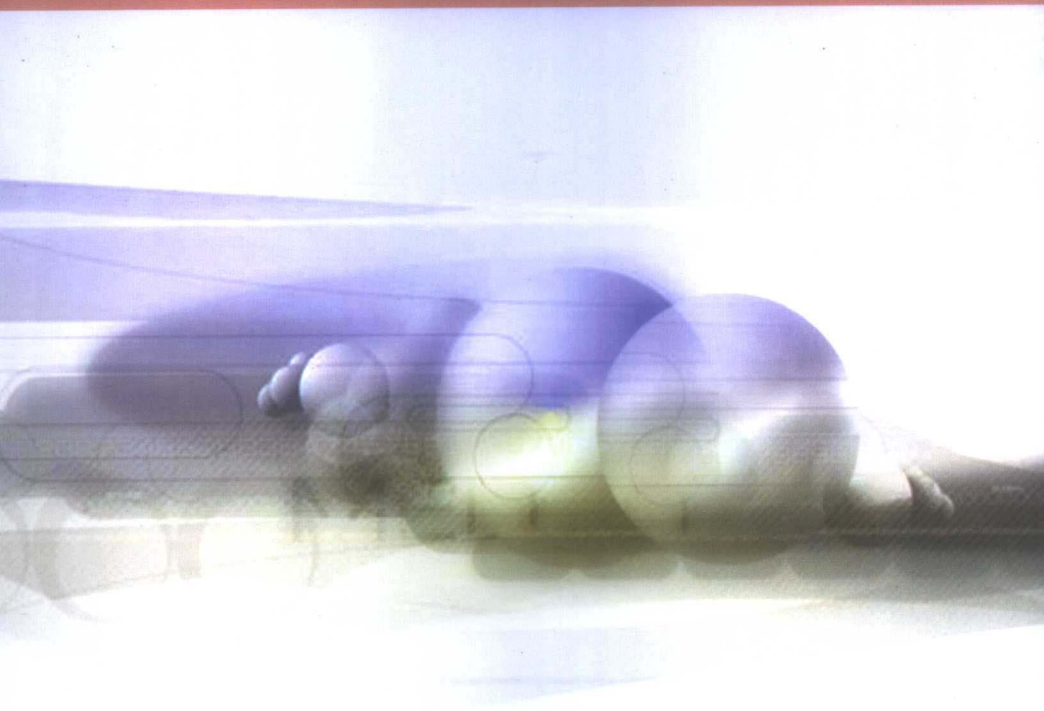


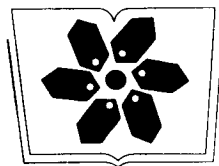
李前树 邵 彬 邹 健 / 著

场与介观约瑟夫森结的 相互作用



科学出版社

www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

场与介观约瑟夫森结的 相互作用

李前树 邵 彬 邹 健 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书重点讨论外场与介观 Josephson 结相互作用系统的动力学性质,特别是非经典性质,包括力学量的量子涨落、压缩效应、超导电流的量子崩塌与复苏效应和流压台阶效应等。全书共分五章,在第一章绪论之后的前两章中,分别讨论了在小电感近似和大电感近似下的量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统,其后两章分别讨论了非含时和含时经典场作用下的介观 Josephson 结系统。最后给出了几个相关的附录。该书是作者关于介观 Josephson 器件基础理论的科学研究总结,它对我国介观 Josephson 器件理论基础的研究和普及有积极作用,同时对我国介观 Josephson 器件及相关介观器件的应用开发研究有参考价值。全书力求内容充实、系统,叙述简明扼要、深入浅出,尽量反映该领域的科学前沿,并附有相关文献,以帮助读者能更快地深入到该研究领域。

本书适合理论物理、光学、超导物理和介观器件及其相关专业的高年级学生、硕士生、博士生、教师和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

场与介观约瑟夫森结的相互作用/李前树,邵彬,邹健著. —北京:科学出版社,2002

ISBN 7-03-011131-1

I. 场… II. ①李… ②邵… ③邹… III. 约瑟夫森结—研究 IV. O511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007057 号

责任编辑:彭斌 姚晖 / 责任校对:钟洋
责任印制:白羽 / 封面设计:黄华斌

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

*

2002 年 12 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2002 年 12 月第一次印刷 印张:6

印数:1—1 500 字数:180 000

定价:20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

1992年7月,我从吉林大学理论化学研究所调至北京理工大学化工与材料学院。为适应军工院校的环境,除了开展对新型高能量密度材料——氮团簇的量子化学计算研究外,逐步开展了一些有军用背景的纳米团簇制备和光电磁性质的实验研究,进而拟开展介观器件的制备研究。但苦于经费和条件,转而想先搞些有关介观器件方面的理论工作。此时,文献中关于介观 Josephson 结器件的几篇理论文章引起了我的兴趣,恰我校青年教师邵彬和邹健同志亦热心于此,于是我就建议他们进行这方面的研究工作。其后他们还先后以我为导师攻读博士学位。本书就是在这些研究工作的基础上整理而成的。值得高兴的是,这两位教师现在都已晋升为教授,真是后生可畏!

本书主要讨论介观 Josephson 结器件在外场作用下的性质,特别是非经典性质。其主要思想源于 Vourdas 在 1994 年的量子化光场与介观 Josephson 结的工作。他的处理方法是宏观 Josephson 结的等效电路 Hamilton 量正则量子化,成为介观 Josephson 结的 Hamilton 量,并对此 Hamilton 量和引入的量子化光场再进行二次量子化,构成量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统的全量子力学处理方法,用以揭示系统的量子化特性。我们亦是把介观 Josephson 结等效电路 Hamilton 量正则量子化,并且引进不同性质的量子化光场,揭示不同性质的量子化光场与介观 Josephson 结所构成系统的非经典特性和潜在的应用前景。同时为突出介观 Josephson 结本身的非经典性质,我们也讨论了非含时和含时经典场与介观 Josephson 结的作用。我们对本书上述这些理论模型的数学求解方法,基本上是近似的处理方法,即或者是采用将 Hamilton 量中 Josephson 非线性能量展开式的无限项求和取有限项的近似,或者是用微扰理论等。当然其中还利用一些物理近似,例如大电感近似、小电感近似、旋波近似和外场近似等。这些研究工作不仅表明介观 Josephson 结本身的非经典性质,同时也说明量子化光场与介观 Josephson 结之间的相互作用,特别是它们同量子化光场与二能级模型原子相互作用系统一样,会

产生一些相类似的非经典性质。这些工作将会对介观 Josephson 结器件的研究、开发和应用有所帮助。

本书中的研究工作和写作得到吉林大学理论化学研究所、理论化学计算国家重点实验室的大力支持。本书稿承北京大学物理系甘子钊院士及戴远东教授和北京师范大学化学系刘若庄院士的推荐。本书的出版得到中国科学院科学出版基金的资助,谨致衷心的感谢。

最后,我们必须指出,作为初学者,限于我们的业务水平,加之成书的时间仓促,本书定会有很多疏漏、不当甚至错误之处,恳请专家、学者和读者在百忙中不吝赐教、批评和指正,以提高我们的学识水平和本书的学术水平,这是我们衷心期盼和感激的。

李前树

2002 年 8 月于北京理工大学

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
1.1 介观系统和介观物理学	(1)
1.2 介观器件及其理论	(3)
1.3 本书的主要内容	(5)
参考文献	(6)
第二章 量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统 I :小电感近似	(8)
2.1 场与介观 Josephson 结相互作用系统	(8)
2.1.1 系统 Hamilton 量	(10)
2.1.2 系统 Hamilton 量的 Bose 子算符形式	(13)
2.1.3 一个简单相互作用系统的时间演化	(18)
2.2 量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统的时间演化	(20)
2.2.1 系统 Hamilton 量	(20)
2.2.2 Heisenberg 图像下力学量运动方程的解	(23)
2.2.3 相互作用系统波函数的时间演化	(25)
2.3 量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统的非经典特性	(28)
2.3.1 介观 Josephson 结的压缩特性	(29)
2.3.2 光场的 Mandel Q 因子	(34)
2.3.3 在介观 Josephson 结中的磁通量和电荷的时间演化	(36)
2.3.4 介观 Josephson 结的高阶压缩性质	(38)
2.4 在 Schrödinger 猫态场中介观 Josephson 结的量子涨落	(45)
2.4.1 介观 Josephson 结的二阶量子涨落	(46)

2.4.2	介观 Josephson 结的压缩特性	(47)
2.5	量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统在 $\cos 2e\phi$ 展开至四阶项下的波函数时间演化	(49)
2.5.1	旋波近似下的系统 Hamilton 量	(49)
2.5.2	系统波函数的时间演化	(53)
2.5.3	系统波函数的 Pancharatnam 相位性质	(55)
2.6	量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统的零点涨落	(58)
2.6.1	系统 Hamilton 量	(58)
2.6.2	系统耦合与非耦合波函数间的么正变换	(61)
2.6.3	系统耦合与非耦合表象中基态波函数间的变换 关系	(67)
2.6.4	系统的真空态涨落特性	(68)
	参考文献	(70)
第三章	量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统 II : 大电感 近似	(72)
3.1	外场近似下的场与介观 Josephson 结相互作用系统	(72)
3.1.1	大电感近似下系统的 Hamilton 量	(72)
3.1.2	Heisenberg 图像下系统的超导电流算符	(73)
3.1.3	系统超导电流的期望值	(74)
3.2	单模量子化光场作用下系统超导电流的量子崩塌与复苏 现象	(75)
3.2.1	压缩态量子化光场与介观 Josephson 结相互作用 系统	(76)
3.2.2	SU(1,1) 单模相干态量子化光场与介观 Joseph- son 结相互作用系统	(80)
3.3	单模非经典光场作用下系统的 Shapiro 流压台阶特性	(83)
3.3.1	压缩态量子化光场与介观 Josephson 结相互作用 系统	(84)
3.3.2	相干态量子化光场与介观 Josephson 结相互作用 系统	(85)

3.3.3	单模 $SU(1,1)$ 相干态量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统	(85)
3.4	相干态的叠加态量子化光场作用下系统超导电流的超结构特性	(86)
3.4.1	系统超导电流的时间演化	(87)
3.4.2	系统超导电流时间演化中的拍现象和超结构特性	(89)
3.4.3	系统的 Shapiro 流压台阶特性	(93)
3.5	量子化光场作用下系统超导电流的量子涨落	(94)
3.6	双模量子化光场作用下系统超导电流的时间演化	(97)
3.6.1	双模量子化光场作用下系统超导电流的时间演化算符	(97)
3.6.2	双模压缩态量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统	(100)
3.6.3	$SU(1,1)$ 双模相干态量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统	(106)
	参考文献	(110)
第四章	非含时经典场作用下的介观 Josephson 结	(112)
4.1	在介观 Josephson 结中产生 Schrödinger 猫态	(112)
4.1.1	在介观 Josephson 结中产生两个相干态的叠加态	(112)
4.1.2	介观 Josephson 结中两个相干态的叠加态的空间表示—— Q 函数	(116)
4.1.3	介观 Josephson 结中的二阶压缩	(120)
4.2	介观 Josephson 结中的高阶压缩	(123)
4.3	系统超导电流的时间演化特性	(128)
	参考文献	(130)
第五章	含时经典场作用下的介观 Josephson 结	(131)
5.1	在介观 Josephson 结中产生相干态	(131)
5.1.1	经典场作用下介观 Josephson 结的 Hamilton 量	(131)
5.1.2	介观 Josephson 结的 Hermit 不变算符	(133)

5.1.3	介观 Josephson 结的时间演化算符	(135)
5.1.4	在介观 Josephson 结中产生相干态	(138)
5.2	周期场作用下介观 Josephson 结波函数的时间演化 ...	(139)
5.2.1	介观 Josephson 结的 Hamilton 量	(140)
5.2.2	介观 Josephson 结的 Hermit 不变算符	(142)
5.2.3	介观 Josephson 结波函数的几何相位因子	(144)
5.2.4	在介观 Josephson 结中产生广义压缩态	(145)
5.3	在介观 Josephson 结中产生一类相干叠加态	(148)
5.3.1	介观 Josephson 结波函数的时间演化	(148)
5.3.2	介观 Josephson 结力学量的量子涨落	(153)
5.4	介观 Josephson 结的超导电流特性	(155)
5.4.1	超导电流的时间演化	(155)
5.4.2	超导电流的量子崩塌与复苏现象	(159)
5.5	线性含时外场作用下介观 Josephson 结的隧穿电荷台阶	(161)
5.5.1	介观 Josephson 结的时间演化算符	(161)
5.5.2	隧穿电荷的台阶结构	(164)
参考文献		(166)
附录		(168)
A	宏观 Josephson 结与超导电流	(168)
A.1	基本方程	(168)
A.2	微波感应台阶	(169)
B	辐射场的量子描述	(170)
B.1	单模光场	(170)
B.2	光场的粒子数态	(173)
C	光场的量子涨落特性	(174)
C.1	相干态光场	(174)
C.2	压缩态光场	(177)
D	SU(1,1)相干态量子化光场作用下超导电流的直流分量	(180)
参考文献		(182)

第一章 绪 论

1.1 介观系统和介观物理学

随着人类社会生产力和科学技术水平的不断提高,人类对自然界乃至整个物质世界的认识也是不断深入、无限发展的。人们开始只能认识用肉眼观察到的系统,逐渐深入到两个不同层次的领域——宏观领域和微观领域。所谓宏观领域是指以人的肉眼能够观察到的物体作为最小的认识物体,或者说它是该领域所认识的物体在大小上的下限,它向上可以大到星球,甚至到无限大的宇宙。与此相对,所谓的微观领域是指以分子和原子作为最大的认识物体,或者说它是该领域所认识的物体在大小上的上限,而向下可以小到无限可分的基本粒子。然而在宏观领域和微观领域之间,还存在着一个长期以来没有被人们重视的新的研究领域,通常称为介观领域。或者更确切地说,虽然早在 19 世纪化学家就曾研究过胶体,而胶体颗粒的空间尺寸恰处于介观研究领域,不过那时只是将它作为研究分子溶液的一种自然延伸,而没有作为一个新的认识领域来研究。由于介观领域的尺寸都很小,一般来说都限制在从微米到纳米尺度的范围,使介观物体出现了很多物理上有别于宏观物体和微观物体的奇异新性质,甚至可以同时具有属于宏观和微观物体的不同本质特征。因此,近年来越来越受到人们的重视,成为当今凝聚态物理学中的新研究热点,以至于逐渐形成了以研究相干量子输运现象为主的介观物理学。

广义而论,凡是出现量子相干现象的小“宏观”系统,统称为介观系统。不过目前通常按系统的空间尺度大小,把亚微米($0.1\mu\text{m}$)系统有关现象的研究,特别是电输运现象的研究,划归到介观领域。从而,介观物理学实际上是相对于宏观和微观物理学而言的,它所研究的物质的空间尺度大体上在 10 纳米至 1 微米之间,通常含有 $10^8 \sim 10^{11}$ 个原子。因此,从空间尺度意义上说,这样的系统基本上还是可以认为是属于宏观范围的。从研究内容上来说,介观物理是研究系统特征尺寸相当于或小于系统电子波函数的相位相干长度时,所表现出来的物理性质和规律。事实

上,介观系统物理性质的许多特殊表现,集中体现在系统中所有电子波函数的相位相干性上。此相位相干长度一般为几十到几百纳米,介于宏观尺度和微观尺度之间。从而在某种意义上,介观物理学的研究对象可以说是呈现微观特性的那些宏观系统。这些系统一般是低温下的线状和环状小尺寸系统,呈现出若干微观性质,或称量子力学特性。由于介观物理研究的对象是纳米量级的系统,而在金属和半导体等一类固体中,电子平均自由程一般为几个纳米或更长。因此,在电子路程小于电子平均自由程的距离内,电子的运动是弹道的,在电子路程大于电子平均自由程的情况下,电子将受到各种散射作用。如杂质、声子、晶粒间界等的弹性散射,或光子或声子的非弹性散射。弹性散射可使电子波动的相位发生有规则的移动。如在低温下,传导电子的干涉在它们的 Brown 运动中会表现出一些有趣的特点。其中之一是电子在扩散过程中虽然经历了频繁碰撞,但是只要这些碰撞是弹性的或准弹性的,它们就可以在相当一段路径中保持对相位的记忆。通常,电子的相干长度在低温下一般可以达到一微米至十微米量级,其相干性能够得到很好地保持。

实际上,介观物理学是 20 世纪 80 年代以后才在物理学中形成的一门年轻分支学科。介观物理的研究使人们在认识物质世界的深度和广度上又有了一个新的飞跃。它是联系宏观物理学和微观物理学的桥梁,将会促进当代物理学在 21 世纪的重大科学突破。虽然对介观系统的研究只不过有 20 年的历史,但是已经发现其中有许多新奇的物理现象,如量子扩散、弹道输运和 Coulomb 阻塞(Coulomb blockade)等。介观物理的一个重要研究方向还涉及物质之间相互作用的另一种形式,即物质和场的相互作用。通过研究具有不同性质的场与特定物质之间的相互作用,人们可以认识场和物质的许多新性质,观察到系统可能存在的多种新物理现象。20 世纪 80 年代以来,场与原子、分子、纳米颗粒、分子器件和半导体微器件等系统的相互作用研究,已经成为现代科学技术诸多领域的重要研究内容,并在许多方面具有极为广泛的应用前景。事实上,多种类型的介观器件已经开始用于不同的领域中^[1~8]。随着微加工技术的进步,现在人们已经能够研制出有效尺度接近或者达到介观尺寸水平的小量子器件,诸如 Josephson 结器件^[1]、分子开关器件^[2]和超晶格器件^[3,4]等。目前,弱连接 Josephson 结的量子干涉器件可用于大地电磁测量,医学中的心磁、脑磁测量等。超导结作为混频元件应用于高频信号检测、频率计

量、金属探伤和数字电路等方面。超导量子干涉器件可用于核磁共振装置和分析化学检测等^[5,6]。

1.2 介观器件及其理论

介观器件的尺度基本上是宏观的,它们通常可以在实验室中制备,其性质也比较容易测量,因此,在微电子学领域中有广泛的应用前景。例如,使用微加工技术,人们可以制备处于两个隧道结之间的导体孤岛,这个孤岛的体积可以小到其电容达到 10^{-15}F (Faraday) 数量级,因此,导体孤岛上增减一个电子所导致的 Coulomb 能变化可以超过热涨落的能量。再如,在通常宏观情况下,电子穿过金属-绝缘体-金属结时,由于常温下的热涨落影响,掩盖了电子隧穿过程引起的静电能变化。但在介观情况下,电子穿过金属-绝缘体-金属结时,情况会完全不同。又如,对于尺寸大约为 $20\text{nm} \times 20\text{nm}$ 的结,电子隧穿引起的静电能变化很大,相应的温度变化可达 100K ,因此,在液氮温度下,这样大的能量变化实际上意味着电子隧穿不会发生。此时,电子被有效地阻塞了,只有在结端电压高到一定程度时,电子才可能通过,此即为所谓的 Coulomb 阻塞效应^[9]。当电磁场交替地改变隧道势垒的高度时,电子将会像船通过船闸门一样间断地从一侧运动到另一侧。现在,人们已经在金属隧道结和分裂栅下的二维电子气体中观察到这种 Coulomb 阻塞现象^[10]。

由两块超导体通过弱连接而形成的介观 Josephson 结,是当前人们热心研究的、具有应用价值的微型器件之一,其主要的功能特性来源于两块超导体之间的介观 Josephson 结的量子隧道效应。这使以前在较大尺寸器件上观察不到的一些物理现象能够在介观 Josephson 结中被发现,特别是当器件的尺度小于由外界温度所决定的电子非弹性散射平均自由程时,电子的波动性质将会导致介观 Josephson 结的一些新性质。介观 Josephson 结的特殊功能之一是对外加磁场的极端敏感性。表现为外磁场的微小变化能产生可分辨的隧道电流变化,其测量值已能达到 10^{-15}T (Tesla) 的数量级。并且这一精度的最后极限是由器件信号放大过程中的热噪声所限定的,而并非器件灵敏度本身所限制,因此降低系统热噪声能够进一步提高测量灵敏度。利用介观 Josephson 结的这一功能性质,可以制造超灵敏的磁场探测器。例如,军用反潜艇装置和地质探矿磁力仪

等。

通常的宏观器件由于其尺度远大于 de Broglie 波长,其状态波函数之间缺乏足够的相位关联,使之物理测量中与相位相关的量子特性由于统计平均而被掩盖。由于介观器件的有效尺寸接近于电子的相干长度,使介观 Josephson 结中的电子或 Cooper 对在隧穿过程中其相位不会被完全破坏,因此将会导致某些量子干涉现象,从而展现出丰富的物理内容。除了介观 Josephson 结系统本身能够呈现多样的功能特性外,在外驱动场,例如在辐射场作用下,介观器件系统的能级结构将会发生明显变化。辐射场与原子分子相互作用系统中所表现出来的某些物理现象,如量子噪音抑制、参量放大、双稳态等,也将会在辐射场与介观器件相互作用系统中有所反映。

例如,经过十几年的研究,到了 20 世纪 80 年代,人们已经对宏观 Josephson 结的结构和性质有了多方面的认识,如对于经典驱动场作用下的宏观 Josephson 结的动力学问题已经有一定的了解^[11],包括流压曲线中表现出来的台阶行为也已经在实验中进行过观测^[15,16]。由于介观尺度的 Josephson 结的成功制备,以及该系统表现出的量子特性和非线性特点,人们希望能从量子力学的角度更深入地研究这一问题。近年来,人们广泛关注各种介观器件的独特功能性质,其中大多数工作主要集中在研究直流偏置的外驱动场系统,讨论隧道中的 Coulomb 阻塞现象。并且在实际操作中,可将介观器件置于非经典场环境或者准经典相干态场环境中。但是,由于介观器件系统的量子特征已经趋于明显,力学量的动力学行为不可避免地受到量子噪音的影响。因此,用半经典理论处理这样的系统会有一定的局限性。这里所谓半经典理论指的是将外驱动场视为经典场,即外场满足通常的 Maxwell 方程组,而对介观 Josephson 结系统的力学量则实施正则量子化。这种半经典处理方法就实际效果而言,可能导致由于没有考虑辐射场量子化而使其推导的理论结果中丧失某些非经典物理现象的内容。同时,与非经典场相关的某些微加工技术以及介观器件系统的制备技术中的一些问题,利用半经典理论方法也难以解决。因此,需要发展一套处理场与介观器件相互作用的全量子理论方法。

1994 年 Vourdas^[14]首次研究了量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统。揭示了在压缩真空态场作用下,介观 Josephson 结能够呈现出双倍整数的流压台阶结构,并就量子噪音对该台阶结构的影响进行了分

析。很明显,这些电子输运过程中表现出来的相位相干性,对于研制其他介观功能器件也具有十分重要的意义。目前,量子化场与介观 Josephson 结相互作用系统的研究,包括电子隧穿过程中的动力学行为以及量子噪音对输运电子行为的影响等重要研究内容,在国际上尚属起步阶段。至今,系统的结端极化电荷,结端相位差和超导环磁通量等物理量的量子涨落行为以及对系统动力学行为的影响等问题还没有完全解决,仍然需要继续深入研究。其中包括研究量子化光场,特别是实验上已经实现的非经典光场与介观 Josephson 结相互作用系统^[15,16],或者说主要是与单结超导环器件相互作用系统。从而,通过探索具有不同光子统计特性的辐射场对隧穿电子的量子相干性的影响,进一步认识介观器件系统的动力学行为和介观器件输出信号的量子噪音抑制等问题仍然是一个重要的研究方向。显然,由于介观 Josephson 结的非线性和量子性,量子化场与介观 Josephson 结相互作用系统将会呈现出新的动力学结构特征或新的物理现象,相应的场致相干辐射也将会呈现出一些新性质和新特点。

1.3 本书的主要内容

本书着重在理论上探索场与介观 Josephson 结相互作用系统的动力学行为及其量子涨落性质。主要研究方法是先将场与介观 Josephson 结相互作用系统 Hamilton 量中的 Josephson 结部分的 Hamilton 量过渡到介观系统,即对其经典形式的 Hamilton 量部分实施正则量子化,以此作为描述介观 Josephson 结部分的能量算符。具体量子化过程主要是将介观 Josephson 结端极化电荷和结端相位差实施正则量子化。这是因为从形式上看这两个力学量具有类似广义坐标和广义动量的对易关系,因此,可以将它们理解为一对共轭力学量算符。然后再将这些力学量算符实施二次量子化,即用通常满足正则对易关系的 Bose 子湮没算符和产生算符描述它们。该 Bose 子算符在数学上可以表示为 Cooper 对算符的级数求和,其在物理上表现为集体 Cooper 对的多级耦合。此时基本上忽略了超导隧穿电流中的单电子行为及其残余 Coulomb 相互作用。同时,由于此时系统 Hamilton 量中还存在 Josephson 非线性项,使精确求解系统动力学性质几乎成为不可能,需要通过数值模拟计算进行讨论。当然,亦可以对非线性项作一些近似处理,以便能解析地讨论一些问题,即在物理允许

的范围内处理其一些特殊情况。例如,利用截断近似或者微扰方法近似计算。此外,从理论上来说,电子通过发射和吸收光子会改变它们的相对相位,使之光子的量子统计性能够影响电子的量子统计性,从而影响隧穿电子的动力学行为。因此,讨论具有不同光子统计分布的外驱动场对输运电子行为的影响也将是本书重要的内容。至于系统 Hamilton 量中作用于介观 Josephson 结的外驱动场部分大致可分为两类,一类是经典驱动场,这相当于在器件等效电路中偏置一个经典电压源,用于得到直流和交流信号下介观器件动力学行为和输出特性,特别是其非经典性质。另外考虑的一类外驱动场是量子化光场,此时,场与介观 Josephson 结相互作用系统的理论处理特点是全量子力学表述,即光场和介观 Josephson 结均用量子力学方法进行处理。整个系统可以设想为先让介观 Josephson 结处于某一特定状态,如介观 Josephson 结的最低能量态,再将介观器件置于一特定设计的非经典光腔中,随着系统的演化,介观器件将会被激发,如此可以得到器件能级跃迁和辐射行为,以及系统力学量的动力学演化行为。本书拟选取各种量子化光场作为介观 Josephson 结的驱动场,其中包括相干态、压缩态和 Schrödinger 猫态等量子化光场。这些量子化光场在实验上是可能实现的,例如,具有非经典效应的压缩态光场已于 20 世纪 80 年代在实验上得以实现^[15,16]。

本书在结构上先讨论场与介观 Josephson 结相互作用的一般理论,其中外场既可以是经典场,也可以是量子化辐射场。然后按外场的性质和对系统所做的物理近似的不同,分别讨论了小电感近似和大电感近似下的量子化光场与介观 Josephson 结相互作用系统,以及非含时经典场和含时经典场作用下的介观 Josephson 结系统,重点实现各种量子化光场及经典场作用下的介观 Josephson 结系统的非经典性质。本书的最后,作为附录,对上述各章节所涉及的一些基础知识作一概括性介绍,以便有助于读者更好地理解全书各章节的内容。

参 考 文 献

- [1] H. Koch, H. Lubbig. Single electron tunneling and mesoscopic devices. Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [2] J. J. Hopfield, J. N. Onuchic, D. Beratan. Science, 1988, **241**:817

- [3] F. Capasso, S. Datta. Phys. Today, 1990, **2**: 74
- [4] F. Capasso, S. Sen, F. Belram, L. Lunadri, A. Vengurleker, P. R. Smith, N. J. Shah, R. J. Malik, A. Y. Cho. IEEE Trans. Electron Devices, 1989, **36**: 2065
- [5] Y. S. Greenberg. Rev. Mod. Phys., 1998, **70**(1): 175
- [6] J. P. Yesinowski, M. L. Buess, A. N. Garroway, M. Ziegeweid. A. Pines. Anal. Chem, 1995, **67**: 2256
- [7] G. Schon and A. D. Zaikin. Phys. Rep., 1990, **198**: 237
- [8] M. A. Kastner. Rev. Mod. Phys., 1992, **64**: 849
- [9] M. L. Roukes, A. Scherer, S. J. Allen, Jr, H. G. Graighead, R. M. Ruthen, E. D. Beebe, J. P. Harbinson. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**: 3011
- [10] M. L. Roukes, A. Scherer, B. P. Van der Gaag. Phys. Rev. Lett., 1990, **64**: 1154
- [11] A. Barone, G. Paterno. Physics and Applications of the Josephson Effect. Wiley, New York, 1982
- [12] B. D. Josephson. Phys. Lett., 1962, **1**: 251; Rev. Mod. Phys, 1964, **36**: 216
- [13] S. Shapiro. Phys. Rev. Lett., 1963, **11**: 80
- [14] A. Vourdas. Phys. Rev. B, 1994, **49**: 12040
- [15] R. Loudon, P. L. Knight. J. Mod. Opt., 1987, **34**: 709
- [16] M. C. Teich, B. E. A. Saleh. Quantum Opt., 1989, **1**: 153

第二章 量子化光场与介观 Josephson 结 相互作用系统 I: 小电感近似

介观 Josephson 结实质上是一个在低温下对外加磁场非常敏感的量子器件,其主要特征是量子隧道效应。事实上,在场与介观 Josephson 结相互作用系统中,与电感相关的能量项对系统的动力学性质有着不可忽略的影响。本章研究小电感近似下,当相互作用系统初始驱动场为相干态光场或压缩态光场时,介观 Josephson 结中电荷和磁通量等力学量的量子涨落特点,同时探索具有不同光子统计特性的辐射场对隧穿 Cooper 对量子相干性的影响,以及辐射场与介观 Josephson 结相互作用系统物理量的动力学演化特性。

2.1 场与介观 Josephson 结相互作用系统

微观粒子的运动有许多与通常宏观粒子不同的现象,其中隧道效应是最重要的量子现象之一。量子力学隧道效应的概念差不多与现代量子力学同时建立。Schrödinger 方程建立之初,人们就试图用它去解释粒子贯穿问题。众所周知,在经典力学中,若某一空间被一个有效势垒分隔成两个空间区域时,即粒子只有具有高于势垒的能量时,才可能从一个空间区域运动到另一个空间区域。而在量子力学中,情况则有所不同。粒子能量必须超过势垒能量的要求,已经不再是它能从一个空间区域运动到另一个空间区域的必要条件,能量低于势垒的粒子也可以有一定的概率穿过势垒而运动到另一个空间区域,这就是所谓的量子力学隧道效应,简称隧道效应。要想从实验上明显地观测到量子力学隧道效应,就必须使势垒区非常薄。当两块金属被一个足够薄的绝缘体隔开时,若绝缘体势垒两端的电势差不为零,则在它们之间可以有电流通过,此电流称之为隧穿电流。如果绝缘体势垒两侧的材料都是超导体,那么它们之间出现的隧道效应为超导隧道或正常电子隧道效应。对于超导体-绝缘体-超导体构成的结,当绝缘介质层厚度约为几百个埃时,隧穿电流一般是由