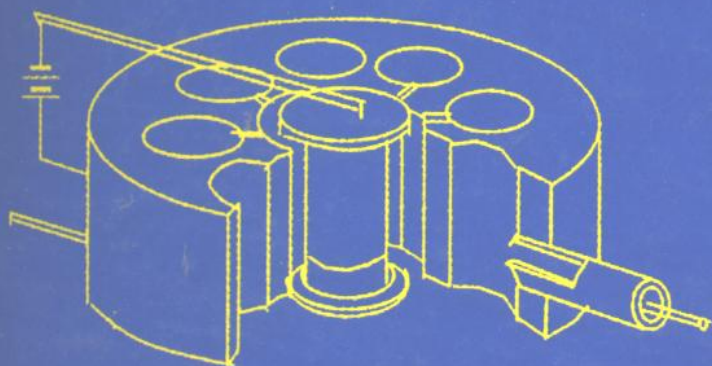


微波化学

主 编 金钦汉

副主编 戴树珊 黄卡玛



科学出版社

微波化学

主 编 金钦汉

副主编 戴树珊
黄卡玛

科学出版社

1999

内 容 简 介

微波化学是一门新兴的前沿交叉学科,已在广泛的实际应用中显示出空前强大的生命力.

本书从微波的特性及其与物质的相互作用和微波等离子体的获得及其基本特征入手,系统地介绍了微波对凝聚态化学反应的影响,微波凝聚态化学反应系统,微波诱导催化反应,微波合成化学,微波在分析化学和环境化学中的应用;微波等离子体合成化学,微波等离子体分析化学,以及微波化学在石油和冶金工业中的应用,最后还较深入地讨论了微波的生物效应及相应的健康防护问题.

本书可供化学、物理学、电子科学、环境科学、石油化工、冶金、医学卫生等相关学科及产业部门的科技工作者参考,也可供大专院校相关专业师生作教学参考用书.

图书在版编目(CIP)数据

微波化学/金钦汉主编. -北京:科学出版社, 1999

ISBN 7-03-007346-0

I. 微… II. 金… III. 微波技术-应用-化学工程 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 05068 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

科 地 亚 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1999年10月第一次印刷 印张: 21 1/4

印数: 1—2 300 字数: 480 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

微波化学是研究在化学中应用微波的一门新兴的前沿交叉学科。它是在人们对微波场中物质的特性及其相互作用的深入研究基础上发展起来的。因此也可以说，微波化学是根据电磁场和电磁波理论、电介质物理理论、凝聚态物理理论、等离子体物理理论、物质结构理论和化学原理，利用现代微波技术来研究物质在微波场作用下的物理和化学行为的一门科学。

微波场可以直接作用于化学体系从而促进或改变各类化学反应，这就是通常意义上的微波化学，微波对凝聚态物质的化学作用主要属于这一类。微波场也可先被用来诱导产生等离子体，进而在各种化学反应中加以利用，微波对气态物质的化学作用主要属于这一类。这就是所谓微波等离子体化学，它是广义微波化学所涵盖的内容。

从历史上看，微波等离子体化学的发展实际上先于直接微波化学的发展。最早在化学中利用微波等离子体的报道出现于 1952 年，当时 H.P. Broida 等用形成微波等离子体的办法以发射光谱法测定了氢-氘混合气体中氘同位素的含量。后来他们又将这一技术用于氮的稳定同位素的分析，从而开创了微波等离子体原子发射光谱分析的新领域。微波等离子体用于合成化学则是 60 年代以后的事，其中最成功的事例包括金刚石、多晶硅、氮化硼等超硬材料，有机导电膜，超细纳米粉体材料，蓝色激光材料 c-GaN，单重激发态氧¹O₂的合成；高分子材料的表面修饰和微电子材料的加工等，其中不少现已形成了产业。

有趣的是，在化学中直接利用微波能的研究也开始于分析化学。1974 年 J.A. Hesek 等首先利用微波炉进行样品烘干。次年，有人用它作生物样品的微波消解并取得了很大成功。现在这一技术已经商品化并作为标准方法被广泛用于分析样品的预处理。

微波用于合成化学始于 1986 年 R. Gedye 等对微波炉内进行酯化、水解、氧化和亲核取代反应及 R.J. Giguere 等对蒎与马来酸二甲酯的 Diels-Alder 环加成反应的研究。此后在有机化合物的几十类合成反应中也都取得了很大成功。

微波在无机固相反应中的应用是近年来迅速发展的一個新领域。现已广泛应用于陶瓷材料（包括超导材料）的烧结，固体快离子导体、超细纳米粉体材料、沸石分子筛的合成等，并取得了十分可喜的成功。

在催化领域，由于 Al₂O₃、SiO₂ 等无机载体不吸收微波，微波可直接传送到负载于载体表面的催化剂上并使吸附其上的羟基、水、有机物分子激活，从而加速化学反应的进行。已研究过的催化反应最有名的有甲烷合成高级烃类、光合作用的模拟和酸气污染物的去除等。

此外，微波在采油、炼油、冶金、环境污染物治理等方面也都取得了很大进展。可以看出，微波在化学中的应用已几乎遍及化学的每一个分支领域，微波化学实际上已成

为化学学科中一个十分活跃而富有创新成果的新的分支学科。

微波化学研究在我国起步并不太晚，中国科学院兰州化物所、吉林大学、云南大学、兰州大学，四川大学等在微波等离子体化学和微波合成及反应化学方面的研究都起步较早并取得过有影响的成果。1993年以微波化学为主题的长春夏季化学讨论会、1996年在长春召开的第一届全国微波化学会议及随后成立的微波化学专业委员会和1998年在昆明召开的第二届全国微波化学会议对我国微波化学的发展起了很好的推动作用。现在，随着微波技术的日渐普及，从事微波化学研究的队伍越来越大，所涉及的领域越来越广泛，一个有一定群众性的研究微波化学的高潮正在出现。在这种形势下，集中全国微波化学方面的专家，编写一本理论和应用并重的《微波化学》专著，对于进一步推进微波化学的发展，适应普及和提高相结合的要求，显然是有积极意义的。

本书各章的作者如下：第一章，金钦汉（吉林大学），季天仁（电子科技大学）；第二章，戴树珊、洪品杰、王真、毕先钧（云南大学）；第三章，黄卡玛（四川大学）；第四章，季天仁（电子科技大学）；第五章，王建营、胡文祥（总装备部军事医学所），金钦汉（吉林大学）；第六章，戴树珊、洪品杰、王真、毕先钧（云南大学）；第七章，刘福安（吉林大学），胡文祥（总装备部军事医学所），路建美（苏州大学）；第八章，张寒琦、金钦汉（吉林大学）；第九章，张寒琦、金钦汉（吉林大学）；第十章，于爱民、金钦汉（吉林大学）；第十一章，戴树珊、洪品杰、王真、毕先钧（云南大学）；第十二章，杨文军、于爱民、金钦汉（吉林大学）；第十三章，金友煌、任斌、黄凤林、魏爱军（西安石油学院）；第十四章，华一新、彭金辉、刘纯鹏（昆明理工大学）；第十五章，胡文祥、曹晔（总装备部军事医学所）。

本书的出版得到了中国科学院科学出版基金委员会的大力支持，科学出版社责任编辑操时杰先生付出了大量辛勤的劳动，微波化学专业委员会秘书长张寒琦教授和吉林大学化学系赵丽巍、宋大千、彭增辉、赵晓君、梁枫、郇延富、陈焕文等小姐、女士和先生在修改、打印、整理书稿方面作出了长时间的巨大的努力，使其得以按时以较高质量交稿，保证了本书的按计划出版，作者谨向他们表示最诚挚的谢意。

由于本书系一集体创作，作者较多且地域分布很广，加上主编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬希广大读者不吝批评指正。

金钦汉

中国电子学会微波分会微波化学专业委员会主任

符 号 表

(一) 英文符号

A ——常数、横截面积、跃迁几率、表面积
 a_0 ——比例因子
 B_0 ——介质的升温势垒、磁场强度
 C ——比热、浓度
 c ——真空中光速
 C_p ——等压热容
CVD——化学气相沉积
 d ——长度、厚度
 D ——穿透深度, 油滴直径
 $D_{1/2}$ ——半功率穿透深度
 D_e ——电子扩散系数
 D_p ——功率穿透深度
DRE——污染物的破坏和去除率
 E ——电场强度
 e ——电荷电量、热辐射系数
 E ——能量、电子平均动能
 E_c ——活化能
 E_{dis} ——离解能
 E_e ——电子能
 E_r ——转动能
 E_t ——平动能
 E_v ——振动能
 F ——法拉第常量
 f ——微波频率
 F ——转化率
 $F(t)$ ——电磁场作用力
 f_0 ——电场作用力
 f_0, f_s ——谐振频率
 g ——重力加速度, 统计权重
 g_A ——原子基态简并度
 g_{A_2} ——分子基态简并度
 H ——磁场强度
 ΔH ——热效应
 h ——普朗克常量
 I ——谱线发射强度、转动惯量、检波电流
 J ——电流密度
 J ——转动量子数
 k ——反应速率常数
 K ——激发常数、角动量量子数、吸收率、常数

K, k_b, k —— 玻尔兹曼常量
 k_r —— 导热系数
 L —— 光程长
 M —— 分子量、质量
 m —— 电子质量
 N —— 分子中原子数、组分的粒子总数
 N_0 —— 阿佛伽德罗常量
 N_L —— Loschmidt 数
 n —— 光致离子化效率、数目密度
 n_A —— 原子数目密度
 n_{A_2} —— 分子数目密度
 n_{sq} —— q 态的原子数目密度
 n_d —— 缺陷浓度
 n_e —— 电子密度
 n_{is} —— s 态的离子数目密度
 n_m^i, n_m^B —— 数目密度
 P —— 表观功率、功率
 $P(x, t)$ —— 概率密度
PCVD —— 等离子体化学气相沉积
 P_d —— 极化强度
 P_e —— 介质的极化损耗
 P_j —— 介质的欧姆损耗
 P_m —— 介质的磁滞损耗
 P_m —— 偶极子的偶极矩
 $\vec{P}(\omega)$ —— 极化强度
 Q —— 调制度、品质因子、质量因子、速率增加因子
 q —— 热量
 Q_{1d}, Q_{1s} —— 品质因数
 Q_u, Q_d —— 品质因子
 R —— 反射系数、气体常数
 r —— 距离、半径
 r_e —— 平衡核间距
 $r_m^{(0)}, r_m^{(1)}$ —— 碰撞辐射系数
 $\vec{s}$ —— 坡印廷矢量
 $\Delta s(t)$ —— 熵变
 T —— 绝对温度
 t —— 时间、辐照时间、加热时间
 t_0 —— 拐点时间
 $T_{1 \rightarrow 3}$ —— 转化时间
 T_d —— 分解温度
 T_e —— 电子温度
 T_{exc} —— 激发温度
 T_g —— 气体温度
 T_{ion} —— 电离温度

T_{rot} ——转动温度
 T_s ——颗粒表面温度
 T_{tr} ——平动温度
 U ——势能
 V ——电子平均势能、体积
 v ——速率、速度
 W ——重量
 ΔW ——失重百分数
 X ——转化分数
 x, y, z ——坐标

(二) 希 文 符 号

α ——衰减常数, Stefan-Boltzman 常量
 β ——相位常数
 $\beta(t)$ ——阻尼系数
 $\chi(\omega)$ ——极化率
 δ ——损耗角
 τ ——弛豫时间
 ϵ ——复介电常数
 ϵ_0 ——真空介电常数
 ϵ' ——介电常数
 ϵ'' ——介电损耗因子
 ϵ''_d ——偶极损耗
 ϵ''_{eff} ——介质的有效损耗
 ϵ_{MW} ——界面损耗
 ϵ_r ——相对介电常数
 γ ——传播常数、比质量
 κ ——力常数
 λ_D ——德拜半径
 λ_e ——有效导热系数
 μ ——约化质量、偶极矩
 μ_w ——水的粘度
 ν ——频率、分子振动频率
 ν_c ——弹性碰撞频率
 ρ_m ——物质密度
 ρ_w ——电磁能量密度
 σ ——电导
 σ_1 ——热辐射系数
 $\Gamma(t)$ ——随机力
 ω ——角频率, 电场频率
 ω_0 ——固有角频率
 ω_p ——载流子的跳跃频率
 ξ ——高频电离系数
 Ψ ——电流密度势函数
 Ω ——角频率

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 微波及其特性	1
1.2 微波化学及其发展	3
参考文献	5
第二章 微波与物质的相互作用	7
2.1 物质对微波的吸收	7
2.1.1 微波吸收光谱	7
2.1.2 微波等离子体	10
2.1.3 微波对凝聚态物质的加热作用	13
2.2 凝聚态物质在微波场中的行为	14
2.2.1 液体在微波场中的行为	14
2.2.2 粉末在微波场中的行为	17
2.3 物质介电性质的测量	21
2.3.1 终端短路法	21
2.3.2 谐振腔微扰法	22
2.3.3 波导微扰法	25
2.3.4 介电测量在化学中的应用	25
参考文献	28
第三章 微波对凝聚态化学反应的影响	30
3.1 引言	30
3.2 微波对化学反应的影响	30
3.3 微波化学中的非线性响应	33
3.4 弱微波对化学反应速率影响的计算	36
3.4.1 弱微波对简单分解反应速率的影响	36
3.4.2 弱微波对复杂化学反应的影响	39
3.5 微波场中有耗物质内的温度分布计算	41
3.5.1 复介电常数与温度之间的关系	41
3.5.2 反应物中的微波耗散功率	42
3.5.3 热传导方程	42
3.5.4 计算反应物中电磁场分布和温度分布的定解问题	43
3.5.5 有限时域差分方法	43
参考文献	45

第四章 微波凝聚态化学反应系统	(47)
4.1 微波凝聚态化学反应系统概述	(47)
4.1.1 系统框图	(47)
4.1.2 系统总体设计	(48)
4.1.3 系统各论	(48)
4.2 微波功率源	(55)
4.2.1 简易微波功率源	(56)
4.2.2 大功率磁控管微波功率源	(58)
4.2.3 高稳定程控微波功率源	(60)
4.3 微波传输系统	(61)
4.3.1 微波传输系统的作用和基本要求	(61)
4.3.2 微波传输系统的组成和运行原理	(61)
4.3.3 高频率稳定度可变功率微波传输系统	(68)
4.4 微波凝聚态化学反应器	(69)
4.4.1 微波化学反应腔类型、选择和设计考虑	(69)
4.4.2 多模箱式微波化学反应器	(70)
4.4.3 波导型微波化学反应器	(78)
参考文献	(85)
第五章 微波诱导催化反应	(86)
5.1 微波诱导催化反应原理	(86)
5.2 微波诱导催化反应举例	(87)
5.2.1 甲烷分解	(87)
5.2.2 烃类氧化	(87)
5.2.3 SO_2 和 NO_x 还原	(88)
5.2.4 模拟光合作用	(89)
5.3 微波诱导催化反应机制	(89)
5.4 微波诱导催化反应用催化剂和载体	(90)
5.5 微波用于催化剂制备和载体改性	(91)
参考文献	(93)
第六章 微波无机合成化学	(94)
6.1 微波燃烧合成和微波烧结	(94)
6.2 微波水热合成	(110)
6.2.1 Fe^{3+} 的微波辐照强迫水解制备均分散氧化物胶体粒子	(110)
6.2.2 金属盐或醇盐溶液在微波辐照下直接分解制备超细氧化物粉体	(112)
6.2.3 沸石的微波合成	(114)
参考文献	(117)
第七章 微波有机合成化学	(118)
7.1 微波有机合成反应技术	(118)
7.1.1 微波密闭合成反应技术	(118)

7.1.2 微波常压合成反应技术	(120)
7.1.3 微波干法合成反应技术	(123)
7.1.4 微波连续合成反应技术	(124)
7.2 微波技术在有机合成中的应用	(126)
7.2.1 酯化反应	(126)
7.2.2 Diels-Alder 反应	(128)
7.2.3 重排反应	(129)
7.2.4 Knoevenagel 反应	(131)
7.2.5 Perkin 反应	(131)
7.2.6 苯偶姻缩合	(131)
7.2.7 Reformatsky 反应	(132)
7.2.8 Deckman 反应	(132)
7.2.9 缩醛(酮)反应	(132)
7.2.10 Wittig 反应	(132)
7.2.11 羟醛缩合反应	(133)
7.2.12 开环反应	(133)
7.2.13 O-烷基化反应	(133)
7.2.14 N-烷基化反应	(134)
7.2.15 C-烷基化反应	(135)
7.2.16 水解反应	(135)
7.2.17 烯烃的加成	(136)
7.2.18 消除反应	(136)
7.2.19 取代反应	(137)
7.2.20 自由基反应	(137)
7.2.21 立体选择性反应	(137)
7.2.22 成环反应	(138)
7.2.23 环反转反应	(140)
7.2.24 酯交换反应	(140)
7.2.25 酰胺化反应	(141)
7.2.26 催化氢化反应	(141)
7.2.27 脱羧反应	(141)
7.2.28 脱保护反应	(141)
7.2.29 糖类化合物的某些反应	(141)
7.2.30 有机金属反应	(143)
7.2.31 微波合成放射性药剂	(144)
7.2.32 微波聚合反应	(144)
7.2.33 其它反应	(146)
7.3 关于微波加速化学反应的机理	(146)
参考文献	(147)

第八章 微波在分析化学中的应用	(151)
8.1 微波溶样	(151)
8.1.1 微波溶样理论基础	(151)
8.1.2 微波溶样设备	(154)
8.1.3 微波溶样方法	(159)
8.2 微波萃取	(166)
8.2.1 微波萃取用仪器	(166)
8.2.2 微波萃取方法	(166)
8.3 脱附	(169)
8.4 干燥和测湿	(170)
8.4.1 干燥	(170)
8.4.2 测湿	(170)
8.5 预浓缩和净化	(171)
8.5.1 预浓缩	(171)
8.5.2 预净化	(172)
8.6 显色反应、形态分析和热雾化	(173)
8.6.1 显色反应	(173)
8.6.2 形态分析	(173)
8.6.3 热雾化	(174)
参考文献	(175)
第九章 微波在环境化学中的应用	(177)
9.1 微波除污	(177)
9.2 油污回收	(179)
9.3 SO_2 和 NO_x 的还原	(182)
参考文献	(187)
第十章 微波等离子体的获得及其基本特征	(188)
10.1 获得微波等离子体的装置	(188)
10.1.1 渐缩矩形腔	(189)
10.1.2 $3/4$ 波长同轴腔	(190)
10.1.3 $1/4$ 波长同轴腔	(190)
10.1.4 $1/4$ 波长径向腔	(191)
10.1.5 圆柱形 TM_{010} 型谐振腔	(191)
10.1.6 表面波器件	(192)
10.1.7 电容耦合微波等离子体装置	(193)
10.1.8 微波等离子体炬	(194)
10.2 微波等离子体的基本性质及其测量方法	(196)
10.2.1 微波等离子体温度的测量	(199)
10.2.2 MWP 中的电子数目密度及其测量	(205)
10.3 微波等离子体中的基元过程, 荷电粒子的扩散和迁移	(205)

10.3.1 电晕模型	(206)
10.3.2 完全饱和相模型	(207)
10.3.3 辐射电离复合模型	(207)
10.3.4 亚稳态组分的作用	(208)
10.3.5 自由电子的作用	(210)
10.4 微波等离子体化学反应器	(210)
10.4.1 表面波器件——Surfatron 微波等离子体反应器	(210)
10.4.2 微波传输线等离子体化学反应器	(211)
10.4.3 电子回旋共振微波等离子体反应器	(211)
参考文献	(213)
第十一章 微波等离子体合成化学	(215)
11.1 微波等离子体化学气相沉积 (MPECVD)	(215)
11.1.1 MPECVD 法制备金刚石	(217)
11.1.2 MPECVD 法制备 β -SiC, Co 和 BN 薄膜	(221)
11.2 微波等离子体表面改性	(223)
11.2.1 微波等离子体的刻蚀作用	(223)
11.2.2 微波等离子体对高分子材料的表面处理	(224)
11.3 微波等离子体化学气相合成	(228)
11.3.1 氨的合成	(228)
11.3.2 甲烷转化	(229)
11.3.3 $^1\text{O}_2$ 的产生	(229)
11.4 微波等离子体热解技术	(231)
参考文献	(234)
第十二章 微波等离子体分析化学	(235)
12.1 发展简史	(235)
12.2 微波等离子体原子光谱分析	(236)
12.2.1 MWP 原子发射光谱分析 (MWPAES)	(236)
12.2.2 MWP 原子质谱分析 (MWPMs)	(246)
12.2.3 MWP 原子荧光光谱分析 (MWPAFS) 和 MWP 原子吸收光谱分析 (MWPAAS)	(249)
12.2.4 MWP 增强辉光放电原子发射光谱分析	(252)
12.3 色谱用微波诱导等离子体离子化检测器 (MIPID)	(254)
参考文献	(257)
第十三章 微波化学在石油工业中的应用	(259)
13.1 微波对地层流体及岩石的作用机理	(259)
13.1.1 地层流体及岩石的组成和特性	(259)
13.1.2 微波对地层流体及岩石的作用机理	(261)
13.2 微波化学在稠油及高凝原油开采中的应用	(263)
13.2.1 稠油及高凝油的性质特征	(263)

13.2.2 稠油及高凝原油开采过程中存在的问题	(263)
13.2.3 高凝原油的微波开采	(264)
13.3 微波化学在低渗透油气田开发中的可能应用	(269)
13.3.1 低渗透油气田的性质特征	(269)
13.3.2 微波化学用于低渗透油气田的开发	(269)
13.4 微波化学在油气田开发中的其它方面应用	(271)
13.4.1 微波破乳	(271)
13.4.2 微波化学脱硫	(273)
13.4.3 微波脱蜡	(274)
13.4.4 微波化学防止天然气中水化物的形成	(274)
13.4.5 微波解堵	(275)
13.4.6 微波化学应用于原油开采后地面污物的处理	(275)
13.5 微波化学在石油、天然气、煤化工中的应用	(276)
13.5.1 等离子体煤炭气化	(276)
13.5.2 微波对石油蒸馏过程的影响	(276)
13.5.3 微波激发甲烷气相裂解	(277)
13.5.4 微波对催化反应的影响	(279)
参考文献	(280)
第十四章 微波化学在冶金中的应用	(282)
14.1 引言	(282)
14.2 矿物在微波场中的升温性能	(283)
14.3 微波加热对矿石显微结构的影响	(289)
14.4 矿物的微波加热分解	(291)
14.4.1 二氧化锰的微波加热分解	(291)
14.4.2 软锰矿的微波加热分解	(296)
14.4.3 碱式碳酸镍的微波加热分解	(299)
14.5 金属氧化矿的微波加热碳热还原	(302)
14.5.1 铁矿石的微波碳热还原	(302)
14.5.2 钛铁矿的微波碳热还原	(304)
14.5.3 软锰矿的微波碳热还原烧结	(307)
14.6 硫化矿的微波加热浸出	(311)
14.6.1 硫化铜精矿的微波辐射三氯化铁浸出	(312)
14.6.2 微波辐照下闪锌矿与软锰矿的同时浸出	(313)
14.6.3 闪锌矿的微波辐射三氯化铁浸出	(313)
14.7 矿石的微波辐射预处理	(316)
14.7.1 难处理金精矿的微波辐射预处理	(316)
14.7.2 红砷镍矿的微波辐射氧化脱砷	(318)
参考文献	(318)
第十五章 微波生物学效应及其健康防护	(320)

15.1	微波的生物效应	(320)
15.1.1	微波生物效应的作用机制	(320)
15.1.2	微波对人及动物的生物学效应	(321)
15.2	微波对人体的损伤及治疗	(322)
15.3	微波健康防护	(322)
15.3.1	职业辐射防护	(322)
15.3.2	公众辐射防护	(323)
	参考文献	(323)

第一章 绪 论

1.1 微波及其特性

微波是频率大约在 300 MHz~300 GHz, 即波长在 100 cm 至 1 mm 范围内的电磁波. 它位于电磁波谱的红外辐射(光波)和无线电波之间(见图 1.1). 因此, 可以用电磁波和电磁场理论处理与微波有关的一些问题, 特别是微波在空间的传播及其与物质的相互作用等(详见第二章). 但是, 由于微波波长与所用元器件的尺寸相近, 所以常用于电子学中的印刷电路已不能使用. 在这里, 能够使用的是同轴电缆、空心金属管波导、谐振腔、速调管和磁控管等(详见第四章).

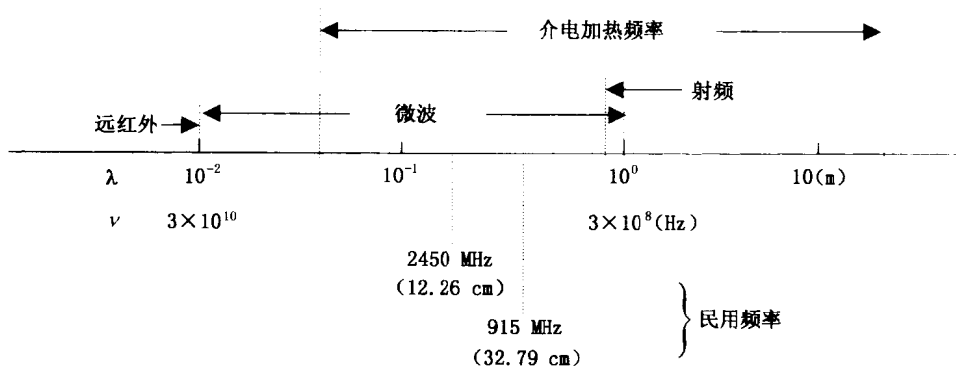


图 1.1 微波在电磁波谱中的位置

微波是一个十分特殊的电磁波段, 尽管它介于无线电波和红外辐射之间, 但却不能仅靠将低频无线电波和高频红外辐射的概念加以推广的办法导出微波的产生、传输和应用的原理. 例如, 按照低频无线电波的原理, 空心金属管波导将不能传输微波, 因为按照这些原理, 相反方向的电流将不能同时在一块金属里流动而不汇合成单一方向的电流. 然而, 对于微波, 却确实可以观测到相反方向的电流在波导的同一导体中流动. 同样, 虽然光可以在空心管中传播, 但光却不能像微波那样沿一个同轴电缆传播.

微波也不能用在无线电和高频技术中普遍使用的器件, 如传统的真空管和晶体管来产生. 连续的低功率微波可用 Gunn 二极管或速调管作振荡器产生, 100 W 以上的微波功率则常用磁控管来产生.

由于所谓的“趋肤效应”, 导体中由微波场诱导产生的电流都集中分布在导体的表面. 微波场对导体的穿透程度可用趋肤深度 δ (单位为 m) 加以表征:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \quad (1.1)$$

式中 ω 是微波场振动的角频率(以弧度/秒表示), σ 是金属的电导率(单位为 $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$),

μ_0 是真空中磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$. 对于铜, σ 为 $5.81 \times 10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. 若微波频率为 2450 MHz, 则 $\delta = 1.3 \mu\text{m}$. 因此, 除有关能量损失的计算外, 在各种实际应用中都可以认为电流完全分布在导体的表面, 相应的场则完全分布在导体以外的空间中.

微波可由一个硬质或柔软的同轴电缆或圆形(或矩形)波导来传输(详见第四章). 图 1.2a 为同轴传输线中电磁场分布的示意图. 这种传输线由两根同轴金属管组成. 由于趋肤效应, 电流仅在金属表面流动, 电磁场则全部被局限在导体之间的空间中. 外导体和内导体中的电流方向是相反的, 且沿着传输线会改变方向. 由于沿线总有可供波传输的空间, 因此只要内外导体间的距离小于波长, 在频率降低时, 这种同轴传输线就不会出现任何问题. 但如果没有内导体存在(如图 1.2b 所示), 有些电磁场分量就会没有得以扩展的空间, 这时就会存在某一个确定的频率, 在这个频率以下, 图 1.2b 中所示的特定的场构型就不能存在了. 这个频率就是所研究波型(或传播模式)的“截止频率”. 对于同轴传输线, 则既能传输如图 1.2a 所示的基波, 又能传输更高次模式的波(即那些具有更高截止频率的模式).

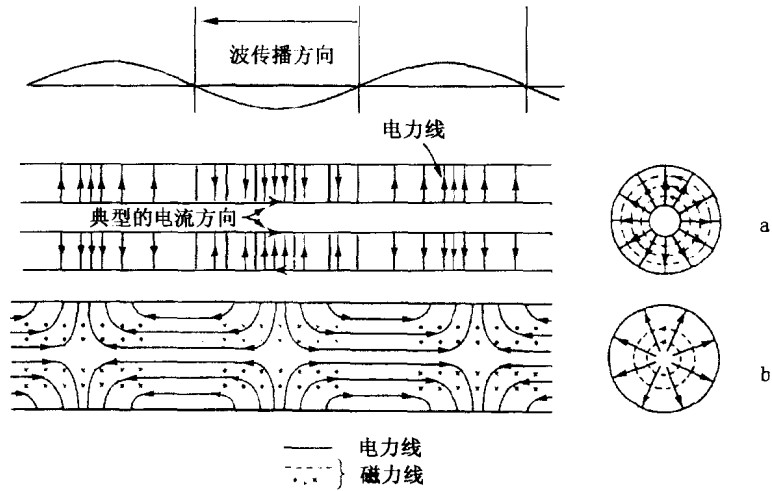


图 1.2 同轴线a和空心圆柱形波导b中的电磁场和电流分布

由于微波的波长很短, 因此任何两个装置间的连接都可被看成为传输线, 而任何距离的传输都有必要考虑波的原理.

微波除可通过波导或同轴电缆传输外, 也可以用一些天线将其聚焦成波束进行传输, 这已被广泛应用于雷达、通讯和电子战中.

在一般条件下, 微波可方便地穿透某些材料, 如玻璃、陶瓷、某些塑料(如聚四氟乙烯)等. 因此, 可用这些材料作家用微波炉的炊具、支架及窗口材料等. 微波也可被一些介质材料, 如水、碳、橡胶、食品、木材和湿纸等吸收而产生热, 因此, 微波也可作为一种能源而在家用、工业、科研和其它许多领域获得广泛的应用. 这种微波功率是一类不属于通讯用的微波功率.

微波波段中波长在 1~25 cm 的波段专门用于雷达, 其余部分用于电讯传输. 为了