

超导器件物理

蒋建飞 编著



国防工业出版社

超导器件物理

蒋建图编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书对超导器件的物理基础, 超导二极管、超导量子干涉器、超导结型晶体管、超导场效应晶体管和超导磁通量子器件的结构、原理、等效电路和发展趋势均作了系统的论述。本书的特点是把超导器件的物理基础、工作原理和制造技术与半导体器件的物理基础、工作原理和制造技术作了类比和对偶的比较, 这不仅为超导微电子学工作者而且为广大的半导体微电子学工作者掌握超导微电子学这门新学科提供了捷径。

本书可供从事超导器件、半导体器件以及集成电路科研、教学和生产的科技工作者参考。

超 导 器 件 物 理

蒋 建 飞 编 著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张19 502千字

1988年7月第一版 1988年7月第一次印刷 印数: 0,001—2,760册

ISBN7-118-00016-7/TN3 定价: 5.55元

代 序

自从 1957 年 J. 巴丁 (Bardeen)、L. N. 库柏 (Cooper) 和 J. R. 施里弗 (Schrieffer) 提出关于超导电性的 BCS 微观理论以后, 超导物理学有了很大的发展。正如其它物理问题一样, 随着基础理论研究的深入, 实用性的探索也将随之发展。

1960 年, 超导准粒子隧道二极管问世不久, 约瑟夫逊结又于 1962 年出现。随之又发明了许多利用超导电性的器件。利用超导体的超导性可以构成大电流密度, 从而产生超强磁场, 这方面的实用价值不言而喻。作为超高速、低功耗的需要, 超导器件已成为固态器件的重要组成部分。国内外正在努力探索利用超导器件研制超大规模集成电路 (VLSI)、大容量超高速数字电子计算机和模拟应用, 超导物理及其器件是当代前沿科学技术的重要分支。

本书的一个主要特点是把超导物理与超导器件作为一个整体来论述。书中对超导现象和超导器件的物理基础——超导宏观唯象理论、超导宏观量子理论等, 超导器件——超导二极管、超导量子干涉器、超导结型晶体管、超导场效应晶体管和超导磁通量子器件的结构、原理和等效电路以及超导器件的发展趋势均作了系统的论述。本书另一个特点是把超导器件的物理基础、工作原理和制作工艺与半导体器件、集成电路的物理基础、工作原理和制作工艺作了“对偶”比较, 这为广大半导体微电子学工作者掌握超导器件这门新技术提供了捷径。

本书对于从事超导器件、超导电子学、半导体器件、大规模和超大规模集成电路等方面工作的科技工作者、大学师生, 是一本很有价值的参考书。

方俊鑫

1985 年 3 月

前 言

本书共分三篇十五章。第一篇从第一章至第五章为概论,重点论述了超导器件的发展潜势,超导器件与半导体器件的类比和对偶,高温超导材料和器件的发展与展望,这对本书感兴趣的各类读者均能顺利阅读。第二篇从第六章至第十章为物理基础,重点论述了超导电性的宏观唯象与宏观量子理论,还论述了准粒子和电子对隧道效应,这部分可供具有大学理工科基础知识的读者根据自己的实际情况进行选读。第三篇从第十一章至第十五章为器件原理,论述了各类超导器件的结构、原理和等效电路。其中超导量子干涉器及其阵列、超导结型晶体管、超导场效应晶体管和超导磁通量子器件对发展超大规模集成电路有积极意义,这特别适宜从事大规模和超大规模集成电路工作的读者参考。

上海交通大学方俊鑫教授、王志成副教授曾详细审阅了本书手稿,提出了宝贵的修改意见,方俊鑫教授还为本书写了代序,作者在此表示衷心谢意。

限于笔者水平,在内容和材料的取舍上,可能存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

作 者

1984年6月于上海

目 录

第一篇 概 论

第一章 超导器件发展潜势	1
第一节 引言	1
第二节 发展潜势	3
第三节 响应时间	4
第四节 功耗	7
第五节 优值系数	9
第六节 损耗与色散	12
第七节 最大采样频率	14
第八节 超高灵敏度	15
第九节 美中不足	16
第十节 一分为二	17
第十一节 寄予期望	17
参考文献	19
第二章 从半导体器件到超导体器件	21
第一节 引言	21
第二节 半导体晶体管的发明	22
第三节 半导体器件的发展	23
第四节 半导体器件的展望	37
第五节 超导电性和超导器件发展史	64
第六节 固体多功能器件展望	67
参考文献	72
第三章 超导器件与半导体器件的类比和对偶性	73
第一节 引言	73
第二节 导电性的类比	73
第三节 准粒子能谱的类比	77
第四节 隧道效应的类比	83
第五节 器件性能的类比	85

第六节	器件结构的类比	87
第七节	器件工艺的类比	87
第八节	对偶性定则	89
第九节	物理量子的对偶	91
第十节	电、磁探测器的对偶性	95
第十一节	模拟器件的对偶	98
第十二节	数字器件的对偶	101
参考文献	.....	105
第四章	基本术语和参数	106
第一节	引言	106
第二节	基本状态	106
第三节	磁通现象	113
第四节	临界参量	116
第五节	约瑟夫逊现象	124
参考文献	.....	136
第五章	高温超导材料与器件展望	137
第一节	引言	137
第二节	高温超导体与微区超导效应	137
第三节	高温超导体与晶体结构	155
第四节	高温非生物有机超导体	156
第五节	两个可能的常温超导体实验	159
第六节	高温超导电性理论研究进展	160
第七节	评述与展望	182
参考文献	.....	184

第二篇 物理基础

第六章	宏观唯象理论	187
第一节	引言	187
第二节	超导体的完全导电性	187
第三节	超导体的完全抗磁性	195
第四节	其它实验与现象	198
第五节	超导热力学	206

第六节	二流体模型概念	220
第七节	超导电动力学——伦敦方程	221
第八节	朗道-金兹堡唯象方程	229
参考文献	.....	238
第七章	量子论基础概要	240
第一节	引言	240
第二节	光的波粒二象性	240
第三节	实物粒子的波粒二象性	242
第四节	德布罗意波	245
第五节	测不准关系	246
第六节	薛定格方程	248
第七节	力学量的算符表示	250
第八节	量子论中的表象	254
参考文献	.....	258
第八章	宏观量子理论	259
第一节	引言	259
第二节	超导宏观量子效应	260
第三节	超导宏观量子理论概念	263
第四节	常导体量子理论概要	264
第五节	超导BCS宏观量子理论的物理图 象	269
第六节	$T \neq 0\text{K}$ 时的超导宏观量子方程组	273
第七节	$T \approx 0\text{K}$ 时的超导宏观量子方程组	281
第八节	应用宏观量子理论来描述超导体的热学和电磁学性质	285
参考文献	.....	300
第九章	固体中准粒子隧道效应	301
第一节	引言	301
第二节	隧道效应的基本量子理论	301
第三节	半导体准粒子隧道效应	317
第四节	超导准粒子隧道效应	335
第五节	真空隧道效应	353
参考文献	.....	354
第十章	超导电子对隧道效应	356
第一节	引言	356

第二节	弱耦合超导体	356
第三节	超导电子对隧道效应方程的费曼推导法	358
第四节	超导电子对直流隧道效应	362
第五节	超导电子对交流隧道效应	365
第六节	超导电子对隧道效应方程的再讨论	370
第七节	约瑟夫逊-麦克斯韦方程	380
第八节	电磁振荡效应	384
第九节	自测效应	385
第十节	超导电子对隧道效应方程的格林函数推导法	392
第十一节	超导电子对隧道效应方程的 BBS 推导法	394
第十二节	非平衡超导电子对隧道效应方程	399
第十三节	从基本物理定律出发推导超导电子对隧道效应方程	402
参考文献	.....	412

第三篇 器 件 原 理

第十一章	超导二极管	414
第一节	引言	414
第二节	超导二极管结构与工艺	415
第三节	RSJ等效电路	427
第四节	RCSJ等效电路	448
第五节	超导结二极管RCS-LJ等效电路	463
第六节	评述、特性和高频限制	465
参考文献	.....	469
第十二章	超导量子干涉器	471
第一节	引言	471
第二节	SQUID结构	472
第三节	单结SQUID原理	479
第四节	双结SQUID原理	490
第五节	多结 SQUID 描述方程	498
第六节	SQUID 阵列	499
参考文献	.....	504
第十三章	超导结型晶体管	505

第一节	引言	505
第二节	基本结构	505
第三节	超导电子对的产生与复合	509
第四节	超导结型三极管的放大特性	510
第五节	超导结型三极管的基本方程组	514
第六节	势阱结与超导结型三极管理论	528
	参考文献	540
第十四章	超导场效应晶体管	542
第一节	引言	542
第二节	基本结构	542
第三节	半导体耦合材料的性质	546
第四节	临界沟道长度	548
第五节	超导器件电极材料的性质	554
第六节	超导场效应晶体管的原理	557
第七节	2DEG超导场效晶体管	564
	参考文献	568
第十五章	超导磁通量子器件	569
第一节	引言	569
第二节	孤立子与超导传输线中的磁通量子	569
第三节	超导传输线中单个磁通量子的运动	575
第四节	磁通量子串和电磁波的相互作用	581
第五节	超导磁通量子模拟器件	586
第六节	超导磁通量子数字器件	592
	参考文献	597

第一篇 概 论

第一章 超导器件发展潜势

第一节 引 言

任何一门科学的发展都是与其应用的研究联系在一起的。半导体科学之所以成为本世纪最引入注目的科学分支之一，不仅在于探明了其基本物理机理，而且还在于美国固体物理学家肖克莱、巴丁和布拉坦及其助手们发明了点接触晶体管的雏型，以及随之而发展起来的半导体电子工业和技术。

同样，超导体科学与技术所以越来越引起人们的重视，也不仅在于人们经过长期的努力，初步找到了超导量子机制的某些规律，而且还在于人类开始探索将已有的成果付之应用的途径。目前，这

表1-1 超导电现象及其应用

超导电现象		应 用
完全导电性		超导电力设备；电动机，发电机，超导传输电缆
		超导磁体：核聚变反应，能源贮存，汽泡室，磁悬浮
完全抗磁性		超导微波谐振器；磁屏蔽
超导态与常导态之间转移	磁场	冷子管
	热	超导测辐射热计，超导开关
宏观量子效应	磁通量子化	超导量子干涉器；高灵敏度电磁测量计，心磁计
	直流约瑟夫逊效应	地下资源探测，开关器件，存储器件，放大器件
	交流约瑟夫逊效应	电磁波器件；通信用器件，无线电望远镜，远红外检测器，标准电压

种应用主要表现在大尺寸范围的超导磁体和小尺寸范围的超导电子学。对于超导电性现象及其应用，可以通过表 1-1 来表示。

以宏观量子效应应用为基础的超导器件物理，是以磁通量子化及约瑟夫逊隧道效应为依据的。从应用价值来看，我们可以说，约瑟夫逊效应的发现及约瑟夫逊结二极管、晶体管的制成，与第一只半导体晶体管的发明将具有同等的历史地位。

超导电子学的出现，一方面是由于超导器件和电路与半导体器件和电路相比，在特性上有着无可比拟的优点；另一方面，是由于它在某些方面具有半导体器件和电路无法完成的功能。超导电子学的这种优越性是由其物理原理决定的。从器件和电路性能上来评价，是一种优值的固态电子学，它将具有超低功耗、超低噪声、超高频率、超高速度和超高可靠性等特性。

超导电子学的应用范围十分宽广，它将可以遍及近代物理学和工程研究的许多领域。近代物理学的前沿——基本粒子和引力波理论与实验研究，开始从超导电子学中获得帮助。新兴学科“生物医学工程”已经注意到超导器件是探测人体微弱心磁现象的有力工具。无线电微波技术对超导电子学用于振荡器、混频器、检波器和参量放大器等领域寄予很大希望。超导电子计算机和各类超导数字、模拟电子仪表的进展，构成了超导电子学的两大分支：超导数字电子学和超导模拟电子学。超导电子学的发展还为空间技术研究开辟了更好的前景。

近几年，超导器件发展很快。约瑟夫逊结二极管、超导量子干涉器、超导双结晶体管 and 超导场效应晶体管的研究很活跃。超导集成电路在数字和模拟两个领域中都获得了很大的发展，超导电子计算机中所用的超导存储器和各类超导逻辑集成电路以及超导 A/D 和 D/A 转换器的性能，是相应的半导体集成电路难以比拟的。

超导器件、电路的微加工技术与半导体器件、电路的微加工技术之间虽有很大的相似性，但由于所依据的物理原理完全不同，这又导致超导器件、电路的加工过程将会出现某些困难。

第二节 发展潜势

超导器件和电路的发展潜势是由其固有的特性决定的, 这些特性具体地说有以下几点:

1. 超导器件和电路的响应时间极快, 通常能低至 10^{-12} s 以下, 比起半导体器件和电路要快 1 至 2 个数量级。
2. 超导器件和电路的集成度极高, 单个约瑟夫逊结可望达到仅比生命细胞稍大一点。有可能比半导体器件和电路的集成度要高 4 至 5 个数量级。
3. 超导器件和电路的功耗极低, 通常认为单个器件可以低至 $1\text{ }\mu\text{W}$, 比半导体器件和电路要低 3 至 4 个数量级。
4. 超导器件和电路的能耗极小, 通常认为每个门只消耗 10^{-15} 至 10^{-17} J, 比半导体器件和电路要低 3 至 5 个数量级。
5. 超导器件和电路的工作电压极低, 通常可以认为能低至 3 到 10mV, 比半导体器件和电路要低 3 个数量级。
6. 超导传输线具有极低的功耗和十分有利的匹配性能。
7. 超导器件和电路在一定程度上具有极高的可靠性, 因为低温的工作环境避免了电迁移和化学反应所造成的失效。

当前固态器件为适应电子计算机的超高速、超微型化的发展需要, 正在向超大规模集成化方向发展。虽然从微型化的角度来看, 它的上限目前尚难定论, 但有一点是肯定的, 即研究追求的目标将是在单片上能够集成的器件数量与人类脑细胞数目相当, 而真正的极限在于物理限制。从超高速的角度来看, 人们追求的目标将是超高速电子计算机的主时钟信号发生器发出的信号间隔的周期时间缩短到毫微秒和亚毫微秒量级。目前大多数高性能数字电子计算机的周期时间是在 30ns 到 50ns 之间。要把电子计算机的周期时间从 30ns 下降到 1ns, 一方面要把构成电子计算机的基本单元——电子开关器件的状态改变时间缩小到 1ns 以下; 另一方面要使信号从一个电子开关器件传输到另一个电子开关器件的传输时间远小于电子计算机的周期时间, 因此, 任何超高速

电子计算机都必须做得很小。我们知道，在电子计算机中，电信号在 1 ns 的时间内的传输距离大约只有 15 cm ，这就要求在设计时必须考虑到电信号的传输距离不得超过 15 cm 。因此，要把几百万个甚至更多的电子开关器件构成一台电子计算机，就必须把它的容积限制在 15 cm^3 的小空间内。要想同时获得这样高的密度和速度，必须选择最合适的固态电子开关器件。对于半导体器件的研究表明，如果用常规的硅材料或砷化镓材料等制造未来的超集成器件，由于加工的困难和温升等因素是难以实现的。

通过研究，人们发现超导器件是解决集成度、功耗和速度三者之间矛盾的优值方案。当然，研究者也不排斥其它可能的途径，比如，最近研究成功的由具有高电子迁移率的砷化镓和镓铝砷材料制成的半导体器件，在低温下将有可能和超导器件相竞争。因为它的电子迁移率在 300 K 时达到 $6200\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，在 77 K 时达到 $38000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。然而，超导器件不会停留在目前的水平，随着研究的深入将有可能找到更好的方案，以显示自己独有的优越性。下面以对比的形式来论述速度、功耗和集成度之间的相互制约关系，并定义优值系数。

第三节 响应时间

在集成电子学特别是数字集成电子学中，速度或者说响应时间和功耗是最重要的技术指标。响应时间又可以分为理想响应时间和实际响应时间。理想响应时间又称为本征响应时间，把它记为 t_{1a} ，在超导器件和电路中，它是由超导体的能隙大小来决定的。实际响应时间是由器件和电路的时间常数决定的，把它记为 t_a ，有时也就把它简称为响应时间。以后如不加特殊说明，本书中所说的响应时间，即指实际响应时间。

可以定义超导约瑟夫逊结器件的本征响应时间 t_{1a}^{J} 为

$$t_{1a} = \frac{\hbar}{2\Delta(0)} \quad (1-1)$$

式中 $\hbar = 1.055 \times 10^{-27}\text{ erg}\cdot\text{s}$ 为约化普朗克常数；

$2\Delta(0)$ 为超导体在 0K 时的能隙，常用单位为 meV。

如果温度为 T_c 以下的任意温度，则能隙将表示成为 $2\Delta(T)$ ，这里 T_c 称为超导临界温度，即超导体由超导态到常导态或由常导态到超导态的转变温度。显然，对于同一超导体， $2\Delta(0)$ 值最大， $2\Delta(T_c)$ 值等于零。表 1-2 给出了一些超导器件和电路中常用超导材料的本征响应时间。表中 meV 表示毫电子伏，ps 表示皮秒。从表 1-2 中不难看出，就目前已有的超导材料而言，超导约瑟夫逊结的本征响应时间可以低至亚皮秒量级，也就是说，可以达到 10^{-13} s 量级。在表中还列出了 T_c 和 $2\Delta(0)$ 的比值，它的范围从 2.53~3.59K/meV，但中心值集中在 3.0K/meV 附近。如果这个关系对超导材料是普遍适用的，只要人类最终能够实现常温超导，即使 T_c 达到 300K，相应的能隙将达到 100meV，而本征响应时间就有可能达到 10^{-15} s 数量级，当然，此时功耗将有相应的提高。

表1-2 超导器件和电路中常用超导材料的本征响应时间

超导材料	临界温度 $T_c(K)$	能隙 $2\Delta(0)$ (meV)	$T_c/2\Delta(0)$ (K/meV)	本征响应时间 $t_{fd}(ps)$
In	3.4	1.10	3.09	0.58
Sn	3.7	1.15	3.22	0.57
Pb	7.2	2.40	3.00	0.27
Nb	9.2	2.80	3.28	0.22
Ga	8.40	3.32	2.53	0.19
NbN	16.00	4.80	3.33	0.13
Nb ₃ Sn	18.00	5.40	3.33	0.12
Nb ₃ Ge	23.00	6.40	3.59	0.10

然而，必须指出，由于约瑟夫逊隧道结的介质层(隧道势垒区)极薄 (20 Å 左右)，其结电容的数值是可观的。如果把约瑟夫逊结处于常导态时的电阻记为 R_N ，电容记为 C_N ，则其时间常数就为 $R_N C_N$ ，它就是我们前面所说的实际响应时间 t_d ，电容 C_N 可以通过约瑟夫逊结的结构尺寸和势垒层的介质性质来估算。 R_N 的确定就比较困难，特别是对于合金超导材料，就更为困难。目前已

有的研究成果是由铅 (Pb) 和铟 (In) 的合金决定的 R_N 专利。根据这个专利, 再综合分析其它许多文献, 通过推论可以得到图 1-1 所示的超导约瑟夫逊结响应时间的估计曲线。这个图表示当响应时间 t_d 受到时间常数 $R_N C_N$ 限制时, 响应时间 t_d 与临界电流密度 J_c 的关系。图中左边的纵坐标给出了超导材料响应时间对铅铟合金本征响应时间的归一化值, 即 t_d/t_{ia} 的比值。图中右边的纵坐标给出了铅铟合金的约瑟夫逊结响应时间 t_d , 单位为 ps。图中实曲线上圆圈旁边的数字为隧道势垒层厚度, $\times$ 为从几篇文献中摘录的实际测量值, 虚线 A 为 1978 年获得的一般值, 虚线 B 为铅铟合金的约瑟夫逊结本征响应时间的极限值, 虚线 C 为已发表工作的最高值, 图中数据的精确程度约为半个数量级。

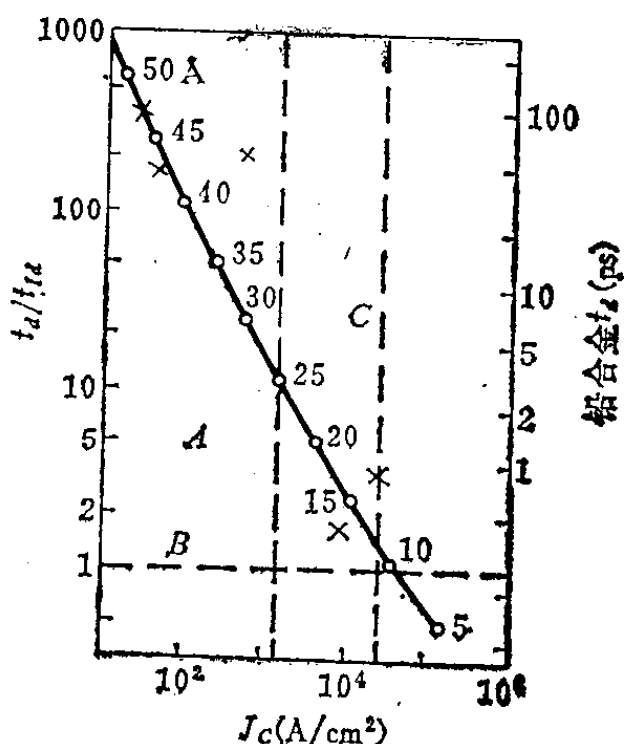


图1-1 约瑟夫逊结响应时间的估算曲线

根据已经制成的可靠的铅合金约瑟夫逊结实验结果, 其临界电流密度 J_c 至少已经达到 $2 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$, 从图 1-1 中可以查得归一化响应时间为 13, 即 $t_d/t_{ia} = 13$ 。因为铅合金超导体的 t_{ia} 为 0.27ps, 故约瑟夫逊结的响应时间 t_d 为 $0.27 \times 13 = 3.5 \text{ ps}$, 这是一个相当低的数值, 随着工艺水平的不断提高, 它在极限范围内还会有一个数量级的减小, 即有可能尽量接近其本征响应时间 0.27ps。

当然, 和半导体逻辑功能器件一样, 单个约瑟夫逊结的响应时间并不等于电子开关器件构成逻辑功能器件的响应时间。但基于以上分析, 就每一个开关单元而言, 超导逻辑功能器件响应时间将会比半导体逻辑功能响应时间要小得多。表 1-3 和表 1-4 分

表1-3 超导逻辑功能器件开关单元的响应时间

序 号	优值系数 $Q_1 = P_d t_d (\text{pJ})$	响应时间 $t_d (\text{ps})$	功耗 $P_d (\mu\text{W})$	约瑟夫 逊结数	线 宽 (μm)	参考文献
1	—	13	—	3	2.5	[2]
2	—	32	—	6	5	[3]
3	0.042×10^{-3}	42	1.0	3	5	[4]
4	1.2×10^{-3}	60	17	3	5	[5]
5	—	165	—	1	50	[6]
6	4.76×10^{-3}	170	28	1	25	[7]
7	9.4×10^{-3}	235	40	3	3	[8]

表1-4 半导体逻辑功能器件开关单元的响应时间

序 号	优值系数 $Q_1 = P_d t_d (\text{pJ})$	响应时间 $t_d (\text{ps})$	功 耗 $P_d (\mu\text{W})$	线宽 (μm)	参考文献
1	1.40	34	4.1×10^4	1.0	[9]
2	0.043	63	6.8×10^2	0.5	[10]
3	0.17	75	2.26×10^3	1.0	[9]
4	0.19	85	2.20×10^3	0.4	[11]
5	3.90	86	4×10^4	1.0	[9]
6	0.10	300	1×10^2	1.2	[9]
7	0.50	600	8×10^2	2.0	[12]
8	0.80	1600	5×10^2	2.0	[12]

别列出有关数据，以作比较。

表中的 $Q_1 = P_d t_d$ 称为优值系数，将在后面对其进行专门的讨论。

从表 1-3，表 1-4 中可见，超导逻辑功能开关单元响应时间要比半导体逻辑功能开关单元响应时间小 1 至 2 个数量级。进一步改进微加工工艺，响应时间还会进一步减小。由此可见，在超大规模集成电路中用超导器件做超高速电路单元是很理想的。

第四节 功 耗

要使整机达到微型化和节省能源，必须尽力减小元、器件的功耗。超导器件和电路是目前能够找到的最低功耗的器件和