

以原子作砖块的建筑术

简介分子束外延技术

孙殿照

一、引言

分子束外延技术(简称 MBE)是制备超薄多层晶体膜的技术之一。它制做的薄膜厚度可以薄到单原子层或单分子层的厚度,这就意味着如同用砖砌墙一样,可以用各种分子或原子“垒”出新的晶体材料,使其具有人们希望的性质,有人称其为“能带工程”,还有人比拟为生物学中的遗传工程。MBE 技术已在半导体材料、器件和物理几方面都引起了巨大变化,取得很多重要成果,形成了新的研究领域。

二、分子束外延(MBE)原理

MBE 起源于真空蒸发技术。在真空中分别加热几种高纯材料,由这些材料蒸发或升华出来的分子或原子直接飞行到具有一定温度的晶体(衬底)表面上,通过在表面上的移动、分解和化学吸附、有序排列成晶体薄膜。多余的未被吸收进晶体的分子脱离晶体表面、重返真空、吸附在真空室内壁上或被抽气泵抽走。

三、分子束外延(MBE)成膜过程

虽然 MBE 已能外延很多种材料,但是对于外延过程的研究多数是关于砷化镓分子束外延。在砷化镓(GaAs)晶体中砷和镓的原子个数是相等的,而在分子束外延砷化镓时,砷分子束和镓分子束是彼此独立,互不相关的,那么砷原子和镓原子是如何 1 比 1 地组成晶体的呢?原来镓原子和砷分子在砷化镓衬底上的粘附系数不同。所谓粘附系数是指入射到衬底上的一束分子中稳定吸附在表面的分子个数所占的比例。在通常砷化镓分子束外延时,镓分子束实际上是镓原子束,砷分子束中的砷分子是由两个砷原子组成(As_2)或者由四个砷原子组成(As_4)。衬底温度在 $500-600^\circ\text{C}$ 范围,在这个衬底温度,镓原子的粘附系数是 1,而砷分子的粘附系数取决于有没有和有多少镓原子。当表面无镓原子时,砷分子粘附系数为零。当晶体表面有镓原子时,砷分子在衬底表面遇到成对镓原子后分解成砷原子,一个砷原子和一个镓原子结合进入晶体,在表面上“定居”下来,而那些多余的和未遇到镓原子的砷分子则很快离开晶体表面返回真空。因此只要提供足够多的砷分子就可以使喷到晶体表面的每

个镓原子都能抓到一个砷原子,而多余的砷分子不会进入晶体,因此形成了镓和砷原子数为 1 比 1 的符合化学比的晶体。其它 III—V 族化合物的分子束外延有大致相同的机理。III—V 族化合物外延速率由 III 族原子到达晶体表面的速率决定,而 V 族分子的分解、吸附则控制着外延过程。

IV—VI 族化合物,例如碲化铅等在真空加热时,飞出来的不是碲和铅两种分子而是该化合物的分子碲化铅。该化合物的分子束外延就是直接由此化合物的分子束完成的。

II—VI 族化合物(如硫化锌、碲化镉等)的分子束外延过程类似于 III—V 族化合物分子束外延,只是外延速率不一定由 II 族或 VI 族原子到达速率决定而是由两者中到达速率较低者决定。

为研制半导体器件,要求在外延薄膜中有意掺入一定量的杂质,以控制材料的性质,例如在 III—V 族化合物分子束外延时用硅(Si)和铍(Be)进行掺杂,IV 族元素薄膜则用镓(Ga)和锑(Sb)等。

四、分子束外延(MBE)系统

MBE 系统包括超高真空系统、外延过程控制系统以及监测分析仪器、目前 MBE 超高真空系统通常由

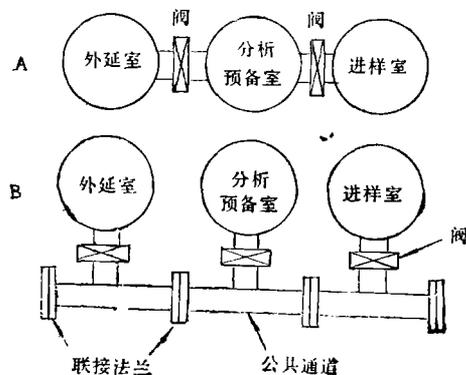


图1 三室联结方式
A 串接式 B 走廊式

三个不锈钢真空室组成,它们分别是进样室、预备分析室和外延室。每个室用无油真空泵抽气,各室通过闸板阀串接或各自与公共通道相连(如图 1)。衬底或外

延样品可以在真空状态下在各室之间传递,这种传递是通过磁力或金属波纹管传动的。外延室可以长达几个月不暴露大气,照常进行外延,这样可以明显改进外延室环境,减少来自空气的污染,提高材料质量。

外延室是 MBE 系统的核心部分。图 2 示意表示了现代分子束外延室的基本结构,它呈圆柱形或球形、直径约为 45 厘米、真空度优于 2×10^{-10} 托或优于 5×10^{-11} 托。在此真空室内装有分子束源炉、衬底加热器及机械手,检测分子束流的真空规管、液氮冷屏、超高真空计、高能电子衍射仪和四极质谱计(图中未画出)

分子束源炉加热方式多数是电阻加热、电子轰击加热,少数也有用激光加热的,加热功率由源材料温度

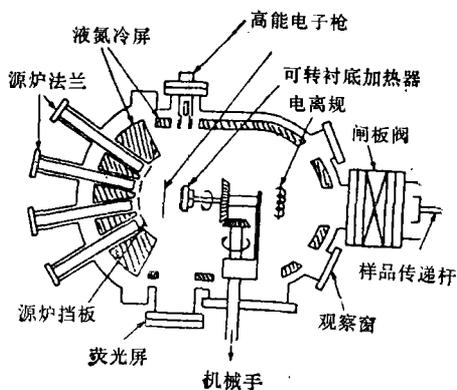


图 2 MBE 外延室结构示意图

或分子束流强度反馈进行控制。温度用热电偶测量,分子束流强度则用放在束流中的真空规管测量。在每个分子束源炉口处都设有机械挡板,用来瞬间开关分子束流;衬底加热器固定在机械手上,用电阻加热方式加热衬底,用热电偶测温。衬底在外延时可以转动以改善外延膜横向均匀性。在外延过程中,源炉温度,挡板和衬底温度都可以统一用微型计算机按预定外延程序进行控制;外延室的冷屏的作用是改善外延室真空和减少各个源炉间热干扰和污染;反射式高能电子衍射仪(RHEED)由高能电子枪和荧光屏组成。由电子枪发出能量为 10 keV—30 keV 的电子束,以 1° — 3° 角度照射衬底或外延面,在荧光屏上可观察衬底或外延面(表面几个原子层)的电子衍射图形;四极质谱计用以检测外延室气体成份和对 MBE 系统进行探漏检查。

MBE 系统使用的真空抽气泵包括离子溅射泵、钛升华泵、低温冷凝泵、涡轮分子泵、分子吸附泵、无油机械泵以及油扩散泵。一般 MBE 系统主抽气泵用离子溅射泵和钛升华泵,有时附加低温冷凝泵;下面将谈到的气态源分子束外延系统用涡轮分子泵或扩散泵做为主抽气泵。

五、分子束外延材料的分析手段

分析手段很多,主要的可分为结构分析、成份分

析、光学分析和电学分析四类。其中,电学分析有霍尔测量(Hall)、深能级瞬态谱(DLTS)、电容-电压(C-V)、电流-电压(I-V)等方式;光学分析有低温光荧光(PL),拉曼散射光谱、椭圆偏振光谱、光吸收、光电导等;结构分析有 X 射线衍射(XRD),卢瑟福背散射(BS),高能或低能电子衍射(HEED 或 LEED),反射或透射电子显微镜(SEM 或 TEM);成份分析有二次离子谱(SIMS),俄歇电子谱(AES)、电子探针(EMA)等。

六、分子束外延技术的几项发展

1. RHEED 强度振荡与锁相外延、间断外延

八十年代初发现在 MBE 过程中,反射式高能电子衍射强度发生衰减的周期变化(振荡),如果适时中断外延,其强度又会恢复。一个振荡周期相应于外延一个分子层或两个原子层。衍射强度反映外延面平滑程度。锁相外延就是跟踪这种振荡进行的分子束外延。用此技术外延多层结构材料,可以使得每层由预定的整数个分子层构成,各层界面平滑,无材料交错。间断外延的目的则是通过短时间中断外延来平滑外延表面或两层界面。

2. 脉冲束外延或单原子层外延(ALE, MLE)

有的二元化合物 AB(例如 ZnS),在适当的衬底温度下,它的表面覆盖一层 A 原子以后就不再吸附 A 原子而吸附 B 原子;当表面覆盖一层 B 原子时就不再吸附 B 原子而吸附 A 原子,因此将 A 原子或 B 原子交替喷射到衬底晶体上,而且每次喷射之后有个间歇,不喷任何原子,使得晶体表面不吸附的原子跑光,这样就可以做到逐层外延,形成原子级平滑的表面或界面。在某些情况用含 A 的化合物 AC 分子束和含 B 的化合物 BD 分子束,用同样方法也可以获得 AB 膜的单原子层外延。不同的是有 CD 分子的形成和脱出。

3. 气态源分子束外延(GSMBE, MOMBE, CBE)

其分子束是由真空室外输入的气体形成。气体流量由流量计和/或压力计控制。气态源分子束外延综合了 MBE 和 MOVPE 两个技术的优点,可以进一步提高材料质量,扩展可能外延的材料种类。

4. 分子束外延与聚焦离子束等真空工艺联合

近年来人们在试验将聚焦离子束等真空工艺设备与 MBE 设备联合,以逐步实现材料生长及器件制造全部在真空中一次完成。

5. 光辅助分子束外延

在分子束外延过程中,用强紫外光源照射局部衬底表面,可以实现有选择进行局部外延同时还可以降低外延温度。

6. 迁移增强外延(MEE)

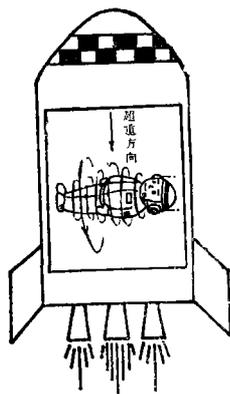
以砷化镓的外延为例说明,在外延时,不同时喷射镓和砷分子束而是将此二束交替喷射,可增强表面镓



编者按:

青少年是富于幻想的,因而常常被人称之为“异想天开”。但正是这种幻想,这种异想天开,曾诱惑他们中的许多人走进科学的殿堂,登攀科学的

顶峰,摘取科学的桂冠……。也许今天,他们的想法是那么幼稚,那么肤浅,甚至有些荒唐。但通向明天的成功之路,却从这里开辟、延伸和发展!为了激励我国青少年勇于探索、敢于拼搏的精神,本刊新辟《异想天地》栏目,希望得到您的喜欢与支持。



飞船加速的同时人体进行旋转可增加耐力

王磊*

超重对人体影响是一种惯性反作用的机械力,它可以使松弛的悬垂器官移位,使软组织压扁,使血液动力学改变等,对人体生理有很大影响。虽然人们采取了一些措施来提高超重耐力,但人体的超重耐力毕竟有限,这使得飞船加速度不能太大,而且作用时间也有限,能不能寻找一种方法,来增大超重耐力呢?

假如飞船加速的同时,让人体旋转起来(其装置的平面如图所示)人体和飞船底板垂直(也可采取其他耐超重的姿式),以人体为轴进行正旋转。因为人体在很短时间内,在一种超重形式下可承受很大的超重,如用这种方法旋转,则可时时改变身体的放置形式,这样横

式超重和侧式超重可综合利用。在人体某个部位还未感到不适,此处的超重方式已改变。如此快速进行循环,这样可大大提高超重耐力。

当然,飞船的加速度和人体旋转的向心要适当,不能因飞船加速度过大而使人体感到不适,也不能因旋转向心加速度过大而使人感到不适。这要根据一些实验数据计算出这两个加速度。由于人体的生理条件,人体所承受的加速度的值是有限的,所以预测这个设想主要用来增大作用时间。

我们要用实验来证实这个设想。把人体(动物、人体模拟装置)装入航天飞机,或在地面模拟超重环境,记录下超重情况下人体生理的变化。如果这个设想成功,我们就可以长时间加速,为我们探索外星球提供条件。

* 作者系陕西临潼华清中学高一(二)班学生

原子的移动,有利于镓原子各就其位,这种外延优点是可以降低外延衬底温度和提高材料质量。

7. 原子平面掺杂技术 将掺杂剂集中掺在外延膜中一个原子平面内的技术。

七、分子束外延技术的应用

到目前为止,用分子束外延技术已能外延出很多种材料,包括金属、半导体、绝缘体、磁性材料、超导材料、稀土化合物材料等。其中半导体材料最多,包括绝大多数 III—V 族, II—VI 族, IV—VI 族, IV 族材料以及由这些材料中的两三种构成的异质结构材料。用 MBE 技术研制了多种所谓超晶格、量子阱的多层结构材料,在这些材料中,由于各层厚度接近或小于自由电子的平均自由程,表现出明显的量子尺寸效应。MBE 提供了充分开发利用这一效应的手段;在器件研制方面,除了研制了性能良好的一些常规器件外还研制了性能优越、独特的新器件,如多量子阱激光器、基于室温激子非线性吸收或量子限制斯塔克效应的光双

稳器件及其陈列,超晶格雪崩光电探测器、高电子迁移率晶体管,异质结双极晶体管以及共振隧穿热电子器件等;在物理研究方面有分子束外延超晶格、量子阱的能带结构,晶格振动、发光、二维激子光吸收以及低维载流子物理等研究。为提高现有材料和器件质量,八十年代发展起来的一些新技术如原子层外延、原子平面掺杂等将得到更广泛应用;气态源分子束外延,光辅助分子束外延以及包含分子束外延的全真空加工工艺将进一步发展完善;在外延材料方面,研究和利用低维电子特性的量子线、量子盒结构材料,金属、半导体和绝缘体外延在一起的复合外延材料,由晶格失配材料组成的有弹性应变的多层结构材料,可见光、红外、远红外光电器件材料,新型超高速、超高频器件材料,硅衬底上外延的光电子集成材料以及 II—VI 族分子束外延材料的掺杂问题等可能会着重研究和发展;MBE 设备,除了继续提高现有设备性能(如真空度)外,将继续向生产型和自动化方向发展;在外延机理、外延表面结构研究中计算机模拟可能发挥更大的作用。