

# PECVD 技术在微结构表面沉积薄膜的复形性

潘永强, 陈佳\*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 采用光刻技术、刻蚀技术和等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术,在线阵掩模微结构表面沉积了  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜,研究了线阵掩模的宽度和厚度,以及薄膜的厚度和沉积速率对  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜复形性的影响,制备得到了具有良好微结构形貌的微结构滤光片阵列。结果表明,薄膜沉积速率越大,薄膜的复形性越好;掩模厚度和薄膜沉积厚度的增加会导致薄膜的复形性变差; $\text{SiO}_2$  薄膜的复形性优于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜的。

**关键词** 薄膜; 复形性; 光刻; 等离子体增强化学气相沉积; 微结构滤光片

中图分类号 O484 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.113102

## Reproducibility of Thin Films Deposited on Microstructure Surface by PECVD Technology

Pan Yongqiang, Chen Jia

School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** The thin films of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  are deposited on the microstructure surface of a linear array mask by the techniques of photolithography, etching and plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The influences of the width and thickness of the linear array mask, as well as the film thickness and deposition rate on the reproducibility of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  films are investigated. A microstructure filter array with a good microstructure is prepared. The results show that the larger the film deposition rate is, the better the film reproducibility is. The increases of mask thickness and film deposition thickness lead to the deterioration of thin film reproducibility. The reproducibility of  $\text{SiO}_2$  films is better than that of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  films.

**Key words** thin films; reproducibility; photo etching; plasma enhanced chemical vapor deposition; microstructure filter

**OCIS codes** 310.6628; 240.0310; 310.1860

## 1 引言

多光谱、超光谱成像技术已经成为军事侦查和探测等领域的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。微型化多通道薄膜滤光片(简称微结构滤光片)的制造常采用光刻技术、刻蚀技术和真空镀膜技术<sup>[3-4]</sup>。在制造过程中,不同特征波长的微结构单元之间会加入不透光的间隔,以避免不同特征波长之间的光谱串扰<sup>[5-6]</sup>。美国宇航局与美国科达公司成功研制了通道宽度为  $10\sim 15\ \mu\text{m}$  的 6 通道微结构列阵滤光片,其中以铬膜为防串光间隔,间隔大小为  $30\sim 32.5\ \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>。Marcus 等研制了 RGB 三色微滤光片阵列,采用了先镀制  $\text{MgF}_2$  停止刻蚀层形成通道间隔、再镀制滤光膜的方法<sup>[8]</sup>。美国佐治亚理工学院研制了一种最大光谱半峰全宽为  $30\ \text{nm}$  的微结构滤光片,但未能解决串光问题<sup>[9]</sup>。程实平等<sup>[10]</sup>采用光化学掩模分离法,研制了 3 通道短波红外微型滤光片,防串光的方式是在冷基片上镀制金属膜和  $\text{SiO}_2$  绝缘保护膜。Wang 等<sup>[11]</sup>研制出面阵单元尺寸分别为  $2\ \text{mm}$  和

收稿日期: 2017-06-03; 收到修改稿日期: 2017-06-16

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM8333)

作者简介: 潘永强(1974—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事薄膜工艺与薄膜检测技术方面的研究。

E-mail: pyq\_867@163.com

\* 通信联系人。E-mail: 972192477@qq.com

1.5 mm的16通道和64通道微型面阵滤光片。罗海瀚等<sup>[12]</sup>利用3次光刻掩模板镀制一定厚度的间隔层,从而研制出了8通道微型滤光片阵列,通道宽度和通道间隔分别为450  $\mu\text{m}$ 和30  $\mu\text{m}$ 。厦门大学机电工程系研制的微型化多通道滤光片是由4种不同通光波长的窄带微滤光单元阵列组成,单元面积为10  $\mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ ,通道带宽约为40 nm<sup>[13]</sup>。然而,有关微结构表面沉积薄膜复形性的研究却鲜有报道。

在进行光学薄膜镀制时,间隔本身具有一定厚度,会在掩模边缘部分产生阴影,从而形成膜层厚度或刻蚀深度不均匀的区域,也即复形性问题。本文采用掩模代替微结构滤光片中的间隔,利用光刻技术、刻蚀技术和等离子体增强化学气相沉积技术(PECVD),研究了不同掩模厚度和宽度下,氧化硅( $\text{SiO}_2$ )和氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )薄膜的复形性情况。

## 2 实验设计

PECVD利用辉光放电产生等离子体,可实现低温沉积薄膜,具有沉积速率高、膜层厚度均匀性好等优点,可用于生长界面陡峭的多层薄膜结构,复形性优异,可配套光刻和刻蚀工艺制备各种微结构薄膜,被广泛应用于半导体集成电路的制作中<sup>[14-15]</sup>。

由于掩模的存在,薄膜沉积时无法在掩模边缘沉积陡直的薄膜,出现图1所示的沉积效果,其中掩模的厚度为 $h$ ,掩模边缘的投影长度为 $l$ ,坡度角为 $\alpha$ 。坡度角 $\alpha$ 的计算公式为

$$\alpha = \arctan \frac{h}{l} \quad (1)$$

由(1)式可知, $\alpha$ 的大小保持在 $0\sim\pi/2$ 范围内,可以通过 $\alpha$ 的大小表征薄膜复形性的优劣。当 $\alpha$ 越接近 $\pi/2$ 时,说明薄膜复形性效果好。当 $\alpha$ 为 $\pi/2$ 时,掩模边缘陡直,说明薄膜沉积过程中完成了对掩模形貌的复现。

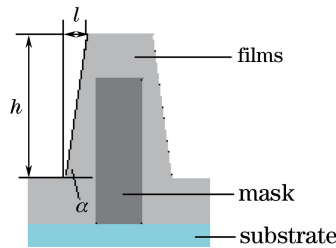


图1 掩模表面薄膜沉积示意图

Fig. 1 Diagram of thin films deposited on mask surface

因此,设计如下实验:先利用光刻技术,在BK7玻璃基底上对不同宽度的线阵掩模进行图形化,再采用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀技术刻蚀出不同厚度的掩模间隔,最后利用PECVD技术制备不同沉积速率和不同厚度的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜。通过日本尼康公司生产的eclipse L-150A型偏光显微镜和英国泰勒霍普森公司生产的Talysurf CCI-2000非接触式表面轮廓仪对结果进行测量及分析。

## 3 实验过程

### 3.1 光刻图形化

光刻图形化是将掩模板上的图形利用光刻胶复制到基底上。实验所用匀胶机是由中国科学院微电子研究所生产的KW-4A型台式匀胶机,光刻机是上海学泽光学机械有限公司生产的JKG-2A型光刻机,光刻胶和显影液分别为台湾永光化学工业股份有限公司的EPG533型正性光刻胶和北京科华微电子材料有限公司的KMPPD238-II型显影液。

在进行匀胶前,将基片分别放在装有丙酮和无水乙醇的烧杯中,利用超声波清洗器加热至50  $^{\circ}\text{C}$ ,清洗10 min,再用去离子水冲洗,直到基片表面水膜呈连续状,用氮气吹干并放于100  $^{\circ}\text{C}$ 热板上烘烤3 min。

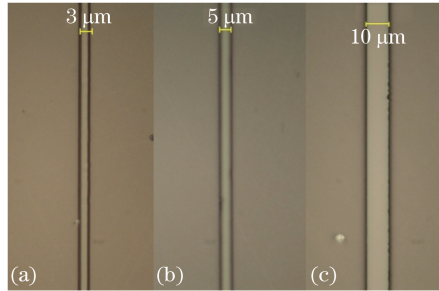
匀胶过程是光刻胶先在800  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 低转速下旋涂12 s,再在3000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 高转速下旋转40 s,最终得到的光刻胶厚度约为1.3  $\mu\text{m}$ 。

前烘温度及时间、曝光时间、后烘温度及时间、显影时间直接影响了光刻图形化<sup>[4]</sup>,前烘温度通过前期实验确定为 105 °C。经过多次实验得到的 1.3  $\mu\text{m}$  厚度光刻胶的光刻图形化最佳工艺参数见表 1,图 2 所示为最佳参数下的图形化结果。

表 1 光刻图形化工艺参数

Table 1 Process parameters of photoetching patterning

Width / $\mu\text{m}$	Prebake time /min	Exposure time /s	Development time /s	Post-exposure bake temperature / $^{\circ}\text{C}$	Post-exposure baketime /min
3	21	40	45	105	21
5	21	40	45	105	21
10	21	40	45	105	21

图 2 光刻图形化结果。(a) 3  $\mu\text{m}$ ; (b) 5  $\mu\text{m}$ ; (c) 10  $\mu\text{m}$ Fig. 2 Results of photoetching patterning. (a) 3  $\mu\text{m}$ ; (b) 5  $\mu\text{m}$ ; (c) 10  $\mu\text{m}$ 

### 3.2 刻蚀过程

刻蚀过程采用英国牛津仪器公司生产的 Oxford Plasmalab-system100 的 ICP180 刻蚀系统,反应气体为  $\text{SF}_6$  和  $\text{O}_2$  的混合气体,体积比为  $V_{\text{SF}_6}:V_{\text{O}_2}=40:5$ 。其他工艺参数:温度为 40 °C,压强为 0.4 Pa,射频功率为 50 W,ICP 功率为 800 W,得到的玻璃基底和 EPG533 光刻胶的刻蚀速率分别为  $225.04 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $525.07 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。通过改变刻蚀时间,得到厚度分别为 1000 nm 和 500 nm 的线阵掩模结构。

### 3.3 薄膜沉积

采用日本 SAMCO 公司生产的 PD-220 型 PECVD 系统作为  $\text{SiO}_2$  薄膜和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜的沉积设备。利用美国 WOOLLAM 公司生产的 M-2000UI 型宽光谱变角度椭圆偏振仪检测薄膜的膜厚、折射率以及消光系数。

制备  $\text{SiO}_2$  薄膜的工艺参数为:反应温度 250 °C,气体体积流量比  $V_{\text{SiH}_4}:V_{\text{N}_2\text{O}}=50:70$ ,射频功率 150 W。通过改变工作压强,可以得到不同的  $\text{SiO}_2$  薄膜沉积速率,同时保证折射率变化较小<sup>[16]</sup>,沉积  $\text{SiO}_2$  薄膜的情况见表 2。

表 2 不同压强下沉积  $\text{SiO}_2$  薄膜的参数Table 2 Parameters of  $\text{SiO}_2$  thin films deposited at different pressures

Pressure /Pa	Deposition time /min	Film thickness /nm	Deposition rate /( $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Refractive index
80	20	416.73	20.84	1.4509
90	20	515.27	25.76	1.4605
100	20	618.12	30.91	1.4647
110	20	660.83	33.04	1.4715
120	20	825.71	41.92	1.4476

制备  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜的工艺参数为:反应温度 250 °C,气体体积流量比  $V_{\text{SiH}_4}:V_{\text{NH}_3}=115:20$ ,工作压强 120 Pa,射频功率 200 W,沉积速率  $20.94 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,折射率 2.0683。

在不同厚度  $b$ 、不同宽度  $d$  的线阵掩模表面,分别进行以下三组薄膜沉积实验:

1) 在厚度为 1000 nm,宽度分别为 3,5,10  $\mu\text{m}$  的线阵掩模表面,以 5 种不同的沉积速率沉积 600 nm 的

SiO<sub>2</sub> 薄膜;

2) 工作压强为 80 Pa、沉积速率为 20.84 nm·min<sup>-1</sup> 的条件下,在厚度分别为 500 nm 和 1000 nm,宽度分别为 3,5,10 μm 的线阵掩模表面,分别以 5,10,15,20,25 min 的沉积时间,得到不同厚度的 SiO<sub>2</sub> 薄膜;

3) 在厚度为 1000 nm,宽度分别为 3,5,10 μm 的线阵掩模表面,分别以 5,10,15,20,25 min 的沉积时间,得到不同厚度的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜。

## 4 结果及分析

利用非接触式表面轮廓仪对上述三组结果进行检测,并结合(1)式计算  $\alpha$ 。

第一组实验得到的沉积速率对 SiO<sub>2</sub> 薄膜沉积复形性的影响如图 3 所示。可以看出,当掩模厚度一定时,对于相同宽度的掩模,随着沉积速率的增大, $\alpha$  逐渐增大;而对于相同的沉积速率,不同宽度掩模对应的  $\alpha$  基本保持不变。说明增大沉积速率能促进薄膜对微结构形貌的复现,沉积速率越大,复形性效果越好。

第二组实验得到的掩模厚度和沉积厚度对 SiO<sub>2</sub> 薄膜复形性的影响如图 4 所示。可以看见,以相同的沉积速率沉积同一种薄膜材料时,掩模厚度越大,薄膜复形性的效果越差;随着沉积时间的增加,沉积的薄膜厚度越厚,微结构形貌的复现效果越差。结合图 3 和图 4 可知,利用 PECVD 技术在微结构表面沉积薄膜时,复形性效果受薄膜沉积速率、沉积厚度及微结构掩模厚度的影响较大。

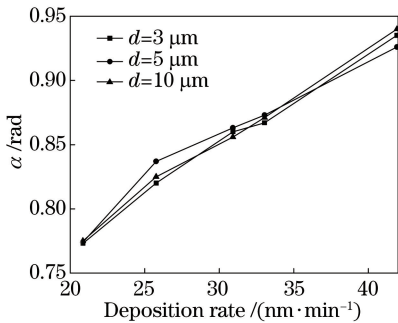


图 3 不同沉积速率下 SiO<sub>2</sub> 薄膜的复形性  
Fig. 3 Reproducibility of SiO<sub>2</sub> thin films under different deposition rates

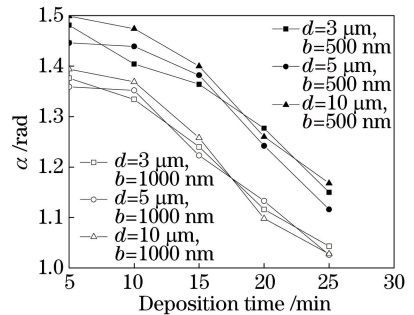


图 4 不同掩模和沉积厚度下 SiO<sub>2</sub> 薄膜复形性  
Fig. 4 Reproducibility of SiO<sub>2</sub> thin films with different mask and deposition thicknesses

第三组实验得到的沉积厚度对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜复形性的影响如图 5 所示。

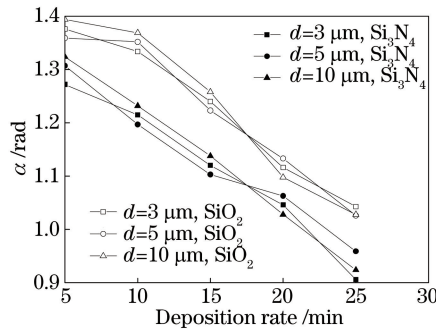


图 5 沉积厚度对 SiO<sub>2</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜复形性的影响

Fig. 5 Influences of deposition thickness on reproducibility of SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> thin films

结合图 4 和图 5 可以发现,掩模厚度和薄膜厚度对薄膜复形性的影响趋势不随沉积薄膜材料的不同而发生变化。由图 5 也可以看出,对于沉积速率较为接近的两种薄膜,SiO<sub>2</sub> 薄膜的复形性要优于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜。

根据上述实验结果,利用 PECVD 和光化学掩模分离相结合的技术制备了阵列数为 2×2、通道面积为 50 μm×50 μm 的微结构滤光片,基本膜系是 G/(HL)<sup>2</sup>2mH(LH)<sup>2</sup>/A,其中 H 是 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,L 是 SiO<sub>2</sub>,A 是空气,G 是基底 K9 玻璃,2m 为间隔层的厚度,480,520,590 nm 中心波长对应的 m 分别为 1.72,2 和 2.99。SiO<sub>2</sub> 薄膜沉积工艺参数:气体体积流量比为 V<sub>SiH<sub>4</sub></sub>:V<sub>N<sub>2</sub>O</sub>=50:70,射频功率为 150 W,工作温度为 250 °C,反

应压强为 120 Pa。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜沉积工艺参数: 气体体积流量比为  $V_{\text{SiH}_4}:V_{\text{NH}_3}=115:20$ , 射频功率为 200 W, 工作温度为 250 °C, 反应压强为 120 Pa。掩模厚度为 1.3  $\mu\text{m}$ 。图 6 所示为得到的微结构滤光片。可以看出, 生长的薄膜具有较好的复形性, 得到的微结构滤光片阵列边缘整齐、分界线清晰。

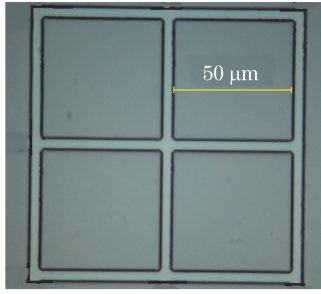


图 6 显微镜下的微结构滤光片

Fig. 6 Microstructure filter under microscope

## 5 结 论

利用光刻技术和刻蚀技术, 制备得到了不同宽度和厚度的线阵掩模, 并用 PECVD 技术沉积了  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜, 分析了薄膜在微结构上沉积时的复形性情况。结果表明, 掩模宽度对薄膜沉积的复形性无明显影响; 掩模厚度越大, 薄膜沉积的复形性越差。沉积速率越大, 薄膜复形性效果越好; 薄膜的沉积厚度越大, 薄膜沉积的复形性越差。 $\text{SiO}_2$  薄膜的复形性要优于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜的, 薄膜沉积的复形性可能还受薄膜晶体结构的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Jincheng, Kuang Cuifang, Wang Yifan, *et al.* Multispectral fluorescence microscopic imaging based on compressive sensing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1204003.  
王金成, 匡翠方, 王轶凡, 等. 基于压缩感知的荧光显微多光谱成像[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1204003.
- [2] Wang Shaowei, Chen Xiaoshuang, Lu Wei. Integrated-cavities wavelength division devices and their application for micro-spectrometers[C]. The Nineteenth Annual Academic Conference of Shanghai Infrared and Remote Sensing Society, 2014: 59-65.  
王少伟, 陈效双, 陆卫. 集成微腔分光器件及在微型光谱仪中的应用[C]. 上海市红外与遥感学会第十九届学术年会, 2014: 59-65.
- [3] Zhang Jianhuan, Liu Tingting, Lin Shan. Spectral crosstalk modeling and evaluation of a micro-arrayed multichannel optical filter[J]. Optical Technique, 2013, 39(6): 540-543.  
张建寰, 刘婷婷, 林珊. 微型化多通道滤光片光谱串扰模型的建立和评价[J]. 光学技术, 2013, 39(6): 540-543.
- [4] Liu Guangming. Introduction to surface treatment technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.  
刘光明. 表面处理技术概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [5] Chen Sheng, Ma Yan, Zhang Pingping, *et al.* Production of double-layer light mask in atom nano-lithography[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2070-2073.  
陈晟, 马艳, 张萍萍, 等. 原子纳米光刻中双层光学掩模的实现方法研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2070-2073.
- [6] Wang Shaowei, Chen Xiaoshuang, Lu Wei. Fabrication of step filter for miniature wavelength-division device based on photolithography[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1358-1362.  
王少伟, 陈效双, 陆卫. 基于光刻工艺的阶跃滤光片式微型分光器件研制[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1358-1362.
- [7] Gluck N S, Gunning W J. Patterned infrared spectral filter directly deposited onto cooled substrates[J]. Applied Optics, 1989, 28(23): 5110-5114.
- [8] Wang Yunji. Integrated filter for InGaAs short wave infrared detector[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2014.



- 王云姬. 集成滤光微结构的 InGaAs 短波红外探测器[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2014.
- [9] Yi D R, Kong L H. Fabrication of densely patterned micro-arrayed multichannel optical filter-mosaic[J]. Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS, 2011, 10(3): 033020.
- [10] Cheng Shiping, Yan Yixun, Zhang Fengshan, *et al.* Development of three-channel short-wave IR spectrum distinguishable detector array[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1994, 13(6): 401-404.  
程实平, 严义坝, 张凤山, 等. 3 通道短波红外光谱可识别列阵探测器的研制[J]. 红外与毫米波学报, 1994, 13(6): 401-404.
- [11] Wang S W, Liu D, Lin B, *et al.*  $16 \times 1$  integrated filter array in the MIR region prepared by using a combinatorial etching technique[J]. Applied Physics B, 2006, 82(4): 637-641.
- [12] Luo Haihan, Li Yaopeng, Cai Qingyuan, *et al.* Fabrication of 8-channel micro integrated filter in  $2.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$  by combine masks and plating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1107001.  
罗海瀚, 李耀鹏, 蔡清元, 等. 组合套镀法制备  $2.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$  波段 8 通道微型集成滤光片[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1107001.
- [13] Zhang Jianhuan, Zhang Chentao, Zhuo Yong, *et al.* Design of micro-arrayed multichannel optical filter for multispectral colposcope[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 2035-2040.  
张建寰, 张陈涛, 卓勇, 等. 多光谱阴道镜的微型化多通道滤光片设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2035-2040.
- [14] Tao Tao, Su Hui, Xie Zili, *et al.* Research on nitride membranes grown by PECVD[J]. Nanomaterial and Structure, 2010, 47(5): 267-272.  
陶涛, 苏辉, 谢自力, 等. PECVD 法氮化硅薄膜生长工艺的研究[J]. 纳米材料与结构, 2010, 47(5): 267-272.
- [15] Pan Yongqiang, Chen Jia. Design and fabrication of microstructure narrowband filter[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(1): 78-82.  
潘永强, 陈佳. 微结构窄带滤光片设计及制备工艺研究[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 78-82.
- [16] Zhang Xiao. Research on anti-reflection coatings by PECVD technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2010.  
张霄. PECVD 技术制作减反膜研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2010.