

超大规模

集成电路电子学

蒋建飞等编著

MODAGUIMOJICHENGDIANLUDIANZIXUE

上海交通大学出版社

超大规模集成电路电子学

蒋建飞等 编著

上海交通大学出版社

超大规模集成电路电子学

出版: 上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)

发行: 新华书店上海发行所

印刷: 常熟文化印刷厂

开本: 850×1168(毫米) 1/32

印张: 10.5

字数: 2333000

版次: 1990年2月第一版

印次: 1990年4月第一次

印数: 1—1750

科目: 218—303

ISBN 7-313-00637-3/TN·4

定价: 2.35 元

内 容 简 介

本书对超大规模集成电路电子学中基本物理效应、数理方程、数值解方法、基本参量和特性、电子材料和 GaAs VLSI 电子学、HEMT VLSI 电子学、超导 VLSI 电子学及 VLSI 电子学极限作了较清晰的阐述。内容新颖,突出了超高速必须超集成,必须开掘硅以外的新型固态器件及相应的 VLSI 电子学。

本书可作为高等学校有关专业研究生和本科生教材或参考书,也可作为半导体微电子学、超导电子学、固态电子学、材料科学和工程、计算机科学和工程领域中研究人员和工程技术人员的参考书。

前 言

超高速大容量超级计算机和通信设备发展的需求,促进了超高速电子器件的发展。对超大规模集成电路(VLSI)电子学物理极限研究表明:超高速必须伴随超微型和低功耗。基于这种考虑,高性能VLSI电子学的发展必须用高电子迁移率半导体材料和具有超导电性的超导材料来开掘新型器件和相应的VLSI电子学。本书中讨论的VLSI电子学中基本物理效应、数理方程、数值解方法、基本参量和特性、电子材料和砷化镓(GaAs)VLSI电子学、高电子迁移率晶体管(HEMT)VLSI电子学、超导VLSI电子学及VLSI电子学极限正是在这一指导思想下取材的。

HEMT除常规GaAs肖特基势垒场效应晶体管(MESFET)及相应VLSI已有急速的发展外,以沟道区由二维电子气(2DEG)为载流子的异质结而构成的HEMT也已取得了重大的进展,并且隐含着更大的潜力。

超导电子器件是建立在全新的器件物理基础上的。它们以超导电性、约瑟夫逊(Josephson)效应和超导体—常导体或超导体—半导体邻近效应为出发,开掘出多种有待深入研究才能进行评定的超高速低功耗器件。高临界温度氧化物超导体的发现和全球性的竞争研究为超导VLSI电子学迅速发展提供了良机。

新型电子材料——合金半导体、超导材料的研究成为超高速VLSI电子学最重要的工程基础。物理效应、数理方程、数值解、基本参量和特性的研究为VLSI电子学器件物理和电路物理研究提供基础。VLSI电子学极限的探讨有助于评判研究方向。

本书可以作为我国半导体微电子学、超导电子学、固态电子学、材料科学和工程、计算机科学和工程领域中高年级本科生、研

研究生教学用书或参考书，也可给相应领域的研究人员和工程技术人员参考。

本书第一章，第七章，第八章由蒋建飞执笔；第二章由汤玉生执笔；第三章由余兴执笔；第四章由王慎执笔；第五章由谢可勋执笔；第六章，第九章由陆鸣执笔。郭淳熙同志参加了第七章部分资料收集。全书由蒋建飞统稿。

编 著 者

1988.6于上海

目 录

第一章 绪论	1
第二章 VLSI 电子学物理效应与数理方程	7
2-1 半导体中的基本数理方程	7
2-2 空间电荷效应	9
2-3 热载流子效应	19
2-4 小尺寸量子效应	24
2-5 弹道效应	33
2-6 约瑟夫逊效应	39
参考文献	47
第三章 VLSI 器件基本方程的数值解	49
3-1 半导体器件基本方程的数值解	49
3-2 GaAs FET's 的有限元二维数值分析	75
参考文献	88
第四章 VLSI 电子学基本参数和特性	89
4-1 载流子的迁移率	89
4-2 载流子的注入和复合	102
4-3 半导体的热传导	110
4-4 超导能隙	112
4-5 超导体的穿透深度和相干长度	114
参考文献	120
第五章 VLSI 电子学材料	123
5-1 材料对器件和电路性能的影响	123
5-2 合金半导体的概念	125
5-3 合金半导体的原子排列	127

5-4	合金半导体的晶格振动	129
5-5	合金半导体的能隙与迁移率	133
5-6	异质结	135
5-7	超晶格材料	138
5-8	超导材料	143
5-9	高温超导材料特性	145
5-10	高温超导薄膜	149
	参考文献	149
第六章	GaAs VLSI 电子学	151
6-1	GaAs VLSI 器件结构	153
6-2	GaAs 器件原理和电路模型	160
6-3	GaAs VLSI 基本电路	168
	参考文献	178
第七章	HEMT VLSI 电子学	179
7-1	HEMT VLSI 器件结构	180
7-2	HEMT 物理模型和电路模型	189
7-3	HEMT 大规模集成电路	207
	参考文献	209
第八章	超导 VLSI 电子学	211
8-1	超导 VLSI 器件结构	211
8-2	两端超导器件物理模型	222
8-3	两端超导器件电路模型	238
8-4	超导量子干涉器(SQUID)工作原理与电路模型	245
8-5	超导结型晶体管工作原理	249
8-6	超导结型晶体管电路模型	258
8-7	超导场效应晶体管物理模型和工作原理	262
8-8	超导超大规模集成电路	270
	参考文献	277

第九章 VLSI 电子学基本极限	278
9-1 VLSI 物理极限	280
9-2 VLSI 的工艺极限	306
9-3 VLSI 电路复杂性极限	321
9-4 VLSI 经济极限	325
参考文献	326

第一章 绪 论

超大规模集成电路 (VLSI) 电子学是固态电子学的重要分支。它是固态电子科学和电子工程之间的桥梁。它的研究对象包括 VLSI 物理、材料、器件、电路和工艺中的基础论题。

人们习惯上用集成度来给集成电路 (IC) 进行分类。所谓超大规模集成电路最直观的定义是单片上集成 10 万个到 10 亿个器件的 IC。按集成度可将 VLSI 的发展划分成三个阶段：其一为单片上集成 10 万~50 万个器件，1986 年前已达到此集成度。其二是单片上集成 50 万~几千万个器件，1986 年已经达到此水平。其中单片上有 60 万个器件的 256 k 位随机存贮器已经是生产能力很强的产品。单片上有 200 万个器件的 100 万位的随机存贮器已经开始研制。单片上集成更多器件的 400 万位和 1600 万位的随机存贮器已经列入研究计划。预计 1990 年将要进入单片上集成几千万~10 亿个器件的 25600 万位随机存贮器的研究，而到 2000 年将有可能出现相应的产品。

在提高集成度的同时，人们还企求超高速化，追求 ps 量级的开关速度，这就导致化合物半导体器件和超导器件的迅猛发展。

以 VLSI 为核心的微电子技术的急速发展，使电子工业和机械、光学、能源、冶金、交通和邮电等部门发生了深刻的变化，迅速向着高速化、高效率、高可靠、低功耗、信息化、智能化和系统化的方向发展。LSI、VLSI 的应用正在向各个领域渗透，为人类提供了巨大的信息传递、处理、检测和控制的功能，成为社会新的生产力，日益改变着国民经济和国防建设的面貌，引起了工业结构和人们日常生活的变化。

VLSI 的发展推动了半导体科学、超导体科学、计算机科学及其相关科学的发展。VLSI 本身的发展应该是继续提高集成度、速度、逻辑功能及降低功耗。互补金属-氧化物-半导体(CMOS)VLSI 仍然是近几年的主要研究方向, 而双极型晶体管 VLSI 将加快发展速度, 混合集成和相容集成将成为必然的趋向。必须大力发展多层布线和二次集成。电子设备生产的自动化和机械化, 要求电子部件标准化, 模块化, 这将要求发展混合 VLSI。分析表明, 利用三层布线, 集成度可比单层布线大四倍。双层绝缘衬底上硅(SOI)器件预计在 VLSI 中将占相当大比例。三维 SOI 的研究已经取得很大的进展, 已经探讨了利用深注入氧(O_2)和氮(N_2)到硅(Si)衬底中, 二氧化硅(SiO_2)上多晶硅激光退火, SiO_2 上多晶硅石墨条加热再结晶, 多孔性硅氧化, 横向外延生长等形成的 SOI 结构。

VLSI 物理不是研究物理定律本身的发展规律, 而是研究物理定律在 VLSI 工程中的应用。即它主要研究 VLSI 材料、器件、电路和工艺中已知和未知的物理效应。由于 VLSI 中广泛地使用了多种绝缘体、半导体、常导体、准导体、超导体, 研究这些材料的物理性质和成因, 特别是分析和讨论它们的薄膜成分、晶体结构、原子排列、能带结构、晶格常数、表面和界面效应、电子输运过程、散射机理和迁移率理论等尤为重要。

在 VLSI 中, 常用的绝缘材料有 SiO_2 , 氮化硅(Si_3N_4), 三氧化二铝(Al_2O_3)和某些金属的氧化物。常用的半导体材料有元素半导体 Si 和 III 族元素铝(Al)、镓(Ga)、铟(In)和 V 族元素磷(P)、砷(As)、锑(Sb)分别构成九种可能的化合物半导体和合金半导体。常用的常导体有 Al、钼(Mo)和钨(W)等。常用的准导体有高掺杂多晶硅(Poly Si), 硅金属化合物($MoSi_2$, $TaSi_2$, WSi_2), 多晶硅表面金属氧化物(Poly Si/ $MoSi_2$, Poly Si/ $TaSi_2$, Poly Si/ WSi_2)以及 Al-Si/Poly Si, Al-Si-Cu/Poly Si, Al-Si-Cu/Si 金属化合物等。常用的超导体有铅(Pb)、In、In-Pb 合金、铌(Nb)、 NbN 、 Nb_3Ge 、 Nb_3Si 、 $LaBaCuO$ 、 $YBaCuO$ 和 $BiCaSrCuO$ 等。

应该指出:在半导体材料中目前硅仍为主要材料,对其物理性质的研究已日趋成熟,待研究的课题是硅片直径不断增大所带来的掺杂均匀性,表面平整性及应力效应。化合物半导体材料和合金半导体材料的研究正越来越占据重要地位。前者中的 GaAs 已经初步确立了应用地位,现在正在进行完善化的研究。后者是一个新崛起的领域,是未来的关键半导体材料,必须从晶体生长机制、相图、多层薄膜制备、薄膜量子效应等多方面从事探索。

未来的 VLSI 对超导材料寄予很大的希望,高温以致室温超导体的研究有可能带来电子学的革命性变革。重要的课题是薄膜制备、高质量材料势垒形成、同质和异质界面效应、多层膜和超晶格的研究。

在器件研究中,主要研究构成 VLSI 器件所依据的物理效应,诸如表面场效应、调制掺杂效应、弹道效应和约瑟夫逊效应等;研究二维电子系统的性质和输运理论;研究描述器件特性的物理方程;研究超集成化引起的各种小尺寸量子效应;研究电子、空穴、电子对、光子、声子等复杂系统的输运过程;研究器件结构设计、物理模型和电路模型。

从更深的意义上来考虑,由于 VLSI 所用的固态材料本身同时兼有电、磁、光、声、热等物理效应,在设计高集成器件时综合利用这些效应是很重要的,它将使传感器件有可能和标准计算机电路进行单片集成,从而达到传感器—A/D 转换器—计算机电路—D/A 转换器—传感器的系统集成,使 VLSI 进入更高的发展阶段。

在 VLSI 电子学中,超集成硅器件、砷化镓器件、超晶格与二维电子器件和超导器件是当前器件研究的主要方向。超高速大容量电子计算机、超高速大容量通信设备和一切高速模拟与数字系统的发展,都要求不断探索新型 VLSI 器件,在这种探索中,提高速度和减低功耗成为主要追求目标。在给定的能耗下,要想获得高速度,就必须减小开关时间,也就是必须减小器件和电路的工作

电压,增大工作电流,减小器件尺寸和增大器件载流子迁移率。为了满足以上要求,除了探求不同的物理机理和新材料外,说明高速化必须微型化。

器件微型化将要受到基本物理限制和工程限制,这些限制主要包括工艺极限、材料极限、物理极限、器件极限和电路极限等。

工艺极限由于微米、亚微米、毫微米加工技术的发展已经大大扩大了,这方面的发展还有很大潜力。

材料极限是微电子材料的物理性质决定的,对于半导体,禁带宽度大的材料其器件耐压也高;介电常数小的材料电感应弛豫时间小,有利于开关速度的提高;饱和速度高的材料器件极限速度高;热传导系数大的材料有利于散热,本征载流子浓度低的材料绝缘性能好。

突破基本材料的极限是研究超晶格等复合材料和超导体等新型材料,后者的导电机理已完全不同于半导体材料。

VLSI 电子学的电路研究中,主要研究超集成化以后所带来的热效应、物理极限和工程极限。

应该指出:器件极限实际上包含着理论极限和实践极限两种。例如,热起伏效应限制了每个开关动作的最小能量要大于几个 kT ,但实际上将受到可行的冷却温度的限制。理论上, GaAs 及 InP 比 Si 的迁移率要高 2~20 倍,实际上由于无 SiO_2 类似的稳定,低界面态,可以作为掺杂掩膜的介质等特性,故界面处的迁移率离开理论值还有较大的距离。MOS 器件的最小沟道长度的极限,理论上由源一漏穿通决定,实际上由于刻蚀等微加工限制,无法实现。

超大规模集成电路电子学的发展与微加工技术密切相关,当人们要求固体图形的线条加工精度达到 $0.1\mu\text{m}$ 以下时,现有半导体理论中一些基本概念已不再适用,许多原来认为无关紧要的次级效应都会上升为一级效应。比如表征半导体材料宏观性质的基

本长度, 诸如载流子平均自由程、掺杂原子的平均间距和德拜屏蔽长度等都已和 VLSI 中器件图形尺寸达到相同量级, 电子的量子效应将明显地呈现出来。此时就无法把半导体看作是宏观均匀的材料, 而必须考虑各种微观参量。

为此, VLSI 电子学向理论工作者显示了无限宽广的新研究领域。如果说半导体能带理论和表面态理论的研究曾经为集成电路的发展奠定了基础的话, 那末表面相理论、表面物理、表面和界面的微观结构、原子间的跳跃式电导, 单电子和电子对隧道效应、低维电子系统物理、超晶格物理和低维电子系统 Josephson 效应等课题的深入研究和突破, 将为 VLSI 的发展奠定理论基础。

本书共分九章, 第一章为绪论, 主要介绍 VLSI 电子学的研究对象和发展方向。第二章至第五章介绍 VLSI 电子学中带有共性的基础问题, 其中第二章为 VLSI 电子学物理效应与数理方程, 介绍了半导体器件物理中的泊松方程, 连续性方程, 电流密度方程, 热流方程, 空间电荷效应, 热载流子效应, 小尺寸量子效应, 弹道效应和超导电子学中的约瑟夫逊效应。第三章为 VLSI 电子学基本方程的数值解方法, 主要介绍有限差分法和有限元法。第四章为 VLSI 电子学基本参数和特性, 介绍了半导体中载流子迁移率, 载流子的注入和复合, 半导体的热传导和超导能隙, 超导穿透深度和相干长度, 超导 G-L 参量等概念和描述方法, 它们对理解 VLSI 电子学中载流特性等极为重要。第五章为 VLSI 电子学材料, 主要介绍了材料对 VLSI 电子学器件和电路性能的影响, 介绍了化合物半导体材料高迁移率特性和超导材料特性。第六章至第八章介绍 VLSI 电子学的工艺技术, 器件结构, 器件物理模型, 电路模型和集成电路技术。第六章为 GaAs VLSI 电子学, 第七章为 HEMT VLSI 电子学, 两者在电路模型和集成电路技术上有许多相似性, 实际表述时第六章偏重于集成电路技术, 第七章偏重于器件物理模型和电路模型。第八章为超导 VLSI 电子学, 介绍了各种超导器件结构, 器件物理模型和电路模型和超导超大规模集成电

路。第九章为 VLSI 电子学极限,介绍了 VLSI 物理极限,工艺极限,电路复杂性极限和经济极限。

参 考 文 献

- [1] 王守觉,冯宏娟,半导体情报, Vol. 1, 1988, pp.1
- [2] 蒋建飞,第四届全国半导体集成电路和硅材料年会,1985, 8, 呼和浩特
- [3] 周秀树,固体物理(日), Vol. 16, No. 4, 1981, pp.45
- [4] 凤 垂井,固体物理(日), Vol. 15, 1980, pp.705
- [5] 二井理郎等,エレクトロニクス,昭和 59 年 1 月号,pp.48
- [6] 早川尚夫,应用物理(日),第 53 卷,第 6 号,1984, pp.464
- [7] 蒋建飞编,超导器件物理,国防工业出版社,1988
- [8] Y.E.Mansy, *IEEE J. of SSC*, Vol, SC 17, No. 2, 1982, pp.197
- [9] R.Troutman, *IEEE on ED*, Vol, ED 26, 1979, pp. 461
- [10] D.K.Ferry VLSI Electronics, Microstructure science. Vol.1981, pp.231
- [11] M.Ohmori, Thern, *Symp On GaAs and Related Compounds*, 1984
- [12] C.O.Bozler, *IEEE J. of ED*, VOL, ED 27 No. 6, 1980
- [13] H.Sakaki, *Jpn J. Appl Phys* 21, 1982
- [14] N.Fujimaki, et al. *JJpn. APPL. Phys* 24 L1 1985
- [15] W.H.Henkels, et al *J. Appl Phys*. 58 1985, pp.2371

第二章 VLSI 电子学物理效应 与数理方程

固体的物理效应对 VLSI 电子学的发展有着很重要的作用。物理效应是器件结构和特性的基础。如晶体管是基于半导体 PN 结中的输运特性, 而该特性正源于其本身的空间电荷效应; MOS 晶体管是基于半导体表面电场效应; 超导器件是基于约瑟夫逊效应等。

器件的研究又展现出各种新的物理效应。在集成电路按比例缩小的发展过程中, 随着 MOS 器件沟道长度的缩短, 导致了短沟道效应。这种效应包括载流子速度饱和效应、高功耗密度效应、高电流密度效应、迁移率下降效应、自锁效应、热电子效应、源漏寄生电阻效应、反型层厚度效应、漏感应势垒效应、亚阈值效应、电荷分配效应等。充分认识这些效应会给 VLSI 技术带来促进。

物理效应需要用数理方程来描述。因此, 器件的物理效应和数理方程两者是相辅相成的。本章将着重讨论 VLSI 电子学中的一些主要的物理效应及其相应的数学方程。

2-1 半导体中的基本数理方程

半导体中的基本数理方程有泊松方程、连续性方程、电流密度方程和热流方程等。这些方程的建立及其物理意义在很多教科书中均有详细的描述。这里仅给出主要结果。

一、泊松方程

描述空间电势 ψ 与空间电荷密度 ρ 之间关系的表达式为泊松

方程,即

$$\nabla \cdot \nabla \psi = -\rho/\epsilon \quad (2-1)$$

式中 ϵ 是介电常数, ρ 是空间电荷密度,

$$\rho = q(p - n + c) \quad (2-2)$$

其中 p, n 分别为半导体中的空穴和电子浓度; c 为附加浓度,如电离杂质浓度等, q 为电子电荷量。

二、连续性方程

连续性方程描述了带电粒子流的运动,它表明了任何时间于任何位置均无电荷堆积。在半导体中,连续性方程对电子和空穴分别成立,即有

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR \quad (2-3a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_p - q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR \quad (2-3b)$$

式中 $\mathbf{J}_n, \mathbf{J}_p$ 分别表示电子和空穴的电流密度; R 是用来描述电子和空穴的产生和复合的, R 为正时表示复合,为负时表示产生。

三、电流密度方程

电流密度方程描述了总的传导电流为扩散电流分量与漂移电流分量之和。在半导体中,电流密度方程对电子和空穴分别成立,即有

$$\mathbf{J}_n = q\mu_n n \mathbf{E} + qD_n \nabla n - q\mu_n h \left[\frac{kT}{q} \nabla \ln(n_{ie}) \right] \quad (2-4a)$$

$$\mathbf{J}_p = q\mu_p p \mathbf{E} + qD_p \nabla p + q\mu_p p \left[\frac{kT}{q} \nabla \ln(n_{ie}) \right] \quad (2-4b)$$

式中 μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散长度, E 为电场强度, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, n_{ie} 为本征载流子浓度。而 (2-4) 式中的最后一项表示由本征载流子 n_{ie} 在空间上的变化所引起的电流密度。显然它考虑了带