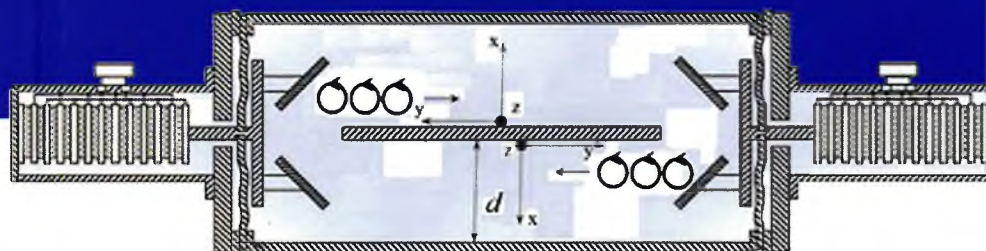


А.А. Кураев, В.В. Матвеев

Мощные электронные приборы СВЧ и КВЧ со специальными видами взаимодействия



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

ГЛАВА 1	9
Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с учетом конечной проводимости стенок и их приложение в задачах электроники СВЧ сверхбольших мощностей.....	9
1.1. Уравнения возбуждения произвольно-нерегулярного полого волновода с учетом конечной проводимости стенок.....	12
1.2. Двумерные самосогласованные уравнения нелинейной модели релятивистских ЛОВ и ЛБВ-О с замедляющей системой в виде гофрированного волновода	20
1.3. Двухмодовый ЛБВ-генератор	24
Литература	28
ГЛАВА 2	31
Гиротроны и гиро-ЛБВ на замедленной E_{01} -моде гофрированного волновода. 31	
2.1. Схемы и принцип действия гиро-ЛБВ и гиротрона на замедленной E - волне	33
2.2. Математическая модель.....	35
2.3. Результаты расчетов.....	41
Литература	50
ГЛАВА 3	51
Коротковолновые гиротроны с зеркальными резонаторами	51
3.1. Устройство коаксиального гироклинофона	52
3.2. Постановка задачи.....	53
3.3. Методы и результаты решения электродинамической задачи	55
3.4. Решение задачи электроники	56
3.5. Расчет коаксиального гироклинофона	57
3.6. Четырехзеркальный гиротрон на бегущей Т-волне.....	58
3.7. Гиромонотрон с вертикальной поляризацией Т-волны.....	61
3.8. Гиромонотрон с горизонтальной поляризацией Т-волны.....	63
Литература	65
ГЛАВА 4	66
Электрически перестраиваемые гиротроны со скрещенными полями.....	66
4.1. Схема конструкции гирогелитрона	67
4.2. Математическая модель гирогелитрона	69
4.3. Результаты расчета гирогелитрона.....	70
4.4. Схема конструкции четырехзеркального гиротрона с пьезоперестройкой резонатора	72
4.5. Математическая модель четырехзеркального гиротрона	73
Литература	75
ГЛАВА 5	77
Орбитроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов ..	77
5.1. Устройство орбитрона генератора.....	79
5.2. Моделирование электромагнитных полей в резонансной системе «ОР - согласующая впадка - двоянная гребенка».....	80
5.3. Уравнения движения электронных частиц	85
5.4. Расчет поля пространственного заряда	87
5.5. Зависимость эффективности двоянной гребенки орбитрона от формы канавки	88
5.6. Аппроксимация поля в зазоре гребенки	93

5.7. Уравнение возбуждения резонансной системы «ОР – бинарная гребенка»	94
5.7.1. Соотношения для добротности резонатора, возбуждаемого электронным пучком	94
5.7.2. Условия возникновения генерации	95
5.8. Оптимальные варианты орбитрона генератора.....	99
5.9. Влияние соотношения запасенных энергий в ОР и гребенке на величину пускового тока ..	102
5.10. Эффект расслоения в орбитроне.....	103
5.11. Клиноорбитрон с толстым пучком	104
5.12. Клиноорбитрон в диапазоне 180 ГГц.....	106
Литература	108
ГЛАВА 6	109
Терагерцовый клиноорotron с азимутальной гребенкой	109
6.1. Устройство клиноорotronа с азимутальной гребенкой	109
6.2. Решение электродинамической задачи	110
6.3. Метод и результаты решения электродинамической задачи	111
6.4. Условия синхронизма	112
6.5. Решение задачи электроники	113
6.6. Результаты расчета.....	114
Литература	116
ГЛАВА 7	117
Клиноotron на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон	117
7.1. Принципиальная схема горатрона	118
7.2. Электродинамическая задача	118
7.3. Уравнения движения электронов	119
7.4. Результаты расчета горатрона.....	121
Литература	123
ГЛАВА 8	124
Безмагнитные мощные электронные приборы СВЧ	124
8.1. Релятивистский гелитрон	124
8.1.1. Схема конструкции релятивистского гелитрона	125
8.1.2. Нелинейные уравнения математической модели релятивистского гелитрона	126
8.1.3. Результаты расчета и оптимизации релятивистского гелитрона при $n=2$	127
8.2. Безмагнитный клистрон-удвоитель с поперечной модуляцией	130
8.2.1. Схема безмагнитного клистрона-удвоителя частоты с поперечной модуляцией	131
8.2.2. Основные уравнения	132
8.2.3. Результаты расчета клистрона-удвоителя	133
8.3. Сферотрон – СВЧ генератор на двусферическом резонаторе	135
8.3.1. Принципиальная схема сферотрона	135
8.3.2. Поля в резонаторе и условия резонанса.....	136
8.3.3. Уравнение движения электронов	137
8.3.4. Результаты расчета и оптимизации	138
8.4. Перестраиваемый сферотрон сантиметрового диапазона.....	142
8.4.1. Схема конструкции перестраиваемого сферотрона.....	142
8.4.2. Расчет сферотрона.....	143
Литература	147
ГЛАВА 9	149
Гиротоны и гирокны	149
9.1. Гирогон-генератор	151
9.1.1. Зоны генерации	151

9.1.2. Схемы одно- и двухкаскадного генераторов	153
9.1.3. Взаимодействие релятивистского электронного потока с вращающимися E_{111} -, H_{111} -полями цилиндрического резонатора	154
9.1.4. Основные уравнения	154
9.1.5. Механизм взаимодействия в гиротоне	155
9.1.6. Сравнение и оптимизация различных схем гиротонов-генераторов	158
9.1.7. Схемы гиротонов-генераторов	158
9.1.8. Оптимальные варианты однорезонаторных гиротонов-генераторов	159
9.1.9. Оптимизированные варианты двухкаскадного гиротона-генератора	161
9.1.10. Критичность по отношению к толщине пучка	162
9.2. Исследование процессов умножения частоты в гиротонах и гироконах	163
9.2.1. Схема и принцип действия гирокона-умножителя	163
9.2.2. Используемая для расчетов математическая модель	164
9.2.3. Результаты расчетов	166
9.2.4. Предельные возможности умножителей на частотах, кратных частоте сигнала	171
9.3. Моделирование и оптимизация гиротона-умножителя	172
9.3.1. Схема и принцип действия гиротона-умножителя	172
9.3.2. Используемая для расчетов математическая модель	173
9.3.3. Результаты расчетов	175
9.3.4. Предельные выходные характеристики умножителей	179
Литература	180
ГЛАВА 10	183
Субмиллиметровые ЛБВ на спирально свернутом прямоугольном волноводе	183
10.1. ЛБВ-ЛОВ на спирально изогнутом прямоугольном волноводе	184
10.1.1. Модуляция по скорости электронов в зазорах секций волновода	185
10.1.2. Возбуждение электромагнитных волн в секциях волновода	186
10.2. ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе	187
10.2.1. Конструкция ЛБВ	187
10.2.2. Результаты расчетов	188
Литература	189
ГЛАВА 11	191
Усилители М- <i>J</i> -типа	191
11.1. Схема и принцип действия прибора	191
11.2. Поля замедляющей системы	192
11.3. Система уравнений прибора. Основные свойства	194
Список литературы	197
ПРИЛОЖЕНИЯ	201
Об отсутствии «дефекта» КПД в клинотронах	201
Список литературы	202
Перспективные модификации гирорезонансных приборов	202
1. Импульсная гиро-ЛБВ	203
2. Сверхизлучение в гиро-ЛОВ	204
3. Каскадная гиро-ЛБВ на гофрированном волноводе	205
4. Широкополосный гироусилитель на коническом волноводе	205
5. Высокоорбитный гиротрон на пениотронном резонаторе	206
6. Гироклистрон на конических коаксиальных резонаторах	207
7. Низковольтные гироклистрон и гиротрон с неоднородным магнитным полем	208
Список литературы	209
Алгоритм с сильной устойчивостью для решения краевых задач в теории нерегулярных волноводов	210

1. Физическая задача, описывающая распространение H_{01} -волны в продольно-нерегулярном волноводе с круговым сечением.....
 2. Методика решения с сильной устойчивостью для краевой задачи ОДУ второго порядка.....
 3. Решение краевой задачи (6), (7).....
- Литература.....

Вариант 4

Дальнейшую компенсацию эффекта динамического расслоения электронного потока можно обеспечить за счет коррекции геометрических параметров электродинамической системы. В варианте 4 они имеют следующие значения: $b_0 = 7,9$; $h_v = 1,44$; $d = 1,27$; $L_v = 25,44$; область дрейфа – 1.64. Благодаря этой коррекции КПД генератора оказывается весьма близок (42 %) к КПД генератора варианта 1 с идеализированным (тонким) электронным потоком (43 %).

Заключение

Полученные в конечной форме уравнения возбуждения (1.17) продольно-нерегулярного волновода электронным потоком включают как вихревую, так и потенциальную («поле пространственного заряда») составляющие полного поля на частоте $m\omega_0/W$ с учетом конечной проводимости стенок и могут быть непосредственно использованы при моделировании широкого класса мощных электронных приборов СВЧ: гиротронов, гиро-ЛБВ, гироклистронов, релятивистских ЛБВ и ЛОВ на E_{ni} и H_{ni} модах, пениотронов и гиротонов на E_{li} и H_{li} модах. Для формулирования самосогласованной модели этих приборов необходимо дополнить уравнения возбуждения продольно-нерегулярного волновода специализированными для каждого типа приборов уравнениями движения электронов.

Литература

1. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 460 с.
2. Никольский, В. В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1983. – 304 с.
3. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
4. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М.: Связь, 1971. – 486 с.
5. Князь, А. И. Электродинамика информационных систем / А. И. Князь. – М.: Радио и связь, 1994. – 392 с.
6. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Минск : Бестпринт, 2004. – 357 с.
7. Альтман, Дж. Устройства СВЧ / Дж. Альтман. – М.: Мир, 1968. – 487 с.

8. Харвей, А. Техника сверхвысоких частот: в 2 т. / А. Харвей – М.: Советское радио, 1965. – Т. I, II. – 870 с.
9. Тараненко, З. И. Замедляющие системы / З. И. Тараненко, Я. К. Трохименко. – Киев: КПИ, 1965. – 307 с.
10. Нефедов, Е. И. Электродинамика периодических структур / Е. И. Нефедов, А. Н. Сивов. – М.: Наука, 1977. – 209 с.
11. Илларионов, Ю. А. Расчет гофрированных и частично заполненных волноводов / Ю. А. Илларионов, С. Б. Раевский, В. Я. Сморгонский. – М.: Советское радио, 1980. – 200 с.
12. Ильинский, А. С. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями / А. С. Ильинский, Г. Я. Слепян. – М.: Изд. МГУ, 1983. – 232 с.
13. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. – Т. I: Стационарные процессы / под ред. А. А. Кураева и Д. И. Трубецкова. – М.: Физматлит, 2009. – 288 с.
14. Кураев, А. А. Возбуждение произвольно-нерегулярных волноводов с круглым сечением / А. А. Кураев. – Известия АН БССР. Сер. ФТН. 1979. – С. 121–127.
15. Кураев, А. А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ / А. А. Кураев. – Минск : Наука и техника, 1979. – 334 с.
16. Кураев, А. А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации сантиметров / А. А. Кураев. – М.: Радио и связь, 1986. – 208 с.
17. Кравченко, В. Ф. Черенковские релятивистские генераторы на симметричных E -волнах гофрированного волновода / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, В. И. Пустовойт, А. К. Сеницын. // Доклады РАН. – 2005. – Т. 404. – № 4. – С. 485–492.
18. Кравченко, В. Ф., Кураев А. А., Пустовойт В. И., Сеницын А. К. Нерегулярные волноводы в электронике СВЧ // ЭВ и ЭС, 2005. – Т. 10. – № 8. – С. 51–58.
19. Кравченко В. Ф. Нелинейная теория релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных волноводах с учетом конечной проводимости стенок Доклады РАН, / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, В. И. Пустовойт, А. К. Сеницын. – 2007. Т. 412. – № 6, – С. 759–763.
20. Никольский, В. В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики / В. В. Никольский – М.: Наука, 1967. – 460 с.
21. Цимринг, Ш. Е. Вариационный метод расчета волноводов с периодическими неоднородностями / Ш. Е. Цимринг // Радиотехника и электроника: ч. I. – 1957. – Т. 2. – № 1. – С. 3–15; ч. II. – 1957. – Т. 2. – № 8. – С. 969–988.
22. Каценеленбаум, Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / Б. З. Каценеленбаум. – М.: АН СССР, 1961. – 216 с.
23. Малин, В. В. К вопросу о полосах непропускания в периодических волноводах / В. В. Малин // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7. – № 8. – С. 1349–1354.
24. Стрэттон, Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стрэттон. – М.: ОИИЗ, 1948. – 539 с.
25. Свешников, А. Г. Нерегулярные волноводы / А. Г. Свешников // Изв. вузов СССР. Радиофизика. – 1959. – Т. 2. – № 5. – С. 720–723.

26. Кураев, А. А. Устойчивые методы расчета нерегулярных волноводов / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. О. Рак // Техника и приборы СВЧ. – 2010. – № 1. – С. 19–25.

27. Батура, М. П. Сходящиеся численные методы решения граничных задач в расчетах и оптимизации устройств СВЧ на нерегулярных волноводах / М. П. Батура, А. А. Кураев, Т. Л. Попкова // Доклады БГУИР, 2010. – № 8 (54) – С. 61–70.

28. Kurayev, A.A., Matveyenko V.V., Popkova T.L., Algorithms with stabilizing coefficients for solving poorly determined radiophysics problems // Journal of Radiophysics and Electronics. Kharkov 2016, – V. 7(21). – № 3. – P. 5–10.

29. Ерофеенко, В. Т. Математические модели в электродинамике : курс лекций / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская. – Минск : БГУ, 2008. – 167 с.

30. Зайцев, Н. И. Релятивистский карсинотрон с длиной волны 3 см и длительностью импульса 0,4 нс / Н. И. Зайцев, Н.Ф. Ковалев, Г.С., Кораблев, И.С. Кулагин // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – № 14. – 879 с.

31. Братман, В. Л. Релятивистские генераторы диапазона миллиметровых волн / В. Л. Братман, Г. Г. Денисов, С. Д. Коровин, М. М. Офицеров, С. Д. Полевин, В.В. Ростов // в кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 4. – Горький : ИПФ АН СССР, 1984. – 119 с.

32. Иванов, В. С. Релятивистский карсинотрон миллиметрового диапазона / В. С. Иванов, Н. Ф. Ковалев, С. И. Кремнецов, М. Д. Райзер // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – № 14.

33. Климов, А. И. Релятивистский черенковский СВЧ-генератор без внешнего магнитного поля / А. И. Климов, С. Д. Коровин, В. В. Ростов, Е. М. Тотьменинов // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 3.

34. Коровин, С. Д. Релятивистская ЛОВ с сосредоточенным резонансным рефлектором / С. Д. Коровин, И. К. Куркан, В. В. Ростов, Е.М. Тотьменинов // Изв. ВУЗов. РАДИОФИЗИКА. – Т. XLII. – № 12.

35. Бугаев, С. П. Релятивистский многоволновой черенковский генератор / С. П. Бугаев и др. // Письма в ЖТФ. – 1983. – Т. 9. – № 22. – 1385 с.

36. Бугаев, С. П. Релятивистская высокочастотная электроника / С. П. Бугаев [и др.]. / Вып. 4. – Горький : ИПФ АН СССР, 1984. – С. 79.

37. Кураев, А. А. Влияние конечной проводимости металлических стенок на характеристики мощных релятивистских приборов СВЧ с нерегулярными электродинамическими системами / А. А. Кураев, А. К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2006. – № 3 (15). – С. 82–92.

38. Кравченко, В. Ф., Кураев А.А., Матвеев В.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с учетом конечной проводимости стенок и их приложение в задачах электроники СВЧ сверхбольших мощностей / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, В. В. Матвеев. – Минск : 2022. –Т. 11. – № 2 (44). – С. 91–99.

увеличение магнитной индукции F . Также из графика видно уменьшение тока пучка, которое вызвано возрастающим негативным влиянием пространственного заряда.

Заключение

Гиротрон на замедленной E_{0i} -моду исследован в трех режимах: усилитель, генератор, регенеративный усилитель. Показано, что данный прибор имеет не худшие выходные характеристики, чем обычный гиротрон на H_{0i} -моду квазирегулярного волновода. Однако в рассматриваемом гиротроне возможно снижение почти в два раза уровня резонансного магнитостатического поля по сравнению с обычным гиротроном. Эти результаты установлены впервые и имеют важное значение с точки зрения продвижения гиротронов в коротковолновый диапазон частот, а также в отношении возможности существенного снижения стоимости и веса магнитной системы гиротрона.

Литература

1. Генератор на циклотронном резонансе: пат. 19572 С1 2015.10.30 Респ. Беларусь / А. А. Кураев, В. В. Матвеев, А. К. Синицын; Белорусский гос. ун-т инф-ки и радиоэл-ки.
2. Кравченко, В. Ф., Кураев А. А. Гирорезонансные приборы: принцип действия, нелинейная теория, достижения и перспективы / В. Ф. Кравченко А. А. Кураев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 9. – С.13–60.
3. Кравченко, В. Ф. Гирорезонансные приборы / В. Ф. Кравченко и др. // Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. – Т. 1 : Стационарные процессы; под ред. А. А. Кураева и Д. И. Трубецкова. – М.: Физматлит, 2009. – С. 5–81.
4. Кравченко, В. Ф. Нерегулярные волноводы в электронике СВЧ / В. Ф. Кравченко и др. // ЭВ и ЭС, 2005. – Т. 10. – № 8. – С. 51–58.
5. Кравченко, В. Ф. Черенковские релятивистские генераторы на симметричных E -волнах гофрированного волновода / В. Ф. Кравченко [и др.]. // Докл. РАН, 2005. – Т. 404. – № 4. – С. 485–492.
6. Кравченко, В. Ф. Нелинейная теория релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных волноводах с учетом конечной проводимости стенок / В. Ф. Кравченко [и др.]. // Докл. РАН 2007. – Т. 412. – № 6. – С. 759–763.

Заключение

Приведенные результаты указывают на перспективность двух-четырехзеркальных гиротронов, обеспечивающих их продвижение в терагерцовый диапазон.

Литература

1. Кураев, А. А. МЦР – моноотрон с широким электронным потоком и наклонным относительно оси резонатора магнитным полем / А. А. Кураев // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14. – № 9. – С. 1614–1622.
2. Кураев, А. А. Гирорезонансные приборы с четырехзеркальными резонаторами бегущей волны / А. А. Кураев // Доклады АН БССР. – 1990. – Т. 34. – № 7. – С. 610–612.
3. Кравченко, В. Ф. Гирорезонансные приборы: принцип действия, нелинейная теория, достижения и перспективы / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 9. – С. 13–60.
4. Батура, М. П. Основы теории расчета и оптимизации современных приборов СВЧ / М. П. Батура, А. А. Кураев, А. К. Сеницын. – Минск: БГУИР, 2007. – 246 с.

Рисунок 4.4 иллюстрирует проекцию траекторий движения электронов на плоскость yz для варианта $W = 0.91$ (встречная волна): электроны равномерно дрейфуют в направлении $-y$, их винтовые траектории сближаются, а радиусы вращения большинства электронов уменьшаются вследствие отдачи энергии вращения электромагнитному полю T -волны.

Заключение

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В коаксиальных и четырехзеркальных гиротронах со скрещенными E_0 , B_0 полями возможна электрическая перестройка частоты при одновременной электрической пьезоперестройке частоты резонатора в полосе 10...20 %.
2. Возможно значительное понижение требуемой индукции магнитного поля гирогелитрона (до пяти раз).
3. Существенную роль в повышении КПД гирогелитрона (до 55 % на второй гармонике циклотронной частоты) играет фазовая селекция электронов.

Следует также указать на перспективность использования скрещенных полей электрически перестраиваемых гиро-ЛОВ и гиро-ЛБВ (перестраиваемая полоса усиления), в которых нет необходимости пьезоперестройки каких-либо структур.

Литература

1. Чернов, З. С. Методы фокусировки электронов в современных приборах (НЧ) / З. С. Чернов // Радиотехника и электроника, 1958. – Т. 3. – № 10. – С. 1227–1235.
2. Watkins, D. A. The helitron oscillator. Proc. I.R.E. / D. A. Watkins, G. Wada. 1958. V. 46. – N 10. – P. 1700–1712.
3. Pantell, R. H. Small-signal analysis of the helitron oscillator / R. H. Pantell // IRE Trans., 1960. – ED-7. – N 1. – P. 20–34.
4. Nunn, W. M. Some characteristics of certain electrostatically-focused devices / W. M. Nunn, J. E. Rowe // Proc. I.R.E., 1962. – V. 50. – N 1. – P. 110–121.
5. Wada, G. Design, theory and characteristics of the helitron – a new type of microwave oscillator / G. Wada, R. H. Pantell // I.R.E. Wescon Convent. Rec. 1959. – V. 3. – N 3. – P. 92–118.
6. Lindsay, P. A. Some general properties of E-type devices / P. A. Lindsay, J. Gunter // Mikrowellen, Vortrage der Internationalen Tagung, 1960. – V. 1. – P. 224–241.
7. Кураев, А. А. Стартовые условия в генераторах E-типа / А. А. Кураев, Н. Н. Романов, В. Н. Шевчик // Радиотехника и электроника. – 1964. – Т. 9. – № 6. – С. 983–993.

8. Кураев, А. А. Сверхвысокочастотные приборы с периодическими электронными потоками / А. А. Кураев. – Мн. : Наука и техника, 1971. – 312 с.
9. Гапонов, А. В. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн / А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов // А.С. СССР № 223931 от 24.03.67.
10. Запевалов, В. Е. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД / В. Е. Запевалов // Изв. вузов. Радиофизика, 2006. – Т. – 49. – № 10. – С. 864–871.
11. Запевалов, В. Е. Терагерцовые гиротроны / В. Е. Запевалов, М. Ю. Глявин // В сб. «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона» Саратов : изд. СГУ. – 2016. – 460 с.
12. Кураев, А. А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ / Кураев, А. А. – Мн. : Наука и техника, 1979. – 334 с.
13. Harriet, S. B. Construction of a Large-Orbit Second-Harmonic TE₂₁ Gyro-TWT Amplifier / S. B. Harriet, McDermott D. B., N. C. Luhmann // Proceeding of IVEC 2005. – P. 293–296.
14. Кураев, А. А. Гиротроны с резонаторами бегущей волны Т-волны / А. А. Кураев, А. К. Сеницын // Материалы Крымико-2002. – Севастополь. – С. 176–177.
15. Кураев, А. А. Перспективы повышения мощности коротковолновых гиротронов / А. А. Кураев, А. К. Сеницын. – Радиотехника, 2004. – № 9. – С. 48–53.
16. Кравченко, В. Ф. Гирорезонансные приборы: принцип действия, нелинейная теория, достижения и перспективы / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2006. – № 9. – С.13–60.
17. Кураев, А. А. Функции радиального электростатического поля в коаксиальных гироклистронах / А. А. Кураев // Весці АНБ, сер. Фмн. – 1993. – № 1. – С. 75–77.
18. Сушков, А. Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы. – М. : Лань, 2004. – 404 с.
19. Кураев, А. А., Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – М. : Инфра-М, 2016. – 424 с.
20. Еремка, В. Д. Сверхмощный гиротрон с пьезоэлектрической перестройкой зеркального резонатора бегущей Т-волны / В. Д. Еремка, А. А. Кураев, А. К. Сеницын // Вести НАНБ, сер. фтн, 2005 – № 1. – С. 78-82.
21. Кураев А. А., Рудницкий А. С., Сеницын А. К. Генератор на циклотронном резонансе. Патент РБ № 11964. 2007.07.11

Полученные результаты указывают на перспективность орбитрона и его модификации клиноорбитрона в нижнем миллиметровом диапазоне.

Заключение

Приведенные материалы показывают, что при использовании согласующей канавки между зеркалом и гребенкой и определенных размерах сдвоенной гребенки в орбитроне возникает резонанс поля в пролетном канале, благодаря чему возможно пятикратное превышение амплитуды поля в канале над амплитудой поля в ОР. Этот факт принципиально меняет оценку требуемой добротности ОР и делает перспективным продвижение орбитрона в субмиллиметровый диапазон длин волн. Эффективность прибора возрастает в конструкции клиноорбитрона, в которой компенсируется динамическое расслоение толстого ленточного пучка.

Литература

1. Wallance, H. Bruc Analysis of RF imaging applications at frequencies over 100GHz / H. Bruc Wallance // Appl. Opt. 2010. – Vol. 49. – № 19. – P. E38–E47.
2. Tonouchi, M Cutting-enge terahertz technology / M. Tonouchi // Nat. Photon. 2007. – Vol. 1. – № 2. – P. 97–105.
3. Zhang, X.C. Terahertz wave imaging : Horizons and hurdles/ X. C. Zhang. – Phys. Med. Biol. – 2002. – Vol. 47. – № 21. – P. 3667–3677.
4. Koch, M. Terahertz technology : / M. Koch // Photonik international. – 2006. – P. 14–17.
5. Электроника и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн под ред А. Я. Усикова. – Киев. : Наукова думка. 1986. – 386 с.
6. Тараненко, З. И. Замедляющие системы / З. И. Тараненко, Я. К. Трохименко. – Киев. – 1965. – 216 с.
7. Цейтлин, М. Б. Оротрон. Анализ эффективных режимов / М. Б. Цейтлин, Е. А. Мясин // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38. – № 6 – С. 961–981.
8. Кравченко, В. Ф. Оптимизация закона изменения фазовой скорости волны вдоль гребенки оротрона на основе атомарных функций / В. Ф. Кравченко [и др.]. // Электромагнитные волны & Электронные системы. – 1999. – № 5 – Т. 4. – С. 33–37.
9. Мясин, Е. А. Оротрон – мощный резонансный генератор О-типа сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн / Е. А. Мясин // Радиотехника. – 2004. – № 2. – С. 22–32.
10. Еремка, В. Д. Атомарные функции в задаче оптимизации по КПД двухпучкового оротрона с нерегулярной сдвоенной гребенкой / Еремка В. Д., Кравченко В. Ф., Кураев А. А. [и др.]. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – М. – 2000. – № 3. – с. 58–62.
11. Гуревич, А. В. Двухкаскадный оротрон – усилитель и умножитель частоты / А. В. Гуревич, В. Д. Еремка, В. Ф. Кравченко А. В. [и др.]. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. йф– № 10. – с. 64–69.

начинают эффективно отдавать энергию по мере вхождения в нарастающее поле достаточной амплитуды (на расстоянии $0,2\lambda/(2\pi)$ от гребенки). Максимальный КПД достигается в первых слоях.

При увеличении толщины электронного пучка $\Delta z > 0.8$ КПД медленно убывает, однако если угол наклона обеспечивает равномерное оседание всех электронов на решетку, то даже при толщине $0,5\lambda$ он остается на уровне 10 %, а если не ограничивать амплитуду, то и 18 %.

Как видно из рисунка 6.4, в), функция группировки электронов в каждом слое достигает максимального значения 0.4–0.6. Полный КПД увеличивается практически по линейному закону, что видно из рисунка 6.4, з), при незначительной суммарной группировке в электронном пучке.

В приведенном варианте амплитуда не ограничивалась ($A=0,011$), поэтому нагруженная добротность при токе $I_0=10$ А довольно значительна $Q=2500$. Если уменьшить амплитуду до $A=0.005$, то реализуется КПД 14 % при вполне приемлемой добротности $Q=780$ и токе 10А.

Заключение

Проведенные моделирование и оптимизация режима взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы указывают на эффективность клинотронного режима и реализуемость клиноорotronа с азимутальной гребенкой в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн и в субмиллиметровом диапазоне за счет использования электронного потока конечной толщины с повышенной величиной рабочего тока.

Литература

1. Вайнштейн, Л. А. // РиЭ. – 1983. – Т. 28. – № 7. – С. 1233–1248.
2. Цейтлин, М. Б. // РиЭ. – 1993. – Т. 38. – № 6. – С. 961–981.
3. Мороз, Е. Е. // РиЭ. – 1980. – Т. 25. – № 11. – С. 2301.
4. Генератор дифракционного излучения : а. с. 830946 РФ / В. Д. Еремка, А. В. Стадник 1981.
5. Еремка, В. Д., Кравченко В. Ф., Кураев А. А. [и др.]. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – М. – 2000. – № 3. – С. 58–62.
6. Еремка, В. Д., Кураев А. А., Сеницын А. К. // Материалы 14-й Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2004). – 2004. – С. 199–202.
7. Гуляев, Ю.В. // Докл.АН СССР. – 1981. – Т. 257. – № 2. – С. 349–352.
8. Ежов, Г.И., Кураев А.А., Нефедов Е.И. и др. Генератор дифракционного излучения. А.С.№1129670. Приоритет от 10.01.1983г.
9. Vavriv, D.M. // Telecommunications and Radio Engineering. 67(9):757-781 (2008).
10. Батура, М. П. Основы теории расчета и оптимизации современных приборов СВЧ / М. П. Батура, А. А. Кураев, А. К. Сеницын. – Минск, 2006.

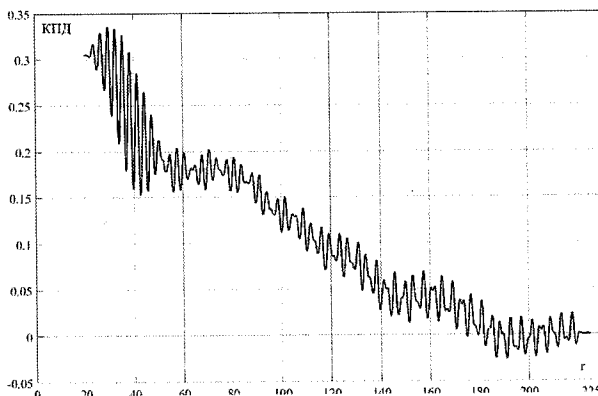


Рисунок 7.4 – Распределение $\eta^e(r)$ при $l=16$

Заключение

Горатрон, как развитие идеи радиального клиноорotronа, представляется перспективной конструкцией, обеспечивающий повышение КПД клинотронов и их мощности за счет пространственно развитого электронного пучка. Пучок имеет большой начальный радиус ($r_1 \approx 225$) и относительно большую толщину (порядка $\lambda/4$). КПД горотрона превосходит КПД радиального клиноорotronа в 1.5 раза. При этом надо иметь в виду, что полная оптимизация по КПД конструкции горатрона может существенно повысить его величину. Следует также отметить особенность режима работы горатрона при отстройке от синхронизма ($\beta_0 > \beta_{\Phi}$).

Литература

1. Мясин, Е. А. Оротрон и его модификации / Е. А. Мясин // В сб. «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона». – Изд СРТУ, Саратов. – 2016. – С. 160–194.
2. Кравченко, В. Ф. Орбитроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, В. В. Матвеевко. – Ч. I. – Физические основы приборостроения. – 2016. – Т. 5. – № 2. – С. 102–115.
3. Кураев, А. А. Клиноорotron на коаксиальном резонаторе / А. А. Кураев, А. К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2010. – № 7 (47). – С. 12–18.
4. Кураев, А. А. Радиальный клиноорotron / А. А. Кураев, А. К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2012. – № 3 (65). – С. 98–104.
5. Еремка, В. Д. Применение клинотронного эффекта в вакуумных источниках терагерцовых электромагнитных колебаний / В. Д. Еремка, О. Ф. Пишко // Радиофизика и электроника. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 8–39.
6. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – М.: ИНФРА-М. – 2016.

Заключение

Расчет предложенного сферотрона показал возможность достижения КПД до 30 % и перестройки в полосе 30 % при изменении ускоряющего напряжения $V_0 = 1.1 \div 2$ кВ. Такой тип генератора востребован в специальных (малогабаритных) системах связи, доплеровской радиолокации, радиоэлектронной борьбы с перестройкой частоты [26], в биохимических исследованиях и технологиях [27], в биологических исследованиях [28], в молекулярном синтезе.

Литература

1. Кравченко, В. Ф. Электродинамика сверхпроводящих структур / В. Ф. Кравченко. – М. : ФИЗМАТЛИТ. – 2006. – С. 270.
2. Концептуальный проект ускорительного комплекса Nuclotron – based Ion Collider. – Дубна ОИЯИ, 2008. – 51 с.
3. Кураев, А. А. Сверхвысокочастотные приборы с периодическими электронными потоками / А. А. Кураев. – Мн. : Наука и техника. – 1971. – 312 с.
4. Чернов, З. С. // Труды ИРЭ АН СССР, 1956. – Т. 7.
5. Pantell, R. // IRE Trans., 1960, ED-7. – N 1. – 20.
6. Сушков, А. Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы / А. Д. Сушков. – СПб.–М.: Лань, 2004. – 404 с.
7. Кураев, А. А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров / А. А. Кураев. – М. : Радио и связь, 1986. – 208 с.
8. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 424 с.
9. Кураев, А. А., Парамонов Б.М., Сеницын А.К. АС СССР №152601 «Клистрон с поперечной модуляцией», приоритет 2.10.1987, зарегистр. 1.08.1989.
10. Кураев, А. А. Некоторые перспективные схемы СВЧ-электронных приборов / А. А. Кураев, Б. М. Парамонов, А. К. Сеницын. – Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36. – № 5. – С. 893–897.
11. Кураев, А. А. О некоторых модификациях приборов релятивистской СВЧ-электроники / А. А. Кураев, Б. М. Парамонов, А. К. Сеницын Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37. – № 2. – С. 316–320.
12. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Минск : Бестпринт, 2016. – 357 с.
13. Кураев, А. А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров / А. А. Кураев. – М. : Радио и связь, 1986. – 208 с.
14. Калинин, В. И. Введение в радиофизику / В. И. Калинин, Г. М. Герштейн М. : ГИТТЛ, 1957. – С. 513.
15. Шевчик, В. Н. Основы электроники сверхвысоких частот / В. Н. Шевчик, М. : Советское радио, 1959. – С. 96.

16. Кравченко, В. Ф. Несинхронные взаимодействия / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, А. К. Сеницын // М. : Успехи физических наук. 2007. – Т. 177. – № 5. – С. 511–534.
17. Кураев, А. А. Коаксиальный диодный генератор-диотрон / А. А. Кураев, А. К. Сеницын // М. : Радиотехника и электроника. 1997. – Т. 42. – № 2. – С. 214–219.
18. Батыгин, В. В. Сборник задач по электродинамике / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин. – М. : ГИФМЛ. –1962. – С. 480.
19. Канавец, В.И. Релятивистские генераторы и усилители СВЧ-излучения / В. И. Канавец, А. Н. Сандалов // М. : «Электроника» (Итоги науки и техники ВИНТИ). – 1985. – Т. 17. – С. 82–168.
20. Миллер, М. А. Движение заряженных частиц в высокочастотных электромагнитных полях / М. А. Миллер // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. – 1958. – Т. 1. – № 3. – С.110–123.
21. Кураев, А. А. Несинхронное взаимодействие: мнимые противоречия усредненных решений / А. А. Кураев, А. К. Сеницын // Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42. – № 4. – С. 468–471.
22. Кураев, А. А. Моделирование и оптимизация нелинейных электромагнитных процессов. Несинхронное взаимодействие свободных электронов с электромагнитным полем излучения / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. – 2019. – Т. 2. – № 120. – С. 17–27.
23. Кураев, А. А. Терагерцовый генератор – сферотрон / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2018. – Т. 1. – № 4. – С. 384–394.
24. Кураев, А. А. Многопучковой сферотрон / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 5–12.
25. Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ. – М. : Высшая школа. – Т. 1. – 226 с.
26. Белоус, А. И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи / А. И. Белоус, М. К. Мерданов, С. В. Шведов // Техническая энцикл.: в 2-х кн. – М. : «Техносфера», 2018. – С. 1415.
27. Ленинджер, А. Основы биохимии / А. Ленинджер. – М.: «Мир», 1985. – Т. 1. – С. 367
28. Кураев, А. А. Особенности распространения электромагнитных волн в живых биологических объектах / А. А. Кураев // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, 2004. – № 4. – с. 71–74.

22. Кураев, А. А. Умножение частоты в гиротонах / А. А. Кураев // Докл. АН БССР. – 1989. – Т. 33. – № 1. – С. 32–35.
23. Матвеевко, В. В. Умножение частоты в гироконе с продольным магнитным полем / В. В. Матвеевко, А. К. Синицын // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5. – С. 12–18.
24. Кураев, А. А. Исследование характеристик гиротона-умножителя частоты / А. А. Кураев, В. В. Матвеевко, А. К. Синицын // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1. – С. 63–69.
25. Kurayev, A.A. Calculation of Characteristics of Gyroton Multiplier / A. A. Kurayev, A. K. Sinitsyn, V. V. Matveenko // IVEC, California, USA, 24–26 April, 2012 / California, 2012. – P. 527–528.
26. Кураев, А. А. Моделирование гиротона-умножителя частоты / А. А. Кураев, В. В. Матвеевко, А. К. Синицын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы 22-й Междунар. Крымск. конф., Севастополь, 10–14 сент. 2012 / Севастополь, 2012. – С. 221–222.
27. Березин, В. М. Электронные приборы СВЧ : учеб. пособие для вузов по специальности «Электронные приборы» / В. М. Березин, В.С. Буряк.
28. Nusinovich G.S., Walter M. Theory of the inverted gyrotwystron Phys. Plasmas, september 1997, V. 4 – № 9. – P. 3394–3402.
29. Колосов, С. В. Усилители и умножители на основе гиро-ЛБВ / С. В. Колосов, А. А. Кураев, А. В. Сенько // Докл. БГУИР. – 2012. – № 5. – С.51–58.
30. Matveenko, V.V. Multiplication of Frequency in a Gyrocon with a longitudinal Magnetic Field / V.V. Matveenko, A.K. Sinitsyn // IVEC, Bangalore, India, 21–24 February, 2011 / Bangalore, 2011. – P. 449–450.

При заданной входной мощности и токе пучка получено: при числе витков волновода $n=40$ усиление G_n в насыщении составляет 42 дБ; при $n=50$, $G_n=48$ дБ.

Зависимость G_n от тока пучка при $P_{вк}=0.1$ Вт, $n=48$: $I_0=0.2$ А - $G_n=35$ дБ; $I_0=0.5$ А - $G_n=45$ дБ; $I_0=0.7$ А - $G_n=50$ дБ.

Таким образом, расчеты подтверждают высокую эффективность терагерцовой ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе.

Заключение

Предложенная конструкция ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе является более технологичной, чем ЛБВ на планарно-спиральном волноводе. Ее эффективность в наиболее востребованном диапазоне 220 ГГц (здесь окна прозрачности в атмосфере) весьма высока и может обеспечить потребность в усилителях и генераторах в этом и других диапазонах. Заметим также, что ЛБВ на спирально свернутом волноводе может работать в режиме ЛОВ [4] и, более того, одновременно в режимах ЛБВ и ЛОВ [4].

Литература

1. Патент РБ на изобретение №16356, 2012. Многолучевая лампа обратной волны // Аксенчик А.В., Киринович И.Ф., Кураев А.А., Рудницкий А.С. Оpubл. 2012.06.12.
2. Aksenchuk, A. V., Kurayev A. A., Kirinovich I. F. Millimeter and Submillimeter O-type Amplifiers and Oscillators. The Theory and optimization. – Germany : Palmarium Academic Publishing, 2014. – 154 p.
3. 220 GHz Power Amplifier Development at Norton Grumman / Tucek John C. [at al.]. // 12-th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, USA, 2012. – P. 553–554.
4. Kory, G. [et al.]. – Overview of W-Band Travelling Wave Tube Programs. – IVEC – 2006, 2006. – P. 447–448.
5. Huarong Gong et al. High Power Ka-band Folded Waveguide Travelling-Wave Tube. – IVEC–2010, 2010, PP. 499-500.
6. Kurayev, A. A., Popkova T. L., Sinityn A. K. Electrodynamics and Electromagnetics Wave Propagation. – Moscow, INFRA-M, 2013. – 424 p.
7. Huarong Gong [et. al.]. – High Power K-band Folded Travelling-Wave Tube-IVEC-2010. – P.499-500.
8. Кураев А.А., Матвеев В.В., Рак А.О. Лампа бегущей волны : пат.22050 Респ. Беларусь; дата публ. 30.08.2018.

9. Кураев, А. А. Двухлучевая лампа обратной волны на изогнутом волноводе / А. А. Кураев, В. В. Матвеев, А. О. Рак // Докл. БГУИР. – 2017. – № 3 (105). – С. 100–103.
10. Кураев, А.А. Двухлучевая ЛБВ на спирально изогнутом прямоугольном волноводе / А. А. Кураев, А. О. Рак // Материалы международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Т. 1. – Севастополь, 2015. – С. 161–162.
11. Kolosov, S. V., Kurayev, A. A., Sinitsyn, A. K., Aksenchyk A.V., Senko A.V. The simulation codes “CEDR”. IVEC-2010. USA. Monterey. – P. 115–116.
12. Шевчик, В. Н. Общее дисперсионное уравнение с бегущей волной с периодической замедляющей системой / В. Н. Шевчик, А. А. Кураев // Радиотехника и электроника. – 1961. – № 9. – С. 1519–1532.

Заключение

Насыщение мощности ЛБВ М-*J*-типа происходит при θ (приведенная безразмерная длина пространства взаимодействия) ~ 7 и усиление мощности при этом составляет 36 Дб, т. е. характер усиления соответствует ЛБВ-О ($C=0.1$ и соответственно $A_0=0.0225$), но КПД в режиме насыщения по мощности достигает 50 %, что значительно выше, чем в ЛБВ-О.

Литература

1. Кураев, А. А. Характеристика прибора М-*J*-типа с симметричной ВЧ системой / А. А. Кураев. – Вопросы электроники сверхвысоких частот. Саратов, Изд. СГУ. – 1965. – Вып. 2.
2. Тараненко, З. И., Трохименко Я.К. Замедляющие системы / З. И. Тараненко, Я. К. Трохименко. – Киев, 1965.

происходит, но уже не в области взаимодействия, а на коллекторе электронов. Механизм возврата энергии осуществляется следующим образом: на металлической стенке коллектора в силу граничных условий на металле возникает зеркальное изображение сгустка электронов с положительным знаком. В результате появляется ускоряющее для электронов поле, возвращающая им энергию, затраченную на формирование сгустка. После полного прохождения сгустка на коллектор это поле (как и поле сгустка) исчезает.

В обычных приборах О-типа (релятивистских и нерелятивистских усилителях и генераторах) коллектор находится вне области взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем. Поэтому потенциальная энергия электронного сгустка возвращается только источнику питания прибора.

Однако существует модификация приборов О-типа – ЛОВО-клинотроны [3]. В этих приборах направление движения электронного потока составляет острый угол с рабочей поверхностью ПЗС. Поток электронов осаждается на рабочую поверхность ПЗС в области электронно-волнового взаимодействия, поэтому в таких приборах начальная кинетическая энергия электронного потока используется полностью, т. е. в клинотронах «дефект» КПД отсутствует.

Литература

1. Кураев, А. А. Черенковские усилители и генераторы на нерегулярных волноводах / А. А. Кураев, А. О. Рак, А. Б. Гуринович. – LAPLAMBERT, Mauritius, Saarbrücken, 2017. – 118 с.
2. Кураев, А. А. КПД релятивистских приборов О-типа с учетом энергии взаимодействия электронов / А. А. Кураев, Н. А. Кураев, А. К. Сеницын. – Радиотехника и электроника, 1991. – Т. 36. – № 11. – С. 2179–2185.
3. Левин, Г. Я. / Левин Г.Я. [и др.]/ под редакцией А. Я. Усикова. – Киев : Наукова думка. – 1992. – 200 с.

Перспективные модификации гирорезонансных приборов

Широкий класс приборов, называемых гирорезонансными, включает гиротроны, гиро-ЛБВ, гироклинотроны [1–4]. Объединяет их условие гирорезонанса, лежащее в основе механизма работы [3]:
$$\omega \left(1 \mp \frac{v_{\parallel}}{v_1} \right) = k\Omega \quad (1)$$

Здесь $\Omega = eB_0/m$ – циклотронная частота вращения электрона в магнитном поле B_0 , e – заряд электрона, $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ – масса движущегося электрона; m_0 – его масса покоя; $\beta = v/c$, v – полная скорость электрона, c – скорость света в пустоте; $k=1, 2, 3$ – номер рабочей гармоники циклотронной частоты; $\omega = 2\pi f$ (f – частота электромагнитного поля); v_{\parallel} – продольная (по оси волновода или резонатора) скорость электрона; v_{ϕ} – фазовая скорость волны в волноводе или парциальной волны

Заклучение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что предложенная методика решения (11) с сильной устойчивостью может быть использована для некорректных задач в теории нерегулярных волноводов, а также для решения систем ОДУ как первого, второго, так и высших порядков.

Литература

1. Кураев, А. А. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ / А. А. Кураев, И. С. Ковалев, С. В. Колосов. – Минск : Наука и техника, 1975. – 296 с.
2. Самарский, А. А. Разностные схемы с операторными множителями / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич, П. П. Матус. – Минск : Наука и техника, 1998. – 442 с.
3. Kurayev, A. A. Algorithms with Stabilizing Coefficients for Solving Poorly Determined Radiophysics Problems / A. A. Kurayev, V. V. Matveyenko, T. L. Popkova. – Radiofizika i elektronika. V. –7. – 2016. – N 3. – P. 5–10.
4. Кураев, А.А. Аппарат T -функций для решения двухточечных краевых задач в теории нерегулярных волноводов / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, С.И. Яроменок // Радиотехника, 2004. – № 9 – С. 34–39.
5. Кураев, А. А. T -функции для четных численно-аналитических методов решения краевых задач электродинамики / А. А. Кураев, Т.Л. Попкова, С.И. Яроменок // Вести НАН Бел., сер. ФТН, 2005. – № 2 – С. 60–68.
6. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын. – М., 2016. – 424 с.

Научное издание

Кураев Александр Александрович
Матвеевко Владимир Владимирович

**МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ И КВЧ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ
ВИДАМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Монография

Подписано в печать 12.12.22 г. Формат 60x84/16.
Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 12,55. Уч.-изд л. 7,89.
Тираж 60 экз. Заказ 220.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УП «Бестпринт». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 17160 от 27.01.2017 г.
ул. Филатова, 9, к. 1, 220026, Минск

574890

БЕЛАРУСКА
УСТАНОВА АДУКАЦЫИ
"БЕЛАРУСКИ ДЗЯРЖАВНЫ УНІВЕРСИТЭТ"