

材料的电磁基础

FUNDAMENTALS OF ELECTROMAGNETISM IN MATERIALS

● 韦 丹 著



科学出版社

www.sciencep.com

材料的电磁基础

韦 丹 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书包括绪论、电磁问题的数学基础、麦克斯韦方程组、静电与静磁问题、微磁学与磁信息存储、电流及其传输、电磁波与信息传输等内容. 书中讨论的电磁基础问题的相关科学研究领域涉及材料学、应用物理学、电子学, 相关工业领域主要有信息的存储和通讯工业、半导体电子工业、军事电子工业和能源工业.

本书可作为材料科学与工程、应用物理学、电子学专业的本科生和研究生的教材, 也可供信息的存储和通讯工业、半导体电子工业、军事电子工业和能源工业的研究人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

材料的电磁基础/韦丹 著. —北京: 科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015353-7

I. 材… II. 韦… III. 工程材料-电磁学 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005) 第 052041 号

责任编辑: 田士勇 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

原创阳光印业有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 7 月第一次印刷 印张: 12 1/2

印数: 1—2 500 字数: 235 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

自序

触动我开材料的电磁基础这门课,有两个理由:一是我在跟自己的研究生讨论问题的时候,发现他们在大一学的电磁学基本都忘掉了,很难在研究当中用得上;二是我在教本科生的固体物理课的时候,也发现同样的问题,电磁学大家都不很熟悉,麦克斯韦方程组基本不会使用.

材料科学与工程系的研究涉及的范围和领域很广,从接近自然科学的基础研究到与冶金、机械、电子等各类工业应用相关的研究都有.从自然科学的角度说,电磁力是自然界的四种基本力中非常重要的一种,既是长程力,又相当强,很多基本科学问题能归于电磁相互作用.从工科研究的角度讲,几乎所有涉及高科技的工业领域,都跟电磁力的应用有关系.因此电磁材料已经成为材料科学与工程研究中非常重要的一个类别.

费曼曾经说过,如果再过一万年,回顾人类的发展史的时候,19世纪最重要的事件,一定是麦克斯韦发现的电磁运动的基本规律.在同一时期发生的美国内战,相比之下会变成不太重要的事件.对我们中国人来说,在19世纪中期发生的鸦片战争终结了中国的古代社会,使中国进入了痛苦而又精彩的近现代150年的发展历程.这个转折对于本民族很重要,但是长期的历史意义还是比不过麦克斯韦的电磁理论.

所以,从2003年暑假开始,我就逐渐在读各种书籍,试图找到更适合材料系而不是物理系的课程讲授方法,也就是说这门课必须包含理学的知识,还得有相关的工学的解决问题的方法.从2004年寒假开始写讲义,以准备在2004年秋天开课.本书写作的前提,是假设读者是要做与材料科学,特别是与电磁材料或者信息电子工业相关的基础研究的.不过,即使读者在目前和未来不做研究,本书中有很多内容也可以作为高级科普来阅读——只要把公式跳过去就可以了.

最后,我要感谢几位学界同仁的帮助.首先要感谢北大物理系的俞允强教授,我在本科期间听过他的电动力学课程,至今仍然觉得受益匪浅.本系的周济教授对课程的名称提了很好的建议,我觉得是非常恰当的,而且回想起来美国的一些材料系是有材料的电磁基础这样一门主干课的.对这门课,本系的朱静院士也给过我很多鼓励以及帮助,她对课程的预期和规划设想,促使我更仔细地考虑课程结构以及与材料系的研究之间的衔接关系.北大物理系的刘川教授惠允我使用他做好的中文 $\text{\LaTeX}$ 的模板,这样我可以不太费力就把教材写成一本书的样子,非常省时间.在此向以上诸位表示最衷心的感谢.

韦 丹
2005年6月

目 录

自序

第一章 绪论	1
§1.1 电磁现象的起源	2
§1.2 科学与技术的关系	5
§1.3 电磁研究与各学科的关系	7
1.3.1 材料科学与工程	8
1.3.2 自然科学	8
1.3.3 其他相关工学	10
§1.4 本课程的基本内容	11
第二章 电磁问题的数学基础	14
§2.1 对称性与坐标系	14
§2.2 标量、矢量和张量	16
§2.3 梯度算符	20
§2.4 矢量与张量的积分	24
习题	27
第三章 麦克斯韦方程组	28
§3.1 国际单位制和高斯单位制	29
§3.2 真空及材料中的麦克斯韦方程组	32
§3.3 电磁场、势和能量	41
§3.4 电磁波谱——麦克斯韦彩虹	45
习题	49
第四章 静电与静磁问题	50
§4.1 电介质与介电常数	52
§4.2 静电学	54
§4.3 铁磁体	61
§4.4 静磁学	64
§4.5 静电和静磁问题的计算方法	67

习题	82
第五章 微磁学与磁信息存储	84
§5.1 磁信息存储工业	85
§5.2 微磁学	89
§5.3 磁滞回线、磁畴和磁导率的计算	97
§5.4 数据存储信道	120
§5.5 读写过程的微磁学模拟	123
习题	132
第六章 电流及其传输	133
§6.1 能源工业	134
§6.2 电感的计算	136
§6.3 输电线	143
§6.4 电话: 声波与电流	146
§6.5 集成电路中的时间延迟	148
§6.6 电视: 真空中的粒子电流	150
习题	152
第七章 电磁波与信息传输	153
§7.1 通讯与载波	154
§7.2 电磁波在大气层和地面的传播	157
§7.3 电磁波在材料中的传播	163
§7.4 波导和光纤中的电磁波	167
§7.5 天线: 电磁波的发射和接收	173
§7.6 信息工业的内在一致性	176
习题	177
参考文献	179
索引	181

第一章 绪 论

- 电磁现象的起源 (§1.1)
 - 科学与技术的关系 (§1.2)
 - 电磁研究与各学科的关系 (§1.3)
 - 本课程的基本内容 (§1.4)
-



类生存于其中的这个物质世界,之所以像我们看到的那样构成和运行,是因为有四种基本的相互作用力把基本粒子耦合成原子,原子构成宏观物质,进而组成宇宙. 这四种基本的相互作用是强相互作用 (strong interaction)、电磁相互作用 (electromagnetic interaction)、弱相互作用 (weak interaction) 和引力相互作用 (gravitational interaction). 强相互作用是在 10^{-15}m 左右的尺度起作用,对于原子核的构成起着决定作用;弱相互作用的力程在四种作用中是最短的,最早是在原子核发射出电子的 β 衰变过程中观察到的;电磁相互作用是在静止和运动的电荷之间的相互作用,它是长程力;引力相互作用是在任何具有质量的物质之间存在的相互作用,在涉及巨大质量的宇宙结构的解释中起到关键的作用,也是长程力.

电磁相互作用是相当强的,在粒子间距相同的情况下,它是强相互作用的 $1/100 \sim 1/1000$, 是弱相互作用的 1000 倍. 尤其惊人的是,两个电子之间的电磁排斥力比引力要强 4.2×10^{42} 倍,这个比例是由自然界存在的基本常数——电子电荷、电子质量、真空介电常数、引力相互作用常数——计算出来的,并没有任何可调的参数参与其中. 爱因斯坦曾经试图研究这个巨大的比例的来源,但是最终也没有获得一个解释. 这个巨大的比例,加上自然界正负电荷基本平衡的事实,也可以解释为何电磁相互作用在微观直到宏观的各个尺度上都很重要.

本书讨论的是电磁现象的自然科学基础及其在各种工业中的应用,主要围绕与材料相关的问题进行讨论,因此涉及的内容只是非常丰富的电磁现象及其应用的一小部分而已. 虽然如此,作者还是希望尽量普遍地分析和讨论这个领

域的问题. 有些相关领域的问题, 在本书中也会科普性地介绍一下, 以使读者对于电磁现象涉及的问题的广度有一个印象. 本章将从比较宏观的角度讨论电磁现象的起源、科学与技术发展的关系、姐妹学科中的相关研究问题以及本课程的基本结构.

§1.1 电磁现象的起源

自古以来, 各个民族就分别对电现象、磁现象有了一些观察和认识; 但是直到 19 世纪初, 人类还没有认知到电、磁现象之间是有关系的. 最早观察到的电现象包括摩擦起电、闪电等, 现在英文当中的 electron(电子) 一词, 就是从古希腊的 amber(琥珀) 一词衍生来的, 因为用手摩擦琥珀以后, 琥珀可以吸引稻



图 1.1 《梦溪笔谈》书页, 元大德九年 (1305 年) 刻本^[1].

草屑. 中文的“电”字, 应该是从闪电来的. 最早观察到的磁现象是发现在自然界存在一些“石头”可以吸引铁器. 在中国的战国时代, 古人称磁铁矿 Fe_3O_4 为慈石, 意思是慈爱而具有吸引力的石头. 英文当中的 magnet(铁磁体) 一词, 来源于古希腊时期在小亚细亚的一个省 Magnesia, 此地也发现了能吸引铁器的磁矿石.

1044 年, 北宋的曾公亮、丁度等修撰的《武经总要》中有应用磁石制造水浮型指南针 (compass) 的方法. 其后沈括的《梦溪笔谈》中谈到用丝悬挂或放在碗边平衡着的铁针指向是恒定的, 并观察到铁针所指不是正南而是微偏东的事实, 这是源于铁磁体和地球磁场之间的作用, 可惜他未明其理.

16 世纪末, 英国的吉尔伯特 (William Gilbert) 著有 *De Magnete* 一书, 被认为是近代电磁学的发端. 正是吉尔伯特从 amber 一词定义了 electricity 一词. 吉尔伯特通过指南针的悬挂实验, 推论地球本身一定是个大磁体, 地磁的南北极与地理南北极不重合, 但相差不远. 他确认指南针是来自中国的, 在 12~13 世纪已经在远洋海船上使用.

18 世纪中期, 富兰克林 (Benjamin Franklin) 在一个危险的实验中通过闪电获得了电流. 而且, 富兰克林发现在摩擦起电以后, 两个带电物体之间可以相吸也可以相斥, 因此他认为一定存在两种电荷. 1752 年, 富兰克林随机地定义了“+”或者“-”电荷的符号, 这就是为什么我们现在总是认为电子电荷是负的而质子电荷是正的, 实际上这个“正负”是可以互换的, 只是年深月久所有人都已经习惯了这个定义.

1800 年, 意大利物理学家伏打 (Alessandro G A A Volta) 发明了电池, 他用一片片潮湿的纸板隔开一对对锌版和铜版, 第一次实现了稳定电流. 后人为了纪念他的贡献, 将电动势和电势的单位命名为伏 [特] (volt, V). 在 1820 年, 奥斯特 (Hans Christian Oersted) 在给他的物理学生上课并做演示实验的时候, 发现电线中流过的电流可以改变旁边的指南针的方向, 从此电磁现象才联系在一起. 后来人们把高斯制中磁场的单位取作奥 [斯特] (oersted, Oe) 以纪念他. 电磁学这门学科通过很多学者的努力 —— 特别是通过法拉第 (Michael Faraday) 的一系列精彩的实验 —— 最后于 1864 年在麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 的具有优美数学形式的方程组中成熟.



图 1.2 伏打在演示电堆式的电池^[1]

电磁现象是由带电荷的基本粒子之间的相互作用引起的. 这得在 20 世纪物理学经历了相对论、量子物理、粒子物理和高能物理的大发展以后, 才能理解得更清楚. 电荷是基本粒子的内禀性质, 实际上讨论一个基本粒子的电荷, 比讨论它的质量更精确. 这是因为根据相对论的质能原理, 一个粒子的质量在不

同样的环境中是可以不一样的。例如核子的平均质量在中等原子量的元素中是最大的,这也是在不违反能量守恒定律的前提下,裂变核反应和聚变核反应能进行的基本原因。基本粒子的电荷却是非常稳定的,自然界中虽然不存在严格的质量守恒,却存在严格的电荷守恒 (conservation of charge)。电荷守恒的意思是,在任何物理过程中正负电荷之和是个守恒量,任何相互作用都不会改变这个守恒量。这是富兰克林最早提出的假设,后来经过无数实验的验证而无误。

电荷不仅是守恒的,而且是量子化的。一般来说,电荷量子 (elementary charge) 就等于质子或电子电荷的绝对值 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 其中 e 是自然界中的一个重要常数。如果分解到核子内部,那么一个质子或者一个中子内部有三个夸克 (quarks), 夸克的电荷是 $e/3$ 的整数倍。自然界中一共存在六种夸克,其中 u 夸克 (up quark)、 c 夸克 (charm quark)、 t 夸克 (top quark) 的电荷都是 $2e/3$, d 夸克 (down quark)、 s 夸克 (strange quark)、 b 夸克 (bottom quark) 的电荷都是 $-e/3$ 。物质世界中的所有基本粒子可以分为强子 (hadrons)、轻子 (leptons) 和中间子 (messenger particles) 三类。强子主要指质子和中子这样的构成原子核的粒子,它们是由夸克组成的。质子是 (uud) 三夸克组合,所以质子电荷是 e ; 中子是 (udd) 三夸克组合,所以中子电荷是 0。轻子主要包含电子和中微子,电子电荷为 $-e$, 中微子电荷为 0。中间子是传递相互作用的粒子。传递电磁相互作用的光子 (photon) 的电荷是 0, 传递强相互作用的中间子胶子 (gluon) 电荷是 0, 传递弱相互作用的中间子 Z 粒子的电荷也是 0, 但 W 粒子的电荷为 $\pm e$ 。所有这些基本粒子组成的微观物体或者宏观物体,其总电荷在任何物理过程中都是守恒的。在宏观物体中往往正负电荷互相抵消,呈现为中性,此时电相互作用力很小,不容易为人察觉。这也是为什么在 19 世纪电磁相互作用的研究才最终成熟,这要比在 17 世纪就由牛顿研究清楚的引力相互作用要晚的多。

电相互作用力的精确规律是在 1785 年由法国的库仑 (Charles Augustin Coulomb) 发现的,为了纪念他的贡献,电荷的单位就叫库 [仑] (coulomb, C)。电相互作用是直接和电荷联系在一起的,因为在任何两个带电荷的粒子之间都有电相互作用力——即库仑力或静电力。在 1820 年左右,奥斯特发现的电流对磁针的作用力和安培 (André Marie Ampère) 精确测量的两根带电流的导线之间的作用力,显示了磁相互作用力与运动的电荷有关。但是,对磁性的更深入的理解要在现代原理建立以后才确立。

原子是物质构成的基石,原子论的猜想自公元前 5 世纪在古希腊成熟,经 18 世纪化学家通过精确的实验开始排列自然界存在的原子的元素周期表,到 19 世纪化学家和物理学家发现了原子光谱,最后到 20 世纪物理学家最终

用量子理论解释了原子的结构,这期间经历了漫长的过程.在研究磁性的起源的时候,量子力学的几位创始人发现基本粒子的自旋是原子磁矩的主要来源之一,过渡金属铁磁体的磁矩几乎全部来自电子自旋.由于强相互作用的规律没有完全为人类所了解,由夸克组成的质子和中子磁矩的来源也不是很清楚,但是至少知道原子核磁矩是与核子的总自旋成正比的.因此,可以说基本粒子的内禀性质电荷和自旋是电磁相互作用的本质来源.

§1.2 科学与技术的关系

伴随着对电磁相互作用和量子物理规律的深入了解和把握,人类在此基础上发展了大量的利用电磁力的技术,并开启了一个电磁时代.如果说现代社会在某种程度上可以称为信息时代的话,那也是从19世纪开始的电磁时代的继续发展和延续.表1.1中列出了部分18世纪到20世纪中叶的物理学原理发现和技术进步的关系.

表 1.1 物理学原理的发现和技术进展的关系 [3,26]

电磁学和量子物理基本原理的发现	有重大后续技术应用的科学发现和技术发明
1752, 富兰克林: 定义正负电荷	1800, 伏打: 电池, 第一次实现稳定电流
1785, 库仑: 电荷之间的平方反比力	1807, 戴维: 电解法, 分离出大量纯元素
1819, 奥斯特: 电流对磁体的作用力	1821, 法拉第: 电动机
1820, 安培: 电流之间的力的规律	1831, 法拉第: 电感, 发电机; 亨利: 变压器
1826, 欧姆: 电压与电流之间的线性关系	1833, 高斯与韦伯: 有线电报机原型
1857, 麦克斯韦: 气体分子运动论	1837, 法拉第: 电容
1864, 麦克斯韦: 电动力学	
1869, 门捷列夫: 元素周期表	1873, Guthrie: 白热金属发射电子的效应
1876, 维恩: 热—辐射能谱规律	1876, 贝尔: 电话机
1887, 赫兹: 电磁波存在的实验验证	1887, 赫兹: 电磁波的发射和接收
1887, 赫兹: 光电子电流	1895, 伦琴: X 射线
1897, 汤姆孙: 电子 e/m 比的测量	1897, 布劳恩 (Braun): 阴极射线管
1900, 普朗克: 光量子理论	1897, 马可尼 (Marconi): 越洋无线电报
1904, 爱因斯坦: 光电效应方程	1904, 弗莱明 (Fleming): 真空二极管
1910, 密立根: 电子电荷的测量	1906, 德福雷斯特 (de Forest): 真空三极管
1911, 卢瑟福: 原子核的 α 散射	1906, 费森登 (Fessenden): 无线电广播
1912, 布拉格: X 射线衍射	1928, 范思沃斯 (Farnsworth): 全电子电视机
1913, 玻尔: 原子理论	1936, Clecton 与 Williams: 微波频谱分析
1924, 德布罗意: 物质波	1936, 沃森—瓦特 (Watson-Watt): 雷达
1925, 泡利: 不相容原理	1938, Hansen: 波导
1925, Uhlenbeck 与 Goudsmit: 自旋	1948, 巴丁与布喇顿: 固体三极管
1926, 海森堡与薛定谔: 量子力学	1949, 肖克利: p-n 结二极管
1926, 费米与狄拉克: 费米子统计	1950, Purcell 与布洛赫: 核磁共振
1927, Davisson 与 Thomson: 电子衍射	1934, Knoll 与 Ruska: 电子显微镜
1927, 海森堡: 测不准原理	1957, 德州仪器公司集成电路、IBM 计算机硬盘

自伽利略和牛顿以来,近现代物理学已经有 350 多年的历史,其内容是非常庞杂的,仅就表 1.1 中列出的电磁学和量子物理的基本规律,就已经很是可观了. 自然科学的研究目的是找到能描述人类积累知识的规律. 可是,这个寻找的过程是十分复杂的,费曼 (Richard P Feynman) 曾经很精彩地分析了这个复杂的过程: ①不是所有基本规律都已经被人类了解,比如强相互作用的规律就还没有完全研究清楚; ②任何科学规律的正确表达,依赖于数学,而数学是非常需要抽象思维的; ③为了进一步发现新的科学规律,一个人必须进行长时间的学习,因为前人积累的学问越来越多; ④最重要的,目前发现的所有自然规律,只是物质世界的真理的近似. 这是一种信念,因为就是像麦克斯韦的电磁理论这么完美的物理学规律,也有一些不能解释的问题,比如随距离 $1/r$ 下降的电势在三维全空间的积分是无穷大. 这个无穷大是可以通过重正化 (renormalization) 的办法来补救的,也就是说,只有这个无穷大积分的变化才能被实验验证 —— 我们都知道科学的原则是以实验验证为准的.

理论和实验是科学研究相辅相成的两种基本方法,这在表 1.1 的科学进展中也体现得很清楚. 理论方法的源头还是来自古希腊,柏拉图曾经有过非常好的关于理论的论述. 他说关于几何的描述 —— 比方举例说正方形,只有在理论上是完美的,真的用实验去画一个正方形,永远不可能达到几何原理要求的那种完美,比如线不直不是无穷细,角度不是精确的 90° 等等. 但是,这是数学,数学是不依赖于实验验证的. 包括物理学在内的自然科学,却是要用实验来检验的,在这个意义上说,物理学是实验科学,材料学和电子学等工学更是实验科学. 那么理论的意义何在? 费曼认为,理论实际上是一种想象,它能从过去有的实验基础出发,通过推理、想象和猜测,得到关于自然的新的规律. 实验物理则需要在理论框架的之内和之外验证、想象、推理和猜测. 理论和实验互相推动,才有了今日的科学成就.

在物理学的发展历史中,最开始是由古希腊自然哲学衍生来的对空间、时间和世界基本构成的研究,这在 17 世纪牛顿的力学中第一次达到了辉煌的程度,因为人类能够理解我们存在的宇宙的结构了. 19 世纪成熟的电磁学,是经典物理 (classical physics) 的第二次伟大成就. 电磁相互作用是物质构成的基础,原因在于质子和电子这两个粒子既带电荷,又具有 $1/2$ 的自旋,都是尺度极小、质量极小的费米子,它们之间的相互作用正是典型的电磁相互作用. 根据图 1.3 中光谱仪获得的大量谱线,在 20 世纪通过电磁学与量子物理 (quantum physics) 的结合,才能解释原子结构和化学键形成的基本原理,进而解释物质结构,这在表 1.1 中也能看得很清楚. 另外,电磁波还是信息传播的主要途径之一,从牛顿发现可见光的七色光谱,到麦克斯韦建立电磁理论以

后,终于归到一个频率从 0 到无穷大的电磁波谱中,这个电磁波谱被称为麦克斯韦彩虹 (Maxwell rainbow), 光学和电磁学的原理达到了统一. 在研究微观的原子、分子结构时,在考虑原子分子与电磁波的相互作用时,量子物理是必须使用的. 不过,本书中讨论的绝大部分现象,用经典物理就可以了,因为在与电磁相关的绝大多数工业应用中,材料的尺度和质量都不是微观的 (microscopic, 纳米以下的尺度), 一般是介观的 (mesoscopic, 纳米到微米, 也称纳米尺度) 或宏观的 (macroscopic, 几十微米、毫米到米的尺度), 此时量子物理是用不上的.

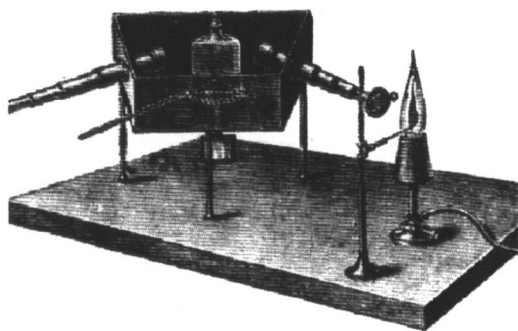


图 1.3 基尔霍夫 (Kirchhoff) 和本生 (Bunsen) 在 19 世纪后期使用的光谱仪^[12]

表 1.1 中所列的技术发明与科学原理的发现一样, 同样体现了人类智力的极限. 自然科学的起源是出于对自然的好奇, 想要知道自然界为什么是这样的, 怎么样组成我们所知的物质世界. 工程和技术研究则关心某项研究和发明对人类有什么用, 对人类的这个用处也许开始的时候只为发明者和极少数人所认识, 比如说电机、电话、电视、计算机、网络; 但是这些技术最后证明了他们能普遍为全世界各民族接受, 并能极大地改善人类的生活. 科学和技术, 就是这样从先知的好奇、天才的发明, 最后变成了我们日常生活的现实. 另外, 历史上也有几位工程师的工作对基础研究有非凡的贡献, 比如法拉第之于麦克斯韦的电磁理论, 卡诺之于热力学第二定律, 发明信息论的 Shannon 对于随机理论、噪音理论和概率论. 科学与工程研究之间, 确实有相辅相成的关系.

§1.3 电磁研究与各学科的关系

电磁相互作用既然是自然界里非常重要而且普遍存在的一种相互作用, 那么它必然与很多学科都有联系. 本节将讨论与电磁相关的研究在各个门类的学科当中的应用.

1.3.1 材料科学与工程

材料科学与工程 (materials science and engineering) 是工学里比较特殊的学科,因为它与理学中的物理、化学、生物、地质学都有密切的关系,又与工学中的冶金、机械、航天、电子学很有关系.材料学的前身是矿冶,在 20 世纪 60 年代首先因为航天的需求,要做很多特殊材料的基础研究,以实现极端的材料性质,这时候美国很多冶金系就改名为材料科学与工程系.这个阶段,金属材料、无机非金属材料,与化工结合紧密的高分子材料,还有复合材料等学科在材料学内部生长起来.后来,随着美国的信息电子工业的发展,各个大学的材料系都有了电磁材料方面的研究,比较极端的——像斯坦福大学材料系,因为临近信息电子工业的大本营硅谷,全系做的研究大都是跟电磁材料有关的.

材料科学与工程研究的四个环节制备、结构与成分、性能、应用,都分别与电磁研究有着或多或少的关联.从制备 (synthesis processing) 来说,最早使用电进行材料制备的是 1807 年化学家戴维 (Humphry Davy) 开创的电解法,这是后来一切电化学制备方法的基础.最近几十年,使用离子束、电子束的薄膜制备仪器,基本都是使用真空电流的方法进行控制的.电化学法和真空薄膜制备法能达到传统的烧结、冶炼方法所难以控制的材料的尺寸精度,特别适用于电子工业使用的材料.另外,在超大规模集成电路的制备过程中,使用的光学刻蚀和离子刻蚀也都是与电磁波和真空电子电流的控制有关的.从结构 (structure) 和成分 (composition) 研究来说,最重要的三种结构研究方法——光学显微镜法、X 射线衍射法和电子衍射法,都是在控制电磁波或者控制真空电子电流的基础上实现的.而如果考虑得深一些,到了分子、原子或电子的尺度,其成分还必须将电磁学与量子物理结合起来研究.从性能 (performance) 来说,材料学主要研究电磁声光热等几种性能,实际上电磁光三种性能都与电磁相互作用直接相关.另外,还有研究交叉性能的,比如微电和微磁学.从应用的角度来说,机械和电子是工业“硬件”生产的两大主体领域,其中信息电子工业领域中的几乎所有的材料应用都与电磁研究有关系.在机械学中,目前推进的机电一体化研究,也是要大量用到电气和电子工业中的成果的.

1.3.2 自然科学

物理学 (physics) 在自然科学中是最基础的部分,它集成了古希腊自然哲学的成果,可以说提供了一种定量化的比较精确的“世界观”.电磁相互作用既然是物质世界的四种相互作用之一,在物理学研究中的地位不言自明.实际

上, 在高能物理理论中, 处于核心地位的场论, 所谓“规范场”的概念就是直接来自电动力学中的磁场的矢量势 $\mathbf{A}$, 只不过电磁学中的矢量势是可对易的; 而高能物理中的矢量势还可能是不可对易的张量, 从对称性上属于非阿贝尔群. 在高能物理实验中, 用电磁场加速带电粒子是最基本的实验方法. 在凝聚态物理中, 大量的研究都跟固体的电磁性质有关, 凝聚态物理最核心理论之一能带论就是研究自旋 $1/2$ 的费密子电子在周期电势中的能量谱. 在光学中, 最近的强场光学研究实际上跟电磁波脉冲的控制有关, 也跟材料的非线性光学性质有关.

化学 (chemistry) 与物理学有长期共同发展、互相促进的历史. 1800 年物理学家伏打发明了电池, 第一次实现了稳定电流. 同年化学家戴维从理论上解释了电解过程, 并于 8 年以后用电化学法分离出钾、钠、钙、锶、钡、镁这些纯元素. 1859 年物理学家基尔霍夫和化学家本生合作, 开创了光谱学. 电解法和光谱学在 1869 年门捷列夫总结出的元素周期表过程中起到重要的作用. 反过来, 元素周期表的确立对物理学的发展促进是巨大的, 1913 年玻尔原子模型的建立, 如果没有气体光谱学和元素周期表是不可想象的. 从化学理论来说, 目前量子化学是化学的主要理论, 而量子化学就是吸收了物理学中对电磁学和量子物理结合处理的方法, 解释了化学键的形成. 另外, 物理学的基本方法, 比如原子分子光谱法、核磁共振法, 目前都是化学家确定分子结构的主要方法, 这些方法中都需要进行大量电磁波的控制和检测, 还有对于原子磁矩和核磁矩的理解.

现代生物学 (biology) 开端于 DNA 结构的测定, 这是一个生物、物理、化学多学科综合的研究成果. DNA 结构是用 X 射线衍射法确定的, 同时对于氢键的理解也是这个结构最终被确定的关键. 由此衍生出的生物物理学, 用物理规律来从微观和介观的层次认识生物现象, 其中大量借用了 X 射线衍射法、电子衍射法、核磁共振法和分子光谱法等物理和化学的研究方法, 当然生物学家的理解对研究是至关重要的. 由于电磁波对于信息传输的重要性, 所有与神经、视觉有关的生物学研究都免不了使用电磁学的方法, 因为可见光就是电磁波, 而神经很像具有局部电容和电阻的传输线或者光纤, 这些都是还在研究的领域, 很多问题的最终解决, 离不开生物电流和生物电磁波的研究.

天文学 (astronomy) 的研究起源于星体观测, 恒星和行星发射到地球上的光是这种观测得以实现的根本. 天文学实际上比物理学古老, 近代物理学的开端牛顿力学就是脱胎于天文观测的. 现代天文学中兴起了一个新的分支, 对宇宙进行“全电磁波谱”的观测, 按波段不同分别称为射电天文学、微波天文学、红外天文学、X 射线天文学等, 而不仅仅局限于可见光的天文观测. 最近

流行的 γ 射线爆研究、中子星研究、黑洞研究,全部都依赖于宇宙间各种电磁波谱的观测.

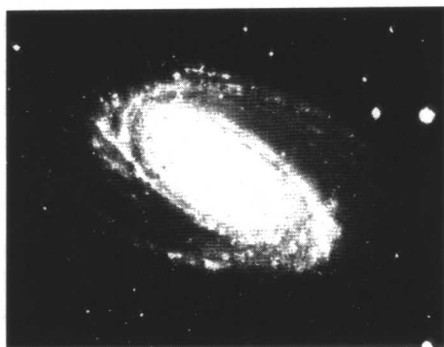


图 1.4 宇宙星系^[1]

地质学 (geology) 的研究主题与力学关系更大,与电磁相互作用并无太大的关系——除了还没理解清楚的地核运动以外. 不过,在地质学中,有很多地球物理的勘探方法是要使用物质的电磁性质的. 比如,电法探测可以通过大地上两点之间的电流测量,分析当地电阻率的高低,从而分辨出有无特殊的矿藏.

1.3.3 其他相关工学

电工 (electrician, 也称电气、电机) 是最早脱胎于电磁学的工业领域. 实际上它的创始人法拉第既是一个物理学家,也是一个伟大的电工程师. 电工的研究分为电力生产和发电设备制造两个部分,它们都和电磁领域的研究有密切的关系. 实际上工程电磁学中的一个重要部分就是输电线和电网的研究,后来发展出来的电话、光纤、电视光缆等有线信息传输方式,都是脱胎于输电线的. 电机当中大量使用永磁体,这在现代的机械工业中也是使用广泛的. 现代的能源工业的范围更广泛,包括火力发电、水力发电、核能发电、太阳能发电、化学电池等各种方法,但是这些一次能源最终总要转化成电能这种二次能源,因为电力的传输是最方便的,而且网络化,达到各个应用的领域. 19 世纪的电工学是电磁基础研究第一次大规模的工业应用,它改变了人类的生活,这么说也不为过.

电子工程与计算机科学 (electrical engineering and computer science, EECS) 是以电子运动和电磁波的研究和应用为核心发展起来的,它是现代信息工业的基础. 电子在真空、气体、液体、固体和等离子中运动产生很多物理现象,电磁波在真空、气体、液体、固体和等离子体中传播发生很多物理效应,以及电子与电磁波的相互作用的物理规律是电子学基础研究的基本内容,

这显然与电磁相互作用直接相关,只是电子学的研究有明确的应用目的.实际上,这与电子和磁材料的研究领域是有所重合的,只是材料学还要重视制备、结构、性能和应用的综合研究.电子学已经是现代工学的基础,因为它的应用简直是无处不在的,但其最重要的应用在于信息的采集、传输、存储、处理和再现,这些都离不开的电磁波的发射、传播和接受,以及电流的控制.早期计算机(1946~1959年)是用阴极射线电子管、或用磁鼓和磁芯做为存储器.晶体管计算机中(1959~1964)的主存采用磁芯存储器,外存开始使用计算机硬盘做.1964年开始,集成电路计算机开始发展,半导体存储器逐渐取代了磁芯存储器的地位,硬盘则成为了不可或缺的外存,因为程序越来越多而且越来越需要大的存储容量.可见计算机硬件技术与电磁方面的研究联系是及其紧密的.

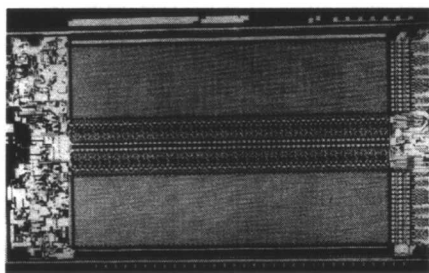


图 1.5 动态随机存储器 (DRAM)^[14]

航空航天 (aviation and aerospace) 领域是一个国家综合国力的体现. 航空和航天器本身是个综合学科的成果, 机械、力学、电子和计算机技术都在其中大量使用. 其中首先使用电磁技术的领域, 应该是航空器的定位技术. 在二次世界大战中, 英国人 Watson-Watt 发明了雷达, 这使地面能测知航空器的位置, 从而予以防范和打击. 1958 年, 美国继苏联之后发射人造地球卫星, 但是美国的卫星是一颗通讯卫星“斯科尔”, 这开始了卫星通讯这个领域. 目前卫星通讯已经是洲际信息通讯的稳定和可靠的手段. 这也可以归到电子学的领域, 但是确实有它的特殊性, 因为电子设备在外太空没有大气层的保护, 要受到宇宙高能粒子的辐照, 这会产生很多新的问题.

§1.4 本课程的基本内容

由前面几节讨论, 我们知道电磁相互作用的基础研究及其应用的领域是及其广泛的. 一本书无法将这么多的科学研究和应用面面俱到, 因为这涉及很多一级学科和专门的学问. 但是, 我们可以围绕材料来讲述电磁相互作用, 同时