

具有亚表面损伤层基底表面的激光减反膜设计

刘华松¹, 刘杰², 王利栓¹, 姜玉刚¹, 冷健¹, 季一勤¹

- (1. 天津航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300192;
2. 中国人民解放军驻中国空军导弹研究院军事代表室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 光学材料的亚表面损伤层(SSD)是激光光学领域内的研究热点之一。亚表面损伤层的存在将导致其表面薄膜特性发生变化, 尤其是在高精度低损耗激光薄膜的设计与制造中亚表面损伤层必须给予考虑。文中研究了亚表面损伤层的物理特性, 并借助于椭圆偏振仪测量基底表面的椭偏光谱, 反演计算出 SSD 的物理厚度和折射率梯度。通过计算得到了亚表面的深度和梯度对激光减反膜反射率光谱的影响, 证明了亚表面深度对反射率的影响具有周期效应。在考虑亚表面损伤层的深度和梯度存在的基础上, 对激光减反膜的设计进行了理论修正, 数值实验结果证明通过膜系的修正可以实现 633 nm 处的零反射。

关键词: 激光减反膜; 亚表面损伤层; 椭偏光谱; 折射率梯度

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2737-05

Design of laser antireflection coating on substrate with subsurface damage

Liu Huasong¹, Liu Jie², Wang Lishuan¹, Jiang Yugang¹, Leng Jian¹, Ji Yiqin¹

- (1. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China,
2. Military Deputy Office of PLA in China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Subsurface damage (SSD) of optical material is a focal point of research in laser optical field. The existence of SSD of substrates would change the properties of thin film, and the influence of the surface damage in substrates is essential to consider during the design, manufacture of high precision low loss laser antireflection coating. Physical properties of SSD were studied. And the physical thickness and refractive index gradient of SSD could be retrieved by the spectroscopic ellipsometry of substrate surface. Then the effect of them on reflection spectrum of antireflection coating was obtained by calculation. The depth of SSD affects the reflection spectrum periodically. At last, with depth and gradient of SSD taken into account, the design of laser antireflection coating was revised theoretically, and the numerical experiment shows that the design is possible to realize zero-reflection at 633 nm.

Key words: antireflection coating; subsurface damage; spectroscopic ellipsometry; refractive index gradient

收稿日期: 2013-02-04; 修订日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61235011); 天津市科委项目(10JCYBJC01500, 12JCQN1C01200)

作者简介: 刘华松(1980-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事激光薄膜的设计、制备与测试技术研究。

Email: liuhuasong@gmail.com

0 引言

玻璃或晶体均为常用的光学薄膜基底材料,其加工过程具有工序多、周期长等特点,如切割、铣磨成型、研磨和抛光,这些加工过程中会在光学材料的亚表面引入各种损伤或缺陷,包括裂纹、划痕、微断裂、残余应力、杂质等,形成亚表面损伤层^[1]。

近年来,在高精度激光测量和高能激光系统发展的需求下,对光学薄膜元件的总损耗和抗激光损伤特性提出了日益苛刻的要求,高质量的光学薄膜元件甚至成为激光系统发展的瓶颈技术。随着对激光薄膜研究的深入,科研人员逐渐认识到基底特性与薄膜之间的关系密不可分,如基底的表面粗糙度、疵病、面形和应力等特性对薄膜性能的影响。在研究亚表面损伤问题上,科研人员从亚表面产生的机制、物理特征、测量方法和消除等方面开展了大量的研究,而亚表面与薄膜特性之间的关系研究报道较少,尤其是在低损耗激光薄膜研究领域,亚表面损伤层的存在成为需重点考虑的问题之一^[2-3]。

文中在分析熔融石英亚表面物理机制的基础上,研究了熔融石英亚表面对激光减反膜的影响,并给出了在亚表面损伤层存在的前提下激光薄膜的设计方法,为低损耗激光薄膜的设计提供了设计思路和方法。

1 亚表面的基本理论与物理特征

参考文献[4-5]给出了基于椭圆偏振测量技术,来建立 p 偏振光在布儒斯特角附近相位变化与表面结构的关系,并以表面粗糙度(TSR)、SSD 和空气比率 f,三个参数来描述表面和亚表面损伤层的信息,如图1和图2所示。在椭圆偏振仪测量基底表面得到相位数据后,选取合适的结构模型计算出相应的理论值,对测量数据和理论值进行优化处理,当评价函数最小时得到相应的结构信息,主要为 SSD 的物理厚度和梯度。

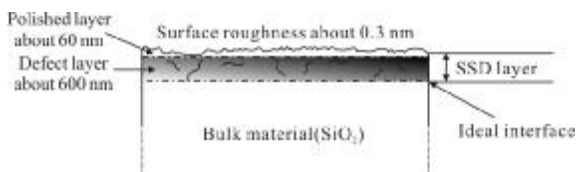


图1 熔融石英的亚表面损伤层示意图

Fig.1 Schematic of SSD of fused silica

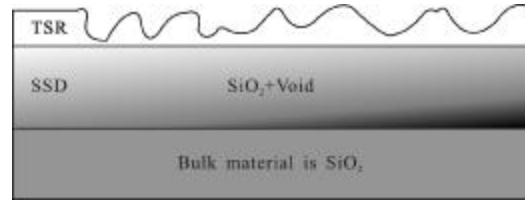


图2 损伤层物理模型示意图

Fig.2 Physical model of surface damage

通过上述对亚表面物理特征的分析得知,可以将亚表面损伤层等效为折射率渐变薄膜,折射率从基底到空气方向逐渐降低,降低的程度取决于空气比例 f。基于此思想计算了石英基底 SSD 的椭圆反射特征。图3给出了随着亚表面深度的变化反射相位的变化情况。计算中假定基底的折射率梯度为 -0.05,物理厚度从 0~8.0 QW(1 QW= $\lambda_0/4$)变化时,隅布儒斯特角变小;图4给出了反射相位随 SSD 梯度的变化情况,其中假定基底的物理厚度为 800 nm,折射率梯度从 0~-0.05 之间变化,随着 SSD 梯度的增加隅布儒斯特角仅有微小的移动;由此得知,可以通过椭圆偏振仪测量基底的表面,由反射相位进行反演计算出 SSD 的物理厚度和折射率梯度。

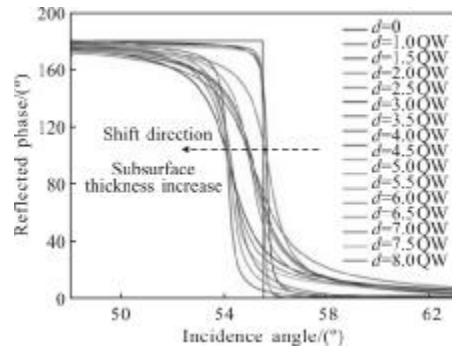


图3 熔融石英的 SSD 厚度对反射相位的影响

Fig.3 Effect of SSD thickness of fused silica thickness on reflection phase

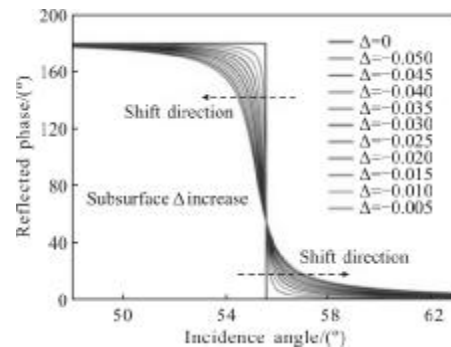


图4 熔融石英的 SSD 梯度对反射相位的影响

Fig.4 Effect of SSD gradient of fused silica gradient on reflection phase

2 亚表面对激光减反膜的影响

2.1 减反膜的理想设计

V 型减反膜是单波长激光薄膜元件中常用的膜系,该膜系具有结构简单、膜层厚度小、制备过程累积误差小容易控制等优点。在理想设计情况下,该膜系的结构为 $S/\alpha H \beta L/Air$, 其中 H 和 L 为单位光学厚度,一般定义为 $\lambda_0/4$ 厚度。在此选择激光波长 λ_0 为 633 nm, 基底为熔融石英,H 层选择 HfO_2 材料,L 层选择 SiO_2 材料,其光学常数分别见图 5、图 6 和图 7。理想情况下减反膜的设计结果为:膜系结构系数 $\alpha=0.4133, \beta=1.2861$, 图 8 为理论设计的光谱曲线,在 633 nm 波长处可获得零剩余反射。

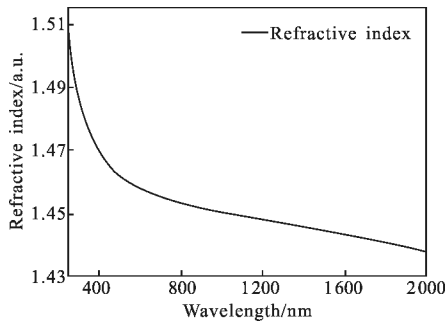


图 5 熔融石英基底的折射率色散

Fig.5 Refractive index dispersion of fused silica

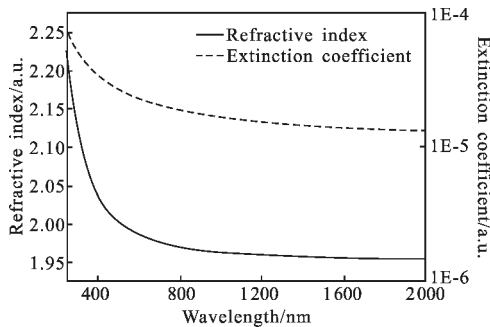


图 6 H 层薄膜材料的光学常数色散

Fig.6 Refractive index dispersion of H layer

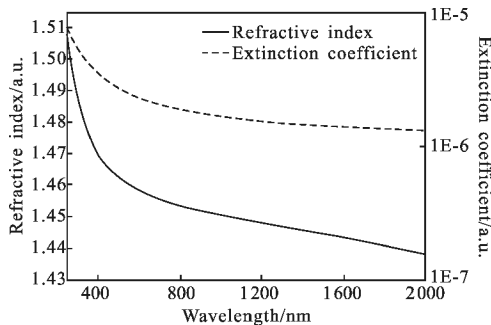


图 7 L 层薄膜材料的折射率色散

Fig.7 Refractive index dispersion of L layer

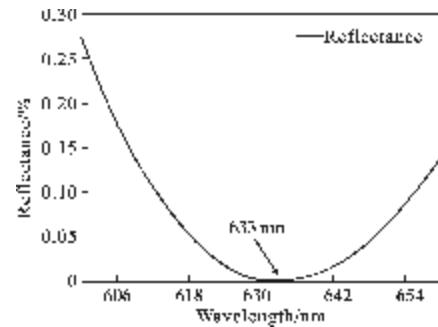


图 8 V 型激光薄膜的理论设计反射光谱

Fig.8 Reflection spectrum by V-type design method

2.2 SSD 厚度对减反膜的影响

假定亚表面损伤层的折射率梯度为 -0.05 , 考虑该梯度下亚表面损伤层,则膜系结构将修正为: $S/M \alpha H \beta L/Air$, M 为亚表面损伤层, 假定亚表面损伤层的物理厚度为 $0 \sim 700$ nm 时,通过计算上述膜系即可得到 SSD 的厚度对减反膜剩余反射率的影响,计算结果见图 9 和图 10。从图 9 中可以看出, 减反膜的反射率光谱随着 SSD 的深度增加出现周期性振荡, 考察 633 nm 波长点的反射率,见图 10,沿着 SSD 深

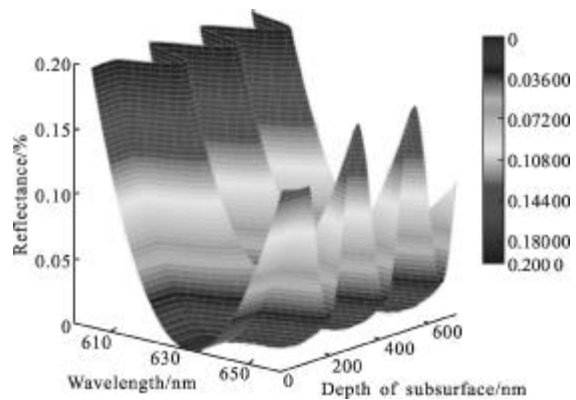


图 9 SSD 深度对激光减反膜反射率光谱的影响

Fig.9 Effect of SSD depth on reflection spectrum of antireflection coating

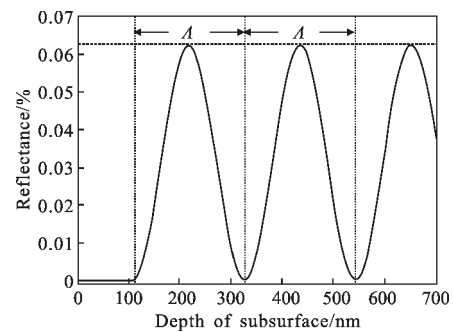


图 10 SSD 深度对 633 nm 波长反射率的影响

Fig.10 Effect of SSD depth on reflectivity at 633 nm

度方向反射率变化具有一定的周期，反射率在 0~0.06%之间振荡，根据薄膜光学原理分析，如果基底 SSD 的深度的相位厚度为 $\pi/2$ 的偶数倍时将会出现最低反射率点，相位厚度为 $\pi/2$ 的奇数倍时将会出现最高反射率点。

2.3 SSD 梯度对减反膜的影响

假定亚表面损伤层的深度为 600 nm，通过 2.2 节中修正的膜系即可得到 SSD 的梯度对减反膜剩余反射率的影响，见图 11 和图 12。从图 11 中可以看出，减反膜的反射率光谱随着 SSD 的梯度变化未出现

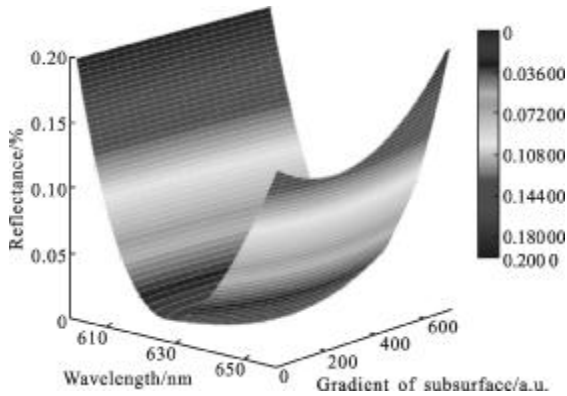


图 11 SSD 梯度对激光减反射膜反射率光谱的影响

Fig.11 Effect of SSD gradient on reflection spectrum of laser antireflection coating

如图 9 所示的周期性振荡现象。考察 633 nm 波长点的反射率，见图 12，随着梯度的增加，反射率呈现单调增加的趋势，在梯度为 -0.05 时，剩余反射率最大可达到 0.02%。

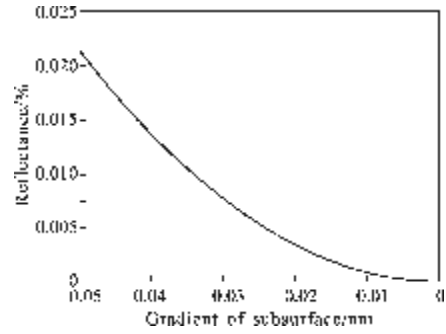


图 12 SSD 梯度对 633 nm 波长反射率的影响

Fig.12 Effect of SSD gradient on reflectivity at 633 nm

3 具有亚表面层基底激光减反膜的设计

根据第 2 节对减反膜系物理模型的分析，当基底存在亚表面损伤时，必须对膜系进行物理修正，否则将无法实现零剩余反射。因此，下面将在考虑基底 SSD 情况下进行减反膜设计，假定亚表面损伤层物理厚度为 600 nm 和 200 nm，对不同梯度(-0.05~0)情况下进行激光减反膜设计，设计结果见表 1。

表 1 激光减反膜的修正设计结果

Tab.1 Modified design of laser antireflection coating

Depth of subsurface/nm	Gradient of subsurface	α	β	H physical thickness/nm	L physical thickness/nm	Before revised R@633 nm/ppm	After revised R@633 nm
0	0	0.413 3	1.286 1	32.99	139.69	0.00	-
	-0.050	0.406 3	1.259 4	32.42	136.79	337	
	-0.045	0.407 4	1.261 9	32.52	137.06	273.01	
	-0.040	0.408 3	1.264 5	32.58	137.34	215.76	
	-0.035	0.409 2	1.267 1	32.66	137.62	165.24	
	-0.030	0.410 1	1.269 6	32.72	137.90	121.46	
	-0.025	0.410 6	1.272 4	32.77	138.20	84.40	
	-0.020	0.411 4	1.275 0	32.83	138.48	54.07	
	-0.015	0.412 0	1.277 7	32.88	138.77	30.47	
	-0.010	0.412 6	1.280 5	32.93	139.07	13.59	
600	-0.005	0.412 9	1.283 3	32.96	139.39	3.43	
	-0.050	0.435 7	1.280 2	34.77	139.04	83.33	Zero-reflection
	-0.045	0.433 6	1.280 6	34.6	139.09	67.47	
	-0.040	0.431 3	1.281 1	34.42	139.15	53.29	
	-0.035	0.429 1	1.281 7	34.25	139.21	40.78	
	-0.030	0.426 8	1.282 3	34.06	139.27	29.95	
	-0.025	0.424 6	1.282 9	33.88	139.34	20.79	
	-0.020	0.422 4	1.283 5	33.71	139.40	13.30	
	-0.015	0.420 1	1.284 1	33.53	139.47	7.47	
	-0.010	0.417 9	1.284 7	33.35	139.54	3.32	
200	-0.005	0.415 7	1.285 3	33.18	139.6	0.83	
	0	0.413 3	1.286 1	32.99	139.69	0	

从表 1 中可以得到,当 SSD 的物理厚度为 600 nm 时,H 层的物理厚度需从 32.99 nm 减小到 32.42 nm,相对变化为 1.728%;L 层的物理厚度需从 139.69 nm 降低到 136.79 nm,相对变化为 2.076%,减反膜的剩余反射率从 337 ppm 降低到零反射率;当 SSD 的物理厚度为 200 nm 时,H 层的物理厚度需从 32.99 nm 增加到 34.77 nm,相对变化为 5.396%;L 层的物理厚度需从 139.69 nm 降低到 139.04 nm,相对变化为 0.465%;只有经过这样的修正,剩余反射率才能从 83.33 nm 降低到零反射率。

4 结 论

文中将基底的亚表面损伤层等效为折射率渐变的薄膜,研究了亚表面的物理特性,讨论了 SSD 深度和梯度的表征方法。以 V 型激光减反膜为例,研究了 SSD 的不同深度和梯度对剩余反射率的影响,证明了在亚表面存在的情况下,SSD 的深度对剩余反射率影响具有周期效应,其相位厚度若为 $\pi/2$ 的偶数倍时仍然会出现最低反射率点,相位厚度若为 $\pi/2$ 的奇数倍时则出现最高反射率点。而梯度的影响则是导致剩余反射率单调增加。制备超低剩余反射率的激光减反膜时,必须对膜系结构进行物理厚度修正,修正的依据是获得的基底 SSD 的深度和梯度。

参 考 文 献:

- [1] Paul H D, Edwards J B. Subsurface damage in optical materials: origin measurement & removal [R]. DE89001221, 1988.
- [2] Feit M D, Rubenchik A M. Influence of subsurface cracks on laser induced surface damage[C]//SPIE, 2003, 5273: 264-272.
- [3] Campbell J H, Hwaley-Fedder R A. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview [C]//SPIE, 2004, 5341: 84-101.
- [4] Wang J, Maier R L, Burning J H. Surface characterization of optically polished CaF₂ crystal by quasi-Brewster angle technique[C]//SPIE, 2003, 5188: 106-114, .
- [5] Jue Wang, Robert L Maier. Quasi-Brewster angle technique for evaluating the quality of optical surfaces[C]//SPIE, 2004, 5375: 1285-1294.
- [6] Ji Yiqin, Liu Huasong, Zhang Yanmin. Test and analysis of optical film constants [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 513-518. (in Chinese)
季一勤, 刘华松, 张艳敏. 光学薄膜常数的测量与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 513-518.
- [7] Ji Yiqin, Cui Yuping, Liu Huasong, et al. Test and analysis of optics thin film loss[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 37(3): 505-508. (in Chinese)
季一勤, 崔玉平, 刘华松, 等. 光学薄膜的损耗测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 37(3): 505-508.