

超光滑光学表面加工技术

高宏刚 陈 斌 曹健林

(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, 长春130022)

摘要 现代科学技术的发展,在许多领域中提出了加工超光滑表面的要求。这种表面不仅要具备较高的面形精度和极低的表面粗糙度,同时要具有完整的表面晶格排布,消除加工损伤层。近年来国际出现了不少成功的超光滑表面加工技术,可以实现表面粗糙度小于1nm,面形精度优于30nm。本文介绍了超光滑表面的主要应用领域,从去除机理的角度讨论了BFP抛光、Teflon抛光、离子束加工、PACE加工、浮法抛光、延展性磨削等六种有代表性的超光滑表面加工技术,并对国内情况作了简单分析。

关键词: 超光滑表面,超精密加工,抛光

1 引 言

加工精度是人类社会科技发展水平的一个重要标志,包括两个量,一是形状精度,二是表面光滑(粗糙)程度,二者有着密切联系。在纳米(nm)技术已有长足发展的当今,所谓超光滑表面是指粗糙度均方根值小于1nm rms的表面,相应地,用于加工制造这类表面的技术被称为超光滑表面加工技术。

光滑表面通常亦叫做光学表面,这主要是因为最初对光滑表面的需求主要来自光学系统,其表面粗糙度一般为10nm rms。当代科学的发展,对这类表面乃至超光滑表面的需求已超出了光学领域,尤其是电子学的发展极大地推动了光滑表面制造技术的进步,渐渐地超光滑表面加工技术研究成为了现代超精密加工技术的热点之一。这种技术面对当今尖端科技,主要应用于两方面。一是以X射线光学、X射线激光、高温等离子体诊断等为代表的领域;这是发展国防、航天高科技系统的基础,欧美等国在这方面投资颇大。二是以磁记录、超大规模集成电路为代表的电子工业领域,其目的在于发展高精密民用技术;日本是这方面应用的受益者。日本很早以前就投入了大量的物力人力进行超精密加工技术的研究,推动了其电子工业的迅猛发展,并因此而获得了巨额利润。正是由于这两方面的原因,许多国家的科学家都在致力于研究超光滑表面加工原理和新技术。

2 超光滑表面加工技术的应用

超光滑表面加工技术是科学自身发展对材料加工提出的必然要求,这一点可以从下面的几个典型例子中看出。

(1)磁头加工。锰—锌铁(Mn—Zn Ferrite)是一种耐磨损性较高的材料,并且在高频电流中涡流损失很小。由于这一特点,锰—锌铁广泛用于制造录音机、录相机的磁头。作为磁头,为保证传输信号不失真、减少磨损延长使用寿命,锰—锌铁表面必须抛光到超光滑程度,并且表面平整,边缘几何形状规矩。

(2)集成电路用基板。光通讯系统、微波装置及SOS(石英—蓝宝石)集成电路中,需要基板上能刻出微数量级的线宽和间隔,这就要求基板表面不仅足够光滑平整,而且无亚表面破坏层、表面应力极小。这样的表面只有使用超光滑技术才能得到。

(3)强激光系统。强激光系统所使用的光学元件必须能够承受强辐射,具有较高的破坏极限。一些研究表明,光学元件受强激光的破坏极限是其表面诸多量的函数,比如表面粗糙度、麻点、划痕以及受抛光粉和磨盘的污染等等。这就是说,强激光使用的光学元件的表面必须超光滑、无破坏层且无污染。

(4)软X射线光学系统。软X射线光学近年来发展很快,原因之一是光学多层膜元件的成功应用;多层膜反射镜是软X射线光学应用于生物医学、天体物理、亚微米光刻等领域的关键器件。目前,多层膜元件正入射反射率在20~30nm波段,已由最初的2.7%提高到60%以上;其重要原因,除镀膜工艺外,就是基板的表面粗糙度可以降到0.5nm rms以下。Debye-Waller因子描述了多层膜系反射率因粗糙度引起的减小:

$$DW = \exp\left[-2\left(\frac{2\pi\delta\sin\alpha}{\lambda}\right)^2\right]$$

δ :均方根粗糙度

α :掠入射角

目前国际上所有的高水平工作中使用的基板表面粗糙度在0.5nm rms以下,最好的已达到0.1nm左右。

3 超光滑表面加工技术

加工光滑表面最重要的在于抛光过程。通常的抛光理论认为,抛光是三种作用共同作用的结果:磨料对工件的机械磨削、抛光液的化学作用、工件表面的热流动。对于超光滑表面加工,这种理论已不完全适用。通过比较近年来国际上出现的多种抛光新技术,可以发现存在着以下特点:

依赖磨料精细度的机械磨削;

利用物理方法去除工件表面原子;

利用化学方法去除工件表面原子。

不能说哪种技术单纯依靠某方式达到超光滑加工的目的,更多的是这三种去除方式共同

作用,以其中一种为主。实际的抛光是一个受多种因素控制的过程。磨盘材料、尺寸、表面加工情况和工件材料的硬度、化学组成以及抛光液酸碱性、浓度等都能影响抛光结果,另外抛光粉粒度种类、抛光时间、抛光机主轴转速和抛光压力等也是不可忽视的抛光条件。

本文介绍的几种超光滑表面加工(或抛光)技术,都是很成熟的工艺;我们不考虑具体的工艺条件,只就抛光工艺轮廓作一描绘。

3.1 浴法抛光(Bowl-Feed Polishing)

浴法抛光早在六十年代就已出现。当时美国为发展深紫外波段的光学,需要平面度和粗糙度很好的光学元件。采用这种方法在熔石英平面上获得了 0.3nm rms 的光滑表面,而当时用常规方法,只能获得 $1\sim 4\text{nm rms}^{[1]}$ 的表面。

图1是浴法抛光的机构图^[2]。抛光液浸没了磨盘与工件的交接面。

与传统的常规抛光类似,工件在旋转的沥青盘上水平摆动,并绕自身轴旋转,保证工件上每点与沥青盘上每点随机接触,使工件被均匀去除。由于离心力及重力的作用,抛光液中的磨料颗粒被甩到边缘并沉到桶底。抛光过程分两个阶段:(1)抛光开始时使用搅拌棒,让磨料在溶液中均匀分布,这样就不断有磨料颗粒沉淀在沥青盘上。磨料有自锐性,研磨破碎后露出新的锋利边缘,仍有磨削作用,但粒度更小了。(2)此时工件与沥青盘已很好地吻合,磨料粒度已足够小,移去搅拌棒,使抛光液中磨料沉入桶底,沥青盘上的磨料逐渐减少,有效抛光液浓度不断降低。由于抛光中磨料颗粒不断被研碎挤入沥青中,沥青盘表面变得越来越光滑,嵌入其中的磨料微粒不断锐化并变得越来越小,犹如一把把极小的车刀,持续微量地车削工件表面,使其粗糙度降低。

由于工件浸于液体中,工作时液体的作用使磨盘与工件的接触更柔合;大量液体的存在保证了磨盘表面局部温度的均恒,使磨盘不易变形,抛光小环境相对稳定,这样就有希望获得高面形精度的表面。

3.2 聚四氟乙烯(Teflon)抛光

用 Teflon 抛光出现于七十年代^[3],最初抛光法布里一珀罗干涉板,面形精度要求高于 $\lambda/100$ 。Teflon 的特点之一是耐磨损不变形,用于制作的磨盘面形可以保持相当长时间。Teflon 抛光可在几乎所有材料表面获得小于 $\text{rms } 4\text{ \AA}^{[4]}$ 的粗糙度。这种工艺的关键在于磨盘的制做。

制做磨盘时,选一块热膨胀系数小的材料作基板(比如微晶玻璃);首先在基板表面切出纵横交错的井字槽,得到 2mm 见方的许多小方块;将锐边倒角,如图2。然后用毛刷沾液体 Teflon 轻刷在基板表面。再用硬质毛玻璃直接研磨 Teflon 表面,不加任何磨料。不断减小研磨毛玻璃用的磨料粒度,这样经毛玻璃研磨的 Teflon 表面愈来愈光滑,最后可以用干涉法检查其平面度。显然可以得到极平整的 Teflon 表面。

高面形精度的 Teflon 用于抛光的最后阶段。工件最初要在沥青盘上抛光至 $\lambda/3\sim\lambda/6$ 。所使用的 Teflon 磨盘直径通常是被抛光工件的 $3\sim 4$ 倍;最好将磨盘和工件浸在抛光液中,采用前面所描述的浴法抛光方式。作为工件面形的最后修正,抛光速度一定要慢,机械振动要小。

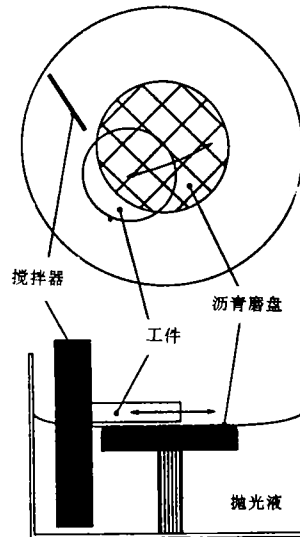


图1 浴法抛光示意图

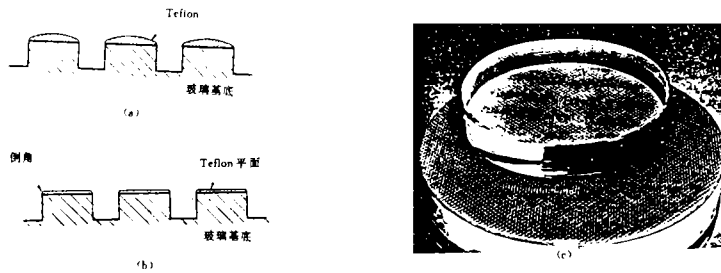


图2 a:基板涂 Teflon;b,涂 Teflon 后磨平;
c:Teflon 磨盘面形的干涉图

Teflon 抛光所使用的抛光机的主轴和偏心轴(即摆轴)分别由两个无级变速电动机带动,速度均为3~8rpm。

一般地,工件面形是磨盘面形的“拷贝”。Teflon 材料的化学性质比较稳定,耐磨,磨光性较好,制成平面度很好的磨盘,在连续抛光中可以保持其自身面形精度;理论上讲,采用大磨盘抛光小工件可以获得比磨盘面形好得多的表面,因此,Teflon 抛光是获得高面形精度的较好的工艺方法。

3.3 浮法抛光

七十年代末,日本研究人员为抛光磁头材料提出了浮法抛光工艺^[7],这是一种以金属锡为磨盘材料的抛光方法。应用浮法抛光技术可以获得表面粗糙度 $<0.1\text{nm rms}$,平面度 $<\lambda/20$ 的超光滑表面;与其它抛光方法相比,抛光后工件的边缘几何形状规整,亚表层没有破坏层,由抛光引起的表面残余应力极小,晶体面有完好的晶格。

浮法抛光的机械结构如图3^[8]。这种结构吸取了浴法抛光的优点,将磨盘、工件浸于抛光液中,工件浮在锡盘上绕自身转轴作定轴旋转运动,而不摆动。

磨盘的制做是很重要的。为保证锡磨盘的高平面度,首先在锡盘上车出2mm宽的螺线或同心圆;由于锡较硬,容易损伤工件表面,需要进行软化处理,这可以通过在锡盘面再车出更精细的螺线来实现;最后用高精度钻石车床修正锡盘的研磨平面。锡盘的平面度由钻石车床的精度来保证,可达 $\lambda/20$ 。

浮法抛光分预抛光和超光滑抛光两个过程来进行。首先用一般方法(也可用锡盘)将工件抛光至2~3个光圈;然后用新锡盘进行抛光,主轴转速为40~150rpm。浮法抛光所用抛光液浓度通常为2%~5%^[8],抛光粉(磨料)粒度小于 200\AA 。

浮法抛光主要是对工件表面原子的去除。由于原子间结合能与其周围同类原子数成正比,工件表层原子显然不如内部原子结合能大,所以工件表层原子比内部原子容易去除。当磨料颗粒与工件表层原子碰撞时,磨料与工件表层原子开始相互扩散、填充,从而进一步减弱了表层

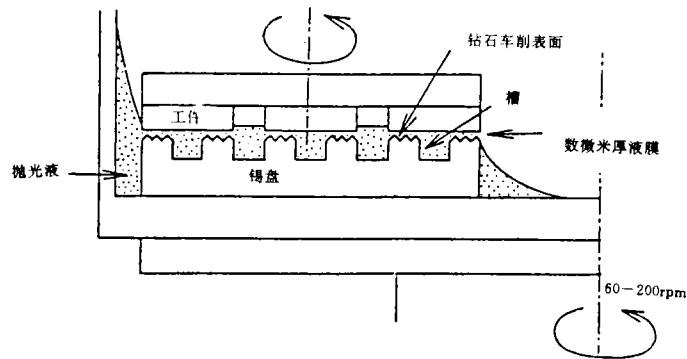


图3 浮法抛光的机械结构

原子的结合能;在下次碰撞发生时,表层原子就被去除了。

工件的面形主要是由磨盘面形来决定的,因此磨盘在抛光过程中的均匀磨削是保证工件面形的关键。浮法抛光中,由于锡材料本身的特性,其硬度及流动性适中,磨损可以忽略,因而锡盘平面度是很容易控制的;只需在锡盘工作一段时间后,再用高精密钻石车床车一次表面即可。这样,抛光期间锡盘的工作面形是稳定的,保证了工件面形稳定。这种稳定性使浮法抛光有可能成为高速抛光。

3.4 离子束抛光

离子束抛光利用中性离子束流轰击工件,去除其表面一定区域的原子或分子,达到超光滑抛光目的^[8]。这是一种典型的运用物理碰撞方法进行抛光的技术。

离子束抛光设备比较复杂,主要由三部分组成:真空系统、离子源转换系统、离子源。工件需放在真空系统中,以保证离子束的强度和直线性。真空室的大小要与最大可加工工件尺寸匹配。离子源转换系统要保证离子束能轰击到工件表面的任何部位;离子束的偏转控制是由五轴 CNC 系统完成的。离子源产生的中性离子束流由两部分组成:一定流量的离子和相同流量的低能电子;电子束的作用是减弱离子束中的静电斥力,并防止被加工工件表面带电荷。

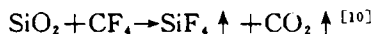
离子束抛光的目的在于对工件表面的修正,因此工件首先要预抛光到一定精度,并对工件进行检测,然后将工件表面等高图、工件几何参数等信息输入处理程序中,计算出离子束轰击的路径、驻留时间等参数。离子束抛光就是由这些参数决定,由 CNC 控制实现的。

离子束抛光的加工范围较广,对工件尺寸没有严格控制,并且可加工球面、非球面和非对称面形。离子束抛光可以获得面形误差 $\lambda/50$,表面粗糙度优于 0.6nm rms 的表面^[9]。

3.5 等离子体辅助抛光(PACE)

与离子束抛光机理恰好相反,PACE 技术是通过化学反应来达到去除材料目的^[10];这也是一种非接触式抛光技术,被加工工件不会产生机械变形或亚表面破坏层。

PACE 抛光是在真空室中进行的,如图5。工作时,向抛光块中注入某种化学气体,在射频激励离子激光器(或其它方式)作用下,在抛光块中产生等离子体。化学活性的等离子体与工件表面物质发生化学反应,产生易挥发的混合物,并由排气孔排出。比如对石英(SiO_2)的抛光,注入气体 CF_4 ,在工件表面将发生以下反应:



PACE 技术对工件材料的去除就是通过类似的化学反应来实现的。材料去除率由一套自反馈系统控制,保证单位时间内材料去除量恒定;这样工件表面材料去除量完全由抛光块的驻留时间决定。

PACE 技术中,工件面形修正是主要工作,不必刻意追求表面粗糙度。抛光块的运动由一套五轴高速 CNC 系统控制,去除效率很高,可以进行工件的成型。面形加工采用了抛光块扫描轨迹叠加原理;较多去除量要求抛光块的扫描速度低(即驻留时间长),较少去除量则对应较

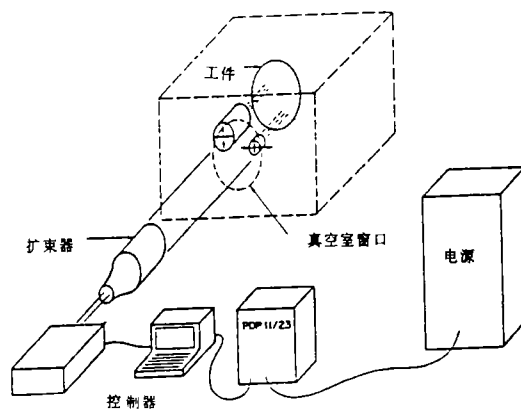


图4 离子束抛光设备

高的扫描速度,因此抛光块的驻留时间是由扫描速度决定的。

在进行 PACE 抛光之前,要对工件表面进行测量,并与要求面形比较,计算出抛光块驻留时间图,进而转化为抛光块扫描速度图。将数据输入 CNC 系统,实现抛光块扫描,完成面形修正。然后再经过测量——修正循环,直至达到面形要求。

常规方法粗加工后的工件,不仅表面粗糙而且亚表面有破坏层。对这样的工件进行 PACE 抛光,由于只有表面化学反应而不会产生机械损伤,所以在实现面形加工的同时,只要工件表面材料的去除深度足够消除亚表面破坏层,就可以获得较好的表面粗糙度。

与常规抛光不同,加工球面和非球面,对 PACE 技术来说其难易程度是等同的。最近建成的一套 PACE 抛光装置,可实现 $\varphi 0.5 \sim 1\text{m}$ 的非球面加工,面形精度 $< \lambda/50$,表面粗糙度 $< 0.5\text{nm rms}^{[11]}$ 。这是一项很有前途的抛光新技术。

3.6 延展性(Ductile)磨削

延展性磨削是一种全新的超光滑表面加工技术,将常规脆硬材料加工中的粗磨成型、精磨抛光等工艺合为一体,可以直接将工件由毛坯加工成形,并满足面形精度和表面粗糙度等基本要求。

按照 N. J. Brown 的理论^[3],工件材料被磨料去除有三种形式:

破碎——工件表面以破碎形式被去除;

微裂纹——工件表面产生微裂纹,亚表面有破坏层;

塑性——工件表面发生塑性变形,类似于车刀对金属的作用,既无表面破碎也无亚表面破坏层。

决定材料去除形式的关键因素是工件表面每个磨料作用点上的压强 p_i , p_i 大时破碎形式明显, p_i 小时塑性变形明显,通常的加工是这三种去除形式共同作用的结果。由此可见,当 p_i 小到一适当小值 p_0 时,对工件的加工就是纯塑性变形去除过程。延展性磨削就是利用了这一原理。

对于固着磨料的磨轮加工,工件与磨料间的压强 p_i 同磨料对工件的切削深度 d_i 有直接关系。实验表明存在一个值 d_0 ^[13];当 $d_i < d_0$ 时,工件的材料去除以塑性方式进行。因此如果加工机床的进给精度小于 d_0 ,磨轮偏转(或跳动)量小于 d_0 ,并且磨轮表面磨料的突出部分(有效切割点)的高度差小于 d_0 ,就足以保证磨轮对工件的切削深度小于 d_0 ,也就保证了脆硬材料的塑性去除。

利用上述原理,日本于八十年代末研制出了第一台加工平面的延展性磨削机床^[12],磨头轴的进给精度优于 $0.2\mu\text{m}$;对于 $\varphi 100\text{mm}$ 的 K₉玻璃,一次完成加工,面形精度达亚微米量级,表面粗糙度为 $0.16\text{nm}^{[14]}$,所用时间为10分钟。

象加工金属材料那样加工脆硬材料一直是人们的幻想,延展性磨削技术给这个幻想的实现带来了希望。虽然延展性磨削目前还不能加工球面,但仍不啻为很有前途的超光滑表面加工

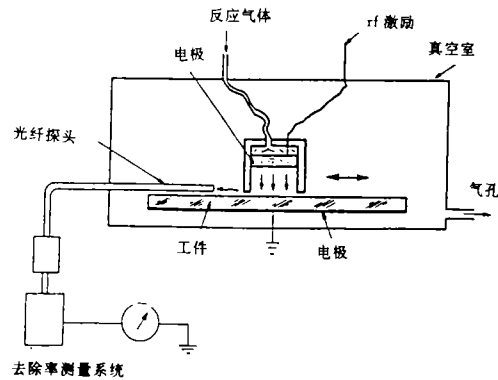


图5 等离子体辅助抛光(PACE)示意图

技术。

4 我国超光滑表面加工现状

我国超光滑表面加工的研究起步较晚,投入的人力和资金都不太多,主要是在原有常规抛光机的基础上进行以沥青为磨盘材料的工艺研究,着眼点在磨盘配方、磨料粒度、抛光时间等方面。加工者丰富的经验和数年的研究积累,我国制造超光滑表面的水平还是很高的;面形精度和表面粗糙度指标均可达到国际一流水平。比如,中科院长春光机所为短波段光学系统磨制的光学元件,面形精度优于 $\lambda/20$,表面粗糙度优于 0.5nm rms ;元件材料有K,玻璃、熔石英、单晶硅等,面形包括平面和球面。

总的来说,我国的加工技术较国际水平还是有很大差距的,尤其是在加工设备方面。虽然我国也有些先进的自动化程度高的光学加工机床,但超光滑表面的制造主要依赖加工者多年的经验,生产效率和稳定性很低。高精度平面的加工主要通过环形分离器抛光技术来实现;球面和非球面的加工设备通常是五、六十年代简陋的光学机床。虽然有许多人进行过多种新技术、新工艺的研究,但由于种种原因均没有得到推广用于实际生产中。可见,研究新的加工技术,改变我国超光滑表面加工中依赖经验、生产效率低、质量稳定性差的现状,仍是一项艰巨的任务。

参 考 文 献

- [1] R. W. Dietz and J. M. Bennett, Bowl feed technique for producing supersmooth optical surfaces. *Appl. Opt.*, 1966, **5**: 881-882
- [2] J. Wingerden, H. J. Frankena and B. A. Zwan, Production and measurement of superpolished surface. *Opt. Eng.*, 1992, **35**:1086-1092
- [3] A. J. Leistner, Teflon polisher, their manufacture and use. *Appl. Opt.*, 1976, **15**:293-298
- [4] A. J. Leistner, E. G. Thwaite, F. Lesha, Polishing study using Teflon and pitch laps to produce flat and supersmooth surface. *Appl. Opt.*, 1992, **31**:1472-1482
- [5] Y. Namba et al., Mechanism of float polishing. *Technical Digest*, April 17, 1984; Monterey California
- [6] J. M. Bennett, J. J. Shaffer, Y. Namba, Float polishing of optical materials. *Appl. Opt.*, 1987, **26**: 696-703
- [7] Y. Namba and H. Tsuwa, Ultra finishing of Sapphire single crystal. *Annals of the CIRP*, 1977, **26**:325-329
- [8] S. R. Wilson et al., Surface figuring using neutral ion beams. *Proc. SPIE.*, 1988, **966**: 74-81
- [9] L. N. Allen et al., Demonstration of an ion figuring process. *Proc. SPIE.*, 1990, **1333**:22-33
- [10] L. D. Bollinger and C. B. Zarowin, Rapid, nonmechanical, damage-free figuring of optical surface using plasma-assisted chemical etching (PACE); Part I Experimental Results. *Proc. SPIE.*, 1988, **966**:82-90
- [11] L. D. Bollinger, G. Steinberg and C. B. Zarowin, Rapid optical figuring of aspherical surface with Plasma-assisted chemical etching (PACE). *Proc. SPIE.*, 1991, **1618**:14-17
- [12] Y. Namba, R. Wada etc., Ultra precision surface grinder having a glass-ceramic spindle of zero thermal expansion. *Annals of the CIRP*, 1989, **38**:331-334

- [13] M. Miyashita et al. , The way to nanogrinding technology. Proc. SPIE. , 1990,1333,7-21
- [14] Y. Namba, Ultra precision machining and its applications for X-Ray/EUV optics proc. of SJSEO, ACTA Optica SINICA eds. , 1992, 160-165

Fabricating Technology for Supersmooth Surfaces

Cao Honggang, Chen Bin and Cao jianlin

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract

Elements with supersmooth surfaces are demanded in many fields along with the development of modern science and technology, which present high contour accuracy, extremely low surface roughness, perfect crystalline distribution and nondamaged layers. Lots of new fabricating techniques have been applied to obtain supersmooth surfaces with surface roughness < 1 nm and contour accuracy < 30 nm. This paper introduces the application of such surfaces, and from the point of stock removing mechanism, discusses 6 different superpolishing techniques. Bowl Feed Polishing, Teflon Polishing, Ion Beam figuring, Float Polishing, Plasma Assisted Chemical Etching, Ductile Grinding.

Key words: Supersmooth surface, Ultraprecision machining, Polishing