

Fundamentals of Electric, Magnetic and Optic
Materials and Devices

材料的电磁光基础

(第二版)

韦 丹◎著

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$



科学出版社

www.sciencep.com

材料的电磁光基础

Fundamentals of Electric, Magnetic and
Optic Materials and Devices

第二版

韦 丹 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以麦克斯韦方程组为核心构架,讨论了信息工业的三大要素——存储、传输和输入输出系统的发展历史,以及这些系统中与电磁光材料和器件相关的基本理论.涉及的重要系统包括录音和录像磁带、计算机硬盘、传输线、电路中的无源器件、电话、无线通信、天线、波导、光纤、电视和电脑屏幕、复印、打印、扫描、数码照相、太阳能电池等.本书的目的在于引导读者熟悉信息工业的核心领域,并且能从材料的基本电磁光性能出发来分析问题.

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

图书在版编目(CIP)数据

材料的电磁光基础=Fundamentals of Electric, Magnetic and Optic Materials and Devices/韦丹著. —2版. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-022979-3

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(2008) 第 140784 号

责任编辑: 吴凡洁 / 责任校对: 李奕莹
责任印制: 刘士平 / 封面设计: 无极书装

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>

新 蕾 印 刷 厂 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)

2009年1月第 二 版 印张: 21 1/4

2009年1月第三次印刷 字数: 413 000

印数: 4 001-7 500

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新蕾〉)

第二版前言

《材料的电磁基础》的第一版出版后, 作者在教学中就发现此书的构架还有许多问题. 恰巧在 2007 年春, 作者刚刚修改完《固体物理》著作的英文版, 反过来思考了一下《材料的电磁基础》与基础物理核心课程和信息工业要素的关系. 信息处理系统中的半导体电子器件的基本原理已在固体物理中讨论过了, 那么其余的三个要素——信息存储、传输和输入输出工业系统就应该在这门课程中讨论.

考虑到第一版《材料的电磁基础》原有的课程结构, 本书首先加上了第八章, 以专门讨论信息的输入输出系统中的主要材料和系统原理. 此后, 对原先的所有章节也都进行了修改, 充实了内容. 例如, 在第七章中, 初步介绍了信息理论, 更详细地探讨了光纤中电磁波传播的问题, 因为这是网络系统中最重要硬件材料; 在第六章中, 加入网络理论和电话系统简介; 在第五章中, 介绍了光存储和半导体存储的起源, 详细分析了磁信息存储系统的演进过程; 在第四章中, 把静电学和静磁学的解析解与数值解分开, 使得结构更加清晰; 在第二章中, 增加了微分方程的简述, 便于读者参考.

考虑到上述内容的大幅度扩充, 因此本书的书名以《材料的电磁光基础》为宜, 这与美国各大学材料系的研究生基础课 “Electrical, Optical and Magnetic Devices” 在课程宗旨上是一致的. 不过本书的内容广度应该超过美国大学的对应课程. 今后, 还应该向国内外同行学习, 实现每年的内容更新, 使读者能不断接触最前沿的内容.

国内的材料系多半是由冶金系演变而来的, 因此, 以前没有普遍开设固体物理与材料的电磁光基础这两门研究生课, 但这两门课很早就分别在美国的冶金系或材料科学与工程系中开设. 材料的电磁光基础与固体物理都是材料科学与工程专业中电类材料的主要基础课. 美国大学材料系中的研究生固体物理课程往往叫做 “Electrical, Optical and Magnetic Materials”, 与电磁光器件的课程名字非常容易混淆, 好在也能一目了然两门课程之间的联系.

我在多年的研究中认识到, 几乎所有信息工业的核心理论都与麦克斯韦方程组有关系. 即使在不同的工业中会用到其他各种各样的理论和实验, 但其他的知识必然得与麦克斯韦方程组结合, 才能解释各种现象. 所以, 本书是

以麦克斯韦方程组为核心构架, 试图分析信息存储、传输、输入输出系统中的材料、设计和核心理论. 我国在信息电子工业的核心研发领域一直是有所欠缺的, 本书的目的在于引导学生熟悉信息工业的核心领域, 并且能从材料的基本电磁光性能出发来分析问题. 当然, 如果学生再能学习相应的材料制备、结构和性能分析的课程就更好了.

最后, 在此感谢清华大学材料系的同学们, 他们对新知的追求永远是我工作的动力.

韦 丹

2008 年 1 月

第一版前言

触动我开这门“材料的电磁基础”的课,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;另外,我在教本科生的“固体物理”的时候,也发现同样的问题,电磁学大家都很不熟悉,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,电磁力是自然界中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上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,也得有相关的工学的解决问题的方法.从2004年寒假开始写成讲义,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——只要把公式跳过去了就可以了.

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,至今仍然觉得获益匪浅.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让我使用他做好的中文 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. 在此一并表示最衷心的感谢.

韦 丹

2005 年 6 月

目 录

第二版前言

第一版前言

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	8
1.3.1 材料科学与工程	8
1.3.2 自然科学	9
1.3.3 其他相关工学	11
1.4 本课程的基本内容	12
本章总结	13
参考文献	14
第二章 电磁问题的数学基础	15
2.1 对称性与坐标系	15
2.2 标量、矢量和张量	17
2.3 梯度算符	22
2.4 微分方程	25
2.5 矢量与张量的积分	29
本章总结	32
参考文献	33
本章习题	33
第三章 麦克斯韦方程组	34
3.1 国际单位制和高斯单位制	36
3.2 真空及材料中的麦克斯韦方程组	38
3.3 电磁场、势和能量	48
3.4 电磁波谱——麦克斯韦彩虹	52
本章总结	57
参考文献	57

本章习题	58
第四章 静电与静磁问题	59
4.1 电介质与介电常数	60
4.2 静电学	63
4.2.1 退极化矩阵法	65
4.2.2 微分方程与边值问题	68
4.3 铁磁体	71
4.4 静磁学	74
4.4.1 退磁矩阵法	74
4.4.2 微分方程与边值问题	76
4.5 静电和静磁问题的计算方法	78
4.5.1 解析计算方法	79
4.5.2 数值计算方法	84
本章总结	94
参考文献	95
本章习题	95
第五章 信息存储与微磁学	97
5.1 电子信息存储的基本原理	98
5.1.1 磁存储的起源	99
5.1.2 光存储的起源	101
5.1.3 半导体存储的起源	103
5.2 磁信息存储工业	105
5.2.1 声音存储: 录音机	106
5.2.2 图像记录: 录像机	108
5.2.3 数据记录: 硬盘	112
5.2.4 磁记录技术的进步	115
5.3 微磁学与磁信息存储理论	129
5.3.1 微磁学的起源	131
5.3.2 磁滞回线、磁畴和磁导率的计算	139
5.3.3 读写过程的微磁学模拟	162
本章总结	171
参考文献	171
本章习题	173

第六章 电流及其传输	174
6.1 稳定电流基础	175
6.1.1 电感的计算	177
6.1.2 传输线	184
6.1.3 网络	188
6.2 电话通信	192
6.2.1 电话接收机	194
6.2.2 程控交换机	196
6.2.3 电话网	198
6.3 电流在其他电子系统中的传输	200
6.3.1 集成电路中的时间延迟	200
6.3.2 电视：真空中的粒子电流	203
本章总结	205
参考文献	206
本章习题	207
第七章 电磁波与信息传输	209
7.1 电磁波基础	210
7.1.1 通信与载波	212
7.1.2 电磁波在大气层和地面的传播	219
7.1.3 电磁波在材料中的传播	227
7.2 无线通信	236
7.2.1 天线：电磁波的发射与接收	237
7.2.2 波导	243
7.3 光纤通信和网络	252
7.3.1 光纤	255
7.3.2 激光器：光纤的光源	261
本章总结	268
参考文献	269
本章习题	269
第八章 信息的输入输出	271
8.1 显示材料	271
8.1.1 白热光	272
8.1.2 阴极射线荧光	274

8.1.3 光致发光	279
8.1.4 电致发光	284
8.1.5 等离子体显示	289
8.1.6 调制光 —— 液晶显示	291
8.2 光电转换器件	294
8.2.1 光导材料的应用	295
8.2.2 光电晶体管	301
8.2.3 光伏器件	304
8.3 信息工业的内在一致性	306
本章总结	307
参考文献	309
本章习题	309
索引	311

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、粒子带电子电荷的情况下,它只比强相互作用弱 100~1000 倍,但比弱相互作用要强 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,这个比例是自然界存在的基本常数——电子电荷 (e)、电子质量 (m_e)、真空介电常数 (ϵ_0)、引力相互作用常数 (G) 之间的关系,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合理的解释. 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, 以使读者对电磁现象涉及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, 琥珀可以吸引稻草屑。中文的“电”这个字, 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, 来源于古希腊本土东北部的一个省 Magnesia, 此地也发现了能吸引铁器的磁矿石 (magnetite)。

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》中记述了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 (见图 1.1), 这是源于铁磁体和地球磁场之间的作用, 可惜他未明其理。

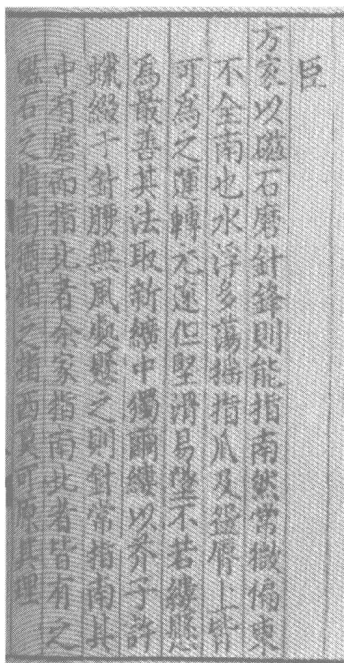


图 1.1 《梦溪笔谈》书页, 元大德九年 (1305 年) 刻本 (《中国大百科全书》编辑组, 1998a)

16 世纪末, 英国的吉尔伯特 (Sir 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“-”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 (见图 1.2)。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) 在给他的物理学生准备做演示实验的时候,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。

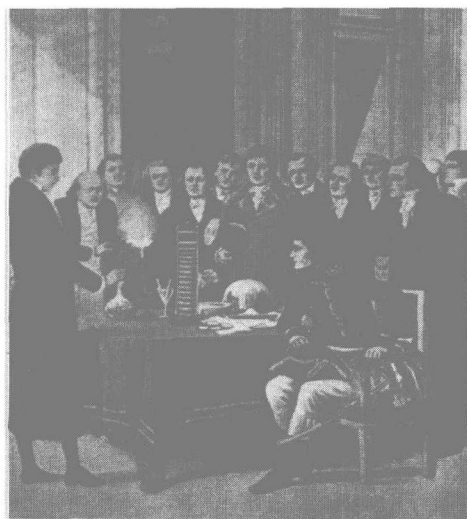


图 1.2 伏打在演示电堆式的电池 (《中国大百科全书》编辑组, 1998a)

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的环境中可以是不一样的. 例如, 核子的平均质量在中等原子量的元素中是最小的, 这也是在不违反能量守恒定律的前提下, 裂变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 (proton) 或者一个中子 (neutron) 内部有三个夸克 (quark), 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 (hadron)、轻子 (lepton) 和中间子 (messenger particle) 三类. 强子主要是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 (neutrino), 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, 不容易被人察觉. 这也是直到 19 世纪时电磁相互作用的研究才最终成熟的原因, 这要比在 17 世纪就由牛顿研究清楚的引力相互作用要晚得多.

电相互作用力的精确规律是在 1785 年由法国人库仑 (Charles Augustin Coulomb) 发现的, 为了纪念他的贡献, 电荷的单位就叫做库 [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或者物体之间都有电相互作用力, 即库仑力 (Coulomb force) 或静电力

(electrostatic force). 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 Ampere) 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.

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化学实验逐渐发现了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, 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被人类所了解, 原子核磁矩的来源也不是很清楚, 但是至少知道原子核磁矩是与质子自旋和中子自旋成正比的. 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.

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, 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. 例如, 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整化 (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。

表 1.1 物理学原理的发现和技术进展的关系

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: 电子荷质比的测量	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, 劳厄与布拉格: X 射线衍射	1928, 范思沃斯 (Farnsworth): 全电子电视机
1913, 玻尔: 原子模型	1934, Knoll 与 Ruska: 电子显微镜
1924, 德布罗意: 物质波	1936, Cleeton 与 Williams: 微波频谱分析
1925, 泡利: 不相容原理	1936, 沃森-瓦特 (Watson-Watt): 雷达
1925, 乌伦贝克等: 自旋	1938, Hansen: 微波波导
1926, 海森堡与薛定谔: 量子力学	1948, 巴丁与布喇顿: 固体三极管
1926, 费米与狄拉克: 费米子统计	1949, 肖克莱: pn 结二极管
1927, 戴维孙与汤姆孙等: 电子衍射	1950, 布洛赫与珀塞尔: 核磁共振
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

引自: Spangenberg, 1957.

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. 科学理论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, 他关于几何的描述 —— 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, 如线不直不是无穷细, 角度不是精确的 90° 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