x' - x) + \kappa_2(y' - y), \quad p = \sqrt{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}, \quad p_h = \sqrt{(\kappa_1^2 + \frac{\mu_0}{\mu} \kappa_2^2)}.$$

где d - толщина ферритовой плёнки, h - толщина диэлектрика, ε_0, μ_0 и ε_1, μ_1 - диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства и диэлектрика соответственно, ε и μ , μ_a - диэлектрическая проницаемость и компоненты тензора магнитной проницаемости ферритовой плёнки, $I_{x,y}^M(S)$ - компоненты тангенциального магнитного тока, эквивалентного щели в экране [2].

На основе формул для магнитного поля получены коэффициенты отражения и прохождения ПМСВ в исследуемой плоскостной структуре.

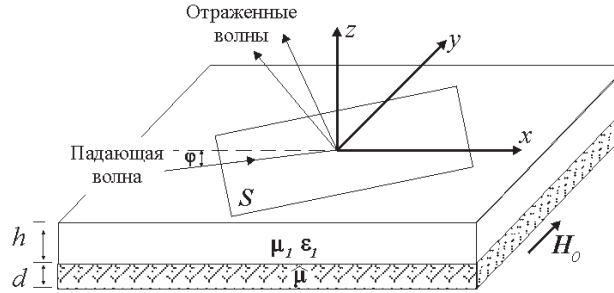
1. Бодров В.В., Сурков В.И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. Издательство МЭИ, Москва, 1994.
2. Банков С.Е., Никитов С.А. *Радиотехника и электроника* **53** (2008) 545.

Дифракция магнитостатических волн на щели в структуре, содержащей нормально намагниченную ферритовую плёнку

Вяткина С.А., Иванов В.Н., Бабищев Р.К.

ЮФУ, Ростов-на-Дону

В работе исследована слоистая структура, содержащая нормально намагниченную ферритовую плёнку, слой диэлектрика и металлический экран с щелью. Поперечные размеры щели сравнимы с длиной магнитостатической волны. Определены электро- магнитные поля, возникающие при рассеянии на щели прямых объёмных магнитостатических волн (ПОМСВ).



Используя метод эквивалентных схем [1], получены компоненты магнитного поля исследуемой структуры в областях над металлическим экраном H_y^+ и под ним H_y^- :

$$H_y^+ = \frac{i}{4\pi^2 k_0 W_0} \int_S \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(I_y^M (\kappa_2^2 - \frac{k_0^2}{p^2} \kappa_1^2) + I_x^M \kappa_1 \kappa_2 (1 + \frac{k_0^2}{p^2}) \right) \frac{e^{i\bar{\kappa}(\bar{r}' - \bar{r})}}{p} d\kappa_1 d\kappa_2 dS',$$

$$H_y^- = \frac{i}{4\pi^2 k_1 W_1} \int_S \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(I_y^M (\kappa_2^2 F^h + \frac{k_1^2}{p^2} \kappa_1^2 F^e) + I_x^M \kappa_1 \kappa_2 (F^h - \frac{k_1^2}{p^2} F^e) \right) \frac{e^{i\bar{\kappa}(\bar{r}' - \bar{r})}}{p} d\kappa_1 d\kappa_2 dS',$$

$$F^e = \frac{e^{-ph} ((\varepsilon^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_0) sh(pd) + \varepsilon(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) ch(pd))}{(\varepsilon_0 \varepsilon_1 ch(ph) + \varepsilon^2 sh(ph)) sh(pd) + \varepsilon(\varepsilon_1 ch(ph) + \varepsilon_0 sh(ph)) ch(pd)} + 1,$$

$$F^h = \frac{e^{-ph}(pp_h(\mu_0 - \mu_1)\cos(p_h d) - (\mu_1 p^2 + \mu_0 p_h^2)\sin(p_h d))}{(\mu_1 p^2 \operatorname{sh}(ph) - \mu_0 p_h^2 \operatorname{ch}(ph))\sin(p_h d) + pp_h(\mu_0 \operatorname{ch}(ph) + \mu_1 \operatorname{sh}(ph))\cos(p_h d)} - 1,$$

$$\overline{\kappa}(\vec{r}' - \vec{r}) = \kappa_1(x' - x) + \kappa_2(y' - y), \quad p = \sqrt{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}, \quad p_h = \sqrt{-\frac{\mu}{\mu_0}(\kappa_1^2 + \kappa_2^2)}.$$

где d - толщина ферритовой плёнки, h - толщина диэлектрика, ε_0 , μ_0 и ε_1 , μ_1 - диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства и диэлектрика соответственно, ε и μ , μ_a - диэлектрическая проницаемость и компоненты тензора магнитной проницаемости ферритовой плёнки, $I_{x,y}^M(S)$ - компоненты тангенциального магнитного тока, эквивалентного щели в экране [2].

На основе формул для магнитного поля получены коэффициенты отражения и прохождения ПОМСВ в исследуемой плоскостойкой структуре.

1. Бодров В.В., Сурков В.И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. Издательство МЭИ, Москва, 1994.
2. Банков С.Е., Никитов С.А. *Радиотехника и электроника* **25** (2007) 1301.

Синтез углеродных нанотрубок на подложках из стеклоуглерода с применением жидких катализаторов

Тарасов Е.А.^{1,2}, Сеницын Н.И.¹, Григорьев Ю.А.¹, Бурцев А.А.²

¹СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

²ФГУП «НПП «Алмаз», Саратов

Углеродные нанотрубки (УНТ) на сегодняшний день являются один из самых перспективных материалов для создания на их основе полевых транзисторов, электромеханических датчиков, элементов памяти [1], автоэмиссионных катодов электровакуумных приборов, обладающих большой плотностью тока и высокой стабильностью в работе [2], а также сверхчувствительных газовых сенсоров [3].

При создании подобных устройств важное значение имеют физико-химические свойства материала подложки, на которой осуществляется рост УНТ, поскольку это играет решающую роль как при самом синтезе нанотрубок, так и при дальнейшей эксплуатации приборов на их основе. На данный момент в качестве такого материала наибольший интерес представляет собой стеклоуглерод, который обладает высокой химической и термической устойчивостью, а также имеет малую преимущественно закрытую пористость, что обуславливает практически полную его газонепроницаемость. При этом при помощи операции травления стеклоуглерода никелем в атмосфере водорода возможно создавать различную микро-и наноразмерную топологию на поверхности используемых пластин, что открывает новые возможности в создании приборов и устройств на основе УНТ.

В данной работе УНТ на поверхности пластин стеклоуглерода (марки СУ-2000) были получены методом химического осаждения паров гептана в присутствии катализатора. Источником углерода служили пары гептана, которые подавались в рабочую зону в потоке газа-носителя (аргона). В качестве катализатора были использованы водные растворы ферритина (см. рис. 1а) и ацетата железа (см. рис. 1б).

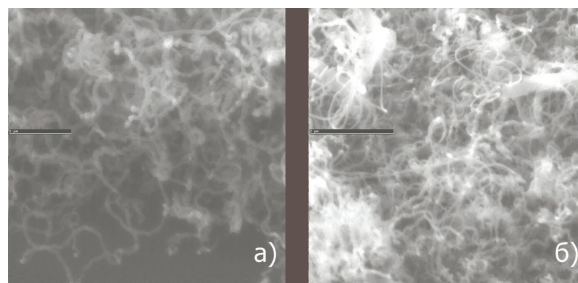


Рис. 1. СЭМ изображения УНТ, выращенные на стеклоуглероде с применением водных растворов железосодержащих веществ.

1. M. P. Anantram, F. Leonard. Physics of carbon nanotube electronic devices // Reports on Progress in Physics, 2006. Vol. 69, №. 3. P. 507-561.
2. Xiomara Calderon-Colon, Huaizhi Geng, Bo Gao, Lei An, Guohua Cao, Otto Zhou. A carbon nanotube field emission cathode with high current density and long-term stability // Nanotechnology, 2009. Vol. 20, № 32. 325707 (5 pp).
3. Ting Zhang, Syed Mubeen, Nosang V Myung, Marc A Deshusses. Recent progress in carbon nanotube-based gas sensors // Nanotechnology, 2008. Vol. 19, № 33. 332001 (14 pp).

Антенны сотовых телефонов: совмещение несовместимого

Григорьев А.Д.

СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, Санкт-Петербург

Сотовые телефоны - одно из совершеннейших изделий современной электроники. Как отмечают эксперты [1], по критерию “сложности на кубический дюйм” они превосходят большинство современных радиоэлектронных средств, как гражданских, так и военных. В полной мере это относится и к высокочастотной части телефона, содержащей несколько приемо-передатчиков, работающих на несколько антенн в различных диапазонах частот. Современные сотовые телефоны содержат до шести различных антенн, выполняющих функции приема-передачи телефонных разговоров, сообщений, Blue-tooth связи, приема цифрового телевидения, GPS-навигации и другие функции.

К антеннам сотовых телефонов предъявляются очень жесткие и во многом противоречивые требования. В первую очередь, они должны быть малогабаритными, иметь простую конструкцию, приспособленную к массовому производству. С другой стороны, антенна должна иметь требуемую рабочую полосу частот (или несколько таких полос), обладать высоким КПД, иметь невысокую направленность. Антенна не должна оказывать заметное влияние на другие устройства телефона (в том числе на другие антенны), ее параметры не должны заметно ухудшаться под действием близко расположенных тел – например, головы и руки пользователя. Все это делает разработку антенн достаточно трудной задачей.

Обычно разработчик антенны получает готовую геометрическую модель телефона, разработанную в системе автоматизированного проектирования (CAD). Такая модель содержит 150...200 деталей, выполненных из различных материалов. Многие из этих деталей имеют сложную криволинейную форму, а их размеры варьируются в широких пределах. Для антенны в этой модели оставлено небольшое пространство. Как правило, она должна плотно прилегать к соседним деталям. Ввиду сжатых сроков проектирования основным инструментом разработчика служат программы электродинамического моделирования. При этом метод конечных элементов обеспечивает лучшую аппроксимацию криволинейных поверхностей, однако задача построения сетки, содержащей несколько миллионов конечных элементов под силу далеко не всем имеющимся коммерческим программам.

В докладе обсуждаются проблемы и приводятся результаты проектирования различных антенн сотовых телефонов с помощью программы RFS [2], реализующей метод конечных элементов. Эти данные демонстрируют сложность проблемы и подходы к ее решению, позволившие получить заданные параметры антенны.

1. Judge S., “Mobile phone development”, *Gartner Newsroom*, Q3, 2010.
2. Grigoryev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Multiple-cell lumped element and port models for the vector finite element method. - *Electromagnetics*, V. 28, No 1, pp 18-26.

Анализ и оптимизация гибридного МСЭ-усилителя

Ильенко К.

ИРЭ НАН Украины, г. Харьков, Украина

Опираясь на асимптотически точные аналитические выражения для траектории тестового электрона в магнитостатическом поле накачки [1], построена теория гибридного планарного мазера/лазера на свободных электронах (МСЭ) [2-4], аналогичная теории гиротрона. Предложен полуаналитический критерий, определяющий области хаотизации динамики электронов в магнитостатических “идеальном” и “реалистическом” полях накачки гибридного планарного МСЭ [4,5]. Показано, что энергетически выгодные области так называемых режимов “отрицательной” массы примыкают зонам хаотической динамики со стороны больших значений ведущих однородных магнитных полей [5].

Для более точного учета эффектов пространственного заряда в умеренно релятивистских гибридных МСЭ предложено использовать дарвиновскую модель [4,6], последовательно учитывающую, как потенциальную, так и вихревую части поля пространственного заряда, и дающую неплохое соответствие с результатами численного моделирования [7].

Построены уравнения укороченной модели волноводного гибридного МСЭ-усилителя, учитывающие, как сложную динамику электронов во всей регулярной области параметров гибридного планарного МСЭ, так и внутримодовое рассеяние в нерегулярной электродинамической системе (волноводе) [5,8]. С использованием укороченных уравнений и концепции эволюционных вычислений [9,10], продемонстрирована возможность увеличения КПД такого МСЭ-усилителя в несколько раз в магниторезонансном режиме [4] при применении оптимизированного профиля волновода [5,8]. КПД МСЭ-усилителя максимален, если переход между режимами “отрицательной” и “положительной” массы происходит в ходе взаимодействия электронного пучка с усиливаемым сигналом.

1. Ефимов Б.П., Ильенко К.В., Яценко Т.Ю., Горяшко В.А. *Радиофизика и радиоастрономия* **8** (2003) С. 190-198.
2. Goryashko V.A., Ilyenko K.V., Opanasenko A.N. *Telecommunications and Radio Engineering* **65** (2006) pp. 991-1003.
3. Горяшко В.А., Ильенко К.В., Опанасенко А.Н. *Радиофизика и электроника* **11** (2006) С. 440-446.
4. Goryashko V.A., Ilyenko K., Opanasenko A. *Phys. Rev. ST-AB* **12** (2009) 100701.
5. Goryashko V.A. *Phys. Rev. ST-AB* **14** (2011) 030703.
6. Горбик Г.М., Ильенко К., Яценко Т.Ю. *Радиофизика и электроника* **11** (2007) С. 356-361.
7. Goryashko V.A., Ilyenko K., Opanasenko A.N. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **620** (2010) pp. 462-469.
8. Makarov N.M., Tarasov Yu.V. *Phys. Rev. B* **64** (2001) 235306.
9. Humphries S. Charged particle beams. pp. 803-812. John Wiley & Sons, NY, 1990.
10. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms. MIT Press, Cambridge, MA, 1999.

Магнитная фокусирующая система интенсивных электронных пучков для клинотронов субмиллиметрового диапазона

Ефимов Б.П., Завертанный В.В., Кириченко Л.А., Кишко С.А., Кудинова Т.В., Кулешов А.Н., Пономаренко С.С., Забродский А.Ф., Хорунжий М.О., Хуторян Э.М.

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

При разработке электронно-вакуумных приборов коротковолнового диапазона большое внимание уделяется проблеме формирования и фокусирования интенсивного электронного потока с малыми пульсациями. С целью обеспечения эффективного взаимодействия интенсивного электронного потока с замедленными волнами в ЛОВ-клинотроне электроны должны находиться в поле волны на расстояниях порядка периода замедляющей структуры, что уже на длине волны излучения в 1 мм соответствует расстояниям менее 100 мкм. В субмиллиметровом диапазоне статические неоднородности пучка становятся сравнимы с величиной слоя, в котором сосредоточено высокочастотное поле замедляющей системы клинотрона. Проблема формирования и фокусирования в пространстве взаимодействия интенсивного электронного пучка с необходимыми границами может решаться путем оптимизации электронно-оптической системы формирования и транспортировки электронного потока, что в случае магнитных фокусирующих систем требует создания достаточно высоких магнитных полей. Из экспериментальных данных [1] следует, что для работы клинотронов диапазона длин волн короче 1 мм необходимы фокусирующие магнитные поля напряженностью порядка 1 Т и выше. Поэтому, при создании коротковолновых электронно-вакуумных источников типа ЛОВ-клинотрон, актуальной остается проблема разработки компактной магнитной фокусирующей системы, способной обеспечить необходимые величины магнитных полей. В данной работе представлены результаты расчета многосегментной магнитной фокусирующей системы на постоянных магнитах для клинотрона субмиллиметрового диапазона. Магнитная фокусирующая система состоит из двух обоев, в каждой из которых в два слоя размещены шестнадцать магнитных сегментов, изготовленных из сплава Nd-Fe-B. Использование магнитотвердых материалов на основе сплавов неодима с железом и бором (Nd-Fe-B) обусловлено более высокими энергетическими характеристиками, повышенной объемной однородностью свойств и более низкой стоимостью по сравнению с магнитами из сплавов самарий-кобальт (Sm-Co). При помощи компьютерного моделирования проведена визуализация распределения постоянного магнитного поля в зазоре магнитной системы. Результаты, полученные в процессе моделирования, сопоставляются с данными, полученными экспериментально. Также приведены кривые распределения магнитной индукции как для одного сегмента, так и для целой обоевы магнитной системы. Показано, что при заданной конфигурации магнитов, в сечении диаметром 10 мм, перпендикулярном оси магнитной системы, и величине магнитного зазора равного 32 мм создается магнитное поле напряженностью не менее 1.15 Т.

1. Клинотрон / Г.Я. Левин, А.И. Бородкин, А.Я. Кириченко, А.Я. Усиков, С.А. Чурилова. Под ред. А.Я. Усикова. - Киев: Наук. думка, 1992. - 200 с.

Исследование дискретного электронно-волнового взаимодействия в полосах пропускания и запираия замедляющих систем

Назарова М.В., Солнцев В.А., Колтунов Р.П., Шабанов Д.С.

МИЭМ, Москва

В работах [1,2] был проведен анализ уравнений дискретного электронно-волнового взаимодействия в периодических замедляющих системах (ЗС) и получены уравнения линейной теории такого взаимодействия. В отличие от известных ранее работ, они используют уравнения возбуждения периодических волноводов в конечных разностях второго порядка [3] и локальный импеданс связи вместо сопротивления связи Пирса. Это позволило описать единым образом взаимодействие электронов с полным полем двух - прямой и встречной волн ЗС в зазорах взаимодействия как в полосах пропускания, так и запираия ЗС.

В настоящей работе основное внимание уделено исследованию отдельных электронных волн, существующих в такой системе, для их постоянных распространения получено алгебраическое характеристическое уравнение 4-ой степени, включающее в качестве параметров обобщенные параметры дискретного электронно-волнового взаимодействия электронного пучка и поля: в т.ч. комплексную электронную проводимость зазоров, параметр пространственного заряда и параметр усиления, вычисленный через локальный импеданс связи. Проведен анализ решений полученного характеристического уравнения. Для ЗС с основной рабочей пространственной гармоникой, для которой сдвиг фазы на период L лежит в пределах $0 < \varphi_0 < \pi$, при $\varphi_0 \rightarrow 0$ (т.е. при уменьшении периода L) характеристическое уравнение становится кубическим, совпадающим с известным уравнением теории Пирса, полученным для спиральных ЗС. С ростом φ_0 проявляется влияние встречной волны, приводящее к небольшому изменению постоянных распространения уже в центре полосы пропускания ЗС при $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$. Дальнейшее приближение фазы к точке отсечки $\varphi_0 = \pi$ приводит к существенному изменению постоянных распространения электронных волн из-за взаимодействия электронов с пространственной гармоникой встречной волны ЗС. Величина этого расширения полосы зависит от параметров взаимодействия и может быть вычислена из полученного характеристического уравнения для каждого конкретного случая. Аналогичные результаты получаются при использовании в качестве рабочей 1-й пространственной гармоники в цепочках связанных резонаторов и подобных им петляющих ЗС, где $\varphi_1 = \varphi_0 + \pi$. Однако здесь при $\varphi_0 \rightarrow 0$ (т.е. $\varphi_1 \rightarrow \pi$) ЗС остается периодической структурой, и в полосе запираия также возможно усиление.

Помимо исследования электронных волн в отдельных секциях ЗС, проведено моделирование многосекционной ЛБВ с запредельными секциями. Разработаны способы сопряжения отдельных секций при моделировании получено распределение ВЧ токов и полей вдоль ЗС, найденная величина коэффициента усиления в линейном режиме близка к экспериментальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-02-00859-а)

1. В.А.Солнцев, Р.П.Колтунов // РЭ, 2008, Т.53, №6, С.738
2. В.А.Солнцев, Р.П.Колтунов // РЭ, 2010, Т.55, №11, С.1362
3. В.А.Солнцев, С.В.Мухин // РЭ, 1991, Т.36, №1, С.2161

Анализ подавления нелинейных искажений сигнала в ЛБВ методом “премодуляции” тока электронного пучка при учете фазоамплитудных характеристик

Шульга А.И.

МИЭМ, Москва

Для современных радиосистем связи различного направления предъявляются жесткие требования к уровню нелинейных искажений передающих устройств СВЧ диапазона. Основные методы коррекции нелинейных искажений основаны как на оптимизации "внутренней" структуры СВЧ усилителей, в частности ламп с бегущей волной (ЛБВ), так и на применении "внешних" корректоров в виде цепей обратной связи или устройств предискажения сигналов на несущей высокой частоте.

Новый метод коррекции нелинейных искажений, основанный на использовании низкочастотного сигнала огибающей, передаваемого через цепи отрицательной обратной связи, предложен и экспериментально реализован в работе [1], где описано подавление интермодуляционных искажений в СВЧ - усилителе на полевом транзисторе. Экспериментальные исследования показали возможность уменьшения уровня нелинейных искажений на 5-6дБ. Идея подавления состоит в следующем: с помощью цепи низкочастотной обратной связи на вход усилителя с его выхода передается сигнал огибающей, частота которого существенно ниже частоты несущей. Наличие низкой частоты на входе приводит на выходе к изменению комбинационных составляющих третьего и других порядков вблизи несущей. Подбором амплитуды и фазы сигнала, передаваемого через обратную связь, можно добиться подавления комбинационных составляющих этого порядка. Теоретическое обоснование и методика расчета данного способа подавления нелинейных искажений приведены в работе [2].

В СВЧ усилителях частота несущей и частота огибающей сигнала значительно разнесены. Однако низкочастотный сигнал (сигнал огибающей) можно подать на отдельный вход, для воздействия на некоторый параметр J , определяющий вид АХ и ФАХ усилителя. Например, в транзисторных усилителях возможно низкочастотное изменение положения рабочей точки транзисторов через цепи питания, в ЛБВ и клистронах - изменение тока электронного пучка через фокусирующие электроды, т.е. “премодуляция” сигналом огибающей тока пучка. При расчетах в [2] использовался квазистационарный метод [3] и учитывалась зависимость только АХ усилителя от его параметров (в ЛБВ- тока пучка), которые могут медленно изменяться во времени под воздействием амплитуды входного сигнала. Для ЛБВ вычислен относительный уровень комбинационных составляющих в точке близкой к насыщению (-16дБ) без “премодуляция” тока пучка и с таковой (-27дБ). Т.о. относительный уровень комбинационных составляющих понижается на 11дБ. В настоящей работе для учета фазовых искажений были использованы фазоамплитудные характеристики, представленные в работе [4] для различных параметров скорости b и пространственного заряда $4QC$. Приведем разницу величин относительного уровня комбинационных составляющих третьего порядка без “премодуляция” и с “премодуляция” для различных параметров скорости и пространственного заряда. Для $b=0$ и $4QC=0$ имеем 10дБ, $b=0.5$ и $4QC=0$ - 6дБ, $b=1$ и $4QC=0$ имеем 3дБ, $b=2$ и $4QC=0$ имеем 2.6дБ, $b=2$ и $4QC=2.1$ имеем 3дБ. Т.о. величина, на которую могут быть уменьшены нелинейные иска-

жения уменьшается с ростом параметров пространственного заряда и скорости.

1. Дутышев И.Н. // Электрон.техн.Сер.1.СВЧ-техника.2007.№ 4.С.7.
2. Солнцев В.А.,Шульга А.И. // РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА,2012,том 57,№ 2.
3. Малышенко В.И.,Солнцев В.А. // Электрон.техн.Сер.1.Электроника СВЧ.1969.№10.С.72.
4. Малышенко В.И.,Осин А.В.,Солнцев В.А. // Электрон.техн.Сер.1.Электроника СВЧ.1976.№ 7.С.32.

Когерентный резонанс и синхронизация колебаний в каскадном клистронном автогенераторе на пороге самовозбуждения

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

СарГУ, Саратов

Приводятся данные по экспериментальному исследованию синхронизации внешним гармоническим сигналом резонансного отклика, индуцированного внешними и собственными шумами в каскадном клистронном автогенераторе. Показано, что внешний сигнал приводит к существенному уменьшению уровня шумов и повышению отношения сигнал/шум на выходе регенеративного клистронного усилителя.

Каскадный автогенератор состоит из двух последовательно соединённых почти идентичных многорезонаторных клистронов, причём выход каждого клистрона соединён с входом другого [1]. При таком построении прибора реализуется схема со "встречными электронными потоками" в цепи автогенератора. Схема позволяет получить больший коэффициент усиления и понизить пусковой ток автогенератора по сравнению с одиночным клистроном.

Подбором управляющих параметров системы - токов клистронов, ускоряющих напряжений и затухания в цепи обратной связи устанавливался режим работы автогенератора ниже порога самовозбуждения. В кольцо обратной связи вводился шумовой сигнал. Источником шумов являлся цифровой генератор шума, сигнал с которого усиливался ЛБВ средней мощности. Вместе с шумом через тройник в цепь обратной связи подавался гармонический сигнал с генератора стандартных сигналов.

В процессе исследований наблюдался эффект когерентного резонанса в каскадном автогенераторе - при подаче внешнего шумового сигнала в нелинейной динамической системе, находящейся на пороге самовозбуждения, возникал резонансный отклик. При увеличении мощности внешнего шумового сигнала амплитуда индуцированного шумом отклика возрастала и достигала максимума при вполне определённой мощности шумов.

Также исследовался эффект синхронизации, заключающийся в подавлении шумов на выходе автогенератора, сопровождаемом захватом резонансного отклика внешним сигналом [2]. Были сняты серии зависимостей ширины полосы синхронизации резонансного отклика и отношения сигнал/шум от мощности внешнего шумового сигнала. Проведено сопоставление с аналогичными данными для одиночного клистрона.

Кроме того, была исследована синхронизация отклика, возбуждаемого собственными шумами системы. Показано, что внешний сигнал приводит к существенному уменьшению уровня шумов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты №11-02-00057 и №11-02-00047) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект №НШ-3407.2010.2).

1. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Семеновых П.Ю., Бирюков А.А. // ЖТФ, 2005, Т. 75., вып. 12, С. 94-97
2. Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Садовников С. А., Скороходов В. Н. // 21-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011): материалы конф. С. 314-315

Динамика модового состава электромагнитного поля при развитии генерации в релятивистских черенковских приборах

Корниенко В.Н., Черепенин В.А.

ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, Москва

В черенковских приборах релятивистской высокочастотной электроники [1] используются, в основном, сверхразмерные электродинамические структуры (ЭС). Прежде всего, это позволяет при той же самой мощности генерируемого СВЧ-излучения существенно снизить напряженность переменного электрического поля вблизи неоднородностей ЭС, уменьшив вероятность пробоя. Однако, в сверхразмерных ЭС одновременно может существовать значительное количество как симметричных, так и несимметричных мод электромагнитного поля, взаимодействие с электронным пучком которых может приводить к многочастотной генерации со сложной поперечной структурой поля. Проведенные в ИСЭ СО РАН эксперименты [2] показали, что модовый состав выходного излучения действительно сложен, но само излучение в достаточной степени монохроматично и в нем преобладают симметричные моды.

Целью данной работы было изучение методами вычислительного эксперимента динамики модового состава электромагнитного излучения, формируемого одним из релятивистских устройств - многоволновым черенковским генератором (МВЧГ).

Была рассмотрена двухсекционная ЭС, представляющая собой отрезок круглого волновода (диаметр 14 см) общей длиной 120 см, аналогичная ЭС МВЧГ. Слева и справа отрезок волновода был заполнен поглотителем (толщина 15 см). В ЭС инжестировался кольцевой пучок с начальной энергией частиц 2 МэВ и током 15 кА.

Моделирование самосогласованной динамики такой системы было проведено при помощи численного алгоритма, описанного в [3]. Анализ модового состава был выполнен следующим образом. В заранее выбранных поперечных сечениях ЭС фиксировались временные зависимости продольных компонент магнитного и электрического поля. Полученные временные реализации были использованы в качестве исходных данных для Фурье-преобразования, выполняемого для заранее заданной частоты (например, частоты генерации). Полученные в результате амплитудно-фазовые соотношения компонент поля для точек поперечного сечения служили исходными данными процедуры разложения поля по модам круглого волновода заданного радиуса на фиксированной частоте. Так как Фурье-преобразование выполнялось последовательно для конечных временных выборок, по полученным данным удалось проследить процесс изменения модового состава излучения во времени. В результате было показано, что в зависимости от качества поглотителя, расположенного в области влета пучка, в рассматриваемой системе возбуждаются, в основном, либо симметричные, либо несимметричные моды.

Моделирование проведено на ресурсах Межведомственного Вычислительного Центра.

1. С.П.Бугаев, В.И.Канавец, В.И.Кошелев, В.А.Черепенин. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Наука, Новосибирск, 1991.
2. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И. *Докл. АН СССР*. 1988. Т.298. № 1. С.92.
3. Корниенко В.Н., Черепенин В.А. *Радиотехника и электроника*. 2003. Т.48. № 6. С.758.

Дифракционные эффекты, возникающие в процессе взаимодействия мощного импульса излучения с тонким плазменным слоем

Корниенко В.Н., Кулагин В.В., Черепенин В.А.

ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, Москва

В настоящее время создание импульсов электромагнитного излучения с максимально возможным коротким фронтом является весьма актуальной проблемой. Такие импульсы, в частности, необходимы для проведения экспериментов по изучению быстро протекающих процессов. Кроме того, они могут быть использованы для создания релятивистских электронных зеркал [1], пригодных для генерации когерентного рентгеновского излучения [2].

Крутой передний фронт волны можно получить в результате взаимодействия исходного импульса лазерного излучения (имеющего, в общем случае, гауссову зависимость амплитуды от времени) с тонким плазменным слоем определенной плотности, значение которой зависит от максимального значения электрического поля в импульсе.

Анализ особенностей процесса укорочения импульса был проведен при помощи численной модели, реализующей алгоритм решения самосогласованной динамики заряженных частиц и электромагнитного поля. Была рассмотрена следующая двумерная задача. На слой полностью ионизованной холодной плазмы с плотностью $7.1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ толщиной 1.7 мкм падает линейно поляризованный электромагнитный импульс, поперечное электрическое поле которого в фокусе задано выражением:

$$E_x(x, t) = E_0 \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{d^2}\right) \exp\left(-\frac{(t - t_0)^2}{\tau^2}\right) \sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda} t\right)$$

где $d = 0.003 \text{ см}$ - поперечный размер импульса, $c\tau = 3\lambda$, $\lambda = 1 \text{ мкм}$, $E_0 = 2.14 \cdot 10^9 \text{ Гс}$.

Анализ пространственно-временного распределения поля показал, что в результате взаимодействия после прохождения плазменного слоя формируется импульс, передний фронт которого значительно короче фронта падающей волны. Кроме того, наблюдается и изменение поперечной структуры поля, которая становится близкой по форме к отрезку плоской волны. В результате распределение поля во всей рассматриваемой области оказывается качественно похожим на распределение, которое возникает в результате дифракции волны на щели. Усложнение структуры поля влияет на качество формируемого им релятивистского электронного зеркала: неоднородность поперечной структуры поля может приводить к неоднородной поперечной плотности зеркала, что, в свою очередь, изменит характеристики рассеянного излучения рентгеновского диапазона. Таким образом, при выполнении оценок параметров реального эксперимента следует учитывать возможные дифракционные эффекты.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 09-02-01483-а и 11-02-12259-офи-м-2011).

1. Kulagin V.V., Cherepenin V.A., Hur M.S. et. al. *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 124801
2. Kulagin V.V., Cherepenin V.A., Suk H. *App.Phys.Lett.* **85** № 15(2004) P.3322.

Широкополосный ансамбль циклотронных осцилляторов в поле короткого импульса

Веселов А.П., Корниенко В.Н., Привезенцев А.П.

МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, Москва, ЧелГУ, Челябинск

Коллективные процессы, имеющие место при взаимодействии пучков заряженных частиц с короткими электромагнитными импульсами, вызывают в настоящее время значительный интерес. Делаются попытки найти в классической электронике аналоги таких известных в оптике явлений как свертывание, самоиндуцированная прозрачность и др. [1].

Целью данной работы было исследование динамики набора взаимодействующих между собой циклотронных осцилляторов в поле короткого электромагнитного импульса в случае, когда спектр начальных частот вращения осцилляторов набора близок к спектру падающей волны и является либо квазинепрерывным, либо дискретным. Анализ динамики был проведен методами вычислительного эксперимента, основанных на алгоритме решения самосогласованной задачи взаимодействия заряженных частиц и электромагнитного поля.

Набор циклотронных осцилляторов был размещен в круглом волноводе, стенки которого покрыты слоем хорошо согласованного поглотителя. Направление силовых линий внешнего однородного магнитного поля совпадало с продольной осью волновода. Осцилляторы занимали объем, линейный размер которого был меньше длины волны, соответствующей центральной частоте падающего линейно поляризованного импульса, а вектор электрического поля лежал в плоскости вращения частиц. Исходно заряженные частицы были так распределены по начальной скорости и фазам, чтобы спектры вращения осцилляторов и внешнего импульса были близки, а суммарный дипольный момент системы равнялся нулю. В качестве контролируемых величин были выбраны временные зависимости полной энергии и суммарного дипольного момента набора циклотронных осцилляторов, а также энергии электромагнитного поля в рассматриваемой области. Кроме того, по полученным временным реализациям вычислялась функция корреляции между электрической компонентой падающего импульса и суммарным дипольным моментом системы частиц.

Проведенные исследования показали, что при умеренных плотностях частиц и амплитудах падающего импульса, соответствующих значению ускорительного параметра меньше единицы, отклик широкополосного ансамбля с квазинепрерывным спектром локализован во времени, а его профиль совпадает с профилем возбуждающей волны. При этом происходит частичное поглощение осцилляторами энергии электромагнитного поля. В случае дискретного спектра в системе наблюдается эффект, аналогичный эффекту циклотронного эха [3]: через время, соответствующее обратной величине расстояния между ближайшими спектральными линиями, ансамбль частиц генерирует дополнительный электромагнитный импульс.

1. И.В. Зотова, Н.С. Гинсбург, А.С. Сергеев и др. *VIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн*. Тезисы докладов. Нижний Новгород, 2011. С.42.
2. R.M. Hill, D.E. Kaplan *Phys.Rev.Lett.***14** № 26(1965) С.1062

Исследование влияния тормозящего ВЧ поля в зазоре резонатора на структуру сгруппированного электронного потока мощного СВЧ усилителя

Макеев А.Э., Комаров Д.А., Морев С.П.

ФГУП “НПП Торий”, Москва

При разработке новых высокоэффективных СВЧ усилителей особое внимание уделяется структуре электронного потока, из-за ее сильного влияния на выходные параметры усилителя. Кроме того, полнота информации об электронном потоке на выходе пространства взаимодействия позволяет проектировать максимально эффективные системы рекуперации. Поиск методов, а так же исследование механизма влияния того или иного способа воздействия на структуру потока целесообразно проводить на основе численных расчетов, в том числе, использующих алгоритмы, основанные на самосогласованном решении уравнений Максвелла.

В докладе представлены результаты численных исследований структуры электронного потока с мощностью порядка 600 кВт в пространстве взаимодействия однолучевого семирезонаторного клистрона с КПД не менее 35%.

Показано, что фокусирующее магнитное поле со сложной структурой может стать дополнительным инструментом в снижении уровня оседания пучка в выходном резонаторе в динамическом режиме работы без ухудшения выходных характеристик прибора.

Проведено сопоставление выходных характеристик клистрона, полученных на основе расчетов по одномерным и двумерным программам расчета взаимодействия. Для проверки адекватности полученных результатов расчетов пространства взаимодействия использована хорошо зарекомендовавшая себя одномерная программа моделирования KLYS.

Приведены результаты исследований влияния тормозящего ВЧ поля в зазоре выходного резонатора мощного клистронного усилителя на структуру сгруппированного электронного потока, влияния структуры фокусирующего магнитного поля на КПД клистрона и тепловой режим выходного резонатора.

Проблемы транспортировки мощных электронных потоков в трехмерных “реверсоподобных” магнитных полях и обеспечение требуемой структуры магнитного поля

Дармаев А.Н., Морев С.П.

ФГУП "НПП Торий Москва

При фокусировке электронных потоков в многолучевых ЭВП СВЧ применяются магнитные системы с трехмерной структурой магнитных полей. Обычно для этого используются реверсоподобные магнитные фокусирующие системы с радиально намагниченными магнитами. Для реализации требуемой структуры магнитного поля в таких системах используются магнитомягкие настроечные элементы в виде разнообразных переключателей магнитного поля или вставок из магнитомягкого материала.

В докладе представлены результаты исследований влияния различных магнитомягких настроечных элементов на структуру магнитного поля многолучевого клистрона с реверсной системой.

Показано, что в реверсоподобных магнитных фокусирующих системах с радиально намагниченными магнитами переключатели, соединяющие противоположные полюса соседних магнитов, увеличивают амплитуду магнитного поля в целом, не оказывая влияние на структуру магнитного поля в парциальном канале. Исследовано влияние смещения переключателей на локальное изменение структуры магнитного поля парциального канала.

Рассмотрено влияние геометрических размеров кольцевых магнитомягких вставок на распределение и величину поперечной составляющей магнитного поля.

Обсуждены основные проблемы, возникающие при транспортировке электронных потоков и связанные с необходимостью подбора требуемого уровня магнитного поля с целью обеспечения оптимальной фазы пульсации при входе в область реверса, а также с необходимостью обеспечения минимальных уровней поперечных магнитных полей в пространстве между реверсами поля. Отмечено, что в режиме, когда фаза пульсации электронного потока выбрана так, что в области реверса амплитуда пульсации минимальна, решающее значение играет положение центра электронного потока относительно оси пролетного канала. В том случае, если оси не совпадают, электронный поток после прохождения области реверса приобретает спиралевидное вращение, тем самым существенно увеличивая заполнение канала.

Показана целесообразность разделения задачи фокусировки электронных потоков в многолучевых реверсоподобных системах на две части: фокусировку в области между полюсными наконечниками и в области реверса, внутри полюсного наконечника.

Пассивные резонансные структуры для управления полосовыми характеристиками для мощных ЭВП СВЧ.

Комаров Д.А., Морев С.П., Парамонов Ю.Н.

ФГУП “НПП Торий”, Москва

Одной из основных характеристик мощных ЭВП СВЧ является усиление прибора в заданной полосе частот при фиксированном перепаде усиления. Для обеспечения этой характеристики в клистронных усилителях широко используются фильтровые системы, представляющие собой последовательность пассивных связанных резонаторов, которые реализуют, совместно с активным контуром (входным, или выходным резонатором клистрона), определенный закон изменения импеданса взаимодействия.

В докладе представлена методика настройки многозвенной фильтровой системы мощных ЭВП СВЧ, основанная на исследовании искажения ее передаточной функции с помощью анализа смещения центра инерции плоской криволинейной трапеции, образованной этой передаточной функцией.

Показано, что при выполнении условия равенства амплитуд передаточной характеристики на резонансных частотах совокупной системы (вне зависимости от величины их численных значений) достигается равенство парциальных частот резонаторов фильтровой системы.

Показано, что при равенстве парциальных частот, а также волновых сопротивлений активного резонатора фильтра и резонатора простой формы, при идентичности щелей связи у первого пассивного звена фильтра и резонатора простой формы, активный резонатор фильтра, имеющий сложную структуру, может быть заменен резонатором простой формы (резонатором-прототипом) без искажения фильтровой характеристики многозвенной системы.

Предложен метод моделирования многозвенной фильтровой системы на основе использования понятия резонатора-прототипа.

Применение предложенной методики для проектирования трехзвенной фильтровой системы мощного клистрона показало ее эффективность для расчетной или экспериментальной настройки многозвенных фильтровых систем по сравнению с методиками настройки многозвенных фильтровых систем, основанными на эмпирических критериях.

Влияние отражений от удаленной нагрузки на пространственную структуру излучения гиротрона

Харчев Н.К.¹, Батанов Г.М.¹, Бондарь Ю.В.¹, Колик Л.В.¹, Малахов Д.В.¹, Петров А.Е.¹, Сарксян К.А.¹, Сковорода Н.Н.¹, Петелин М.И.², Новожилова Ю.В.², Каппа А.³, Мартинез Ж.³, Толкачев А.³

¹Институт общей физики РАН, Москва,

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород,

³Научный центр CIEMAT, Мадрид, Испания

Как известно, отражение от нагрузки может существенно повлиять на мощность и спектральные характеристики гиротрона [1,2]. В недавних экспериментах было обнаружено, что отражение от нестационарной удаленной нагрузки приводит к изменениям во времени поперечной структуры в периферийной части излученной из гиротрона волны: наблюдалось качание волнового пучка в вертикальной плоскости, а также изменение поляризации с периодом колебаний мембраны [3].

Если считать квазиоптический выходной преобразователь гиротрона идеальным (т.е. выводящим 100% излучения на рабочей моде в виде гауссова пучка), то одним из наиболее вероятных объяснений указанного эффекта является предположение, что в гиротроне помимо рабочей моды возбуждается резонансная мода с противоположным направлением азимутального вращения. Эта мода возбуждается под влиянием отраженной волны, которая, вернувшись в гиротрон через квазиоптический преобразователь, имеет противоположное направление вращения поля относительно рабочей моды. (Обычно гиротрон проектируют таким образом, чтобы в отсутствие отражения мода с противоположным направлением вращения не самовозбуждалась).

Эффект возбуждения моды с противоположным азимутальным вращением поля в гиротроне под воздействием отражения исследовался численно в [4]. В данной работе этот эффект описывается на основе укороченных феноменологических уравнений для комплексных амплитуд мод внутри генератора. В отсутствие отражений теория дает известную картину конкуренции двух мод. Параметры в уравнениях, как и в эксперименте, выбирались таким образом, чтобы в отсутствие отражения возбуждалась только рабочая мода. Тогда даже при сколь угодно малых отражениях наряду с рабочей модой в резонаторе гиротрона на моде встречного вращения возникают колебания, которые являются вынужденными. На выходе гиротрона излучение представляет собой суперпозицию двух волн: основной и вторичной, причем на периферийной части гауссова пучка амплитуды этих волн могут оказаться соизмеримыми. Поскольку модуляция отражателя приводит к изменению разности фаз этих волн, меняется интерференционная картина на периферии волнового пучка, что и наблюдалось экспериментально.

1. Батанов Г.М., Колик Л.В., Новожилова Ю.В. и др. *ЖТФ* **71** (2001) 90–96.
2. Фернандес А., Харчев Н.К., Новожилова Ю.В. и др. *Прикладная физика* **6** (2009) 159–165.
3. Kharchev N.K., Batanov G.M., Bondar Yu.V., et.al. Proc. of 8th Int.Works. Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications. IAP RAS, Nizhny Novgorod, 2011. P. 90.
4. Dumbrajs O. Int. J. of Infr., Millim. and Terah. Waves. **31** (2010) P. 892–898.

Магنونные кристаллы в электронике сверхвысоких частот

Шараевский Ю.П., Никитов С.А., Бегинин Е.Н., Гришин С.В.

СарГУ, Саратов

В настоящее время благодаря успехам в технологии выращивания пленочных магнитных материалов и новым подходам в технологиях получения периодических структур большой интерес вызывает получение кристаллов, подобных фотонным, на основе магнитных материалов - магنونных кристаллов (МК) [1,2], в которых распространяющимися волнами являются спиновые волны (магноны). Размерные эффекты, разнообразие дисперсионных свойств, сильная поверхностная и объемная анизотропия пленочных магнитных материалов - все это способствует формированию уникальных электродинамических и нелинейных характеристик при распространении магнитостатических волн в таких структурах, а также открывает более широкие возможности для управления этими характеристиками. В докладе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение особенностей электродинамических и нелинейных характеристик планарных структур на основе 1D- и 2D- магنونных кристаллов.

В частности, в докладе основное внимание уделяется следующим вопросам:

- Разработке периодических и квазипериодических структур, включая фрактальные структуры, на основе ферритовых пленок, и исследованию брэгговских резонансов в них.
- Исследованиям, направленным на изучение влияния 3D процессов распада на брэгговские резонансы в спектре магнитостатических волн.
- Теоретическим и экспериментальным результатам, связанным с выяснением основных механизмов формирования щелевых солитонов в запрещенной зоне МК.
- Вопросам управления характеристиками линий передачи с использованием МК при изменении уровня входного сигнала и возможности создания на их основе перестраиваемых нелинейных переключателей, нелинейных СВЧ фильтров, элементов с насыщающимся поглощением и др.
- Результатам, связанным с исследованием различных режимов генерации сигналов в кольцевом активном резонаторе с нелинейным элементом на основе МК, включая режим генерации хаотических автосолитонов.

В прикладном плане полученные результаты позволят разработать физико - технологические принципы создания устройств с широкими функциональными возможностями для обработки и генерации сигналов в диапазоне сверхвысоких частот.

Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (№ 11.G34.31.0030).

1. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.L., Shapovalov E.A. and Rasing Th. // *J. Phys. D:Appl. Phys.* **36** (2003) 277.
2. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В. и др. *Письма в ЖЭТФ* **77** (2003) 670.

Spin-wave excitations in magnonic crystals

Filimonov Y.^{1,3}, Khivintsev Y.^{1,3}, Nikitov S.^{2,3}, Pavlov E.¹, Sakharov V.¹, Vysotskii S.^{1,3}

¹ *Kotel'nikov IRE RAS, Saratov Branch;* ² *Kotel'nikov IRE RAS, Moscow;*

³ *Saratov State University, Saratov*

The lateral periodic magnetic structures (LPMS) are an object of considerable interest both from fundamental and practical application points of view. Initially LPMS were treated in approximation of small perturbation of magnetic media characterizing by ratio $\delta\Gamma/\Gamma \leq 0.1 \ll 1$, where $\delta\Gamma$ is perturbation of the parameter Γ (thickness, magnetization, etc.) of magnetic structures. Due to progress in technology it is possible now to produce LPMS with strong modulation $0.1 \leq \delta\Gamma \leq 1$. This kind of magnetic structures in some sense is microwave analog of photonic crystal and was called as magnonic crystals (MC). In this work some recent results of investigation of spin waves propagation in 1D and 2D MC based on ferrite and ferromagnetic films are discussed. The 1D and 2D MC based on yttrium iron garnet (YIG) and ferromagnetic (Py, Co) films with micron size patterns and period Λ were fabricated using lift-off and photolithography and etching processes. The properties of spin-wave excitation in MC's were investigated by FMR and VNA techniques.

For MCs based on YIG films both propagating and localized excitations were studied. For propagating magnetostatic waves (MSW) both collinear and noncollinear Bragg diffraction were investigated. In case of 1D MC spin-wave spectra quantization induced by surface microstructure was observed. Bragg resonance of magnetostatic surface waves (MSSW) in metallized 1D MC were investigated as a function of dielectric spacer thickness t . It was shown that for $t < \Lambda/\pi$ Bragg resonance disappear due to loss of the synchronism between incident and reflected waves. The MSSW defect mode in 1D MC with defect in periodic structure was investigated. It was shown that due to excitation of the defect mode the narrow peak of the transmitted signal was appeared in forbidden frequency gap, corresponding to the 1-st Bragg resonance. An influence of the parametric instability processes on MSW propagation in MC was studied. It was shown that under parametric instability the nonlinear changes of the MSW dispersion can be sufficiently big to suppress the MSW Bragg resonances in MC.

Three types of MCs based on ferromagnetic films were studied: magnetic antidot lattices, continuous magnetic films deposited on patterned substrates and structures with in-plane combination of permalloy (Py) and cobalt (Co) films like periodically alternating Co and Py microstrips. For tangentially magnetized Py antidot square lattice we found spin-wave modes hybridization effects while varying angle between MC axis and bias field. In continuous Py films sputtered on meander-like patterned substrates we found lateral spin-wave spectra quantization. For MC with periodically alternating Co and Py stripes MSSW resonances across the stripes width as well as uniform modes in Co and Py stripes were observed using typical FMR technique at frequencies 9.85 GHz. It was shown that observed resonance excitation are essentially standing waves localized in Py or Co stripes. It can be realized at magnetic bias fields (or frequencies) where degeneracy of MSW spectra in Co and Py stripes are absent.

This work was supported by the Grant for Support of Scientific Research in the Russian Universities Under the Guidance of Leading Scientists (project No. 11.G34.31.0030).

Нелинейные свойства спиновых волн в магнонных кристаллах

Устинов А.Б.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

Одним из современных научно-технических направлений является исследование спиновых волн в пространственно-периодических волноводах, изготовленных из ферромагнитных пленок. Первая волна интереса к таким исследованиям наблюдалась в конце 70-х и начале 80-х годов прошлого века (см., например, [1-5]) и была обусловлена разработкой технологии выращивания высококачественных монокристаллических пленок железиттриевого граната (ЖИГ), обладающих рекордно низкими магнитными потерями на СВЧ. Сейчас наблюдается вторая волна интереса к пленочным периодическим структурам. Она вызвана изучением волновых явлений в метаматериалах и искусственных средах. В рамках второй волны магнитные периодические структуры получили название "магнонные кристаллы" из-за наличия в них так-называемой системы запрещенных магнонных состояний (magnonic band gaps), обусловленных периодичностью магнитной волноведущей структуры [6]. Иными словами, это набор запрещенных зон в спектре спиновых волн, которые обусловлены Брегговскими резонансами. Соответственно, в этих зонах распространение спиновых волн запрещено. Подавляющее большинство как теоретических, так и экспериментальных работ было посвящено линейным спиновым волнам в магнонных кристаллах (см. обзоры [7,8]). Сравнительно недавно началось исследование нелинейных свойств спиновых волн в магнонных кристаллах. В настоящем докладе сначала будет дан краткий обзор состояния исследований спиновых волн в магнонных кристаллах на основе пленок ЖИГ, затем более подробно будут представлены результаты изучения таких нелинейных спин-волновых явлений в них, как солитоны огибающей и модуляционная неустойчивость.

1. Sykes C.G., Adam J.D., Collins J.H. *Appl. Phys. Lett.* **29** (1976) 388.
2. Seshadri S.R. *IEEE Trans. MTT* **27** (1979) 199.
3. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Плесский В.П. *ФТТ* **22** (1980) 2831.
4. Герус С.В., Харитонов В.Д. *ФММ* **58** (1984) 1069.
5. Вашковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В. *РЭ* **30** (1985) 2422.
6. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В. и др. *Письма в ЖЭТФ* **77** (2003) 670.
7. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 264001.
8. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 264002.

Угловые диаграммы рассеяния поверхностных и прямых объемных магнитостатических волн углублением, расположенном на поверхности ферромагнитной пленки

Тимошенко П.Е., Иванов В.Н., Бабичев Р.К., Шлома А.В.

ЮФУ, Ростов-на-Дону

В последнее время возрос интерес к дифракционным задачам отражения магнитостатических волн (МСВ) от неоднородностей в виде углубления на поверхности ферромагнитной пленки. Для получения требуемых характеристик устройств необходимо иметь возможность управлять распространением волны: отражать волну с малыми потерями, рассеивать волны и т.д. На основе отражательных структур можно создавать уникальные миниатюрные интегральные устройства обработки СВЧ сигналов [1-2]. Основой ряда устройств на магнитостатических волнах являются периодические структуры элементов, расположенных на пути распространения волны. В ходе проектирования таких устройств необходимо уметь рассчитывать плотность потока энергии рассеянных МСВ.

В докладе в магнитостатическом приближении представлено решение дифракционной задачи [3-4] рассеяния магнитостатических волн от произвольного неглубокого дефекта, расположенного на поверхности ферромагнитной пленки, намагниченной под произвольным углом к ее поверхности. При нахождении плотности потока энергии рассеянных магнитостатических волн использованы: метод граничных возмущений для определения выражений поверхностной плотности магнитных зарядов и двойного слоя в плоскости неоднородностей; метод стационарной фазы для определения асимптотического выражения магнитостатического потенциала в дальней зоне. Приведены результаты численных расчетов усредненной во времени плотности потока отраженных прямых и объемных МСВ для неглубоких неоднородностей прямоугольной и круглой формы. Отражение МСВ рассчитано для одиночных дефектов, имеющих размеры порядка длины волны. В таких случаях волна испытывает сильное отражение и рассеяние, причем распределение энергии между прошедшей, отраженной и рассеянными волнами зависит от геометрии неоднородности и параметров среды. Располагая неоднородности периодически, можно добиться, например, того, чтобы отраженные волны складывались в фазе, а рассеянные гасились за счет интерференции с различными фазами. Таким образом, используя мелкие углубления, можно получать требуемое управление распространением волны.

1. Вашковский А. В., Локк Э. Г. // *УФН*. (2006). Т. 176. № 4 С. 403.
2. Вашковский А. В. Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. // *Саратов*. (1993).
3. Тимошенко П. Е., Иванов В. Н., Бабичев Р. К., Шлома А. В. // *XVIII МНК «Электромагнитное поле и материалы»*. МЭИ ТУ. (Москва-Фирсановка) (2011), С. 129-137.
4. Тимошенко П. Е., Иванов В. Н., Бабичев Р. К., Шлома А. В. // *XVIII МНК «Электромагнитное поле и материалы»*. МЭИ ТУ. (Москва-Фирсановка) (2011), С. 138-153.

Исследование зависимости характеристик длинноволновых флуктуаций плотности плазмы в стеллараторе Л-2М от магнитной конфигурации и величины поперечного магнитного поля методом малоуглового рассеяния греющего гиротрона

Батанов Г.М., Борзосекон В.Д., Колик Л.В., Малахов Д.В., Петров А.Е., Пшеничников А.А., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

Развитие неустойчивостей в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) может приводить к дополнительным тепловым потерям (аномальный перенос) или даже срыву удержания и попаданию плазмы на стенки вакуумной камеры. В настоящее время определение зависимости характеристик флуктуаций от условий удержания является неотъемлемой частью исследовательских работ на всех экспериментальных установках УТС [1]: как токамаках, так и стеллараторах. На стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН, Москва) проводятся исследования длинноволновых флуктуаций плотности плазмы ($\lambda \approx 6$ см, $k_{\perp} \rho_s \approx 0,1-0,2$, где ρ_s — гирорадиус ионов, $k_{\perp}$ — поперечный волновой вектор флуктуаций) методом коллективного рассеяния излучения гиротронов, входящих в состав комплекса электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН). В качестве зондирующего излучения используется 10% от мощности гиротрона в виде обыкновенной волны, практически не поглощающейся в плазме, в отличие от 99% поглощения необыкновенной волны. В работах на Л-2М было установлено, что повышение мощности ЭЦР нагрева не приводит к росту уровня длинноволновых флуктуаций [2], в то время как уровень коротковолновых флуктуаций повышается [3], одновременно с этим снижается энергетическое время жизни, т.е. ухудшается удержание, как предполагается вследствие аномального переноса и соответствующих потерь.

Данный доклад посвящен изучению изменения характеристик длинноволновой турбулентности методом малоуглового рассеяния при изменении магнитной конфигурации стелларатора Л-2М и величины поперечного магнитного поля. Создана и проанализирована электронная база данных по ≈ 1000 разрядам Л-2М, отобраны разряды с одинаковой средней плотностью $(1,6-1,7) \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, мощностью ЭЦРН 200 кВт. Установлено, что при всех исследуемых условиях удержания спектры длинноволновых флуктуаций — широкие, существуют в виде широких спектральных полос со временем жизни до нескольких миллисекунд. При изменении магнитной конфигурации со стандартной на топологически неустойчивую уровень длинноволновых флуктуаций вырастает практически в 2 раза. При изменении поперечного магнитного поля с 0 до -20 Гс уровень длинноволновых флуктуаций увеличивается примерно в полтора раза.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (проект П779).

1. <http://www.iaea.org> *Fusion Energy Conference* (2010).
2. Батанов Г.М., Борзосекон В.Д., Колик Л.В. и др. *Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез* **2**, (2011) 70-75.
3. Skvortsova N.N., Akulina D.K., Batanov G.M. et al. *Plasma Phys. Control. Fusion* **52** (2010) 055008.

Мультипликатор в скрещенных полях в цилиндрическом резонаторе трехсантиметрового диапазона длин волн

Вихарев А.А., Иляков Е.В., Кузиков С.В., Кулагин И.С.

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Теоретические исследования [1] и эксперименты по одностороннему мультипактору в прямоугольном волноводе 3-см диапазона длин волн [2] показали, что за 10-15 нс ток разряда достигает насыщения, а концентрация электронов в облаке разряда становится близкой к критической для данной частоты излучения. При этом максимальная удельная мощность, поглощенная разрядом в условиях эксперимента, составляла более 4 кВт/см² и ограничивалась мощностью входного СВЧ источника. Эти свойства мультипакторного разряда, а также возможность его существования в отсутствии второй стенки, делают привлекательным его применение в волноводах и резонаторах с объемными пространственно развитыми модами для создания электрически управляемых поглощающих устройств и быстрых переключателей излучения высокой мощности.

Создан демонстрационный вариант управляемого переключателя на основе одностороннего мультипактора в скрещенных СВЧ электрическом и квазистационарном магнитном полях предназначенного для переключения потоков СВЧ излучения мультимегаваттного уровня мощности. Основу переключателя составляет цилиндрический резонатор, рассчитанный на моду ТМ₀₁₁ круглого волновода. Резонатор помещался в однородное магнитное поле соленоида, так что силовые линии магнитного поля были направлены вдоль оси резонатора, а силовые линии электрического поля СВЧ волны - по радиусу. В данных условиях электроны разряда дрейфовали поперек силовых линий магнитного поля и могли совершать большое число последовательных циклов соударения с поверхностью, двигаясь по кругу, что обеспечивало режим насыщения разряда и достижения критической концентрации электронов. В свою очередь, высокая концентрация электронов приводила к смещению центральной частоты резонатора.

В эксперименте под действием мультипактора происходило переключение резонатора из режима полного прохождения СВЧ излучения в режим, когда большая часть излучения отражалась.

1. Бляхман Л.Г., Горшкова М.А., Нечаев В.Е. *Изв. вузов. Радиофизика* **43** (2000) 1004.
2. Иляков Е.В., Кулагин И.С., Нечаев В.Е. *Изв. вузов. Радиофизика* **52** (2009) 979.

Модуляция излучения гиротрона при электронно-циклотронном нагреве плазмы стелларатора Л-2М

Батанов Г.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

В современных установках электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева плазмы до термоядерных температур широко используются отечественные гиротроны (мазеры на циклотронном резонансе). До последнего времени пренебрегалось влиянием на работу гиротрона весьма слабого отражения от плазменного шнура. В 2001 г. на стеллараторе Л-2М была обнаружена модуляция мощности гиротрона при ЭЦ нагреве плазмы на второй гармонике гирочастоты электронов [1]. Исследования проводились на комплексе ЭЦ нагрева плазмы стелларатора МИГ-2. В этих экспериментах было показано, что основное влияние на гиротрон оказывается в области низких частот [2], спектр модуляции состоит из отдельных спектральных полос, среди которых регистрируется пик в районе 20 кГц [3].

В докладе представлены результаты модуляции излучения трехэлектродного гиротрона Борец 75/0,8 (75 ГГц, максимальная мощность 0,8 МВт) нового комплекса ЭЦ нагрева стелларатора Л-2М. В эксперименте был измерен коэффициент взаимной корреляции между огибающей мощности гиротрона и обратного рассеяния от флуктуаций плотности плазмы. Было обнаружено, что коэффициент взаимной корреляции принимает высокие по модулю значения, что указывает на взаимосвязь флуктуаций плотности плазмы и модуляции гиротрона.

Настоящая работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 11-08-01129-а.

1. Батанов Г.М., Колик Л.А., Новожилова Ю.В. и др. *ЖТФ* **71(5)**, (2001), 90—95.
2. Харчев Н.К., Батанов Г.М., Бондарь Ю.Ф. и др. *Прикладная физика* **6**, (2009), 158—164.
3. Батанов Г.М., Колик Л.В., Кончечков Е.М. и др. *Физика плазмы* **37(5)**, (2011), 414—423.

Возможности численной двумерной модели адиабатической ловушки гиротрона

Мануилов В.Н.

Нижегородский госуниверситет им. Н.И.Лобачевского, Нижний новгород

Гиротроны являются на данный момент наиболее мощными источниками СВЧ излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Активной средой для гиротронов, служат винтовые электронные пучки (ВЭП), формируемые адиабатическими магнетронно-инжекторными пушками (МИП). Для получения высокого КПД и выходной мощности необходимо формирование ВЭП с максимально возможными величинами среднего питч-фактора $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$ (здесь $v_{\perp}$ и $v_{\parallel}$ - соответственно средняя вращательная и поступательная компоненты скорости частиц в рабочем пространстве). Однако, в эксперименте удается реализовать значения g не более $g_{max} = 1.3 - 1.5$. С укорочением длины волны излучения величина g_{max} существенно уменьшается и в миллиметровых и субмиллиметровых гиротронах уже оказывается близка к 1 с соответствующим падением КПД.

Основной причиной снижения g_{max} являются наличие двух зеркал в системе формирования (магнитного зеркала вблизи рабочего пространства прибора и электростатического зеркала в прикатодной области МИП) и одновременно - значительного относительного разброса осцилляторных скоростей $\delta v_{\perp} \approx 20 - 30\%$. Поэтому попытка реализовать большие значения g вызывает отражение электронов от магнитного, а затем и электростатического зеркал, и последующий захват значительного числа частиц в адиабатическую ловушку между катодом и резонатором. Захваченные электроны ухудшают скоростное распределение в ВЭП, инициируют низкочастотные колебания пространственного заряда в ловушке и за счет этого могут уширять энергетический спектр частиц в резонаторе. Все перечисленные выше факторы ведут к дополнительному падению КПД, и к потере устойчивости пучка. Поэтому статическая модель пучка, используемая обычно для расчета характеристик ВЭП в МИП, недостаточна для расчета параметров ВЭП при больших величинах g и определения g_{max} .

В докладе описана двумерная по пространственным координатам динамическая модель ВЭП, учитывающая отражение частиц от магнитного и электростатического зеркал, электронную бомбардировку катода отраженными частицами, и вызванную ею вторичную эмиссию электронов с катода. Моделирование выполнялось методом крупных частиц в рамках квазистатического по электрическому полю приближения. В процессе моделирования учитывались также такие важные для формирования ВЭП факторы как влияние двумерного кулоновского поля пучка, тепловые скорости электронов и шероховатости эмиттера.

Проанализированы временные зависимости захваченного в адиабатическую ловушку гиротрона пространственного заряда, потенциала в разных сечениях пучка и проходящего в рабочее пространство тока при различной величине холодного питч-фактора. Найдены зоны бомбардировки катода, ток бомбардировки. Определены энергетические спектры проходящих в рабочее пространство частиц. Выполнено сравнение характеристик МИП, формирующих ВЭП различной топологии, отличающихся углом наклона магнитного поля к поверхности эмиттера. Проанализированы отличия МИП гиротронов длинноволновой и коротковолновой частей миллиметрового диапазона длин волн (частоты соответственно 24-30 и 80-170 ГГц) с точки зрения возникновения колебательных режимов в облаке пространственного заряда. Первый частотный диапазон интересен для разработки гиротро-

нов для технологических комплексов, второй - для гиротронов используемых в установках УТС с целью нагрева и стабилизации плазмы.

Оптимизация режимов генерации непрерывных гиротронов средней мощности на второй гармонике гирочастоты

Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В.

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Интенсивного излучение миллиметрового диапазона длин волн используется в широком круге технологических задач, например, для высокотемпературной обработки диэлектрических и полупроводниковых материалов, выращивания алмазных пленок и дисков, создания пучков многозарядных ионов. Повышение частоты излучения по сравнению с традиционными промышленными СВЧ источниками (2.45 ГГц) позволяет значительно повысить эффективность нагрева и спекания материалов на основе оксидов и нитридов, за счет сильного роста их поглощающей способности с увеличением частоты. Кроме того, в миллиметровом диапазоне достижима более высокая однородность нагрева, что позволяет уменьшить время обработки и улучшить эксплуатационные характеристики получаемых материалов. Наконец, использование гиротронов для ЭЦРН плазмы в источниках многозарядных ионов позволяет реализовать сравнительно высокий заряд ионов и ток ионного пучка. В Институте прикладной физики РАН создана линейка гиротронных комплексов [1] с различными рабочими частотами и мощностями, не имеющих мировых аналогов по техническим параметрам и функциональным возможностям. Дальнейшее развитие комплексов направлено на повышение их мощности и эффективности, а также на создание частотно-перестраиваемых источников.

В докладе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования гиротронов с рабочими частотами 24-28 ГГц. Экспериментально продемонстрирована возможность существенного (в 1.5 раза) повышения КПД за счет использования схемы рекуперации остаточной энергии электронного пучка и реализация быстрой (2 кГц) ступенчатой перестройкой частоты генерации на величину около 2%. Показана возможность возбуждения в одном приборе колебаний на первой (13.6 ГГц) и второй гармониках (24.1 ГГц) гирочастоты с примерно равной эффективностью (25%) и мощностью (5 кВт). Теоретически проанализирована электронная пушка со сниженной мощностью подогревателя, в которой необходимая температура эмиттера обеспечивается нагревом за счет малого тока на катод отраженных от магнитной пробки электронов. Необходимо отметить, что несмотря на значительный опыт в создании технологических гиротронов, ряд вопросов требует дополнительного исследования. В частности, при попытке увеличить мощность гиротрона с рабочей частотой 24 ГГц до 10 кВт наблюдались сложные нестационарные режимы генерации, обусловленные конкуренцией мод на разных гармониках, как бегущих, так и на критических частотах. Детальный расчет зон возбуждения показал, что для сохранения одномодовой генерации рабочего типа колебаний повышение тока электронного пучка должно сопровождаться дополнительными мерами по обеспечению селекции, например, возмущение высокочастотного и электростатического поля [2].

1. Bykov Yu.V. et al. *IEEE Trans. On Plasma Sci.* **32** (2004) 67
2. Антаков И.И. и др. Гиротроны на гармониках гирочастоты в кн. Гиротрон, ИПФ АН СССР, Горький, 1981.

Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН

Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев, А.С. Седов

ИПФ РАН, Нижний Новгород

Одним из перспективных методов повышения чувствительности в ЯМР-спектроскопии является динамическая поляризация ядер (ДПЯ) [1]. Для ее реализации требуется источник непрерывного когерентного излучения с мощностью порядка нескольких десятков ватт в диапазоне частот от 0.25 ТГц и выше. В настоящее время среди всех относительно компактных источников электромагнитного излучения только гиротроны полностью удовлетворяют этим требованиям [2]. Для ДПЯ ЯМР спектроскопического комплекса в Институте Биофизической химии (университет Франкфурта-на-Майне, Германия) требовался источник с частотой $258,6 \pm 0,3$ ГГц, мощностью 20 Вт, при относительной стабильности мощности и частоты выходного излучения не хуже 10% и 10^{-5} при многочасовой непрерывной работе прибора. Для этой цели в ИПФ РАН, совместно с НПП «ГИКОМ», был разработан гиротронный комплекс на второй гармонике гирочастоты. Максимальная выходная мощность разработанного гиротрона составила 200 Вт при токе 0.45 А и напряжении 14 кВ. Относительная стабильность мощности и частоты выходного излучения в режимах 10-50 Вт составила 1% и $5 \cdot 10^{-6}$, соответственно [3]. При использовании данного гиротрона чувствительность ЯМР-спектрометра возросла в 80 раз [4]. В настоящее время в ИПФ ведутся работы по созданию 263 ГГц гиротрона на первой гармонике гирочастоты и 395 ГГц гироприбора на второй гармонике гирочастоты с выходной мощностью порядка 100 Вт [5]. Рассматриваются такие варианты реализации 395 ГГц прибора, как классический гиротрон, гироклистрон, и гиротрон с инвертированной электродинамической системой в режиме giro-ЛОВ. Использование режима giro-ЛОВ позволит существенно расширить диапазон плавной перестройки частоты в приборе. Использование гироклистрона позволит реализовать импульсно-периодический режим работы, новый для динамической поляризации ядер в ЯМР.

1. Griffin, R.G. 1998. Dipolar recoupling in MAS spectra of biological solids. *Nature Struct. Biology*. 5: 508-512.
2. В.Л. Братман, А.Г. Литвак. Е.В. Суворов Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения. // *Успехи Физических наук* 2011 Т.181 №8 стр.267
3. Н.П.Венедиктов, В.В.Дубров, В.Е. Запевалов, С.Ю.Корнишин, А.В.Котов, А.Н.Куфтин, О.В.Малыгин, А.С.Седов, А.Ш.Фикс, В.И.Цалолихин. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. // *Изв.вузов. Радиофизика*, 2010. Т.53. №4. С.260-268
4. V.Denysenkov, M.J. Prandolini, M Gafurov, et al. Liquid state DNP using a 260 GHz high power gyrotron *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010
5. Development of 395 GHz gyrotrons for NDP spectroscopy on the basis of experience of elaboration 260 GHz gyrotron. V.E.Zapevalov, A.N.Kuftin, V.N.Manuilov, M.A.Moiseev, A.B.Pavelyev, A.S.Sedov, N.A.Zavolsky 8th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications" Nizhny Novgorod-St. Peterburg, Russia July 9-16 2011

Экспериментальное исследование дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн

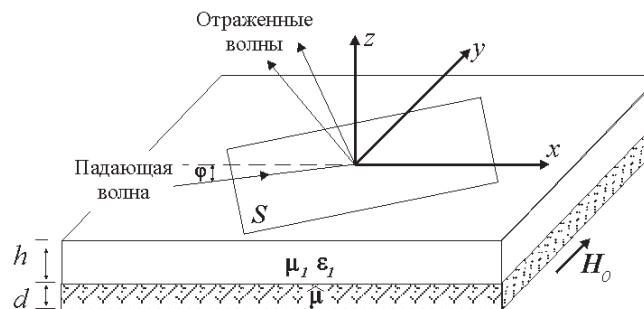
Вяткина С.А., Нистратов Н.П., Бабичев Р.К., Иванов В.Н.

ЮФУ, Ростов-на-Дону

В области малых волновых чисел проведено сравнение результатов расчета дисперсионных характеристик поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в слоистых структурах типа диэлектрик - касательно намагниченная ферритовая плёнка железо-иттриевого граната (ЖИГ) - подложка из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) с результатами измерений.

Дисперсионные зависимости ПМСВ рассчитаны на основе дисперсионного уравнения, полученного в [1], для двух слоистых структур: структура 1 - воздух (диэлектрическая проницаемость - 1) - ЖИГ (15.4) - ГГГ (11); структура 2 - керамическая подложка (100) - ЖИГ - ГГГ. В обоих случаях толщина плёнки ЖИГ 15 мкм, намагниченность насыщения 1750 Гс. В эксперименте исследованы структуры, подмагничиваемые постоянным внешним магнитным полем 1500 Э и 1650 Э. При расчете дисперсионных зависимостей учтена роль магнитной анизотропии плёнки.

На рисунках сплошными кривыми 1 и 2 показаны дисперсионные характеристики электромагнитных волн, возбуждаемых в частотном диапазоне ПМСВ в структурах 1 и 2 соответственно. Эти волны представляют собой поверхностные электромагнитные волны (ПЭМВ), локализующиеся внутри плёнки ЖИГ вблизи её верхней поверхности. Также на графиках представлены экспериментальные дисперсионные характеристики ПЭМВ, полученные с помощью метода, использующего для определения длины волны интерференцию сигналов на приёмной антенне от поверхностной волны в ЖИГ и электромагнитной волны [2]. Ромбиками обозначены экспериментальные характеристики ПЭМВ в структуре 1, кружками - в структуре 2. Рис. 1 соответствует величине постоянного внутреннего магнитного поля 1535 Э, рис. 2 - 1685 Э.



Результаты расчета и эксперимента показали, что в исследованных структурах при малых волновых числах ПМСВ представляют собой ПЭМВ; при заданных значениях подмагничивающего поля и намагниченности насыщения феррита минимальное волновое число и нижняя граница частотного диапазона ПЭМВ зависят от диэлектрических проницаемостей ферритовой плёнки и окружающих её сред.

1. Вяткина С.А., Бабичев Р.К., Иванов В.Н. *Труды XVIII Международной конференции "Электромагнитные поля и материалы"* (2010) 182.
2. Огрин Ю.Ф., Луговской А.В. *Радиотехника и электроника* **28** (1983) 1664.

Генерация одиночных хаотических импульсов в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки под внешним шумовым воздействием

Гришин С.В., Шараевский Ю.П.

СарГУ, Саратов

В теории синхронизации одним из фундаментальных явлений является синхронизация автоколебаний внешним сигналом, получившей название вынужденной синхронизации. На сегодняшний день в связи с развитием теории динамического хаоса и созданием источников хаотических сигналов интерес представляют исследования, направленные на изучение синхронизации хаоса. Синхронизацию хаоса можно рассматривать как явление установления периодического режима в автоколебательной системе, работающей в режиме хаотических колебаний, под влиянием внешнего гармонического воздействия [1].

Недавно проведенные эксперименты показали, что в автоколебательной системе на основе ферромагнитной пленки, в условиях существования трехмагнонных и четырехмагнонных процессов распада магнитостатических волн, наблюдается генерация широкополосного хаотического СВЧ сигнала [2]. В [3] исследовано влияние внешнего периодического воздействия на хаотическую динамику такого автогенератора, приводящее к формированию периодической последовательности хаотических СВЧ импульсов.

В качестве внешнего воздействия может использоваться шумовой СВЧ сигнал, влияние которого, как известно, приводит к увеличению степени порядка в хаотической динамике автоколебательной системы, а также к возникновению явления когерентного резонанса. В настоящей работе впервые демонстрируется возможность формирования одиночных хаотических СВЧ импульсов в автогенераторе хаоса, находящемся под внешним узкополосным шумовым воздействием, частота которого находится за полосой частот хаотического сигнала, но в полосе частот широкополосного транзисторного усилителя мощности. В те интервалы времени, на которых амплитуда внешнего воздействия превышает некий порог, наблюдается подавление хаотической динамики системы и, наоборот, на временных интервалах, где амплитуда внешнего воздействия ниже порога, наблюдается генерация хаоса. Показано, что время корреляции генерируемого в кольце СВЧ сигнала увеличивается с увеличением интенсивности шума и имеет ярко выраженный максимум при определенной его интенсивности. Данный эффект схож с эффектом когерентного резонанса, который наблюдался в системе Фитц-Хью-Нагумо, возбуждаемой шумом [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057) и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (проект № 14.740.11.1078)

1. Pikovsky A. , Rosenblum M. and Kurths J. Synchronization. A universal concept in nonlinear sciences. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
2. Wu M., Kalinikos B.A., and Patton C.E., *Phys. Rev. Lett.* **95**, (2005) 237202.
3. Гришин С.В., Зарькова Е.В., Шараевский Ю.П., *Письма в ЖТФ* **37**, (2011) 96.
4. Pikovsky A.S. and Kurths J., *Phys. Rev. Lett.* **78**, (1997) 775.

Генерация хаотических импульсов в кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой в условиях трехволнового взаимодействия

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

СарГУ, Саратов

В последнее время интенсивно проводятся исследования, направленные на создание кольцевых автоколебательных систем с положительной обратной связью, демонстрирующих хаотическое поведение в диапазоне сверхвысоких частот. Особый интерес вызывают автоколебательные системы, в которых генерация сигнала со сплошным спектром возникает в случае использования в цепи обратной связи пассивных нелинейных элементов на основе объемных или тонкопленочных ферромагнетиков [1]. Нелинейные свойства таких элементов обусловлены тем, что при достаточно высоких уровнях мощности сигнала в ферромагнетиках происходит параметрическое возбуждение коротковолновых обменных спиновых волн (СВ), приводящее к стохастической автомодуляции генерируемого сигнала [2,3].

В данной работе исследовалась кольцевая автоколебательная система, состоящая из последовательно соединенных широкополосного твердотельного СВЧ усилителя мощности на GaAs полевых транзисторах, переменного аттенюатора и перестраиваемой магнитным полем широкополосной нелинейной линии задержки на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ). При малом значении коэффициента усиления кольца G в системе генерировался гармонический сигнал на частоте одной из собственных мод кольца. При увеличении значения коэффициента усиления G наблюдалась амплитудная модуляция сигнала. Вначале она была гармонической, а при дальнейшем увеличении коэффициента усиления в системе формировалась последовательность релаксационных импульсов. При больших значениях G в системе генерировалась последовательность хаотических релаксационных колебаний. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления в системе начинали генерироваться другие кольцевые моды.

Для теоретического анализа исследуемой системы была построена модель, представляющую собой систему трёх дифференциальных уравнений для комплексных амплитуд огибающих ПМСВ и СВ, описывающих взаимодействие ПМСВ со СВ при параметрических процессах первого порядка в активной системе с нелинейным усилением и задержкой в цепи обратной связи.

Результаты численного моделирования полученной модели достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными в случае возбуждения в системе одной из собственных мод кольца.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057) и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 гг (ГК № 14.740.11.1078).

1. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П. *Письма в ЖЭТФ* **25** (2008) 743-747
2. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. *Письма в ЖТФ* **24** (1998) 66-72
3. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. *ЖТФ* **69** (1999) 100-103

Миниатюрная система намагничивания и термостабилизации СВЧ ферритовых устройств

Тихонов В.В., Литвиненко А.Н.

СарГУ, Саратов

Общей проблемой всех типов ферритовых устройств является необходимость намагничивания. Ее решение сводится к созданию портативных магнитных систем на постоянных магнитах. В случае спинволновых СВЧ устройств к магнитным системам дополнительно предъявлялся целый ряд жестких и порой противоречивых требований, а именно: магнитная система должна быть миниатюрной и экранированной, но при этом поле в рабочем зазоре должно быть достаточно сильным, однородным и регулируемым. Не меньшую проблему создает температурная нестабильность частоты спинволновых устройств, которая возникает из-за теплового размагничивания, как самой пленки ЖИГ, так и постоянных магнитов. К сожалению универсальных решений этих проблем пока не найдено.

В данной работе предлагается достаточно простое комплексное решение проблем намагничивания и термостабилизации спинволновых устройств для случая нормального намагничивания пленки ЖИГ. Предложено несколько вариантов конструкций экранированных магнитных систем с механической и электрической регулировкой поля, в которых температурный дрейф частоты ферритового устройства компенсируется температурным размагничиванием специально подобранной комбинации самарий-кобальтового и неодим-железо-борового магнитов. Настройка магнитной системы на заданную частоту стабилизации осуществляется механической регулировкой поля, которая по окончании настройки фиксируется. В дальнейшем используется только электрическая регулировка частоты, которая не нарушает условия термостабилизации. Предложены варианты конструкции магнитной системы, допускающие размещение внутри экрана многоэлементной микрополосковой схемы, содержащей, помимо ферритового устройства, другие активные и пассивные элементы. В этих конструкциях магнитный экран дополнительно выполняет функции корпуса микрополосковой схемы. При этом магнитная система практически не увеличивает габариты всего устройства. В качестве примера приводятся конструкции перестраиваемого транзисторного СВЧ генератора, выполненного на основе пленочного ЖИГ резонатора.

Климатических испытаний магнитной системы и встроенной системой термостабилизации частоты проводились в диапазоне температур от нуля до 60°C . В качестве испытуемого устройства использовался пленочный ЖИГ резонатор. На основании измерений было установлено, что предлагаемая система термостабилизации обеспечивает стабильность частоты резонатора не хуже во всем диапазоне температур. Это эквивалентно термостатированию ЖИГ резонатора с точностью поддержания температуры порядка $0,01^{\circ}\text{C}$.

Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (проект № 11.G34.31.0030)

Синтез углеродных нанотрубок на подложках из молибдена с применением тонкопленочных и жидких катализаторов

Тарасов Е.А.^{1,2}, Сеницын Н.И.¹, Григорьев Ю.А.¹, Бурцев А.А.^{2,2}

¹СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

²ФГУП «НПП «Алмаз», Саратов

Как известно, углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальными физико-химическими свойствами (малые размеры, высокая электропроводность, термическая и химическая стабильность, высокое аспектное соотношение) и вследствие этого являются перспективным материалом для создания на их основе холодных катодов электровакуумных приборов нового класса [1].

На данный момент перед нами стоит задача по получению тонких пленок из УНТ на плоских торцевых поверхностях оправок, выполненных из молибдена (марки МЧ). Предполагается, что такие структуры будут использованы в качестве холодных катодов при создании действующих образцов ЛБВ. Обзор литературных источников показал, что за последнее время не было опубликовано ни одной работы, посвященной проблеме синтеза УНТ на подложках из молибдена. Однако в [2] было отмечено, что подобные структуры, названные «нитевидные кристаллы графита», были выращены на тугоплавких металлах (в том числе и на молибдене) путем разложения углеводородов над поверхностью подложек при помощи лучистого нагрева.

В данной работе УНТ на поверхности молибденовых оправок были получены методом химического осаждения паров гептана в присутствии катализатора. Источником углерода служили пары гептана, которые подавались в рабочую зону в потоке газа-носителя (аргона). Для синтеза УНТ в качестве катализатора были использованы тонкие пленки железа АРМКО, полученные методом термического испарения в вакууме с резистивным нагревом (см. рис. 1а), а также водные растворы ферритина (см. рис. 1б) и ацетата железа (см. рис. 1с).

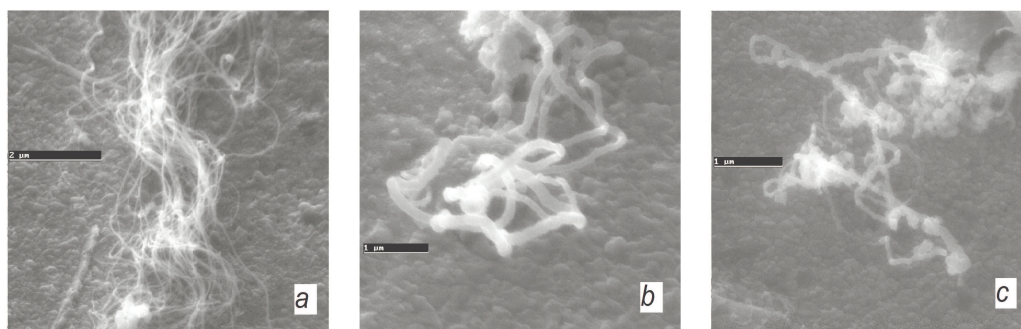


Рис. 1. СЭМ изображения УНТ, выращенных на поверхности молибденовых оправок.

Отмечено, что в случае использования молибдена в качестве материала подложки температура технологического процесса синтеза УНТ должна быть не менее 900 °С.

1. А.В. Елецкий. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // Успехи физических наук, 2010. Т. 180, № 9. С. 897-930.
2. Б.В. Дерягин, Д.В. Федосеев. Рост алмаза и графита из газовой фазы.- М.: Наука, 1977.- 116 с.

Генераторы гиперболического хаоса: схемотехническая реализация и моделирование в программной среде Multisim

Кузнецов С.П.

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов

Со времени классических работ Андронова и его школы, грубые, или структурно устойчивые системы считаются подлежащими первоочередному исследованию в теории колебаний и рассматриваются как наиболее значимые с практической точки зрения [1]. В свете этого принципа, говоря о прикладных аспектах динамического хаоса, следовало бы отдать предпочтение классу систем с однородно гиперболическими хаотическими аттракторами, которым присуща структурная устойчивость. Такие аттракторы были введены в рассмотрение в 60-70-е годы [2], но их примеры до последнего времени были представлены лишь искусственными математическими конструкциями (аттрактор Плыкина, соленоид Смейла-Вильямса), не имеющими прямого отношения к реальным системам.

Недавно предложены примеры физически реализуемых систем с однородно гиперболическими хаотическими аттракторами [3,4]. Тем самым возникли предпосылки для создания на этой основе реально функционирующих устройств электроники, демонстрирующих структурно устойчивый хаос, свойства которого нечувствительны по отношению ко всевозможным шумам и помехам, а также к вариации параметров и характеристик элементов, составляющих систему.

В лекции изложен ряд возможных подходов к разработке систем, демонстрирующих грубый, структурно устойчивый хаос, которые опираются на традиционные для радиофизики представления и модели (осцилляторы, связанные системы, цепи обратной связи). Обсуждается несколько схем, построенных на этой основе, в том числе, система двух автогенераторов, активных попеременно благодаря периодической модуляции параметра, осциллятор с запаздывающей обратной связью, аналоговые устройства, реализующие неавтономные системы с динамикой на аттракторе Плыкина и Смейла-Вильямса, а также автономная система с аттрактором Смейла-Вильямса в сечении Пуанкаре. Для всех систем приводятся и сопоставляются результаты численного решения динамических уравнений и моделирования с использованием программной среды Multisim, в том числе реализации, фазовые портреты, спектры колебаний.

Радиотехнические устройства со структурно устойчивым гиперболическим хаосом, подобные рассмотренным в лекции, могут найти приложение в системах скрытой коммуникации, шумовой локации, а также для криптографических схем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-ННИО 11-02-91334.

1. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. Наука, М., 1959.
2. Синай Я.Г., в кн. Нелинейные волны, ред. Гапонов-Грехов А.В. Наука, М., 1979.
3. Кузнецов С.П. *УФН* **181** (2011) 121
4. Kuznetsov S.P. Hyperbolic Chaos: A Physicist's View. Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012.

Турбулентные электронные пучки - источники широкополосных шумоподобных СВЧ колебаний

Калинин Ю.А., Стародубов А.В.

СарГУ, Саратов

В настоящее время в качестве рабочих частот различных систем связи и телекоммуникаций широко используется сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон электромагнитных волн. Представляет интерес рассмотрение вакуумных источников СВЧ излучения, которые являются основными элементами мощных систем радиолокации, связи и телекоммуникаций [1]. В настоящей работе сделана попытка с единых позиций проанализировать все известные в настоящее время так называемые вакуумные генераторы с внутренней электронной обратной связью (в том числе и вакуумные генераторы на виртуальном катоде - низковольтные виркаторы). Общим для таких систем вакуумной электроники является наличие одного или многих сгустков пространственного заряда, которые образуются многоскоростными турбулентными электронными пучками. Плотность образующихся сгустков пространственного заряда влияет на амплитуду генерируемых колебаний, а их количество влияет на полосу генерации. Для формирования турбулентных электронных пучков, в которых будет наблюдаться значительное количество сгустков пространственного заряда, необходимо наличие большого разброса электронов по скоростям. В области электронной пушки начальный разброс электронов по скоростям может быть достигнут путем расположения ускоряющего электрода вблизи катода. В качестве ускоряющего электрода может выступать сетка или диафрагма, которые вследствие линзовых эффектов могут обеспечить большой разброс электронов по поперечным скоростям (угол наклона траекторий электронов). Естественно, что разброс электронов по поперечным скоростям приводит к разбросу электронов по продольным скоростям. Далее, в пространстве дрейфа электронного пучка присутствие неоднородного магнитного поля способствует увеличению разброса электронов по продольным скоростям, что в свою очередь сказывается на разбросе электронов по поперечным скоростям. В коллекторной области разброс электронов по скоростям может быть увеличен путем создания тормозящего электрического поля. Таким образом, на образование плотных сгустков пространственного заряда влияют следующие факторы:

- начальный разброс электронов по скоростям в области электронной пушки
- разброс электронов по скоростям в магнитном поле
- наличие отраженных от коллекторной области "медленных" электронов

Все вышеперечисленное создает условия к образованию плотных сгустков пространственного заряда (плотность тока в таких сгустках может быть в 300-500 раз выше средней). Сгустки пространственного заряда и их пространственно-временные колебания являются источниками широкополосных шумоподобных колебаний [2]. В данной лекции также рассмотрены результаты проведенных экспериментальных исследований по анализу структуры турбулентных электронных пучков. Приведен обзор ряда принципиальных схем малогабаритных генераторов широкополосных шумоподобных СВЧ колебаний, работа которых основана на формировании и использовании физических эффектов в интенсивных турбулентных электронных пучках. Рассмотрен также эффективный способ создания

мощных широкополосных шумоподобных генераторов, который может быть реализован практически на обычных промышленных классических лампах бегущей волны (ЛБВ), за счет изменения системы магнитной периодической фокусировки и подачи тормозящего потенциала на электродинамическую систему усиления через ввод энергии. Таким образом, в данной лекции сделана попытка осветить такое фундаментальное физическое явление как турбулентность в интенсивных электронных пучках, наблюдаемое в приборах и устройствах вакуумной электроники, с новых позиций, путем его использования для генерации принципиально широкополосных шумоподобных колебаний.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-02-00047-а и № 10-02-00256-а.

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электроники для физиков. Т. 1,2. М.: Физматлит. 2003, 2004.
2. Kalinin Ju.A., Starodubov A.V. *Physics of wave phenomena* **19** 1 (2011) 1-6

Научное издание

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

МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ

Ответственный за выпуск — доцент Е.Н. Егоров

Оригинал–макет подготовлен в пакете L^AT_EX