

УДК 621.35.6

МОЩНЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ. НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ И ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

А.А. КУРАЕВ, Т.Л. ПОПКОВА, А.К. СИНИЦЫН, С.И. ЯРОМЕНОК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 ноября 2003

Кратко изложены основные результаты исследования и оптимизации мощных электронных приборов СВЧ, полученные в БГУИР. Приведены принципиальные аспекты оригинальных достижений в области нелинейной теории, методов оптимизации, трактовки физики оптимальных процессов и предсказанных эффектов нелинейного взаимодействия мощных электронных потоков с электромагнитными полями.

Ключевые слова: электронные приборы СВЧ, КПД, нелинейная теория, оптимизация, нерегулярные волноводы, новые физические эффекты.

Введение

Научное направление, название которого вынесено в заголовок статьи, сформировалось в БГУИР (тогда — МРТИ) в 1969 г. Его становление связано с работами по созданию в СССР новых эффективных систем ПВО и ПРО, а также созданием мощных приборов миллиметрового диапазона для нагрева термоядерной плазмы в токамаках и радиолокационных систем в этом диапазоне. Разработка мощных и сверхмощных приборов СВЧ — весьма дорогостоящий процесс, он невозможен без привлечения адекватных методов моделирования и оптимизации нелинейных процессов взаимодействия мощных электронных потоков с электромагнитными полями нерегулярных электродинамических систем в этих приборах. В 1969 г. не существовало ни строгой трехмерной теории такого взаимодействия, ни эффективных методов решения задач оптимального управления динамическим процессом нелинейного взаимодействия. Поэтому решение задач создания строгой теории мощных электронных приборов СВЧ и методов численной оптимизации таких приборов проводилось в большей части впервые. Наиболее интересные результаты этих решений перечислены ниже. Подробные материалы о них можно найти в цитируемых 172 статьях и шести монографиях.

Теория возбуждения произвольно-нерегулярных волноводов и резонаторов

Для полной оптимизации электронных приборов СВЧ вместе с параметрами этих приборов необходима также и оптимизация профиля их электродинамических систем, в качестве которых используются отрезки нерегулярных волноводов — полых, коаксиальных и спиральных. Таким образом, возникает задача создания строгой теории возбуждения нерегулярных волноводов электронными потоками. Эта задача для полых волноводов с круговым сечением на симметричных типах волн с использованием электродинамических потенциалов решена в работах [13, 34, 35], для спиральных в импедансном приближении — в [33, 46, 104, 105]. Строгая теория возбуждения произвольно-нерегулярных полых волноводов, основанная

на отображении внутренней поверхности нерегулярного волновода на регулярный цилиндр, изложена в статье [42]. Эта теория затем развита в работах [46, 88, 90, 104, 105, 116, 132–134, 142, 144, 145, 147, 149, 153, 157, 159, 161, 166, 169, 170]. Основы строгой теории возбуждения произвольно нерегулярных коаксиальных волноводов сформулированы в статье [146] и затем развиты в работах [165, 177]. Теория возбуждения нерегулярных волноводов с прямоугольным сечением развита в работах [168, 175]. Теория возбуждения нерегулярных цепочек связанных резонаторов сформулирована в работах [162, 163, 171, 172, 174, 176, 178]. Общая теория возбуждения нерегулярных волноводов дополнена в последние годы численными методами расчета критических волн в таких системах, основанными на использовании специально разработанных дискретно определенных T -функций. Обычные пошаговые и сеточные методы в случае критических на отдельных участках волновода волн расходятся, но учет таких волн необходим, поскольку они существенно влияют на характеристики нерегулярного волновода.

В работе [138] строго решена задача возбуждения резонаторов с конечной проводимостью стенки. Здесь показано, что в традиционных решениях (включая приведенные в учебниках) имеются существенные ошибки, не позволяющие использовать их в задачах расчета и оптимизации приборов СВЧ. В работах [17, 48, 56, 62, 64, 66, 68, 75, 77, 80, 81, 89, 100, 107] развиты строгие методы расчета локальных неоднородностей и элементов связи в нерегулярных волноводах и резонаторах.

Нелинейная теория трехмерного взаимодействия мощных релятивистских потоков с электромагнитными полями

Для создания адекватных математических моделей электронных приборов различных типов уравнения возбуждения нерегулярных волноводов следует дополнить уравнениями движения электронов в электромагнитном поле, возбуждаемом ими же в волноводе, а также в управляющих статических полях и полях, создаваемых самим электронным потоком (полях пространственного заряда). При полном учете всех факторов система уравнений оказывается замкнутой и отвечает самосогласованному полю. Наиболее сложной задачей, особенно в теории гирорезонансных приборов, является расчет поля пространственного заряда. Достаточно упомянуть, что строгой теории взаимодействия электронов, неравномерно движущихся с релятивистскими скоростями, до сих пор нет.

В БГУИР на основе разделения квазистатических и динамических составляющих поля пространственного заряда, а также специального порядка объединения фаз вращения электронов впервые решена задача строгого расчета полей пространственного заряда поливинтовых электронных потоков [10, 13, 14, 16, 19, 27, 30–32, 36, 37, 46, 82, 104, 105] и упорядоченных винтовых потоков [43]. Аналогично решена задача о релятивистских силах взаимодействия в приборах типа "О", причем впервые указано на необходимость учета "самодействия" крупных частиц, моделирующих электронный поток [51, 58, 46, 104, 105, 109, 114, 120, 162, 163, 171, 172, 174, 176, 178]. Созданные универсальные самосогласованные нелинейные релятивистские уравнения позволили не только проводить оптимизацию традиционных приборов, но и осуществить поиск новых эффективных механизмов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями, которые могут быть положены в основу новых типов приборов СВЧ [70].

Вариационно-итерационный метод решения задач оптимального управления нелинейными динамическими системами.

Уравнения самосогласованного поля относятся к типу уравнений нелинейной динамической системы. Порядок этой системы нелинейных дифференциальных уравнений составляет от 34 до 400. Решение ее возможно только численными методами и весьма трудоемко. Поэтому при решении задачи оптимального управления нелинейным процессом взаимодействия к методу ее решения предъявляются весьма жесткие требования в отношении устойчивости и скорости сходимости. Ни один из существующих теоретических и прикладных методов в области современной теории оптимального управления для этой цели не подходит. В БГУИР был

сформулирован специальный вариационно-итерационный метод, обеспечивающий и устойчивость, и скорость сходимости к точному решению, — АУС-метод [3, 9, 24, 28, 33, 34, 35, 40, 46, 104, 105, 137, 139, 141, 155, 173]. Метод основан на многопараметрической аппроксимации управлений и на использовании аналитических формул составляющих градиента целевой функции, определенных на решениях сопряженной по Гамильтону системы уравнений. Формулы составляющих градиента получены с использованием вариационных методов. Движение к минимуму целевой функции в пространстве оптимизируемых параметров (включая параметры аппроксимации управлений) осуществляется с помощью градиентных методов минимизации с переменной метрикой типа методов ДФП и Гольдфарба. Аналитические формулы градиента целевой функции решают две задачи: ускоряют решение в $\frac{n+3}{4}$ раза (n — общее число оптимизируемых параметров); обеспечивают точность определения градиента целевой функции, равную точности решения уравнений состояния (т.е. нелинейных уравнений модели прибора). Последнее обеспечивает сходимость метода минимизации. Вычислительная процедура также существенно улучшена за счет использования метода рационального исчисления [156, 167].

Результаты оптимизации мощных электронных приборов СВЧ

Разработанные математические модели и АУС-метод позволили создать комплекс программ оптимизации ряда типов электронных приборов СВЧ, которые были использованы на ведущих предприятиях и НИИ бывшего СССР для разработки высокоэффективных образцов мощных приборов СВЧ различного применения. Ниже перечислены основные публикации по результатам оптимизации и исследованию указанных приборов в БГУИР.

Гиротроны, гироклистроны, гиротристоры, гиро-ЛБВ [1, 2, 4–14, 15–22, 25–32, 34–39, 41, 43–46, 49, 55, 70, 78, 82, 85, 90, 93, 95, 104, 105, 116, 119, 135, 136, 144, 150, 166]. Разработанные в БГУИР программы оптимизации гирорезонансных приборов использованы в НИИ "Исток" и ИПФ АН СССР, что способствовало разработке гирорезонансных приборов с рекордным до настоящего времени комплексом показателей.

Многорезонаторные клистроны (МРК), включая релятивистские [46, 51, 58, 60, 83, 96, 104, 105, 129, 176]. Программы оптимизации МРК, созданные в БГУИР, использовались в НИИ "Титан" при создании прототипа МРК одного из каналов ЗРК С-300 и затем при его модернизации. МРК с КПД 76% до сих пор остается рекордным в своем диапазоне длин волн.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) и обратной волны (ЛОВ), включая релятивистские [33, 46, 53, 61, 70, 71, 91, 97, 104, 105, 109, 112, 118, 120, 121, 125, 128, 131–134, 142, 143, 145, 147, 149, 153, 154, 157, 159–163, 165, 166, 168–174, 176, 178]. С использованием разработанных в БГУИР программ оптимизации релятивистских ЛБВ-ЛОВ в Московском РТИ (ОКБ "Горизонт") успешно разработаны сверхмощные приборы типа "О" гигаваттного уровня.

Оротроны [50, 56, 59, 62, 64, 68, 79, 158, 179, 180].

Пениотроны [102, 105, 117, 122–124, 152, 158].

Новые типы мощных электронных приборов СВЧ.

Поиск новых механизмов генерации и усиления электромагнитных волн на основе комплекса программ, образующих цикл вычислительного эксперимента [70], привел к обоснованию возможности создания следующих эффективных типов приборов СВЧ.

Гиротон. Прибор с круговой разверткой предварительно прямолинейного релятивистского электронного потока (РЭП) во вращающемся несинхронном поле и последующим гирорезонансным отбором энергии РЭП. Механизм действия этого прибора принципиально допускает достижение КПД 100% для тонкого (по отношению к рабочей длине волны) РЭП [54, 57, 63, 65, 69, 74, 84, 87, 94, 95, 99, 101, 104–106, 108, 110, 111, 113, 123, 127, 148, 151]. Гиротон простейшей (двухкаскадной) конструкции реализован в ОИЯИ СО АН СССР в 1986 г. с КПД 75%.

Гиротрон с наклонным относительно оси двухзеркального резонатора широким спирализированным электронным потоком [1] и гиротрон с четырехзеркальным резонатором бегущей Т-волны [103, 105, 126, 182]. В таких гиротронах отсутствует эффект динамического расслоения электронного потока и поэтому их выходная мощность принципиально не ограничена.

Гиротрон с составными (разного диаметра) резонаторами [6, 12, 20, 21, 25, 29, 38, 39]. В таких гиротронах решается проблема устойчивости по отношению к паразитным колебаниям. Эти гиротроны изготавливаются в ИПФ АН СССР с 1984г.

Гироклистрон с резонатором на второй гармонике циклотронной частоты [135, 183]. В таком гироклистроне КПД повышается на 10% за счет компенсации перегруппировки в центре фазового сгустка, обусловленной действием сил пространственного заряда.

Коаксиальный гироклистрон с радиальным электростатическим полем [115, 119]. В таком гироклистроне снижается эффект углового разброса скоростей электронов, повышается КПД и появляется возможность фазовой модуляции выходного сигнала электрическим полем.

Гиротрон с магнитным зеркалом [136, 184]. В таком гиротроне резко снижается пусковой ток.

Клистрон-удвоитель с поперечной модуляцией электронного потока [92, 108, 111, 181]. Как удвоитель этот прибор имеет высокий КПД. Способ формирования электронного сгустка в КПМ использован в Московском РТИ при создании ускорителя с поворотным магнитным полем.

Коаксиальный оротрон [50, 59, 62, 64, 179, 180]. Такой оротрон имеет повышенную мощность, в нем могут быть реализованы оптимальные распределения ВЧ поля и он имеет удобную систему перестройки резонатора.

ЛБВ с винтовым электронным потоком и профилированным магнитным полем [118]. В такой ЛБВ условия оптимального взаимодействия обеспечиваются неоднородным магнитным полем, управляющим осевой скоростью электронов, и поэтому нерегулярная замедляющая система в нем не нужна.

ЛБВ с авторегулировкой замедления [143]. В такой ЛБВ оптимальное замедление по длине области взаимодействия регулируется самим усиливаемым сигналом за счет использования нелинейных диэлектрических и магнитных элементов в конструкции замедляющей системы.

Диотрон [130] — коаксиальный диодный генератор, не требующий фокусирующих магнитов.

Интегралы движения. Новые физические эффекты

Интегралы движения электрона (или законы сохранения) имеют место в электромагнитных полях, обладающих пространственной или пространственно-временной симметрией. 12 законов сохранения сформулированы в работах [15, 35, 46, 52, 67, 104, 105]. Они позволяют получить ценную информацию о специфике процессов взаимодействия электрона с электромагнитными полями, не прибегая к численному решению задач. С другой стороны, являясь точными соотношениями, они позволяют контролировать как точность математических моделей, так и точность численных расчетов.

При исследовании процессов взаимодействия мощных электронных потоков с электромагнитными полями в БГУИР были предсказаны следующие физические явления и эффекты.

Излучение в продольном магнитном поле предварительно прямолинейных РЭП при взаимодействии с вращающимися интерферирующими электромагнитными волнами в условиях нормального эффекта Доплера [23, 35, 47, 70, 76, 84, 94, 95, 104, 105, 110, 148, 151].

Эффект ускорения фазовой группировки под действием квазистатических сил пространственного заряда [14, 16, 27, 30, 31, 32, 35]. Установлена противофазность влияния Е и Н-динамических составляющих сил пространственного заряда [37, 41, 44, 45, 46, 49, 78, 90, 104, 105].

Бистабильность излучения Вавилова–Черенкова в нелинейных средах [72, 73].

"Дефект" КПД в мощных релятивистских приборах типа "О": часть энергии РЭП запасается в силовом поле фазового сгустка, образованного неравномерно движущимися релятивистскими электронами [109].

Смещение резонансной частоты резонатора с конечной проводимостью стенки за счет реактивной составляющей импеданса стенки [138].

Разрешены мнимые противоречия в расчетах квадратичных сил электромагнитного поля в системах координат "t" и "z" [131].

Эффект группировки О-типа и удвоения частоты сигнала при прохождении поперечно-модулированного РЭП через неоднородность фокусирующего магнитного поля [92].

POWERFUL UHF DEVICES. NONLINEAR THEORY AND NUMERICAL OPTIMIZATION

A.A. KURAYEV, T.L. POPKOVA, A.K. SINITSYN, S.I. YAROMENOK

Abstract

The basic results of research and optimization of powerful UHF electronic devices are presented in brief. Their complete description is contained in quoted six monographs and 172 papers, which were published in international and state journals by authors of researches. Only principal aspects of original achievements in area nonlinear theory, the methods of optimization, interpretation of physics of optimal processes and predicted effects of nonlinear interaction of powerful electron beams with electromagnetic waves are quoted from our published papers.

Литература

1. Кураев А.А.// РЭ. 1969. Т. 14, №9. С. 1614-1622.
2. Кураев А.А., Степухович В.А., Жураховский В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 429-431.
3. Жураховский В.А., Кураев А.А.// Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1970. Т. 13, №9. С. 1137-1139.
4. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1971. Т. 15, №8. С. 806-809.
5. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1971. Т. 15, №10. С. 896-899.
6. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1971. Т. 15, №12. С. 1082-1084.
7. Кураев А.А. Сверхвысокочастотные приборы с периодическими электронными потоками. Мн.: Наука и техника. 1971. 306 с.
8. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1972. Т. 16, №1. С. 24-27.
9. Ковалев И.С., Кураев А.А.// Докл. АН БССР. 1972. Т. 16, №8. С. 698-700.
10. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1972. Т. 16, №9. С. 791-794.
11. Ковалев И.С., Демидович Е.М., Колосов С.В. и др. // ЭТ. Сер.1. Эл. СВЧ. 1972. Вып. 12. С. 85-96.
12. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1973. Т. 17, №4. С. 320-322.
13. Ковалев И.С., Кураев А.А., Слепян Г.Я.// Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1973. №4. С. 87-93.
14. Ковалев И.С., Кураев А.А., Колосов С.В., Слепян Г.Я.// Докл. АН БССР. 1973. Т. 17, №5. С. 416-419.
15. Ковалев И.С., Кураев А.А., Колосов С.В. // Докл. АН БССР. 1973. Т. 17, №7. С. 621-624.
16. Ковалев И.С., Колосов С.В., Кураев А.А. // РЭ. 1973, №7. С. 1525-1528.
17. Слепян Г.Я.// ЖВМиМФ. 1977. Т.17, №3. С.776-70.
18. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР.1973. Т.17, №8.С.706-709.
19. Ковалев И.С., Кураев А.А.// Докл. АН БССР. 1973. Т. 17, №9. С. 812-815.
20. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.//Докл. АН БССР. 1973. Т. 17, №10. С. 909-912.
21. Ковалев И.С.,Кураев А.А.,Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.//Докл. АН БССР.1973.Т.17.№11.С. 1007-1010.

22. Ковалев И.С., Кураев А.А., Демидович Е.М., Шевченко Ф.Г.//РЭ. 1973. Т. 18, №10. С. 2097-2105.
23. Колосов С.В., Кураев А.А. // РЭ. 1973. Т. 18, №12. С. 2558-2566.
24. Кураев А.А., Колосов С.В.// ЭТ. Сер.1. Эл. СВЧ. 1974. Вып. 2. С. 45-58.
25. Ковалев И.С., Колосов С.В., Кураев А.А., Шевченко Ф.Г.// Докл. АН БССР. 1974, №4. С. 326-329.
26. Кураев А.А., Шевченко Ф.Г., Шестакович В.П.// РЭ. 1974. Т. 19, №5. С. 1046-1055.
27. Ковалев И.С., Кураев А.А., Колосов С.В., Слепян Г.Я.// РЭ. 1974. Т. 19, №5. С. 1112-1115.
28. Ковалев И.С., Колосов С.В., Кураев А.А. // Докл. АН БССР. 1974. Т.18, №7. С. 604-607.
29. Ковалев И.С., Кураев А.А. Колосов С.В., Стекольников А.Ф.// Докл. АН БССР. 1974. Т.18, №9. С. 801-804.
30. Колосов С.В., Кураев А.А.// РЭ. 1974. Т.19, №10. С. 2105-2115.
31. Кураев А.А., Слепян Г.Я.// РЭ. 1975. Т.20, №1. С. 202-206.
32. Ковалев И.С., Кураев А.А., Колосов С.В., Слепян Г.Я.// Докл. АН БССР. Т.19, №1 С. 44-47.
33. Кураев А.А., Слепян Г.Я.// РЭ. 1975. Т.20, №5. С. 1019-1029.
34. Колосов С.В., Кураев А.А., Слепян Г.Я., Шевченко Ф.Г.//РЭ. 1975. Т.20, №7. С. 1440-1448.
35. Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ. Мн.: Наука и техника. 1975. 295 с.
36. Кураев А.А., Стекольников А.Ф.// РЭ. 1976. Т.21, №1. С. 198-202.
37. Кураев А.А., Слепян Г.Я., Стекольников А.Ф.//РЭ. 1976. Т.21, №4. С. 802-810.
38. Кураев А.А., Шестакович В.П.//РЭ. 1977. Т.22, №2. С. 415-417.
39. Кураев А.А., Шестакович В.П.//РЭ. 1977. Т.22., №2. С. 418-421.
40. Кураев А.А.//ЖВМиМФ.1978, №6. С. 1604-1607.
41. Кураев А.А., Стекольников А.Ф.// РЭ. 1978. Т.23, №8. С. 1668-1677.
42. Кураев А.А.//Изв. АН БССР. Сер. физ.-тэхн. навук.1979. №1. С. 121-127.
43. Ковалев И.С., Кураев А.А., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.//Изв. АН БССР. Сер. ФТН. 1979. №1. С. 118-120.
44. Кураев А.А., Стекольников А.Ф.//РЭ. 1979. Т.24.,№2. С. 362-370.
45. Кураев А.А., Стекольников А.Ф.//РЭ. 1979. Т.24, №10. С. 2089-2102.
46. Кураев А.А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ. Мн.: Наука и техника.1979.334 С.
47. Кураев А.А., Шестакович В.П.//РЭ. 1980. Т.25, №4. С. 815-822.
48. Кураев А.А., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.//Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т.23, №9.С. 1085-1091.
49. Кураев А.А., Стекольников А.Ф.//РЭ. 1980. Т.25, №9. С. 1928-1035.
50. Гуляев Ю.В., Кураев. А.А., Нефедов Е.И., и др.// Докл. АН СССР. 1981.Т.257.№2.С. 349-352.
51. Аксенчик А.В., Ковалев И.С., Колосов С.В., и др.// Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1981. № 3. С. 111-115.
52. Кураев А.А. //РЭ. 1982. Т.27, №4. С. 794-798.
53. Кураев А.А., Соловей М.П.//РЭ. 1982. Т.27, №6. С. 1234-1236.
54. Кураев А.А.//РЭ. 1982. Т.27, №6. С. 1231-1234.
55. Кураев А.А., Красько С.А.//РЭ. 1982. Т.27, №6. С. 1229-1231.
56. Кураев. А.А., Нефедов Е.И., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.// Письма в ЖТФ. 1982. Т.8. Вып. 22. С. 1402-1403.
57. Кураев. А.А., Парамонов Б.М.// РЭ. 1982. Т.27.№7. С. 1403-1407.
58. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Шестакович В.П.// РЭ. 1982. Т.27.№12. С. 2426-2434.
59. Кураев. А.А., Нефедов Е.И., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.// Докл. АН СССР.1983.Т.272.№1.С.241-244.
60. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Парамонов Б.М.// РЭ. 1983. Т.28.№2. С. 336-345.
61. Кураев А.А., Соловей М.П.//РЭ. 1983. Т.28.№7. С. 1339-1346.
62. Кураев А.А., Нефедов Е.И., Оленин В.Д., и др.//РЭ.1983.Т.28, №7.С.1442-1444.
63. Дикун Т.Ф., Кураев А.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К. // РЭ. 1983. Т.28, №8. С. 1624-1632.
64. Гуляев Ю.В., Кураев. А.А., Нефедов Е.И., и др.// РЭ. 1983. Т.28, №8. С. 1791-1798.
65. Дикун Т.Ф., Красько С.А., Кураев А.А., Сеницын А.К.// РЭ. 1984. Т.29, №2. С. 293-299.
66. Кураев А.А., Лук Л.Н., Плоткина С.М., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.// Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т.27, №5.С. 595-603.
67. Жураховский В.А., Кураев А.А.// РЭ. 1984. Т.29, №7. С. 1427-1429.
68. Кураев А.А., Нефедов Е.И., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.//РЭ.1984.Т.29, №7.С.1407-1408.
69. Кураев А.А., Сеницын А.К. // РЭ.1985.Т.30, №9.С.1794-1802.
70. Кураев А.А.// Изв.вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т.28, №10.С. 5-22.
71. Кураев А.А., Соловей М.П., Слепян Г.Я. // РЭ.1986.Т.31, №1.С.118-126.
72. Кураев А.А., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.// Письма в ЖТФ. 1986.Т.12. вып. 14. С. 862-866.
73. Kirgayeв А.А., А.Уа. Slepяn and G.Уа. Slepяn// Physics letters A.1986. Vol.119. No.2. PP. 69-72.
74. Дикун Т.Ф., Кураев А.А., Колосов С.В., Парамонов Б.М. // РЭ.1986.Т.31, №8.С.1613-1619.
75. Ильинский А.С., Кураев А.А., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.//Докл. АН СССР.1987.Т.294, №6.С.1345-1348.
76. Кураев А.А., Сеницын А.К. // РЭ.1987.Т.32, №8.С.1686-1873.
77. Кобылинский Ю.В., Попкова Т.Л., Слепян Г.Я. // ЖВМиМФ. 1986. Т.28, №2. С. 237-246.
78. Колосов С.В., Кураев А.А., Шакирин А.И. // РЭ.1987.Т.32, №11.С.2420-2427.

79. Кураев А.А., Сеницын А.К // РЭ.1987.Т.32, №11.С.2427-2431.
80. Копенкин А.Д., Кураев А.А., Слепян Г.Я., и др.// ЖВМиМФ. 1987, №12. С. 1894-1900.
81. Копенкин А.Д., Кураев А.А., Слепян Г.Я., и др. //РЭ.1988.Т.33, №2. С.247-254.
82. Kurayev A.A., Kolosov S.V., Stekolnicov A.F., et al. // Int. j. Electronics. 1988. Vol. 65. No.3. pp. 437-462.
83. Аксенчик А.В., Кураев А.А //РЭ.1988.Т.33, №6. С.1240-1249.
84. Кураев А.А., Сеницын А.К // Докл. АН БССР.1988. Т.32, №8. С.710-713.
85. Закалюкин А.Б., Кураев А.А // Докл. АН БССР.1988.Т.32, №10. С.895-898.
86. Копенкин А.Д., Кураев А.А., Слепян Г.Я., и др.// РЭ.1988.Т.33, №10. С.2022-2029.
87. Кураев А.А // Докл. АН БССР.1989.Т.33, №1.С.32-34.
88. Натаров М.П., Попкова Т.Л., Родионова В.Н., и др. // РЭ. 1993. Т.38, №9. С. 1577-153.
89. Ильинский А.С., Кураев А.А., Слепян Г.Я., Слепян А.Я.// Радиотехника. 1989. №2. С. 57-58.
90. Колосов С.В., Кураев А.А., Шакирин А.И // РЭ.1989.Т.34, №3.С.562-570.
91. Кураев А.А., Сеницын А.К // РЭ.1989.Т.34, №6.С.1264-1279.
92. Кураев А.А., Сеницын А.К // Докл. АН БССР.1989.Т.33, №7.С.614-617.
93. Закалюкин А.Б., Кураев А.А // РЭ.1989.Т.34, №8.С.1707-1714.
94. Кураев А.А., Сеницын А.К // РЭ.1989.Т.34, №8.С.1776-1779.
95. Закалюкин А.Б., Кураев А.А // Докл. АН БССР.1989.Т.33, №8.С.698-701.
96. Аксенчик А.В., Кураев А.А //РЭ.1989.Т.34, №10. С.2157-2165.
97. Кураев А.А., Сеницын А.К // РЭ.1989.Т.34, №10.С.2166-2172.
98. Кураев А.А., Сеницын А.К., Тимохин А.Б // Докл. АН БССР.1989.Т.33, №11.С.969-972.
99. Дикун Т.Ф., Кураев А.А., Парамонов Б.М // РЭ.1990.Т.35, №4.С.827-831.
100. Кураев А.А., Слепян А.Я.// Докл. АН БССР.1990.Т.34, №5.С.418-421.
101. Кураев А.А // Докл. АН БССР.1990.Т.34, №6.С.514-516.
102. Кураев А.А // РЭ.1990.Т.35, №6.С.1278-1283.
103. Кураев А.А // Докл. АН БССР.1990.Т.34, №7.С.610-612.
104. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ: Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и Связь. 1986.208 С.
105. Кураев А.А, Байбурин В.Б., Ильин Е.М. Математическое моделирование и методы оптимального проектирования СВЧ приборов. Мн.: Наука и техника. 1990. 392 С.
106. Бурцев А.А, Колосов С.В., Кураев А.А // РЭ.1990.Т.35, №11.С.2369-2375.
107. Kurayev A.A., Natorov M.P., Radionova V.N., et al. // Int. j. Electronics. 1991. Vol. 70. No.5. PP.1005-1014.
108. Кураев А.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К // РЭ.1991.Т.36, №5.С.893-897.
109. Кураев А.А., Кураев Н.А., Сеницын А.К // РЭ.1991.Т.36, №11.С.2179-2185.
110. Дикун Т.Ф., Кураев А.А., Сеницын А.К // Докл. АН БССР.1991.Т.35, №8.С.686-688.
111. Кураев А.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К // РЭ.1992.Т.37, №2.С.316-320.
112. Киселев Б.М., Кураев А.А., Сеницын А.К. // РЭ.1992.Т.37, №5.С.895-899.
113. Дикун Т.Ф., Кураев А.А., Парамонов Б.М // РЭ.1992.Т.37, №7.С.1248-1252.
114. Аксенчик А.В., Кураев А.А // РЭ.1992.Т.37, №9.С.1654-1658.
115. Кураев А.А // РЭ.1992.Т.37, №12.С.2591-2593.
116. Kurayev A.A., Kolosov S.V., Stepyan A.Ya., Zakalukin A.B // Int. j. Electronics. 1992. Vol. 72. Nos. 5 and 6. PP.1103-1117.
117. Кураев А.А. Матвеев В.В., Сеницын А.К // РЭ.1993.Т.38, №5.С.916-921.
118. Кураев А.А., Кураев Н.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К // РЭ.1993.Т.38, №8.С.1468-1478.
119. Кураев А.А // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1993. №1. С. 75-77.
120. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К // РЭ.1994.Т.39, №2.С.288-296.
121. Кураев А.А., Кураев Н.А., Сеницын А.К // РЭ.1994.Т.39, №2.С.296-303.
122. Кураев А.А., Матвеев В.В., Сеницын А.К // РЭ.1994.Т.39, №10.С.1661-1666.
123. Кураев А.А., Матвеев В.В., Сеницын А.К // РЭ.1994.Т.39, №11.С.1819-1825.
124. Кураев А.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К // РЭ.1995.Т.40, №1.С.102-111.
125. Кураев А.А., Кураев Н.А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К // РЭ.1995.Т.40, №9.С.1428-1434.
126. Колосов С.В., Кураев А.А // РЭ.1996.Т.41, №1.С.96-99.
127. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K., Stepyan A.Ya. // Int. j. Electronics. 1996. Vol. 80. No.4. PP. 603-610.
128. Кураев А.А., Сеницын А.К. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997, №1, с.61-71.
129. Кураев А.А., Аксенчик А.В. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997, №4, с.45-58.
130. Кураев А.А., Сеницын А.К //РЭ. 1997. Т.42, №2. С.214-219.
131. Кураев А.А., Сеницын А.К. //РЭ. 1997. Т. 42, № 5. С. 468-471.
132. Кураев А.А., Попкова Т.Л.//РЭ.1997. Т.42, №10. С.1256-1261.
133. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К.// Радиотехника. 1997. №9. С.13-20.
134. Кураев А.А., Попкова Т.Л //ЭВиЭС, 1997, Т.2, №4. С.67-73.

135. Kolosov S.V., Kurayev A.A //IEEE Electron Device letters.1997.Vol.18, №6. PP 254-257.
136. Кураев А.А., Лукашевич Д.В., Синецын А.К //ЭВиЭС.1997.Т.2, №5. С.57-61.
137. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Рвачев В.А.//Радиотехника. 1997, № 9. С.4-8.
138. Кураев А.А., Попкова Т.Л. //Докл. НАН Беларуси. 1998. Т.42, №2. С.120-122.
139. Kravchenko V.F., Kuraev A.A.and Rvachev V.A.//Electromagnetic Waves &Electronic Systems. 1998. Vol.3, №1. PP.21-25.
140. Кураев А.А., Синецын А.К., Щербаков А.В // ЭВиЭС. 1998. Т.3, №2. С.16-21.
141. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Рвачев В.А // ЭВиЭС. 1998. Т.3, №3. С.41-45.
142. Закалюкин А.Б., Кравченко В.Ф., Кураев А.А // ЭВиЭС. 1998. Т.3, №3. С.93-96.
143. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Попкова Т.Л., Синецын А.К // ЭВиЭС. 1998. Т.3, №1. С.47-50.
144. Колосов С.В., Кураев А.А // ЭВиЭС. 1998. Т.3, № 4. С. 35-44.
145. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Синецын А.К // ЭВиЭС. 1998. Т.3, №6. С. 49-52.
146. Кураев А.А // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1999. №4. С.60-65.
147. Закалюкин А.Б., Кураев А.А., Попкова Т.Л // РЭ.1999. Т.44, №10. С.1275-1280.
148. Колосов С.В., Кураев А.А., Синецын А.К., Щербаков А.В // РЭ. 1999. Т.44, №6. С.732-735.
149. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Батура М.П // ЭВиЭС. 1999. Т.4, № 6. С.28-31.
150. Кураев А.А., Синецын А.К., Щербаков А.В // РЭ. 1999. Т.44, №7. С.891-896.
151. Колосов С.В., Кураев А.А., Синецын А.К.// ЭВиЭС. 2000. Т.5, №1. С.18-23.
152. Еремка В.Д., Кураев А.А., Синецын А.К., Щербаков А.В.// РЭ. 2000. Т.45, №3. С.357-361.
153. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синецын А.К // ЭВиЭС. 2000. Т.4, №5. С.34-39.
154. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Навроцкий А.А., Синецын А.К // ЭВиЭС. 2000. Т.4, №2. С.28-34.
155. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Пустовойт В.И //Докл. РАН. 2000. Т.370, №5, с 605-607.
156. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Попкова Т.Л // ЭВиЭС. 2000. Т.5, №3. С.41-50.
157. Кураев А.А., Попкова Т.Л.// Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2000. №2. С.85-87.
158. Еремка В.Д., Кравченко В.Ф., Кураев А.А., и др.// Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 3. С.58-62.
159. Закалюкин А.Б., Кураев А.А.// РЭ. 2000. Т.45, №4. С. 499-501.
160. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синецын А.К. //РЭ. 2000. Т.45, №12. С.1493-1498.
161. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синецын А.К. // ЭВиЭС. 2000. Т.5, №6. С.11-16.
162. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Синецын А.К. // Радиотехника. 2001. №4. С.21-26.
163. Аксенчик А.В., Кравченко В. Ф., Кураев А.А., Синецын А.К. // ЭВиЭС. 2001. Т.6, №1. С. 43-47.
164. Аксенчик А.В // ЭВ и ЭС. 2001. Т.6, №4. С. 27-32.
165. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Синецын А.К. // РЭ. 2001. Т.46, №7. С.877-882.
166. Колосов С.В., Кураев А.А // РЭ. 2001. Т.46, №10. С.1277-1280.
167. Кураев А.А., Попкова Т.Л // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2001. №4. С.70-76.
168. Кураев А.А., Синецын А.К // ЭВиЭС. 2002. Т.7, № 3. С.12-23.
169. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синецын А.К.// ЭВиЭС. 2002. Т.7, № 3. С.24-27.
170. Попкова Т.Л. // ЭВиЭС. 2002. Т.7, № 3. С.37-41.
171. Аксенчик А.В. // ЭВиЭС. 2002. Т.7, № 3. С.42-54.
172. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Синецын А.К.// ЭВиЭС. 2002. Т.7, № 6. С.50-57.
173. Кравченко В.Ф., Кураев А.А. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. №3. С. 4-43.
174. Аксенчик А.В. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. №1. С. 55-63.
175. Качинская О.А., Кураев А.А., Синецын А.К. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. № 2. С.59-65.
176. Аксенчик А.В., Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ с дискретным взаимодействием (теория и оптимизация). Мн.: Бестпринт, 2003. 376 с.
177. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Синецын А.К.// ЭВиЭС. 2003. Т.8, № 1. С. 4-9.
178. Аксенчик А.В. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2003. №1. С.72-80.
179. Ежов Г.И., Кураев А.А., Нефедов Е.И. и др. // А.с. №1129670 СССР от 10.01.1983.
180. Ежов Г.И., Кураев А.А., Нефедов Е.И. и др. // А.с. №1215563 СССР от 19.05.1983.
181. Кураев А.А., Парамонов Б.М., Синецын А.К. // А.с. №1526501 СССР от 1.08.1989.
182. Кураев А.А., Рудницкий А.С., Слепян А.Я // А.с. №1776155 СССР от 20.08.1990.
183. Колосов С.В., Кураев А.А // А.с. №1829741 СССР от 9.10.1990.
184. Кураев А.А., Рудницкий А.С., Слепян А.Я // А.с. №1828327 от 17.12.1990.