



“十二五”科学技术专著丛书

# 介电常数 及其测量技术

刘小明 著

DIELECTRIC AND  
MEASUREMENT  
TECHNIQUES



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)



“十二五”科学技术专著丛书

# 介电常数及其测量技术

刘小明 著



北京邮电大学出版社  
www. buptpress. com

## 内 容 简 介

介电质在实际生活当中有着广泛的应用,而介电常数是描述介电质的一个重要物理参量。鉴于介电常数的频率及温度依赖特性,本书着重讨论介电常数的基本知识及介电常数的测量方法,主要涉及低频方法、传输线方法、自由空间测量方法、谐振测量方法等。一并讨论的还有介电常数的反演技术。考虑计算机技术的发展及数值计算的普遍,除了对解析反演法的讨论,还增加了数值反演的阐述。本书在理论上力求简洁明了,对数学过程的描述力求细致、详尽,对仪器设备的展示尽量做到直观、易懂。书中部分内容是基于国家自然科学基金及教育部留学归国人员科研启动基金项目的研究成果。本书适合电子科学与技术、物理、材料及生物电磁相关专业的研究生及工程人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

介电常数及其测量技术 / 刘小明著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2015. 8  
ISBN 978-7-5635-4410-3

I. ①介… II. ①刘… III. ①介电常数计量 IV. ①TM934.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 143296 号

---

书 名: 介电常数及其测量技术

著作责任者: 刘小明 著

责任编辑: 徐振华 孙宏颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷:

开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 13

字 数: 261 千字

版 次: 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-4410-3

定价: 32.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

# 前 言

介电质是一种能够极化的绝缘体。在实际的生活当中,介电质有着广泛的应用价值。最简单的应用就是用作绝缘体,常见的应用就是用于制作电容器。在微波电路中,可以用作电路板的基底、同轴线内芯及外导体之间的支撑材料,甚至用于天线,如介质谐振天线。这些应用与介电特性有很大的关系。

在研究介质的电磁特性的时候,介电常数是一个十分重要的物理参数。在电磁学里,介电常数对介质分界面的边界条件有着重要的影响。电磁波在介电质中传输,介电常数决定了电磁波的波长。实际上,介质的介电常数并非像通常所认为的那样是不变量,而是随着温度、频率的变化而变化的,甚至随着外界的压力变化而变化。另外,介电质也并非完全不导电,而是具备微弱的甚至可观察到的导电能力。再者,从广义上讲,所有的物质都可以有介电常数,即便是金属也可以用介电常数去描述。只不过对于导体而言,介电常数采用复数的形式表示。而理想导体可以看作介电常数的虚部是无穷大的物质。通常,介电常数的虚部与损耗是相关的,因此,有些地方将介电常数的虚部也称为损耗因子。损耗的存在,也得到了实际的应用,例如,生活当中的微波炉,恰恰是利用了食物对电磁波有吸收损耗,从而使电磁能转化成了内能,也就是热现象。这些性质,都是在讨论电磁场与介质相互作用时要考虑的。研究介质的介电常数是研究电磁应用的一个重要的课题。

目前,对介电常数的研究主要有建模和测量两种方式。实际上,这两种方式是难以分开的。测量的目的是为了得到第一手数据。而建模的目的一方面是为了从机理上理解介电常数的特性,另一方面也是为了方便形成公式化的表示,以便于实际应用。例如,在计算电磁学中,就要求准确地知道每个频率点的介电常数。利用建模得到的公式,可以方便于程序设计及软件实现,从而进行仿真分析。但实际情况是,很多模型参数的得到是通过实验数据拟合而成的,如 Debye 模型中的参数。尽管 Debye 模型建立了理论上的解释,但不能给出定量的参数。因此,介电常数的测量的作用就显得尤为重要。

本书主要介绍介电常数的基本知识以及介电常数的测量方法。由于介电常数是随测量信号的频率的变化而变化的,因此,在实际的测量过程中,不同的频率段会采用不同的测量方法。这一点是无法避免的,也是由于电磁理论中的电尺寸所

决定的。随着频率的升高,电磁波的波长会逐渐减小。因此,相同物理尺寸的物体,其电尺寸往往是在增加的。在低频情况下,物理的尺寸与波长相对过小,因此,可以采用集总参数模型去处理。但随着频率的升高,就必须采用分布式模型以及波动理论去处理。在物理尺寸与波长相当时,应当采用谐振的方法去处理。正是由于这些理论基础的存在,测量方法也是随频率变化的。低频情况下采用平行板电容器测量方法进行测量,这是一种集总参数方法。频率到了射频及微波段时就有传输线法、自由空间测量法、谐振腔法等测量方法。在本书中,我们将对这些方法进行讨论。

一并讨论的还有介电常数的数值反演方法。由于测量设备的复杂性,很难有解析解存在。即使对于一些简单的结构存在解析解的可能性,在正文中将会看到,也存在着一定的歧义性。考虑计算机技术的发达及数值计算的普遍,作者认为,这些讨论是有益的。

另外,本书也包括了一些重要的介质的讨论。如水、氯化钠溶液及一些生物组织。这些物质的讨论主要是总结了一些前人的工作,给感兴趣的读者一些参考。另外,这一部分内容也是作者在实际工作中会经常碰到的。尽管不全面,但重要的文献都已列出,供读者参考、查阅。

本书的内容始于在博士研究期间研究纳米材料的电磁特性时的一些读书笔记。随着作者研究的深入,深感介电质的测量是一件复杂而有意义的事情。因此,作者一直在总结有关的测量技术和测量方法。2014年1月,作者得到国家留学基金委留学归国人员科研启动基金的资助,研究毫米波技术,其中就涉及毫米波段物质的介电特性。作者认为应当对介电常数的测量方法进行系统性的总结。于是,作者开始整理之前的笔记及相关文献。2014年8月,作者又得到国家自然科学基金青年基金的资助(资助编号:61401031),继续研究纳米材料的电磁特性,又涉及纳米材料的介电特性的研究。这进一步促使作者对该领域进行了归纳整理。尽管目前有不少国家或相关机构的标准,但不少标准对于原理及过程的阐述并不详细,想深入研究的人员会感到不足。

从开始至定稿,总共有三四年的时间。出版过程中,得到了留学归国人员科研启动基金及国家自然科学基金青年基金的资助,在此表示感谢。

尽管作者尽力避免一些错误,但囿于作者的水平和时间,书中难免有不少纰漏甚至错误之处。敬请各位专家、学者能与作者联系,予以斧正。

# 符号与单位

符 号	物理含义	单 位
$\epsilon$	介电常数	F/m
$\mu$	磁导率	H/m
$\epsilon_0$	真空中的介电常数	F/m
$\mu_0$	真空中的磁导率	H/m
$\epsilon_r$	相对介电常数	
$\mu_r$	相对磁导率	
<b><math>D</math></b>	电位移矢量	C/m <sup>2</sup>
<b><math>E</math></b>	电场强度	V/m
<b><math>P</math></b>	电极化矢量	C/m <sup>2</sup>
$\chi$	电极化率	
$\sigma_0$	直流导电率	S/m
$\sigma$	导电率	S/m
<b><math>M</math></b>	磁化矢量	V/m <sup>2</sup>
$\chi_m$	磁化率	
<b><math>H</math></b>	磁场强度	A/m
<b><math>B</math></b>	磁感应强度	Wb/m <sup>2</sup>
<b><math>J</math></b>	电流密度	A/m <sup>2</sup>
$\rho$	电荷密度	C/m <sup>3</sup>
<b><math>S</math></b>	坡印廷矢量	W/m <sup>2</sup>
<b><math>S_{av}</math></b>	平均坡印廷矢量	W/m <sup>2</sup>
$Y$	导纳	S
$G$	电纳	S

续表

符 号	物理含义	单 位
$\omega$	角频率	rad/s
$f$	频率	Hz
$C$	电容	F
$R_s$	电阻	$\Omega$
$S_{21}$	散射矩阵前向传输系数	
$S_{11}$	散射矩阵前向反射系数	
$S_{12}$	散射矩阵反向传输系数	
$S_{22}$	散射矩阵反向反射系数	
$\gamma$	传播常数	
$\alpha$	衰减常数	dB/m
$\beta$	相位常数	rad/m
$Z$	阻抗	$\Omega$
$\lambda$	波长	m
$\Gamma$	反射系数	

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 介电常数基本理论	6
1.2.1 介电常数	6
1.2.2 磁导率	12
1.2.3 电磁吸收与介电常数	14
1.3 介电常数测量技术概述	15
1.4 小结	18
参考文献	18
第 2 章 平行板电容器测量法	21
2.1 接触式测量方法	21
2.2 非接触式	24
2.3 其他结构	27
2.3.1 频率法测量液体电介质介电常数	27
2.3.2 同轴线结构测量液体电介质介电常数	28
2.4 测量电阻分量	29
2.5 小结	30
参考文献	30
第 3 章 传输线测量方法	32
3.1 传输线结构	32
3.2 传输线的分析方法	33
3.2.1 多次反射叠加法	33
3.2.2 多层结构的信号流图分析方法	35



3.2.3 传输矩阵法(ABCD矩阵法) .....	36
3.3 相位补偿 .....	39
3.4 从S参数反演介电常数 .....	40
3.4.1 数学公式反演方法 .....	41
3.4.2 数值迭代法 .....	45
3.5 小结 .....	46
参考文献 .....	46
<b>第4章 开端同轴线测量方法 .....</b>	<b>48</b>
4.1 开端同轴线测量方法的基本原理 .....	48
4.1.1 电容模型 .....	48
4.1.2 天线模型 .....	52
4.1.3 虚拟传输线模型 .....	52
4.1.4 有理式方程模型 .....	54
4.2 样品测量 .....	55
4.2.1 甲酰胺和甲醇 .....	56
4.2.2 金纳米悬浮液 .....	57
4.2.3 讨论分析 .....	63
4.3 小结 .....	64
参考文献 .....	65
<b>第5章 自由空间测量技术 .....</b>	<b>67</b>
5.1 准光技术测量方法 .....	67
5.1.1 准光技术的基本原理 .....	67
5.1.2 透射式系统 .....	69
5.1.3 反射式系统 .....	74
5.2 校准方法 .....	76
5.3 太赫兹时域光谱测量方法 .....	80
5.3.1 太赫兹时域光谱仪的基本原理 .....	80
5.3.2 利用太赫兹时域光谱仪测量介电常数 .....	81
5.4 傅里叶光谱仪 .....	86
5.5 小结 .....	92
参考文献 .....	93

<b>第 6 章 谐振测量方法</b> .....	95
6.1 介质谐振技术 .....	95
6.1.1 介质杆谐振技术 .....	95
6.1.2 分裂谐振杆法 .....	101
6.1.3 片样谐振法 .....	102
6.1.4 Fabry-Perot 谐振腔 .....	104
6.1.5 平面电路法 .....	115
6.1.6 其他方法 .....	117
6.2 腔体微扰技术 .....	118
6.2.1 腔体微扰法的基本理论 .....	118
6.2.2 腔体微扰法的一些结构 .....	122
6.2.3 改进型的腔体微扰法 .....	123
6.3 小结 .....	127
参考文献 .....	127
<b>第 7 章 参考介质的介电常数</b> .....	130
7.1 纯水的静介电常数 .....	130
7.2 纯水的复介电常数及理论模型 .....	132
7.2.1 MCL 测量软件模型 .....	133
7.2.2 Liebe 模型 .....	134
7.2.3 Ellison 统计模型 .....	142
7.3 其他参考介质的介电常数 .....	149
7.3.1 甲酰胺 .....	149
7.3.2 乙二醇 .....	150
7.3.3 甲醇 .....	151
7.4 小结 .....	152
参考文献 .....	152
<b>第 8 章 混合媒质的介电常数</b> .....	156
8.1 一般理论 .....	156
8.2 电解质混合物 .....	164
8.3 小结 .....	166
参考文献 .....	167

<b>第 9 章 生物组织的介电常数</b> .....	169
9.1 人体及人体组织的构成 .....	170
9.2 生物组织的介电常数汇总 .....	174
9.3 生物组织的介电常数拟合模型 .....	186
9.4 生物组织的介电常数的测量 .....	194
9.5 小结 .....	195
参考文献.....	196

# 第1章 绪论

## 1.1 概述

介电常数(Dielectric Constant)表征的是材料能使电场通过的能力。其英文前缀Die有通过、跨过的意思<sup>[1]</sup>。但同时它有另外一层物理含义,即允许电场通过,而不允许粒子通过,包括电子。因此,介电质(绝缘体)的中文释义中的“介”表明的是隔开电流的意思,也就隐含有理想介电质(Dielectric Media)不具有导电能力的意思。

事实上,理想的介电质是不存在的。任何物体总是具备一定的导电能力,只是这种导电能力是有很大的差异的。总体而言,材料大体可以分为3类:介电质(Insulator)、半导体(Semiconductor)和导体(Conductor)。绝缘体的导电能力很差,基本上可以认为是理想的介电质;而半导体具备一定的导电能力,也因此在实际的电子器件中有很广泛的应用价值;导体具有良好的导电特性,在实际生活与生产中的应用相当广泛。同样,介电质也有很广泛的应用,除了传统的用于制造绝缘体、电容器(电容器的实物图与内部结构如图1-1所示)件外,它还可以用于微波频段内的介电质共振器,从而产生振荡电路的参考频率。



图 1-1 电容器的实物图与内部结构

如图 1-2 所示,贴片式电容器内部的介电质的功能就是增加电容器的电容值。电容器主要由两个电极组成,电极之间由介电质填充。在电极之间填充介电质除了增加电容值之外,还能使电容器的体积减小。

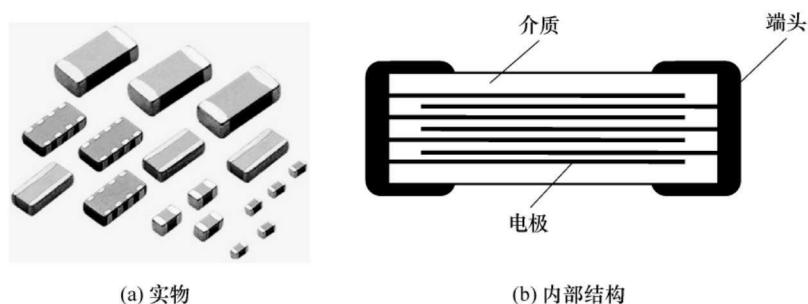


图 1-2 贴片式电容的实物图与内部结构

利用高介电常数制作的介质谐振天线(Dielectric Resonator Antenna)可以使天线设计小型化,能更好地与集成电路整合,如图 1-3 所示。介质谐振器天线是一种谐振式天线,由低损耗的微波介质材料构成,它的谐振频率由谐振器尺寸、形状和相对介电常数所决定。相对于金属谐振腔,介质谐振天线工作在谐振时一直在向外辐射电磁波,因此其辐射效率比较高<sup>[2,3]</sup>。同时,介质谐振天线能与目前的集成电路很好地融合,有利于设备的小型化。而印制电路板的基板则无一例外地采用的是介电质。此外,有些介电质在受到机械压力时,会产生电压差,或者受到外加电压时会产生物理形变,这种特性称为压电效应,如图 1-4 所示。利用压电效应可以制造传感器、谐振器。常用的压电材料有压电陶瓷、压电晶体等<sup>[4]</sup>。介电质还有其他的应用,限于篇幅,这里不展开讨论。

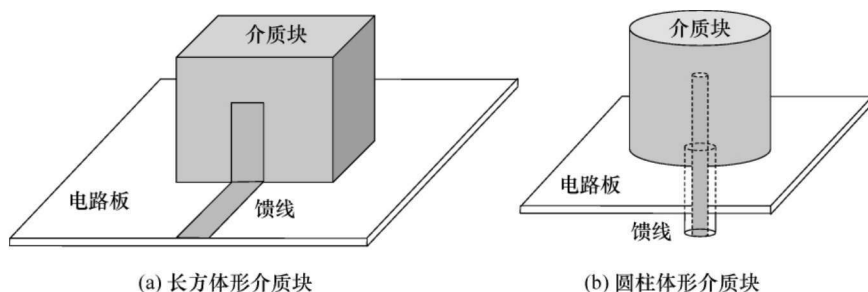


图 1-3 介质谐振天线

描述介电材料的电磁特性主要有两个参数:介电常数(Dielectric Permittivity)和磁导率(Permeability),分别用希腊字母  $\epsilon$  和  $\mu$  表示。尽管我们习惯地称这两个参数为常数,但实际上,它们是随着频率、温度等参数变化的。介电常数的重要性

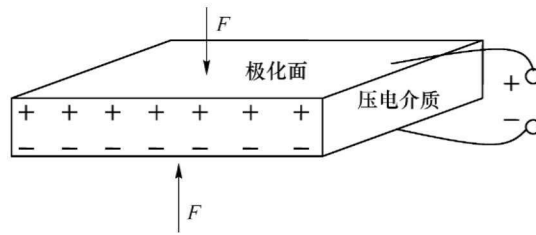


图 1-4 压电材料示意图

在于,它是研究材料与电磁波相互作用时的核心参数之一。例如,高介电常数材料是当前微电子行业最热门的研究课题之一。它的应用为解决当前半导体器件尺寸缩小导致的栅氧层厚度极限问题提供了可能性,同时利用一些高介电常数材料具有的特殊物理特性,可实现具有特殊性能的新型器件<sup>[5-7]</sup>。而低介电常数材料的研究也在世界范围内展开,这些低介电常数材料需具备以下性质:在电性能方面,要有低损耗和低泄漏电流;在机械性能方面,要有高附着力和高硬度,否则外力将易于跨越材料的降伏强度,势必导致断线危机,进而破坏组件的运作;在化学性能方面,要能耐腐蚀和有低吸水性;在热性能方面,要有高稳定性和低收缩性。由于普遍采用的介电材料  $\text{SiO}_2$  已经不能满足超大规模集成电路(ULSI)发展的需求,所以多年来人们一直都在努力寻找各种合适的低介电常数材料<sup>[8,9]</sup>。

在很多应用中,如材料的电磁烘干、食物电磁加热处理等都要求研究被处理材料的介电特性,以期得到最佳的加热效果<sup>[10-13]</sup>。例如,电磁炉加热食品采用 2.45 GHz 的原因就在于:①食品中有大量的水分;②水分在 2.45 GHz 有比较好的加热效果。因此,测量这些材料的介电常数是这些应用中的一项基本工作。另外,生物组织的介电常数是研究生物电磁学的一个核心参数,尤其是在研究生物组织的电磁效应的过程中,为了达到最佳的电磁防护或最佳的电磁加热,选好材料及加热频率就显得尤其重要<sup>[13]</sup>。生物电磁学研究的就是电磁波或电磁场对生物组织的作用,生物组织的介电常数是一个比较复杂的问题,其测量也是一项比较繁杂的工作。

如图 1-5(a)所示,电磁烘干机一般是由射频源及一个电容烘干板组成。被烘干产品置于电容烘干板之间。如图 1-5(b)所示,电磁烘干器的烘干原理是产品中的介电损耗。由于分子中的偶极子跟随电场变化时有滞后效应,从而产生介电损耗。电磁烘干机中,产品的介电常数与电磁烘干效果有密切的关系,一般在烘干过程中要严密监控加热过程。因此,对产品的介电常数随温度和湿度的变化的研究就显得十分必要。一方面是为了使仪器正常工作,另一方面是寻求最佳的加热效果,达到节能的目的。图 1-5(c)是英国 Strayfield 公司(其网站为 <http://www.strayfield.co.uk/>)75 kW 电磁烘干器的示意图。

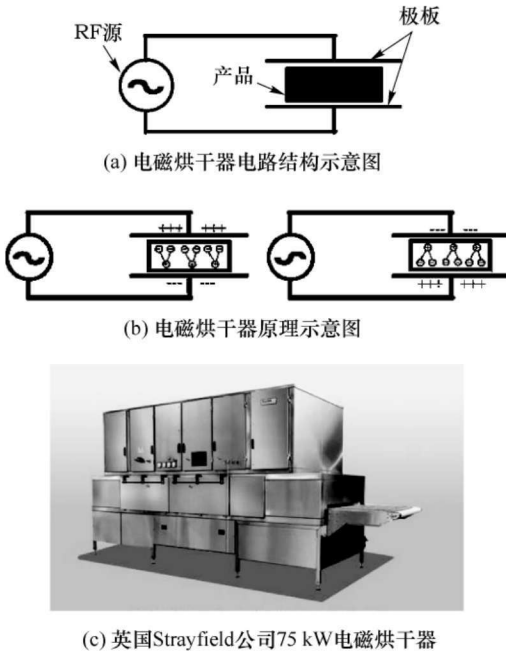


图 1-5 电磁烘干机

图 1-6 为微波炉加热示意图，微波炉加热的原理与电磁烘干器的原理一样，而且食物中一般会有大量的水分子，水分子在微波段的电磁吸收能力比较好。

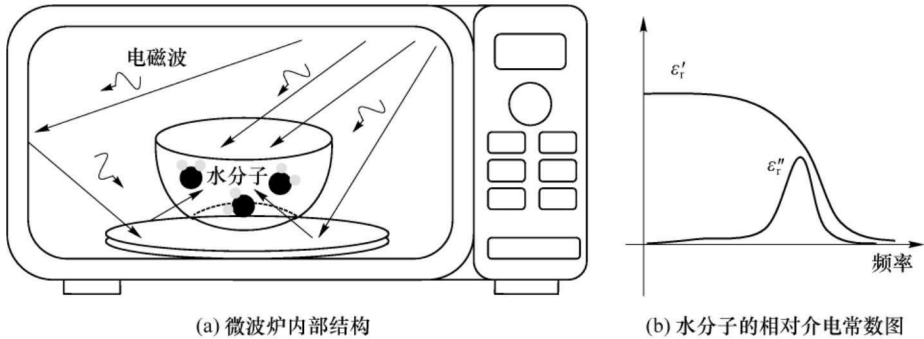


图 1-6 微波炉加热

图 1-7 为生物电磁效应的应用。生物电磁的应用比较广泛，在一些情况下，生物组织的电磁效应对人体是有害的。因此，应当选择适当的材料减小电磁效应。而在很多情况下，可以利用生物的电磁效应进行疾病治疗，通常的有射频高热疗法。不管是有害的电磁效应还是可利用的电磁效应，其原理都是利用了材料的介电损耗效应。如何减小或提高生物电磁效应都离不开生物组织的介电特性，最主

要的就是介电常数的测量。生物组织的介电常数是一个复杂的问题,原因在于一方面生物组织种类繁多,另一方面生物组织的活的有机体(In vivo)下的测量是一个比较困难的问题。

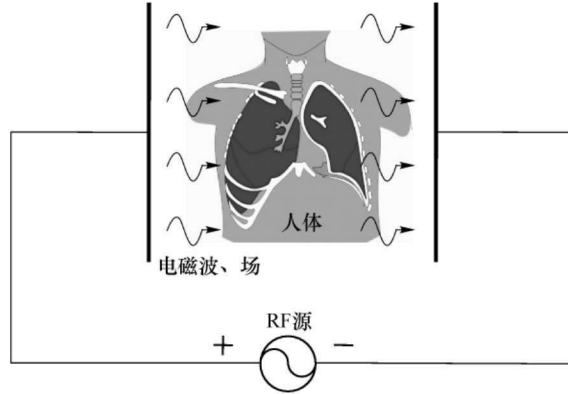


图 1-7 利用生物电磁效应进行疾病的治疗

在农业领域,介电常数的应用也很广泛,其中一应用就是农产品的质量控制在监测。农产品的质量参数包括含糖量、水分含量、酸碱度等。监测这些参数的方法很多,而一种无损检测方法就是通过测量农产品的介电常数来评估其质量<sup>[14-16]</sup>。

这里,我们要讨论的主要是介电常数的测量方法。鉴于介电常数是频率的函数,因此,测量材料在不同频率下的介电常数就得考虑不同的测量方法。由于不同的频率所对应的波长是不一样的,如图 1-8 所示,因此也就会产生不同的物理现象。介电质测量也是一样的,在不同的频段,其采用的技术也不一样。同时还应当充分考虑其他因素带来的影响,如样品的形态、温度。接下来的部分,将简要介绍与介电常数有关的基本知识,并对测量方法进行概述。在后续的章节中,对各种测量方法及一些重要的材料的介电常数会进行详细的讨论。

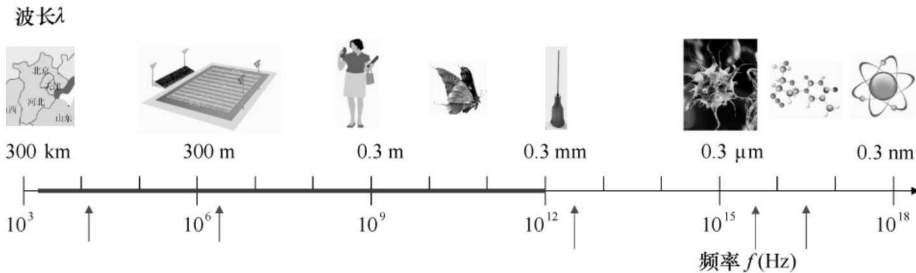


图 1-8 频率及其所对应的波长



## 1.2 介电常数基本理论

### 1.2.1 介电常数

材料的介电常数与材料在外加电场的作用下的极化特性有关。物体都是由原子或分子组成的,原子是由带正电的原子核及带负电的电子云层组成,而分子则是由相同或不同的多个原子组成的。当不存在外界的电场(Electric Field)或磁场(Magnetic Field)作用时,电子云层相对于原子核呈现均匀的分布,从而,原子总体上显示的是一种中性的状态,如图 1-9(a)所示。但当施加外电场后,原子的电子云层相对于原子核有小尺度的位移,从整体上来看,正负电荷的中心形成一个电偶极子,并且其方向与电场方向平行,如图 1-9(b)所示,这种现象称为电子极化(Electronic Polarisation)。电子极化是最常见的一种极化现象。

电偶极子  $p$  可以定义为一对分别带正负电量为  $q$ 、相隔距离为  $l$  的电荷,并且可以表示为  $p=ql$ 。电偶极子是有方向的,其方向为负电荷指向正电荷,如图 1-9(b)所示。在后面的讨论中我们可以看到,电偶极子的数量和强度都会影响介电常数的大小的特性。

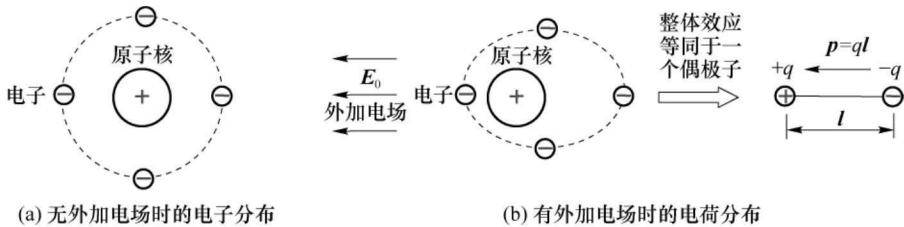


图 1-9 原子模型及原子在外加电场下的电荷分布

另外一种极化称为取向极化(Orientational Polarisation)或偶极子极化(Dipole Polarisation)。分子极化主要存在于由极化分子组成的物质当中。如水分子是由 1 个氧原子和 2 个氢原子组成。3 个分子不在同一条直线上,因而使得水分子从整体上来看如同一个偶极子,如图 1-10(a)所示。当没有外加电场时,这些极性分子呈无序分布,因而总体上对外显电中性,如图 1-10(b)所示。当施加了电场之后,这些极性分子开始在电场的作用下重新进行排列,使得其自己的偶极子方向与电场方向平行,如图 1-10(c)所示。

离子极化(Ionic Polarisation)主要存在于离子晶体中。离子晶体是由带正电的正离子和带负电的负离子交错成周期性结构组成。如图 1-11 所示,在无外加电场时,这种周期结构保持稳定与平衡的状态,使物体在整体上显现电中性。但当施