

**Шматько
Александр Александрович**

Профессор, доктор физико-математических наук, академик Академии наук ВШ Украины. С 1972 года работает на радиофизическом факультете Харьковского государственного университета. С 1990 года – профессор кафедры физики СВЧ, с 2005 года – заведующий отделения «радиофизика и электроника» АН ВШ Украины, Почетный доктор Сумского государственного университета. Член трех

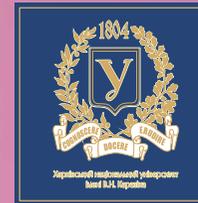
редколлегий научных журналов, участник многих научных международных конференций и симпозиумов.

На протяжении многих лет читает для студентов радиофизического факультета такие дисциплины как: «Введение в физику миллиметровых и субмиллиметровых волн», «Новые методы генерации и усиление электромагнитных волн», «Электродинамика и электроника устройств и приборов СВЧ», «Термодинамика», «Физика СВЧ», «Электроника СВЧ», «Техника и электроника приборов СВЧ», «Оптоэлектроника», «Физика КВЧ».

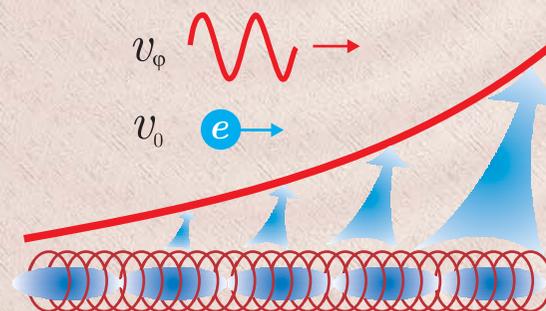
Область научных интересов – дифракционная электроника, рассеяние волновых пакетов и сигналов на многослойных изотропных и анизотропных средах, нелинейное взаимодействие электронов с полями периодических структур, шумовые и стохастические процессы в нелинейных электронно-волновых системах, электродинамика резонансных СВЧ устройств и др. Имеет свыше 200 научных публикаций. Им опубликовано три учебных пособия с грифом Министерства образования и науки Украины.

В представленном учебном пособии изложены основы теории традиционных электровакуумных резонансных и нерезонансных приборов с длительным и кратковременным взаимодействием (клистроны, лампа бегущей и обратной волны О- и М- типа, генератор дифракционного излучения, магнетрон, амплитрон) и приведено описание лабораторных работ.

Учебное пособие предназначено для студентов физических и радиофизических специальностей высших учебных заведений, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников.



А. А. Шматько



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. Н. КАРАЗИНА

А. А. Шматько

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Основы теории
и
радиофизический лабораторный практикум

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины
как учебное пособие для студентов высших учебных заведений*

Харьков - 2006

УДК 621.385.6
ББК 22.336 я7
Ш71

*Рекомендовано Министерством образования и науки Украины
как учебное пособие для студентов высших учебных заведений
(письмо №1.4/18-Г-745 от 01.09.06)*

Рецензенты:

Воробьев Г. С., доктор физико-математических наук, профессор,
декан физико-технического факультета
Сумского государственного университета

Чурюмов Г. И., доктор физико-математических наук, профессор,
профессор Харьковского национального университета
радиоэлектроники

Яковенко В. М., доктор физико-математических наук, профессор,
академик НАН Украины, директор научно -
исследовательского института радиопизики
и электроники НАН Украины

Ш71

Шматько А. А. Электронные приборы сверхвысоких
частот. Основы теории и радиофизический лабораторный практикум.
Учебное пособие. - Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2006. –
328 с.

В учебном пособии представлены основы теории и радиофизический лабораторный практикум по технике и электронике СВЧ традиционных электровакуумных резонансных и нерезонансных приборов с длительным и кратковременным взаимодействием. Рассмотрены такие приборы: пролетный, отражательный и многорезонаторный клистроны, лампа бегущей волны О- и М- типа, лампа обратной волны О- и М-типа, генератор дифракционного излучения, магнетрон, амплитрон. Отдельно рассмотрены периодические системы: гребенка в волноводе, спираль, анодный блок цилиндрического магнетрона. Дано описание лабораторных работ. Приведены контрольные вопросы и список рекомендованной литературы по каждому из приборов.

Учебное пособие предназначено для студентов физических и радиофизических специальностей высших учебных заведений, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников.

УДК 621.385.6
ББК 22.336 я7

© Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, 2006
© Шматько А. А., 2006
© Дончик И. Н., Шматько А. А.
макет обложки, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7	2.9. Механическая перестройка частоты	104
Введение	9	2.10. Нагрузочные характеристики	105
Глава 1. Основные уравнения СВЧ-электроники	15	Лабораторная работа 1	111
1.1. Необходимые физические условия работы СВЧ приборов	16	Лабораторная работа 2	115
1.2. Уравнения электронно-волнового взаимодействия ..	19	Контрольные вопросы	117
1.3. Различные подходы и приближения	19	Рекомендованная литература	118
1.4. Потенциальные и вихревые поля	31	Глава 3. Периодические структуры	119
1.5. Уравнение возбуждения	37	3.1. Основные характеристики периодических структур ..	120
1.6. Двухмерное приближение	42	3.1.1. Теорема Флоке и пространственные гармоники поля	121
1.6.1. Нелинейные уравнения движения	47	3.1.2. Фаза волны, фазовая и групповая скорости, коэффициент замедления	123
1.6.2. Магнитное фокусирующее поле	50	3.1.3. Формула Релея и классификация дисперсии	125
1.6.3. Поле пространственного заряда	55	3.1.4. Сопротивление связи	130
Контрольные вопросы	58	3.2. Гребенка в волноводе	133
Рекомендованная литература	59	3.2.1. Постановка и решение граничной задачи	133
Глава 2. Клистроны	61	3.2.2. Дисперсионное уравнение и его анализ	137
2.1. Модуляция электронов по скорости	62	3.3. Замедляющая структура анодного блока магнетрона	145
2.2. Группировка электронов	66	3.4. Спиральная замедляющая система	153
2.2.1. Движение электронов в пространстве дрейфа ..	66	Лабораторная работа	161
2.2.2. Движение электронов в тормозящем поле	70	Контрольные вопросы	163
2.3. Высокочастотный ток пучка	73	Рекомендованная литература	163
2.4. Двухпролетный, многорезонаторный и отражательный клистроны	79	Глава 4. Лампа бегущей волны (ЛБВ)	165
2.5. Эксплуатационные характеристики	86	4.1. Конструкция ЛБВ и принцип действия	166
2.5.1. Мощность электронно-волнового взаимодействия	87	4.2. Модуляция электронов в поле бегущей волны	171
2.5.2. Рабочие характеристики отражательного клистрона	90	4.3. Плотность высокочастотного тока	174
2.5.3. Комплексная проводимость колебательной системы	91	4.4. Взаимодействие электронного потока с бегущей волной (<i>слабосигнальное приближение</i>)	176
2.6. Пусковой ток клистрона	94	4.5. Выходные характеристики ЛБВ	180
2.7. Мощность и частота генерации отражательного клистрона	96	4.5.1. Коэффициент усиления	180
2.8. Диапазон и крутизна частотной перестройки	100	4.5.2. Электронный КПД	183
		4.5.3. Амплитудные и частотные характеристики ЛБВ ..	184
		4.5.4. Магнитное поле	186
		4.5.5. Дисперсионные характеристики ЛБВ	188
		Лабораторная работа	191
		Контрольные вопросы	193

Рекомендованная литература	193
Глава 5. Лампа обратной волны (ЛОВ)	195
5.1. Принцип действия ЛОВ	195
5.2. Линейная теория ЛОВ	202
5.3. Параметры и выходные характеристики ЛОВ	208
5.3.1. Частота генерируемых колебаний	208
5.3.2. Выходная мощность и электронный КПД	212
Лабораторная работа	218
Контрольные вопросы	221
Рекомендованная литература	221
Глава 6. Генератор дифракционного излучения (ГДИ)	222
6.1. Принцип действия ГДИ	223
6.2. Теория электронно-волнового взаимодействия в ГДИ	230
6.2.1. Исходные предпосылки и допущения	230
6.2.2. Система уравнений электронно-волнового взаимодействия	231
6.2.3. Крутизна колебательной характеристики	235
6.3. Эксплуатационные характеристики ГДИ	238
6.3.1. Пусковой ток	238
6.3.2. КПД и электронная перестройка частоты	240
6.4. Экспериментальные методы	244
6.5. Измерение амплитудного распределения поля в ОР	245
6.6. Измерение добротности открытого резонатора	253
6.7. Холодная модель ГДИ	256
Лабораторная работа 1	259
Контрольные вопросы	260
Лабораторная работа 2	261
Лабораторная работа 3	263
Контрольные вопросы	264
Рекомендованная литература	264
Глава 7. Приборы М-типа	265
7.1. Движение электрона в плоском диоде в скрещенных электрическом и магнитном полях	266
7.2. Движение электронов в скрещенных полях при наличии высокочастотного поля.	

Группировка электронов	275
7.2.1. Влияние продольной компоненты электрического поля	277
7.2.2. Влияние поперечной компоненты электрического поля	278
7.3.3. Образование спиц в электронном потоке	280
7.4. Многорезонаторный магнетрон	282
7.5. Рабочий режим магнетрона	284
7.5.1. Потенциал синхронизации	285
7.5.2. Пороговое значение потенциала	287
7.6. Выходные характеристики магнетрона	291
7.7. Лампа бегущей волны (ЛБВМ) и лампа обратной волны (ЛОВМ) М-типа	296
7.8. Выходные характеристики ЛБВМ	298
Лабораторная работа 1	306
Контрольные вопросы	308
Лабораторная работа 2	309
Контрольные вопросы	312
Рекомендованная литература	312
Заключение	314
Приложение	322
Список использованной литературы	326

ПРЕДИСЛОВИЕ

В пособии основное внимание уделено описанию физических процессов в традиционных электровакуумных приборах электроники сверхвысоких частот (СВЧ), изучаемых в высших учебных заведениях по курсу «Техника и электроника СВЧ». Рассмотрены такие приборы: отражательный, пролетный и многорезонаторный клистроны, лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа обратной волны (ЛОВ), генератор дифракционного излучения (ГДИ-орotron), магнетрон, платинотрон и разновидности приборов М-типа. В отдельную главу выделены вопросы, касающиеся замедляющих систем (в частности гребенки, гребенки, свернутой в кольцо, спирали), применяемых в приборах О- и М-типа СВЧ-электроники.

В первой главе описываются физические принципы электроники СВЧ, положенные в основу построения теории электронно-волнового взаимодействия, рассматриваются различные подходы и методы анализа протекающих в приборах физических процессов на различных стадиях процесса. Это метод заданного тока, метод заданного поля, самосогласованное гидродинамическое описание, метод кинетическое уравнения. Получены основные уравнения, которые описывают закономерности энергообмена в резонансных и нерезонансных приборах СВЧ-электроники и построена нелинейная теория таких приборов. Определена роль поля пространственного заряда и магнитного поля, которое в общем случае может быть пространственно неоднородным или двумерным с произвольным наклоном.

В методическом плане изложение каждой главы учебного пособия построено по примерно одинаковой схеме. Вначале дается относительно краткое теоретическое описание изучаемого электронного прибора, его принцип действия, уравнения, описывающие процесс электронно-волнового взаимодействия, выводятся основные эксплуатационные характеристики и проводится их физический анализ. Затем приводится описание лабораторных работ и дается задание для их выполнения. Для самостоятельной подготовки студентов сформулированы контроль-

ные вопросы и приведен список рекомендованной литературы по изучению рассматриваемого прибора.

При написании учебного пособия автор не ставил перед собой цели дать полный обзор научных работ по электронным приборам СВЧ. Книга создавалась как учебное пособие, ориентированное на широкий круг студентов старших курсов, аспирантов и специалистов, работающих в области СВЧ электронных приборов и изучающих физические процессы электронно-волнового взаимодействия в приборах О-типа и М-типа электроники СВЧ. В связи с этим учебное пособие не претендует на всеобщность и полноту освещаемых в нем вопросов. Поскольку данное издание является одним из первых в отечественной литературе по электронным приборам СВЧ, то оно, естественно, не лишено недостатков. Поэтому все замечания и пожелания по написанию книги автором будут приняты с благодарностью.

Автор выражает благодарность академику НАН Украины, профессору Яковенко В. М., профессору Г. С. Воробьеву и профессору Г. И. Чурюмову за полезные замечания при рецензировании работы.

ВВЕДЕНИЕ

Электроника сверхвысоких частот изучает взаимодействие электромагнитных волн с электронными потоками, движущимися под действием статических электрических и магнитных полей в различных электродинамических волноведущих и резонаторных системах. В результате такого взаимодействия может наблюдаться генерация, усиление, умножение и преобразование частоты электромагнитных колебаний, а также другие родственные процессы, сопровождающиеся преобразованием энергии движущегося ансамбля электронов (кинетической или потенциальной) в энергию высокочастотных колебаний. Длина волны таких колебаний может простираться от единиц метров до десятых долей миллиметров, фактически от метровых до субмиллиметровых волн. По существу к СВЧ-диапазону относятся частоты, которые находятся в диапазоне 0.3–3000 ГГц.

В 1975 г. Международный консультативный комитет по радио предложил новую систему разделения и наименования полос в спектре электромагнитных волн от 3 Гц до 3000 ГГц. Фактически СВЧ-диапазон разделился на ряд поддиапазонов: ультравысокие частоты (УВЧ): 300–3000 МГц; сверхвысокие частоты (СВЧ): 3–30 ГГц; крайне высокие частоты (КВЧ): 30–300 ГГц; гипервысокие частоты (ГВЧ): 300–3000 ГГц.

На рис. 1 представлена шкала электромагнитных колебаний по частоте, длине волны, буквенному обозначению диапазонов, которая дает представление о расположении друг относительно друга различных участков спектра колебаний.

Так, например, диапазон миллиметровых и субмиллиметровых волн, широко освоенный в настоящее время, располагается на этой шкале на стыке двух диапазонов: СВЧ-диапазона, активно разрабатываемого с конца 30-х годов XX века средствами вакуумной и полупроводниковой электроники, и оптического диапазона, освоение которого фактически началось с 60-х годов приборами квантовой электроники и оптики.

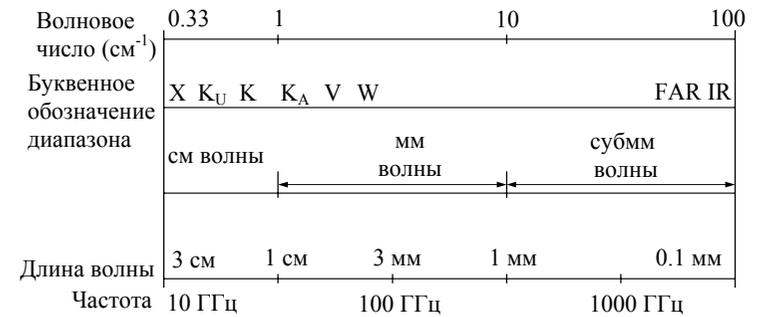


Рис. 1. Шкала электромагнитных колебаний

В настоящее время электромагнитные колебания используются для многочисленных практических применений. Перечислим наиболее важные из них.

1. *Радиосвязь, радиолокация и радионавигация.* Информационная емкость канала (радиотелефонного – 1 канал с полосой частот порядка 10 кГц, телевизионного – 1 канал с полосой 5 МГц) повышается с увеличением частоты используемого частотного диапазона. Так, например, если бы весь СВЧ-диапазон использовался для передачи информации, то в нем можно было бы разместить в 100 тысяч раз больше каналов, чем в диапазонах длинных, средних и коротких радиоволн вместе взятых. С помощью устройств антенной техники СВЧ-колебания могут излучаться в соответствующем направлении в свободное пространство узкими пучками (волновыми пакетами), с помощью которых можно получать изображение различных движущихся и неподвижных объектов, причем четкость изображения повышается с укорочением длины волны. Это свойство электромагнитных волн используется в радиолокации и радионавигации. Электромагнитные волны могут проникать через ионосферу, что используется для космической связи с летательными аппаратами и изучения атмосферы Земли. Существуют окна непрозрачности и прозрачности для электромагнитных волн в различных частотных диапазонах. Такие окна прозрачности наблюда-

ются в диапазонах частот $f = 35, 95, 140, 240$ ГГц. Особое применение СВЧ-диапазон нашел в военной технике для управления полетами ракет различного назначения, скрытой военной связи на небольшие расстояния ($f = 60$ ГГц), в системах радиопротиводействия, авиационной технике и спутниковой связи.

2. *Диагностика плазмы и электронных пучков.* Резонансное поглощение электромагнитного излучения плазмой на разных частотах позволяет определять закономерности различных процессов и явлений, происходящих в плазме, а также стимулировать протекание реакций в термоядерной плазме.

3. *В новых технологиях и бытовом применении.* Это прежде всего промышленные СВЧ-печи различного применения: сушка леса, бумаги, мануфактуры, производство в молибденовых СВЧ-печах стекловолоконных линий передачи, сублимационные сушилки, бытовые СВЧ-печи и др.

4. *Молекулярная спектроскопия.* Исследование колебательных и вращательных спектров молекул различных объектов, колебаний кристаллической решетки твердых тел, спектров примесей в полупроводниковых структурах и других веществах. Такое изучение вещества возможно за счет того, что квант энергии электромагнитного поля соответствующего диапазона частот соизмерим с квантом энергии перехода молекул из одного энергетического уровня на другой. Квантовые переходы определяются соответствующими частотами электромагнитного излучения или поглощения:

а) квантовые переходы электронов с одного энергетического уровня атома на другой сопровождаются излучением или поглощением кванта энергии видимого света;

б) изменение энергии колебаний атома в молекуле соответствует излучению или поглощению энергии в инфракрасном диапазоне частот;

в) вращение молекулы как единого целого соответствует колебательным процессам, которые сопровождаются поглощением или излучением в сантиметровом, миллиметровом или субмиллиметровом диапазоне.

5. *Медицина, биология и химия.* Резонансное воздействие электромагнитного излучения на биологические объекты открывает новые перспективы по изучению физики природы явлений. Анализ интенсивности и ширины линий свидетельствует о физико-химическом состоянии вещества, что является существенным для развития современной биологии и медицины. Многие резонансные процессы, протекающие в биологических объектах, имеют электромагнитную природу, что упрощает их исследование, физическое объяснение механизмов наблюдаемых явлений и создание новых веществ с заданными свойствами. Электромагнитное воздействие определенной частоты на химические реакции приводит к их ускорению. При взаимодействии с лекарственными препаратами улучшается их качество и эффективность, а также могут проявляться новые свойства и др.

Освоение различных частотных диапазонов спектра электромагнитных волн связано с разработкой новых, совершенно отличных от длинноволновой вакуумной электроники и низкочастотной радиотехники способов и механизмов преобразования энергии электронов в энергию СВЧ-колебаний, что стимулировало развитие новых областей не только техники, но и науки в целом.

Впервые СВЧ-колебания на длине волны 66 см зарегистрировал в своих опытах по изучению существования и передачи электромагнитных волн на расстояние Генрих Рудольф Герц (1888 г.). Впоследствии П. Н. Лебедев в опытах по двойному лучепреломлению усовершенствовал искровой генератор Герца и получил колебания с длиной волны 0.6 см. В дальнейшем А. А. Глаголева-Аркадьева получила излучение на длинах волн от 0.1 до 50 мм, достигнув, таким образом, длин волн инфракрасного диапазона. Однако все эти колебания были некогерентными и малой интенсивности. И лишь в 1919 г. Баркгаузен и Куртц в вакуумном триоде (аудионе) обнаружили когерентные СВЧ-колебания, хотя сам триод был сконструирован на низкочастотный диапазон. Сетка в нем находилась под положительным по отношению к аноду и катоду потенциалом. После этого А. Халл (1921 г.) открыл существование докритического, крити-

ческого и закритического режима работы цилиндрического диода, движение электронов в котором осуществлялось в скрещенных электрических и магнитных статических полях. Позже А. Жачеком (1924 г.) были обнаружены СВЧ-колебания в конструкции Халла на частоте, близкой к циклотронной частоте. В этом же году в Харькове А. А. Слуцкиным и Д. С. Штейнбергом под руководством профессора Д.А.Рожанского был открыт магнетронный способ генерации колебаний на разрезной конструкции многосегментного цилиндрического диода. Братья Варриан (1937 г.) открыли клистронный способ генерации электромагнитных колебаний (пролетный клистрон) В 1939–1940 гг. В. Ф. Коваленко и независимо Н. Д. Девятков с сотрудниками разработали отражательный клистрон. Все приборы, названные выше, фактически содержали резонаторную колебательную систему. Рудольф Компфнер (1942 г.) на основе спиральной замедляющей структуры сконструировал первый нерезонансный усилитель на бегущей электромагнитной волне – лампу бегущей волны (ЛБВ). Компфнеру принадлежит идея и конструкция генератора СВЧ на обратной волне – ЛОВ.

После Второй мировой войны началось бурное развитие СВЧ-техники и электровакуумных приборов. В это время появились такие приборы, как ладдертрон, оротрон, генератор дифракционного излучения, клистроны с распределенным взаимодействием, мазеры на циклотронном резонансе, гиротроны, амплитроны, пениотроны и др.

Механизмы преобразования энергии электронов в энергию высокочастотных колебаний в указанных приборах разные. Общим для всех электронных приборов СВЧ является свойство *инерции* электронов. На низких частотах электроны при взаимодействии с полем не проявляют своей инерционности и время их пролета через пространство взаимодействия существенно меньше периода электромагнитных колебаний. В СВЧ-диапазоне ситуация обратная – период колебаний значительно меньше времени пролета электронами пространства взаимодействия. Это приводит к тому, что электроны приобретают разные переменные скорости – происходит их скоростная моду-

ляция. Последнее приводит к группировке электронов в сгустки, наличие которых приводит к появлению высокочастотного конвекционного тока. Фактически эти эффекты и определяют работу большинства электронных приборов СВЧ. Различают приборы с кратковременным и длительным взаимодействием О-типа и М-типа в зависимости от направления электрического и магнитного статических полей, приложенных к электронному потоку.

В последующих главах рассмотрены основные приборы СВЧ-диапазона, принцип их действия, механизмы передачи энергии электронов СВЧ-полю, элементы теории, экспериментальные методы анализа работы таких приборов, а также дано описание лабораторных работ на основе оборудования, используемого на кафедре физики СВЧ радиофизического факультета Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина.

Автор выражает благодарность кандидату физико-математических наук, доценту Одаренко Е. Н. за помощь в оформлении пособия и за плодотворное сотрудничество и заведующему учебной лабораторией В. М. Бондаренко за помощь, оказанную при постановке лабораторных работ, и полезные замечания при составлении заданий к ним.