

文章编号: 0258-7025(2009)08-2135-05

# 深紫外/紫外薄膜材料的光学常数研究

薛春荣<sup>1,2,3</sup> 易葵<sup>1</sup> 齐红基<sup>1</sup> 范正修<sup>1</sup> 邵建达<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800  
<sup>2</sup>常熟理工学院江苏新型功能材料实验室, 江苏 常熟 215500  
<sup>3</sup>中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230026

**摘要** 为了进一步明确氟化物薄膜材料在深紫外-紫外波段(DUV-UV)的光学常数,研究了深紫外-紫外波段常用的 6 种大带隙的氟化物薄膜材料,分别在熔石英(JGS1)基底和氟化镁单晶基底上用热舟蒸发镀制了 3 种高折射率材料薄膜  $\text{LaF}_3$ ,  $\text{NdF}_3$ ,  $\text{GdF}_3$  和 3 种低折射率材料薄膜  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ;用商用 Lambda900 光谱仪测量了它们在 190~500 nm 范围的透射率光谱曲线;用包络法和迭代算法相结合研究了它们的折射率和消光系数,由柯西色散公式和指数色散公式对得到的离散折射率和消光系数的值用最小二乘法进行曲线拟合,得到了 6 种薄膜材料在所测波段内的折射率和消光系数的色散公式和色散曲线。所得结果与文献报道的  $\text{MgF}_2$  和  $\text{LaF}_3$  的结果相一致,证明了结果的可靠性。

**关键词** 薄膜光学; 氟化物薄膜; 光学常数; 包络法; 迭代算法

**中图分类号** O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2135

## Optical Constants of Film Materials for Deep Ultraviolet/Ultraviolet

Xue Chunrong<sup>1,2,3</sup> Yi Kui<sup>1</sup> Qi Hongji<sup>1</sup> Fan Zhengxiu<sup>1</sup> Shao Jianda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup>Jiangsu Laboratory of Advanced Functional Materials, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500, China  
<sup>3</sup>National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** In order to determine the optical constants of fluoride films in deep ultraviolet (DUV) to ultraviolet (UV), high-refractive-index materials such as  $\text{LaF}_3$ ,  $\text{NdF}_3$ , and  $\text{GdF}_3$ , and low-refractive-index materials such as  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ , and  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  single thin films are deposited by a resistive-heating boat at different deposition rates and specific substrate temperatures on JGS1 and single crystal  $\text{MgF}_2$  substrates. Transmittances in 190~500 nm of all fluoride thin films are measured through business spectrometer in the ambient atmosphere. The optical constants of these films are determined from iterative algorithm combined with the envelope method. These dispersive optical constant values are fitted by Cauchy formula and index formula, respectively. The results are consistent with other relevant articles, which testifies the reliability of the results.

**Key words** film optics; fluoride films; optical constants; envelope method; iterative algorithm

## 1 引言

随着紫外(UV)材料和技术在新的研究及应用

领域的发展<sup>[1~4]</sup>,迫切需要在短波范围的高质量的光学薄膜,为了设计多层膜系,精

收稿日期: 2008-07-02; 收到修改稿日期: 2008-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(60678004)资助项目。

作者简介: 薛春荣(1972-),女,讲师,博士研究生,主要从事真空紫外光学薄膜和薄膜材料方面的研究。

E-mail: xcr163@163.com

导师简介: 邵建达(1964-),男,研究员,博士生导师,主要从事光学薄膜技术与光电信息功能薄膜方面的研究。

E-mail: jdshao@mail.shcnc.ac.cn

确知道薄膜材料在紫外领域的光学常数是必要的。有关氟化物介质材料在紫外和深紫外(DUV)波段的物理、机械和光学性能,在国外已有很多报道<sup>[5~8]</sup>,国内也有不少报道<sup>[9,10]</sup>,这些文章大多是对特定波长如 355 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm 处的光学常数进行了报道,再加上影响薄膜光学常数的参数太多,报道结果比较分散。在国内,到目前为止,还没有可靠的紫外薄膜材料光学常数的相关报道,因此研究紫外薄膜材料的光学常数是必要的。

## 2 氟化物光学薄膜的沉积和测量

氟化物材料常用电阻热蒸发(RH)、电子束蒸发(EB)、粒子辅助沉积(IAD)和粒子束溅射(IBS)等沉积方式,相比较而言,RH 沉积的氟化物光学损耗较小<sup>[6,8,11,12]</sup>。在氟化镁单晶基底上用热舟蒸发以一定的沉积工艺镀制了 3 种高折射率材料薄膜 LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub> 和 3 种低折射率材料薄膜 MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, 沉积条件如表 1 所示,其中  $P_0$  是本底真空,  $P$  为薄膜沉积过程中的真空度,  $D_R$  为沉积速率,  $d$  为膜层厚度。为了改善膜的质量、减少损耗,沉积时基板温度都加热到 250 ℃ 左右。

表 1 沉积条件

Table 1 Deposition conditions

Material	$P_0$ /(10 <sup>-3</sup> Pa)	$P$ /(10 <sup>-3</sup> Pa)	$D_R$ /(nm/s)	$d$ /nm
LaF <sub>3</sub>	0.933	1.07	0.23	680
NdF <sub>3</sub>	1.13	1.6	0.16	597
GdF <sub>3</sub>	1.33	2.4	0.43	1007
MgF <sub>2</sub>	1.33	1.47	0.21	664
AlF <sub>3</sub>	1.2	1.47	0.6	947
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	1.2	1.33	0.42	1241

为了得到氟化物单层膜的光学常数,考虑到光谱仪的测量精度越来越高,用光谱仪测量膜的透过率或反射率,再由此推导光学常数变得比较容易;考虑到光谱仪的测量中,测量透过率比测量反射率更为便利和准确,因此用商用光谱仪测量了这 6 种氟化物在 190~500 nm 范围的透射率光谱曲线,如图 1,2 所示。

由图 1,2 可以看出,所沉积的高、低折射率薄膜,在所研究的光谱范围内,干涉峰明显,可以利用包络法计算薄膜的光学常数。

## 3 包络法与迭代算法

### 3.1 包络法

透射率包络法是利用透射率光谱曲线的极值点

数值  $T_{\lambda/2}$  (膜厚为二分之一波长整数倍处的极值)和  $T_{\lambda/4}$  (膜厚为四分之一波长整数倍处的极值)来计算弱吸收薄膜的光学常数。图 3 为包络法示意图。

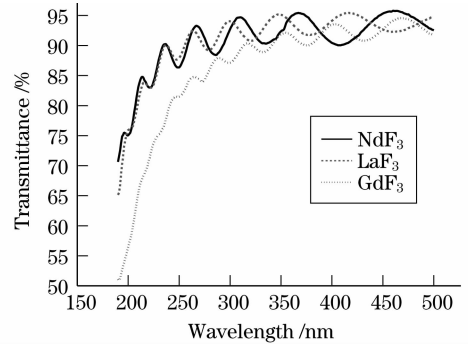


图 1 LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub> 和 GdF<sub>3</sub> 单层膜的透过率  
Fig. 1 Transmittance of LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, and GdF<sub>3</sub> single layer films

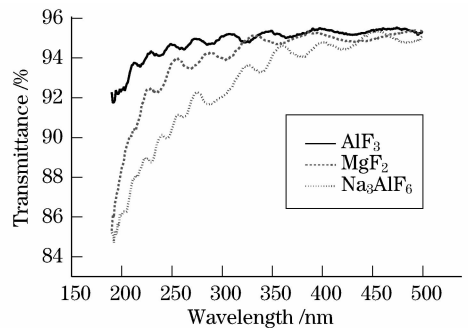


图 2 MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub> 和 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 单层膜的透过率  
Fig. 2 Transmittance of MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, and Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> single layer films

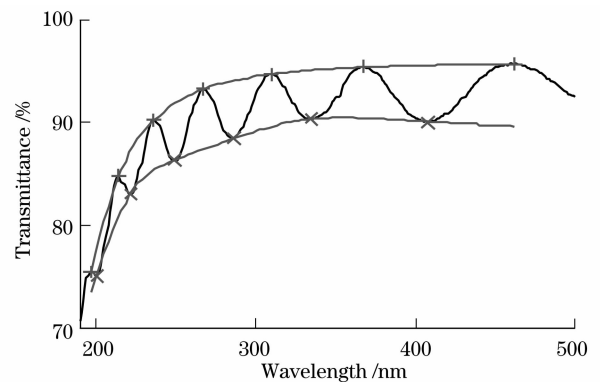


图 3 包络法示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of envelop curves  
根据文献[13],薄膜的透过率  $T$ , 折射率  $n$ , 消光系数  $k$ , 厚度  $d$  的表达式分别为

$$T = \frac{AX}{B - CX + DX^2}, \quad (1)$$

$$n = [Q + (Q^2 - n_s^2)^{1/2}]^{1/2}, \quad (2)$$

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln X, \quad (3)$$

$$d \approx \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2[n(\lambda_1) \cdot \lambda_2 - n(\lambda_2) \cdot \lambda_1]}, \quad (4)$$

其中

$$A = 16n_s(n^2 + k^2),$$

$$B = [(n^2 + 1)^2 + k^2][(n + 1)(n + n_s^2) + k^2],$$

$$C = 2[(n^2 - 1 + k^2)(n^2 - n_s^2 + k^2) - 2k^2(n_s^2 + 1)]\cos 2\alpha - 2k[2(n^2 - n_s^2 + k^2) + (n_s^2 + 1)(n^2 - 1 + k^2)]\sin 2\alpha,$$

$$D = [(n - 1)^2 + k^2][(n - 1)(n - n_s^2) + k^2],$$

$$Q = 2n_s \cdot \frac{T_{up} - T_{low}}{T_{up} \cdot T_{low}} + \frac{n_s^2 + 1}{2},$$

$$X = \frac{F - \sqrt{F^2 - (n^2 - 1)^3 \cdot (n^2 - n_s^4)}}{(n - 1)^3 \cdot (n - n_s^2)},$$

$$F = \frac{8n^2 n_s}{T_i}, \quad T_i = \frac{2T_{up} \cdot T_{low}}{T_{up} + T_{low}},$$

$n_s$  为基底的折射率,  $T_{up}, T_{low}$  分别为高低包络线在极值点处的值,  $\lambda_1, \lambda_2$  为两相邻极大值或极小值处的波长,  $n(\lambda_1), n(\lambda_2)$  为对应的折射率。

可见,在用包络法计算薄膜的光学常数时,影响计算结果的只有  $n_s$  和上下包络线上的极值,只要精确确定了这 3 个量,便可求出膜层的光学常数。

基底折射率  $n_s$  的色散,在长波段,如可见和红外波段,影响很小,一般都可以把基底折射率处理为一个常数;但在较短波段,如深紫外波段,必须考虑基底折射率色散的影响。但遗憾的是很多材料手册都没有给出深紫外基底材料如紫外级石英(JGS1)、氟化镁单晶(MgF<sub>2</sub>)、氟化钙单晶(CaF<sub>2</sub>)等在深紫外波段的色散关系,而且,晶体的光学特性与晶体的生长和加工有很大关系,不同厂家提供的晶体的光学特性会有所不同,同一厂家提供的同一样品不同点的光学特性也会稍有差别。因此在用于深紫外波段时,必须对所用基底的折射率进行测量或计算。为了研究基底折射率色散的测量误差对薄膜光学常数的影响,首先比较了折射率色散略有不同的基底上同一薄膜的透过率。研究表明,基底折射率值相差 0.01 时,在 200 nm 处引起的薄膜透过率值相差为 0.003,波长越长处,引起的薄膜透过率的差值越小。这个差值与包络点的选取带来的误差相比可以忽略不计。包络点的正确选取对准确计算光学常数的重要性是不言而喻的,很多文章都对极值点的正确选取做了大量工作<sup>[13~16]</sup>,如把包络法与遗传算法、模拟退火、曲线拟合优化算法等相结合。为了减小极值

点的选取给计算光学常数带来的误差,用迭代算法<sup>[16]</sup>对包络线优化以确定氟化物薄膜的光学常数。

### 3.2 迭代算法优化包络线

包络法计算弱吸收薄膜的光学常数简单易行,但最大的缺点是对包络线上极值点的选取依赖性很强,极值点选择的准确与否会引起光学常数,尤其是光学厚度的极大误差甚至错误。为了减小包络法中光学常数对包络线极值点选择的依赖性,为了更好地运用包络法推算薄膜的光学常数,此处用迭代算法对包络法进行了优化,主要步骤为:

1) 测出所研究的弱吸收薄膜的透过率  $T$ ,画出其上、下包络线,记下整个光谱区间透射率曲线与上下包络线的切线点,在弱吸收区域,这些点通常与透过率极值重合。

2) 记下各个切线点的上下包络值  $T_{up}$  和  $T_{low}$ ,并由(2)式算出对应的折射率  $n$ 。

3) 确定干涉级次:符合包络条件的切线点满足  $2\alpha = m\pi$ ,其中  $m$  为整数,忽略吸收系数,得出四分之一波长条件

$$nd = m \frac{\lambda}{4}. \quad (5)$$

由(5)式可以确定参考点处的级次,如  $\lambda_3$  处的级次可以通过相邻极大或极小值  $\lambda_1$  估算为  $m_3 = \frac{2}{(n_1\lambda_3)/(n_3\lambda_1) - 1}$ ,这里  $\lambda_3 > \lambda_1$ 。

一般来说最好选择透明区域的一对极大或极小值来估算级次,因为在这些区域,可以得到精确的包络。估计得到的级次可能不是一个整数,需要根据是透射极大还是极小值来选取一个相近的偶数或奇数分配到这个参考点。一旦参考点的级数确定,其他数据点的级次可以依次推出。

4) 级次  $m$  确定后,加上步骤 2) 得出的折射率  $n$ ,可由(5)式推出薄膜厚度  $d$ 。在这个阶段,利用不同的数据点进行计算时,得出的厚度可能会是色散的,尤其是在高吸收区域。色散可能来自两方面:第一,错误的级次分配给了这个数据点。可以用一套新的接近于步骤 3) 计算出的级次重新进行厚度计算。这个过程可以反复进行直到发现最好的级次。最优化的级次应该产生最小的厚度分散,尤其是在透明的区域。第二,色散来自于错误的折射率。要解决有假的包络产生的折射率的固有错误,可以用阶段迭代算法,它能使包络线的影响减少到最低限度。因为厚度  $d$ , 折射率  $n$  和消光系数  $k$  在包络法中是相互关联的,对于给定  $d$ , 光学常数可以在第一阶

段的迭代中解出。这 3 个参数,可以放到一个评价函数中以最低的搜索过程一起优化。

5) 迭代光学常数:用从步骤 4)得到的平均厚度作为迭代的初始值,对每个数据点通过(5)式可以得到比较连续的  $n$ 。一旦指数  $n$  确定了,由(3)式可以计算出  $k$ 。

6) 优化厚度:评价函数定义为  $\Delta = \sum_i |T_i - T_{mi}|$ ,其中  $T_i$  是根据(1)式计算出的第  $i$  个点的透过率, $T_{mi}$ 是对应的测量值。因为光学常数与厚度是相关的,象上面看到的情况,所有 3 个参数其实是通过迭代同时优化的。优化的目标是找到一个厚度使得评价函数有最小值。对一个新的优化厚度,一套新的光学常数可以通过步骤 5) 得到。

#### 4 氟化物光学常数的确定

用第 3 节叙述的方法,从包络法得出的初始值出发,利用迭代算法减小极值点的选取对包络线的影响,强调实际测量数据,对第 2 节沉积的 6 种氟化物薄膜的透过率曲线用改进的包络法进行推算,可以得到 6 种氟化物薄膜在各个极值点处的光学常数,最后对优化后得到的各离散点的光学常数,由柯西(Cauchy)色散公式  $n(\lambda) = A_1 + \frac{A_2}{\lambda_2} + \frac{A_3}{\lambda_4}$  与指数色

散公式  $k(\lambda) = A_4 + A_5 \exp\left(\frac{\lambda}{A_6}\right)$  用最小二乘法进行曲线拟合,便可得到薄膜材料在所测波段内的折射率和消光系数,如表 2 所示,其中  $A_1 \sim A_6$  为用最小

表 2 参量取值

Table 2 Parameter values

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
LaF <sub>3</sub>	1.53215	1460.451	$1.67 \times 10^8$	$5.14 \times 10^{-5}$	4.8580884	-28.8136
NdF <sub>3</sub>	1.54105	1364.383	83129382	0.000145	4.7823166	-28.8926
GdF <sub>3</sub>	1.47729	5238.094	18740997	$5.98 \times 10^{-5}$	0.3079412	-53.031
AlF <sub>3</sub>	1.34236	1864.119	38186608	0.000019	0.0149568	-43.6372
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	1.34192	6679.986	83549329	-0.00015	0.0088917	-101.547
MgF <sub>2</sub>	1.31225	9560.322	$2.13 \times 10^8$	$-1.2 \times 10^{-5}$	0.9245473	-29.8639

为了验证所得结果的可靠性,重点研究了文献报道比较多的 MgF<sub>2</sub> 和 LaF<sub>3</sub> 薄膜。比较发现,本文方法所得到的 MgF<sub>2</sub> 和 LaF<sub>3</sub> 的光学常数在所测波段范围内与文献报道<sup>[6,10,11,17~20]</sup>的基本一致。

由图 4 可以看出,3 种高折射率薄膜的折射率与 3 种低折射率薄膜的折射率在 190~500 nm 范围

二乘法进行曲线拟合时得到的拟合参量。相应的色散曲线如图 4,5 所示。

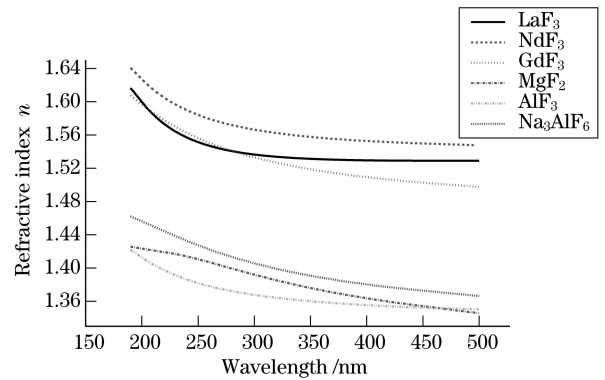


图 4 LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, 和 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 单层膜的折射率

Fig. 4 Refractive indices of LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, and Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> single layer films

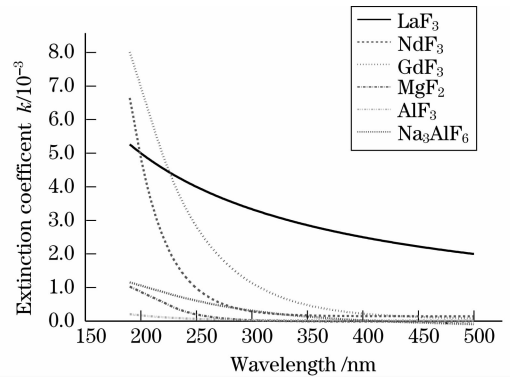


图 5 LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, 和 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 单层膜的消光系数

Fig. 5 Extinction coefficients  $k$  of LaF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, and Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> single layer films

相差较大,在膜系设计中可以组成高低折射率材料对设计各种实用的薄膜器件。图 5 表明,所研究的所有材料在短波段吸收较大,在长波段吸收较小,相比而言,高折射率薄膜材料比低折射率薄膜材料的吸收大很多。因此在组成膜系时,膜系的吸收主要来自高折射率薄膜。

## 5 结 论

通过热舟蒸发在紫外级熔石英和氟化镁单晶基底上沉积了 6 种大带隙的氟化物薄膜材料。从包络法得出的初始值出发, 利用迭代算法减小包络法的影响, 强调实际测量数据, 给出了 6 种材料在深紫外到紫外区的光学常数。避免了包络法准确得出数据的固有的困难, 使在广大谱区范围, 包括高吸收谱区, 提取薄膜的厚度和光学常数成为可能。由光学常数的计算结果可以看出, 6 种高低折射率薄膜材料的折射率相差较大, 在膜系设计中可以组成高低折射率材料对设计各种实用的薄膜器件, 而在高低折射率对组成的多层膜系中, 膜系的吸收主要来自高折射率薄膜材料。

## 参 考 文 献

- Zhu Jingtao, Zhang Shumin, Wang Bei *et al.*. SiC/Mg multilayer film reflective mirror at 30.4 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 735~738  
朱京涛, 张淑敏, 王 蓓 等. 30.4 nm 波长 SiC/Mg 多层膜反射镜[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 735~738
- Zhang Fangpei, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Laser induced plasma shutter for wave clipping of 355 nm radiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 759~764  
张芳沛, 楼祺洪, 董景星 等. 355 nm 脉冲激光诱导等离子体开关削波[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 759~764
- Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 29~32  
石朝辉, 樊仲维, 张 瑛 等. 高效率大功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
- Cui Yun, Zhao Yuanan, Jin Yunxia *et al.*. Laser damage characteristic of third harmonic separator at 1064 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1129~1134  
崔 云, 赵元安, 晋云霞 等. 三倍频分光膜在 1064 nm 的破斑特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1129~1134
- S. Niisaka, T. Saito, J. Saito *et al.*. Development of optical coatings for 157-nm lithography. 1. Coating materials[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(16): 3242~3247
- D. Ristau, S. Günster, S. Bosch *et al.*. Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF<sub>2</sub> and LaF<sub>3</sub> coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(16): 3196~3204
- K. Yoshida, M. Ohya, K. Hatooka *et al.*. Optical properties of porous fluoride coatings for UV and deep UV lasers[C]. *SPIE*, 2002, **4679**: 429~434
- Cheng Chung Lee, Ming Chung Liu, Masaaki Kaneko *et al.*. Characterization of AlF<sub>3</sub> thin films at 193 nm by thermal evaporation[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(34): 7333~7338
- Yuan Jingmei, Yi Kui, Qi Hongji *et al.*. Design of 193 nm optical thin films under practical structure and optical parameters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 477~481  
袁景梅, 易 葵, 齐红基 等. 非理想参数下 193 nm 光学薄膜的设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 477~481
- Yuan Jingmei, Tang Zhaosheng, Qi Hongji *et al.*. Analysis of optical property for several ultraviolet thin films materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 984~988  
袁景梅, 汤兆胜, 齐红基 等. 几种紫外薄膜材料的光学常数和性能分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 984~988
- M. Zukic, D. G. Torr, J. F. Spann *et al.*. Vacuum ultraviolet thin films. 1: Optical constants of BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, LaF<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>, and SiO<sub>2</sub> thin films[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(28): 4284~4292
- J. Kolbe, H. Kessler, T. Hofmann *et al.*. Optical properties and damage thresholds of dielectric UV/VUV coatings deposited by conventional evaporation, IAD, and IBS[C]. *SPIE*, 1992, **1624**: 221
- Tsung-Hui Ho. Optical constant calculation by envelope method [D]. Taiwan: Institute of Optical Science of National Central University, 2002, 12~26  
何聪慧. 光学薄膜常数之计算[D]. 台湾: 国立中央大学光电所硕士论文, 2002, 12~26
- Xia Zhilin, Xue Yiyu, Zhao Li *et al.*. Analysis of thin film's optical parameters based on the envelope method[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2003, **25**(5): 73~76  
夏志林, 薛亦渝, 赵 利 等. 基于包络线法的薄膜光学常数分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2003, **25**(5): 73~76
- H. Z. Zhen. Epi-film thickness measurement using emission Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 1995, **8**(3): 340~345
- Shu-Chung Chiao, Bertrand G. Bovard, H. A. Macleod. Optical-constant calculation over an extended spectral region; application to titanium dioxide film[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(31): 7355~7360
- Shang Shuzhen, Shao Jianda, Fan Zhengxiu *et al.*. The study of ultraviolet properties of resistant boat evaporated LaF<sub>3</sub> films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1941~1945  
尚淑珍, 邵建达, 范正修 等. 热舟蒸发 LaF<sub>3</sub> 薄膜的紫外性能研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1941~1945
- F. Rainer, W. H. Lowdermilk, D. Milam *et al.*. Materials for optical coatings in the ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(4): 496~500
- O. R. Wood II, H. G. Craighead, J. E. Sweeney *et al.*. Vacuum ultraviolet loss in magnesium fluoride films[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20): 3644~3649
- M. C. Liu, C. C. Lee, M. Kaneko *et al.*. Microstructure and composition-related characteristics of LaF<sub>3</sub> thin films at 193 nm[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 083801-1~6