

## 光电子封装中新型激光焊接吸收薄膜的设计\*

江绍基, 李伟多, 金涛, 汪河洲

(中山大学 光电子技术与材料国家重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:**设计了一种用于对  $\text{SiO}_2$ 、Si 和  $\text{LiNbO}_3$  等材料进行激光焊接的吸收薄膜。这种“金属-介质-金属”的三层吸收薄膜减少了夹在透明母料之间的焊料表面对 Nd:YAG 激光束的反射。该设计使激光能量在实验中的实际吸收率超过 99%。这种吸收膜与焊料层的结合使激光能更有效地转化为热能, 减少了激光穿透母料的能量, 这样也就减少了因为激光的透射而导致母料损伤的可能性, 使激光能量得到更有效的利用。同时, 焊接成品的力学性能也得到了有效提高。

**关键词:**吸收薄膜; 激光焊接; 光波导; 光学器件; MEMS

**中图分类号:**TG456.7; O484 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)05-0505-06

## Design of novel absorptive thin film for laser welding in optoelectronic device capsulation\*

JIANG Shao-ji, LI Wei-duo, JIN Tao, WANG He-zhou

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** A kind of absorptive thin film was designed and used in laser welding of  $\text{SiO}_2$ , Si and  $\text{LiNbO}_3$ . This absorptive thin film of three layer metal-dielectric-metal structure is designed for further reducing the high reflectance of the Nd:YAG laser beam on the surface of the thin layer that is utilized as solder between the transparent parent materials. The actual absorption of laser energy in experiment exceeds 99%. This combination of absorber and solder transformed the laser energy into heat efficiently and decreased the minimum necessary incident laser power transmitting through the transparent parent materials. As a result, the damage of the parent materials, which is suffered from laser transmission, was avoided; On the other hand, mechanical stability of the welded materials had been improved. Experiment shows the difference between welding with and without the absorptive thin film.

**Key words:** Absorptive thin films; Laser welding; Wave-guide; Optical components; MEMS

### 0 引言

经广泛地应用于光波导材料 (如  $\text{SiO}_2$ 、Si 和  $\text{LiNbO}_3$ ) 的焊接中。本文最初的目的是在金属基底上将  $\text{LiNbO}_3$  光波导和 V 形槽组相合。一般使用胶粘方法。激光焊接是光电子器件封装的一项关键技术, 已

收稿日期: 2005-06-23; 修订日期: 2005-09-18

\* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2003AA311022); 广州市 2003 年科技计划攻关资助项目 (2004Z3-D0331)

作者简介: 江绍基 (1959-), 男, 广东广州人, 副所长, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学薄膜与光学封装。

虽然胶粘是一种很方便的方法,但是其过高的膨胀系数和过短的寿命是很大的缺陷。用铜与铜作为结合焊料的连接技术被广泛研究,并证明是一种非常有效的光电子器件连接技术<sup>[1-3]</sup>。在这些例子中,整个器件被放置在加热管中,并被加热到焊料熔融的温度。整个过程需持续几十分钟。

Cheng 等人用 4 μm 厚的金属铜层作为结合材料,使用波长为 355 nm 的纳秒激光将玻璃和硅连接起来<sup>[4]</sup>。在这个例子中,铜层被事先放置在硅基底上,然后放置 pyrex 玻璃,使铜层夹在两种材料中间,激光束穿过玻璃并到达铜层。大多数的紫外激光能量被铜层吸收,并且转换为热量。受到适量激光能量辐射而被加热的铜融化并将玻璃和硅连接在一起。利用激光进行加热,整个过程所持续的时间降到了几个毫秒,并且加热区域也得到了限制,即这种技术更适合精密加工。

然而,在工业激光焊接中,Nd:YAG 激光在 1.06 μm 波长处的应用更加广泛。我们希望能够使用 1.06 μm 波长的激光将硅片、LiNbO<sub>3</sub> 光波导以及其他光学器件连接到硅基底上。与 355 nm 激光不同,1.06 μm 波长的激光在大多数金属与介质之间的表面反射率都很高,这也就意味着低吸收以及较高的入射激光功率。如图 1 所示,低吸收率与高入射激光功率将会导致母料损伤危险系数的增加。其中,(a)激光强度与时间的函数关系;(b)反射率与时间的函数关系;(c)温度与时间的函数关系。又如图 2 所示,为了防止激光

能量的浪费、减少母料的损伤和增加操作的安全系数,设计了一种用于激光焊接领域的吸收体<sup>[1]</sup>。其中,(a)激光强度与时间的函数关系;(b)反射率与时间的函数关系;(c)温度与时间的函数关系。

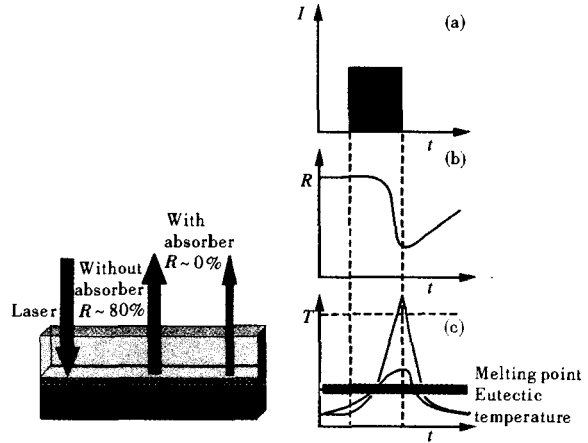


图 2 低反射率导致能量的节省以及对母料损伤的减少  
Fig.2 Low reflectance leads to saving energy & low potential risk of cracking parent material

吸收体广泛应用于太阳能采集装置<sup>[5]</sup>、红外辐射吸收装置<sup>[6,7]</sup>、弱光吸收装置<sup>[8]</sup>等。吸收体可以是单层石墨膜、硅膜(可见光波段)、金属膜、反射率可变的陶瓷薄膜以及光学干涉薄膜。在所考虑的情况中,需要符合以下条件:

- (1) 对 1.06 μm 激光有较高吸收,并且容易使用;
- (2) 具有紧凑的结构和高强度;
- (3) 与焊接金属的附着性要好。

采用金属-介质-金属的模式,其中金属为 Ni 或者 Cr,介质为 SiO<sub>2</sub>,这种结构可以满足上述条件,因为 Ni 或者 Cr 对玻璃和大多数金属都有较好的附着力<sup>[9]</sup>,并且该结构可以方便地利用图表和矩阵进行设计,亦可以用电子枪蒸发的方法确保其牢固性,以下将分步骤详细介绍。最后,实验证实了其有效性。

### 1 理论设计

#### 1.1 吸收薄膜设计

有关吸收膜的设计方法有多种。J. A. Dobrowolski 等人针对吸收膜开展的研究中,对修改 F-P 腔方法、反射率降低堆垛方法和导纳法进行了研究<sup>[9]</sup>。其中导纳法在参考文献[8]和[10]中也有详细的论述。

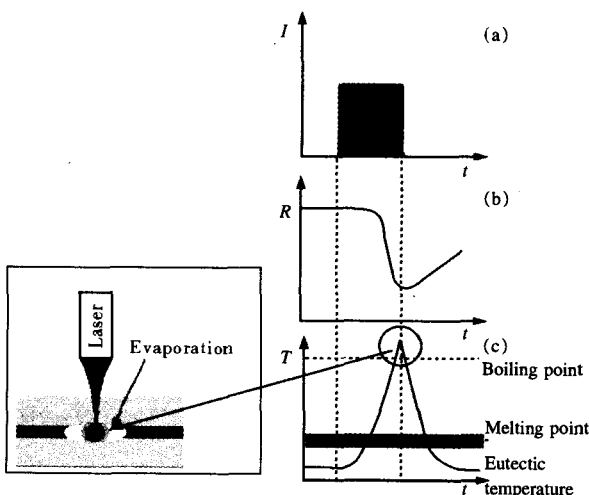


图 1 高反射率导致能量损失以及对母料的损伤  
Fig.1 High reflectance leads to energy lose & potential crack of parent material

另外一些方法,如散射形式法、包括参考文献[6]所用的方法也都有使用。文中,采用导纳法设计吸收体,然后分析其中心波长漂移以及反射光谱。

这种吸收体对 1.06 μm 波长的激光具有较高吸收。我们分析了如图 3 所示的金属-介质-金属的结构。玻璃基底厚度为 1 mm。首先将透明 Ni 膜镀制在玻璃上,然后镀制 SiO<sub>2</sub> 介质层,最后是厚 Cr 层。透射激光穿透玻璃并且被吸收体吸收。吸收体吸收激光后产生热量并传导至焊接材料层。在实际应用中,因为可以方便、准确地测量半透明 Ni 膜的光学常数,我们用 Ni 膜作为吸收体的半透明层。但是,在参考文献[11]中,只提供了 400~800 nm 波段的 Ni 膜的光学参数,用相似的方法得到了近红外波段的 Ni 膜光学参数。另外需要使用的金属层是厚 Cr 膜,厚膜的光学参数同块材的相近。这层膜的厚度为几十纳米。在两层金属膜之间,是 SiO<sub>2</sub> 介质层。激光束在两层金属层之间反射,最终由于在厚 Cr 层中的指数衰减而能量为零。

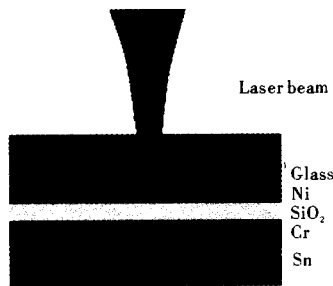


图3 吸收体整体结构

Fig.3 Whole structure of the absorber

### 1.2 导纳轨迹与导纳图理论

对于这个吸收体,因为在膜系底部使用了厚 Cr 膜,透射波将迅速下降为零。根据吸收率  $A$ , 反射率  $R$  和透射率  $T$  的关系可表示为:

$$A+T+R=1 \tag{1}$$

得到,

$$A=1-R \quad (T \text{ 近似为零}) \tag{2}$$

因此,当反射消除的时候,吸收最大。

根据 Macleod<sup>[12]</sup>的导纳轨迹理论,起始导纳  $Y_0$  是基底导纳,在所设计的这个结构中,厚焊料层即为光束入射方向上的最后一层。从理论上来说,导纳图起始于厚焊料层。但是,由于与厚焊料层邻接的薄膜是

吸收膜的底层厚金属膜,光能量基本在此厚金属膜内消耗殆尽,因此焊料层的导纳实际上对薄膜性能的影响可以忽略,即可以任意设定基片的导纳。为了简单起见,可以认为起始导纳为空气的导纳 1。参考波长为 1.06 μm。图 4 为该结构的导纳图。导纳轨迹起始于空气导纳  $Y_0$  并且结束于“结束导纳” $Y_E$ 。Ni 层厚度和 SiO<sub>2</sub> 层厚度要求都比较苛刻,因此需要选择  $Y_E$  与玻璃导纳的等价值。

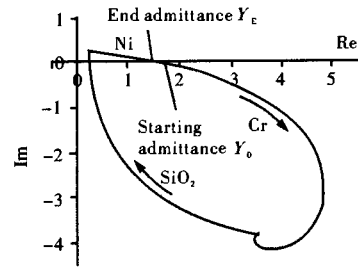


图4 吸收体导纳图

Fig.4 Admittance diagram of the absorber

一个更加直观的展示是导纳轨迹,见图 5。它显示了吸收体的反射率是如何随着膜层的镀制而变化的。从图中可以看出,反射系数轨迹结束于  $0.0047+0.00676i$ ,并且反射率不到  $10^{-4}$ 。当吸收率很高时反射率非常低。

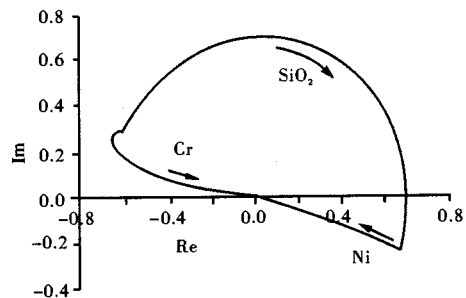


图5 吸收体的导纳轨迹

Fig.5 Admittance circle diagram of the absorber

### 1.3 反射光谱和敏感度分析

在以上分析中,集中讨论了单波长 1.06 μm,并且将吸收体当作一个理想模型而忽略了镀膜过程中引入的误差。在实际应用中,中心波长和最小反射率随各层膜厚的变化十分敏感,对透明膜层 Ni 厚度的变化尤其敏感。按照参考文献[12]的详细计算,并画出反射率光谱图,就可以得到中心波长漂移和最小反

射率变化的全部数据。图中每条曲线上标出的数值分别是 Ni 膜和 SiO<sub>2</sub> 膜的厚度。图 6(a) 是吸收膜反射谱随着超薄 Ni 金属膜的厚度改变而改变的一组曲线。从图中可以看出, 超薄 Ni 金属膜厚度的改变致使中心波长漂移的同时也影响了反射率。当超薄 Ni 金属膜的厚度从 20 nm 逐渐变小到 16 nm 或增大到 24 nm 时, 中心波长都有约 10 nm 的漂移, 在 1.06 μm 波长处的反射值从 10<sup>-4</sup> 上升到 10<sup>-2</sup>。同样, 相似的现象也发生在 SiO<sub>2</sub> 膜层, SiO<sub>2</sub> 膜层的厚度漂移对中心波长的影响如图 6(b) 所示。但不同的是, SiO<sub>2</sub> 的厚度变化对中心波长和最小反射率的影响并没有 Ni 膜层的大; 而且 SiO<sub>2</sub> 主要影响的是吸收膜的中心波长位置。因此, 多层膜焊料镀制过程中控制好超薄 Ni 金属膜的厚度是最关键的因素, 同时, 要通过调整 SiO<sub>2</sub> 膜的厚度来补偿 Ni 金属膜的厚度偏差。

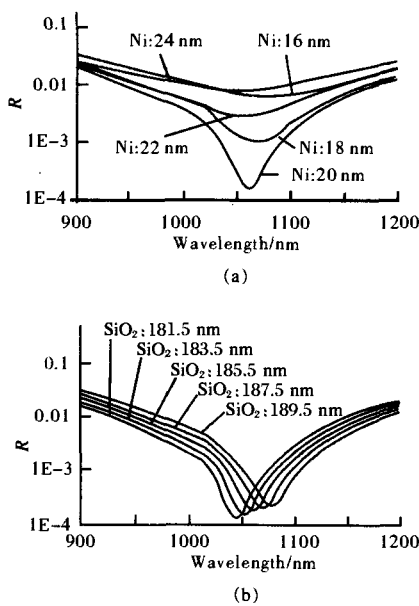


图 6 Ni 与 SiO<sub>2</sub> 膜层的厚度漂移对中心波长的影响

Fig.6 Influence of the thickness deviation of the nickel and SiO<sub>2</sub> to the central wavelength

实际上, 两个膜层的厚度偏差致使 1.06 μm 波长处的反射率值的变化都只局限于  $R < 1\%$  的范围。只要吸收膜在 1.06 μm 波长处的反射率值低于 0.01, 那么在焊接工艺上已经是可用并且是性能良好的, 因为反射率低于 0.01, 意味着吸收率高于 99%, 而 99% 吸收率和 100% 吸收率之间的差距是完全可以忽略的。在薄膜的镀制过程中, 采用光学监控的办法将膜层厚度

控制在几个纳米是完全可以的, 即精确控制吸收膜在 1.06 μm 波长处的反射率值低于 0.01 是完全可行的。

## 2 实验和结论

### 2.1 镀膜和膜厚监控

吸收膜镀制中使用的是 DMDE 450 真空镀膜机。真空度设为 10<sup>-4</sup> Pa。为了能比较准确地监控膜层的厚度, 沉积速率设定约为 0.2 nm/s。考虑到光是从玻璃基底入射吸收膜的, 因此要达到吸收膜的效果, 超薄 Ni 金属膜首先被蒸镀在玻璃基片上。然后是 SiO<sub>2</sub> 膜, 最后是厚的 Cr 膜。另外, 如果要进行焊接实验, 在镀制完 Cr 膜后还需要镀制一层厚的 Sn 膜。膜层的蒸镀过程中使用了光学方法来监控膜层的厚度。可以看到, 吸收膜的各个膜层的镀制顺序与原图所描述的膜层顺序是相反的, 这是因为吸收膜在焊接中光是从玻璃基底入射, 而不是从空气入射。因此不能直接使用监控反射的方法进行膜厚监控, 但是可以换算出膜层镀制过程中的透射率变化来进行监控。由参考文献 [11] 中提到的干涉矩阵方法可得到膜层的干涉矩阵:

$$M_v = \begin{pmatrix} \cos \delta_v & \frac{j}{\eta_v} \sin \delta_v \\ j \eta_v \sin \delta_v & \cos \delta_v \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中  $\delta_v = \frac{2\pi}{\lambda} n_v d_v \cos \theta_v$  是第  $v$  层的相移;  $\eta_v$  是第  $v$  层的特征光学导纳。

薄膜系统的干涉矩阵可以表示为各个膜层的干涉矩阵的乘积:

$$M = \prod M_v \quad (4)$$

薄膜系统的透射率可以通过以下公式推导得出:

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_s \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$T = \left( \frac{4\eta_0 \eta_s}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \right) \quad (6)$$

式中  $\eta_0$  是入射侧的导纳;  $\eta_s$  是衬底一侧的导纳。

对于本文所讨论的吸收膜系统, 参考它的膜层的

实际镀制顺序,  $\eta_0$  是玻璃基底的导纳;  $\eta_s$  是真空的导纳。随着膜层的不断镀制, 可以用公式(3)~(6)计算透射率的变化。从而得到一条监控曲线, 如图7所示。通过监控透射率的变化, 膜层的厚度也得到较准确的控制。

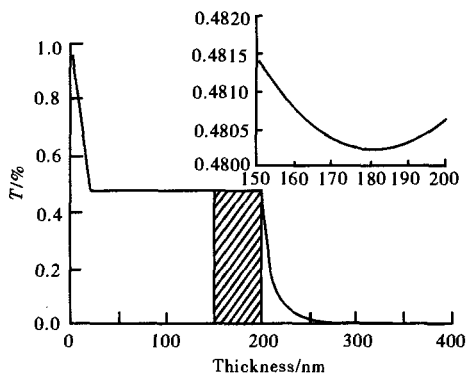


图7 透射率随膜层镀制厚度变化而变化

Fig.7 Transmittance as function of the film being deposited

### 2.2 实验结果

图8是吸收膜的反射谱曲线, 波长范围为800~1300 nm。从图中可以看出, 虽然中心波长偏移到了1050 nm, 但是在1.06  $\mu\text{m}$  波长处的反射率值已经低于0.01。导致这种误差的主要原因是  $\text{SiO}_2$ 。从图7可以看到, 当  $\text{SiO}_2$  的厚度不断增加, 透射率轻微下降到谷底, 随后便缓慢升高一点点。出现这种现象是因为  $\text{SiO}_2$  光学厚度稍微比  $1/4$  波长大一点, 因此要控制这个截止点存在一定的误差。另外, Ni膜镀制的轻微过量也会导致中心波长的漂移。因此, 中心波长由于监控误差而产生偏移。然而, 正如第1.3节分析指出的,  $\text{SiO}_2$  的厚度变化对中心波长的偏移作用比对反射率变化作用更大, 而Ni膜则相反。

为了确认吸收体在激光焊接中的有效性, 做了一个对比实验。实验中准备了两种薄膜样品, 两种样品都是镀制在玻璃基底上。第一组样品只含有一层厚度为  $1 \mu\text{m}$  的厚焊料层, 命名为 No.1, 图9为整个膜层的结构, 其中有一层厚度只有几纳米的薄Cr膜, 用来作透射层。另外一组样品命名为 No.2, 其中吸收体以及厚度为  $1 \mu\text{m}$  的厚焊料层顺序镀制在玻璃表面上。

激光焊接的基本原理是透射焊接原理。如图10

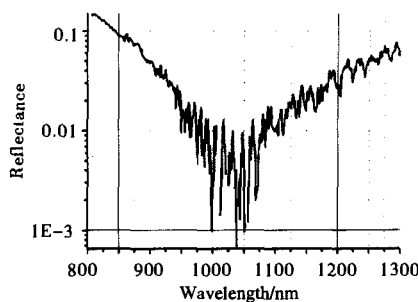


图8 吸收膜反射谱的实验测量曲线(800~1300 nm)

Fig.8 Reflectance spectra of the absorber(wavelength ranges from 800~1300 nm)



图9 No.1样品, 薄Cr层和焊料层顺序镀制在玻璃基底上

Fig.9 #1 specimen Chromium and thin film are deposited sequentially on glass substrate

所示, 激光穿过如玻璃等的透明材料, 最终被焊料所吸收。在这个过程中只有一小部分激光被透明材料吸收, 激光是加热焊料的有效途径。在焊接过程前, 每组样品都要把镀有焊料或多层膜的玻璃基片叠压在一起, 使镀有焊料或多层膜的表面相对贴紧。Hanslaser

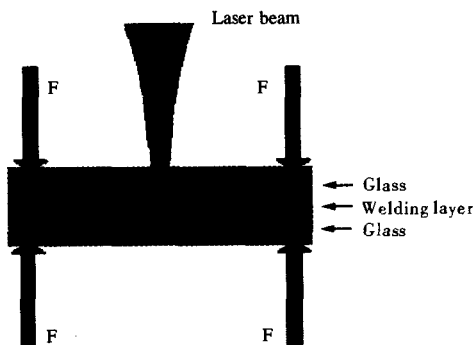


图10 焊接过程简图

Fig.10 Schematic diagram of the welding process

有限公司提供的50 W激光器用于焊接, 工作波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 最大峰值功率为60 W。

在焊接过程中, 设置焊接时间均为1 ms, 但是两组样品所需要的最小脉冲能量以及焊接区域不同。第

一组最小激光脉冲能量是 0.8 J, 焊接区域是 1.9711 mm<sup>2</sup>; 第二组最小激光脉冲能量是 0.5 J, 焊接区域是 4.5216 mm<sup>2</sup>。两组样品的单位面积的脉冲能量比为 3.67。激光利用率在第二组样品中得到了改善。考虑到薄 Cr 透射层的吸收以及焊料内的干涉损失, 只有不到 40% 的激光能量被第一组样品中的焊料所吸收; 在第二组样品中 99% 以上的激光能量都被吸收体吸收。如果焊接层下镀制一层高反射率的金属铜层, 激光利用率将会更显著。

### 3 结 论

设计了一种金属-介质-金属的吸收体结构并解释了其用于透射非损伤激光焊接的可行性。由于使用了该吸收体, 导致了焊料层表面的反射损失有效地下降, 使激光能量被有效吸收利用。因此, 可以使用来焊接的透射激光能量减少, 以防止对透射材料的损伤。在未来的工作中, 我们将会继续研究这种吸收体, 探讨应用于光学器件的激光焊接。

#### 参 考 文 献:

- [1] Tu K N. Cu/Sn interfacial reactions: thin-film case versus bulk case[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1996, 46: 217-223.
- [2] Chin C Lee, CHEN Yi-chia. High temperature tin-copper joints produced at low process temperature for stress reduction [J]. *Thin Solid Films*, 1996, 286: 213-218.
- [3] Chin C Lee, Selah Choe. Fluxless In-Sn bonding process at 140 °C [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, A333: 45-50.
- [4] LUO Cheng, LIN Li-wei. The application of nanosecond-pulsed laser welding technology in MEMS packaging with a shadow mask [J]. *Sensors and Actuators*, 2002, A 97-98: 398-404.
- [5] Yun-zhen CAO, Xing-fang HU. Absorbing film on metal for solar selective surface [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 375: 155-158.
- [6] Vincent T Bly, J Thomas Cox. Infrared absorber for ferroelectric detectors [J]. *Applied Optic*, 1994, 33: 26-30.
- [7] Monzón J J, Sánchez-Soto L L. Optical performance of absorber structures for thermal detectors [J]. *Applied Optic*, 1994, 33: 5137-5141.
- [8] Frédéric Lemarquis, Gérard Marchand. Analytical achromatic design of metal-dielectric absorbers [J]. *Applied Optic*, 1999, 38: 4876-4884.
- [9] Dobrowolski J A, LI Li, Kemp R A. Metal/dielectric transmission interference filters with low reflectance [J]. *Applied Optic*. 1995, 34: 5673-5683.
- [10] ZHENG Yan-fei, Kazuo Kikuchi, Masafumi Yamasaki, et al. Two-layer wideband antireflection coatings with an absorbing layer [J]. *Applied Optics*, 1997, 36: 6335-6338.
- [11] Michel Cathelinaud, Frédéric Lemarquis, Claude Amra. Index determination of opaque and semitransparent metallic films: application to light absorbers [J]. *Applied Optic*, 2002, 41: 2546-2554.
- [12] Macleod H A. *Thin-Film Optical Filter*. 2nd Edition [M]. New York: McGraw-Hill, 1989.

## 书 讯

### 《光学系统设计》简介

《红外与激光工程》编辑部组织翻译、编辑的《光学系统设计》(内部资料)现已出版发行。该书主要内容包括: 基础光学与光学系统技术要求; 光阑、光瞳和其他基本原理; 衍射、像差和像质; 光程差的概念; 几何像差及其消除方法; 玻璃的选择(包括塑料); 球面和非球面; 光学系统的设计型式; 光学设计过程; 计算机性能评价; 高斯光束成像; 红外热成像基础和紫外光学系统; 衍射光学; 照明系统的设计; 性能评价与光学测试; 公差与生产工艺性; 光学加工; 光学设计中的偏振问题; 光学薄膜; 硬件设计问题; 镜头设计优化实例; 光学系统设计中的错误; 经验法则和提示。该书适于光学领域的技术人员使用, 也可作为大学教科书及研究生参考书, 中译本 301 页, 定价 240 元。英文简装本, 定价 220 元。有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系。联系电话: (022) 23666400; (022) 23009840; 通信地址: 天津市 225 信箱 32 分箱 (300192)。