

• 李文石 著
• 赵鹤鸣 审

微纳电子学建模 案例研究

WEINA DIANZIXUE
JIANMO
ANLI YANJIU



苏州大学出版社
Soochow University Press

微纳电子学建模案例研究

李文石 著

赵鹤鸣 审

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微纳电子学建模案例研究 / 李文石著. — 苏州:
苏州大学出版社, 2016. 7
ISBN 978-7-5672-1759-1

I. ①微… II. ①李… III. ①微电子技术—数学模型
—建立模型—案例 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 148746 号

内容简介

《微纳电子学建模案例研究》共六章,分为导论、教育、探索、定律、表达与院士. 基于数学建模研究方法学,全景贯穿微纳电子学的交叉学科内涵与产业分工链条, 举要 72 个建模案例,关照材料参数优化,触摸信号计算特征,浓缩 MOS 管物理解析,聚焦 ASIC 设计技巧,摘要 IC 工艺化学,量化 IC 封装难点,提炼 IC 测试范式.

特别凝眸成像技术挤进微观世界,重视集合量子实验触摸原理机制,重点图解微纳电子学建模入门诀窍,鼎新深耕脑健康微电子学世界前沿,最新突破 MOS 管混沌电路超低电压拓扑,趣味建模与对话院士兼及思维训练、科技写作与竞赛准备.

本书是著者研究微纳电子学的教学笔记摘要与技术总结要点,既浓缩分享了世界级的优秀研究实例,也坦诚融合了作者和研究生的倾心合作成果,是为写作初心.

本书既可视作集成电路邻近专业本科生开启微电子学与固体电子学的入门指导,也可作为集成电路相关专业研究生挺进半导体与集成电路研发领域的案头之作.

微纳电子学建模案例研究

李文石 著

责任编辑 苏 秦

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市十梓街 1 号 邮编: 215006)

苏州恒久印务有限公司印装

(地址: 苏州市友新路 28 号东侧 邮编: 215128)

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 16.5 字数 402 千

2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5672-1759-1 定价: 52.00 元

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话: 0512-65225020

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

前言 QIANYAN

古希腊哲学家、美学家和数学家毕达哥拉斯认为：数(Number)是万物之本源。

著者别解半导体器件物理的内核——PN结： $PN=Picture+Number$ (图+数)。

“哈佛神童”、1970年诺贝尔经济学奖得主保罗·萨缪尔森认为：“永远需要回头看，你可能从过去的经验中学到东西。”此被称为“萨缪尔森法则”。

集成电路发明人、2000年诺贝尔物理学奖得主J. 基尔比认为：“发明是循环过程，要在需求、技术和设计之间反复辗转。有时候，发明念头就像灯泡亮起，只是一瞬；当你寻找例证和确立原理时，模糊如摸象，然而它们关联渗透在你脑海中，也许数天累月经年，之后形成概念，得到启发，开始创造；但真正问题不是‘可制造吗？’，而是新产品价格是否为人们所乐意支付，因此，工程学中包含着经济学。”(J. Yama, 1979年)

以小胜大是微纳电子学专业的突出特点。通过设计、制造、封装和测试新型芯片，承载必须缩微增效降耗的盈利的电子系统的部分，例如传感器，或者全部，就是所谓系统芯片SOC，它所跨越的建模层次，从微米深入纳米，又从量子挺进混沌，它所呈现的产业经济学规律，以摩尔定律最为见微知著。

作为星至奖联合发起人，李氏系列电路发明人，新概念“脑健康微电子学”(Brain Health Microelectronics)、“相似器”(Similaritor)和“血糖无创检测混沌型传感器”(Chotic Sensor for Noninvasive Detection of Blood Glucose)的独立提出者，著者主要研究领域是模式分析与微芯片设计。

著者主讲过20多门本科生电子学基础课与硕士研究生微电子学专业课，梳理旧知，创造新知，基于总共6章(导论+教育+探索+定律+表达+院士)书稿，把握 Know What(事实)，提炼 Know Why(规律)，打造 Know How(技巧)，认知 Know Who(专家)，行走在微纳电子学的博弈合作的棋盘中，著者将教研心得摘要与实战案例解说融入该书，写作初心是向专家致敬，同时方便本科生与研究生新人的入门自学。

人生就是一场测试能走多远的趣味建模实验——问题表征+解码评估+产品优化！“第一流的教育家，敢探未发明的真理，敢入未开化的边疆。”(陶行知，1919年)“千淘万漉虽辛苦，吹尽狂沙始到金。”(刘禹锡，唐)精力所限，笔难从心，不当之处，还请匠心独妙的

大家学者指正。

近悦远来,常与三位同事:苏州大学资深教授黄贤武博导、东京大学客座教授俞一彪博士、苏州大学东吴学者毛凌锋博士,促膝谈心。

鸣谢苏州大学资深教授赵鹤鸣博导审阅全部书稿;谢谢责任编辑苏秦老师的悉心帮助。

感谢 Stanford University 施敏院士于 2009 年 4 月 14 日再次欣然为本书题字!

资助:(1) 苏州大学专业学位硕士案例教材建设子项目(编号 58320901)(2016 年,结题评为优秀);(2) 江苏省重点学科建设经费立项课题。

心声:每天的阳光都是新的,尽力而为,拓荒脑网(Brainet),止于至善!

李文石博士,硕导,教授

1990 年 6 月一稿写于南京大学

2002 年 6 月二稿写于复旦大学

2007 年 6 月三稿写于东北大学(日本)

2008 年 6 月四稿写于东南大学

2016 年 6 月定稿写于苏州大学

第 0 章 微纳电子学导论

1

- 0.1 数学 / 1
- 0.2 物理学 / 2
- 0.3 化学 / 3
- 0.4 生物学 / 4
- 0.5 电子学 / 5
- 0.6 微电子学 / 6
- 0.7 纳电子学 / 7
- 0.8 成像学 / 8
- 0.9 脑神经科学 / 13
- 0.10 模型构造学 / 14
- 0.11 产品开发方法学 / 16
- 0.12 本章小结 / 20
- 0.13 思考题 / 24
- 0.14 参考文献 / 24

第 1 章 微纳电子学教育

26

- 1.1 蚂蚁找路 / 26
- 1.2 沥青滴漏 / 28
- 1.3 希尔密码 / 29
- 1.4 基于阴极射线管发现电子 / 30
- 1.5 三维扩散电阻 / 31
- 1.6 共振晶体管 / 34
- 1.7 量子隧穿器件 / 36
- 1.8 阻变存储器 / 40
- 1.9 自旋电子学器件 / 42



- 1.10 基于近场显微镜同时成像波粒二象性 / 44
- 1.11 双缝干涉实验 / 46
- 1.12 NMOS管沟道注入B离子调节 V_{th} 实验 / 50
- 1.13 本章小结 / 56
- 1.14 思考题 / 57
- 1.15 参考文献 / 57

第2章 微纳电子学探索

59

- 2.1 设计方法学概论 / 59
- 2.2 折中设计概论 / 64
- 2.3 蒙特卡罗方法学概论 / 69
- 2.4 量子修正的MOSFET表面电势解析模型研究 / 76
- 2.5 电子存储器中的软故障特征导论 / 83
- 2.6 微电子系统中的FoM概论 / 86
- 2.7 高精度-低功耗SAR ADC的FoM函数研究 / 89
- 2.8 微码技术概论 / 97
- 2.9 第一键合点铜线焊接的三步键合研究 / 100
- 2.10 串扰概论 / 104
- 2.11 RF手机测试案例 / 108
- 2.12 ATE技术演进规律 / 110
- 2.13 MOS管混沌产生电路设计方法研究 / 113
- 2.14 生物医学环境信号模式识别实验 / 118
- 2.15 本章小结 / 123
- 2.16 思考题 / 124
- 2.17 参考文献 / 124

第3章 微纳电子学定律

131

- 3.1 欧姆定律(1827年) / 131
- 3.2 兰特法则(1960年) / 135
- 3.3 良率幂律模型(1963年) / 142
- 3.4 摩尔定律(1965年) / 148
- 3.5 阿姆达尔定律(1967年) / 154
- 3.6 丹纳定律(1974年) / 160
- 3.7 硅周期(20世纪80年代) / 167
- 3.8 MOS管的 α 幂律模型(1990年) / 171
- 3.9 金帆定律(1994年) / 177
- 3.10 海兹定律(2003年) / 179

- 3.11 想法定律(2014 年) / 186
3.12 本章小结 / 187
3.13 思考题 / 189
3.14 参考文献 / 189

第4章 微纳电子学表达

- 4.1 科学研究 ABC / 194
- 4.2 科技写作精要 / 195
- 4.3 本科论文举例 / 198
- 4.4 硕士论文举例 / 199
- 4.5 博士论文举例 / 201
- 4.6 中文综述论文举例 / 204
- 4.7 英文学术论文举例 / 210
- 4.8 省自然科学基金申请书举例 / 218
- 4.9 国家自然科学基金申请书举例 / 223
- 4.10 发明专利申请书举例 / 229
- 4.11 调研报告举例 / 235
- 4.12 本章小结 / 240
- 4.13 思考题 / 241
- 4.14 参考文献 / 241

第5章 微纳电子学院士

- 5.1 巴德年院士论未来医学 / 242
- 5.2 张淑仪院士论科学研究 / 243
- 5.3 核物理之父卢瑟福论教育 / 244
- 5.4 王守觉院士论科技创新 / 246
- 5.5 许居衍院士论集成电路 / 247
- 5.6 施敏院士论微纳电子学 / 248
- 5.7 吉德斯院士论生物医学工程 / 249
- 5.8 刘永坦院士论信号处理 / 250
- 5.9 邓中翰院士论微电子系统集成 / 251
- 5.10 程京院士论生物芯片与健康产业 / 251
- 5.11 郝跃院士论宽禁带半导体与可靠性 / 252
- 5.12 本章小结 / 253
- 5.13 思考题 / 253
- 5.14 参考文献 / 254

科学(Science)涵盖任何知识系统,涉及物理世界及其现象,对于科学的研究需要无偏见的观察和系统化的试验.简言之,科学浓缩一般真知或基础定律.技术(Technology)是科学知识的应用,其面向人生的实际目的,简言之,其旨在改变和操纵人类的环境.

尽管科学与技术的学科在不断分叉与融合,对于热爱微纳电子学的青年学子而言,建议重视如下4门基本功课:数学、物理学、化学以及生物学[施敏(S. M. Sze)院士讲座,于苏州大学,2009年4月14日].

璨若群星的新兴学科,都是大自然之子,是思维孩子(Brainchildren).

本章主要根据《大英百科全书》2009年网络版(Encyclopedia Britannica Online 2009)的信息,分别引论入4门基础学科,桥接电子学,突出微电子学和纳电子学,亮出成像学,挤进脑神经科学,聚焦模型构造学,收获在产品研发方法学.

文末根据维基百科凝练给出本章小结,推出关键思考题,择要开列参考文献[1—30].

0.1 数学

数学(Mathematics)是关于结构、队列和联系的科学,它演变自原始的计算实践、量度以及针对各种物体形状的描述.它能够处理逻辑推理和定量计算,其发展包括针对客观物质对象的逐渐提高级别的理想化和抽象化方法.

自17世纪以来,数学已经是自然科学研究和技术探索的不可或缺的辅助手段,在近期,数学的类似应用已经指向生命科学的量化方面.

发明关联创业的最高境界是从0到1,而非从1到N.

图0.1是漂亮的阿拉伯数字1与秋千(Trapeze).古印度人发明了“阿拉伯数字”的符号0~9和十进制计数法.

图0.2来自“数学王子”C. F. 高斯的故乡——一幅德国漫画(格罗·冯·兰多,德国《时代周报》,2004年12月2日),主题为:数学自由且根本.它提示我们:数学有一种不同于其他科学的自由,数学家的唯美理想蕴涵着一种就连十

$$\begin{array}{l}
 3 \times 37 = 111 \\
 6 \times 37 = 222 \\
 9 \times 37 = 333 \\
 12 \times 37 = 444 \\
 15 \times 37 = 555 \\
 18 \times 37 = 666 \\
 21 \times 37 = 777 \\
 24 \times 37 = 888 \\
 27 \times 37 = 999 \\
 111, 111, 1111 \times 111, 111, 111 = 12,345,678,987,654,321 \\
 1 \times 9 + 2 = 11 \\
 12 \times 9 + 3 = 111 \\
 123 \times 9 + 4 = 1111 \\
 1234 \times 9 + 5 = 11111 \\
 12345 \times 9 + 6 = 111111 \\
 123456 \times 9 + 7 = 1111111 \\
 1234567 \times 9 + 8 = 11111111 \\
 12345678 \times 9 + 9 = 111111111
 \end{array}$$

图0.1 漂亮的阿拉伯数字1与秋千

二音音乐亦不能与之媲美的特殊严谨性。

“宇宙之大,粒子之微,火箭之速,化工之巧,生物之谜等各个方面,无处不有数学的贡献。”(华罗庚,大哉数学之为用,1959年发表于《人民日报》)。

工程问题的数学化——数学建模,在向我们招手,至于结合数学的形象思维的训练,可以求助于物理学。

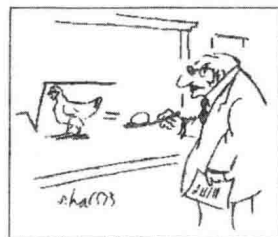


图 0.2 数学是自由的艺术

0.2 物理学

物理学(Physics)是一门基础科学,研究物质的结构,探知可见的宇宙基本成分之间的相互作用,涉及自然界从宏观到微观的各个层面.它的最终目标是将众多的原理加以公式化,并借此解释所有不同的自然现象。

脱胎于自然哲学的物理学可被基本定义为关于物质、运动和能量的科学.因为应用了数学语言,其众多定律的解释既经济又精确.物理学的进步,一直伴随着尽可能精确的可控条件下的现象观察与实验.对于检验物理学定律,理论预言与实际测量结果一致与否,是判断真理性规律的唯一标准。

图 0.3 是欧姆定律(基本型和微分型)的趣味图解,启发来自《图解杂学:电子回路》(福田务,ナツメ社,2006年).欧姆定律(Ohm's Law, G. 欧姆,1827年)是电学中的最基本模型 $I=V/R$, 或 $J=\sigma E$ (此为微分形式的欧姆定律). 其中 I 是电流(单位:安), V 是电压(单位:伏), R 是电阻(物质的基本性质,单位:欧); J 是电流密度(单位:安每平方米), σ 是电导率(单位:西/米), E 是电场强度(单位:伏/米)。

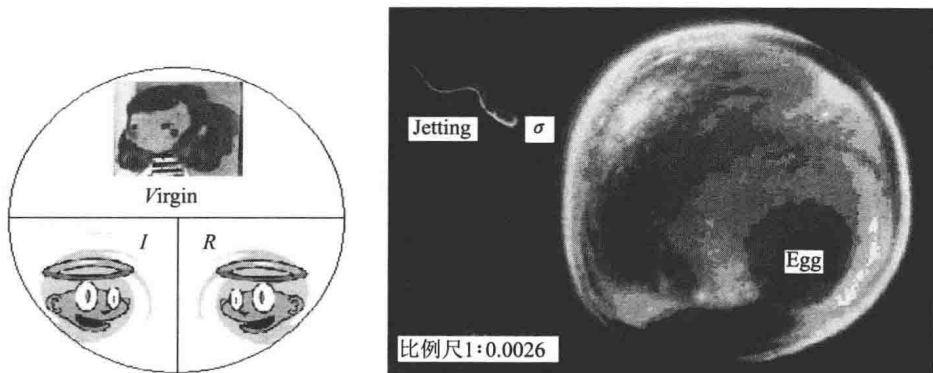


图 0.3 欧姆定律(基本型和微分型)的趣味图解

图 0.4 的三棱镜与七种色光出自文献 Encyclopedia Britannica Online 2009.

1666年,牛顿在家休假躲避黑死病,应用三棱镜,他发现一束白光可分成不同颜色的光束,形成红、橙、黄、绿、蓝、靛和紫七种色光,即发生了色散(Dispersion)现象.而不同的单色光又可借助三棱镜,合成还原为白光.现代光谱学研究

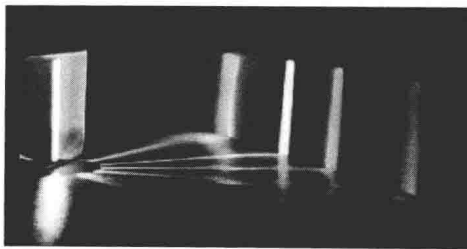


图 0.4 三棱镜与七色光

的先河由此开启。

科学巨人爱因斯坦建立的成功学模型是:成功 $A=X+Y+Z$, 其中 X 代表艰苦的劳动, Y 代表正确的方法, 而 Z 代表少说空话。

做物理工作的成功要素是什么?! 杨振宁院士归纳为如下三个字母 P:

眼光(Perception)、坚持(Persistence)和力量(Power)。

专家有言:格物致知! 每天格一物, 研究物之道理。当然, 探求新功能材料, 搞清其机制, 主要是指物理或化学的道理。

0.3 化学

化学(Chemistry)是一门科学, 研究物质(元素和化合物)的性质、组成和结构, 探究物质的转化过程以及其间所释放或吸收的能量。任何天然或人造物质都是由一种或多种原子(元素, 总数有 100 余种)组成的。

化学不仅涉及亚原子领域, 而且研究原子的性质, 包括支配原子间组合的定律, 以及如何应用原子的已知性质, 以便实现特定的目的。化学研究也关注可能造成瞬间爆燃的物质之间的反应变化。

截止 1965 年, 被掌握特性及已生产的不同化学物质(自然的和人造的)尚不超过 50 万种; 而当时光之箭射入聚合物时代(Polymer Age), 该数字翻新为需要乘 16 倍。在化学技术的诸多成果中, 有各种元素或多元半导体(Semiconductors)材料。

图 0.5 是俄国门捷列夫制作的化学元素周期表(D. I. Mendeleev, 1869 年)。其中已存在为硅器时代奠基的化学元素 Si, 其重要的左邻右舍还包括硼(B)、磷(P)、铝(Al)和氧(O), 碳(C)是如今的新贵邻居。元素硅(Si)发现于 1823 年, 其以氧化物(例如石英砂)或硅酸盐的形式存在, 占地壳含量的 25%。现在, 大于 95% 的集成电路基于半导体材料硅。

图 0.5 门捷列夫化学元素周期表(局部)



图 0.6 原子半径的周期变化示意图

图 0.6 是原子半径的周期变化图解。其中, 氢原子的半径是 0.05nm; 注意, 硅原子的“体态”与近邻硼(B)和磷(P)是近似相等的, 此奠定了 Si 杂质工程的基本几何机制——在晶格中可以替位或占位容身。

图 0.7 是玻尔原子模型(1913 年由 N. Bohr 提出, 1922 年获得诺贝尔物理学奖)以及第一级巴尔末跃迁。爱因斯坦有言:玻尔的电子壳层模型是思想领域中最高的音乐神韵。

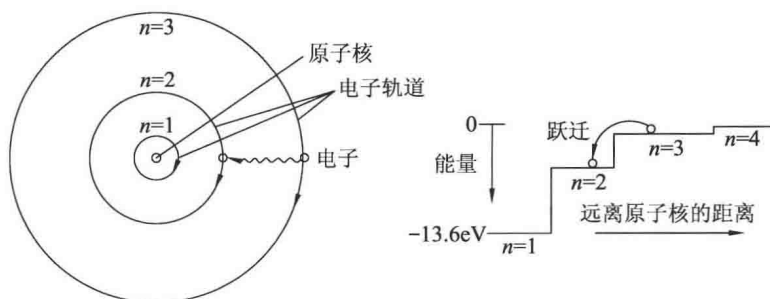


图 0.7 玻尔原子模型与第一级巴尔末跃迁图解

N. 玻尔的导师是近代原子核物理学之父 E. 卢瑟福(读研究生师从电子的发现者 J. J. 汤姆逊教授),他是 1908 年诺贝尔化学奖获得者。

在现实领域里,机遇偏爱那种有准备的头脑(Chance Favors the Prepared Mind),法国微生物学家、化学家和近代生物学的奠基人 L. 巴斯德如是说。

0.4 生物学

生物学(Biology)旨在研究生命体及其关键过程,同时探究生命的物理和化学特性。

在分子生物学的层面上考察,生命可被视为化学和能量转化的一种表现,发生在组成有机体的许多化学成分之中。

更精确的实验仪器和测量技术的发展,导致了如是结果:现在已能更加准确地理解和定义的,不仅包括原先不可见的最终的理化超结构(关于生命物质的分子),而且还包括生命物质究竟如何在分子层面上再生。

图 0.8 是恐龙胚胎化石(大椎龙,年龄 1.9 亿年),1978 年发现于南非,刊于 2005 年 7 月 29 日出版的《Science》杂志。



图 0.8 没有牙齿的恐龙胚胎化石

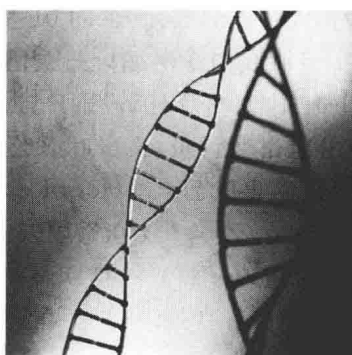


图 0.9 DNA 双螺旋结构

似乎即将破壳而出的骨架(长约 12cm)都没有出现牙齿,说明小恐龙孵出之后,也需要“双亲”的抚育。

地球诞生已有 46 亿年,若把地球 46 亿年的历史浓缩为一天,则:

零点零分到 3 点 39 分,地球诞生,最初的海洋开始形成,海洋中简单的有机物生成。

5 点 43 分到 16 点 09 分,火山活动强烈,太阳辐射强,原核生物出现,地球上出现了

原始生命。

22点05分到22点28分,是两栖类动物的全盛期,巨型有翅昆虫开始出现。

22点51分到23点12分,气候温和潮湿,这21分钟是恐龙的全盛期,始祖鸟开始出现。

23点37分,恐龙时代终结,为哺乳动物和人类的登场提供了契机。

23点57分,这是个重要的时刻,因为人类登上了历史舞台。

在24小时的地球历史中,人类在最后3分钟才登场,最后的1分10秒,现代人类出现。从模型建立的角度考察人体,其就是一个能够产生和传导微弱电能的“水袋”。

生物学进步的已知代表成果:写就人类基因组[脱氧核糖核酸 DNA(Deoxyribonucleic Acid)序列]的基本指令,即DNA所包括的四种核苷酸:腺嘌呤(A)和胸腺嘧啶(T),鸟嘌呤(G)和胞嘧啶(C)。

图0.9是DNA的分子模型,由J. 沃森和F. 克里克于1953年建立,同年《Nature》发表其1篇千字文且仅含1张X射线晶体衍射照片,9年后,他们借此获得了诺贝尔生理学或医学奖。

DNA的有机化学分子呈现双螺旋结构(而非原来构想的三螺旋),这提示了DNA的复制机制。遗传信息经过DNA编码,以传递遗传性状。已经发现DNA存在于一切原核与真核细胞中,也存在于许多病毒中。

量子波动力学创始人E. 薛定谔(1933年诺贝尔物理奖得主)以著作《生命是什么?——细胞的物理面貌》(1944年),和J. 沃森博士一起开启了分子生物学之门。

薛定谔是在世界著名的卡文迪许实验室工作的,而同属该实验室的J. J. 汤姆孙教授(1906年诺贝尔物理学奖得主),早在1897年就因发现电子而敲响了电子学的大门^[1]。

0.5 电子学

电子学(Electronics)是物理学和电气(电机)工程的分支学科,研究电子的发射、行为和效应,发明和应用电子器件。电子学涵盖了极其广阔的技术领域,因为信息的获取、放大、存储、处理、传输、转换和显示,哪一样都离不开电子学。

最初,电子学特别针对第一只电子管(Electron Tube)中的电子行为展开研究。电子技术应用基于理解电子基本特性的进展,以及合理运用这些粒子的行为方式。

电子学研究进展的里程碑是发明了很多关键器件,例如晶体管(Transistor)、集成电路(Integrated Circuit)、激光器和光纤等。新器件的出现又催化了电子制造业,使其中涌现出面广量大的电子消费品、工业品和军用品。

可以断言,电子革命与19世纪的工业革命同等重要。

图0.10是电子(真空)二极管的发明原理。1879年爱迪生发明白炽灯泡后,第一个把爱迪生效应(热电子发射现象)付诸实用的,是英国人J. A. 弗莱明(麦克斯韦的学生),他于1904年发明了电子二极管。

基于此,1906年美国人D. 福雷斯特专门加入了控制级,位于收集罩极和阴极之间,这就是著名的电子三极管。自此,人类正式迈进了电子时代。

在前面走过的40年中,电子三极管唱绝对主角,因为它是唯一可选的放大器(虽然在

能耗和便携性等方面,尚不令人十分满意).

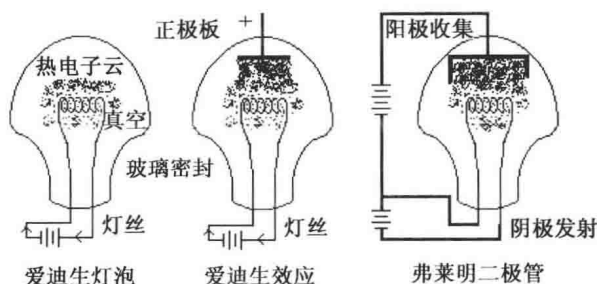


图 0.10 爱迪生效应与弗莱明真空二极管

图 0.11 是 1947 年圣诞节前诞生在美国贝尔实验室的首只晶体三极管(电压增益为 15). 9 年后因之获得诺贝尔物理学奖的项目组长 W. B. 肖克利认为:在我看来,晶体管将是电脑理想的神经细胞^[2].

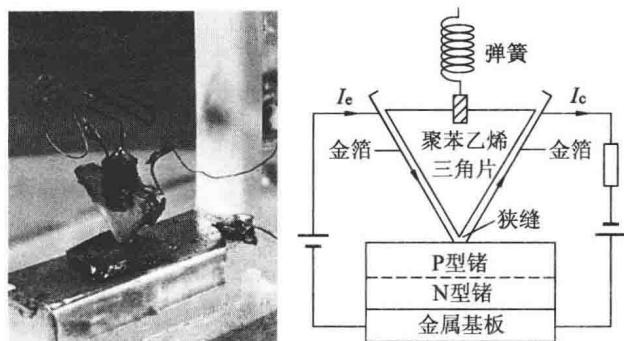


图 0.11 点接触晶体管的发明与实验原理示意^[2]

0.6 微电子学

微电子学(Microelectronics)是电子学的一个重要分支,研究半导体器件(Semiconductor Device)、电子学电路(Electronics Circuit)和系统(System)的微小型化,特征尺寸(Feature Size)是微米量级(Micrometer-Scale)或者更小^[3]. 对比数据:人类头发直径处在 $50\mu\text{m}$ (微米)数量级.

微电子学先声是固态电子器件——晶体管(先基于锗,后主要基于硅),核心硕果是集成电路(IC, Integrated Circuit)的定义与发明(Invention). “电子设备可在一块固体上实现,无须连线;在固体块各层切出一块块直接互连”(G. W. A. Dummer, 1952 年).

随着微加工技术的进步,微电子学的固态器件(Solid-State Devices)正在被持续缩微,呈现出恰如摩尔定律所概括的技术经济学统计特征——单片 IC 所能集成的晶体管数量每 18 个月翻一番.

若在更小的缩微尺度考察,集成电路内部性质的相互影响将更为严重,如互连线延迟已经超过了门延迟($0.25\mu\text{m}$ 工艺节点以下),这是寄生效应(Parasitic Effects)使然. 微电子学设计工程师们的研究目标,就是设法补偿这些寄生效应,也或使其最小化,以便提供

更小、更快、更冷和更廉(价)的器件与芯片(Chips,如中央处理器 CPU)。

图 0.12 是 TI 公司的 J. 基尔比于 1959 年 2 月 6 日提交申请的美国专利附图(U. S. Patent 3138743)。“本发明首要的目的,就是利用一块包含扩散 PN 结的半导体材料,制备一种新颖的小型化电子学电路,在其中,所有电路元件全部集成在这块半导体材料之中”。

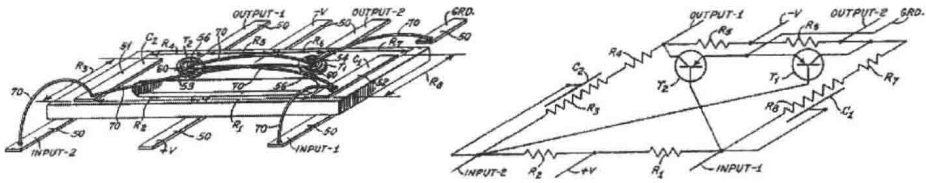


图 0.12 单片集成电路(振荡器和锁存器)的结构布置和电路原理^[4]

凭借 1958 年制作出第一块锗基单片 IC(长度为 1.1cm,手工绑定金线),“为现代信息技术奠定了基础”、为人低调勤勉的伟大工程师 J. 基尔比赢得了 2000 年诺贝尔物理学奖。

图 0.13 是微纳电子学的“圣杯”总览图解。中心是特征尺寸,左为集成度,右为诺贝尔奖,上有硅极限,从 5nm 变为 3nm,趋向亚纳米工艺。

1986 年美国加州大学 R. G. Paul 教授提出集成电路分类的鸡蛋模型:模拟电路(Analog Circuits)是蛋壳,数字电路(Digital Circuits)是蛋黄,而 ADC 与 DAC(A 模拟, D 数字, C 转换器)是蛋清。ADC 和 DAC 是联结模拟电子世界和数字电子系统之间的纽带与桥梁;其二者的串联就是化学突触的等效电路。对于未来 SOC 的架构,看好众核 MCU+Interfaces+Sensors。

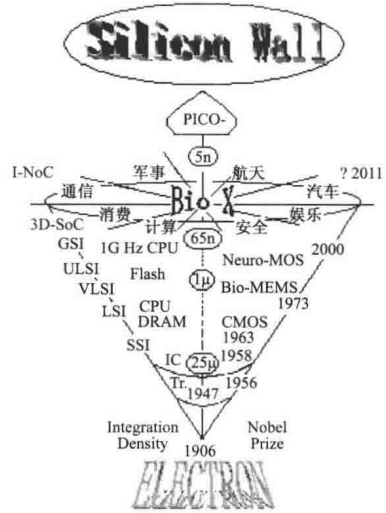


图 0.13 微纳电子学的“圣杯”
图解(李文石, 2005 年)

0.7 纳电子学

纳电子学(Nanoelectronics)也称为量子功能电子学,它主要在 100nm 以下的尺度,研究晶体管器件内部的原子间的相互作用,探究量子效应,构造全新的量子结构体系。

区别于现在主流的电子器件——MOS 管,纳电子学发展了许多变革性的新器件候选者,包括单电子晶体管、单电子存储器和单原子开关等,以及可能用于量子系统的零维的量子点(Quantum Dot)、一维的量子线(Quantum Wire)和二维量子阱(Quantum Well)等。

1V 电压及以下供电的纳电子学是十分重要的研发(Research & Development)领域。通过阶段性地考察,基于纳电子学的实用化进程尚有待突破。

图 0.14 是扫描隧道显微镜的结构原理示意,纳米级的测量表征基于扫描隧道显微镜[STM(Scanning Tunneling Microscope),1982 年发明,1986 年获诺贝尔奖]。

STM 的基本工作原理:探针与样品在近距离(小于 0.1nm)时,因二者存在电位差而产生隧道电流,其对距离非常敏感;当控制压电陶瓷使得探针在样品表面扫描时,由于样品表面的高低不平而使针尖与样品之间的距离发生变化,该距离变化将引起隧道电流变

化;控制和记录隧道电流的变化,并把电流信号送入计算机进行处理,即可得到样品表面的高分辨率的形貌图像。

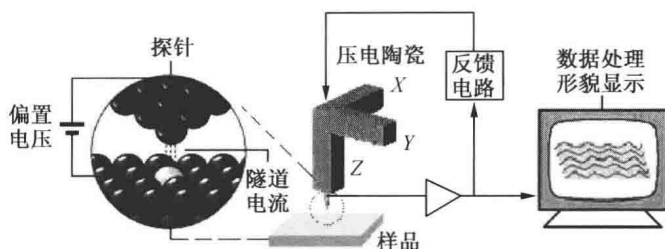


图 0.14 STM 结构原理示意图

图 0.15 是由硅原子组成的硅元素符号(尺度为 $4\text{nm} \times 4\text{nm}$, 由 12 个半径为 0.117nm 的硅原子组成), 2009 年, 由日本大阪大学的杉本宜昭等基于 AFM (Atom Force Microscope) 操纵, 逐一置换锡原子而成。

图 0.16 显示了硅墙 (Silicon Wall) 的出现和纳电子学的机会 (纵坐标为对数坐标)。半导体技术国际路线图 ITRS 2007 提供的仿真数据表明: 在低静态功耗电路中, MOSFET 的栅极 (SiON 介质) 漏电流密度于 2008 年已超过了极限值。因此, 尽快发展 Si 微电子学持续缩微的改良或替代技术已是大势所趋。

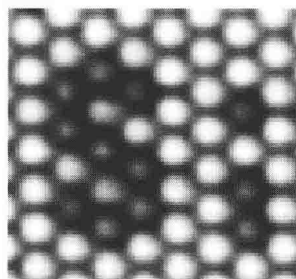


图 0.15 由硅原子组成的硅元素符号 (尺度为 $4\text{nm} \times 4\text{nm}$, 来源于杉本宜昭)

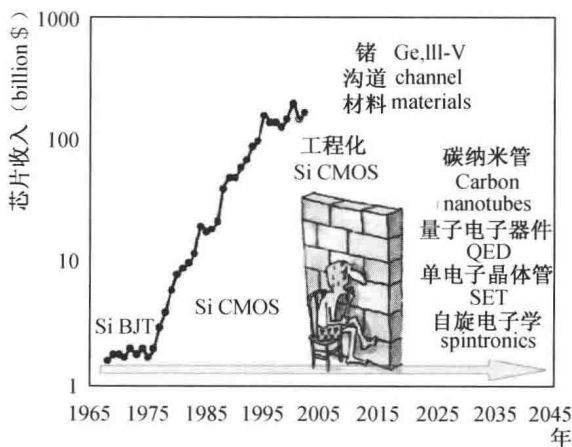


图 0.16 硅基微电子学的收入、硅墙的出现与纳电子学的机会^[5]

在纳米尺度下, 器件与电路的量子混沌效应备受关注, 能否顺利地控制与利用此机制的“敌”“友”身份, 即将成为延续摩尔定律节拍的工业量产的瓶颈^[6]。

0.8 成像学

激发灵长动物好奇心的无疑是其色觉与立体视觉。成像技术 (Imaging Technology)

就是模式识别(Pattern Recognition)的计算机图形学之可视化^[7].

基于成像系统(Imaging System)可能获得例如人体微结构图像,以便进行模式识别与诊断治疗.

结构与流程=研究对象+传感换能+预处理+特征提取与编码+解码与显示+可视化理解. 其中,微弱信号的传感换能最为关键,而建像算法更为重要.

所涉及的多核 CPU 或 DSP 系统控制,已呈阶段成熟态势(一直呼唤新器件与新架构).

光学成像的发展可分为三个阶段:直接光学成像(即古典光学成像)、间接光学成像(即衍射光学成像)和扫描光学成像(如近场光学成像)^[8-9].

例证 1: 墨经与小孔成像

《墨经》有云:景到,在午有端,与景长,说在端. 今译:(结果)像是倒立的,(装置特点:两束直线传播光线的)交叉所在(焦点)(开)有小孔,至于成像的长短,言说关键就在小孔(的位置). 图解参见图 0.17.

启发一:作为眼睛的延伸工具,小孔成像装置的发明是墨子的重要成果.

启发二:将人本位变换成因变量,旨在提示,为寻找人和宇宙的本质,始于逻辑起点,基于工具理性进行解构或者重构.

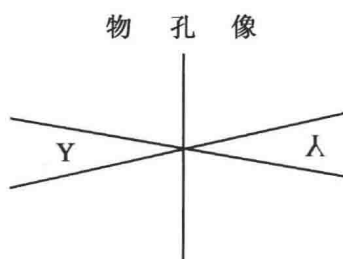


图 0.17 墨子的小孔成像实验示意图

例证 2:《窗外》与雪花

图 0.18 是世界上第一幅永久性照片,《窗外》的左边是鸽子笼,中间是仓库屋顶,右边是另物一角.

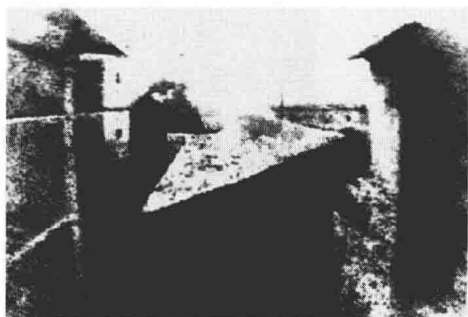


图 0.18 窗外(摄影:尼埃普斯)



图 0.19 世界首张雪花照片

1827 年的一天,法国人约瑟夫·尼埃普斯在顶楼工作室,拍摄了窗外的景色,方法步骤是:① 将一层薄沥青敷在铅锡合金板上;② 将前述感光版放入照相暗盒;③ 利用阳光和原始镜头进行曝光;④ 曝光时间长达 8 小时;⑤ 再用薰衣草油进行冲洗.

参见图 0.19,世界首张雪花照片定格于 1885 年(增加了透镜片组数). 2015 年初晶体学研究揭示雪花只有 35 个形状,其形状根据温度和湿度改变.

例证 3: X 射线衍射成像

受到劳厄像(图 0.20)的启发,布拉格父子实验建立了布拉格定律——相邻晶面反射光、入射光的光程差与入射光波长呈整数关系,成立条件是波长小于等于 $2d$,定律本质是晶格周期性使然,参见图 0.21. 应用这一公式,已知入射 X 射线波长 λ 与入射角度(与晶