

光学滤光片薄膜边缘应力研究

董茂进 张玲 王多书 熊玉卿 王济洲

(兰州空间技术物理研究所,真空技术与物理重点实验室,兰州 730000)

文 摘 以光学滤光片薄膜边缘应力作为对象,研究了 Ge/ZnS 单、多层光学薄膜应力的变化规律。通过实验研究了离子束轰击能量以及真空退火温度等因素对 Ge/ZnS 光学薄膜应力类型、大小、变化及其分布的影响规律。ZnS 薄膜的应力为压应力,采用离子束辅助工艺后薄膜边缘应力变得均匀;真空退火使 ZnS 薄膜的应力减小为原来的一半。通过优化沉积参数和张应力、压应力薄膜的组合降低了 Ge/ZnS 多层光学薄膜的应力,结果表明其平均应力分别为 0.1 MPa,而且处于压应力状态。

关键词 光学薄膜,边缘效应,应力模型

中图分类号:O484.1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.01.004

Study on Stress in Edge of Optical Filters

DONG Maojin ZHANG Ling WANG Duoshu XIONG Yuqing WANG Jizhou

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract Stress is a universal phenomenon in thin film deposition. It has important effect on structure and performance of thin film. In order to improve optical and mechanical performance of filters, the stress in ZnS/Ge optical thin film and stress control technology are studied by theory and experiments. It is found that ion beam bombardment and vacuum annealing affect the stress in thin film. The stress in ZnS films is compressive stress. Ion beam assisted deposition makes the stress uniformity in ZnS films. Vacuum annealing makes compressive stress in ZnS films half of the value before annealing. Finite element method analysis results of ZnS/Ge multilayer thin films show the thermal stress has larger value on edge of thin film and substrate. Thin film has larger deformation on edge. The results show that ZnS/Ge multilayer thin film filters have less compressive stress by optimum deposition and different stress films. The average stress is 0.1 MPa respectively.

Key words Optical thin film, Edge effect, Stress model

0 引言

空间光学滤光片是空间相机、光谱成像仪及各种观察窗上面的关键组件,主要起到对光波进行光谱选择的作用,应用非常广泛。

滤光片膜层边缘效应一般是指在离滤光片边缘的一定距离内发生膜层机械性能与特殊性功能的降低或失效。通常情况下,根据滤光片的形状大小与实际使用面积将膜层边缘部分置于应用区域之外,但是当滤光片尺寸很小时或膜层很厚时,膜层的边缘效应特别明显。其特点是边缘膜层附着不牢固(图 1),容易脱落,从而导致膜层功能性的降低或失效^[1]。

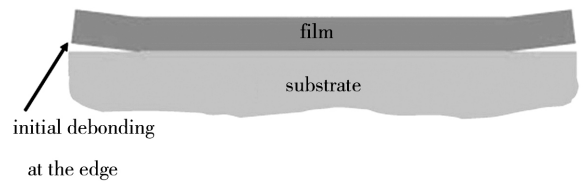


图 1 膜层边缘效应示意图

Fig. 1 Edge effect of thin film

红外谱段集成光学薄膜器件的尺寸小,边缘效应直接影响了整个器件的膜层附着性。同时,由于集成光学薄膜器件采用多个单通道窄带光学薄膜器件拼接的方式进行制作,因此每个通道窄带光学薄膜器件

收稿日期:2014-12-04

基金项目:重点实验室基金(9140C540301110C5402)

作者简介:董茂进,1980 年出生,博士,主要从事光学薄膜技术研究工作。E-mail:klmdmj@126.com

的拼接缝一侧加工不能倒角(确保拼接精度能够满足要求),使得边缘效应更加明显,严重影响了光学薄膜的有效通光面积与光谱性能。为此,本文对光学滤光片薄膜边缘应力进行了研究。

1 仿真计算

考虑到膜层之间不同的弹性常数,在基底的上部分受压应力的作用,而下部分受张应力的作用。在 ZnS 膜层中的热应力为张应力,Ge 膜层中的热应力也为张应力^[2]。

多层薄膜边缘热应力的有限元模型如图 2 所示。基底采用直径 50.8 mm、厚度 350 μm 的圆形硅片(Si <100>),多层薄膜膜系为 Si/ZnS/Ge/ZnS /Air。所建立的模型各参数为:ZnS、Ge 薄膜厚度都为 1 μm ,硅基底直径 50.8 mm、厚度 350 μm ,沉积温度为 473 K,环境温度为 298 K。

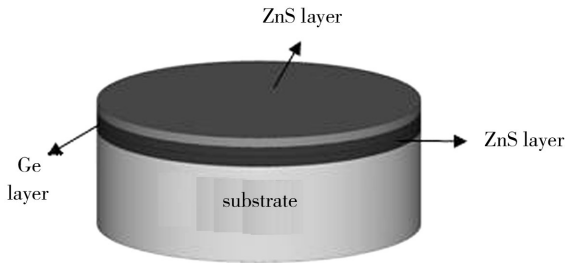


图 2 多层薄膜有限元模型

Fig. 2 FEA model of multilayers

从沉积温度均匀冷却至室温,薄膜材料特性的变化是可以忽略的,热应力主要是由于基底的热胀系数与基底边缘的不同造成的。计算边缘应力可以采用结构分析的办法,温度梯度变化则可以采用耦合分析^[3]。为方便对有限元模型求解,对所建立的多层薄膜边缘有限元模型进行网格化处理,以计算得到其应力分布图,图 3 为对多层薄膜有限元模型网络化后的模型加载并求解得到的剖面图。

从数值模拟结果可知,计算的 ZnS 薄膜热应力为 105.142 MPa,Ge 膜热应力为 95.186 MPa,数值为正

值,说明模型的薄膜热应力为张应力,而根据弹性理论公式所计算的 ZnS 薄膜热应力为 105.139 MPa,Ge 薄膜热应力为 95.183 MPa,二者十分接近,因此所建立的有限元模型是合理的。从模拟的结果看,热应力在薄膜和基底的边缘部分变化比较大,分布也很不均匀。而在实际的应力测试中,也确实发现在薄膜样品的边缘易出现应力的集中现象,而且薄膜的破裂、脱落也往往是从薄膜的边缘开始的^[4]。



图 3 应力分布图

Fig. 3 Stress distributing plot

通过有限元分析计算得到的热应力值,计算结果与理论解进行了比较,证明了所建立的有限元模型是合理的。数值模拟结果表明,热应力在薄膜和基底的边缘部分变化比较大,分布也很不均匀;薄膜边缘处的变形最大,而其他部分的变形则较小^[5]。

2 滤光片边缘应力的抑制方法

采用电子束蒸发的方法在直径 50.8 mm、厚度 350 μm 的圆形硅片基底上镀制 1 μm 的 ZnS 薄膜,分为不用离子束辅助(IBAD)、IBAD 两种情况。用 BGS6431 型电子薄膜应力分布测试仪测量了硅基底 ZnS 薄膜的应力分布(以下各组实验样品均用该仪器测试)。

从图 4 中可以看出,应力分布均匀性较差的是未采用 IBAD 的样品,而采用 IBAD 的样品应力分布较均匀。说明采用 IBAD 技术可以改善 ZnS 薄膜边缘的应力分布状况。

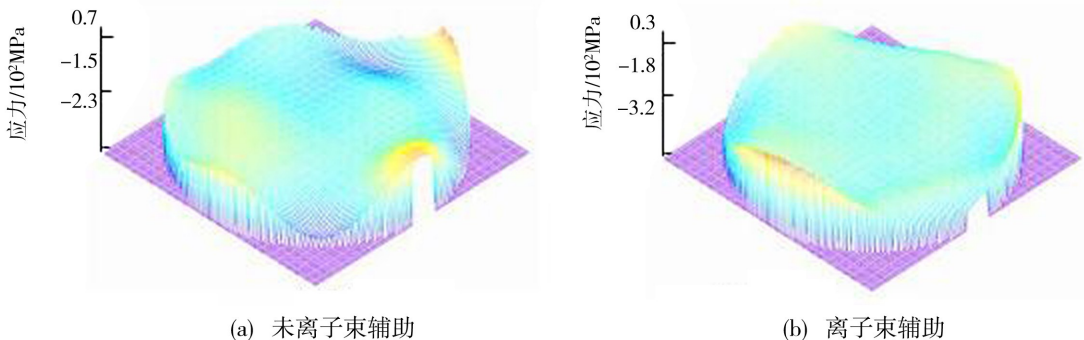


图 4 离子束辅助对 ZnS 薄膜应力的影响

Fig. 4 Effect of ion beam bombardment on ZnS thin film

在 473 K、5.0 mPa 的条件下对采用电子束蒸发 IBAD 在直径 50.8 mm、厚度 350 μm 的圆形硅片基底上镀制 1 μm 厚 ZnS 薄膜的 1[#]、2[#]、3[#] 三个样品进行退火处理,薄膜边缘应力的表现形式为压应力(表 1)。

表 1 真空退火对 ZnS 薄膜边缘应力的影响¹⁾

Tab.1 Effect of vacuum annealing on ZnS thin film

样品 编号	沉积温度 /K	退火时间 /h	平均应力/MPa	
			退火前	退火后
1 [#]	473	1	-107.7	-107.0
2 [#]	473	2	-113.5	-60.2
3 [#]	473	3	-164.2	-83.3

注:1)“-”表示压应力。

经过退火工艺后测试结果仍为压应力,其应力值

随着真空退火时间的延长降低的更明显。当真空退火时间小于 1 h,边缘的应力几乎没有变化,真空退火时间达到 2 h 时,压应力测试值为退火前的一半。而 3 h 退火后与 2 h 退火相比薄膜边缘应力值基本相同,这说明真空退火可以有效降低 ZnS 薄膜边缘的应力,且时间至少要达到 2 h。

图 5 为真空退火对 ZnS 薄膜边缘应力的影响。退火前薄膜的边缘部分主要是压应力,而且分布不均匀,薄膜中间的部分区域为张应力;退火后 ZnS 薄膜边缘的压应力减小,可以看到薄膜边缘的压应力明显大于中间的,通过退火处理,薄膜边缘应力分布变得较为均匀。

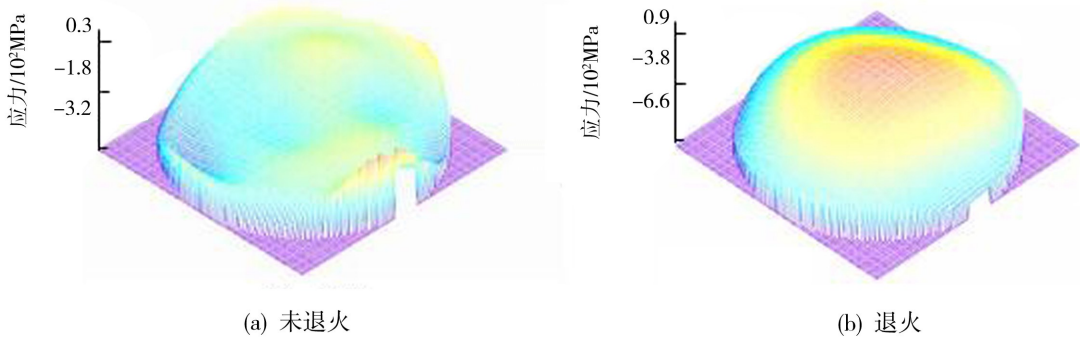


图 5 真空退火对 ZnS 薄膜应力的影响

Fig.5 Effect of vacuum annealing on ZnS thin film

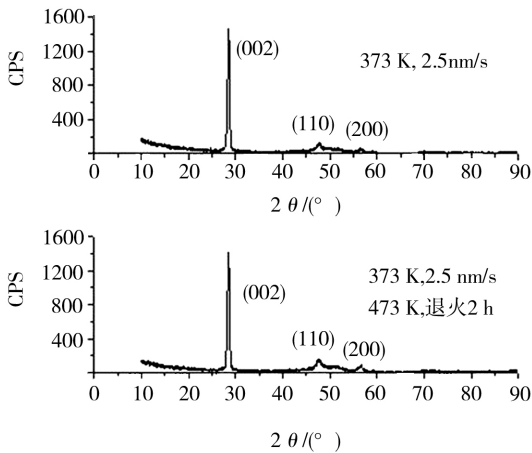


图 6 ZnS 薄膜样品 XRD 图

Fig.6 XRD of ZnS thin film

从图 6 可以看出:未进行退火的 ZnS 薄膜样品, XRD 测试时在 28.5°、47.7°、56.7° 位置出现了 (002)、(110)、(200) 的衍射峰,其中 (002) 衍射峰很强;而对 ZnS 薄膜样品进行退火后, (002) 衍射峰强度基本不变, (110)、(200) 衍射峰强度有所增强。

这可以解释为,对 ZnS 薄膜的真空退火改变了其晶体结构,使薄膜朝结晶方向变化,同时降低内应力。在这一过程中退火温度和时间是非常重要的参数。

温度可以增加原子振动的振幅,加快原子的运动,使原子重新排布,通过原子的运动、释放出其中的应力,降低薄膜中的应变能量。

图 7 为直径 50.8 mm、厚度 350 μm 圆形硅片镀制 Ge/ZnS 多层薄膜样片边缘的应力分布图。在镀膜过程采用了离子束辅助,镀膜后进行了真空退火处理。可以看出:Ge/ZnS 多层薄膜样片边缘的应力分布是比较均匀的。

测试结果表明 Ge/ZnS 多层薄膜为压应力,平均应力为 0.1 MPa。由此可见多层薄膜滤光片边缘的平均应力是很小的,而且处于压应力状态,因而它更稳定。这是因为在设计多层薄膜滤光片膜系时就考虑了滤光片边缘的应力情况。ZnS 薄膜的应力为压应力,而 Ge 膜的应力为张应力,因此把多层薄膜滤光片的两种膜料选为 ZnS 和 Ge,这样就可以抵消一部分应力;另外通过选择合适的沉积参数,还可以降低滤光片边缘的平均应力。

实验结果说明,通过选择合适的沉积参数,同时结合 Ge/ZnS 多层薄膜滤光片膜料的选择成功地减小了滤光片的应力。镀制的滤光片平均应力只有 0.1 MPa,而且处在压应力状态。

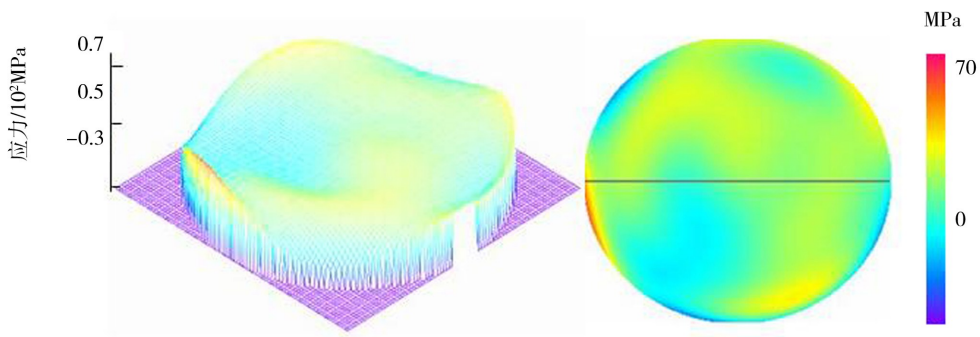


图7 Ge/ZnS 多层薄膜样片的应力分布图

Fig.7 Stress distributing plot of Ge/ZnS thin films

3 结论

采用有限元分析方法,计算出了薄膜边缘的热应力值,数值模拟结果表明,热应力在薄膜边缘变化比较大,分布不均匀;薄膜边缘处的变形最大,而其他部分的变形则较小。对镀制 Ge/ZnS 多层薄膜后的边缘应力进行了应力测试,结果表明通过选择合适的沉积参数,同时结合膜料的选择成功地减小了多层薄膜边缘的应力。镀制的 Ge/ZnS 多层薄膜边缘的平均应力仅为 0.1 MPa,而且都处在压应力状态。

参考文献

[1] 邵淑英, 范正修, 邵建达. 多层膜中膜厚组合周期数及基底材料对残余应力的影响[J]. 物理学报, 2005, 54(7):3312-3316

[2] Bilek M M M, McKenzie D R. A comprehensive model of stress generation and relief processes in thin films deposited with energetic ions[J]. Surface & Coatings Technology, 2006 (200): 4345-4354

[3] 袁超, 安兵, 张同俊. 基片弯曲法分析 Ag/Fe 多层膜退火过程中界面应力的变化[J]. 理化检测, 2003 (39): 237-239

[4] 向鹏, 金春水. Mo/Si 多层膜残余应力的研究[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1):62-67

[5] 顾培夫, 郑臻荣, 赵永江, 等. TiO₂ 和 SiO₂ 薄膜应力的产生机理及实验探索[J]. 物理学报, 2006, 55(12):6459-6463

(编辑 李洪泉)

抗核电磁脉冲多功能防护涂层技术

2014年10月28日,中国航天科技集团公司在北京主持召开了航天材料及工艺研究所完成的"抗核电磁脉冲多功能防护涂层技术"项目成果鉴定会。该项目具有自主知识产权,综合技术水平达到国内领先,鉴定委员会同意通过鉴定。该项目突破了多功能涂层结构设计、树脂基体与电磁屏蔽/防静电多功能填料体系的优化及填料的分散等关键技术,研制出了集抗核电磁脉冲、电磁屏蔽、防静电、防盐雾、防湿热、防霉菌、耐高温于一体的多功能防护涂层。研究成果已得到了成功应用,有效满足了抗核电磁脉冲、防静电、三防等复杂环境下的多功能防护技术的需求,应用前景广阔,效益显著。

· 罗焱 ·