

金属薄膜中磁性交换耦合的量子阱效应机制研究新进展*

张志东

(中国科学院金属研究所 沈阳 110015)

摘要 通过对电子在量子阱中的运动行为与经典的弦振动的类比,形象地介绍了金属薄膜中磁性交换耦合的量子阱效应机制研究新进展.电子的几率密度变化周期依赖于双量子阱系统的对称性,其振荡周期符合一个晶格调制波的理论预言.双量子阱系统电子的能量谱依赖于电子的波函数的宇称和量子数的变化.

关键词 金属薄膜,磁性交换耦合,量子阱效应,双量子阱

NEW QUANTUM WELL EFFECT STUDIES FOR THE MECHANISM OF EXCHANGE COUPLING IN METAL THIN FILMS

Zhang Zhidong

(Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

Abstract A brief introduction is given of new studies on quantum well effect to explain the exchange coupling in metal thin films, in which the moving behavior of electrons in quantum wells is analogous to the vibration of a classical string. The periodicity of the spatial variation of the electron wavefunctions depends on the symmetry of the double quantum wells, satisfying a theoretical prediction of the lattice modulated electronic wave.

The energy spectrum of the electrons in the double quantum wells depends on the parity of the wavefunctions and the quantum numbers.

Key words metal thin films, exchange coupling, quantum well effect, double quantum wells

优美动听的音乐可以陶冶人的情操、激发人的斗志.当你陶醉在贝多芬、莫扎特、柴可夫斯基等音乐大师的音乐世界时,当你被梁祝、二泉映月等如泣如诉的旋律所震撼时,你也许会对为什么能产生如此美妙的音乐感兴趣.无论是古典音乐还是现代音乐,无论是西洋音乐还是民族音乐,都需要用乐器来演奏,特别是弦乐器,如小提琴、二胡等,可以拉出非常悦耳的声音.自然是非常奇妙的,一根普普通通的弦可以发出非常广阔的音域的声音.大家都了解弦是通过振动来发出声音的.弦的振动频率和波长决定了不同的声音.不同长度的弦所允许振动的波长是不同的,其允许振动的最长的波长是弦长的二倍,而这一最长波是其他可能的振动

的波长的整数倍.

电子在固体中的运动行为一直是人们非常感兴趣的课题.根据量子力学原理,电子具有波和粒子两者的特性,表现出几率幅、测不准原理、隧道效应等量子行为.有意思的是,电子在一个量子阱中的运动行为与一个经典的有限长度弦的振动有惊人的相似之处.在量子力学课程中的一个标准练习是描述电子在一个势阱内的运动.薛定谔方程的解是电子的驻波,或者说量子阱态,它是由量子数 n 来代表阱内驻波的

* 国家自然科学基金委国家杰出青年基金、辽宁省基金、沈阳市科委资助项目
1999 - 05 - 31 收到

半波的数目,不同的量子数的电子波具有不同的能量,也就是说,在一个无限深的单量子阱内的电子运动的波函数与一个经典的有限长度弦的振动波的形态非常相似.当然,在一个有限深的单量子阱内的电子运动的波函数需满足一定的边界条件,在其量子阱的边界可产生隧道效应,但其在阱内的波函数形态仍基本满足上述波的量子化特性.

电子在量子阱的量子态效应被视为最近发现的金属磁性薄膜中的磁性交换耦合和巨磁电阻效应的机制之一.由一层金属非磁性薄膜间隔的两层铁磁性薄膜间存在磁性交换耦合,并由此产生巨磁电阻效应^[1,2].磁性交换耦合和巨磁电阻效应随非磁性薄膜的厚度发生周期性的振荡^[3].由于巨磁电阻效应在加磁场时引发的磁矩的反转导致电阻的突变,可形成一种磁电转换的开关效应.这使得巨磁电阻效应可以用作计算机的读出磁头,从而极大地提高计算机的存储密度.磁电阻及巨磁电阻读出磁头满足计算机、多媒体及信息高速公路向高密度大容量及小型化方向发展的需求,是实现新型超高密度磁记录的关键技术及有效途径.目前,已经在提高计算机的存储密度方面取得了突破性进展,用 GMR 多层膜实现 22 Gb/in² 的读出头亦已见报道,巨磁阻硬盘磁头已投入应用,10—100 Mb 的 3in 磁盘几年内也将成为现实.巨磁电阻效应还可应用于高灵敏度磁传感器、各类运动传感器、巨磁电阻随机存储器等,在机电自动控制、汽车工业和航天方面有广泛的应用.巨磁电阻效应不仅在应用前景上潜力无穷,而且开拓了磁电子学这一门新的学科领域.

深入研究金属薄膜材料中的巨磁电阻效应和磁性交换耦合的机制对人们更好地了解电子在有限体系的运动行为具有极其重要的学术价值.最近,我们与美国加利福尼亚大学伯克利分校物理系邱子强教授和美国劳伦斯伯克利国家实验室先进光源中心的 Smith 教授领导的研究小组在金属薄膜中磁性交换耦合的量子阱效应机制研究方面取得新进展,有关的研究结果在 1999 年 3 月 11 日英国《自然》杂志上发表^[4].

文章的主要目的是研究电子在一个双量子阱系统中的运动行为,包括电子的几率密度、电子的能谱、电子间的交换耦合等.让我们再回到有限长度经典弦的振动问题,大家也许注意到弦乐演奏家可以通过调节弦下面的支撑点的位置,或者等价地调节弦的长度来改变弦下支撑点的相对位置,来调节弦发出的声调.一个双量子阱系统是由在一个单量子阱里插入一个势垒而形成.这一势垒相当于弦下面的支撑点.如果我们调节势垒的位置,电子的运动形态会发生怎样的变化呢?实际上,改变势垒的位置就改变了双量子阱系统的对称性,从而必将改变电子的运动状态.这篇文章通过用分子束外延的方法生长 Co(100)/Cu/Ni/Cu 正方形单晶薄膜,沿垂直于薄膜的方向构成一个双量子阱.两个铜薄膜层都生长成连续变化的三角楔的形状,从而可以连续改变非磁性的铜薄膜的厚度.两个铜薄膜三角楔的变化方向成 90° 垂直.在两个铜薄膜层中间插入一层等厚度的镍层作为中间的势垒.这种特别设计的生长方法的实际意义是:沿正方形的其中一个对角线 BD,作为势垒的镍层的位置从量子阱的一侧连续变化移到量子阱的另一侧,这一过程正好反映了双量子阱系统的对称性的变化;沿正方形的其中一个对角线 AC,作为势垒的镍层的位置一直保持在双量子阱系统的中间位置,为对称的双量子阱系统,只是两个铜薄膜层的厚度发生连续的改变.这种设计为我们提供了研究双量子阱系统的对称性一个最好的实例.美国劳伦斯伯克利国家实验室先进光源中心的光电子发射谱仪,在纳米尺度对生长的薄膜样品进行扫描,记录了局域在铜薄膜中电子的几率密度,发现电子的几率密度随铜薄膜的厚度成周期变化,变化周期依赖于双量子阱系统的对称性.对称的双量子阱系统的周期与前期的结果一致,证实电子的几率密度的振荡周期符合一个晶格调制波的理论预言.还发现双量子阱系统电子的能量谱依赖于电子的波函数的宇称和量子数的变化.有关的研究结果支持金属薄膜中磁性耦合

(下转第 690 页)