

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В. Н. КАРАЗИНА

Серия | *Series*
«Проблемы теоретической | *«Problems of Theoretical*
и математической физики» | *and Mathematical Physics»*

ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
PROBLEMS OF THEORETICAL PHYSICS

Научные труды | Scientific works

Выпуск 4 | Issue 4

Харьков – 2020 | Kharkiv – 2020

УДК 53.01
П 78

Серия «Проблемы теоретической и математической физики. Научные труды»
под общей редакцией академика А. Г. Загороднего, академика Н. Ф. Шульги

Рецензенты:

академик НАН Украины **Литвиненко Л. Н.**;
академик НАН Украины **Яковенко В. М.**

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 5 от 24 февраля 2020 года)*

Проблемы теоретической физики. Научные труды. Выпуск 4 = Problems of theoretical physics. Scientific works. Issue 4 / Н.А. Азаренков, С.С. Апостолов, В.Г. Барьяхтар, В.А. Буц, А.А. Голованов, А.Г. Данилевич, В.И. Карась, М.И. Копп, И.Ю. Костюков, З.А. Майзелис, А.М. Пухов, Т.Н. Рохманова, П.С. Стрелков, Й. Томас, А.В. Тур, В.А. Ямпольский, В.В. Яновский ; под общей редакцией А.Г. Загороднего, Н.Ф. Шульги, ред. вып. В.И. Карась. – Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2020. – Вып. 4. – 548 с. (Сер. «Проблемы теоретической и математической физики» под общ. ред. А.Г. Загороднего, Н.Ф. Шульги).

ISBN 978-966-285-643-9

Представлены история, становление и современное состояние плазменной электроники и новых методов ускорения заряженных частиц. Проведен подробный анализ основных типов моделей описания взаимодействия спиновых и звуковых волн в магнитоупорядоченных материалах. Показано, что коэффициенты отражения и прохождения в слоистых сверхпроводниках зависят от амплитуды волн. Описаны некоторые важные стороны регулярной и хаотической динамики волновых процессов и формирования крупномасштабных вихревых и магнитных структур в электропроводящих средах.

Для ученых в области естествознания, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов физических факультетов.

УДК 53.01

ISBN 978-966-285-144-1 (вып. 1)	© Национальная академия наук Украины, 2014 © Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2014
ISBN 978-966-285-377-5 (вып. 2)	© Национальная академия наук Украины, 2017 © Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2017
ISBN 978-966-285-594-4 (вып. 3)	© Национальная академия наук Украины, 2019 © Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2019
ISBN 978-966-285-643-9 (вып. 4)	© Национальная академия наук Украины, 2020 © Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2020 © Н. А. Азаренков, С. С. Апостолов, В. Г. Барьяхтар, В. А. Буц, А. А. Голованов, А. Г. Данилевич, В. И. Карась, М. И. Копп, И. Ю. Костюков, З. А. Майзелис, А. М. Пухов, Т. Н. Рохманова, П. С. Стрелков, Й. Томас, А. В. Тур, В. А. Ямпольский, В. В. Яновский, 2020 © Дончик И. Н., макет обложки, 2020

О Г Л А В Л Е Н И Е

От редакторов научных трудов.....	8
ЧАСТЬ I. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ.....	11
Н. А. Азаренков, В. И. Карась.	
1. Становление плазменной электроники и новых методов ускорения.....	12
2. Плазменная электроника и плазменные методы ускорения заряженных частиц.....	22
Примечания.....	32
3. Коллективные взаимодействия интенсивных электронных импульсных пучков с плазмой. Образование и азвите пучково- плазменного разряда.....	34
3.1. Коллективные взаимодействия с плазмой электронного пучка (системы осцилляторов).....	36
3.2. Образование пучково-плазменного разряда.....	46
3.3. Результаты экспериментов и их обсуждение.....	48
3.4. Коллективные взаимодействия интенсивных первоначально модулированных и немодулированных электронных импульсных пучков с плазмой. Развитие пучково плазменного разряда.....	56
3.5. Заключение.....	79
4. 2,5-мерное численное моделирование формирования плазменного канала ионами при распространении последовательности релятивистских электронных сгустков в плотной и разреженной плазме.....	80
4.1. Физическая и математическая модель.....	81
4.2. Моделирование.....	82
4.3. Результаты численного моделирования.....	84
4.4. Заключение.....	87
5. Взаимодействие с плазмой или газами микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой.....	87
5.1. Теоретические и экспериментальные исследования падения электромагнитных волн на границу вакуум – плотная плазма.....	88
5.2. Высокочастотный разряд полями волн со стохастически прыгающей фазой и его применение.....	89
5.3. Заключение.....	97
6. Современное состояние плазменной электроники и новых методов ускорения.....	97

6.1. Нелинейная теория плазменно-пучкового взаимодействия.....	97
6.2. Взаимодействие с заряженными частицами стохастического СВЧ излучения	100
6.3. Плазменные методы ускорения заряженных частиц	105
6.4. Ускорение заряженных частиц в вакууме	110
Список литературы.....	111

ЧАСТЬ II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА..... 124

П. С. Стрелков	
1. Предмет плазменной свч электроники	124
2. Некоторые сведения из теории взаимодействия пространственно-ограниченной плазмы с релятивистским электронным пучком	126
3. Формирование электронных пучков	129
4. Методы создания плазмы	137
5. Схема и основные принципы работы ПРГ.....	142
5.1. Результаты исследований ПРГ с малой длительностью импульса тока пучка и сравнение с расчетом	146
5.2. Плазменный релятивистский генератор микросекундной длительности СВЧ импульса	153
5.3. Перестройка частоты ПРГ в импульсно-периодическом режиме.....	158
5.4. Плазменный релятивистский СВЧ усилитель	159
5.4.1. Плазменный релятивистский СВЧ усилитель с длительностью импульса тока РЭП 30 нс. Частоты 9 - 13 гГц.....	160
5.4.2. Плазменный релятивистский СВЧ усилитель микросекундной длительности. Частоты 2.4 – 3.1 гГц.....	163
6. Заключение	174
Список литературы.....	176

ЧАСТЬ III. ТЕОРИЯ СИЛЬНО НЕЛИНЕЙНОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ СГУСТКОМ ИЛИ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ..... 178

А. А. Голованов, И. Ю. Костюков, Й. Томас, А. М. Пухов	
1. Введение	179
2. Формулировка задачи.....	183
3. Общие уравнения для кильватерной волны	185
3.1. Постановка общей задачи	185
3.2. Квазистационарное приближение	186
3.3. Уравнения для электромагнитного поля	187
4. Движение заряженных частиц	189
4.1. Кинетический подход	189
4.2. Движение электронов плазмы	191
4.3. Движение релятивистских сгустков частиц.....	193
5. Модель плазменной полости	194
6. Уравнение для границы плазменной полости.....	196
6.1. Влияние профиля электронного слоя.....	199
6.2. Приближение бесконечно тонкого слоя.....	200
6.3. Релятивистское приближение	201
6.4. Область применимости приближений.....	201
7. Электромагнитное поле в плазменной полости.....	205

7.1. Кильватерный потенциал	205
7.2. Продольное электрическое поле	206
7.3. Магнитное поле	208
7.4. Поперечное электрическое поле	210
7.5. Поперечная сила.....	211
8. Вычисление формы плазменной полости.....	213
9. Ненагруженная плазменная полость	215
10. Нагруженная плазменная полость	218
10.1. Эффективность ускорения.....	218
10.2. Прямоугольный электронный ступок.....	220
10.3. Ускорение в однородном поле	224
11. Заключение.....	229
Список литературы	231

ЧАСТЬ IV. СВЯЗАННЫЕ МАГНИТОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

В. Г. Барьяхтар, А. Г. Данилевич	
Введение.....	234
1. Магнитоупругие волны в ферромагнетике кубической симметрии	236
1.1. Законы дисперсии связанных магнитоупругих волн в кубическом ферромагнетике.....	236
1.2. Взаимодействие первого поперечного звука со спиновыми волнами в сплавах с эффектом памяти формы	246
1.3. Взаимодействие второго поперечного звука со спиновыми волнами в сплавах с эффектом памяти формы	248
2. Магнитоупругие волны в ферромагнетике одноосной симметрии	254
2.1. Магнитоупругая щель в одноосном ферромагнетике как проявление эффекта Хиггса	254
2.2. Спектры связанных магнитоупругих волн в одноосном ферромагнетике	260
3. Затухание магнитоупругих волн в ферромагнетиках	265
Список литературы	270

ЧАСТЬ V. ПРОХОЖДЕНИЕ, ОТРАЖЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

С. С. Апостолов, З. А. Майзелис, Т. Н. Рохманова, В. А. Ямпольский	
1. Введение.....	273
1.1. Высокотемпературные слоистые сверхпроводники	274
1.2. Джозефсоновская плазма. Джозефсоновские плазменные волны (ДПВ).....	276
1.3. Прикладной аспект исследований слоистых сверхпроводников.....	278
1.4. Связанные синусоидальные уравнения Гордона	279
1.5. Закон дисперсии линейных ДПВ	282
1.6. Нелинейность джозефсоновских плазменных волн	283
1.7. Обыкновенные и необыкновенные ДПВ.....	284
2. Нелинейные ДПВ в слоистых сверхпроводниках, помещенных в волновод... 286	
2.1. Коэффициент прохождения нелинейной волны	287
2.2. Отрицательные отстройки частоты	291
2.3. Положительные отстройки частоты	293

3. Трансформация нелинейных джозефсоновских плазменных волн.....	295
3.1. Электромагнитные поля в вакууме и в образце слоистого сверхпроводника	296
3.2. Аналог принципа суперпозиции	299
3.3. Прохождение и отражение волн с E поляризацией.....	303
3.4. Трансформация TE и TM мод.....	306
4. Прохождение и отражение тм волн в присутствии постоянного магнитного поля	311
4.1. Отражение TM волн от полубесконечного образца	312
4.2. Прохождение TM волны через слоистый сверхпроводник конечной толщины	319
4.3. Анализ зависимостей коэффициента прохождения от параметров волны	324
5. Трансформация поляризации волн при отражении от слоистых сверхпроводников во внешнем постоянном магнитном поле	328
5.1. Поля в вакууме. Аналог принципа суперпозиции	329
5.2. Поля в образце слоистого сверхпроводника.....	331
5.3. Коэффициенты отражения и трансформации	335
5.4. Анализ результатов	338
6. Выводы.....	342
Список литературы.....	343

ЧАСТЬ VI. РЕГУЛЯРНАЯ И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ.....347

В. А. Буц	
Введение	348
1. Фокусировка и динамический хаос лучей в неоднородных волноведущих средах (волновые процессы в приближении геометрической оптики)	351
1.1. Общие уравнения, описывающие динамику лучей в неоднородных средах	352
1.2. Динамика лучей в волноведущей среде с нарастающим вдоль оси коэффициентом Преломления	354
1.3. Фокусировка лучей в средах с пространственной неоднородностью.....	358
1.4. Возникновение хаотической динамики.....	360
1.5. Произвольные по амплитуде возмущения.....	361
2. Сингулярная теория возмущения. Влияние шума на динамику лучей	362
2.1. Уравнения для траекторий лучей. Резонансы	362
2.2. Стационарные точки и их характер (устойчивость).....	366
2.3. Влияние флуктуаций на динамику лучей.....	368
2.4. Обсуждение и выводы к разделам 1 и 2	372
3. Аналитический критерий возникновения режимов с динамическим хаосом.....	374
4. Каскад трехволновых взаимодействий	378
4.1. Динамика распада широкого (по частоте) волнового пакета	378
4.2. Динамика каскадов с учетом процессов слияния	383
4.3. Численный анализ.....	386
4.4. Повышение степени когерентности при трехволновом взаимодействии	389
4.5. Краткое заключение	391
5. О новых условиях взаимодействия волн.....	392
5.1. Известные условия взаимодействия волн	392

5.2. Постановка задачи и основные уравнения.....	394
5.3. Среда с одномерной неоднородностью	394
5.4. Среда с трехмерной неоднородностью.....	397
5.5. Взаимодействие волн в нелинейных средах	400
5.6. Возможность наблюдения. Взаимодействие в слое	403
5.7. Взаимодействие волн в квантовых системах.....	404
5.8. Краткое обсуждение результатов.....	406
6. Заключение.....	409
Список литературы	410

**ЧАСТЬ VII. КВАЗИДВУМЕРНЫЕ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ
ВИХРЕВЫЕ И МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ
В МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ**

В. В. Яновский, А. В. Тур, М. И. Копп	
Введение.....	414
1. Генерация вихревых и магнитных структур в стратифицированной магнитной гидродинамике мелкомасштабной спиральностью	419
1.1. Основные уравнения и формулировка проблемы.....	420
1.2. Многомасштабное асимптотическое разложение	423
1.3. Мелкомасштабные поля	429
1.4. Замкнутые уравнения для крупномасштабных полей	436
1.5. Крупномасштабная неустойчивость	444
2. Нелинейное магнито-вихревое динамо в стратифицированной электропроводящей среде с мелкомасштабной спиральностью.....	454
2.1. Уравнения нелинейного динамо в «квазидвумерной» модели.....	455
2.2. Стационарные крупномасштабные хаотические структуры	461
2.3. Стационарные нелинейные магнитные структуры.....	464
3. Нелинейное динамо во вращающейся электропроводящей жидкости	469
3.1. Основные уравнения и постановка задачи.....	470
3.2. Уравнения нелинейного магнито-вихревого динамо в «квазидвумерной» модели.....	472
3.3. Крупномасштабная неустойчивость	477
3.4. Нелинейные стационарные структуры	481
4. Нелинейное динамо в наклонно вращающейся электропроводящей жидкости	487
4.1. Постановка задачи и замкнутые уравнения для крупномасштабных полей	487
4.2. Крупномасштабная неустойчивость	491
4.3. Стационарные хаотические структуры крупномасштабных полей.....	497
Заключение.....	500
Список литературы	503