

近代物理研究薄膜

杨沛然

由于薄膜具有许多重要的物理特性和实际应用,它已成为近代物理研究的一个重要分支。广义地讲,薄膜应包括汽态薄膜、液态薄膜和固态薄膜三大类。由于篇幅所限,本文简略地介绍固体薄膜的特点、制备方法及其应用。

一、薄膜与大块材料的差异及其物理特性

薄膜与大块材料相比有某些特有的性能,正是这种特殊性能,使它在技术上得到重要应用。

1. 结构特性: 由于薄膜有很大的表面积,很容易受环境气氛和基片状况的影响,所以除分子束外延法外,一般镀膜方法制成的薄膜的有序化程度较大块材料差,杂质、浓度和缺陷都高于大块材料。例如在超高真空及 800°C 单晶硅基片上可蒸镀成结构完整的硅膜,但当基片温度降为 500°C 时,制成的膜中已含有大量的堆垛层错;而在室温基片上蒸发沉积的硅膜则为非晶态。又如钛、钼等在薄膜状态下为面心立方结构,而在大块时则为体心立方或六角结构。

2. 金属薄膜的电导: 薄膜的电子性质与大块材料的电子性质的差异非常明显,某些在薄膜上见到的物理效应,在大块材料上根本不存在。

对大块金属来讲,其电阻因温度降低而减小,在高温区,电阻随温度的一次方减小,而在低温区,电阻随温度的五次方减小。但薄膜的情况不同。一方面,薄膜的电阻率要比大块金属的电阻率大;另一方面,温度降低后薄膜的电阻率不如大块样品下降得那样快。因为在薄膜情况下,表面散射对电阻的贡献很大。一般厚度小于 30nm 的薄膜,即使在 300K 的温度,表面散射对电阻的贡献也已经表现出来。

薄膜电导异常的另一个表现是磁场对薄膜电阻的影响。处于外磁场中的薄膜的电阻要比大块样品的电阻大一些,这是因为在这种情况下,电子在薄膜中沿螺旋形路线前进。只要螺旋线的半径 ($r = mv/cH$) 大于薄膜的厚度,电子在运动过程中在表面处的散射就

会产生附加电阻;使得薄膜在磁场中的电阻大于大块材料的电阻,也大于薄膜在零磁场中的电阻。这种薄膜电阻对磁场的依赖关系叫磁阻效应,它有时被用来作为测量磁场强度的一种方便的手段。

3. 通过绝缘薄膜层的电导: 绝缘体的导电能力是很差的,但当夹在两块金属电极之间的绝缘层变得很薄时,它的导电性能会发生很大变化。因为在这种情况下绝缘薄膜的导电性能不再由绝缘体的固有性质决定,而主要由金属与绝缘体接触界面的特性来决定。金属与绝缘体间一个合适的欧姆接触,可以向绝缘薄膜中注入附加载流子,改变了绝缘体的电子态结构。加到薄绝缘层上的一个不大的电压也可以在靠近界面处的绝缘体内产生很强的电场。在这种情况下,由于场发射注入可从阴极向绝缘体的导带中注入大量电流,实验表明,加到两个金属电极之间的绝缘薄层上的电压比较低时,它的电导表现为欧姆型,但当电场加大,则其 $I-V$ 特性就要偏离线性,而且,电场愈强,偏离线性愈严重。

绝缘薄膜层表现出的这种反常电导行为为部分原因来自其非晶态特性。在非晶态绝缘层的情况下,原来意义上的禁带已不存在,导带和禁带的界面变得模糊不清,再加上蒸发的绝缘层中往往还含有杂质和缺陷,甚至还有化学成份比的偏离,这些也会引起附加电导。有实验表明,在室温测量两个金属电极夹着绝缘薄层系统的电容时发现,其电容几乎与绝缘层的厚度无关,仅由金属电极与绝缘层界面处的肖特基势垒决定。薄膜本身的电导比较高,对电容没有多少贡献。

当夹在两金属电极之间的绝缘层变得很薄,比如说只有 5nm 厚时,通过绝缘层出现隧道电导,即使加到电极之间的电压低于界面势垒高度,导电电子也能通过这层绝缘薄膜。用 $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Al}$ 隧道结测出的,通过薄绝缘层的隧道电导的 $I-V$ 特性曲线如下图。

从实验曲线看出,在 2 伏处隧道电流达极大值,这个电压就是绝缘层的势垒高度。加到电极上的电压大于 2 伏时,隧道电流反而下降,有一个负阻区。这种高度非线性电导在某些情况下是很有用的,用它可以制出一些特殊的电子器件。

4. 超导薄膜: 超导薄膜的性质与大块超导体有明显差异。虽然薄膜的临界温度与大块超导体一般无多大差别,但如果某些超导薄膜与大块超导体结构明显不同,则薄膜超导体的临界温度可能变化很大。另一个对薄膜的性质有明显影响的因素是所谓邻近效应。当在一超导薄膜上再叠上另一层异质薄膜时,超导薄膜的临界温度会明显变化,尤其当超导膜的厚度很小时,这种影响就更显著。

超导薄膜的临界磁场与大块超导体也有明显差别。理论计算表明,薄膜厚度 d 比伦敦穿透深度 λ_L 愈

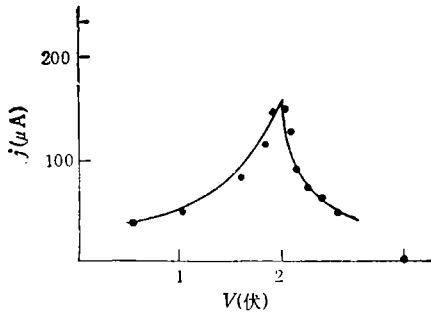


图1 Al-Al₂O₃-Al 隧道结的 $I-V$ 特性

小,它的临界磁场比大块超导样品的临界磁场愈高.对于 d 大于 $2\lambda_L$ 的薄膜,它的临界磁场与大块材料的临界磁场已无多大差别.

5. 薄膜的磁性性质 一百多年前人们就知道薄膜可以呈现铁磁性质,但对薄膜的铁磁性质进行仔细认真研究,却是最近二、三十年的事情.人们发现铁磁薄膜对信号的存贮很有用,可制成各种磁盘、磁带和薄膜存贮器.现已知道,不但用 Fe、Ni、Co、Gd 等金属可制成铁磁薄膜,用非金属的铁氧体,石榴石及硫化化合物也可以制出铁磁薄膜.这种铁磁薄膜的特点是磁化强度向量 M 在薄膜平面内,且处于平面内的这个易极化轴可以处于平面内任意方位角;外加一个小磁场还可使磁化强度矢量反转. FeNi 薄膜的很强的磁各向异性主要来源于薄膜的特殊几何形状.外加一个磁场使铁磁薄膜磁化强度 M 的方位角发生改变的快慢,是这种薄膜的重要参量.研究表明, M 在易磁化轴方向的反转时间为 1ns,因而用这种铁磁薄膜可制成快速存贮元件,如磁膜存贮器.

二、固体薄膜的制备方法

1. 真空热蒸发镀膜. 首先通过加热的办法把待蒸发的固体材料变为蒸汽,然后通过蒸发源到基片之间的空间凝聚在基片上形成薄膜.

2. 离子溅射镀膜. 当具有足够能量的离子轰击固体表面时,只要其能量超过靶材原子的束缚能,它就可使固体材料的原子离开原来的晶格位置,形成结构损伤.如果轰击靶材的离子能量大于靶材升华热的四倍,靶表面的原子可轰击出固体表面,产生离子溅射.

3. 离子束溅射镀膜. 这种方法的作用原理与离子溅射相似.所不同者,这里轰击靶材的不是带正电的离子,而是中性原子.用这种方法溅射薄膜时,先在一个叫作离子枪的专门装置中产生阳离子,并把它加速到一定速度.在这束阳离子离开离子枪进入镀膜室之前,其正电荷被电子中和,但保持其动量不变.

4. 反应溅射镀膜. 某些金属氯化物和氮化物的

薄膜,通常是用溅射的方法来制造的.其工艺设备与离子溅射法所用的相似,但充入的溅射气体为氩气与反应气体的混合物,靶材本身仍然为纯金属.

此外,分子束外延也可以算作一种制膜方法.它可以在单晶半导体基片上生长结构完整的薄膜,严格控制半导体外延层中的杂质含量,以及外延层的导电类型,是目前生产砷化镓半导体器件的主要工艺手段.

三、固体薄膜的一般应用

人们研究半导体薄膜的主要目的是制作薄膜晶体管,这样就可以用蒸发镀膜的办法把晶体和被动元件制备在一块基片上,实现复杂电路的平面集成化.现已研制了多种半导体蒸发薄膜,但性能最好的是硫化镉(CdS)薄膜,硒化镉(CdSe)薄膜和碲(Te)薄膜.

目前主要有两类薄膜半导体器件.第一类是薄膜场效应晶体管.用上述几种薄膜制成的半导体薄膜场效应晶体管的性能类似于 MOS 晶体管,但其频响和稳定性要优于 MOS 晶体管.如果把薄膜场效应晶体管的栅和漏极连在一起,就可以构成一个场效应二极管.另一类薄膜半导体器件是所谓光导器件.光照可以激发半导体的载流子.用高增益半导体薄膜 CdS、CdSe、PbS 等做成的光导器件用于制造光电池,而用低增益半导体薄膜 SbS、PbO、ZnO 等做成的光导器件则用于制造成像器件,如电视摄像管,用它们还可构成更复杂的电路,如多级移位寄存器,记忆存贮器等.

超导薄膜的主要用途是制造超导电子器件.用超导电子器件可以制成灵敏度极高的电磁测量仪器和速度很快的数字电路.但由于低温条件不大适合于大规模工业应用,目前超导薄膜的应用还主要局限于科研部门和实验室.最近氧化物超导薄膜已经制成,人们正努力探索用这种在液氮温区使用的超导薄膜,来实现超导电子器件大规模应用的可能性.

人们根据不同的用途制成了一些具有特殊性能的薄膜.例如氮化钛的硬度很大,把它镀在金属表面或切削工具上,可改善它们的耐磨性能.在光学领域,各种滤光膜、透光膜及用于改善外观的装饰薄膜等,在日常生活中随处可见.这些都足以说明薄膜与现代科学技术诸领域有极紧密的联系.

我国薄膜研究工作始于六十年代初,随着国产镀膜设备性能日益改进,薄膜制备及各种应用研究已从实验室延伸到许多工业技术部门,成为一个重要的工业部门.它涉及各种制膜设备的制造,薄膜物理性能分析测试,各种特殊薄膜的制备工艺研究,以及薄膜在轻工、电子、光学、机械、仪表等部门的应用,随着四化建设的发展,薄膜的研究和应用将会有更大、更快的发展.