

验^[4]对长度变化进行了直接的观测,进一步证实了热膨胀动态过程的存在。近期的实验更加清楚地显示出温度长度变化的不同步效应和瞬态应力的消长过程^[5]。这正是瞬态激光作用下固体中所发生的弛豫过程在宏观上的表现。

本文在理论方面所讨论的内容包括激光光子激发下固体中电子-电子相互作用,电子-声子相互作用和声子-声子相互作用。计算结果和实验结果还有一定差距,主要体现在声子的微观运动和固体的宏观变化之间如何过渡还没有具体计算出来,二者的时间过程大约还差一至两个数量级,这正是我们下一步理论工作所面对的问题。在实验观测方面,应该进一步观测各类试样中的热膨胀滞后效应和这类现象随环境温度的变化情况。在近期的工作中我们已经初步找到了解释这种差距的物理模型,定量计算正在进行中。滞后效应随温度变化的趋势已

有了初步实验结果。

- [1] L. P. Kadanoff and G. Baym, *Quantum Statistical Mechanics*, Benjamin, New York, (1962).
- [2] J.X.Li and B. L. Zhou, *J. Phys.: Cond. Matt.*, **4**(1992), 1015.
- [3] H.J. Maris, *J. Phys. (Paris)*, **33**(C4)(1972),3.
- [4] B. L. Zhou, *Proc. 3rd Asian Therm. Prop. Conf.*, (1992), 1.
- [5] H. Haken and A.Schenzle, *Z. Phys.*, **258**(1973), 231.
- [6] W.L.Zhao and B.L. Zhou, *J.Phys.: Cond.Matt.*, **4**(1992), L25.
- [7] P. W. Anderson et al, *Phil. Mag.*, **25**(1972),1.
- [8] W.A.Phillips, *J.Low Temp. Phys.*, **7**(1972),351.
- [9] D.W. Tang., B.L. Zhou. H. Cao and G. H. He, *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1991), 3113.
- [10] B.L.Zhou, *Proc. 1st. Asian Therm. Prop. Conf.*, China Academic Pulishers, (1986), 39.
- [11] 周本濂, *高压物理学报*, **2**(1988), 119.
- [12] B.L.Zhou, *Proc. 2nd Asian Therm. Prop Conf.*, Sapporo, Japan, (1989), 17.
- [13] C. F. Xu, B. L. Zhou and Q. H. Ye, *Proc. 1st Asian Therm. Prop. Conf.*, (1986), 587.
- [14] 唐大伟、周本濂、何冠虎, *高压物理学报*, **3**(1989),107.
- [15] D.W. Tang et al., *J. Appl. Phys.*, **73**-8(1993).

脆性光学材料超精密加工技术

阎纪旺 于骏一

(吉林工业大学, 长春 130025)

如何在光学晶体、光学玻璃等脆性材料上高效地制取纳米级光学表面是现代超精密加工技术领域重点研究课题。近年来,此项技术取得了突破性进展,出现了浮法抛光、离子束加工、韧性加工等新一代脆性光学材料超精密加工技术。从加工机理、加工精度、表面质量、生产率等方面对其进行分析比较,并讨论了令人瞩目的韧性加工技术。

一、脆性光学材料

在日新月异的光学领域里,脆性光学材料得到了极为广泛的应用。光学玻璃是最为常用的光学材料,例如制造透镜、棱镜等的硅酸盐玻璃,用于制造高速飞行器光学窗口的石英玻璃以及天文望远镜和激光技术中应用的微晶玻璃等。光学晶体也因其具有独特的光学性能而被越来越多地应用在光学系统中。譬如,锗(Ge)

单晶在红外波段具有很高的透过率和折射率,非常适合做红外透镜之类的光学元件;又因它熔点高、导热性好、化学性质稳定而被用作人造卫星、导弹、红外探测仪等的窗口材料。LN(铌酸锂 LiNbO_3)和KDP(磷酸二氢铵 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)是常用的电光晶体和变频晶体,它们在激光技术中用得很多。

光学玻璃、光学晶体的应用虽十分广泛,但这类材料的特点是脆性大,可加工性差。所谓脆性大,是指材料的弹性极限与强度极限非常

接近,当材料所承受的载荷稍稍超过弹性极限时就发生断裂破坏,加工表面容易产生裂纹和凹坑,对其光学性能影响极大。近年来,人们在脆性光学材料的加工方面进行了大量研究和探索,已取得较大进展,并逐渐形成了几种可用于脆性光学材料的超精密加工方法。

二、抛光加工

抛光 (polishing) 是超精密加工脆性光学材料的传统方法,有着悠久的历史。它是通过在作相对运动的抛光模与工件间加入抛光粉,使抛光磨粒对工件进行刮擦、挤压以及抛光液与被加工材料间发生化学反应来实现加工的。因为工件材料是在很大的加工面积内以极低的速率去除的,故尽管工件材料很脆,抛光表面也不会有裂纹产生。

传统的抛光方法因为设备简单,工艺条件易于保证,依靠操作工人精湛的技艺就可以加工出优质光学表面,但它也有许多缺点。首先是它的生产率低,加工过程不易进行精确的控制,难以实现生产过程的自动化;其次,它只能加工平面或球面,而对于具有广泛用途的抛物面、高次曲面等非球面光学表面则是无能为力的;此外,传统的抛光方法还有“工件边缘钝化效应”,光学表面的面型精度不高;加工表面还有破坏层和变质层。

近十几年来,人们对传统的抛光加工方法进行了多种形式的改进,涌现出一批新型的抛光方法,例如浮法抛光 (float polishing)^[1]、弹性发射加工 (elastic emission machining)^[2]、准接触抛光 (semi-contact polishing)^[3]等。浮法抛光是1977年由日本学者 y. Namba 首先提出的^[1],其工作原理如图1所示。被抛光工件相对于锡制抛光盘作高速 (1.5—2.5m/s) 运动,抛光盘和工件间保持几微米厚的间隙以容纳抛光液,抛光液采用4—7nm的SiO₂、CeO₂、Al₂O₃的去离子水溶液 (其浓度为2%—8%)。Namba 等最初用浮法抛光方法加工金刚石晶体,获得了表面轮廓均方根偏差 Rms 值小于

1nm的超精密表面。后来他们又用浮法抛光加工硼酸盐玻璃、微晶玻璃和低膨胀率的非晶玻璃,获得表面轮廓均方根偏差 Rms 值为0.2nm,在100mm内平面度为3.8nm的超精密表面^[4]。浮法抛光属非接触抛光,抛光液中处于悬浮状态的微细磨粒以很高的速度对加工表面进行反复碰撞并有微切削作用,故能得到极小的表面粗糙度,面型精度也很高。但浮法抛光对设备的精度要求十分严格,锡制抛光盘须经金刚石车削制作。浮法抛光方法在日本得到了较为广泛的应用。

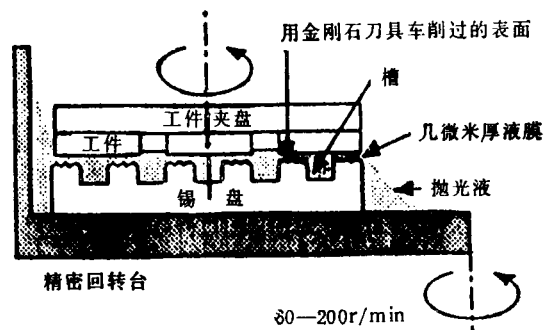


图1 浮法抛光的工作原理^[1]

与传统抛光方法相比,新型抛光方法虽有一些改进和提高,但就其本质而言,它们仍属抛光加工的范畴,仍然存在着生产率低、不能加工非球面等缺点。

三、离子束加工

离子束加工 (Ion beam machining) 是把惰性气体或其他元素的离子在电场中加速,成为高速的离子束流来溅射工件表面,利用离子束的力学作用撞击加工表面的原子或分子,达到微量去除加工的目的。离子束加工可以实现以原子为计量单位的纳米级加工。1987年美国学者 Wilson 等人用 Ar⁺, Kr⁺ 离子束对石英玻璃、微晶玻璃等进行了表面精整加工,在直径为0.3m的工件上得到面型精度为170nm、表面轮廓均方根偏差 Rms 值为0.6nm的超精密表面^[5]。图2是它的加工设备示意图。他们采用1500eV考夫曼离子源,能产生直径为10

mm 的离子束,通过控制离子束对加工表面的入射时间来控制材料的去除量。为了防止不导电的工件在离子束作用下发生放电现象,他们还在离子束的传播过程中加入了具有等量负电荷的低能电子。荷兰学者 Podzimek 也曾用被他称为“离子铣”(ion milling)的方法加工出单晶锗红外非球面透镜^[6]。在日本,离子束加工已被研究了相当长的时间,正逐步走向实用化。

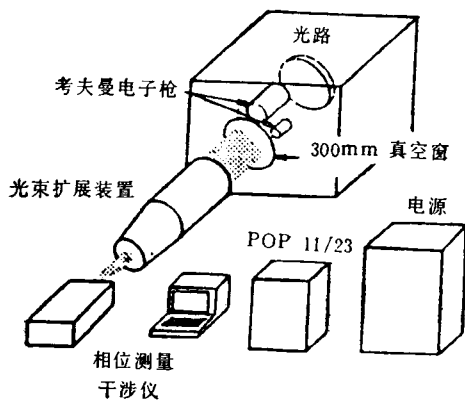


图2 离子束加工示意图^[5]

离子束加工的特点是加工表面无机械接触,不承受负载的作用,表面质量好,没有边缘钝化效应,适用于修整局部表面、校正大波长误差及改善表层材料微观结构、消除表面污染等。但这种加工方法需要有一套复杂的离子束产生设备,且仍然存在生产率低、加工过程不易控制、溅射的工件材料易于产生堆积等问题,有待今后进一步研究解决。

四、韧性加工

所谓“韧性加工(ductile machining)”是指在一定的加工条件下,脆性材料能够以韧性加工的形式进行加工,加工表面不会有裂纹产生。韧性加工是80年代末期研究开发的脆性材料光学元件超精密加工技术。随着超精密加工机床的问世,金刚石刀具制造技术的提高以及超精密加工环境保证技术的完善,单点金刚石车削(single point diamond turning——

物理

SPDT)技术得到了广泛的应用并日趋成熟。有人突破了光学脆性材料不能进行切削加工的传统观念,经过反复试验,终于把具有很多优点的SPDT技术成功地用于光学晶体等脆性光学材料的加工,创造了韧性切削(ductile cutting)技术。与此同时,随着高刚度超精密磨床的研制成功,磨削也被用来制作脆性材料的光学表面,创造了韧性磨削(ductile grinding)技术。这二种韧性加工技术的出现是光学零件超精密加工技术的重大突破,具有重要意义。

1. 韧性切削技术

早在70年代,人们就进行过车削玻璃的尝试,因加工表面有严重的裂纹产生未获成功。有人采用加热切削的办法,期望通过加热来降低光学玻璃的脆性,实现韧性切削^[7]。用这种方法加工虽然加工表面质量可以有所改善,但因加工后工件表面存在较大的冷却变形和残余应力故还是不能用于高精度零件的加工。后来德国学者 Schinker 提出了在室温条件下采用超高速切削方法加工玻璃的想法^[8],期望通过超高速切削(每秒几十米)使之在切削区产生大量的切削热,使玻璃材料发生软化或形成熔化层,从而避免在加工表面形成脆性裂纹,其切削模型如图3所示。试验结果表明,他们成功地实现了某些光学玻璃的韧性切削^[9,10]。然而,能够实现超高速切削的飞切方式只能加工平面,且超高速切削所产生的大量切削热必然会加剧单点金刚石刀具的磨损,因此这种方法的应用受到限制。

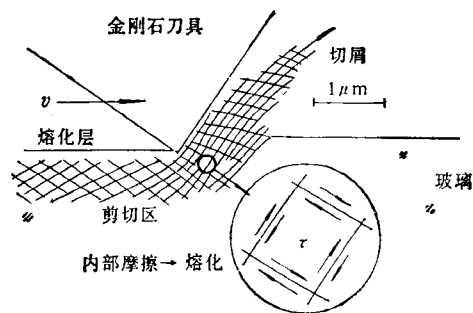


图3 切削模型^[8]

1987年,美国学者 Blake 等人在北卡浴林

那州立大学精密工程中心研制的一台超精密金刚石车床(如图4所示)上对光学晶体材料进行了车削试验^[11]。这一试验的成功开创了韧性切削光学脆性材料的新纪元。图4所示机床有二个相互平行的主轴(均由气体静压轴承支承),其中一个主轴带动工件旋转作切削运动,另一主轴则作为金刚石刀具刀架的支承。刀具的进给运动通过一精密丝杠操纵。金刚石刀具在垂直方向上的精确定位是靠压电伺服装置控制保证的。他们利用这台机床在常温常速下成功地实现了锗、硅单晶等材料的韧性切削,获得了表面轮廓均方根偏差 R_{ms} 值为 0.8nm (锗)、3—4nm (硅)的超精密表面^[12]。

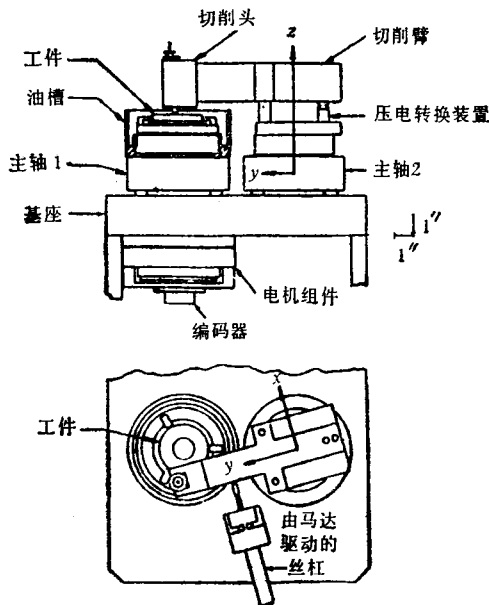


图4 超精密金刚石车床^[11]

Blake 等认为,实现韧性切削的重要条件之一是必须稳定地保证足够小的刀具进给量(工件每转一转,刀具进给几个微米或更小)。他们把切削区状态抽象为图5所示模型^[12,13]。由图5可知,沿金刚石刀具圆弧切削刃各点上的切削厚度 t_c 是各不相同的。Blake 等人的研究表明,切削厚度存在一个临界值 t_c ,在 $t_c > t_c$ 的区域里,由于被切材料的变形范围大,材料以断裂方式切除;而在 $t_c < t_c$ 的区域里,被切材料的变形范围小,材料以塑性变形的形式切除。减小刀具进给量 f ,切削厚度 t_c 随

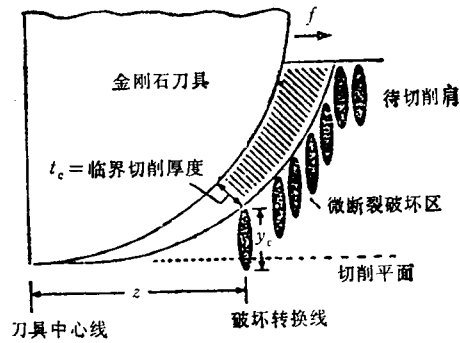


图5 韧性切削模型^[12,13]

之减小,临界切削厚度 t_c 的位置将沿切削刃上移,使塑性变形区增大,加工后表面产生裂纹的可能性变小,有利于实现韧性切削。

综上所述可知,此处所说的“韧性切削”,并不是切削区所有材料全都是以塑性变形的形式切除,而只是在形成加工表面的某一薄层区域内的材料是以塑性变形的形式切除的(故加工表面不会有裂纹产生)。Blake 等人提出的这一模型得到了实验验证,为韧性切削的研究奠定了基础。近年来,日本学者 Nakasuji 等人也相继进行了金刚石车削光学晶体材料的研究^[14],他们还用断裂力学理论解释了切削厚度大小与发生断裂的关系。光学晶体等脆性材料能够在一定的条件下实现韧性切削,可以获得优良的加工表面,已为国内外众多试验结果所证实。

2. 韧性磨削技术

脆性光学材料的磨削曾一直被用作粗加工工序来获取工件的大致形状,好的表面质量还要通过研磨、抛光得到。然而研究表明^[15],即使是脆性材料,当加工是在很小的范围内进行时,使材料发生脆性断裂所需要的能量也有可能大于使材料发生塑性变形所需要的能量。基于这一事实,人们制造了能够保证小范围加工条件(进给量、切削深度均在微米级以下)的超精密加工设备。于是,韧性磨削这一新型的脆性材料超精密加工技术便应运而生。

80年代后期,美国北卡罗林那州立大学精密工程中心在美国海军研究部门的资助下研制了一台超精密磨床,并成功地进行了韧性磨削试验^[11,15],机床主轴刚度为 50 MN/m,机床进

给系统装有驱动范围为 $10\mu\text{m}$ 的压电式微位移装置,其分辨率为 1.5nm 、图 6 是它的加工示意图。他们在这台机床上用经过特别精密修整的金刚石砂轮对硅单晶、锗单晶、非晶玻璃等多种光学脆性材料进行磨削,可以磨出没有裂纹的光滑表面。

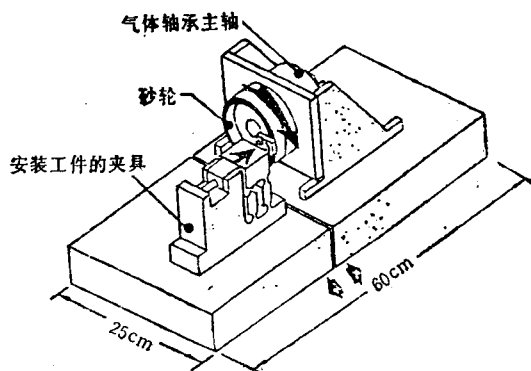


图 6 硬脆材料超精密磨削机床加工示意图^[11,15]

英国的克兰菲尔德精密工程中心 (CUPE) 也做了韧性磨削试验^[6],机床主轴刚度高达 618MN/m ,是迄今为止见诸报道的主轴刚度最大的超精密机床。他们利用这台机床加工 TiC 等硬脆材料,得到了纳米级表面粗糙度值的光学表面。日本在韧性磨削方面的研究工作也已达相当高的水平,目前已研制了很多韧性磨削机床^[7,10]。中部大学和丰田精机公司联合开发的装有零热膨胀系数玻璃陶瓷主轴的超精密磨床,就对多种光学玻璃和光学晶体进行了韧性磨削,得到了表面质量和光学性能均优于用传统的抛光方法加工得到的光学表面。例如,他们用这台机床磨削的 BK-7 玻璃,就获得了表面轮廓均方根偏差 R_{ms} 值达 2.2\AA 的优质表面。韧性磨削已被认为是一项富有广阔应用前景的硬脆材料超精密加工技术,许多国家都在投资研究此项技术。

以上介绍的韧性切削技术和韧性磨削技术,虽然所用工具不同,但因有相似的加工机理,统称之为韧性加工。韧性加工技术之所以得到人们的重视,是因为它有许多显著的优点:首先,它的生产效率远高于抛光加工和离子束加工,且可对加工过程进行精确的计算机控制,

实现自动化生产;其次,韧性加工是在高刚度、高精度机床上进行的,加工精度高,且不会产生工件边缘钝化效应;此外,韧性加工可加工的表面形状范围广,尤其是单点金刚石车削,不论是平面、球面还是抛物面、高次曲面等非球面,均可在计算机控制下进行超精密加工。

韧性加工技术的发展为脆性光学材料的超精密加工开创了一个新的天地,各发达国家都把这项技术列为重点研究项目竞相投资开发。国际上开发超精密加工技术、研制超精密加工机床较为著名的研究机构和制造商有美国的劳伦斯-里夫莫尔国家实验室 (LLL)、北卡罗林那州立大学精密工程中心、莫尔公司、伦克-纽莫公司,英国的克兰菲尔德大学精密工程中心,荷兰的菲利浦公司,日本的丰田公司、东芝公司等。目前在国际市场上销售的最先进的 CNC 超精密机床,其主轴刚度高达数百 $\text{N}/\mu\text{m}$,微位移装置的位移分辨率为 10^1-10^9nm ,能够胜任韧性加工的要求。

五、我国的研究现状及任务

从总体情况分析,我国脆性材料光学元件超精密加工技术距世界先进水平还有相当大的差距。在我国的光学元件生产车间中,大多仍采用传统的抛光方法进行加工,加工一个高精度零件往往需要数百小时或更长的时间,效率很低。有些优质光学元件还要依赖进口。

近十年来,国内光学脆性材料的加工技术有较大进步。中国科学院长春光学精密机械研究所用传统方法抛光 K-9 玻璃及单晶硅等光学镜片,加工表面粗糙度 R_{ms} 值小于 1nm ^[9]。哈尔滨工业大学庞滔等人曾做过准接触抛光的试验研究,加工 GaAs, InP 等软脆材料,加工表面粗糙度 R_z 值达 $0.02\mu\text{m}$ 且表面无变质层^[3]。在韧性加工技术的研究方面,我国已开始起步。天津大学正在进行韧性磨削陶瓷材料的研究。最近,吉林工业大学在中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室立项研究光学晶体材料的韧性切削技术,目前已能

在单晶锗上车出表面粗糙度 Ra 为 6nm 的超精密表面, 现正对单晶硅, $LiNbO_3$, KDP 等光学晶体材料进行切削试验, 寻求脆-韧转换条件。在超精密机床的研制方面, 国内也取得了可喜的进展, 北京机床研究所、沈阳第一机床厂、济南第一机床厂、上海机床厂等单位均有超精密加工机床供货。

为了适应当代科学技术飞速发展的形势, 推动我国光学、光电子及航空、航天技术迅速赶上世界先进水平, 我们必须重视脆性材料光学元件超精密加工技术的研究工作。我们既要重视从理论上深入研究脆性材料超精密加工过程中的脆韧转换机制及加工机理, 寻求韧性加工的工艺条件, 也要重视研制高水平的超精密加工机床。

[1] Y.Namba et al., *Annals of the CIRP*, **26**(1977), 325.
 [2] 森勇藏等, 精密机械, **49**(1985), 1540.
 [3] 庞滔、毛克良等, 中国机械工程学会生产工程专业学

会第六届学术大会论文集, 机械工业出版社, (1991), 183.

[4] J. M. Bennett et al., *Applied Optics*, **26**(1987), 696.
 [5] S.R. Wilson et al., *OSA Tech. Digest Series*, **19**(1987), 20.
 [6] O. Podzimek et al., *Proc. SPIE*, **656**(1986), 135.
 [7] R. Brehm, *Precision Engineering*, **1**(1979), 207.
 [8] M.G. Schinker et al., *Proc. SPIE*, **381**(1983), 32.
 [9] M.G. Schinker et al., *Proc. SPIE*, **802**(1987), 70.
 [10] M.G. Schinker et al., *Precision Engineering*, **13**(1991), 208.
 [11] T.G. Bifano et al., *Proc. SPIE*, **803**(1987), 12.
 [12] P. N. Blake et al., *J. Amer. Ceram. Soc.*, **73**(1990), 949.
 [13] W. S. Blackley et al., *Precision Engineering*, **13**(1991), 95.
 [14] T. Nakasuji et al., *Annals of the CIRP*, **39**(1990), 89.
 [15] T.G. Bifano et al., *Proc. SPIE*, **966**(1988), 108.
 [16] W. J. Wills-Moren et al., *Proc. SPIE*, **1333**(1990), 126.
 [17] Y.Namba et al., *Annals of the CIRP*, **38**(1989), 331.
 [18] J.Yoshioka et al., *Proc. SPIE*, **1320**(1990), 296.
 [19] J. Yu etc., *Proc. of the Sino-Japan Symposium on Engineering Optics*, Published by ACTA OPTICA SINICA, (1992), 198.

一种制备金属硅化物的离子束新技术

柳百新 朱德华 卢红波

(清华大学材料科学与工程系, 北京 100084)

随着目前超大规模集成电路的迅速发展, 要求器件尺寸按比例缩小, 线宽也要求相应变窄。而多晶硅的薄层电阻极限为 $30-60\Omega/\square$, 因此器件尺寸的进一步减小就被栅极内引线的内线电阻所限制。为此, 必须寻找新的合适的替代物以改进电路的速度。对于 MOS 器件来说, 其特性取决于一系列参数, 其中以 RC 时间常数最为重要。 RC 值越大, 器件的工作速度就越慢。根据理论计算和实验验证, RC 随薄层电阻的增加而增加。大多数金属由于低共熔温度、高扩散系数、较差的化学稳定性等特点而不适合于 VLSI 器件。因此低电阻率的金属硅化物便成为很有希望的候选者。硅化物作为栅和内引线金属化的材料, 具有所期望的较

高的电迁移率和直接在多晶硅上形成的优点, 因此引起广泛重视。其中难熔金属 (IVA、VA 和 VIA 族) 硅化物以及近贵金属 (VIII 族) 硅化物更具有类似于金属的低电阻率 (约为多晶硅的十分之一或更低) 和高温稳定性。因此自 60 年代起, 许多从事集成电路开发的研究机构和公司都投入了不少人力和物力进行这方面的研究, 并于 80 年代初, 已应用于某些器件的栅极和欧姆接触, 获得良好的效果^[1]。硅化物除了具有所需要的低电阻率外, 还能满足其他许多性能要求。难熔金属硅化物宜作栅金属化, VIII 族金属硅化物宜作接触。其中 $TiSi_2$, $TaSi_2$, $MoSi_2$, WSi_2 这四种硅化物被认为最有希望用在多晶硅栅上。