

## ITO 材料在减反射膜设计中的应用\*

徐 颖 高劲松 王笑夷 陈 红 王彤彤

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学技术研究中心, 长春 130022)

**摘 要** 改变 ITO 材料通常作为透明导电膜单独使用的状况, 将其作为减反射膜系中的一层, 能够在很大程度上增加 ITO 透明导电膜在可见光部分的透过率. 通过使用将 ITO 材料置于膜系的内层和最外层两类不同的设计思想, 可以使 ITO 透明导电膜达到相当优良的应用效果. 使用低压反应离子镀方法制备了设计的两类减反射膜系, 实验证明, 膜层在可见光部分的透过率显著提高, 剩余反射率明显下降, 并得到了平均透过率为 95.83%, 最高透过率达到 97.26%, 方块电阻为 13.2~24.6 $\Omega/\square$  的试验结果.

**关键词** ITO 透明导电膜, 低压反应离子镀, 方块电阻, 减反射膜

**中图分类号** O484; TN304 **文献标识码** A

## 0 引言

ITO(即:氧化铟锡)透明导电膜属于 N 型氧缺陷型半导体材料, 载流子浓度约为  $10^{20} \sim 10^{21}$  数量级, 电阻率为  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , 禁带宽度为 3.5~4 eV, 可见光部分的吸收小, 且具有高可见光透过率、中远红外波段优良的红外反射性能及微波衰减性能. ITO 透明导电薄膜因其出色的光电性能成为了光电器件应用领域非常重要的光学元件<sup>[1~9]</sup>.

ITO 材料长期以来都是以单层膜的形式作为透明导电膜直接使用, 但是其在可见光部分的平均透过率很低, 一般都低于 90%, 剩余反射率就显得很高, 影响了在显示和电磁屏蔽等方面的应用效果<sup>[10]</sup>. 如果能在可见光部分的透过率有突破性的提高, 将会使 ITO 透明导电膜的应用更加广泛.

本文通过将 ITO 材料作为减反射膜系中的一层, 并分别将其置于膜系的内层或最外层的设计思想, 可以使 ITO 透明导电膜达到相当优良的应用效果. 由于要求多层膜的制备, 实验使用低压反应离子镀方法制备设计的减反射膜, 结果发现设计的含有 ITO 材料的减反射薄膜可以大幅提高 ITO 透明导电膜在可见光部分的透过率.

## 1 膜系设计

ITO 材料在可见光部分的平均折射率约为 2.0 左右, 与其他可见光区常用的镀膜材料相比, 吸收较大. 制备 ITO 单层膜时, 只有将膜层的光学厚度设计为  $1/2$  中心波长的整数倍时, 才能达到最佳的透过效果, 但是此时的可见光区透过率仍然很低, 见图 1 曲线 a.

最大限度地提高 ITO 透明导电膜的可见光透过率、降低其方块电阻, 一直以来都是 ITO 透明导

电膜研究领域追求的目标. 现有的研究大多集中于改变膜层的制备方法、工艺参数以及退火条件等来改善透明导电膜光电性能, 但都没有从根本上改变 ITO 材料本身与玻璃基底的干涉条件, 所以无法进一步提高可见光部分透过率.

如果将 ITO 材料作为膜系设计中的一层, 与其他材料共同构成减反射膜系, 就能从根本上改变 ITO 透明导电膜与玻璃基底之间的干涉条件, 提高膜系的可见光透过率.

从该思想出发, 根据 ITO 透明导电膜的不同应用, 设计了两类减反射膜系. 首先, 由于 ITO 材料的折射率较高, 可以与适当的低折射率材料进行折射率匹配, 构成减反射膜系. 此时的 ITO 材料置于膜系的内层, 可以在电磁屏蔽以及要求低红外发射率等器件中应用; 另外, 将 ITO 材料置于膜系的最外层, 来满足显示器件、触摸屏等透明电极的透明导电功能, 但此时必须要找到合适折射率的材料与基底匹配, 使 ITO 材料作为底折射率材料置于膜系中以构成减反射膜系.

膜系设计包括: ITO 材料置于膜系的内层和 ITO 材料置于最外层两部分. 使用 Essential Macleod 膜系设计软件进行设计, 膜层厚度均采用光学厚度表示, 中心波长为 550 nm, 材料折射率和消光系数由实验结果计算求得. 设计时仅考虑可见光部分的透过率, 方块电阻的测量待实验后进行.

## 1.1 ITO 材料置于内层的设计

低折射率材料选择最常用的  $\text{SiO}_2$ , 将  $\text{SiO}_2$ 、ITO 与 K9 玻璃基底组合构成简单的两层增透膜系. 膜系的设计见表 1 中 b, 膜层由靠近基底一侧开始顺序编号; 设计曲线见图中的曲线 1b.

表 1 和图 1 可看出在 ITO 薄膜外层镀制  $\text{SiO}_2$  膜层后, 与曲线 a 相比, 不仅可见光(400~700 nm)透过率显著提高, 均达到了 94% 以上, 最高达到 98.05%, 平均透过率在 96.08%, 剩余反射率也明

\* 国防科工委 MKPT-01-111(ZD) 资助项目

Tel: 0431-5261561 Email: bessie-7811@tom.com

收稿日期: 2005-01-03

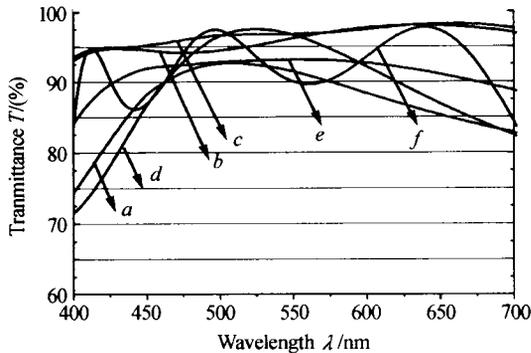


图1 ITO材料作为减反射材料置于膜系中的不同设计曲线(a,b,c,d,e,f对应数据分别列于表1中)

Fig.1 Antireflection design using ITO material

表1 实验中镀膜基片的导电性与可见光的光谱数据

编号	膜系结构	设计最高透过率/(%)	设计平均透过率/(%)	测量最高透过率/(%)	测量平均透过率/(%)	方块电阻/( $\Omega/\square$ )
a	K9/1.8B/Air	92.65	87.55	91.73	87.11	13.2
b	K9/1.76B0.88L/Air	98.05	96.08	97.26	95.83	14.6
c	K9/2.72A1.76B0.92L/Air	98.8	96.85	98.1	96.3	13.9
d	K9/1.16H0.76B/Air	97.5	89.37	96.40	88.28	24.6
e	K9/0.88M0.89H0.86B/Air	93.17	91.53	92.61	91	21.3
f	K9/1.76H1.78L0.92H0.87B/Air	97.73	92.60	96.59	90.9	22.0

其中:各字母所代表的材料如下,B:ITO, L:SiO<sub>2</sub>, A:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, M:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H:TiO<sub>2</sub>;  
各材料前的系数表示1/4中心波长的倍数

射膜系只能在单波长处给出很高的透过率,在可见光的边缘处,明显低于单层ITO薄膜的透过率值,就是说出现了比较窄的V形光谱<sup>[10]</sup>.

光学薄膜的膜系特征矩阵得出的反射率计算公式<sup>[11]</sup>如下

$$R = \left( \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right) \left( \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right)^*$$

式中,空气中 $n_0 = 1$

如果可以使公式中的Y接近1,也就是说构成膜系的材料之间最后的组合导纳接近于1的话,就可以很好地实现膜层的减反射效果.由麦克劳德导纳图解的原理,分析得出如果使用一个连接层作为K9玻璃和TiO<sub>2</sub>膜层之间的折射率过渡的话,会产生很好的折射率匹配效果.于是选择了550nm处的折射率为1.76的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>材料,设计的膜系见表1和图1中的e.可以看出,整个可见光光谱的透过率与曲线a相比均得到了明显改善,最高透过率为93.17%,平均为91.53%,平均剩余反射率为6%左右.

按照同样的方法设计了f曲线,也得到了很好的结果.

文献[12]报导了ITO在外层的设计,只有膜层厚度接近0.03倍中心波长左右的光学厚度时才可以实现可见光的减反射效果,但此时ITO膜层很薄,会导致膜层的电阻很大,几乎无法在实际中应用.

本文设计克服了文献[12]中ITO作为最外层

显下降,均低于2.6%,平均为1.3%.设计的结果在整个光谱范围内都相当好.

将Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为ITO材料与基底之间的过渡层设计的三层减反射膜,得到了更好的透过率曲线,见图1中曲线c,设计结果见表1中c.

## 1.2 ITO材料置于最外层的设计

由于ITO材料的折射率约为2.0,如果要对基底形成增透膜系就要选择更高的折射率材料与之匹配.

首先,考虑两层膜的情况.选择折射率比ITO更高的TiO<sub>2</sub>作为膜系中的高折射率材料,其在550nm处的折射率为2.27.将ITO, TiO<sub>2</sub>及K9玻璃构成膜系,结果见图1中的d曲线.可以看出两层减反

时厚度很薄的缺点,膜层光学厚度接近1/4中心波长,制备方便,且不会对电阻产生很大影响,并可以实现很好的减反射功能.

## 2 实验结果

实验使用的是北京仪器厂的ZZSX800型镀膜机,设备内配有DDY-120/60低压等离子源,蒸发方式为电子束蒸发,即:使用低压反应离子镀方法进行组合薄膜的沉积. ITO材料为In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与SnO<sub>2</sub>按照9:1进行混合的镀膜材料,基底材料为K9玻璃,基片温度为300℃,沉积速率为0.5nm/s,通入氧气流量为25sccm,氩气流量为45sccm.镀膜前真空度在7~8×10<sup>-2</sup>Pa左右.实验使用INFICON公司的IC/5石英晶体控制仪控制材料的蒸发速率和膜层厚度.实验数据的测试包括:四探针测试仪测量ITO的方块电阻,其中,对于ITO材料在内层的膜系,方块电阻值是在ITO材料制备结束后,先取出测试,然后在同样的条件下接着镀制外层材料得到的;Perkin Elmer公司的Lambda 900分光光度计测量膜层的透过率光谱.

表1分别列出了的实验结果,可以看出,通过设计含有ITO材料的减反射膜可以明显改善ITO透明导电膜的光电性能,提高了可见光区的透过率,且方块电阻均低于25 $\Omega/\square$ .图2为对应六组设计的实验测试曲线.

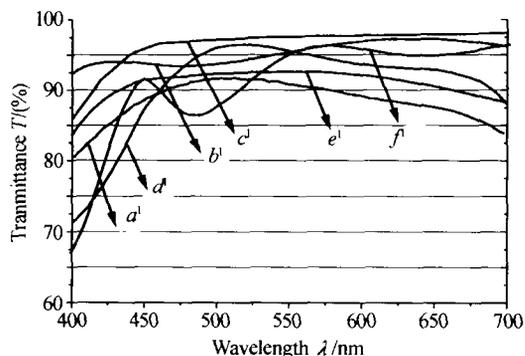


图 2 ITO 材料作为减反射材料对应设计的不同实验曲线 ( $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ,  $d'$ ,  $e'$ ,  $f'$  对应图 1 中  $a, b, c, d, e, f$ )  
Fig. 2 Experiments according to design using ITO material

### 3 结论

通过将 ITO 材料作为其中一层置于减反射膜系中,解决了 ITO 透明导电膜在可见光透过率普遍较低的问题. 使用低压反应离子镀方法制备了含有 ITO 材料的多层减反射膜,得到了可见光平均透过率为 95.83%,最高透过率为 97.26%,方块电阻在  $13.2 \sim 24.6 \Omega/\square$  的透明导电膜. 该减反射膜在很大程度上缓解了透明导电膜的导电性与透明性之间的矛盾,使 ITO 透明导电膜在其应用领域里具有更有益的实用价值和应用前景.

#### 参考文献

- 1 Qiao Z, Latz R, Mergel D. Thickness dependence of  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  film growth. *Thin Solid Films*, 2004, **466**(1-2): 250~258
- 2 Antony A A, Nisha M, Manoj R, et al. Influence of target to substrate spacing on the properties of ITO thin films. *Applied Surface Science*, 2004, **225**: (1-2): 294~301
- 3 Chopra K L, Major S, Pandya D K. Transparent conductors-A status review. *Thin Solid Films*, 1983, **102**(1): 1~46

- 4 周平,黄昱勇,林宇翔,等. 两种方法制备 ITO 薄膜的红外特性分析. *光子学报*, 2002, **31**(8): 985~988  
Zhou P, Huang Y Y, Lin Y X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 985~988
- 5 周引穗,王俊,杨晓东,等. 透光导电 ITO 膜的制备及光电特性的研究. *光子学报*, 2002, **31**(9): 1077~1080  
Zhou Y S, Wang J, Yang X D, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9): 1077~1080
- 6 Guenther K H. Recent progress in optical coating technology: low voltage ion plating deposition. *Proc SPIE*, 1990, **1270**: 211~221
- 7 张诚,卢维强,王涌天. 基于宽光谱监控的光学薄膜自动控制技术. *光子学报*, 2004, **33**(9): 1136~1139  
Zhang C, Lu W Q, Wang Y T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1136~1139
- 8 孔伟金,吴福金,郝殿中. 窄带薄膜偏光分束镜的研制及其性能测试. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1373~1376  
Kong W J, Wu F J, Hao D Z. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1373~1376
- 9 张德恺,胡晓云,李婷,等.  $\text{TiO}_2$  纳米薄膜微观结构及光学性能研究. *光子学报*, 2004, **33**(8): 982~985  
Zhang D K, Hu X Y, Li T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 982~985
- 10 贾克辉,黄建兵,徐颖,等. 霍尔源用于光学镀膜. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1228~1230  
Jia K H, Huang J B, Xu Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1228~1230
- 12 Macleod H A. *Thin Film Optical Filters*, 2<sup>nd</sup> ed. U. K., Bristol: Adam Hilger Ltd Adam Hilger, 1986. 35
- 13 Wang R. Design of antireflective Coating Using Indium Tin Oxide Film Prepared by Ion Assisted Deposition. 1999 Society of Vacuum Coaters, 42<sup>nd</sup> Annual Technical Conference Proceedings, Chicago IL, 246~249

## Antireflective Thin Film Design Using ITO Material

Xu Ying, Gao Jinsong, Wang Xiaoyi, Chen Hong, Wang Tongtong

Optical Technology and Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022

Received date: 2005-01-03

**Abstract** Usually, ITO transparent conductive thin film is made up of only one layer of ITO material with the mean transmittance of nearly 90% in the visible region of the spectrum. The results of using two different new design to produce antireflective film with ITO and deposition them by RLVIP technique are discussed. The mean optical transmittance of thin film of  $T = 95.83\%$ , the maximum transmittance of  $T_{\max} = 97.26\%$  and the sheet resistance of  $R_{\square} = 13.2 \sim 24.6 \Omega/\square$  are achieved by the design in experiments.

**Keywords** ITO transparent conductive film; Reactive low voltage ion plating; Sheet Resistance; Antireflective film



**Xu Ying** was born in Jan. 1978. She received her B. S. degree from Changchun University of Science and Technology in 2000, and studies in Chinese Academy, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics for her doctor degree. Now she is doing research work in the field of optical thin film.