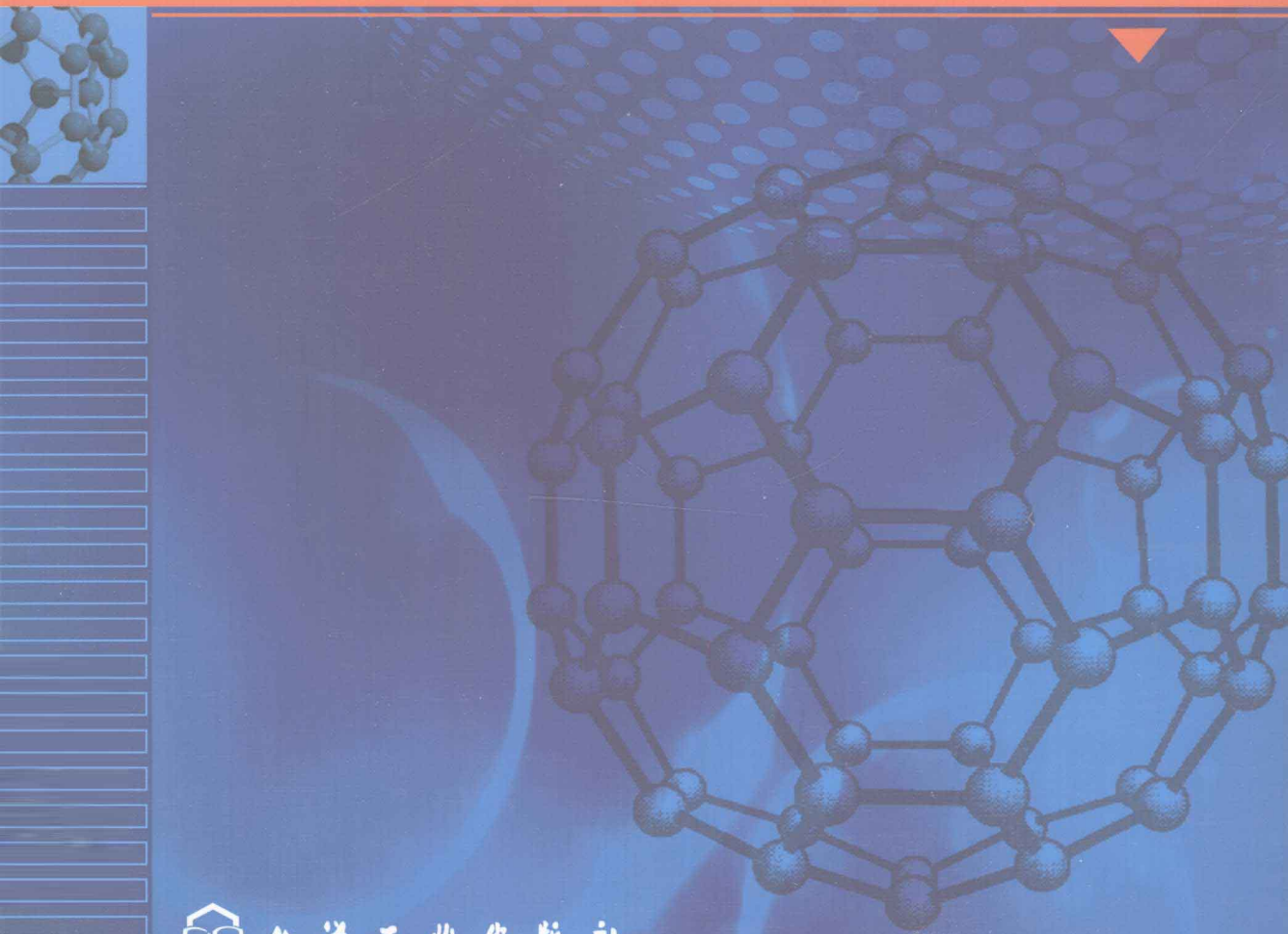




真空科学技术丛书

# 纳米科技基础

薛增泉 编著



化学工业出版社



真空科学技术丛书

# 纳米科技基础

薛增泉 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

20 世纪微电子的成就推动人类社会进入了信息时代，微电子小型化的发展趋势促使纳米科技崛起，成为多学科交叉研究的新领域。在纳米科技中最重要的学科是电子学，电子学至今经历了真空电子学、固体电子学，纳电子学三个阶段。

本书以真空科技为出发点，涉及电子学发展的过程，讨论纳米科技的基础问题。包括纳米科技的基础理论、纳米材料、纳米材料的制备、测量表征、纳米传感器、纳米功能器件、纳电子器件、关联电子学和智能电子学等内容。

本书适用于从事真空科技、纳米科技有关工作的本科生、研究生和科技工作者参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

纳米科技基础/薛增泉编著. —北京：化学工业出版社，2012.3  
真空科学技术丛书  
ISBN 978-7-122-11123-4  
I. 纳… II. 薛… III. 纳米技术 IV. TB303  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 072570 号

---

责任编辑：戴燕红  
责任校对：周梦华

文字编辑：陈 雨  
装帧设计：史利平

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）  
印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订：三河市万龙印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 401 千字 2012 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：68.00 元

版权所有 违者必究

## 《真空科学技术丛书》编写人员名单

主 编 达道安

副 主 编 张伟文 邱家稳 杨乃恒

参编人员 (按姓氏笔画排序) 王荣宗、王欲知、王得喜、王敬宜、达道安、  
刘玉魁、刘喜海、杨乃恒、杨亚天、李云奇、  
李得天、邱家稳、邹惠芬、张伟文、张涤新、  
张景钦、陆 峰、范垂祯、郑显峰、查良镇、  
徐成海、谈治信、崔遂先、薛大同、薛增泉、

技术编辑 谈治信

编辑助理 权素君 曹艳秋

# 丛书序

真空科学技术是现代科学技术中应用最为广泛的高技术之一。制备超纯材料需要超高真空技术，太阳能薄膜电池及芯片制作需要清洁真空技术，航天器空间环境地面模拟设备需要大型真空容器技术。真空科学技术已渗透到人们的教学、科研、生产过程、经济活动以及日常生活中的方方面面，人们普遍认识到了真空科学技术的重要性。

真空科学技术是一门涉及多学科、多专业的综合性应用技术，它吸收了众多科学技术领域的基础理论和最新成果，使自己不断地进步和发展。真空科学技术的应用标志着国家科学和工业现代化的水平，大力发展真空科学技术是振兴民族工业，实现国家现代化的基本出发点。

多年来，党和国家政府非常重视发展真空科学技术。大学设立了真空科学技术专业，培养高层次真空专业人才；兴办真空企业，设计、制造真空产品；成立真空科学技术研究所开发新技术，提高真空应用水平；建立了相当规模和水平的真空教学、科研和生产体系；独立自主地生产出各种真空产品，满足了各行业的需求，推动了社会主义经济的发展。

在取得丰硕的物质成果和经济效益的同时，真空科技人员积累了宝贵的理论认知和实践经验。在和真空科学技术摸、爬、滚、打的漫长岁月中，一大批人以毕生的精力，辛勤的劳动亲身经历了多少次失败的痛苦和成功的喜悦。通过深刻的思考与精心的整理换得了大量的实践经验，这些付出了昂贵代价得来的知识是书本上难以学到的。经历了半个世纪沧桑岁月，当年风华正茂的真空科技工作者均年事已高，霜染鬓须，退居二线。唯一的希望是将自己积累的知识、技能、经验、教训通过文字载体传承给新一代的后来人，使他们能够在前人搭建的较高平台上工作。基于这一考虑，在兰州物理研究所支持下，我们聚集在一起，成立了《真空科学技术丛书》编写委员会，由全国高等院校、科研院所及企业中长期从事真空科学技术研制工作的工程技术人员组成。编写一套《真空科学技术丛

书》，系统的、完整的从真空科学技术的基本理论出发，重点叙述应用技术及应用的典型例证。这套丛书分专业、分学科门类编写，强调系统性、理论性和实用性，避免重复性。这套丛书的出版是我国真空科学技术工作者大力合作的成果，汇集了我国真空科学技术发展的经验，希望这套丛书对 21 世纪我国真空科学技术的进步和发展起到推动作用，为实施科教兴国战略做出贡献。

这套丛书像流水一样持续不断，是不封闭的系列丛书，只要有相关著作就可以陆续纳入这套丛书出版。《丛书》可供大专院校师生，科学研究人员，工业、企业技术人员参考。

这套丛书成立了编写委员会，设主编、副主编及参编人员、技术编辑等，由化学工业出版社出版发行。部分真空界企业提供了资助，作者、审稿者、编辑等付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心感谢。

**达道安**

**2012 年 03 月 22 日**

# 前言

2007年8月在兰州参加中国真空学会主办的全国薄膜会议期间，遇到了中国真空学会前副理事长、510所的老所长达道安教授，他在空间真空领域从事研究和领导中国真空学会多年，取得了许多成果，为真空科技做出了有特色的贡献。老朋友见面，聊天中一个突出的话题：真空科技随着时代在迅速发展，可是我国相应领域的人才培养却在收缩减少。他希望组织学者撰写一套真空科学技术丛书，以供人们学习参考，促进中国真空科技的发展。人类社会进入信息时代与真空电子学的诞生和发展有密切关系，电子器件小型化的发展规律促进了纳米科技的诞生和发展，在这个过程中也带动了真空科技的发展，这是个相辅相成的进程。以真空科技为依托讨论纳米科技的有关问题，强调智能信息时代的重要基础，突出电子学的发展趋势，讨论相关纳米科技问题。达教授建议由我执笔“纳米科技基础”这部分。达教授这个愿望是一项重大工程性的工作，应该竭力支持，因此当时就答应参与这项丛书工程的部分工作，尽我所能编写好纳米科技部分。因为这是真空丛书，我将以真空的发展为主线来组织内容，突出智能信息时代的特点，纳电子学为重要内容，体现电子学的发展历程：真空电子学-微电子学-纳电子学。强调纳米科技中最重要的学科领域的纳电子学，这样本书与已出版的通常的纳米科技书籍将有所不同。纳米科学是刚刚崛起的新科技领域，不论是理论还是技术都仍相当不成熟，处于迅速进展时期。本书将以纳米科技基本原理为重点，偏重机理部分，对技术部分选择典型，只做简介，有关细节可参考相应专著和文献。撰写正在迅速发展的学科基础是有一定难度的，表述肯定是不完善的，希望能抛砖引玉，引起人们的兴趣，促进发展。如果能稍微做到这一点，编者将对您的参与深表谢意！

薛增泉

2012年2月于北京大学

# 绪论

CLUE

真空科学是物理学中的一个重要学科，它的诞生与科学家研究空气和水的密度有关。18世纪的一系列放电实验以及后来白炽灯的发明，人类在研究真空本质过程中，发现了电子，精确地测定了电子的质量和电荷量。进而发现可调控真空中的自由电子，实现电信号放大，发明了具有电信号放大功能的真空电子管，这就是1905年诞生的真空三极电子管。人类信息科技的发展是从真空三极管诞生以后开始的，利用其实现电子信号放大，开始了真空电子学时代。以真空三极管这个非线性元件为核心，配以电阻、电感、电容等线性元件构成了放大电路、逻辑电路和运算电路，成为雷达、广播、电视、遥感遥控、远程通信、电子计算机等的基础，开始了人类社会的电气化时代。在这个过程中发展了真空电子学 (vacuum electronics)，形成了物理学中的一个新学科，主要包括电真空材料、电子管制造工艺、真空的获得与测量、真空电子管电路以及近代迅速发展的空间真空物理与技术等。由于真空电子管的高功耗和大尺寸，满足不了电子学进一步发展的需求，出现了真空电子管小型化的发展趋势，人们研制小尺寸的“指形管”、“花生管”，以减小体积，降低功耗，开展了真空微电子的研究，一直到今天仍是人们探索的一个方向。在20世纪40年代，一些物理学家和电子学家，另辟新径，研制固体电子管，这就出现了贝尔公司的一些科学家在1947年发明了以锗为主要材料的晶体管（三极管），后来发展为硅基材料晶体器件。由于它的低功耗，小体积，可集成，很快成为电子学中的主流器件，发展为集成电路，构成了电子学历史进程中的第二个阶段，几乎全面地取代了真空电子管，发展成为微电子学 (microelectronics)，它主要包括：半导体物理、半导体材料、半导体制造工艺、大规模集成技术等。在微电子学发展的基础上，出现了个人计算机和高性能计算机，更广泛的电气化普及，进而发展了光通信，全球光网的形成，推动人类社会进入了信息时代。在20世纪下半叶，微电子学迅速发展，其趋势是芯片上的集成度越来越高，相应的元件尺寸越来越小，这个发展动向为著名的莫尔定律所描述。从而人们预言了微电子学发展的下一代——纳电子学 (nanoelectronics)。由于20世纪人类社会开始了信息时代，其科技基础是微电子学，相关产品进入社会的各个领域，包括生产和



生活各个环节，因此与微电子有关的硬、软件产品成为家喻户晓，老幼皆知的产品。从而有关纳电子学的诞生和发展更为人们所关注，纳电子学将是电子学发展史上的一个非常重要的新阶段。

摩尔定律描述了微电子小型化的高速发展进程，即每 18 个月芯片上的元件数增加一倍。相应的，以集成电路为基础的仪器、设备的功能显著增强，信息时代自动化水平日新月异，不断给人们带来惊喜。微电子小型化推动科技发展进入到纳米尺寸领域，20 世纪末，开始是美国带头，重视发展纳米科技，随之形成全球纳米研究热潮。材料尺寸小到纳米，首先出现的是尺寸效应和维数效应，主要是限域量子效应。在纳米尺寸，微电子传统的运行规律将不再适用，这决定了摩尔定律的终结。继而将是纳电子器件，它是以量子效应为基础的一代新器件，相对微电子这将是革命的一代，会有相应的理论、材料和加工组装技术。这是电子学发展的第三个阶段，将会推动人类社会进入智能信息时代。

我国对于纳电子学的研究早期比较重视，还在 1996 年以吴全德院士为首的一些学者就建议开展纳米电子学的基础研究，在策划指南建议研讨会上，与会学者对如何表述纳米电子学研究的重要性时，觉得很难用简单明确的语言说明。当时任国家基金委副主任的周炳琨院士赶来参加会议，他说：“就说纳米电子学是微电子学的下一代，因为微电子现今已经家喻户晓，从而人们会意识到开展研究纳米电子学的重要性。”建议很快得到了国家自然科学基金委的批准，发布了立项指南，于 1998 年召开了专家审批会，在专家组会上，作为组长的陈芳允院士指出，纳米电子学，应该取名“纳电子学”，不仅尺寸是纳米的，功耗是纳焦的，速度是纳秒的，对应于英文的“nanoelectronics”是合适的，纳电子学会为人们所接受。作为国家自然科学基金的重大项目“纳米电子学基础研究”，1998~2002 年执行，很好地完成了初期制定的研究计划，成果被评为“特优”。在项目执行期间，我们在北京大学开设了“纳米电子学”研究生选修课，项目结束后，得到基金委出版基金资助，于 2004 年由电子工业出版社出版了《纳米电子学》。我们一直从事电子学的教学和研究工作，从真空电子学、微电子学到目前的纳电子学。经历了电子器件小型化的发展历程，特别是微电子的小型化，推动了科技发展进入纳米时代。这是科技发展的新时代，是对于人类社会的进步充满机遇和挑战的时代。

纳电子学的研究仍处于探索阶段，成长为一代电子学，发展为一门成熟的学科还有很长的路要走。在讨论电子学发展时，如果我们从电子信号放大器件入手，事情容易讲得简单明白。电子学中的核心器件是三极管放大器，这是一个极其重要的非线性元件，能够进行信号放大。在信号加工过程中，将会不断地产生噪声，要保持足够的信噪比 ( $S/N$ )，就要不断地进行信号放大。在信息加工电路中需要放大器的基础是热力学第二定

律：孤立系统的熵永不减少。信息是负熵，要保持熵不变或者减少，就要进行信号放大，通常需要馈入能量，这个功能由放大元件来完成。因此当我们研究一代电子学时，首先选择其功率放大器件的运行原理、结构、材料和加工组装技术，以此为核心或代表进行分析，特别是与传统器件的比较，找出差别，突出重点，会更有效地研究和发展新一代电子学。在过去两代电子学中，放大器件都是三端的，包括载流子输入、输出和控制，即电子注入、电子接收和电子调制，称为三极管。基于此观点，本书将以真空电子学、微电子学到纳电子学为主线，进而讨论纳电子学三极管问题，有些地方借用传统的概念、名词，将新器件的特征、性能与传统器件比较，以便进行分析和加深理解。

过去一个世纪表明，电子学对人类社会的影响太大了，真空电子管开始的电气化时代，晶体管的计算机信息时代，那么自然就会想到，纳电子管的智能信息时代，将给人类带来什么？对于电子学的发展，由真空电子管到固体晶体管是个变革，即晶体管出现以后，很快真空管退出了历史舞台，开始演义微电子时代。按此推想，纳电子器件将取代微电子，它的功能更强，对于微电子将是革命性的进展。

由于微电子影响的巨大，描述微电子发展的莫尔定律对于人们有根深蒂固的影响，人们追求莫尔定律的延长，希望它不要终结，更可怕的是人们用莫尔定律所圈定的微电子模式去思考未来的电子器件，特别是纳电子器件。这种思路将是未来电子器件研究的最大束缚，将不会有电子学发展的革命。当务之急是人们跳出莫尔定律圈定的框框，摆脱微电子的模式，去探索可能适用于智能信息时代的电子器件。

人类走进纳米世界，这是科技发展的新领域，有科学发展跨时代意义，但也要考虑，人类是生活在宏观世界里的，我们所能接受的环境信息是宏观尺寸的。即使是一些新型功能材料和器件，也要组装到宏观尺寸才能为人所接受和利用。从这个观点出发，未来电子器件不一定必须是纳米尺寸的。应该考虑的是未来为智能信息时代，生产和生活工具有利于增强人的机能。在这方面，人类的发展都是从人自身的结构和思维方式去制造工具，如手的延长，动力工具，计算和办公用的电脑，机器人的制造等。所以当我们思考未来电子器件时，应该意识到我们面临的是微电子的革命，是智能信息时代的需求。针对这类问题，本书讨论了量子调控的有关问题。

尽管纳米科技发展很快，纳电子学仍处于成长的初期，至今还没有看到未来纳电子学的轮廓，因此需要扩展思路，广泛探索，发展科技的交叉、综合，才有希望造出一代新电子器件。

# 目录

<b>绪论</b>	<b>1</b>
0.1 真空科学与纳米科技 .....	1
0.2 科学发展的新时代 .....	6
0.3 一代电子学的基本元件 .....	8
参考文献 .....	11
<b>第 1 章 纳米科技的理论基础</b>	<b>12</b>
1.1 量子效应 .....	12
1.2 尺寸效应 .....	17
1.3 维数效应 .....	22
1.4 相位相干 .....	28
1.5 单电子行为 .....	31
1.6 量子比特 .....	34
1.7 量子调控 .....	38
参考文献 .....	39
<b>第 2 章 纳米材料</b>	<b>40</b>
2.1 纳米材料的基本特性 .....	40
2.2 功能材料和结构材料 .....	56
2.3 纳米复合材料 .....	66
2.4 碳纳米材料 .....	69
2.5 纳米材料的负面影响 .....	73
参考文献 .....	74
<b>第 3 章 纳米材料制备</b>	<b>76</b>

3.1 物理气相沉积方法 .....	76
3.2 化学气相沉积方法 .....	78
3.3 一维纳米材料的制备方法 .....	82
3.4 气-液-固生长模型 .....	86
3.5 固-液-固生长模型 .....	94
3.6 用模板制造纳米线 .....	101
参考文献 .....	102

---

## **第 4 章 纳米材料的测量表征** **103**

---

4.1 具有原子尺度分辨的仪器 .....	103
4.2 扫描探针显微镜 .....	105
4.3 超高真空扫描隧道显微镜 .....	110
4.4 电子显微镜 .....	115
4.5 X 射线衍射 .....	119
4.6 拉曼谱分析 .....	125
4.7 光谱分析 .....	129
4.8 纳米表征选择 .....	132
参考文献 .....	137

---

## **第 5 章 纳米传感器** **138**

---

5.1 纳米传感器的概念 .....	139
5.2 气体传感器 .....	144
5.3 环境传感器 .....	148
5.4 微生物传感器 .....	151
5.5 碳纳米管传感器 .....	154
5.6 生物芯片 .....	157
参考文献 .....	158

---

## **第 6 章 纳米功能器件** **160**

---

6.1 纳米太阳能电池 .....	160
6.2 功能器件 .....	168
6.3 热电效应 .....	169
6.4 纳米晶受激光发射 .....	170
6.5 光裂解碳纳米管中的水 .....	175

参考文献 .....	180
------------	-----

---

## **第 7 章 纳电子器件** **181**

---

7.1 纳电子器件的基本概念 .....	181
7.2 纳米三极管 .....	183
7.3 单电子器件 .....	186
7.4 构造新型三极管 .....	189
7.5 C <sub>60</sub> 单电子三极管 .....	193
7.6 碳纳米管场效应三极管 .....	197
7.7 石墨烯三极管 .....	202
7.8 石墨烯的奇异特性 .....	214
7.9 有机聚合物三极管 .....	219
参考文献 .....	223

---

## **第 8 章 关联电子学** **225**

---

8.1 轨道电子云 .....	227
8.2 电子强关联 .....	233
8.3 自旋电子学 .....	238
8.4 铁电/铁磁场效应管 .....	240
8.5 多场调控器件 .....	246
参考文献 .....	253

---

## **第 9 章 智能电子学** **254**

---

9.1 NBIC 汇聚技术 .....	254
9.2 有机电子学 .....	257
9.3 生物电子学 .....	261
9.4 分子电子学的难题 .....	264
9.5 智能电路 .....	266
9.6 纳米科技的未来 .....	269
参考文献 .....	270

# 绪 论

20 世纪人类社会发展全面地进入了信息时代，信息科学和产业是从真空三极管诞生开始的。这里强调三极管是因为它是电子信号放大的基本非线性元件，这个元件是一代电子学的代表。因此当我们研究电子学发展的特征时，重点以讨论三极管放大管的特性为主。从 20 世纪初诞生了真空三极管，带动了信息科技的发展，过程中电子学也不断地发展，经历了真空电子学、微电子学，即将进入纳电子学。同时促进了纳米科技的发展，这个进程具有科学发展跨时代的意义，这里将做简要说明。

## 0.1 真空科学与纳米科技

以真空技术为基础的电子学发展的重要历史阶段，经历了真空电子学、微电子学、信息技术、航天技术等的发展。现今进入了信息时代，人类社会正在发生着迅速的变化，真空科技面临着新的发展机遇，展现出更加辉煌的未来。人类对真空的研究已有很久的历史，从亚里士多德（Aristotle）时代到 21 世纪，一直将“真空”作为一个科学和哲学课题进行探讨。在地球表面获得真空，进行相关的科学、技术活动。很早就从理论和实践中认识到宇宙是最完美的真空环境。真空作为物理学中的一个重要学科，正在向着更深层次的理论和技术研究方向进展，这里对于有关的重要问题做几点讨论。

### 0.1.1 地球表面真空

真空技术的诞生促进了现代科学革命，其开始的标志是 1643 年的托里拆利（Torricelli）实验。他将一端封口的 40in（1in=0.0254m）长的玻璃管注满水银（Hg），倒置于水银槽中，结果玻璃管上端留下了 29in 的空间，这就是托里拆利真空（Torricelli's void）<sup>[1]</sup>。关于托里拆利真空，当时引起了人们的热烈讨论，焦点是那 29in 的空间中有什么？可能是没有物质的空间，还是仍有以太类的或其他什么东西？托里拆利实验首先关系到空气的压力和重量问题。比这早 30 年，1613 年伽里略（Galileo）企图测量空气的重量和密度，利用相似的技术给出了水对空气密度的比例和空气的密度，从此人们认识到空气是可衡量的物质。那个时代正是中国明朝末期，1644 年崇祯皇帝在北京景山公园煤山上吊了，开始了更加闭关锁国封

建专制的清朝，因此近代科学没能诞生在中国，或者说与当时的中国没有什么关系。真空开始于人类对空气的认识和科学研究，这与空气和水有关，这正是人类生存最必要的条件，现代科技就是从这里开始的。从人类自身的周围到宇宙的日月星辰，知道了引力，在真空中认识气体放电，发现电子、离子，以至到 20 世纪 70 年代，超高真空环境中，发展了表面分析仪器，直接观测了表面重构、原子排布和化学组成。在此基础上迅速发展成熟了表面科学技术，推动人类的研究进入了表面和界面领域。所以真空科技是现代科学发展的前提和保障条件。

### 0.1.2 宇宙空间真空

“Science” 杂志评出 2003 年科技突破性进展的第一项是发现宇宙的暗能量和暗物质<sup>[2]</sup>。其中暗能量为 73%，暗物质为 23%，我们知道的仅为 4%。此发现惊动了科学界，引起了人们的好奇。从地球上向外望出去的太空不只是点点发亮的星球，射电天文望远镜、高能粒子探测器探测到的电磁波、光波、X 射线、宇宙射线以及宇宙粒子等，现今知道还有更丰富的东西和更多神秘！

2003 年 2 月，一颗人造卫星，威尔克逊微波异向探测器（Wilkinson microwave anisotropy probe, WMAP）探测到了 40 万年前的宇宙图像，见图 1，(a)

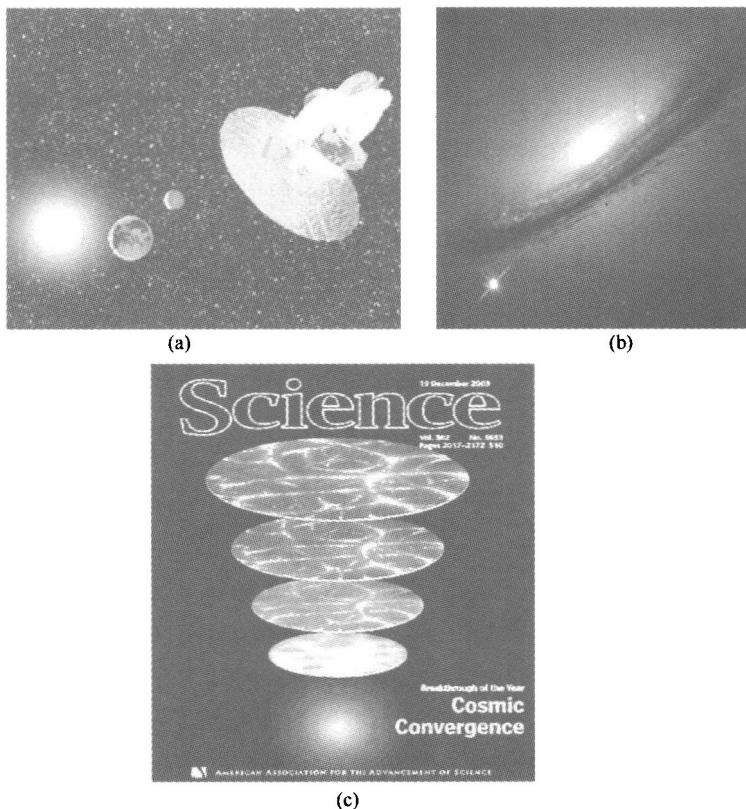


图 1 黑暗的宇宙

(a) WMAP 微波探测卫星；(b) 超新星爆炸以后；(c) 记录的越来越暗过程

WMAP 与探测的宇宙, (b) 记录的超新星爆炸以后的图像, (c) 探测到越来越暗的宇宙变化图像, 这是 2003 年最后一期“Science”封面, 示意了记录到的变化过程。探测到的微波图像表明一些亮斑点缀着宇宙, 从古代光的记录得到新生宇宙的辐射流的变化, 表明它是一个等离子体的辉光球。衰减的微波辉光像一个隔离火墙, 在这个墙上写着古代光的温度起伏及其他特性, 揭示着宇宙的组成和演化过程。可以想象在这些星群和银河存在以前很长时间, 宇宙是热的, 在重力和光作用下, 搅动着辉光等离子体。突然超新星爆炸, 整个宇宙受到巨大冲击, 就像敲响的宇宙大钟, 回声荡漾。通过等离子体的压力波搅乱了宇宙, 压缩、膨胀, 挤压成物质云团。在这个辐射背景上的热点是一个高密度的等离子体压缩的图像, 冷斑是气体抽空的显著范围。正像被敲响大钟的音调一样, 它与其形状和材料有关。早期宇宙的声音与微波背景上的热斑和冷斑的尺寸有密切关系, 依赖于宇宙的组成和它的形状。利用 WMAP 科学家听到了宇宙的音乐和看到了宇宙的图像。结果是惊人的, 宇宙以更快的速度膨胀, 存在着大量的暗能量和暗物质, 什么是暗能量和暗物质至今还不知道。宇宙钟的音调提示了宇宙的年龄和它膨胀的速度。年龄为 137 亿年, 膨胀速度为每秒 71 光年, 形状是一个扁平片。从真空科学角度看宇宙的绝大部分为暗能量和暗物质填充的空间, 这正是当今真空科学探索的重要领域。

### 0.1.3 能量空间

2003 年初, 中国真空学会常务理事会期间, 曾请中国真空界的日本老朋友林主税博士做“21 世纪真空科学技术展望”报告<sup>[3]</sup>, 给人印象深刻的是, 他将真空科技的发展置于物理学的过去与未来的变化之中, 凸显了真空科技未来发展的理论内涵。其中他讲宇宙的演变、真空态的激发, 定义真空为“能量的空间”, 还讲到了“芯片人”问题。所谓芯片人是指电子信息技术的发展, 将研究信息加工硬件与动物神经、人类大脑通过界面连接起来, 成为信息加工智能化的重要研究领域。从物理学角度阐明了真空科技发展的广阔前景, 即不只限于不为气体分子占据的空间(empty), 而是包含宇观、宏观、微观领域的能量和物质。这个无所不包的多尺度空间科学中, 真空科学占有重要地位。人们有很多问题亟待解决, 不只是暗能量、暗物质, 还有宇观/宏观、宏观/微观的界面问题, 人类对自然的认识可能在这类界面上出了问题, 使近百年基础理论没有取得突破性进展。真空将在科技重大发展中, 发挥越来越重要的作用, 为人类科技未来展现了广阔的前景, 将是人类活动的重要领域。

粒子物理用真空态来定义未被占据的空间和量子场论中的基态(最低能量密度)<sup>[4]</sup>。量子力学基本特性涉及任何空间的零点涨落(zero-point fluctuations), 包括不被占据区域(即没有物质和辐射)。这个量子场论中的零点涨落以及其他量子场论中的真空现象, 产生了巨大的真空能量密度  $\rho_{vac}$ 。这个真空能量密度扮演贡献于宇宙常数  $\Lambda$  的角色<sup>[5]</sup>。在量子场论中, 理论上估算各种因素对真空能量密度的贡献超出了观察值约 40 个量级。这个巨大的偏离, 归结于宇宙常数问题。更普遍



的可以区别为三个问题：物理学基础、量子场论真空、宇宙常数  $\Lambda$ ，以及它们之间的关系<sup>[6]</sup>。各种因素贡献的真空能量密度是从量子场理论估算的，它是由已知的粒子和力描述的。与这些理论有关的真空能量密度，取自于物理真实，真空能量密度的宇宙本质来自于广义相对论和量子场论的某种假设，也来源于有关实验结果。

从亚里士多德时代到 21 世纪，真空一直是人们热心争论的问题。由于光、电、磁、力和热全都能在真空中传播，因此在那里发生着很多事情。在科学发展史上，从亚里士多德时代开始，科学家描述各种以太存在于坚硬的空间、弥散的空间<sup>[6]</sup>，到麦克斯韦 (Maxwell) 电磁场理论导出的各种类型的以太没有为实验所检测。最后，1905 年爱因斯坦 (Einstein) 的狭义相对论否定了以太的存在，同时确立了真实真空的存在。不久 1927 年，海森堡 (Heisenberg) 不确定原理导致粒子物理预言，粒子能够自发地在真空中产生，只要它们不违背不确定原理所限定的时间之前湮灭。这样量子真空是个很实际的空间，在那里各种粒子不断地产生和湮灭。现今纳米科技研究所涉及的信息响应时间，化学、生物反应时间正是量子力学所限定的时间段。精细的实验显示在这个真空表述中，量子理论是正确的。进而，于 1980 年提出的宇宙膨胀理论，粒子物理告诉我们整个宇宙产生在真空中，这个真空就是量子真空，它应该有大量的能量。实际真空的衰减到量子真空，将产生宇宙中的所有质量，进而开始了一个大爆炸。现代物理理论，特别是量子电动力学 (QED) 告诉我们真空 (vacuum) 不再是虚空 (void)，这是由于实际上，甚至不存在物质，即使没有粒子，也没有场，但仍然有粒子对 (如电子-正电子) 的产生和湮灭过程，以及场的零点涨落 (ZPF)，因此真空电磁场将是人们科学探索的重要课题。与真空电磁场有关的 ZPF 背景是考虑一个无限情况。在接近高频截止时，ZPF 能量密度仍然是基本的，保守地估计为核能密度量级或更大。对真空电磁场零点涨落的问题，已经进行了较多的讨论，由于一些缺陷或理论的误解，引起了人们长时期的争论。ZPF 是实际的或真实的，必将导致真实物理测量的结果。一个研究例子是关于 Casimir 力 (Casimir force)，在封闭壳层金属或介质板之间实验验证 ZPF 感应的真空吸引力。精细的分析表明 Casimir 力是由于从背景电磁场零点能量产生的辐射压，在板间产生了不平衡。其他影响可能来自所涉及 ZPF 场的相互作用，原子位置的移动产生发射线的扰动引起小的位移和范氏结合力，以及在重力下的量子场作用和自发发射等。

真空科学是物理学的重要分支学科，从 19 世纪开始广泛的真空科学与技术研究，发现了电子，发展了真空科学和真空电子学，促进了信息科学的诞生，给人类社会带来了巨大的影响。到了 20 世纪中叶，晶体管的诞生，开始了新一代的电子器件时期，发展了微电子学，取代了真空电子器件。真空电子学的辉煌时代已经过去，在电子学发展史上翻过了真空电子学一页，至今人们对真空科学有些淡忘了。21 世纪开始，双暗的提出，在凝聚态物理中，对强关联电子现象和效应的探索，又激起科学家的热情，探讨凝聚态物质有关的统一理论，将地球上基本粒子行为实验与宇宙中星体演变统一起来研究。这离不开真空，因此更深层次的真空科学物理