

微纳技术著作丛书

单电子学

蒋建飞 编著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

单电子学是纳电子学最重要的分支之一,它是有可能部分替代发展至终极时的纳米 MOS 电子学的最重要候选者之一。

本书系统地论述了以半经典理论为基础的单电子器件物理,包括网络分析理论、正统理论和超正统理论;传统概念下单电子电路的原理以及非传统概念单电子电路的研究;单电子系统的模拟方法,包括单电子器件和电路蒙特卡罗模拟法,单电子器件和电路主方程模拟法,单电子器件和电路与集成电路通用模拟程序 (SPICE) 兼容模拟法。本书是一部有明确的学术观点、理论体系及很强应用背景的学术著作。

本书可以作为纳米科学技术和相关学科的科学家、工程师、教师的参考书,也可供电子科学技术一级学科和交叉学科(计算机学、物理学、化学、生物学、材料学等)从事纳米科学技术学习和研究的高年级本科生、硕士研究生、博士研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

单电子学/蒋建飞编著. —北京:科学出版社, 2007

(微纳技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-019882-2

I. 单… II. 蒋… III. 纳米材料-电子器件-研究 IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 136621 号

责任编辑:王志欣 孙 芳/责任校对:包志虹

责任印制:刘士平/封面设计:陈 敬

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 9 月第一次印刷 印张: 32 1/2

印数: 1—3 000 字数: 634 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

单电子学是纳电子学最重要的分支之一。目前,在纳米 MOS 器件按比例缩小到极限以后,仍没有单一、普适的纳电子器件去替代它或部分替代它,最普遍和最重要的选择就是单电子器件和单分子器件;而单分子器件是利用单个电子和少数几个电子工作的,其基本原理也主要与单电子学密切相关。因为单电子器件的有源区可以按比例缩小到原子尺寸,使其对材料的选择有极大的自由度,甚至可以覆盖各种分子材料,所以更展现出了它的重要性。

虽然长期的研究使人们对单电子器件的物理机制已经有了较清楚的认识,但遗憾的是,目前尚未找到提高这种器件电压增益的办法;并且,背景电荷效应和共道效应等会严重破坏和干扰单电子器件和电路的正常工作。不过,科学家们正通过单电子器件的非传统的逻辑设计的方法,试图用平行计算的信息处理来克服上述困难,比如构建自展开的神经网络。根据最乐观的估计,这样的系统对于信息处理技术而言,其重要性最终将超过常规的微处理器。但是,要实现这样的目标,在单电子器件的应用和单电子 ULSI 制造技术的研究上还要经历极其艰难的过程。

本书系统地论述了以半经典理论为基础的单电子器件物理、电路设计和模拟方法等内容,是作者在上海交通大学微纳科学技术研究院长期从事这一领域研究工作的总结。全书共分十一章,第一章为绪论,第二章为单电子器件的网络理论和静电学,第三章为金属基单电子器件的半经典理论,第四章为金属基单电子器件的电磁环境效应,第五章为金属基单电子器件的共隧道效应,第六章为金属基单电子器件的噪声,第七章为介观超导隧道结理论,第八章为半导体基和人造原子单电子器件理论,第九章为纳机电单电子器件理论,第十章为单电子电路原理,第十一章为单电子器件和电路模拟器。

在本书出版之际,衷心感谢国家自然科学基金委员会多年来对作者在这一领域研究中所给予的基金资助,衷心感谢上海交通大学微纳科学技术研究院对本书出版的全力支持。

真诚感谢蔡琪玉副教授对编著工作长期的帮助。同时,特别要感谢沈波博士、乐嘉勇博士、胡潮红博士和汪阳博士等,他们富有成效的研究工作对充实本书第十章和第十一章的内容极为重要。最后,还要感谢蒋惠玲博士和蒋惠敏在本书著作过程中所给予的热心帮助和鼓励。

在本书著作过程中,作者还参阅了大量的文献和专著,在此对这些作者表示

真诚的感谢。

最后指出，本书是作者在纳电子学领域中的第三部著作，前两部是《纳电子学导论》（科学出版社，2006）和《纳米芯片学》（上海交通大学出版社，2007）。

书稿虽经多次修改和校正，但限于作者水平，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

蒋建飞

2007年3月于上海

基本符号表

C_J : 隧道结电容 (F)

C_{stray} : 寄生电容

C_D : 单电子晶体管漏端隧道结 (漏结) 电容 (F)

C_S : 单电子晶体管源端隧道结 (源结) 电容 (F)

C_G : 单电子晶体管栅电容 (F)

C_B : 单电子晶体管背栅电容 (F)

C_Σ : 系统总电容

$e=1.60218\times 10^{-19}\text{C}$: 电子元电荷

E_K : 量子化约束能 (eV)

E : 电场强度 (V/cm)

E : 能量 (eV)

$E_Q\sim\hbar\omega/2$: 封闭的哈密顿系统中, 每个自由度量子涨落的特征能量 (eV)

$E_C\sim e^2/C$: 静电能 (eV)

E_F : 费米能量 (eV)

E_J : Josephson 结的耦合能

$f(E)$: 费米函数

f_{SET} : 单电子振荡频率 (Hz)

f_B : 单电子对振荡频率 (Hz)

F_i : 初态自由能 (eV)

F_f : 终态自由能 (eV)

F_k : 弹性力 ($\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$)

F_d : 耗散阻尼力 ($\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$)

F_e 或 F_i : 静电力 ($\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$)

$G=(e^2/\pi\hbar)\sum_i D_i$: 界面电导 ($1/\Omega$)

$h=6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$: 普朗克常数

I_{DS} : 漏-源电流

$k_B=1.381\times 10^{-23}\text{J/K}$: 波耳兹曼常数

L_G : 栅长 (nm)

M : 振动人造原子的质量 (kg)

m_e : 电子的质量 (kg)

N : 库仑岛过剩电子数

Ne : 库仑岛过剩电荷 (C)

Q_{BCO} : 库仑岛背景电荷 (C)

Q_{crit} : 临界电荷 (C)

$R'_Q \equiv \hbar/e^2 \approx 4.1 \text{ k}\Omega$: 电阻的自然量子单位 (约化电阻量子)

$R_Q \equiv h/e^2 \approx 25.8 \text{ k}\Omega$: 电阻量子

R_T : 隧道结电阻 (Ω)

R_D : 单电子晶体管漏端隧道结 (漏结) 隧道电阻 (Ω)

R_S : 单电子晶体管源端隧道结 (源结) 隧道电阻 (Ω)

R_G : 单电子晶体管栅电阻 (Ω)

$S_{II}(\omega)$: 电流的谱密度

$S_{UU}(\omega)$: 电势的谱密度

$S_{IU}(\omega)$: 电流和电势间互谱密度

T : 绝对温度 (K)

T_{OX} : 栅氧化层厚度 (nm)

T_{CH} : 沟道厚度 (nm)

V_{crit} : 临界电压 (V)

V_{eff} : 有效结电压 (V)

V_{DD} : 漏电极电压

V_{SS} : 源电极电压

V_{GG} : 栅电压

V_{BB} : 背栅电压

V_{DS} : 漏-源电压

V_{TH} : 阈值电压或库仑阻塞电压 (V)

W : 外电源所做的功

$x_0 = \sqrt{\hbar/M\omega_0}$: 量子力学的零点振幅 (nm)

$Z(\omega)$: 复数阻抗 (Ω)

$\Delta F = F_i - F_f$: 自由能的变化 (eV)

ΔE_F : 费米能量的变化 (eV)

ψ : 波函数

ϕ : 电势 (V)

φ : 相位, 隧道结的相位差

$\Phi_0 = h/2e = 2.06785 \times 10^{-15} \text{ Wb}$: 磁通量子

Φ : 磁通量 (Wb)

λ_F : 费米波长 (nm)

$\lambda = h/(2mE)^{1/2}$: 电子的德布罗意波长 (nm)

$\lambda = \hbar/2(m_e\bar{\phi})^{1/2}$: 隧穿特征衰减长度 (nm)

$\bar{\phi}$: 平均隧穿势垒高度

$\hbar = h/2\pi = 1.05457 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: 约化普朗克常数

ω : 特征角频率

$\tau = R_T C$: 时间常数

Γ^+ : 隧道结的正向隧穿率

Γ^- : 隧道结的反向隧穿率

$\Gamma^{(n)}$: n 阶隧穿率

$\sigma(n, V, t)$: 概率密度分布函数

目 录

前言

基本符号表

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 单电子器件物理	5
1.3 单电子电路原理	6
1.4 单电子器件和电路模拟器	8
参考文献	11
第二章 单电子器件的网络理论和静电学	17
2.1 单电子器件的网络理论	17
2.1.1 等效电源定理	17
2.1.2 单电子隧道结的网络模型	20
2.1.3 栅控一维单电子隧道结阵列的网络模型	22
2.1.4 单电子箱的网络模型	24
2.1.5 电容耦合单电子晶体管的网络模型	26
2.1.6 等效电流源模型	30
2.2 单电子系统静电学	35
2.2.1 静电势的多极展开	35
2.2.2 静电能	37
2.2.3 球形库仑岛	40
2.2.4 超薄圆盘库仑岛	45
2.2.5 环形纳米线库仑岛	46
2.2.6 纳米线库仑岛	47
2.2.7 椭球库仑岛	48
2.2.8 碳纳米管库仑岛	50
2.2.9 单电子系统的自由能	54
2.3 电容耦合单电子晶体管极限性能的估计	59
参考文献	65
第三章 金属基单电子器件的半经典理论	66
3.1 金属基单电子隧道结的半经典理论	66

3.1.1	费米黄金定律	66
3.1.2	隧穿率	69
3.2	单电子隧道结的主方程: 半经典动力学推导法	73
3.3	单电子隧道结的主方程: 密度算符推导法	77
3.3.1	密度算符及其运动方程	77
3.3.2	单电子隧道结主方程的密度算符推导法	79
3.3.3	库仑阻塞和库仑振荡的主方程解释	82
3.4	单电子晶体管的正统理论	90
3.4.1	电容耦合单电子晶体管	90
3.4.2	电阻耦合单电子晶体管	94
3.4.3	电阻和电容串联耦合单电子晶体管	100
3.5	一维单电子隧道结阵列的电荷孤子和反孤子输运	108
3.5.1	单电子电荷孤子和反孤子	109
3.5.2	一维单电子隧道结阵列作为电阻耦合单电子晶体管的栅电阻	118
	参考文献	120
第四章	金属基单电子器件的电磁环境效应	121
4.1	经典电荷弛豫	121
4.2	LC 回路的量子原理	122
4.3	考虑电磁环境效应的单电子隧道结的系统哈密顿	123
4.3.1	电磁环境哈密顿	123
4.3.2	隧道哈密顿	125
4.3.3	准粒子哈密顿	126
4.3.4	系统哈密顿	126
4.4	考虑电磁环境效应的单电子隧道结的隧穿率	126
4.4.1	微扰理论	126
4.4.2	探究电磁环境态	128
4.4.3	相位-相位相关函数	128
4.4.4	隧穿率公式	129
4.4.5	相位-相位相关函数和环境阻抗	130
4.4.6	能量交换概率 $P(E)$ 的一般性质	132
4.4.7	电流-电压特性的一般性质	133
4.4.8	低阻抗电磁环境	134
4.4.9	高阻抗电磁环境	135
4.5	单电子隧道结电磁环境效应的实例	136
4.5.1	以集中电感作为电磁环境: 集中 L 模型	136

4.5.2 以集中电阻作为电磁环境:集中 R 模型	140
4.5.3 以集中电感和电阻相串联作为电磁环境:集中 LR 模型	142
4.5.4 以分布电感、电阻和电容传输线作为电磁环境:分布 $L_0R_0C_0$ 传输线模型	144
4.5.5 以分布电感和电容传输线作为电磁环境:分布 L_0C_0 传输线模型	146
4.5.6 以分布电阻和电容传输线作为电磁环境:分布 R_0C_0 传输线模型	147
4.6 考虑电磁环境效应的单电子晶体管的隧穿率	148
4.6.1 隧穿率	148
4.6.2 低阻抗电磁环境	150
4.6.3 高阻抗电磁环境	152
4.7 考虑电磁环境效应的多结系统的隧穿率	154
参考文献	159
第五章 金属基单电子器件的共隧道效应	160
5.1 弹性和非弹性共隧道效应	160
5.2 单电子晶体管共隧道的半经典理论	161
5.3 一维单电子隧道结阵列的共隧道半经典理论	166
5.3.1 隧穿率	166
5.3.2 $\epsilon^i \rightarrow 0$ 近似	168
5.3.3 $\epsilon^i = -\Delta F_n/2n$ 的近似	170
5.4 无栅电荷偏置的 1D-SETJA 的电流-电压特性分析	171
5.5 栅电荷偏置的 1D-SETJA 的简化网络分析模型	175
5.6 单电子电荷泵的精度分析	177
5.6.1 优化偏置	178
5.6.2 单个隧道结的单电子隧穿	179
5.6.3 初态的衰减	180
5.6.4 共隧道隧穿率	181
5.6.5 泄漏和转换误差	186
5.6.6 共隧道误差	188
5.6.7 热误差	192
5.6.8 频率误差	194
5.6.9 误差的近似估算	195
参考文献	197
第六章 金属基单电子器件的噪声	198
6.1 一般经典噪声机制	198
6.1.1 散粒噪声	198

6.1.2	热噪声	199
6.1.3	闪烁噪声 ($1/f$ 噪声)	199
6.2	单电子晶体管的热噪声和散粒噪声	199
6.2.1	经典噪声的一般公式	200
6.2.2	主方程的频域解	203
6.2.3	谱密度的矩阵形式	203
6.2.4	低频噪声	205
6.2.5	直流噪声	207
6.2.6	超灵敏度单电子静电计的噪声	212
6.3	一维单电子隧道结阵列中的散粒噪声	222
6.3.1	电荷传输的离散性	223
6.3.2	谱密度的计算	225
6.3.3	接地 1D-SETJA 散粒噪声	227
6.3.4	不接地 1D-SETJA 散粒噪声	229
6.3.5	考虑背景电荷时 1D-SETJA 的散粒噪声	230
	参考文献	231
第七章	介观超导隧道结理论	233
7.1	二次量子隧道效应	233
7.2	q 的量子 Langevin 方程	241
7.3	布洛赫波振荡和电流-电压特性	244
7.4	涨落效应	249
7.5	密度矩阵分析法	250
7.6	单电子现象和磁通量子化之间的对偶性	252
7.6.1	对偶性的法则	252
7.6.2	经典器件和电路的对偶性	253
7.6.3	介观器件和电路的对偶性	256
	参考文献	269
第八章	半导体基和人造原子单电子器件理论	271
8.1	半导体人造原子中的单电子效应	271
8.2	线性响应理论	273
8.2.1	基本关系式	274
8.2.2	线性响应	277
8.2.3	电导公式的极限形式	279
8.2.4	非弹性散射效应	281
8.2.5	对库仑阻塞振荡效应的应用	283

8.3 非线性响应理论	288
8.3.1 模型和基本方程	288
8.3.2 大面积量子阱	291
8.3.3 小面积量子阱	293
参考文献	304
第九章 纳机电单电子器件理论	306
9.1 实验型纳机电单电子晶体管	307
9.2 穿梭输运的类型	308
9.3 粒子的经典穿梭模型	310
9.3.1 本征模型	310
9.3.2 电荷传输的穿梭机制	312
9.3.3 耗散系统的模型	316
9.3.4 隧穿区和穿梭区	318
9.3.5 非理想模型	322
9.3.6 栅控纳机电单电子晶体管	324
9.3.7 范德瓦耳斯力的作用	325
9.3.8 三维本征模型	327
9.4 电子波的经典穿梭模型	332
9.5 粒子的量子穿梭模型	337
参考文献	343
第十章 单电子电路原理	345
10.1 单电子模拟电路	345
10.1.1 单电子数/模转换器	345
10.1.2 单电子模/数转换器	355
10.2 单电子逻辑电路	367
10.2.1 电压态单电子逻辑	367
10.2.2 电荷态单电子逻辑	397
10.2.3 单电子和 CMOS 混合逻辑电路	422
10.3 单电子存储器	422
10.3.1 单电子陷阱存储器原理	422
10.3.2 单电子存储器的读出单元	429
10.3.3 多晶硅 MOS 管浮点单电子存储器	431
参考文献	436
第十一章 单电子器件和电路模拟器	438
11.1 模拟器类型和层次结构	438

11.2 蒙特卡罗模拟法	441
11.2.1 理论原理	441
11.2.2 算法流程图	443
11.2.3 模拟器应用实例	444
11.3 主方程模拟器	449
11.3.1 主方程模拟器的构建原理	449
11.3.2 模拟器的应用实例	452
11.3.3 主方程模拟器简介	468
11.4 SET-SPICE 模拟器	470
11.4.1 SET-SPICE 模拟器简介	470
11.4.2 C-SET 稳态主方程模型	471
11.4.3 C-SET 精简稳态主方程模型	475
11.4.4 C-SET 宏模型	483
11.4.5 C-SET 模型的 SPICE 实现	488
11.4.6 模拟器应用实例	490
11.5 纳机电单电子器件和电路模拟	493
11.5.1 经典牛顿方程的数值模拟	494
11.5.2 主方程模拟法	494
11.5.3 蒙特卡罗模拟法	496
11.5.4 NEM-SET 单元电路设计例	497
参考文献	502

第一章 绪 论

1.1 引 言

在过去的 30 多年中, 半导体微电子学所取得的巨大成功之处在于基于硅 CMOS 器件的按比例缩小及由此带来的逻辑与存储芯片密度的不断提高。权威的《国际半导体技术蓝图 (ITRS)》^[1] 预言: 硅 CMOS 器件和集成电路的摩尔 (Moore) 定律在今后 15 年内会不断拓展, 最终具有 10nm 最小特征长度 (栅长 L_G) 的器件将成为商业性的产品。目前的理论和实验研究都肯定了这一看法, 认为这个界限是一定会实现的, 并给出了一种在经济学上合理的发展趋势^[2,3]。

然而, 当硅 CMOS 器件和集成电路的摩尔定律的发展使得器件超过 10nm 界限以后, 其不确定性却不断增加。一方面, 对这一类 MOS 晶体管 (如具有超薄不掺杂沟道的双栅结构) 理论建模后指出^[4]: 即使栅长短至 3nm 左右, 对于大多数逻辑和存储电路的应用来说, 仍然可以提供足够高的性能。另一方面, 具有这种纳米尺度的 MOS 晶体管特性对于其物理尺寸很微小的变化都是极端灵敏的。图 1.1.1 示出了这种建模的典型结果^[3], MOS 晶体管阈值电压 V_{TH} 的变化保持在可接受的限制 50mV 左右时, 5nm 栅长 L_G 的 MOS 晶体管的尺寸变化最好能控制在 0.25nm 左右, 这比 ITRS 对于在 3σ 等级处的临界尺寸控制精度 0.7nm 的预测要严格得多。如此高的参数扰动灵敏度对整个制造工艺技术的精度要求就更加苛刻, 继而导致芯片制造设备成本剧增。因此, CMOS 器件按比例缩小可能的极限也许只能停留在栅长为 10nm 左右, 也就是长期处在可以实现的基本物理限制之前。

这些研究结果成为进一步探索可供选择的器件的强大动力, 以期发现替代 MOS 晶体管栅长低于 10nm 界限后的器件, 使之具有可比较的性能, 且制造成本较低。这种探索将从审视类晶体管的电子器件的基本物理特性开始, 首先注意到的就是著名的波粒二象性。根据量子力学理论可知, 电子既可以看作离散的粒子, 又可以看作连续的德布罗意 (de Broglie) 波, 这依赖于实验的条件。但在 1980 年以前, 研究者尚未对在固体中传导电子的条件有充分的理解, 有关评论可以参阅文献^{[5]~[7]}。

为了说明导电物质 (包括金属常导体、半导体和超导体, 在此统称为导体) 中的载流子 (如电子) 的运动是离散的还是连续的, 我们考虑如下的实例。即将某个导体用一个界面将其分成两部分, 进而回答这样的问题: 如果在任何时刻, 每一

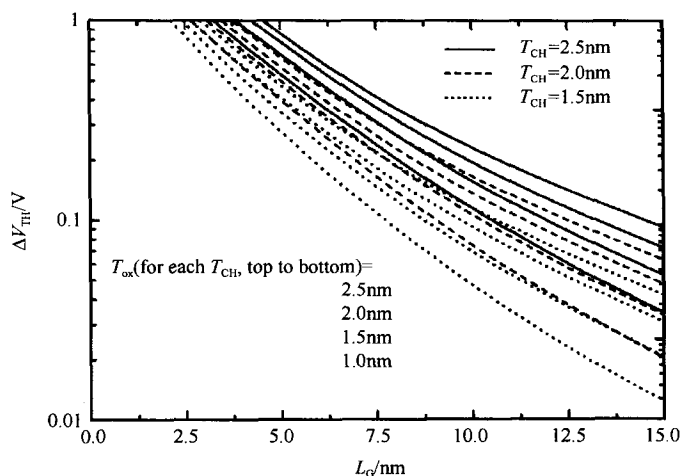


图 1.1.1 硅-MOS 晶体管阈值电压偏差(相对于栅长 $L_G \rightarrow \infty$)作为栅长 L_G 的函数

它们是对最终的硅-MOS 晶体管的简化模型,是在氧化层厚度 T_{ox} 与沟道厚度 T_{CH} 的不同组合下计算而得的,漏-源电压 V_{DS} 被固定在饱和开通电流的典型值处

部分导体中输运的电子电荷是元电荷 e 的倍数,即本质上是离散的粒子图像;或者输运的电子电荷是连续的,即本质上是波动的图像。因为电子的波函数可以分布在这个导体的两部分之间,所以就可以回答将电子看成是粒子还是波为什么要依赖于特定的实验条件。这就是界面的有效隧道电阻 R_T 大于或小于电阻的自然量子单位

$$R_Q \equiv \frac{\hbar}{e^2} \approx 4.1 \text{ k}\Omega \quad (1.1.1)$$

其中, $\hbar$ 是约化普朗克常量。

如果隧道电阻比较小,即满足 $R_T \ll R_Q$, 则每部分导体中的电荷可以认为是连续的。反之,即 $R_T \gg R_Q$, 则可以认为是离散的,即只能为 e 的倍数。

这个关系可以通过多种途径进行推导和解释,其中,或许最简单的表述方法如下。我们知道,在封闭的哈密顿(Hamiltonian)系统中,每个自由度的量子涨落的特征能量 E_Q 为 $\hbar\omega/2$ 左右,其中, ω 是特征角频率。然而,对于我们所讨论的导体的每一部分,其电子电荷的自由度却是一个开放系统,和环境存在着强烈的相互作用。在代表性的论述中,这种相互作用与其说是 LC 振荡器,倒不如说是 R_TC 张弛振荡器。在这种情况下, $\hbar\omega$ 将由 $\hbar/\tau$ 替代,这里, $\tau = R_TC$, C 是两个导体部分之间的电容。当静电能的变化 E_C 达到量级 e^2/C 左右时,两部分导体之间将发生单个电子转换。比较 E_C 和 E_Q , 在消去 C 以后,可以看出,如果 $R_T \ll R_Q$, 量

子涨落将抹去静电能差异,从而力图保持每部分导体中的电子电荷为常数,即为连续输运。

为了理解这个结果的重要性,让我们将它和对于界面电导的朗道(Landauer)公式 $G = 1/R$ 进行结合^[5,6],如下:

$$G = (e^2/\pi\hbar) \sum_i D_i \quad (1.1.2)$$

其中, D_i 是对于电子传输特定横向模式的界面透明度,也就是电子传输的概率;求和是对于所有模式进行的。

比较方程(1.1.1)和方程(1.1.2)可知:如果经过截面(界面)的导体变得很窄,量子约束有可能仅取一个传输模式数,电荷离散化条件的选取就变得简单化,并且自然形成 $D \ll 1$ 。然而,对于具有大截面积 A 的器件,在平均透明度上的限制必须更加严格,即要求 $D \ll 1/N$, 其中, N 是横向模式数。对于简并导体,其数量级为 λ_F^2/A , 其中, λ_F 是费米(Fermi)波长,其典型值的量级为 1nm。

MOS 晶体管是一种很好的器件实例,在它沟道中的电子传输方向上的电子是不被量子化的。因为在电极和沟道之间具有很高的透明度,以致 D 接近 1,而且除此之外,其横向传输模式数也是很高的,即有 $N \gg 1$ 。因此,这种器件即使在沟道中的平均电子数很少,也不会呈现单电子充电,即不会产生库仑阻塞效应。为了充分理解这种器件的工作原理,可以使用电子波动性的概念。

在理论上,对于具有 $R_T \ll R_Q$ 的纳米尺度的电子波器件的工作模式,不仅可以控制 MOS 晶体管的输运实现,而且,也可以实现电子德布罗意波的量子相干效应。在 20 世纪 80 年代和 90 年代初期,科研人员投入了大量的研究分析,并热心宣传和强调这种量子电子器件的前景^[8~11]。然而,其后来经过实际应用前景验证表明是悲观的(或许会有极少数例外)。主要有如下原因:因为如果将其与服从玻色(Bose)统计的光子和声子相比,则存在明显的弱点。这是因为导体中电荷载流子是费米子(Fermions),它服从泡利(Pauli)不相容原理,即它们中的每一个必须有不同的能量,也就是不同的德布罗意波长,从而使得高差异的相干图案要求器件或者工作于是单横向模式,或者是少数模式。

考虑到直接使用电子的德布罗意波波长 $\lambda = h/(2mE)^{1/2}$ 获得单横向模式工作的难度,可以通过控制纳米结构尺寸精确度的精确性 δL ,从连续模式中挑选这种单横向模式,然后再操纵它们的相干性。为了避免由于热扰动所出现的相干性图案的拖尾效应,能量 E 将需要达到超过热扰动的尺度(约为 $k_B T$ 量级)。结合以上两个要求和受到基本常数的限制,我们可以看到,对于室温的情况, δL 达到像在纳米尺度 MOS 晶体管中那样,将低于 1nm。估计显示,这种量子相干器件相对于亚 10nm 尺度的 MOS 晶体管而言,不具有任何实质性的优点。

综上所述,除了某些感兴趣的存储单元的设想外,在 $R_T \ll R_Q$ 的低阻情况下,

与其选取发展量子波器件,还不如使用纳米 MOS 晶体管。而在 $R_T \gg R_Q$ 的高阻范围内,单电子效应占据了统治地位,从而形成了单电子器件的基础。对于以此为主题的简要评论是本书的目的,早期的评论可以参阅文献[12]~[15]。

基于以上的分析和多方面的研究结果表明,迄今为止,当硅纳米 MOS 晶体管按比例缩小到极限以后,除了有可能进一步发展非硅纳米 MOS 晶体管(如纳米线和纳米管 MOS 晶体管、单分子 MOS 晶体管)外,目前还没有单一、普适的纳米电子器件去替代它。研究者呼声最高的也许是单电子器件、单分子器件和人造原子器件等,然而,由于单分子器件和人造原子器件中有相当一部分器件的工作原理是基于单电子器件物理,所以单电子学成为纳电子学研究的重要课题之一。特别应该强调的是,这种器件因为具有可以按比例缩小到原子尺度的优点,而且对材料的选择有极大的自由度,甚至可以覆盖各种分子材料,更增加了对它的研究价值。然而遗憾的是,目前尚未找到提高这种器件电压增益的办法。同时,背景电荷效应和共隧道效应等将会严重破坏单电子器件和电路的正常工作,从而增加对其应用前景评估的不确定性。

当然,正如《纳电子学导论》^[16]一书最后一章中阐述的 Likharev 的观点所指出的,科学家正在通过电容耦合单电子晶体管(capacitively coupled single electron transistor, C-SET)进行非传统单电子逻辑电路设计,试图用平行计算的信息处理方法克服以上所述的单电子器件的某些困难,寻求令人振奋的应用。比如,自展开的单电子神经网络就是其中之一^[17]。根据现在最乐观的估计,这样的系统对于信息处理技术而言,其重要性最终有可能超过微米/纳米 MOS 电子学中的微处理器,而且, Likharev 还进一步建议推进硅纳米 CMOS /纳米线/单电子(单分子)器件混合集成的研究^[3]。

本书的重点为系统论述以金属库仑岛、超导体库仑岛、半导体库仑岛和人造原子或量子点及它们各自的隧道阵列为基础的单电子器件物理,单电子电路原理,单电子器件和电路的模拟。使用的理论方法是基于正统理论的半经典处理,原则上不触及全量子理论(它将由专门著作论述)。对人造原子单电子学的论述,在描述固定的人造原子单电子器件的同时还描述了振动的人造原子单电子器件,后者常被称为机电单电子器件或穿梭单电子器件,它是纳机电系统(nano electro mechanical systems, NEMS)的最基本单元。

人造原子单电子学与金属库仑岛单电子学的最大不同之处在于前者必须考虑电子能级量子化,后者一般则不需要考虑。这一特点不仅使所述理论适用于包括单分子(如球形 C_{60})的单电子器件,而且在某种程度上也适用于半导体库仑岛单电子器件。

在著作[16],[18]中,作者曾对单电子学的发展史、基本概念、实验型器件、器件和电路的基本结构和原理进行了定性的描述,有兴趣的读者可参阅这两本书的