

ПРЕДИСЛОВИЕ

Микроволновая электроника сегодня — это большая и быстроразвивающаяся отрасль науки и техники, оказывающая огромное влияние на экономику страны и ее обороноспособность. Большинство телекоммуникационных систем, радиоастрономия, ускорительная техника, термоядерные установки, технология и медицина, практически все виды вооружения используют в той или иной мере достижения микроволновой электроники. В значительной степени эти достижения обусловлены использованием новых механизмов взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитным полем, новых материалов, новых технологий изготовления приборов и устройств микроволновой электроники.

Физические законы и явления, используемые в микроволновых электронных приборах, принципы действия этих приборов, их конструкция, характеристики и параметры составляют предмет дисциплины «Микроволновая электроника», которая занимает важное место в системе подготовки бакалавров, специализирующихся по направлению «Электроника и нанoeлектроника». Более углубленно эти законы, явления и приборы изучаются в магистерских программах соответствующего направления.

К сожалению, существующие к моменту подготовки рукописи учебники и учебные пособия по данной дисциплине либо были изданы достаточно давно и устарели, либо не охватывают все содержание дисциплины. В частности, отсутствуют современные пособия, рассматривающие с единых позиций процессы, протекающие в вакуумных и полупроводниковых микроволновых приборах.

В предлагаемом учебнике достаточно подробно описаны основные механизмы взаимодействия микроволнового излучения с заряженными частицами в вакууме и твердом теле. Большое внимание уделяется особенностям использования этих механизмов в вакуумных и твердотельных микроволновых электронных приборах. Эта теоретическая часть дополняется описанием конструкций приборов, их параметров и характеристик.

Авторы надеются, что предлагаемый учебник окажет помощь студентам, обучающимся по направлению «Электроника и нанoeлектроника» и по смежным

направлениям. Книга будет также полезна аспирантам и специалистам, занимающимся разработкой и применением изделий микроволновой электроники.

В основу учебника положен курс лекций, читаемый авторами бакалаврам и магистрам в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ».

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту — доктору физико-математических наук, профессору кафедры электронных приборов МЭИ П. И. Акимову за тяжелый труд по изучению рукописи и за ценные замечания, направленные на улучшение качества учебника. Авторы искренне благодарны также заведующему кафедрой радиотехнической электроники ЛЭТИ В. Б. Янкевичу за ценные советы и неоценимую помощь в подготовке рукописи к изданию.

ВВЕДЕНИЕ

Предмет микроволновой электроники — исследование физических процессов, происходящих в электронных приборах, предназначенных для генерации, усиления и преобразования электромагнитных колебаний микроволнового диапазона, а также разработка методов проектирования и конструирования этих приборов, рекомендаций по их эксплуатации.

Микроволновым диапазоном, в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии, называют участок спектра электромагнитных колебаний от $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц (300 МГц...300 ГГц), что соответствует длинам волн в вакууме от 1 м до 1 мм. Микроволновый диапазон делится на несколько поддиапазонов:

- ультравысокие частоты (УКВ, или дециметровые волны (ДМВ)) — диапазон частот 300 МГц...3 ГГц (длины волн 1 м...10 см);
- сверхвысокие частоты (СВЧ, или сантиметровые волны (СМВ)) — диапазон частот 3...30 ГГц (длины волн 10...1 см);
- крайне высокие частоты (КВЧ, или миллиметровые волны (ММВ)) — диапазон частот 30...300 ГГц (длины волн 1 см...1 мм).

Часто к микроволновому диапазону относят и соседние участки спектра — со стороны низких частот — поддиапазон очень высоких частот (ОВЧ) или метровых волн (МВ) — диапазон частот 30...300 МГц (длины волн 10...1 м), а с высокочастотной стороны — поддиапазон гипервысоких частот (ГВЧ) или децимиллиметровых волн (ДММВ) — диапазон частот 300 МГц...3 ТГц (длины волн 1 мм...100 мкм). Этот диапазон часто называют терагерцевым диапазоном, а волны этого диапазона — Т-лучами. В последнее время к этому диапазону привлечено особое внимание исследователей.

Как видно, микроволны занимают большой участок спектра с отношением крайних частот 1:1000 (или 1:100 000, если присоединить соседние поддиапазоны). Они расположены на шкале частот между радио- и оптическим диапазонами. Исторически первым человеком стал использовать оптический диапазон, когда впервые зажег костер в своей пещере, чтобы греть и освещать ее. В конце 19-го века благодаря трудам Г. Герца, А. С. Попова, Г. Маркони и многих других ученых наступила очередь радиодиапазона.

По мере развития радиотехники становились все более очевидными преимущества использования высоких частот. Поэтому в середине 30-х годов прошлого века началось освоение микроволнового диапазона. При этом исследователи и разработчики аппаратуры встретились с большими трудностями, так как методы генерирования, усиления, детектирования и канализации электромагнитного излучения, разработанные для соседних диапазонов, оказались непригодными в микроволновом диапазоне частот. Использование оптических методов затрудняла малая, по сравнению с энергией теплового движения, энергия квантов излучения. Переносу методов из радиодиапазона препятствовали большое время пролета электронов в активной области приборов, сравнимое с периодом колебаний, а также большие паразитные емкости и индуктивности элементов конструкции приборов. В результате необходимо было разработать новые механизмы взаимодействия заряженных частиц с электромагнитным полем, а также новые конструкции приборов и волноведущих структур. Первые такие практически реализуемые механизмы и конструкции появились к концу 30-х годов прошлого века.

Колоссальный импульс развитию микроволновой техники и электроники дали создание и совершенствование радиолокации перед Второй мировой войной и во время войны. После окончания войны развитие микроволновой электроники продолжалось ускоренными темпами, появились новые области ее применения — радиоастрономия, радиоспектроскопия, ускорительная техника, установки термоядерного синтеза. К концу прошлого века бурными темпами стали развиваться микроволновые системы телекоммуникаций, включая сотовую и спутниковую связь, системы глобального позиционирования. Расширяется применение микроволн в биологии и медицине, в химии, пищевой промышленности, технологии изготовления новых материалов, в логистике и других областях науки и промышленности.

Становление и развитие микроволновой электроники стало возможным благодаря трудам больших коллективов ученых и инженеров многих стран. Отметим в этой связи фундаментальные работы Дж. Пирса, Дж. Слэтера, Дж. Роу, М. Чодорова, Г. Кайно, И. Клавира, Дж. Ганна, В. Рида. Существенный вклад в развитие микроволновой электроники внесли российские ученые П. Л. Капица, В. Л. Гинзбург, Л. А. Вайнштейн, Н. Д. Девятков, А. В. Гапонов, Ю. А. Кацман, В. Н. Шевчик, А. С. Тагер, С. А. Зусмановский, С. В. Королев и многие другие.

Сегодня микроволновая электроника — это синтетическая область знаний, объединяющая фундаментальные науки (радиофизику, электродинамику, физику плазмы и твердого тела, математическое моделирование), конструирование, сложнейшие технологии производства, современное измерительное и

испытательное оборудование. Успешная работа в этой области требует глубоких теоретических знаний и практических навыков.

В предлагаемом читателю учебнике делается попытка с единых позиций рассмотреть процессы взаимодействия электромагнитного поля с потоками заряженных частиц в вакууме, плазме и твердом теле и вытекающие из этого особенности конструкции, характеристики и параметры различных микроволновых приборов.

Учебник содержит три части. В первой рассматриваются механизмы индивидуального и коллективного излучения электронов, волновые и колебательные процессы в электронных потоках, вводятся основные понятия микроволновой электроники.

Вторая часть посвящена вакуумным микроволновым приборам. Рассматриваются электронно-оптические и электродинамические системы этих приборов, излагаются принципы их действия, конструкции, характеристики и параметры. Наряду с «обычными» рассматриваются и приборы релятивистской микроволновой электроники.

Третья часть содержит описание принципа действия, конструкции и параметров полупроводниковых микроволновых приборов. Большое внимание уделяется приборам на новых широкозонных материалах — карбиде кремния и нитриде галлия.

В заключение формулируются проблемы, стоящие перед разработчиками микроволновых приборов в настоящее время, и обсуждаются возможные пути их решения.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Скалярные величины обозначаются латинскими буквами, набранными курсивом, и греческими буквами, набранными прямым шрифтом: a, v, A, φ, ψ и т. д. Векторы и тензоры обозначаются латинскими и греческими буквами, набранными полужирным прямым шрифтом: $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \Psi$. В необходимых случаях обозначения векторов, тензоров и матриц заключаются в прямые скобки: $|A|, |B|$ или надчеркиваются: $\bar{\varepsilon}, \bar{\mu}$. Комплексные величины при необходимости отмечаются точкой над символом: $\dot{\rho}, \dot{A}, \dot{A}$. Константы набираются прямым шрифтом: e, i . Скалярное произведение обозначается точкой: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$, векторное произведение — косым крестом: $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$. Для обозначения дифференциальных операций над векторами используется оператор Гамильтона ∇ .

- a — ускорение, м/с²
- \mathbf{A} — векторный потенциал, В·с/м
- \mathbf{B} — магнитная индукция, В·с/м²
- B — реактивная проводимость, См
- $c = 2,9979 \cdot 10^8$ — скорость света в вакууме, м/с
- C — емкость, Ф
- \mathbf{D} — вектор электрической индукции, А·с/м²
- D — коэффициент диффузии, м²/с
- $e = 2,71828$ — основание натуральных логарифмов
- $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ — абсолютная величина заряда электрона, Кл
- E — напряженность электрического поля, В/м
- f — частота, Гц
- \mathbf{F} — сила, Дж/м
- G — активная проводимость, См
- G — коэффициент усиления
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ — постоянная Планка, Дж·с
- \mathbf{H} — напряженность магнитного поля, А/м
- i — мнимая единица
- i, I — электрический ток, А
- j, J — плотность электрического тока, А/м²
- k, \mathbf{k} — волновое число, волновой вектор, 1/м
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана, Дж/град
- L — индуктивность, Гн
- M — взаимная индуктивность, Гн
- M — коэффициент взаимодействия
- n — концентрация, м⁻³

n_m — показатель преломления среды
 n_p, n_g — замедление фазовой и групповой скоростей волны
 P — мощность, Вт
 P_w — плотность мощности (плотность потока энергии), Вт/м²
 p — импульс, кг·м/с
 Q — добротность
 q — электрический заряд, Кл
 R — активное сопротивление, Ом
 R_c — сопротивление связи, Ом
 R_e — эквивалентное сопротивление резонатора, Ом
 T — температура, К
 U — напряжение (разность потенциалов), В
 v, v — скорость, м/с
 W — энергия, Дж
 w — плотность энергии, Дж/м³
 X — реактивное сопротивление, Ом
 Y — полная проводимость, См
 Y_g — волновая проводимость линии передачи, См
 Z — полное сопротивление, Ом
 Z_0 — волновое сопротивление резонатора, Ом
 Z_g — волновое сопротивление линии передачи, Ом
 α — постоянная затухания, 1/м
 β — постоянная фазы, 1/м
 $\gamma = \beta - i\alpha$ — постоянная распространения, 1/м
 δ — глубина проникновения поля, м
 ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость
 $\epsilon_0 = 10^7/(4\pi c^2)$ — диэлектрическая постоянная, А·с/(В·м)
 η — коэффициент полезного действия
 $\eta_0 = 120\pi$ — характеристическое сопротивление вакуума, Ом
 θ — угол пролета, рад
 λ — длина электромагнитной волны в вакууме, м
 λ_c — критическая длина волны в линии передачи, м
 λ_g — длина волны в линии передачи, м
 μ — подвижность носителей заряда, м²/(В·с)
 μ_r — относительная магнитная проницаемость
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, В·с/(А·м)
 Π — вектор Пойнтинга, Вт/м²
 ρ — плотность объемного электрического заряда, Кл/м³
 ρ — волновое (характеристическое) сопротивление, Ом
 σ — электропроводность, См/м
 τ — постоянная релаксации, с
 φ — фаза, рад
 Φ — скалярный потенциал
 ψ — функция вероятности
 Ψ — поток магнитной индукции, Вб
 ω — круговая частота, рад/с

ЧАСТЬ 1

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

1

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Г Л А В А

1.1. ПРЕДЫСТОРИЯ

Эра радио началась с доказательства существования электромагнитных волн профессором Политехнического университета Карлсруэ Г. Герцем в 1888 г. Он создал первые примитивные искровые генератор и приемник этих волн. Длина волны излучения, которое он исследовал, составляла около 3 м (частота 100 МГц). В 1890 г. Э. Бранли изобрел более совершенный прибор для приема электромагнитных волн, представлявший собой трубку, наполненную металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного излучения сопротивление трубки резко уменьшалось за счет микропробоев оксидных пленок, покрывающих поверхность опилок. По существу, это был первый *твердотельный электронный прибор*. В 1894 г. О. Лодж усовершенствовал этот прибор и дал ему название «*когерер*». С его помощью Лодж продемонстрировал 14 августа 1894 г. в Королевском институте в Лондоне беспроводную передачу и прием сигналов азбуки Морзе, т. е. передачу сигналов по радио на расстояние около 40 м. Однако Лодж не запатентовал свое устройство. В дальнейшем А. С. Попов и Г. Маркони положили начало широкому использованию радиосвязи.

В этих первых опытах использовались радиоволны сравнительно короткой длины — метрового диапазона. Однако в связи с необходимостью увеличения дальности радиосвязи, передачи речи и музыки появились новые типы генераторов — дуговые и машинные, работающие в режиме незатухающих колебаний с длиной волны несколько километров. В дальнейшем когереры в приемниках были заменены «кристаллическими детекторами» — полупроводниковыми приборами с барьером Шоттки, изобретенными немецким профессором К. Брауном в 1898 г. (хотя таких понятий, как «полупроводник» и «барьер Шоттки», тогда еще не было).

В 1906 г. американский ученый Ли де Форест изобрел трехэлектродную лампу *аудион* (триод), способную усиливать радиосигналы. С этого момента началась вакуумная электроника. В 1920-х годах усилители и генераторы на вакуумных приборах достигли мощности, позволяющей использовать их в передат-

в США Робертом Пэйджем в 1934 г. Подобная система была разработана Рудольфом Кюнхольдом в Германии в 1935 г. и одновременно Робертом Уаттом в Великобритании. В 1943 г. Пэйдж существенно увеличил точность и помехозащищенность радаров, предложив моноимпульсную систему, которая используется до сих пор.

В СССР первый радиобнаружитель самолетов «Рапид» был создан в Ленинградском радиофизическом институте в 1934 г. под руководством А. И. Мержеевского. Он работал на длине волны 5 м и имел мощность передатчика около 200 Вт. В состав «Рапида» входили одна передающая и три приемные антенны. Он обнаруживал самолеты на расстоянии до 5 км. Первый импульсный радиолокатор был создан Ю. Б. Кобзаревым в ЛФТИ в 1938 г. Он позволил обнаруживать самолеты на расстояниях до 50 км при одновременном определении расстояния до цели.

Англичане первыми начали широкое использование радаров для защиты от нападений с воздуха. Изобретение магнетрона позволило им устанавливать радары на самолеты-истребители. «Битва за Англию» в 1940–1941 гг., когда Великобритания сражалась с Германией фактически в одиночку, во многом была выиграна за счет радаров. В дальнейшем в ходе Второй мировой войны радиолокационные станции (РЛС) широко использовались всеми воюющими сторонами на суше, в море и в воздухе. СССР в ходе войны получил 445 РЛС обнаружения и оружейной наводки по ленд-лизу.

После войны совершенствование РЛС продолжалось быстрыми темпами. Появились и новые области применения микроволн — радиоспектроскопия, радиоастрономия, бытовые и промышленные нагревательные установки, нагрев и диагностика плазмы в установках термоядерного синтеза, наземная и космическая связь с высокой скоростью передачи информации, системы обнаружения скрытых объектов, биология и медицина и многие другие.

При разработке первых РЛС конструкторы столкнулись с отсутствием достаточно мощных и высокочастотных источников энергии и малошумящих усилителей. Быстро стало понятно, что известные в то время электронные лампы не могут эффективно работать на сверхвысоких частотах (больше 300 МГц). Необходимо было разработать приборы, свободные от ограничений на междуэлектродные емкости и время пролета электронов в пространстве взаимодействия.

1.2. ВАКУУМНАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Изобретение братьями Р. и С. Вариан **пролетного клистрона** в Стенфордском университете в 1937 г. было первой ласточкой в этом направлении. Прибор позволял получать мощность до 10 Вт на частоте 1 ГГц. Большой вклад в развитие этих приборов внес Хансен, разработавший первые типы объемных резонаторов. В дальнейшем, уже после войны, клистроны были усовершенствованы, и сегодня они отдают мощность до нескольких десятков МВт в диапазоне частот от 1 до 30 ГГц.

Первый образец *магнетрона* с разрезным анодом был создан А. Халлом в 1920 г. Он же предложил и термин «магнетрон». Однако этот и последующие

образцы магнетронов с разрезным анодом не годились для практического применения.

Многорезонаторный магнетрон был изобретен Холманом в Берлине в 1935 г., однако немцы не оценили значение этого прибора. В 1939 г. Алексеев и Муляров в СССР разработали конструкцию многорезонаторного магнетрона с постоянной откачкой, способного генерировать мощность до 300 Вт на частоте 3 ГГц. В 1940 г. Дж. Рэндалл и Г. Бут в университете Бирмингема создали компактный многорезонаторный магнетрон, отдававший мощность в 100 раз больше, чем любой известный тогда источник микроволнового излучения. В сентябре 1940 г. Черчилль согласился на предложение Тизарда передать в США образец магнетрона в обмен на финансовую и промышленную помощь. В ходе миссии Тизарда образец магнетрона с выходной мощностью 6 кВт на частоте 3 ГГц был передан правительству США, где развернулось массовое производство этих приборов. Недостатком первых многорезонаторных магнетронов была нестабильность и «перескоки» частоты, однако в 1941 г. Рэндалл и Бут решили эту проблему, введя связи между резонаторами. Другие типы источников (клизотроны), имеющиеся в США и Германии, имели в этом диапазоне в то время мощность не более 10 Вт.

Магнетроны стали основой радиолокационных станций Второй мировой войны. Однако в радиолокационных приемниках по-прежнему использовались кристаллические детекторы, так как предельная частота вакуумных диодов не превышала 400 МГц.

Быстрое развитие вакуумной микроволновой электроники в 1940–1950-х гг. характеризовалось как появлением новых типов приборов, так и быстрым совершенствованием параметров уже известных. Этот период можно назвать золотым веком вакуумной микроволновой электроники.

Лампа бегущей волны типа О — широкополосный малошумящий усилитель, которого так не хватало разработчикам радаров, — была изобретена в 1942 г. в лаборатории Британского адмиралтейства Р. Компфнером. Теория этого прибора была разработана Пирсом в 1950–1952 гг. в лаборатории Белл (США). Она позволила существенно улучшить параметры прибора.

Лампа обратной волны типа О — электрически перестраиваемый маломощный генератор, работающий в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн, — была впервые продемонстрирована Компфнером в 1951 г. На сегодняшний день это прибор, генерирующий рекордно высокую частоту вплоть до 1 ТГц.

В 1950-х годах были изобретены «родственники» магнетрона — **электронные приборы типа М**, также использующие скрещенные поля. В 1949 г. Д. Уилбор и Ф. Питерс (США) разработали митрон, в 1950 г. Варнеке во Франции создал ЛБВ типа М, затем в 1952 г. Эпштейн во Франции изобрел ЛОВ типа М, Браун (США) в том же году — платинотрон. Эти приборы существенно расширили возможности проектировщиков РЛС.

Мазеры на циклотронном резонансе были предложены в 1959 г. независимо Гапоновым-Греховым в СССР, Шнайдером и Пантеллом в Австралии. Первые работающие гиротроны были созданы в 1965 г. в Институте прикладной физики АН СССР. В настоящее время гиротроны позволяют получать мощности до

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru