

红外光学元件的制造

摘要

应用在大能量多元件红外系统的光学元件的公差比那些通常使用在可见光谱区的高质量光学系统的光学元件的公差要求更为严格。此外,要求仪器商在此种情况下抛光非普通材料以获得最小的表面吸收和高的激光损伤抗力以及好的光学图形。红外激光系统用的元件和一些主要考虑散射光的较普遍应用的元件常常也要求极小的微粗糙度和刮痕密度。因此,正在发展高度满足这些经常矛盾的要求的技术。

绪言

工作在红外波段和高分辨率的红外成像系统的高能激光器对光学元件的要求难度愈来愈高,如激光聚变研究所用的复杂光学系统包括多达100个光学元件。这样对每个光学表面的公差要预算的非常小。此外,为了满足图形要求,要求仪器商所用技术抛光出的表面要散射最小,在激光操作的情况下表面吸收最小,而损坏阈最大。这些数据主要取决于所使用的抛光技术,例如,由于采用不同的抛光技术,CIK的表面吸收值上百倍的变化,也可比正个厘米厚度的大块材料的吸收高25倍,损坏阈也能改变类似于散射光的数值。许多应用在红外系统的材料是非常软的,机械强度也差,并且还水解。

光学图形要求

目前研制的许多红外系统必须具有接近

衍射极限的性能。对于光学成像系统来说这种要求是很容易理解的。对于聚焦高强度的激光系统更是如此,例如,激光聚变的应用。聚焦衍射极限的强度比产生衍射极限分辨率的公差有更严格的要求,这一点并没有被仪器商广泛了解。由引入均方根波前误差 σ 的光学链系聚焦点中心的强度 I 与 $\sigma=0$ 的 I_0 之比,在 $I/I_0>0.6$ 时由Strehl关系式得出:

$$\frac{I}{I_0} = 1 - \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

式中 λ 是波长,当 $\frac{I}{I_0}=0.8$ 时就满足Marechal准则,Marechal准则比Rayleigh四分之一波长准则更定量,然而也大概相等。如果系统有 N 个元件,并且我们假设各种光学表面的图形误差是无关的(这样还加上了各种光学表面引入的均方根波前畸变的平方),那么峰间波前误差就大约等于均方根值的 $2\sqrt{2}$ 倍,对于反射镜允许的图形误差 τ_f 大约是:

$$\tau_f = \frac{\lambda}{\pi} (10N)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

对于窗口的每个表面

$$\tau_f = \frac{\lambda}{(n-1)\pi} (5N)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中 N 是光学链系的元件数, π 是窗口材料的折射率。假设每个元件的误差预算相等,对于特殊系统的更详细的计算有时多多少少要增加各个元件的公差,然而,对于所要求的图形公差首先利用方程(2)和(3)进行近似计算。如果元件涉及到高功率,那么一些误差预算就要分配给热所引起的图形误差。在有窗口的情况下,除了窗口材料很好之外,也必须分配给窗口一定误差,这种情

况下的光学图形公差甚至比方程(1)和(2)提出的公差更加苛刻。

对于具有30个元件的红外光学链系或具有10个元件的光学链系,在2/3的误差预算分配给热畸变的情况下,所要求的图形如图一所示。假设所有的窗口材料都是均匀的,对于反射镜和硒化锌窗口的图形要求,因为硒化锌2.4的折射系数符合于反射镜的要求,这样和对于应用在可见区高质量的光学系统的要求一样。因为它们的折射率低,这样对于盐窗口的要求更放松一些。但仍然比通常使用这些材料提出的要求要高。

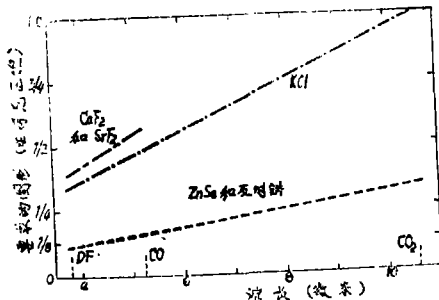
表面质量要求

为了获得好的光学图形质量,仪器商对于表面质量是重视的。散射光、表面吸收和损坏阈所有这些都取决于表面抛光方法。表面吸收影响着元件的热畸变和它对激光损坏的抗力,使用适当的抛光技术可使其值降低或低于整体的吸收系数。然而,如前所述,如果使用的加工技术不适当,则它能成百倍或更多倍高于这最小的数值并且会影响元件的性能。

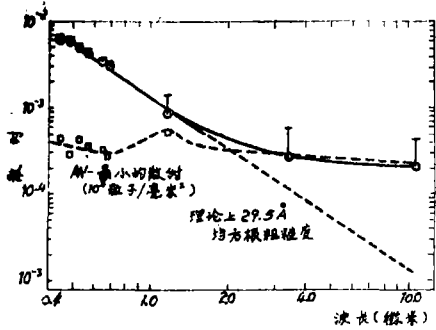
表面粗糙度也会影响元件的吸收,并且对损坏阈和散射光能级都有强烈的影响。表面粗糙度可以分为两类:微型粗糙度,只由几毫微米高的不规则波峰所组成,但遍及整个表面。另一种是宏观粗糙度,例如表面上的划痕,小坑、微粒等。宏观粗糙度由于介质近面场增强,使介质激光损坏阈下降,例如,如果划痕横截面是圆柱型的,则窗口表面局部场强加强了 $411^4/(n^2+1)^2$ 倍。如果划痕横截面是窄V型,则增强仅是 $4n^4$ 倍。对于折射率为2.4的硫化锌材料来说,圆柱型划痕时场增强了3倍,变化到V型划痕时,要超过100倍。如果损坏机理是电介质击穿,则击穿阈由场强决定。反之,如果损坏机理是由热引起的,看情况,若是存在大量表面吸收,则击穿阈由场强的平方来定。这

样,特别是窗口具有高折射率的时候,对应用在高能激光链系窗口的表面提出了严格的要求,即无划痕。

微观粗糙度也是重要的,已经指示出的某些光学抛光玻璃的损坏阈大约是正比于它们的均方根粗糙数的平方根。在红外区,由于表面微小粗糙度引起的反常集肤效应的结果,金属镀层的反射镜吸收可以增长。如图2所示,据光学抛光表面来看,微观粗糙度和宏观粗糙度二者都影响散射光的能级。这种抛光和镀铝的重火石玻璃的均方根微小粗糙度大约是 30 \AA 。对角虚线表示的是散射光能级,这是仅以微小粗糙度作为影响散射的机理观察的结果。在可见和红外区所获得的散射能级以开口环和实线表示,它与微小粗糙度影响散射光的予测值很一致。当波长变长时,散射能级与波长无关接近恒定值。矩形方块代表的是平均和最小的散射数值之间的差别,这是在反射镜上测量许多点而获得的。这种差别几乎与波长无关,并且可能由象划痕那样的宏观粗糙度引起,与波长相比它们很大,因此其散射能级几乎与波长无关。长期观察的结果散射光的变量增长接近一个微小的波长,可能是由于表面上灰尘颗粒而引起的,其直径大约1微米,因此,这种波长时正好产生共振。我们研究的结果是:在可见区,对于经过很好抛光的光学表面其散射能级由微小粗糙度的散射来决定,而在较长的红外区主要是由划痕和表面上出现的其它宏观粗糙度来决定。



图一 热影响原始的图形误差是波前畸变的两倍,并满足 Merechal 时,在一个30个零件或10个零件的光学链系中对每个零件的最初图形要求。



图二 一个敷铝重火石玻璃反射镜的散射值，开口环代表的是整个表面10个点的最小散射值。带横棒的是10个值的平均值。

抛光程序

如果要涂敷反射镜，则所使用的抛光程序主要是产生一个好的光学图形，低的微小粗糙度和一个低的划痕密度。在许多高功率激光应用中首先选择的是不镀金属的反射镜，因为其具有高的损坏阈，在这种情况下所使用的抛光程序也必须产生最少的表面吸收。因为窗口要求清晰透明，因此对它们实施的抛光程序要能产生一个好的光学图形，低的表面粗糙度。在激光应用中同时还要有低的表面吸收。为了满足这种抛光要求的抛光程序已经成功地研制出来。将首先描述用在红外区盐窗口的抛光技术，其次是产生优质抛光金属表面的技术。

碱卤化物由于性质软，吸水，下层在抛光过程中极易损坏导致表面吸收等，所以加工满足于图形要求的窗口是极困难的。目前已发展了一种技术使加工的碱卤化物表面具有低的表面吸收，低散射，良好的光学图形和一非常小的楔角。采用此种技术获得良好结果，在 10.6 微米波段表面吸收小于 1×10^{-4} ，在 3~10 微米波长范围内后向散射低于 1×10^{-4} ，在可见区平度优于 $1/4$ 波长，平行度少于 3 弧秒，使用的是沥青磨盘，

氧化铝磨料，三醋精浆作载体，其并不腐蚀卤化物或沥青磨盘。在 Michelsn 实验室通常使用的是碗式供给程序，但在这里新法供给程序已经实现。

所有表面的污染和机械损坏先用浓盐酸腐蚀该部分而去掉。然后用最小的表面工作量产生光学图形（在每面上抛光并不超过四小时）。使用泡在煤油里的 20, 11, 5 微米的三氧化二铝砂粒在低热克斯板上把样片磨制到近似的平度和楔角，样片研磨之后在浓盐酸中腐蚀 3 分钟，并按 Duvisan 所描述的方法在试药级纯度的乙醇中漂洗。清洗后从乙醇中取出用清洁、干燥的氮气吹干。通过液氮的煮沸加之消电离的喷嘴吹拂使静电荷积累达最小，这样就可以使表面的灰尘积累达最小。

腐蚀程序有时导致颗粒边缘扩大（特别是在细颗粒的多晶材料）和尖角，如直观检查发现这类尖角时可用 0.3 微米的三氧化二铝磨料在三醋精浆中用低热克斯布擦去，直到表面露出平滑的光学表面时为止。通常需要 1~2 分钟，直观检验即可。如果尖角并没被除去而仍留在表面，这样在加工过程中会损伤抛光盘。

把样片固定在与它直径相同，上边嵌有毡子的金属圆盘上，并在一个由 5 份 73# Swiss 沥青和一份石蜡组成的磨盘上进行抛光。三醋精浆作为载体可把 0.3 微米的磨料带走，样片抛光直到获得所需图形和最佳的表面质量为止（用 Nomarsk 显微镜来检验）。经验证明如果所需的图形和表面质量在大约抛光四小时后仍未获得时，最好重新腐蚀并重新抛光它。当所需的表面实现并获得了所需的图形时则样片可用苯来清洗，然后用一块浸饱苯的软纱在样片上轻轻地擦，直到把残余的抛光材料擦净为止。

清洁之后，抛光面用碳膜涂敷，如先前所述把样片固定，对样片第二面进行抛光，该程序在表 1 和表 2 中摘要列出。

表 1 抛光碱卤化物窗口的一般程序

粗磨:	平板玻璃磨盘, Al_2O_3 磨料 (20,11 和 5 微米), 煤油作为载体。
化学腐蚀:	在浓盐酸中腐蚀 3 分钟, 乙醇漂洗, 采用清洁干燥的氮气吹干。
用布擦净:	派热克斯布, 0.3 微米 Al_2O_3 磨料, 三醋精浆载体。
固 定:	一面用碳膜涂敷, 把其固定在嵌有毡条的金属盘上。
抛 光:	石蜡研磨盘, 0.3 微米 Al_2O_3 磨料, 三醋精浆载体, 碗式供给或新法供给。

表 2 详细的抛光程序

磨 盘:	石蜡、压平、切成 $\frac{1}{8}$ 吋的正方形, 间距约 1/8吋。
抛 光:	心轴速度为 28~30 转/分, 臂速为心轴速度的 1/4, 压力为 1~1.5 磅/吋 ² , 叶片连续转动的碗式供给或用刷子沾粘合剂的新法供给, 避免每面抛光多于四小时。
清 洁:	采用沾饱试药级苯的软纱擦净清洁法

采用上述技术已广泛抛光了 KCl 和 NaCl, 强化的 NaCl 已在一小片上进行了抛光, 产生的表面吸收每个面小于 2×10^{-4} , 在可见区面波为 1/8 波长, 表面微型粗糙度为 26 Å (均方根值)。KCl 的抛光比 NaCl 的抛光更为困难, 抛光了一个 16 吋直径的样品, 在可见区面形达 1/2 波长, 表面吸收每面低于 1×10^{-4} , 如图 3 所示。

抛光金属反射镜的基片, 如用于高能激光的反射镜要使其微小粗糙度小于 30~60 Å, 加工起来是困难的。事实上, 粗糙度超过 60 Å (均方根值) 是很普遍的。但相反, 光学抛光的玻璃反射镜的粗糙度通常是在 20~30 Å, 抛光最好的熔石英玻璃的均方根粗糙度数值将低于 10 Å。微小型粗糙度的光学散射正比于均方根值粗糙度的平方。目前已成功地采用一种技术, 即在金属反射镜表面上溅射一层同类型金属作为基底, 然后采

用普通地抛光技术进行抛光。采用这种方法制备的金属反射镜粗糙度在 10~20 Å 范围内, 溅射所形成的小颗粒薄膜可导致高质量的抛光。该膜用锥形硬度仪检验时发现工件表面变硬。用这种方法已经成功地制备了平滑的铜和钨反射镜面。尽管物理蒸发沉淀技术目前还没有成为那么重要, 但它是成功使用的另一种敷涂技术。洛杉矶的 California 大学的 Bunshah 博士采用这种方法成功地在 一块钛反射镜上制备成功。并在 Michelson 试验室进行抛光, 均方根值粗糙度为 14 Å。第三种方法是众所周知的, 即用不带电的镍镀金属反射镜并抛光, 这种方法制备的表面粗糙度低于 8 Å 均方根值。

吸收

当收到时	0.0037
腐蚀的表面	0.0028
抛光的表面	0.0028

图形

当收到时	每吋 $\lambda / 3$
腐蚀的表面	没有
抛光的表面	每吋 $\lambda / 6$

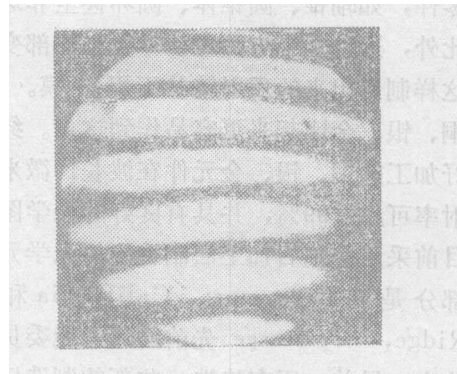


图 3: 图示是抛光一个 6 吋直径, 2 厘米厚的 KCl 单晶窗口的结果。注意: 这个抛光后的窗口总的吸收不大于先前的 (腐蚀的)。

对于制备金属光学零件或某些电介质零件的一种新的有希望的技术是金刚石定向加工法, 尽管这种技术目前仍处于发展阶段, 但它在光学制造的某些领域却具有革新的意义。这种方法不仅几分钟内能制造出普通平

在光学薄膜涂镀中应力的发展

引言

众所周知,很多真空蒸发淀积的材料是处在凝结过程所产生的应力状态中。应力可以是这样的高以致在某些情形下它可以引起基底变形,在其他情形下它能使膜层本身破裂并且从基底上起皮。测量各种不同制备条件下金属和电介质两种薄膜的应力大小是很有意义的,并同时对于特别用来制造薄膜电阻和电容的某些材料进行过详细的研究。现在的研究则是企图测量在单层与多层两种光学薄膜中所产生的应力的量级,目的是为了估计它对高精度光学元件面型和多层膜结构的机械稳定性的影响。借助一个装在真空室

面或球面的金属反射镜,同时也能制造复杂零件,如轴锥、圆锥体、圆环甚至非球面。此外,这种加工方法可使零件小局部变硬,这样制造出来的反射镜并不用镀膜。铝和铜、银、金比起来更容易作到这点。经过很好加工的铜、银、金元件在波长10微米时反射率可超过99%,并具有良好的光学图形。目前采用金刚石加工法制造出的光学元件大部分是在 Livermore, California 和 Oak Ridge, Tennessee 先前的原子能委员会试验室。目前,正在建造一些新的制造厂,包括 Michelson 的试验室的一个实验模型,它计划采用干涉控制来操作,这可大大减轻震动和丝杠带来的问题,加工更好的光学表面。

结论

对于使用许多零件和涉及到大量能量的红

中的激光干涉仪进行应力测量的新方法被采用了。这使得淀积过程能详细地跟随记录下来。我们发现用于光学膜层的不同材料在其应力性能方面变化很广,同时多层膜的合成应力不能期望从单个膜层的应力组合而必然得到。

薄膜应力的测量

薄膜的应力从淀积在它上面的基底的弯曲显示得最明显。一系列不同的方法被用来测量弯曲,坎贝尔^[1](Campbell)曾经给出一种好的精确的计算。最普通的装置是用一个薄玻璃长条,夹住其一端形成一个横梁,薄膜就淀积在它上面。在长条弯曲

外系统的光学图形要求抵得上或超过通常在可见光谱区所使用的高质量的光学元件。此外,经常要求仪器商采用满足一些其它要求和光学图形的方法来抛光一些非普通材料。所使用的抛光技术严重地影响着表面吸收和激光损伤抗力,因此,激光仪器商必须了解这些限制。红外激光系统和对散射光是主要要求的一般应用中所采用的另件,对其最小的微型粗糙度和划痕密度也常提出要求。因此,为了满足这些常常是互相矛盾的要求我们研制了上述加工技术。

译自 "Optical Engineering" Volume.
15/Number 5

(志中译,和平校)