

下,可通过控制多层膜中的单金属层的层数,来控制多层膜的初始能量状态,从而调节该系统的非晶化成分范围。

再看比界面能方程.该式右边第一项 $0.15 \times (\frac{0}{A} + \frac{0}{B})$ 是由于两种原子间的尺寸差异引起的,也称为弹性项,总是正值;右边第二项 $\frac{\text{chem}}{\text{AB}}$ 是由两原子间的化学作用引起的,也称为化学项,其符号与生成热的符号相同.因此,对于生成热为正的系系统,上述两项符号相同,均为正,提高了多层膜的初始能量状态.而对于生成热为负的系系统,弹性项、化学项的符号相反,因而可能提高多层膜的初始能量状态,也可能降低多层膜的初始能量状态,只不过变化幅度很小.因此,在生成热为负的系系统中,界面原子对多层膜的初始能量状态的影响可忽略不计;而在生成热为正的系系统中,却必须考虑界面原子的影响。

致谢 成文中与本课题组的张政军、金瓯等作了有益的讨论,一并致谢。

参 考 文 献

[1] W. Hume-Rothery et al. , *Phil. Trans. Royal Soc. , London, ser. A. , 233*(1934) ,1.
[2] L. S. Darken et al. , in *Physical Chemistry of Metals* , Mc-

Graw-Hill Book Co. , Inc. New York , (1953) , 74.
[3] B. X. Liu , W. L. Johnson , M. A. Nicolet et al. , *Appl. Phys. Lett. , 42*(1983) ,45.
[4] P. M. Ossi , *Phys. Stat. Sol. (a)* , **119**(1990) ,463.
[5] J. M. Lopez , J. A. Alonso and L. J. Gallego , *Phys. Rev. B* , **36**(1987) ,3716.
[6] A. K. Niessen and A. R. Miedema , *Ber. Bunsenges. Phys. Chem. , 87*(1983) ,717.
[7] A. R. Miedema , *Philips Tech. Rev. , 36*(1976) ,217.
[8] 张政军,清华大学博士学位论文,(1995).
[9] J. A. Alonso , L. J. Gallego and J. M. Lopez , *Philos. Mag. A* , **58**(1988) ,79.
[10] J. A. Somozar et al. , *Philos. Mag. B* , **65**(1992) ,989.
[11] L. J. Gallego , J. A. Somozar and J. A. Alonso , *J. Phys. : Condens. Matt. , 2*(1990) ,6245.
[12] Z. J. Zhang , O. Jin and B. X. Liu , *Phys. Rev. B* , **51**(1995) ,8076.
[13] R. B. Schwarz and W. L. Johnson , *Phys. Rev. Lett. , 51*(1983) ,415.
[14] J. A. Alonso , L. J. Gallego , J. A. Somozar et al. , in *Thin Films and Bean-Solid Interactions* , edited by L. J. Hung , Elsevier , Amsterdam , (1991) , 297.
[15] Z. J. Zhang and B. X. Liu , *J. Appl. Phys. , 75*(1994) , 4948.
[16] B. X. Liu and Z. J. Zhang , *Phys. Rev. B* , **49**(1994) , 12519.
[17] A. K. Niessen , A. R. Miedema , F. R. de Boer et al. , *Physica B* , **151**(1988) ,401.
[18] R. Kikuchi , *Phys. Rev. B* , **81**(1951) ,998.
[19] B. M. Clements and T. C. Hufngel , *J. Alloys & Compounds* , **195**(1993) ,221.

与高温超导机制相关的理论研究*

韩 汝 珊

(北京大学物理系,北京 100871)

伍 勇

(首都师范大学物理系,北京 100037)

摘 要 高温超导体是一个强关联体系,它向传统的能带论和强关联模型研究提出了严重的挑战.第一性原理的电子结构的计算研究,试图给出反常的色散关系和费米面几何特性,以及大 U 修正下的影响等.模型哈密顿的研究,企图概括高温超导的主要物理特征,它主要采用两类方法:一类

* 国家自然科学基金资助项目.

1995年10月30日收到初稿,1996年3月12日收到修改稿.

是严格对角化方法,另一类是量子蒙特卡罗方法.对于高温超导电性机制模型,也作了介绍.

关键词 高温超导铜氧化物,一般理论和计算技术,强关联电子系统,高温超导电性微观理论

Abstract A high temperature superconductor (HTSC) is a system with strong correlations, and thus presents a severe challenge not only to traditional electron band theories but also to strongly correlated model approaches. Sophisticated first principles calculations attempt to improve the band approach to deal better with the anomalous dispersion relation and Fermi surface geometry. The model hamiltonian approach attempts to summarize the main features of a HTSC using exact diagonalization and quantum Monte Carlo methods. Models of the superconducting mechanism are also briefly described.

Key words high T_c cuprates, general theories and computational techniques, strongly correlated electron system, microscopic theory of high T_c superconductivity

我们之所以立此标题,主要是目前尚没有一个公认的成熟的高温超导理论.但是,以此为目标,连同计及正常态反常行为,各种各样的理论不断发展,提出了许多有启发性的想法.其他学科的科学家也以极大的热情转入高温超导领域,这种学科交叉给高温超导学科注入了新的血液.超导配对机制的核心问题是找到一个适当的中间媒介,在一定条件下,使强关联的准粒子之间出现有效的吸引力,配对状态在能量上比“单个”状态有利.因为各种模型均在不同程度上得到了与某些实验符合的结果,说明其中有可能包含了正确的内容.各个模型也在不同程度上存在着不尽如人意之处,有待进一步发展.理论与实验的关系是实验决定理论,理论又指导实验的相互依存的关系.具体地说,实验的进一步发展不仅由于提高精度获得更精确的结果.同时在理论的指导下有时还要不断地修正某些错误的结论,或者认识到各种测试手段的内在局限性,从而发展新实验技术.高温超导物理研究的短短的8年历史,就是在理论和实验的密切相互影响中前进的.理论工作者应密切注视实验的进展,反之实验工作者也应了解理论的进展,只有这样,才能使各自的工作立足于物理学的前沿.理论与实验脱节仍是当前国内高温超导研究中一个应注意解决的弊端.下面介绍一些机制模型的物理概念,仍避免过多的数学.

高 T_c 超导电性发现后,人们很自然地会问,它与原来人们对液氦温区超导电性的理解是否本质上是一样的?超导电性是1911年发现的,直到50年代后期,才对这个现象的物理本质有了一个完整的、满意的认识.超导电性是一种宏观量子现象,它表明这时存在着多粒子系统的凝聚状态的波函数,这个波函数有振幅和位相,在宏观尺度上,能保持相位的相干性.用杨振宁提出的术语,这是一种非对角长程有序现象.在一定意义上,它很类似于(但不等同于)液氦的超流动性.配对的电子在一定意义上扮演玻色子的角色.引起电子配对和凝聚的微观相互作用是电子间通过交换声子引起的吸引作用.8年来对高温超导电性的研究表明,它仍然是和液氦温区的超导电性一样,是一种长程有序现象,是配对电子的凝聚.持续电流的实验,表明它的电阻率至少小于 10^{-22} cm,证明了在一定意义下的零电阻.直流 Meissner 效应证明了是一个体积的效应,存在着一定意义下的完全抗磁性.约瑟夫森效应,磁通量子化效应等量子相干效应表现了它是一种宏观量子现象,并且是电子配对.这些对理解高温超导电性的本质是非常重要的.现在的问题是什么样的微观机理导致电子配对和凝聚?为什么 T_c 这样高?目前,还没有一个令人满意的回答.为了寻找满意的回答,有一些重要的实验事实或问题是应该面对的.它们是:

(1) 是一个强关联的电子体系；

(2) 有费米面存在，测量的态密度谱中有陡峭的边界；

(3) 组分和结构有决定性意义吗？目前研究最多的是高温超导铜氧化物，发展的理论模型很多是针对 CuO_2 平面的，但它讨论的主要是强关联导致的磁有序背景中一定数目的载流子的行为，可能具有普遍意义。但是， CuO_2 双层甚至多层对高 T_c 是否有决定性意义？这个问题有待探索；

(4) 氧位的载流子要有适当的浓度，过多或过少对超导都不利；

(5) 有严重的各向异性；超导电性是三维的性质，一定要考虑层间耦合。最小的单元至少是包含 CuO_2 双层的完整的单胞层；

(6) 对高 T_c 超导体来说，电子-声子机制可能不是主要的中介，一定要考虑电子-电子的某种中介；

(7) 要在正常态反常的电子态基础上建立超导理论。因为正常态的反常中包含着电子体系的特殊的相互作用机理，对超导相的出现是本征性的，等等。

理论研究可以概括为三种类型：

(1) 第一性原理的电子结构计算研究。用局域密度泛函为基础的电子结构计算获得了与实验符合的费米面，包括体积和形状。这一成果鼓舞了人们的信心，在这个基础上进一步加入强关联修正。例如，梯度项修正，加大 U 项及自洽迭代方案，鞍点、Nesting、及费米面几何与反常物性的联系等，都是正在研究和值得深入研究的问题；

(2) 模型哈密顿量（以 Hubbard 模型及其变种为主的）严格解及数值研究。例如，排斥型 Hubbard 中的吸引力及基态长程序。二维 Luttinger 问题及费米液体向非费米液体行为的过渡问题；

(3) 高温超导机制模型的定性和半定量研究。包括各种微观机制模型以及强关联参数的计算研究，还有一些唯象的模型。我们仅介绍一些有代表性的模型。所谓代表性是指两重含义：

(a) 这个模型面对着几乎正常态反常的整体，至少是大多数的重要反常，而不是针对一、二个反常行为得出的模型；(b) 还要在国际上受到重视，重要的大实验室正在试图判定它们的正确与否，或被同行们引用讨论较多的，并且我们在这里将只按照是微观模型还是唯象的，是基于常规费米液体理论还是基于非常规费米液体理论，是倾向 BCS 的 s 波配对还是非 BCS 的 d 波配对等主要问题为线索，选出一、二个代表加以介绍。

1 局域密度泛函(LDF)能带计算

在高温超导体刚发现不久，许多研究组计算了 La_2CuO_4 ， $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的能带结构，给出了以 $\text{Cu}-\text{O}$ 键为主要特征的准二维能带。虽然这些较早期的结果被后来收敛得更好的结果所改进，但是它们对人们认识高温超导体电子结构的特点、推动二维强关联模型研究的发展起到了很大作用。当时的侧重点是为了粗略地阐明整体成键性质，并不企图精确预言费米面的几何。随着研究的逐步深入，费米面问题处在重要的理论位置，成为判定理论方案优劣的一个重要试金石。角分辨光电子谱实验对费米面的精确小心地绘制，不断地提供更丰富的信息。要求更精确地计算费米面的形状、色散、鞍点等诸方面。这就对计算的可靠性、精度提出了更高的要求。同时也进一步暴露了局域密度泛函能带理论的局限性。要求面对强关联问题的挑战，发展包含强库仑关联的修正理论。以局域密度泛函为基础的所谓“第一性原理”的能带理论，尽管在某些方面给出了定性的甚至定量的描述，在有些方面仍存在着较大的差距。普遍认为这是由于不能或未能包含有效的强关联所致。这个在过渡金属氧化物中已困扰人们很久的问题，在高温超导中又突显出来。强关联模型哈密顿，如 Hubbard 模型，在磁性、一维问题上有成功，扩展它们用来研究反铁磁-超导共存的二维 $\text{Cu}-\text{O}$ 平面系统，应是顺理成章的。模型中包含的 U （库仑排斥能）、 t （位间转移能）、

(电荷转移能)等参数,可以用第一性原理的限制密度泛函等方法进行计算. 计算有效的强关联参量的要害是通过适当的方式施加限制,以便得到较为局域化的轨道. 这些计算参量对于分析实验数据、判定在模型中参数的取舍等是有意义的. 不同的近似方法给出了大致相近的结果.

沿着弱关联的能带理论思路,进行强关联修正,不失为另一种可行的探索. 较有代表性的是所谓“LDF+ U ”方案,实际上是在局域密度泛函理论基础上进行的修正. 这个方法强调局域化是受在位库仑相互作用 U (而不是被Stoner交换作用)所控制,从而附加一个与自旋和轨道相关的单电子势. 计算结果表明,对于许多3d过渡族氧化物电子结构是成功的. 对通常的LDF结果给予了明显的修正,给出了令人满意的绝缘能隙. 这个方法的另一个优点是在通常LDF理论的基础上很容易作出关联作用的修正. 将平均占有数的涨落作为基本变数,平均占有数由LDF自洽计算而得,避免了不应有的重复修正.

2 模型哈密顿的严格解及数值研究

2.1 严格解

对于强关联系统,常规微扰论方法失效. 因而不得不依赖某些近似方法(如变分法)以便计算系统的性质. 问题在于这些近似引起的误差往往是很难估计的. 这样,对强关联系统的任何严格的数学结果都是有价值的. 通常是计算基态的能态密度. 将严格的结果与近似的结果作比较,可以使人们了解哪种近似方法较好些. 然而,除了一维情形,强关联系统的较精确的能态密度,仅能用数值方法计算“小样品”而获得.

相互作用电子系统的Hubbard模型,类似于自旋-自旋相互作用系统的Ising模型,是能够显示或包容“实在世界”许多特性的最简单的模型. 对它的定性的解析研究比Ising模型要困难得多,经过30多年的研究,对它的基本性质的许多方面仍然是不清楚的. 在这里只能指出,

目前相当多的理论物理学家相信,对Hubbard模型的研究对于最终搞清高温超导体的本质特性会作出贡献.

高温超导铜氧化物有着极复杂的电子浓度-温度相图,其中包含着磁性相变及向超导的转变、金属-绝缘转变、正常费米液体金属相-非费米液体金属相的转变等. 由电子的动能及其相互作用势能共同决定的这些丰富的行为,向物理学家提出了巨大的有刺激的挑战,通过对Hubbard模型的进一步研究,可能是人们更好地理解全同性原理(泡利不相容原理)如何导致如此丰富的属性! 近几年来,对Hubbard模型(及其各种变种)所包容的物理内涵的研究,取了不少的结果. 精密地考察了许多基本问题,有些是在数值模拟的配合下完成的. 这此基本问题包括:隙间态、相分离、附加空穴局域化及巡游性、吸引力、配对及超导性等等. 关于高温超导机理,虽然BCS理论和非对角长程序的概念已建立了30多年,然而还未找到一个强相互作用电子模型,可以严格地建立起超导有序. 最近在这方面有一些突破,杨振宁教授发现有可能在Hubbard模型($-U$ 情形)中找到一类本征态具有非对角长程序,从而推动了一系列重要研究,包括局域配对和发现一类新的超固体(CDW与超流相共存). 最后,引用严格解问题的公认权威E. H. Lieb教授近期给出的一个待解问题的表述,来介绍严格解研究前沿的情况. 这个表述是:“证明在半满、排斥型Hubbard模型、hypercubic点阵和二维情形中,存在有反铁磁长程序基态;以及在大于二维有限温度情形中,对于怎样的 N ,吸引型Hubbard模型有长程序.”在这个表述中有许多名词,不在这里一一说明. 我们只强调指出,高温超导铜氧化物的母化合物(即未掺杂、半满情形)在反铁磁温度以下($T < T_N$)时,是长程反铁磁有序态,面对这一基本事实,人们相信应该被包容在Hubbard模型中,并已有数值结果,但至今尚未给出严格的解析证明. 从这里可以看出严格解析研究步履多艰难!

2.2 模型哈密顿的数值计算研究

由于历史的原因,人们常将理论物理学家区分为概念的解析的理论物理学家和定量的理论物理学家,他们相互之间交流不多.目前,这个分界已变得很模糊不清了.因为面对的问题是如此困难,很难靠一个人给出有说服力的回答.当前世界上较大的研究组,都并行使用完善的解析与数值工具来开展研究.

在强关联的严格解析研究进展的同时,H \ddot{u} bard 模型及相关一类模型的数值解析研究也取得了不少结果.使用最多的方法是 Cluster 精确对角化技术和量子 Monte Carlo 方法.对角化方法相对来说更精确些,但受到“尺寸效应”的限制.主要使用 Lanczos(递推)技术,尚不能计算较大尺寸的 Cluster. Monte Carlo 方法的困难是著名的费米子符号问题,尚不能计算较低温度的情形.尽管如此,仍取得了许多有意义和有趣的结果.

用单带 H \ddot{u} bard 模型研究隙间态使人们认识到隙间态是强关联电子体系的普适特征.因而未必是决定高温超导的最关键因素.因为非超导的甚至非金属的情形中也存在隙间态.直接用关联函数探察长程序,在目前允许的计算条件下,尚未给出存在非对角长程序的信息.因而已有人怀疑单带模型的有效性.

用 t - J 模型研究费米面已给出了“大费米面”的结果,即给出了与 Luttinger 定理一致的、与 $1 \pm x$ 呈正比(x 是掺杂浓度)的费米面.这意味着铜离子上的空穴对费米面也有贡献. Luttinger 定理告诉我们,电子间相互作用并不改变无相互作用时费米面包围的体积.这一研究结果还须改进.存在大费米面是在 16—20 位的 Clusters 用对角化技术求得的.该计算中关于费米面的定义(数密度 = 1/2)的合理性尚待论证. t - J 模型的另一个重要结果是证明了相分离的存在.从而指明相分离可能是电子集合的属性.只是这一结果($J = 3t$)尚须向更现实的参数空间($J < t$)推移.还有人在近相分离的区域给出了超导存在的迹象,但尚不能给出最后的结论.也有人讨论了 Meissner 效应及磁

通量子化,也获得一些有意义的结果.但是必须小心! Meissner 效应和磁通量子化只是超导电性的必要条件,必须小心看待这些结果.

一个值得注意的趋向是转向多带 H \ddot{u} bard 模型的研究.如三带 t - J 模型、三带 t - V 模型等.有关的参数被扩展至更大的区域中, $-U$ 或 $-V$ 模型也包括在内.使用对关联函数探察超导电性的工作仍在进行中.

虽然要给出高温超导体的复杂相图,还有很长的路要走,但是磁性相与超导相可在同一模型下研究是很令人鼓舞的.

3 几个高温超导机制模型

高温超导机制模型的定性和半定量研究,包括各种微观机制模型以及一些唯象的模型,我们不能一一列举.我们只能选出一些有代表性的模型,作简要介绍(“代表性”的两重含义如本文引言中所述).

3.1 Luttinger 液体理论

P. W. Anderson 最早注意到了高温超导体的正常态的非常规(Landau)费米液体行为,并从放弃 Landau 费米液体理论的基本假设入手,构造新的理论.面对高温超导向凝聚态理论提出的深刻挑战,Anderson 预见到为了发展新的超导理论有可能需要从根本上破除原有理论的框架,即突破 Landau 费米液体理论和 BCS 理论的限制,发展全新的理论. Landau 费米液体理论和 BCS 理论作为凝聚态物理的最重大成就,已统治着和影响着凝聚态物理学达 40 年.要发展全新的理论,不仅要有勇气,还需立足于对问题本质的深刻认识.高温超导体是个强关联电子体系.是动能与相互作用同等起作用($U \sim W$)的体系.以弱相互作用为出发点的微扰理论都将面临考验,甚至失效,Anderson 参照一维强关联体系中获得的奇异特性,发展了一个高温超导的 Luttinger 理论.他详细地分析了二维强关联的单带 H \ddot{u} bard 模型,认为由于大 U 项的存在,在空穴掺杂的情形,上 H \ddot{u} bard 带的存在对下 H \ddot{u} bard 带费米面附近

电子结构的影响,导致费米面的不可重整化(重整化常数 $Z = 0$),这就表明常规费米液体理论失效.实际上,在二维 Hubbard 体系中,常规费米液体理论的失效是有疑问的.在一维中费米面的不连续性(仅由 $\pm k_F$ 两点构成),导致了自旋电荷分离,能量较低的激发不是单电子的激发,而是自旋 $1/2$ 的中性自旋子 (spinon) 和无自旋的荷电 (± 1) 玻色子 (Holon) 的激发.它们的行为与三维费米子系统中的常规费米液体行为有本质的差别,已被定名为 Luttinger 液体.在二维中费米面的不连续性一般来说是不存在的. Anderson 借用相移分析等辅助手段,对二维 Hubbard 模型的 Luttinger 液体行为和费米液体理论的失效进行了定性的论证,认为铜氧化物超导体中电子系统的行为应当由自旋子和空穴子的 Luttinger 液体理论来描述.并以此为出发点发展了超导微观理论模型.以这样一个理论模型为基础, Anderson 对高温超导体的正常态和超导态的各种反常特征进行了定性的讨论,并预言了一些与实验吻合很好的结果,如 Hall 角与温度的关系. Anderson 将超导机制的特点概括为四点:

(1) 由于自旋子的“禁闭”性质,不存在沿垂直 CuO 平面方向的相干电子运动;

(2) 自旋子液体是单重态配对的凝聚,约瑟夫森类的双电子输运并不被阻断,由此从二维向三维的跨越诱导了超导电性.动力学屏蔽不仅不限制转变温度反而增强它;

(3) 层间动量守恒是导致高 T_c 的真实理由;

(4) 配对及配对波函数的特性不是由层间机制所决定的,(层间机制只有助于提高 T_c),而是由面内的剩余相互作用(可以是声子、自旋涨落或其他源)所导致的.

上述的大部分特性是铜氧化物超导体所特有的, Anderson 认为对于别的超导体(如有机超导体、重费米子超导体及 C_{60} 超导体等)也是适用的. Luttinger 液体理论的成功主要要靠实验上直接证实自旋电荷的分离.

3.2 Marginal 费米液体理论

这是由 C. M. Varma 等人发展的一个关于高温超导体正常态反常行为的唯象理论.该理论的最基本的假设是:低能的标度量是温度而不再是费米能.具体地说,假设电荷和自旋的极化函数的形式是

$$\begin{aligned} \text{Im } P(Q, \omega) &= N(0) (\omega / T) \quad | \omega | \ll T, \\ &= N(0) \text{sgn}(\omega) \quad T \ll | \omega | \ll \epsilon. \end{aligned}$$

由此,在低能部分,自旋-电荷涨落引起了态密度增强,并当它们与单粒子激发相耦合时,在费米面的单粒子变成非相干的,从而 $Z \rightarrow 0$. 这个假设,而且仅仅这个假设,就已可以满意地解释许多正常态的反常.由于在费米面附近 $Z \rightarrow 0$ 是以对数的方式趋于零,费米液体概念以一种最弱的方式失效.从而有了“Marginal”这一个称谓,意思是边缘的或临界的.在上述极化函数中包含一定的区域,使得准粒子之间的相互作用是吸引的,提供了一个 s 波配对的有效相互作用.从而提供了一个与正常态反常行为有共同物理起源的超导配对机制.这个唯象理论的微观本质尚不清楚.近年来用多带 Hubbard 模型及 Kondo 多道模型的研究已取得了一些进展,但尚未完成最后的微观表述.

3.3 其他

问题很明显,在 Eliashberg 理论的框架下,可以用其他的机制取代原来的电声耦合,发展新的超导配对机制.特别值得注意和令人感兴趣的是高温超导体的短相干长度使人们想到局域配对机制是重要的.正常态中的强关联特征也已明白地告诉人们:近自由的波函数不再是描述电子态的好的出发点,换句话说, k 不再是好的量子数.窄能带的局域化的电子态应更适当的描述.以 Hubbard 模型为代表的点阵模型,就是在这种背景下受到特别重视的.自然地,局域配对对应是比 Cooper 配对更适当的描述.局域配对又称实空间配对.只要有局域净剩吸引作用存在,就可以被包容在 Eliashberg 理论框架中.即使是电子本源的玻色元激发(如激子、等离激元)都可以取代或附加在原理论中声

子的位置上. 困难在于 Migdal 定理已失效. 顶角修正不能再被忽略. 问题的关键是需要找出高温超导体与那些显示电子有序化的不超导的局域配对材料之间的本质区别. 因为, 吸引配对也出现在非超导的变价系统和重费米子系统中, 局域配对并不等于一定出现超导性. 关键是相干凝聚及非对角长程序的出现. 在上述的意义下, 似乎纯库仑排斥型的作用不能导致配对及超导, 至少是在 Eliashberg 理论的框架下是这样. 历史上已论证过, 在某种特别的电荷分布情形, 并不排除配对的可能性. 姑且不论这种情

形. 近来已有人用重整化群证明, 在极端强的库仑排斥下, 只要附加一点点吸引力(声子应该是可以提供的), 载流子就不可避免地导致配对. 虽然这个论证是在一维情形给出的, 但是至少给人们一些启示: 在强关联的条件下, 超导机制的可能性是多种多样的.

著名的超导机制还有: 自旋口袋模型、反铁磁费米液体模型、Nesting 模型、任意子模型等等, 国内的学者甘子钊、苏肇冰、龚昌德教授等在有关高温超导电性机制方面也有许多出色的工作, 这些都留待以后介绍了.

半导体光学微腔——研究腔量子电动力学效应的绝妙范例*

章 蓓

(北京大学物理系, 介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要 光学微腔中真空场和电子的行为与它们在自由空间中截然不同, 导致了腔量子电动力学的一系列复杂性物理问题. 半导体光学微腔是新一代凝聚态微型谐振器的典型代表, 是探索腔量子电动力学、寻求新型微腔器件及其应用的绝妙范例. 文章概要介绍了几种典型的半导体光学微腔及其研究进展.

关键词 半导体微腔, 腔量子电动力学, 光学微腔

Abstract The behavior of electrons and the vacuum field in an optical microcavity is significantly different from that in free space, resulting in a series of complicated physical effects in the cavity quantum electrodynamics. Semiconductor optical microcavities are an excellent example of a new generation of condensed matter micro-resonators for exploring the effects of cavity quantum electrodynamics and developing a variety of new microcavity devices with their possible applications. A review of the current results on different kinds of semiconductor microcavities is presented.

Key words semiconductor microcavity, cavity quantum electrodynamics, optical microcavity

* 国家攀登计划资助项目; 国家自然科学基金资助项目.

1995 年 12 月 22 日收到初稿, 1996 年 3 月 11 日收到修改稿.