

通过热应力分析改善 AOTF 键合层附着力

陆川, 鲜晓军, 张银中, 陈华志, 杨华, 刘伟, 张永川, 刘善群

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:针对声光可调滤光器(AOTF)压电换能器和声光晶体键合后出现附着力差的问题开展分析,根据热应力理论计算 AOTF 键合层各层的热应力分布情况,提出通过增加过渡层改善键合层应力特性。当过渡层 Au 膜厚为 200 nm 时,理论上键合层和声光晶体间的热应力减小到 -0.613 MPa,能够保证膜层的附着强度。测试结果显示,添加过渡层后频率响应的 3 dB 带宽增加,衍射效率提高了 2%~4%。

关键词:声光可调滤光器;声光晶体;真空键合;热应力;声阻抗匹配

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Improvement of the Adhesion of AOTF's Bonding Layer by Thermal Stress Analysis

LU Chuan, XIAN Xiaojun, ZHANG Yinzhong, CHEN Huazhi, YANG Hua, LIU Wei,

ZHANG Yongchuan, LIU Shanqun

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor adhesion after the bonding of piezoelectric transducer of AOTF and the acousto-optic crystal, a method of adding a transition metal layer to improve the stress characteristics of the bonding layer was presented through calculating the thermal stress distribution of the bonding layer of AOTF based on the thermal stress theory. When the thickness of the transition layer of Au film reached to 200 nm, the theory thermal stress between the bonding layer and acousto-optic crystal was reduced to -0.613 MPa and the adhesion strength of the coatings could be ensured. The test results showed that the 3 dB bandwidth of the frequency response increased with the addition of the transition layer, and the diffraction efficiency was increased by 2%~4%.

Key words: acousto-optic tunable filter; acousto-optic crystal; vacuum bonding; thermal stress; acoustic impedance matching

0 引言

声光可调滤光器(AOTF)是基于反常布喇格衍射的声光相互作用原理制成的分光器件,由单轴双折射晶体(通常为 TeO_2)、键合在晶体一侧的压电换能器及作用于压电换能器的射频驱动信号源构成。通过射频驱动使固定在晶体表面的压电换能器产生超声波,耦合进入声光晶体使其调制。当满足布喇格衍射条件时,入射光在晶体内将产生反常布喇格衍射,其衍射光的波长与超声波的频率有着——对应的关系^[1-4]。AOTF 具有衍射效率高,无运动部件,调谐范围宽,扫描快及环境适应性好等优点,这些特点使 AOTF 在激光调谐、光谱分析和光谱成像等领域得到广泛应用,被认为是下一代成像光谱技术的发展方向之一^[5-7]。

利用键合工艺将声光晶体(TeO_2)与压电换能器粘接到一起,在晶体和换能器之间需要镀若干金属膜层,统称键合层。键合层由底电极层和焊接层组成,其中底电极选用在非金属材料上附着力较强的材料(Cr),起到使晶体金属化的作用;焊接层一般选用较软的金属(Sn),用于粘接声光晶体和换能器,同时通过厚度控制起到声学增透的作用。声光晶体、换能器和金属膜层的热膨胀系数不同,导致各界面间存在热应力。 TeO_2 晶体各向异性,膜层热应力分布不均,且与金属膜层间存在较大的应力,引起膜层附着力差的问题。

本文主要根据热应力公式计算 AOTF 键合层各层的应力分布,通过分析膜层材料参数对键合过程存在的附着力问题的影响,提出了一种增加过渡

金属层的方法,以改善键合层的应力特征,实现在满足声阻抗匹配的条件下提高键合层的附着力。

1 膜层应力分析

常用的声光器件键合层结构和键合过程如图 1 所示。金属膜的生长和键合过程在真空镀膜键合机里进行。在高真空环境下,分别在声光晶体和压电换能器表面镀制底电极层和焊接层,再通过键合机构将晶体和换能器对准、接触、加压、保压,完成键合。

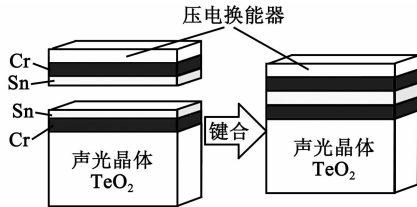


图 1 声光晶体和压电换能器键合过程

通过拉力分别测试 AOTF 高频器件(焊接层膜厚 $2\ \mu\text{m}$)和低频器件(焊接层膜厚 $5\ \mu\text{m}$)膜系附着力,将粘接强度大于 $3\ \text{N}/\text{cm}^2$ 的 3M 胶带紧贴换能器表面,沿垂直方向迅速拉起,重复 10 次,高频器件的换能器和膜层没有脱落,低频换能器和膜层有部分脱落现象,如图 2 所示。通过光学显微镜观察膜体表面,底电极层(Cr)随换能器从晶体表面脱离。

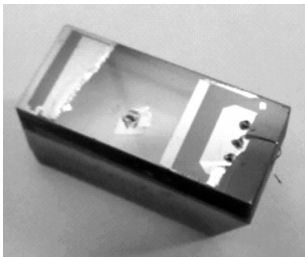


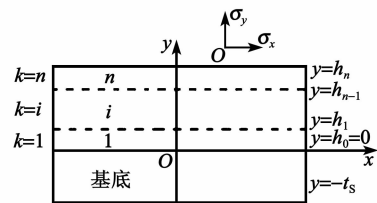
图 2 AOTF 低频器件换能器和膜层脱落

为了检验底电极(Cr)单层和声光晶体间的附着力,共制作 3 只试验样品,编号 a、b、c。样品 a 在晶体上单独镀制了一层 Cr 金属层,重复拉力测试 10 次后,膜层没有脱落;样品 b 在晶体上分别镀制 Cr 金属层和 Sn 焊接层,其中,Sn 焊接层厚度取高频膜厚 $2\ 000\ \text{nm}$,重复拉力测试 10 次后,膜层没有脱落;样品 c 在晶体上分别镀制 Cr 金属层和 Sn 焊接层,其中,Sn 焊接层厚度取低频膜厚 $5\ 000\ \text{nm}$,重复拉力测试 10 次后,换能器和键合层整体出现部分脱落现象。因此,判断低频器件换能器和膜层脱落的原因是键合层和声光晶体间存在热应力失配,并与焊接层的厚度相关。

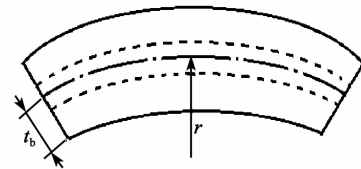
薄膜应力主要由内应力和热应力组成,内应力又称本征应力,取决于薄膜的微观结构和缺陷等因

素,晶粒间界和晶格失配是内应力产生的主要原因。热应力是因薄膜与基底的热膨胀系数不同,成膜时的基片温度不同于应力测量温度及成膜过程中基片温度分布不均匀导致的应力,受镀膜温度影响较大。本文中造成膜系和晶体间附着力下降主要是受热应力影响。 TeO_2 晶体的晶体各向异性,在垂直 $\langle 001 \rangle$ 晶面的热膨胀系数为 $15.1 \times 10^{-6}/\text{K}$;在平行 $\langle 001 \rangle$ 晶面的热膨胀系数为 $7.1 \times 10^{-6}/\text{K}$,导致膜层热应力分布不均;同时,金属膜层间也存在热应力失配的问题。

膜层受力状态如图 3 所示。由于热应力分布较复杂,图 3(a)中将金属膜系中的单层膜视为条状结构,热应力由平行于膜层界面的热应力分量 σ_x 和垂直于膜层界面的热应力分量组成,其中 σ_x 对附着力起主要影响。图中薄膜和基底的接触面为纵坐标零点($y=0$), y 方向上各膜层序号为 $k(k=1,2,3,\dots)$,膜层厚度分别为 $h_i(i=1,2,3,\dots)$ 表示前 i 层的总厚度。图 3(b)为理论上薄膜受力示意图,其中, t_b 是中性面(应力弯曲为 0 的平面)到薄膜界面的距离, r 为室温下薄膜的弯曲曲率半径。



(a) 各膜层应力分布示意图



(b) 薄膜热应力受力示意图

图 3 薄膜受力状态图

多层膜受热产生的应变由两部分组成:一部分是材料受温差影响产生的均匀应变 c ,另一部分是材料膨胀系数差异导致的弯曲应变,即

$$\epsilon = c + \frac{y - t_b}{r} - \alpha \Delta T \tag{1}$$

式中: y 为厚度方向坐标; α 为材料热膨胀系数。

根据胡克定律得应力 $\sigma = \epsilon E$,其中 E 为薄膜材料的杨氏模量,基底的热应力为

$$\sigma_s = E_s \left(c + \frac{y - t_b}{r} - \alpha_s \Delta T \right) \tag{2}$$

$(-t_s \leq y \leq 0)$

第 i 层薄膜的热应力为

$$\sigma_i = E_i \left(c + \frac{y - t_b}{r} - \alpha_i \Delta T \right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中: E_s 和 E_i 分别为基片和第 i 层薄膜的杨氏模量; α_i 为第 i 层薄膜的热膨胀系数。在室温状态下薄膜受力平衡, 由力平衡和力矩平衡可求得均匀应变:

$$c = \frac{(E_s t_s \alpha_s + \sum_{i=1}^n E_i t_i \alpha_i) \Delta T}{E_s t_s + \sum_{i=1}^n E_i t_i} \quad (4)$$

中性面为

$$t_b = \frac{-E_s t_s^2 + \sum_{i=1}^n E_i t_i (2h_{i-1} + t_i)}{2(E_s t_s + \sum_{i=1}^n E_i t_i)} \quad (5)$$

弯曲曲率为

$$\frac{1}{r} = \frac{\{3[E_s(c - \alpha_s \Delta T)t_s^2 - \sum_{i=1}^n E_i t_i (c - \alpha_i \Delta T) \cdot (2h_{i-1} + t_i)]\}}{\{E_s t_s^2 (2t_s + 3t_b) + \sum_{i=1}^n E_i t_i \cdot [6h_{i-1} t_i + 2t_i^2 - 3t_b (2h_{i-1} + t_i)]\}} \quad (6)$$

$$h_i = \sum_{j=1}^i t_j \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中: t_j 为第 j 层的膜厚度; ΔT 为温度变化量。

AOTF 的各膜层参数及膜层厚度如表 1 所示。

表 1 AOTF 膜层参数和厚度

膜层	热膨胀系数/ 10^{-6}K^{-1}	杨氏模量/GPa	高频厚度/ μm	低频厚度/ μm
晶体 TeO_2	5.5	124	25 000	25 000
底电极 Cr	6.2	250	0.05	0.05
键合层 Sn	2.0	54	2	5

将表 1 中的参数代入式(1)~(7), 取 $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 得到各界面的应力如表 2 所示。

表 2 AOTF 各膜层界面热应力

膜层界面	高频热应力/MPa	低频热应力/MPa
TeO_2 -Cr	-0.595 2	-1.508 6
Cr-Sn	-1.751 2	-1.753 0

由表 1、2 可见, 高频器件由于焊接层厚度远低于低频器件, 导致其晶体和底电极界面热应力远低

于低频器件, 因此附着力较好。为了保证低频器件的膜层附着力, 需要将键合层热应力调整到接近高频器件的水平。由式(3)~(7)可知, 底电极和焊接层的膜厚与界面热应力相关, 考虑到焊接层厚度变化对声阻抗匹配影响较大, 故计算保持焊接层厚度不变的情况下, 底电极厚度与界面热应力的关系, 如图 4 所示。由图可见, 界面热应力随底电极厚度的增加而线性降低, 且变化缓慢, 在底电极厚度有限的情况下不能起到有效的应力调节作用。

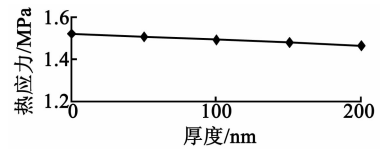


图 4 底电极(Cr)厚度与界面热应力关系

2 增加过渡层后的应力分析

根据式(1)~(7), 键合层界面的热应力不仅取决于相邻膜层参数, 还受到其他膜层的影响, 任一膜层的参数(材料常数、膜厚)发生变化, 都会影响各个界面的热应力分布状态。

为了保证器件性能及可靠性的前提下有效降低声光晶体和底电极间的热应力, 提出在底电极(Cr)和焊接层之间增加一层金属过渡层, 如图 5 所示。该过渡层需要满足以下要求:

- 1) 电导率高, 导电性好。
- 2) 与 Cr、Sn 间的附着力较好。
- 3) 增加过渡层后有效降低晶体和底电极界面的热应力。

4) 满足前 3 项的条件下, 不会增加换能器损耗, 键合层满足声阻抗匹配。通过分析, Au 是合适的过渡层材料。

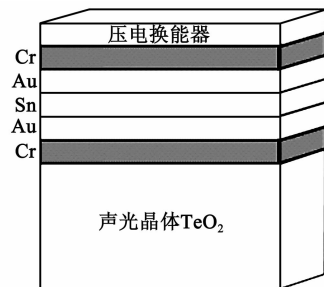


图 5 增加 Au 过渡层

将 Au 材料的热膨胀系数($1.42 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$)和杨氏模量(79.5 GPa)代入式(1)~(7), 计算得到

过渡层厚度和键合层界面热应力的关系,如图6所示。同底电极Cr相比,过渡层Au厚度增加对键合层界面热应力有明显的抑制效果,在一定厚度变化范围内,界面热应力随过渡层厚度的增加而降低。Au层厚度为200 nm,对应的热应力为-0.613 MPa,接近高频段的界面热应力水平。

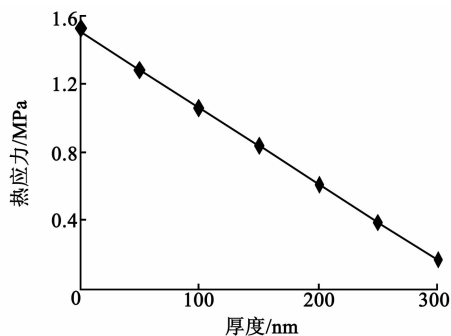
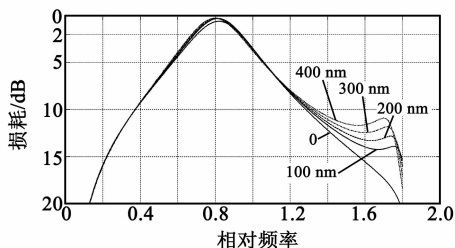
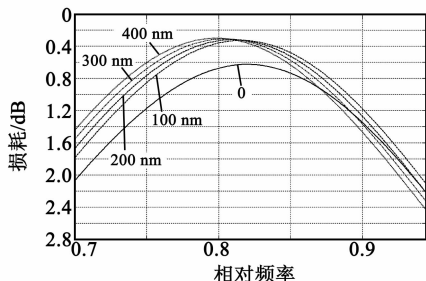


图6 过渡层(Au)厚度和界面热应力关系

为了避免加入过渡层后影响声阻抗匹配,下面计算了在其他金属层膜厚不变的条件下,换能器损耗-频率特性曲线随Au过渡层厚度变化的情况,如图7所示。由图可见,加入过渡层并将厚膜控制在一定范围内(0~200 nm),换能器损耗降低,3 dB带宽增加;膜厚超过200 nm后,3 dB带宽变窄,且曲线发生较大畸变。因此,当过渡层膜厚取200 nm时,理论上可以在保证声阻抗匹配的条件下,有效降低低频器件的界面热应力,提高换能器和金属膜层的附着力。



(a) 频率特性曲线随过渡层厚度增加发生畸变



(b) 过渡层厚膜在一定范围内增加,换能器损耗降低

图7 过渡层膜厚变化对换能器损耗-频率特性曲线的影响

3 工艺验证和结果分析

3.1 镀膜后附着力测试

金属膜沉积和键合均在RH-500真空镀膜键合机中完成。镀膜前对晶体和换能器表面进行了等离子体清洗,可以去除基底残留的有机物,提高基片和膜层间的结合力。Cr和Au膜层使用磁控溅射工艺制备,Sn膜层使用热蒸发工艺制备。

在晶体上分别镀制Cr金属层、Au过渡层和Sn焊接层,其中,Au膜厚取200 nm,Sn膜厚取低频膜厚5 000 nm。镀膜后不作键合,取出表面带有金属膜层的器件,将粘接强度大于3 N/cm²的3M胶带紧贴换能器表面,沿垂直方向迅速拉起,重复拉力测试10次后,膜层无脱落,对比第1节的测试结果可以证明,增加过渡层能提高键合层的附着力。

3.2 金属膜沉积和键合

镀膜和键合优化后主要工艺参数如表3所示。

表3 镀膜和键合参数

镀膜参数	材料	基片温度/°C	沉积速率/(nm·s ⁻¹)	膜厚/nm
	Cr	98	2.1	50
Au	103	1.5	200	
Sn	106	7.0	5 000	

键合参数	压力/MPa	保压时间/min
	1, 2	60

3.3 键合后附着力测试

使用上述工艺对换能器和声光晶体进行键合后,将粘接强度大于3 N/cm²的3M胶带紧贴换能器表面,沿垂直方向迅速拉起,重复10次,低频器件的换能器和膜层没有脱落,如图8所示。测试结果表明,增加金属过渡层可以提高换能器和金属膜系在声光晶体上的附着力。

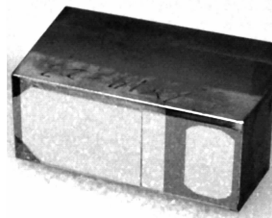


图8 增加过渡层后通过拉力测试

3.4 衍射效率测试

分别测试了不加过渡层和增加过渡层的AOTF在1 470~2 300 nm(低频)的衍射效率,如表4所示,增加过渡层后衍射效率提高了2%~8%。

表4 增加过渡层前、后衍射效率对比

衍射波长/nm	1 470	1 599.999	1 700	1 799.999	1 899.999	2 000.001	2 099.998	2 199.999	2 300.001
衍射效率 (不加过渡层)	0.296 8	0.203 2	0.197 6	0.239 2	0.256 4	0.278 6	0.293 4	0.321 4	0.335 2
衍射效率 (增加过渡层)	0.318 4	0.245 7	0.230 7	0.251 9	0.289 2	0.308 0	0.328 2	0.365 4	0.375 7

3.5 结果分析

上述测试结果和第2节中热应力分布和声阻抗匹配的理论计算相吻合。当过渡层 Au 膜厚取 200 nm 时,理论上键合层和声光晶体间的热应力为 -0.613 MPa,接近高频段的界面热应力水平,能够保证膜层的附着强度;另外,由图7可见,当过渡层 Au 膜厚取 200 nm 时,频率响应的 3 dB 带宽增加,换能器最低损耗由 0.63 dB(无过渡层)下降到 0.32 dB(有过渡层)。在输入功率不变的情况下,换能器损耗降低必然会提升器件的衍射效率。因此,增加过渡层不会影响器件的声阻抗匹配。

4 结束语

针对 AOTF 在键合后出现的附着力差的问题,通过热应力理论计算了键合层各界面间的热应力,以及膜厚变化对应力分布和换能器损耗的影响,提出采用增加金属过渡层的方法降低膜层应力,提高键合层附着力。通过工艺验证和结果分析,增加金属过渡层可以提高换能器和键合层在声光晶体上的附着力,同时对器件性能有一定提升。

参考文献:

- [1] 赵慧洁,周鹏威,张颖,等.基于胶合棱镜的 AOTF 成像光谱仪横向色差校正[J].光谱学与光谱分析,2013,33(10):2869-2874.
- [2] 赵慧洁,程宣,张颖.用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪[J].光学精密工程,2012,20(9):1945-1952.
- [3] 黎俊杰,阙大顺.红外声光可调滤光器的研究[J].光学工程,1989(5):1-13.
- [4] 黄庚辰,赵国珍,戴元超,等. TeO_2 声光可调滤光器[J].无机材料学报,1986(4):14-22.
- [5] WANG Jianyu, HE Zhiping, SHU Rong. Design and application of spaceborne imaging spectrometer based on acoustooptical tunable filter (AOTF) [C]//Incheon, Republic of Korea: SPIE, 2010: 7857.
- [6] GEORGIEV G, GLENAR D A, HILLMAN J J. Spectral characterization of acoustooptical filters used in imaging spectroscopy[J]. Applied Optics, 2002, 41(1): 209-217.
- [7] 许洪,王向军.多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J].红外激光与工程,2007,36(1):13-17.