

# 硅薄膜的短波红外光学特性和 1.30 $\mu\text{m}$ 带通滤光片

段微波<sup>1</sup> 庄秋慧<sup>2</sup> 李大琪<sup>1</sup> 陈刚<sup>1</sup> 余德明<sup>1</sup> 刘定权<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083  
<sup>2</sup> 重庆理工大学电子信息与自动化学院, 重庆 400050)

**摘要** 在短波红外区域(1~3  $\mu\text{m}$ ), 硅薄膜材料因其具有折射率高、透明性好、膜层应力易匹配等诸多优点而得到广泛应用。基于改进后的 Sellmeier 模型拟合出了制备的硅薄膜的短波红外光学特性, 以此为基础, 选用硅和二氧化硅两种材料, 设计并制备出中心波长在 1.30  $\mu\text{m}$ , 相对带宽 2.46% 的带通滤光片。利用了硅薄膜在波长小于 1.0  $\mu\text{m}$  波段的吸收特性较好地扩展了带外截止范围。测量结果表明, 具有 2 个谐振腔的带通滤光片峰值透射率达到 85.8%, 半功率带宽控制在约 32 nm, 带外截止范围覆盖了波长小于 1.75  $\mu\text{m}$  的光谱区域。

**关键词** 薄膜; 光学特性; 带通滤光片; 短波红外

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1031001

## Optical Characteristics of Silicon Thin Film in Short-Wave Infrared Band and 1.30 $\mu\text{m}$ Bandpass Optical Filter

Duan Weibo<sup>1</sup> Zhuang Qiuhui<sup>2</sup> Li Daqi<sup>1</sup> Chen Gang<sup>1</sup> Yu Deming<sup>1</sup> Liu Dingquan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China  
<sup>2</sup> Institute of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

**Abstract** Silicon material can be used as optical thin films in short-wave infrared (1~3  $\mu\text{m}$ ) range, because of its characteristics such as high refractive index, good transparence, easy to match with other layers. Using advanced Sellmeier model, the optical characteristics of silicon thin films have been fitted and calculated. Based on the result, silicon and silicon dioxide are selected as layer materials, and a bandpass filter is designed and fabricated. The center wavelength is about 1.30  $\mu\text{m}$ ; the filter with 2 cavities has 32 nm bandwidth and 85.8% transparence at the peak. Combining silicon layers' high absorption at wavelengths smaller than 1.0  $\mu\text{m}$ , the cut-off range can cover the spectrum range smaller than 1.75  $\mu\text{m}$ .

**Key words** thin films; optical characteristics; bandpass optical filter; short-wave infrared

**OCIS codes** 310.6860; 230.7408

## 1 引言

光学薄膜元件的工作波段是薄膜材料选择的重要依据。光学薄膜材料的制备工艺是保证良好薄膜性能的关键因素。从薄膜沉积前的膜料状态、基片清洗工艺、沉积方法选择, 到薄膜沉积过程中各种工艺参数如沉积速率、衬底温度、背景气体压强等都对

薄膜性能有着重要的影响<sup>[1,2]</sup>。

短波红外区域, 特别是波长小于 1.8  $\mu\text{m}$  的红外波段, 是可见和红外波段的过渡区域。中长波红外区域常用的高折射率材料如锗(Ge)、碲化铅(PbTe)等在该区域并不透明。可见光常用的高折射率材料如氧化钛(TiO<sub>2</sub>)、氧化钽(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、氧化铌

收稿日期: 2012-03-30; 收到修改稿日期: 2012-05-08

作者简介: 段微波(1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学薄膜的制备及应用等方面的研究。

E-mail: dwbuser@sina.com

(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)等虽然在该波段可以使用,但由于折射率偏低而导致膜层数量居高不下,且可见光波段的带外抑制很难处理。硅薄膜(Si)材料克服了以上两类材料在短波红外波段的缺点;作为可见与红外波段过渡区域的高折射率材料,其光学特性的研究具有明确的工程应用价值。

电子束蒸发制备的非晶硅薄膜在短波红外区域有一定的色散和吸收,且对基片温度、蒸发速率、真空度等工艺参数有较高的敏感性<sup>[3]</sup>。研究材料的特性,优化制备工艺并拟合出材料的光学常数,是材料工程应用的关键。本文在不同的工艺条件下制备出薄膜样品,通过光谱测试和光学常数拟合,确定工艺条件。在该工艺条件下,选用硅和二氧化硅两种材料,以蓝宝石为基底,设计并制备出中心波长约为1.3 μm,相对带宽2.46%的带通滤光片。

## 2 薄膜材料实验

### 2.1 实验装置

薄膜沉积实验在德国 Leybold 公司生产的 LAB900 型真空镀膜机上进行。该设备的极限真空可达  $2 \times 10^{-4}$  Pa。蒸发源为两把 e 型电子枪和两组阻蒸电极。两把电子枪的高压均为 10 kV,可根据需要自由选择单穴或多穴坩埚;阻蒸电极的电压为 6 V,电流 0~600 A 可调。工装夹具为磁流体密封高速旋转夹具,转速连续可调,最高可达 800 rad/min。膜厚监控采用 4 探头 IC/5 石英晶振加透、反射式光学直接监控,并配有 OMS3000 自动控制系统。根据材料特性及后续带通滤光片制备需要,选择透射式光学直接监控的方法。

### 2.2 实验条件与结果分析

在 Si 薄膜短波吸收限附近,离子束辅助沉积虽然能够增加膜层的牢固度,提高材料的堆积密度,但同时会增大 Si 材料的吸收<sup>[4]</sup>,因此在制备 Si 薄膜的过程中不采用离子束辅助沉积工艺。在基板温度为 250 °C 的条件下,以蓝宝石为基底制备单层 Si 膜样品,工艺参数如表 1 所示。

表 1 单层 Si 薄膜样品的沉积参数

Table 1 Deposition parameters of single Si layer film

Evaporation rate/(nm/s)	Pressure / (10 <sup>-3</sup> Pa)	Rotation / (rad/min)
0.4	2~3	240

Si 薄膜材料实验得到的光谱曲线如图 1 所示。对于短波红外材料,可选择 Sellmeier 模型作为材料的色散模型。该模型首先由 Sellmeier 提出,适合于

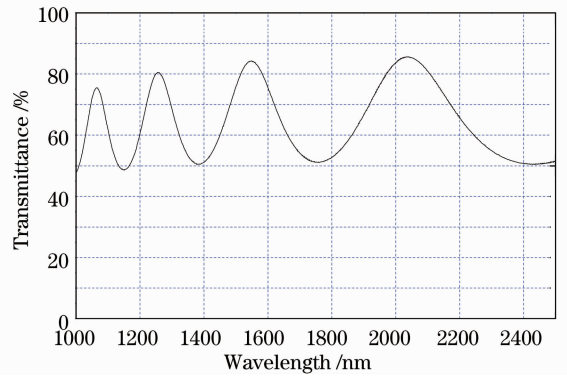


图 1 Si 薄膜材料实验光谱曲线

Fig. 1 Spectrum curve of Si thin film material

透明材料和红外区的一些半导体材料。Sellmeier 模型是柯西模型的一个归总形式,最原始形态的 Sellmeier 模型只适合于透明材料( $k=0$ ),经过改进的 Sellmeier 模型适用于弱吸收的情况,模型的表达式为

$$\begin{cases} n(\lambda) = A_n + \frac{B_n \lambda^2}{\lambda^2 - C_n^2}, \\ k(\lambda) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

或者

$$k(\lambda) = \left[ n(\lambda) \left( B_1 \lambda + \frac{B_2}{\lambda} + \frac{B_3}{\lambda^3} \right) \right]^{-1}. \quad (2)$$

在上面的方程中,  $A_n, B_n, C_n, B_1, B_2, B_3$  都是拟合的参数。

使用美国 SCI 公司的 Filmwizard 软件对材料的光学常数进行拟合。在拟合的过程中,使用 Global Simple 优化方法,得到薄膜的光学常数。光学常数拟合的方法如图 2 所示,选择合理的色散模型,调整变量值,使拟合曲线无限接近实际测量曲线(包括透射、反射、吸收等),当评价函数足够小时,就可以得到薄膜的光学常数。

采用 Sellmeier 色散模型对硅薄膜的光学常数

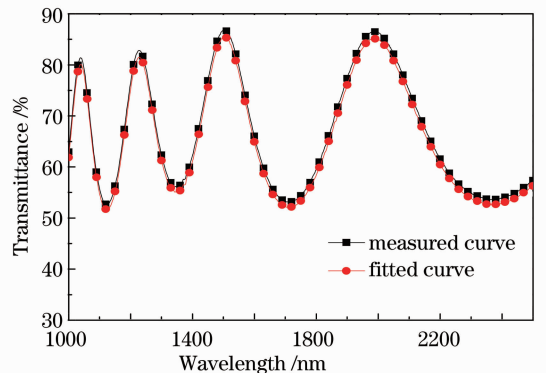


图 2 光学常数拟合示意图

Fig. 2 Sketch map of optical constant fitting

进行了拟合,其光学常数如图 3 和图 4 所示。

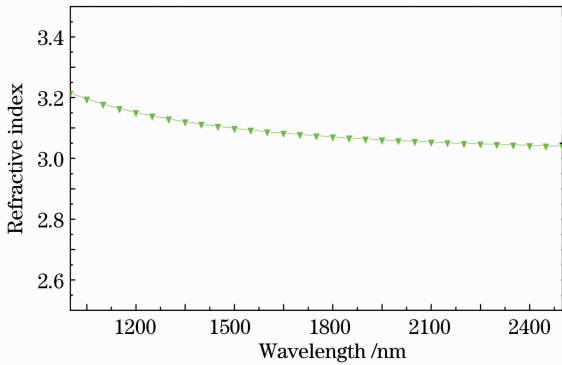


图 3 Si 薄膜折射率

Fig. 3 Refractive index of Si thin film

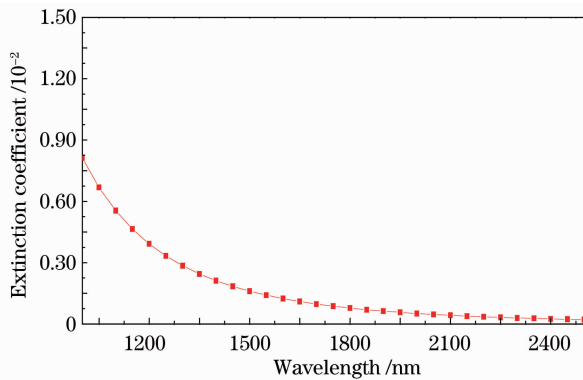


图 4 Si 薄膜消光系数

Fig. 4 Extinction coefficient of Si thin film

### 3 带通滤光片的设计制备

对硅材料的特性进行研究后,选择二氧化硅材料与硅相匹配,在短波红外区域制备带通滤光片,验证光学常数拟合的准确性,同时举例说明硅材料在短波红外区域的应用<sup>[5]</sup>。

#### 3.1 带通滤光片的设计

以硅和二氧化硅分别作为高折射率( $n_H$ )材料和低折射率( $n_L$ )材料,采用双谐振腔结构来设计带通滤光片。利用台伦的对称膜系等效层概念,将多半波滤光片划分为一个对称的主膜系和两侧的匹配膜系<sup>[6]</sup>,只要计算主膜系的等效折射率和匹配情况,便可预知滤光片的特性。设计的膜系如下所示(中心波长  $\lambda_0 = 1.30 \mu\text{m}$ ):

Sub | H L H 2L H L H L H L H 2L H L H | Air

采用以上膜系结构得到的光谱设计曲线见图 5。该滤光片的中心波长为  $1.30 \mu\text{m}$ ,相对带宽为 2.46%,峰值透射率达到了 88.4%(考虑基片背面的剩余反射、多层膜与介质的导纳匹配以及膜层少量的吸收,该设计结果已较理想)。

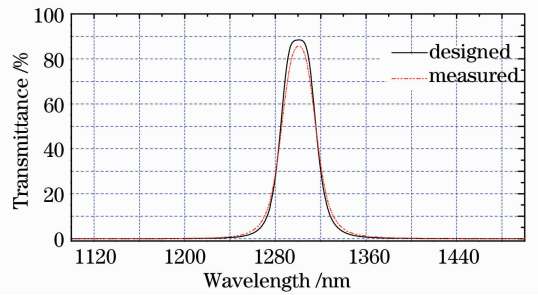


图 5 滤光片的设计与实测透射率曲线对比

Fig. 5 Comparison between measured and designed transmittance curves

#### 3.2 带通滤光片的制备

当真空度达到  $6.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  时开始烘烤,温度设定为  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。材料都采用电子束蒸发,膜层的光学厚度采用透射式光学直接监控法,监控片即基片。

带通滤光片的实测透射率曲线如图 5 所示,从滤光片的实测透射率曲线可知,该带通滤光片的中心波长在  $1.301 \mu\text{m}$ ,相对带宽为 2.46%,峰值透射率为 85.8%。

#### 3.3 光谱分析与可靠性实验

图 5 对带通滤光片的设计曲线与实测曲线进行了对比分析,可知该带通与设计曲线相比,滤光片的中心波长位置蓝移了 1 nm,峰值透射率下降了 2.6%。从滤光片实测曲线与设计曲线的对比可知,两者有较好的吻合,进一步说明拟合出的 Si 材料光学常数的可靠性。

本滤光片经环境模拟实验、浸水实验( $45 \text{ }^\circ\text{C}$  纯水 8 h)、胶带撕拉实验、高低温冲击实验(液氮中保持 5 min,取出后自然升温)等可靠性实验后,其膜层表面仍然完好,复测光谱亦保持稳定。实验前后滤光片光谱曲线对比如图 6 所示。从对比图上可以看出,环境实验后滤光片的峰值透射率有 0.5% 的下降,中心波长向长波方向移动 2 nm,光谱基本保持稳定。由于 Si 薄膜在大气中有可能与空气中的

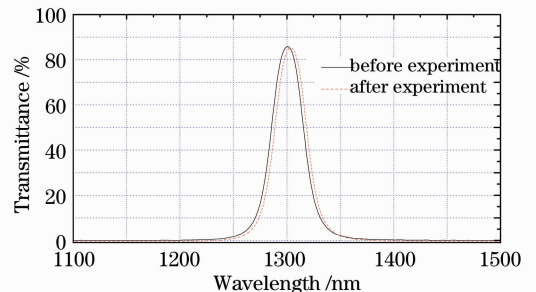


图 6 环境模拟实验前后滤光片光谱曲线对比

Fig. 6 Comparison of spectra before and after environment experiment

氧发生反应,后续还将考察时效性对最外层 Si 薄膜及整个滤光片性能的影响。

## 4 结 论

本文初步研究了硅薄膜在短波红外区域的光学特性,设计和制备了具有 2 个谐振腔的带通滤光片,其带外光谱截止区域可以覆盖  $1.75\ \mu\text{m}$  的光谱区域,经过 8 h 水泡后滤光片的光谱漂移仅为 2 nm,能够满足常规工程应用的要求。

在短波红外区域,硅薄膜因其折射率高和透明性好而显示出独特的优势,还可以利用它在波长小于  $1\ \mu\text{m}$  区域的光吸收,制作带外截止范围很宽的滤光片。相对于全氧化物膜层,利用硅薄膜设计滤光片,膜层数可以大量减少,制造时间能够相应减少,表现出一定的应用优势。

## 参 考 文 献

- 1 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters*[M]. London: Taylor & Francis, 1999. 257~345
- 2 Zhong Disheng. *Vacuum Deposition*[M]. Shenyang: Press of Liaoning University, 2001. 42~48  
钟迪生. 真空镀膜[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001. 42~48
- 3 Pan Yongqiang, Huang Guojun. Study on infrared optical properties of amorphous silicon films deposited by ion beam assisted deposition [J]. *J. Xi'an Technological University*, 2011, **31**(1): 9~13  
潘永强, 黄国俊. 离子束辅助沉积非晶硅薄膜红外光学特性研究[J]. 西安工业大学学报, 2011, **31**(1): 9~13
- 4 J. E. Gerbi, P. M. Voyles, M. M. J. Treacy *et al.*. Increasing medium-range order in amorphous silicon with low-energy ion bombardment [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82** (21): 3665~3667
- 5 Duan Weibo, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Study on optical properties of two thin film materials in medium-wave infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 177~180  
段微波, 刘定权, 张凤山. 两种中波红外薄膜材料的光学特性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 177~180
- 6 Shaowei Wang, Dingquan Liu, Xiaoshuang Chen *et al.*. Realization of integrated narrow bandpass filters in the infrared region[J]. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **25**(11): 1677~1683

栏目编辑: 韩 峰