

# 纳米尺寸微结构制备

Henry I. Smith & Harold G. Craighead

10年前,电子器件的研究和制备刚刚跨入微米的量级。今天,已经在研究100nm尺寸的器件了,从而也就出现了若干新的术语如纳米尺度器件(nanoscale device),纳米制版术(nanolithography),纳米尺寸微结构制备或简称纳米制备(nanofabrication)。

纳米尺度器件(以下简称纳米器件)可分成两类:常规器件和量子器件。通道长度短于100nm的场效应管是常规器件的例子。制备短通道场效应管的目的是获得短的飞越时间,在更高频率下使用场效应管。也可以通过减少飞越时间到与某一特征弛豫时间接近,而建立新的工作模式。常规器件一般用于电子相干长度小于器件的最小尺寸的情况下,因此在常规器件中电子仍被看成经典粒子。

电子波动性是量子器件的基础,准确地说,当器件的某一维或多维方向上的尺寸与电子的德布罗意波长相比拟时,通常这远小于电子的相位损失长度(相干长度)。这时,量子现象占主导地位。当尺寸减少时,电子能级的分离程度增加,量子特性随之也更为突出。常规器件在尺寸减少时所具有的优点,最终被寄生效应所抵消,因此不能继续减少常规器件的尺寸,而量子器件则不然,其尺寸可进一步减少,但是从制备工艺来看,量子器件的制备无疑是对现行工艺的挑战。它要求发展精密、可靠的方法来制备特征尺寸为10nm(即小于100个原子的宽度)的复杂的半导体结构。应该指出的是,两种纳米器件的制备面临着同样的难题:主要基体材料的生长,纳米尺寸结构的制版和转印。本文只限于讨论纳米结构的制版技术(纳米制备),介绍一些实例以说明当前的工艺水平。关于其他问题读者可参看 *Physics Today*, Oct. (1984), 24.

## 1. 纳米尺寸的常规电子器件

绝大多数纳米制备是一个平面过程。这一过程适用于制备特征尺寸接近10nm的结构,它可分为两步:制版和转印。在制版中,使用对辐射敏感的薄膜(抗蚀膜),抗蚀膜被曝光而具有一定的图案。一般选用电子束、离子束、X射线或光子使膜曝光。这些射线可以改变抗蚀膜的性质,改性后的膜可把图案显影成膜中的雕像。这一雕像可通过蚀刻、生长、掺杂或剥离技术转印入基片。工艺成败的关键是制版时的分辨率和准确度以及转印过程中的传真度和不损伤结构的其他部分。

在扫描电子束制版技术中,细聚焦电子源通过一组电磁透镜成象在基片上。这被广泛地用于工业制备光刻掩膜,在纳米制备中也被广泛地用于各种目的。这一技术的优点是有高质量的电子源和电子光学系统,可将电子束聚焦成2nm的束斑,并可准确地对任意图案进行扫描,以制备出任意的花样。例如,用焦斑小于0.5nm的电子束,已制出8nm细的钨线;曾在离子晶体上制成1nm的孔。但是,实践证明直接用电子束扫描制版不是纳米制备中的有效的技术。因此,本文将不详细讨论它。

在结构与商用的金属-氧化物-场效应管相似的纳米尺寸的MOSFT中,已用电子束制版技术制造了多晶硅的门电极和通道,其通道长度为100nm,而其开关时间为13.1ps;在掺杂的AlInAs/GaInAs调制材料上制出了短通道的场效应管,实现了4ps的开关时间。此外,用电子束技术还在AlGaAs/GaAs上制成了共振隧穿量子器件,其作法是先在基片上用调制掺杂的方法获得高迁移率的两维电子气,基片上两维电子气的尺寸范围略大于1 $\mu$ m,然后在它的中部刻蚀成两条平行的宽为60nm、间隔也为

60nm 的 Ti/Pt 门电极的金属线。这两条金属线组成的双门电极是肖脱基型,由此而产生的势垒,阻挡了电子由源电极到漏电极的自由流动。当门电压上升时,电子可以隧穿过双电极之间的势阱。这一量子隧穿效应表现在电流-门电压的曲线上,使得在此曲线上出现了对应于量子隧穿效应的三个峰。与通常的量子共振隧穿器件不同的是此器件的输运过程发生在平面内而不是与平面相垂直的方向上。另外,它的重要特征是效应的强度和能观察到效应的温度都随器件尺寸减少而增加。

在电子束制备的 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 隧道结上,使用了线宽为 50nm 的细导线,从而观察到了 I-V 曲线上的、来源于电子隧道效应的强振荡。

实验上已用电子束刻版和反应离子刻蚀法制出直径小于 10nm 的金属性纳米收缩(nano constriction)。例如,蒸发金属到预先挖有小洞的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜的两侧,可观察到很多有趣的现象,其中包括两能级涨落和 1/f 噪音的出现。这一结构是至今用于输运测量研究过的最小的纳米收缩。

## 2. 减少散射的影响

电子束制版中存在的问题之一,是大量入射电子穿过抗蚀膜后,又被散射回来而产生的背散射影响。背散射影响的范围一般远大于纳米器件中典型的特征尺寸和间隔,它造成的背底曝光限制了可允许曝光的尺寸范围,使我们难以制备大面积的纳米结构。另外,背散射效应还使掩护膜的曝光参数依赖于衬底材料的原子序数和图案细部的保真度。为消除背散射影响,可采取如下的办法:第一个方法是提高入射电子能量(100keV),这时,背底曝光的范围已被扩展为若干微米,而其强度变得更加均匀和弥散。虽然,已有人用此方法,用 10—100nm 的膜作为衬底,刻制成 2nm 细的特征尺寸,但是在半导体器件制备中已很少用了。第二个方法是用极低的电子能量(小于 1keV)来减少背底曝光,它可使背底曝光的范围限于 100nm 之内。

聚焦离子刻版可避免背散射影响和减少毗邻的特征结构的重叠曝光。当离子束穿过抗蚀

膜后,其能量损失是准连续的,而产生背底曝光的是激发的二次电子,二次电子存在范围仅为 5nm 左右。另外,主要的大角度散射发生在离子弹道的末端,此时离子能量极低,进一步减少背底曝光。用离子束技术(如 Be<sup>++</sup> 离子束)制成了 250nm 厚、50nm 宽的金线,其间隔也为 50nm;而用 Ga 离子束在薄的 PMMA 抗蚀膜上已制成 12nm 的细线。聚焦离子束制版技术中存在的问题是用于聚焦的静电透镜技术还不完善;低原子序数的离子源的亮度太低。但是,在制备 10 到 100nm 线宽时,它可以与最昂贵的电子束刻版装置相匹敌。因此,必须发展高亮度和细聚焦的低原子序数的聚焦离子束装置。聚焦离子束技术的一个重要缺点是容易引入杂质和损伤基片。实际上,它一直用于直接制备半导体中的导电和非导电的区域,以省去抗蚀膜曝光过程。

电子束和聚焦离子束制版术对图案曝光过程是逐点进行的,用它易于制备任意的几何图案。控制高能量的带电粒子束产生高保真的、在大面积内相关的图案,要求先进的粒子光学系统和精确的计算机控制。目前的水平是:线宽为 50nm,最大面积为 100μm<sup>2</sup>。在更大的面积内的纳米结构的图案呈现出小块的镶嵌结构。如果使用干涉仪跟踪样品台的精确移动,可以使线条在跨越镶嵌块边界时的间断程度与线宽相近,目前已达到 10nm 的水平。

## 3. 曝光时间

曝光过程是依次进行的。曝光时间与束流、抗蚀膜灵敏度以及图案的面积有关。例如,刻写 50nm 的线,需用线宽为 10nm 的电子束,束流流强范围为 10 到 200pA,这取决于源的型式(热离子还是场发射)和光学系统。对 PMMA 膜,要求 10μC/cm<sup>2</sup> 相应于在 10nm × 10nm 面积内只有 63 个电子,当把灵敏度提高一个量级时,会导致统计噪声出现。假定对于 50nm 线宽,电子灵敏度为 1—10μC/cm<sup>2</sup>,在知道束流和图案的面积后,可计算出曝光时间。为减少曝光时间,可适当增加束流强度,同时降低能量到 1keV 以下。在场发射系统中用 2keV 能量

和 5nm 直径的电子束时,计算出电流为  $2\mu\text{A}$ 。有人打算用类似于扫描隧道显微镜的技术(即用压电晶体调整尖端位置来维持稳恒电流),去解决场发射中的电流不稳定问题。解决这一问题的另一方法是同时平行照射抗蚀膜使其曝光,它比扫描方式所用时间短。例如,用面膜的阴影像或投影像使抗蚀膜曝光时, X 射线束比电子束、离子束都优越。对制备 100nm 以下的特征尺寸,波长应选为 1.3nm 或 4.5nm, X 射线的  $1/e$  吸收深度约为  $1\mu\text{m}$ 。除了可制备面积大(几平方厘米)的图案外,由于可忽略背散射和散射 X 射线的损伤,因而使像的衬度提高,曝光过程也无需严格控制。最好是用同步辐射的软 X 射线,它可把曝光时间由几小时缩短到几秒。另外,激光等离子体源也正在发展之中,它的曝光时间仅为同步辐射的 10 倍左右。X 射线制版用面膜上的图案可预先用电子束、离子束、光子刻版来完成。但是,有关面膜的耐久性、定位和畸变问题尚有待改进。目前,准确到 10nm 的定位似乎是可能的。

#### 4. 量子效应

在 GaAs 基片上生长出的 GaAs/GaAlAs 多层膜上,用 X 射线制版术将 7nm 厚的  $n^+$  掺杂 GaAs 层刻蚀成线宽为 60nm、间隔为 200nm 的四方网格,其面积为  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 。在此面积内形成了以 200nm 为周期的肖脱基位垒网格状的门。升高门电压,减少了电子的费米波长。当电子的半波长的整数倍等于位垒网格的周期时,发生位垒对电子的背发射,导致  $R-V$  曲线上出现几个峰。换句话说,在电子相关长度大于几个格子周期的条件下,人工格子的超点阵把正常的能带结构分成若干子带和子能隙。门电压还可控制调制深度。在门电压足够负时,二维电子气耗尽在门格点下方,形成功绝缘的、抛物型势阱或量子点列阵。每一量子点只包含几个电子。用 X 射线纳米制备技术已制成每平方厘米内含有 2.5 百万的量子点列阵,其总面积为几平方厘米。一般在用远红外、近红外电磁吸收和磁场电容的测量中(即吸收、电容和磁场的关系),探测出了量子点的电子

态。它们要求有几平方微米面积的列阵。在上述制备技术中,还使用了 X 射线掩膜和紫外卤化物刻蚀技术,以保证图案在大面积内的相关性和几秒钟的曝光时间。近年,已在半导体基片上直接作成了人工超点阵的量子点列阵;也在多层化合物膜上蚀刻出量子点列阵。目前水平是点径为 25nm,点密度为百亿个量子点/ $\text{cm}^2$ 。但是,因为在蚀刻时会损伤侧面和表面,破坏了人工超点阵的周期性,所以本技术仍有严重的缺点。目前看来,量子点列阵的近邻的相互作用或许会用于巨型平行计算机,也有人正在计划建立细胞自动机。

综上所述,在纳米尺寸的金电极上施加电压以产生场效应,而场效应产生的势阱进一步限制了电子运动范围,这是量子器件的独特之处。显然,电极控制的场效应易于实现,又可通过外电压来改变势阱的大小。量子弹道输运电导是演示场效应限制电子运动的实例之一。在间隔约为 270nm 的电极上加负偏压,可以压窄甚至切断导电通道。当通道变窄时,电导下降为  $2e^2/h$  的宽度的阶梯形式。当通道进一步变短时,电子穿过通道是弹道式的。通道内允许的波函数的模式是量子化的,它与波导的模式类同,从而导致电导亦是量子化的。当费米面升高到另一高阶波导模式所允许的能量时,电导增加  $2e^2/h$ 。这一增量可由测不准关系导出。在调制掺杂的 AlGaAs/GaAs 上刻蚀的 200nm 周期的 AlGaAs 人工超点阵中,刻蚀成的线的侧面的表面态引起二维电子气耗尽,产生一个 30nm 宽的通道。实验上,观察到电导围绕二维电导值的上下振荡。这是由于费米波长达到下一允许的高阶横波模式时,波导的态密度在此点不连续,电子被散射到允态的几率突然增长,引起迁移率下降。鉴于维数和尺寸对电导的影响,我们可用外电极来调整迁移率。

#### 5. 展望

纳米制备要求材料生长、电极接触、刻版和转印的质量极高。目前,还不存在一种普通的制版和转印技术。特别是高能粒子的轰击损伤

(下转第 14 页)