

芯飞睿技术参数十问系列 (四)

薄膜吸收损耗

薄膜吸收损耗

一、什么是膜层的吸收损耗

吸收损耗是由于电能、电磁能或声能与材料介质相互作用而耗散或转换为其它形式的能量而引起的。在薄膜中体现为部分光能转化为热量而消散。

二、吸收损耗的类型有什么

膜层的吸收损耗分为两种形式：

1、固有吸收损耗

固有损失是材料本身对光能的吸收，每个材料都有其对应不同波长的吸收带。固有吸收损耗是无法消除的，但是可以通过薄膜制备方法、环境因素等使其发生改变。

2、外在吸收

外在吸收是材料杂质或界面污染引起的吸收损耗，有时，该损耗还和衬底特性有关联。

三、为什么要单独测量膜层的吸收损耗

一般来说，若需要获得光学元件的总损耗，只需测量其反射光谱和透射光谱足以。对于高反膜，可以使用光腔衰荡光谱法。但是，对于某些特定应用，吸收损耗和散射损耗对光学性能有不同的影响作用，因此往往需要单独测量吸收和散射损耗。同时，在某些情况下，将衬底吸收和膜层吸收分开测量可以用来区分不同的吸收来源。在光学镀膜测试中，散射损耗极小一般被忽略（在高透/高反膜中，极小的散射损耗也会带来极大的影响，本文第十问会对散射损耗做个简要补充），吸收损耗是我们关注的重点。

四、吸收损耗中的关键参数有什么

1、吸收量（absorption）

吸收量表示在一定时间下，材料吸收一定波长的光的总和。

2、吸光度（Absorbance）

吸光度是入射到样品或材料上的光量与光与样品相互作用后检测到的光的比值的对数。其表示了样品对材料的吸收率，其值与膜厚和吸收系数有一定关系。

3、吸收系数 α （absorption coefficient）

吸收系数表示材料对一定波长的光的吸收能力，决定了一定波长的光在被吸收之前可以穿透到材料中多远。其

值很大程度上由材料的特性和波长决定。

4、吸收消光系数 k （extinction coefficient）

吸收消光系数同样用来表征材料对一定波长的光的吸收能力。吸收消光系数 k 与吸收系数 α 满足一定的函数关系，其关系如下式所示：

$$\alpha = 4\pi/\lambda k$$

同时 $1\text{dB}/\text{cm} = 4.34\alpha$ 。

五、膜层吸收损耗的测试方法是什么

测试膜层的吸收损耗的基本原理是利用激光辐照薄膜样品时的热效应。常用方法有激光量热法、光热偏转法、光热共路径干涉测量法、表面热透镜法、光声光谱法、红外热像仪法等。目前商用的一般有三种：

1、激光量热法

激光量热法是吸收损耗测量的国际标准（本文参照ISO 11551:2019）。该方法测量吸收损耗的具体方法是采用一束激光辐照薄膜样品，随后使用热敏电阻(或热电偶)测量薄膜样品温度从辐照升温到冷却的变化，用函数拟合方法计算得到样品吸收率的数值。其假设测试样品的吸收在测量过程中样品所经历的温度波动范围内是恒定的。该方法的优点在于其十分简单，测量只涉及样品的比热容和应用的激光功率。但是，如对于低热导率材料，其依赖于环境湿度、样品材料、其表面粗糙度和背景介质等因素，导致其难以提高精确度。

2、光热偏转法（laser induced deflection / LID）

光热偏转法又称激光诱导偏转法，其所用装置包括激光器、反射镜、镀有样品膜层（例如高反镜）的元件、输出耦合器、激光功率计和用于温度测量的高温计。装置搭建如图1所示。由于使用特定偏转方向的测量，所以减小了衬底材料的吸收所带来的影响，提高了膜层吸收损耗测量的精确度。其可测量的最小吸收率小于 1 ppm （ 10^{-6} ）。但相对于激光量热法，其极高的测试精度需要依赖于较高的实验技巧。多使用 1030nm 激光测试反射膜。测试往往需要使用低辐照的激光源，可以尽量减小衬底材料的影响。

3、光热共路径干涉测量法（photo-thermal common-path interferometry / PCI）

光热共路径干涉测量法又称为相敏泵浦探针技术（phase-sensitive pump-probe technique）。其通过泵浦光束将被测样品加热（吸收转化为热能）形成热透镜，使探测光束产生波前畸变。畸变使探测光束内部产生干涉效应，进而影响光束强度（相位），该强度（相



位)变化能被探测器所探测到。通过泵浦光的周期开关,测试的干涉图样被时间调制,可以进一步获得更准确的薄膜的吸收率。在该方法中,衬底一般为平面。该方法的测量精度大致在 $5 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ 。示意图如图2所示。

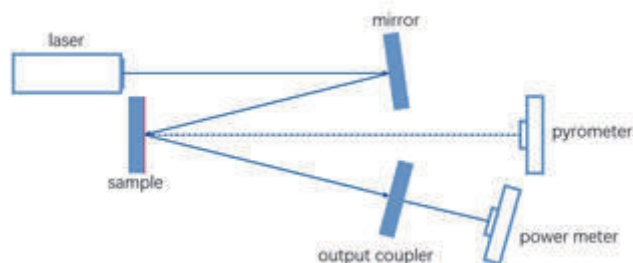


图1. 光热偏转法示意图（反射膜为例）

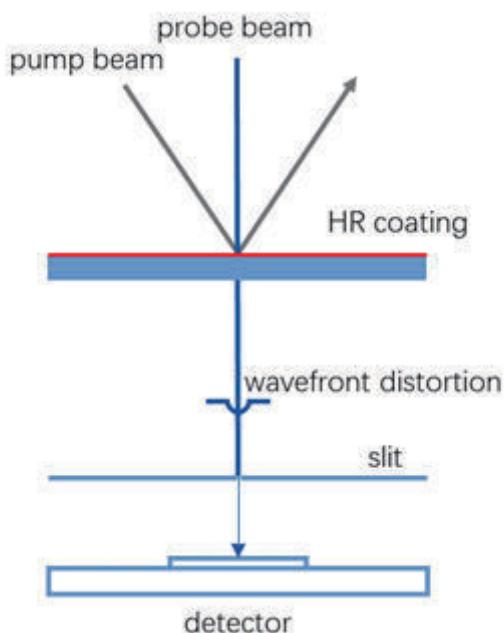


图2. 光热共路径干涉测量法示意图

六、影响膜层吸收损耗的主要因素有什么

1、膜厚

膜厚对膜层的吸收损耗的影响由下式决定:

$$\text{absorption coefficient } (\alpha) = 2.303 (A) / t$$

其中, A是吸光度, t是膜厚。

但有些情况下,膜厚会导致薄膜能带发生改变而导致吸收系数 α 的非线性变化,甚至 α 可能随温度的升高而减小,所以具体情况还应具体分析。

2、温度

环境温度的升高会带来吸收损耗的下降,尤其对红外元件的影响更大。其原因可能包括能量带隙的改变或因温

度产生的谱线漂移或展宽。该结论仅提供参考,并不绝对适用于所有材料薄膜。

3、入射角

入射角的改变会带来吸收损耗的改变。通常情况下,对偏振S光和P光尤其需要讨论入射角的影响。

4、波长

波长和镀膜材料在很大程度上决定了膜层的吸收系数。所以不同材料膜的应用波段范围应谨慎考虑。

5、镀膜材料

常见的镀膜材料有 SiO_2 、 MgF_2 等等。在一定波长下每个材料的吸收都不尽相同,需要选择合适的镀膜材料才能有效地降低吸收。后文一列举了一定波长下的不同材料的吸收消光系数。参考文献[11]列举了一系列的材料应用领域,可以作为参考。

6、薄膜沉积方法

薄膜沉积方法会影响膜层的外在吸收。常用激光薄膜沉积技术包括电子束沉积技术、离子束溅射技术和溶胶-凝胶技术等。根据2021年的最新研究,离子束共溅射沉积可能得到最低的损耗。

7、后处理技术

后处理技术能改变镀膜的结构形态,进而改变膜层的吸收损耗。常见的后处理技术例如激光预处理、热退火等。

七、膜层吸收损耗对光学元件的主要影响是什么

1、热能

吸收主要是材料内部将光能转化为热能。未及时发散的热能必然导致温度升高,并可能导致应力相关的开裂或分层,这两种情况都会降低激光损伤阈值。

2、反射率/透过率

根据能量守恒定律,入射光=反射光+透射光+损耗。损耗主要包括有吸收损耗。所以吸收损耗的增加必然会使高反射或高透射的光学元件的性能受到影响。

3、分光

不同入射角入射、不同波长的入射光、不同材料等情况下, S光和P光的吸收损耗可能会有较大差异。其差异会导致理论的分光现象不理想。相应的,减小吸收损耗能减小这种不理想的可能性。

4、焦距

吸收会产生大量热,过多的热量会使透镜变成“热透镜”。热透镜会影响透镜的折射率,导致原本的焦距产生偏移。

5、波前

参考光热共路径干涉测量法的说明。其就是利用了热透镜效应测试膜层的吸收损耗。热透镜改变光束折射率使光束产生波前畸变。

八、如何降低光学元件的膜层吸收损耗

当已有相应光学镀膜元件或待选择光学镀膜元件时，以下操作提供了减少膜层的吸收损耗的参考建议。

1、升温

在一定条件下，升温可以降低光学镀膜的吸收损耗。某些耐高温材料可以尝试使用烘箱来提高环境温度。

2、清洁度

保持镜面的清洁可以在多方面改善元件的使用性能。保持一定的清洁度可以同时减少吸收损耗和散射损耗。

3、选择合适的参数

对于一般的应用，反射率和透射率就能表征膜层的性能。但对于一些高要求的光学元件或镀膜厂商来说，吸收损耗是重点指标。需要结合应用对元件的吸收光谱图进行一个评估进而选择合适的产品。

九、典型薄膜材料的吸收损耗

典型薄膜材料的吸收损耗如下表所示。

材料	波长 (nm)	吸收消光系数k
SiO ₂	355	1×10^{-8}
	1064	4×10^{-7}
	1064	1.27×10^{-6}
HfO ₂	355	2.8×10^{-4}
	1064	9.3×10^{-7}
Nb ₂ O ₅	1064	6.05×10^{-6}
Al ₂ O ₃	635	5×10^{-6}
Ta ₂ O ₅	1064	4.5×10^{-7}
a-Si	1550	1.2×10^{-5}
TiO ₂	/	10^{-5}
Ta ₂ O ₅ -TiO ₂	1064、1550	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
Ta ₂ O ₅ -Nb ₂ O ₅	1550	2.35×10^{-4}
Si ₃ N ₄	1550	10^{-5}
ZnSe	1064	2.15×10^{-5}
YbF ₃	1064	8.1×10^{-6}

薄膜	吸收消光系数k	
	1060nm	515nm
ZnS	4.1×10^{-6}	2.7×10^{-4}
CdS		2.9×10^{-3}
ZnSe		3.4×10^{-3}
ThF ₄	2.1×10^{-6}	5×10^{-6}
MgF ₂	6×10^{-6}	9×10^{-5}
TiO ₂	7.7×10^{-5}	5.5×10^{-4}
ZrO ₂	2×10^{-5}	1.6×10^{-4}
Al ₂ O ₃	8×10^{-6}	2.3×10^{-5}
SiO ₂	2×10^{-6}	1.3×10^{-5}

十、还有什么原因会导致膜层性能下降

膜层的光学损耗主要为吸收损耗和散射损耗。吸收损耗极大地影响了元件的光学质量，但散射损耗也是同时需要考虑的一点。散射损耗通常关联膜层的不均匀性和粗糙度。其会使反射率和透射率同时下降并带来杂散光。

薄膜元件的散射损耗一般都很小(<1%)，但对于高反或高透元件，这个微量损耗能对元件造成巨大的影响。



参考文献

- [1] absorption loss. https://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-001/_0088.htm, 1996
- [2] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M], 2007, 288-399
- [3] Absorbance. <https://en.wikipedia.org/wiki/Absorbance>
- [4] Absorption Coefficient. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient>
- [5] 荆建行, 孔明东, 王 强, 等. 基于红外热像仪的光学薄膜吸收测试方法[J]. 光电工程, 2021, 48(6): 210071
- [6] Laser and electro-optical systems. ISO 11551:2019 Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment – Test method for absorbance of optical laser components, 2020
- [7] Balasa I., Jensen L.O., Ristau D.. Laser calorimetric absorbance testing of samples with varying geometry. Optical Engineering, 2014, 53(12):122503
- [8] layertec. <https://www.layertec.de/en/>, Germany
- [9] Christian Mühlig, Siegfried Kufert, Simon Bublit, et al. Laser induced deflection technique for absolute thin film absorption measurement: optimized concepts and experimental results. Applied Optics, 2011, 50(9): C449-C456
- [10] A Guide to (Not Over) Specifying Losses in Laser Optics. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/a-guide-to-not-over-specifying-losses-in-laser-optics>
- [11] 温家慧, 朱美萍, 孙建, 等. 激光薄膜吸收损耗控制研究进展 [J/OL]. 光学学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20211110.1126.024.html>



有什么问题请联系我们的
技术工程师, 在线为
您解答



了解更多资讯, 请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

