

超光滑表面及其制造技术的发展*

高宏刚^{1,2} 曹健林² 朱镛¹ 陈创天¹

(1 中国科学院北京人工晶体研究发展中心 北京 100080)

(2 中国科学院应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘要 超光滑表面制造技术是超精密加工技术的一个重要分支.通过介绍超光滑表面的特征、应用及其制造技术的发展,希望给出超光滑表面技术的整体轮廓.在介绍超光滑表面的概念及其主要特征的基础上,通过典型例证指出了超光滑表面在软 X 射线光学、激光陀螺等科技领域的重要应用.回顾了超光滑表面制造技术的发展过程,对各种超光滑表面加工原理与方法进行了简单描述与评价,最后提出了对超光滑表面制造技术的发展趋势的观点.

关键词 超精密加工,超光滑表面,抛光,粗糙度

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF ULTRA-SMOOTH SURFACES

GAO Hong-Gang^{1,2} CAO Jian-Lin² ZHU Yong¹ CHEN Chuang-Tian¹

(1 Beijing Center for Crystal R & D, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(2 State Key Laboratory of Applied Optics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract We present an overview of ultra-smooth surfaces including their characteristics, application and the development of the relevant machining techniques. Based on the properties of ultra-smooth surfaces, important applications of such surfaces in high technology fields are presented through some typical examples. Progress in ultra-smooth machining technology is reviewed, and typical machining methods and principles are described. Finally, future trends in ultra-smooth processing technology are discussed.

Key words ultra-precision machining, ultra-smooth surface, polishing, roughness

1 引言

对元件表面粗糙度的严格要求最初是由光学系统提出的.在常规光学系统中,用于反射、折射的光学元件的表面粗糙度需达到 $0.012\mu\text{m Ra}$ (粗糙度算术平均值) 才能使用.现代短波光学、强光光学、电子学及薄膜科学的发展对表面的要求则更为苛刻,其明显特性是表面粗糙度小于 1nm Ra .这类表面作为光学元件应具有高反射率、高面形精度、低粗糙度及高强度;作为功能元件应具有高可靠性、高频响、高灵敏性.作为光学元件,为获得最高反射率,特别强调表面低散射特性或极低粗糙度值;作为功能元件,因多为脆硬或脆软晶体材料,相对于表面粗糙度而言,更注重表面的晶格完整性.我们统称这两类表面为超光滑表面 (ultra-smooth surface).超光滑表面具有以下主要特征:

(1) 表面粗糙度小于 1nm Ra , 对于光学元件,

表面粗糙度小于 1nm RMS (粗糙度均方根值), 具有较低的表面波纹度以及较高的面形精度;

(2) 尽可能小的表面疵病与亚表面损伤;

(3) 表面残余的加工应力极小;

(4) 晶体表面具有完整的晶格结构, 即表面无晶格错位.

超光滑表面在现代光学及光电子学科领域的作用愈来愈重要, 相应的超光滑加工技术也成为现代超精密加工技术的重要组成部分.在以往的文献中较少见到关于超光滑表面的专门论述.本文试图在这一方面作一补充, 简单阐述超光滑表面的应用, 并对其制造技术原理与方法作一介绍.

2 超光滑表面的应用

不同的超光滑加工技术产生不同的超光滑表面

* 2000 - 01 - 31 收到初稿, 2000 - 03 - 30 修回

特征,而具有不同特征的超光滑表面应用于不同的领域.以下是超光滑表面的一些重要应用.

2.1 软 X射线光学系统

软 X射线的波长范围为 1—30 nm.该波段所有的材料对光都有强烈的吸收作用,因此光学系统多为反射式.多层膜反射镜是软 X射线光学系统的关键器件;反射率是这种元件最重要的指标.多层膜反射镜的镜面反射与 Debye - Waller 因子成正比,其反射率可写成如下形式^[1]:

$$R = R_0 D = R_0 \exp \left[- \left| \frac{4\pi \sigma \sin \theta}{\lambda} \right|^2 \right],$$

其中 R 为实际反射率, R_0 为表面绝对光滑时的理想反射率, D 为 Debye - Waller 因子, λ 为入射波长, θ 为掠入射角, σ 为镜面粗糙度的均方根值.为提高多层膜镜的反射率,一般要求 $\sigma/\lambda < 1/10$,因此,必须采用表面粗糙度 < 1 nm RMS 的超光滑反射镜.另一方面, X 射线多层膜的周期厚度为纳米级,普通光滑表面会造成各膜层沉积厚度的不均匀,并相互交错,从而影响反射率.为此,多层膜反射镜的基板必须采用超光滑表面.

为获得较好的成像质量,考虑到 X 射线散射,软 X射线光学系统对元件的表面粗糙度提出了更为严格的要求.例如,工作于 12.5 nm 波段的 $20 \times$ Schwarzschild 型显微镜及工作于“水窗波段”的同种显微镜都选用了粗糙度为 0.1 nm RMS 的表面^[2].

2.2 激光陀螺反射镜

高精度的激光陀螺对提高飞机、导弹等的控制精度与性能至关重要.高精度陀螺的关键技术之一是激光反射镜的制造工艺.由于镜面散射会导致激光陀螺的性能降低,因此陀螺激光反射镜要求最大限度地减少背向散射;而表面粗糙度是引起散射的主要原因.美国 F22 战机上的激光陀螺反射镜采用具有零膨胀系数的 Zerodur (微晶玻璃) 材料,为达到反射率 $> 99.99\%$,其平面度优于 $0.05 \mu\text{m}$,表面粗糙度 < 1 nm Ra^[3].

2.3 高密度波分复用器

高密度波分复用器 (dense wavelength division multiplexer, DWDM) 是光纤通信中最重要的被动元件之一,其基本功能是利用分/合波原理,让不同波长的信号在同一根光纤中传输.单一光纤的传输容量为 2.5 Gb/s;采用 8 通道的 DWDM 元件,便可以使单一光纤通信的传输容量提高到 20 Gb/s.只有采用极高反射率的平面反射镜,才能将每一带宽小于 2 nm 的 8 个信号分开.因此,制造超光滑高反射镜

便成了 DWDM 元件的关键技术之一^[4].

2.4 高能激光反射镜

在激光系统中,光学元件需承受极高的辐照强度,如激光核聚变用激光束的功率密度 $> 10^{12}$ W/cm²;连续波超音速氧碘激光器 (COIL) 的输出功率可达兆瓦级.普通反射镜因难以承受如此强的辐照,表面会被烧灼而损坏,因此必须提高反射镜的抗激光损伤阈值.镜面散射是造成表面破坏的重要原因,而散射源于镜面的表面粗糙度及亚表面损伤^[5],因此只有使用超光滑表面才能提高反射镜的抗激光损伤阈值.

2.5 功能光电器件

功能光电器件通常是在功能晶体表面上通过 MBE 或 CVD、PVD 等方法生长薄膜实现的,如 SOS 器件是在蓝宝石基板上生长硅膜.基板晶体的表面粗糙度、晶格完整性等直接影响膜层原子的排列方式,因此要求基板表面具有极佳晶格完整性和低粗糙度.另一方面,许多功能晶体材料,如碲镉汞、铋化铟、磷化铟以及砷化镓等,硬度都很低,只有采用加工单位为原子级的超光滑加工技术才能获得高质量的表面.

2.6 光学窗口

蓝宝石是用于中波红外 (3—5 μm) 窗口的理想材料.由于加工后的蓝宝石镜片内的残余应力会影响光传播波前,必须对抛光后的镜片进行退火处理,以消除其加工应力;而采用超光滑技术加工的蓝宝石镜片,不仅粗糙度可达 0.3 nm RMS,而且残余应力极小,其光传播波前误差由常规工艺程序加工后的 $\lambda/20$ 降为 $\lambda/40$ ^[6].

3 超光滑表面制造技术的发展

在常规加工技术中,能够获得最低表面粗糙度的方法是光学抛光.研磨、抛光属于散粒抛光粉加工范畴,是人类社会发展中古老的加工方法,也是最常用的制造光滑镜面的技术.然而要获得超光滑表面,必须对原有的加工技术进行变革或采用新原理的加工方法,于是就产生了以降低元件表面粗糙度为主要目标的超光滑加工技术.各国从 60 年代开始研究制造超光滑表面的技术.随着人们对亚纳米量级光滑表面形成机理认识的深入和超光滑检测技术水平的提高,出现了许多应用化学、磁学、流体力学和能量场原理加工超光滑表面的新方法.

3.1 传统的超光滑抛光方法

简单的超光滑抛光是表面传统光学抛光的变

革,其特征是沿用结构简单的摆动式抛光机,而对抛光模层材料、抛光粉以及抛光液供给方式加以改进。沿用至今的常规光学表面制造方法是采用沥青、松香作为抛光模层的古典法抛光,操作者每隔一段时间往抛光模上加入少量抛光液,这种抛光液供给方式通常被称为“fresh feed”。这种方法的缺点是平面度与亚纳米级粗糙度要求往往不能同时满足。

1966年,R. Dietz改变抛光液供给方式,采用浸液抛光(bowl feed),将沥青抛光模浸没于抛光液中,获得了粗糙度小于0.3 nm RMS的表面^[7]。

抛光模层材料与抛光质量有很大关系。A. J. Leistner^[8]采用聚四氟乙烯(Teflon)抛光模,成功地获得了平面度为 $\lambda/200$ 的元件。与沥青抛光模相比,Teflon抛光模不仅有利于保持工件面形,而且对许多材料都可以实现粗糙度小于0.4 nm RMS的表面粗糙度,并可以有效地抑止元件表面的波纹度和亚表面损伤,从而减小元件的表面散射。采用材质细腻的碳氟化合物泡沫塑料或者纯锡制成抛光模抛光熔石英、蓝宝石单晶等,也可获得亚纳米级的光滑表面。

精细抛光粉对超光滑抛光极为重要。在材料的原子量级去除中,不可忽视抛光粉的化学作用。R. McIntosh在浸液抛光中使用胶体氧化硅抛光液和沥青抛光模,获得了粗糙度为0.6 nm RMS的硅表面^[9]。粒度为数纳米的超微细金刚石(UFD)粉是近年来用炸药爆轰方法合成的新型纳米材料。1995年,N. Chkhalo等在常规加工设备上使用UFD粉抛光X射线光学元件,使其粗糙度由1 nm降为0.2—0.3 nm^[10]。

3.2 新原理加工法

在超光滑抛光中,导致工件表面材料去除的原因为抛光中工件、抛光粉、抛光模及抛光液间的机械作用和化学作用。前者是指抛光粉颗粒锋利的棱角对工件的切削作用以及与工件表面的摩擦;后者是指抛光液对工件表面的溶解或在工件表面形成一层易去除的薄膜。事实上,超光滑抛光是这两种作用的复合,只是不同方法侧重点不同。由于工件材料以原子级被去除,故其加工效率很低。为提高超光滑表面加工的精度和效率,人们进行了大量研究工作,提出了许多新的加工方法。

森勇藏(Y. Mori)提出了EEM(elastic emission machining)加工法^[11],这种方法的基本点是采用抛光液浸没工件方式,利用聚氨酯小球在工件表面高速旋转,二者之间产生约 $1\mu\text{m}$ 厚的液膜;聚氨酯小

球带动抛光液中粒度为数十纳米的抛光粉颗粒,在液膜中以极高的速度碰撞工件表面,从而使工件表面产生原子级弹性破坏,导致材料的去除。用EEM法加工的软X射线反射镜,表面粗糙度可达0.1 nm RMS。

利用微粒流对工件表面的碰撞作用,P. Baker发展了早期用于粗加工的射流加工方法,提出了flow polishing方法。精细抛光粉颗粒混在高速水流中射向工件,极微量去除表面材料;通过精确控制射流速度、喷射角度等,可对多种材料的复杂表面实现超光滑抛光,工件表面粗糙度达0.1 nm RMS^[12]。

从化学作用的角度出发,L. Bollinger提出了PACE(plasma assisted chemical etching)技术^[13]。PACE设备类似于计算机数控抛光(CCNP)装置,只是由非接触等离子体侵蚀头替代了机械磨头。等离子体与工件表面物质发生化学反应,生成气相反应物并被排走。在加工中,等离子体产生低能能量流,以低能离子和活泼中性物质存在;控制这一能量流可以很好地控制化学反应的速度,必要时还可以实现离子束对表面的碰撞,以提高材料的去除率。PACE可以很好地解决普通CCNP抛光中的塌边效应问题,并可制造出近乎无亚表面损伤的超光滑表面。

与PACE完全不同,离子束抛光依赖中性离子流对工件表面原子的物理碰撞。关于离子束抛光的工作早在60年代就有报道,但去除率很低;80年代末,由于采用Kaufman离子源,可以产生低能大离子流,提高了离子束抛光的去除率。

3.3 非接触抛光

近年来,晶体的应用需求增长很快,并且出现了许多新型功能晶体。多数晶体的硬度较光学玻璃低,其元件对表面完整性有特殊要求。在常规抛光中,工件与抛光模处于接触状态;抛光模通过抛光粉颗粒施加给工件表面的力,是造成晶体表面损伤、破坏其表面晶格完整的主要原因。为减小施加给工件的抛光力,出现了以保证晶体表面完整性为主要目的的非接触抛光方法,即抛光中工件不与抛光模接触。

J. Gormley提出了hydroplane polishing方法^[14]:工件在化学侵蚀液液面上高速旋转,借助于液体动压使工件浮在液面上,如同滑板滑行在水面上一样,从而达到工件表面被均匀侵蚀的目的。人们曾用这种抛光方法获得了InP、HgCdTe等晶体的完整晶面。

浜口(T. Hamaguchi)^[15]在工件旋转轴上使用

一对同极相对的永久磁体,利用磁铁间的斥力使工件与抛光模表面间产生间隙.抛光中,工件与抛光模在抛光液中相对运动,两平行的表面因伯努利作用而相互吸引,使器件的间隙减小.这项技术有利于工件表面的平整化.

河西敏雄(T. Kasai)提出了P-MAC抛光法^[16].采用特殊夹具,在同一加工表面上同时抛光不同硬度的工件.不同硬度材料的去除率不同;随抛光时间的延续,低硬度的工件因去除量较大,表面与抛光模间的接触状态由直接接触逐渐变化为准接触至非接触,抛光力也相应地由大渐变至零,从而获得无损表面.

渡边纯二(Watanabe Junji)^[17]利用动压轴承的原理,在抛光模上设计出与其工作面成一定角度的扇形槽.抛光中,抛光液充满扇形槽;楔角的存在使工件相对于抛光模运动时,在其接触面上产生动压,从而使两表面间出现一层液膜,实现了对大口径平面基板的无损非接触抛光.

3.4 场效应辅助加工

近年来,利用场效应的辅助抛光技术发展很快,主要针对复杂形状表面的镜面加工;虽然多数不以获得亚纳米级光滑表面为目标,但当其中某些技术得到发展后,有望用于超光滑加工.

进村武男(T. Shinmura)发展了MAF(magnetic abrasive finishing)技术^[18],采用由铁磁性材料和氧化铝合成的磁性抛光粉.在磁场作用下,磁性抛光粉在磁极间形成抛光粉刷;通过控制磁场强度可以改变抛光粉刷施加在工件上的作用力.这种方法可以用于加工各种形状的表面,包括平面、曲面、内孔和外圆等.

N. Umehara发展了MFP(magnetic fluid polishing)技术^[19].MFP将普通抛光粉混合在磁性流体中,工件与非磁浮板均浸没于磁性抛光液中.根据磁流体动力学原理,在磁场作用下,抛光液中的铁磁性颗粒被吸引向强磁区运动,同时产生浮力将非磁材料(如抛光粉、浮板)推向低磁区,与工件接触.这样,在磁流体的作用下,工件被浮板和抛光粉抛光.工件所受抛光粉的磨削力可以精确控制,因而可以获得无损的亚纳米级光滑表面.

同样借助于磁性流体作用的还有MRF(magnetorheological finishing)^[20]技术.MRF所用磁性流体不同于以上几种.通过控制磁场,可以改变这种磁性流体的物理机械性能,如液固状态、硬度、几何形状等,从而形成不同形状、不同硬度的柔性磨头来抛光

工件,可以高效地实现超光滑加工.

3.5 超精密机械的应用

超精密机械设备在超光滑加工技术的发展中占有重要地位.采用高精密设备不仅能提高加工表面的精度与生产效率,而且可以极大地减少对人的经验依赖.难波义治(Y. Namba)研制了采用超精密轴系的浮法抛光机(float polishing machine),使抛光超光滑高精度平面变得容易.大森整(H. Ohmori)在超精密机床上加载ELID(electrolytic in-process dressing)技术^[21],使砂轮在磨削过程中得到在线修整,成功地实现了延展性磨削(ductile mode grinding),无需后续抛光,可以高效地对玻璃等脆硬材料直接磨削出超光滑表面,粗糙度小于0.4 nm Ra.采用零膨胀玻璃或陶瓷材料作主轴的超精密端面磨床,可以实现亚微米级的进给,磨削后的表面粗糙度达0.5 nm RMS^[22].

4 我国的超光滑表面加工技术现状

超光滑表面加工技术涉及敏感领域,因此西方国家对于相应的超精密机床向中国出口加以限制.我国超光滑表面制造技术的研究进展缓慢.西北工业大学对使用常规抛光机的古典抛光进行过一系列的研究,哈尔滨工业大学曾在石英和硅片的抛光方面做过不少工作,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所曾用浸液抛光法为同步辐射工作抛光过超光滑元件,并采用浮法抛光的方法获得了粗糙度小于0.3 nm RMS的超光滑表面^[23].此外,国防科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所和大连化学物理研究所等都曾经或正在进行古典抛光法的超光滑抛光实验与研究.

总的看来,我国在超光滑表面制造技术方面较国际水平差距很大.虽然目前也可以加工出亚纳米级的光滑表面,但对操作者的经验依赖很强,并且加工质量不稳定,难以满足现代科技发展的需求.

5 超光滑表面加工技术发展趋势

综上所述,近40年来,超光滑表面制造技术获得了长足的发展,原子级光滑的表面已不再难以获得.在众多超光滑加工手段中,依赖于精细磨粒的抛光技术仍是主流方法,其特点是:

- (1) 采用浸液(bowl feed)抛光方式;
- (2) 使用高精度的抛光模;

(3) 采用软质材料抛光液;

(4) 重视抛光液的化学作用和抛光粉的弱机械作用,实现化学机械抛光(CMP)。

目前,超光滑加工技术正朝降低制造成本、提高加工效率的方向发展。采用超精密机械设备,用磨削替代抛光是一个趋势。随着材料科学的发展,采用特殊材料的机床将具有更高的精度和稳定性;电子学的进步则使机床控制技术得以极大提高。这些都使材料磨削去除量达到纳米级成为可能。利用场效应辅助抛光是超光滑加工的另一发展趋势。通过控制工件所受的加工压力来操纵材料的去除,最终达到弱力乃至微力加工,是提高超光滑加工效率的一条重要途径。

参 考 文 献

- [1] Haelbich R, Segmiiller A. Appl. Phys. Lett., 1979, 34(3): 184
- [2] Shealy D *et al.* SPIE, 1989, 1160:109
- [3] 饶勤.航空精密制造技术, 1996, 32(2):1[RAO Qin. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1996, 32(2):1 (in Chinese)]
- [4] 蔡荣源.光讯, 1997, 67:24 [CAI Rong Yuan. Optical Communication, 1997, 67:24(in Chinese)]
- [5] Hickman K *et al.* Appl. Opt., 1993, 32:3409
- [6] Askinazi J. SPIE, 1997, 3134:301
- [7] Dietz R, Bennett J. Appl. Opt., 1966, 5(5):881
- [8] Leistner A J. Appl. Opt., 1976, 15(2):293
- [9] McIntosh R B *et al.* Appl. Opt., 1980, 19:2329
- [10] Chkhalo N I *et al.* Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A, 1995, 359:155
- [11] 森勇藏.精密机械, 1980, 46:659[Mori Y. Precision Mechanism, 1980, 46:659(in Japanese)]
- [12] Baker P. SPIE, 1989, 1160:263
- [13] Bollinger L, Zarowin C. SPIE, 1988, 966:82
- [14] Gormley J *et al.* Rev. Sci. Instr., 1981, 52:1256
- [15] Hamaguchi T *et al.* Rev. Sci. Instr., 1984, 55:1867
- [16] Kasai T, Kobayashi A. The Science of Polishing, Technical Digest, OSA, 1984, TuB- B4 - 1
- [17] 渡边纯二等.精密机械, 1983, 49:655[Junji W *et al.* Precision Mechanism, 1983, 49:655(in Japanese)]
- [18] Shinmura T *et al.* Annals CIRP, 1990, 39:325
- [19] Umehara N. Annals CIRP, 1994, 43:185
- [20] Jacobs S *et al.* SPIE, 1995, 2576:372
- [21] 大森整.光技术コンタクト, 1992, 30:221[Ohmori H, Optical Technology, 1992, 30:221(in Japanese)]
- [22] Namba Y *et al.* Annals CIPR, 1989, 38:331
- [23] 高宏刚等.光学学报, 1995, 15:824[GAO Hong Gang *et al.* Acta Optica Sinica, 1995, 15:824(in Chinese)]

(上接第 622 页)

- [6] 黄久生,刘尚合,武占成.中国纺织大学学报, 1997, 23(4): 26[HUANG Jiu-Sheng, LIU Shang-He, WU Zhan-Cheng. Journal of China Textile University, 1997, 23(4):26(in Chinese)].
- [7] Tabata Y, Tomota H. J. Electrostatics, 1990, 24:155
- [8] Wilson P E, Ma M T. IEEE-EMC, 1991, 33(1):10
- [9] Huang J S. The measurement of transient electromagnetic field radiated by electrostatic discharge. In: IEEE-IM, AUTOTESCON'99. Texas, USA, 1999
- [10] Huang J S, Liu S H, Li C P. Experiment investigation of the field radiated by Human electrostatic discharge (ESD). In: Proceedings of the Third International Conference on Applied Electrostatics. Shanghai:Shanghai Popular Science Press, 1997. 345
- [11] 黄久生.计算机操作中静电放电电磁干扰问题的研究.见:马峰主编.现代静电科学技术研究.西安:西安出版社, 1999. 157[HUANG Jiu-Sheng. Investigation of the electromagnetic interference generated by the electrostatic discharge in the operations of computer. In: MA Feng ed. Modern Electrostatic Science and Technology. Xi'an:Xi'an Press, 1999. 157 (in Chinese)]