

文章编号: 0253-2239(2006)12-1871-6

有效介质近似在 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜 光学性质中的适用性研究*

王佩红^{1,2} 戴旭涵¹ 赵小林¹ 宋学萍² 孙兆奇²

(1 上海交通大学微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200030)
(2 安徽大学 安徽省信息材料与器件重点实验室, 合肥 230039)

摘要: 采用射频磁控共溅射技术制备了 Cu 体积分数分别为 15% 和 30% 的 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜。透射电镜形貌图像表明, 薄膜由不同形状的 Cu 晶态纳米微粒镶嵌于主要为非晶态的 MgF₂ 陶瓷基体中构成。用椭圆光谱技术计算得到 Cu-MgF₂ 复合薄膜在 270~830 nm 波段的光学常数谱。用考虑颗粒形状效应的有效介质近似计算得到 Cu-MgF₂ 复合薄膜在相同波段的光学常数谱。把两样品的透射电镜形貌图像与光学常数理论谱、实验谱相结合, 分析讨论了 Cu-MgF₂ 复合薄膜的光学特性。结果表明: 去极化因子取值 0.33 的麦克斯韦-噶尼特(Maxwell-Garnett)模型可以较好地解释 Cu 体积分数为 15% 的 Cu-MgF₂ 复合薄膜的光学性质, 而去极化因子取值 0.6 的布鲁格曼(Bruggeman)模型可以较好地解释 Cu 体积分数为 30% 的 Cu-MgF₂ 复合薄膜的光学性质。

关键词: 薄膜光学; 光学性质; Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜; 有效介质近似; 光学常数

中图分类号: O484 文献标识码: A

Study on Applicability of Effective Medium Approximation to Optical Properties of Cu-MgF₂ Composite Nanoparticle Films

Wang Peihong^{1,2} Dai Xuhan¹ Zhao Xiaolin¹ Song Xueping² Sun Zhaoqi²

(1 National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)
(2 Anhui Provincial Key Laboratory of Information Materials and Devices, Anhui University, Hefei 230039)

Abstract: Cu-MgF₂ composite nanoparticle films with the copper volume fraction of 15% and 30% were prepared by radio-frequency magnetron co-sputtering technique. The transmission electron microscopy (TEM) images of Cu-MgF₂ composite films show that the films are mainly made of amorphous ceramic MgF₂ matrix with embedded Cu nanoparticles with various grain shapes. The optical constants spectra of the composite films are determined as a function of wavelength in the range of 270~830 nm by spectroscopic ellipsometry. The theoretical optical constants spectra of the composite films are calculated in the same wavelength range by effective medium approximation in which grain shape effect is incorporated. The optical properties of the two composite films are analyzed and discussed by combining TEM images with experimental and theoretical optical constants spectra. The conclusion is drawn that Maxwell-Garnett model in which the depolarization factor of Cu grains is 0.33 is suitable to explain the optical properties of 15% Cu-MgF₂ film, and the optical properties of 30% Cu-MgF₂ film may be better interpreted with the depolarization factor of Cu grains 0.6.

Key words: thin film optics; optical property; Cu-MgF₂ composite nanoparticle film; effective medium approximation; optical constants

1 引 言

现代科技的快速发展对材料的性能提出越来越

高的要求,也促进了以陶瓷为基体的复合纳米颗粒薄膜的发展。用来计算复合薄膜介电函数和描述复

* 国家自然科学基金(59972001)、安徽省自然科学基金(01044901)、安徽省人才专项基金(2004Z029)和安徽省信息材料与器件重点实验室开放课题基金资助课题。

作者简介: 王佩红(1978~),男,安徽阜阳人,安徽大学物理与材料科学学院讲师,上海交通大学博士研究生,主要从事薄膜材料制备及其光学特性和微机电系统研究。E-mail: wangpeihong2002@ahu.edu.cn

收稿日期: 2005-09-12; 收到修改稿日期: 2005-12-11

合薄膜光电特性的有效介质近似(Effective medium approximation, EMA)受到很大的重视,可被广泛地用来讨论多晶硅、非连续金属薄膜、纳米复合材料、多孔硅、磁性颗粒膜、无定形碳等各种材料的光学特性^[1~7]。但是,利用考虑颗粒形状效应的有效介质近似分析复合颗粒薄膜光学性质的文章还很少见^[8,9],而且有时一种有效介质近似模型并不能充分解释某些复合颗粒薄膜的光学特性。本文把三种考虑颗粒形状效应的有效介质近似模型麦克斯韦-噶尼特(Maxwell-Garnett)、布鲁格曼(Bruggeman)和洛伦兹-洛伦茨(Lorentz-Lorenz)模型与样品透射电镜形貌图像相结合来解释复合薄膜的光学特性,并把该方法应用到 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜中。分析讨论了两种不同组分比的 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜的光学特性,以寻求对 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜光学性质的理解和解释。

2 有效介质近似模型

由金属纳米颗粒镶嵌于绝缘介质基体(或半导体介质基体)而构成的复合材料的光电特性取决于金属和介质基体的介电函数以及各组分的体积百分含量,与之相对应的理论就是有效介质近似。描述有效介质近似的通用公式是

$$\frac{\epsilon - \epsilon_h}{\epsilon + Y\epsilon_h} = \sum_{i=1}^m q_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_1}{\epsilon_i + Y\epsilon_1}, \quad (1)$$

式中 ϵ_i 和 q_i 分别表示第 i 种材料的介电函数和体积百分含量, ϵ_1 表示第一种材料的介电函数, ϵ 和 ϵ_h 分别表示复合系统的有效介电函数和介质基体的介电函数, m 表示构成整个系统的材料的种类。 Y 是复合材料中纳米颗粒的形状因子。 ϵ_h 的取值由所选取的有效介质近似的类型决定。

如果把复合材料中的第一种材料看成是介质基体材料,即令 $\epsilon_h = \epsilon_1$,那么(1)式就变为

$$\frac{\epsilon - \epsilon_1}{\epsilon + Y\epsilon_1} = \sum_{i=1}^m q_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_1}{\epsilon_i + Y\epsilon_1}, \quad (2)$$

上式为麦克斯韦-噶尼特(MG)模型^[10]的计算公式。麦克斯韦-噶尼特模型是一种非对称结构模型,比较适用于复合材料中金属颗粒组分被介质基体包围的情况。

如果令(1)式中的 $\epsilon_h = \epsilon$,则(1)式变为

$$\sum_{i=1}^m q_i \frac{\epsilon_i - \epsilon}{\epsilon_i + Y\epsilon} = 0, \quad (3)$$

(3)式为布鲁格曼(BG)模型^[11]的计算公式。布鲁格曼模型是一种对称结构模型,即认为金属相和介

质相都镶嵌在有效介电函数为 ϵ 的等效介质中,比较适用于金属相和介质相在复合体系中随机分布的情况。

如果把基体材料看成是空气,即令 $\epsilon_h = 1$,则(1)式变为

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + Y} = \sum_{i=1}^m q_i \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + Y}, \quad (4)$$

(4)式为洛伦兹-洛伦茨(LL模型)^[12]的计算公式。洛伦兹-洛伦茨模型比较适用于含有空气相比较多的多孔材料。

上述各公式中的颗粒形状因子 Y 可表示如下:

$$Y = 1/L - 1, \quad (5)$$

(5)式中的 L 表示复合材料中纳米颗粒的去极化因子, $0 < L \leq 1$ 。不同的 L 值代表不同的纳米颗粒形状^[4,13]。当 $0 < L < 0.33$ 时,颗粒为轴旋转对称的伸长的椭球体乃至圆柱体;当 $L = 0.33$ 时,颗粒为球体,当 $0.33 < L < 1$ 时,颗粒为轴旋转对称的压扁的椭球体;当 $L = 1$ 时,颗粒为扁平圆盘体。

在光频范围,复合系统的光学复折射率 N 与有效介电函数 ϵ 之间的关系为

$$N = n + ik = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{\epsilon' + i\epsilon''}, \quad (6)$$

式中 n 、 k 、 ϵ' 和 ϵ'' 分别为复合系统的光学折射率、消光系数、有效介电函数的实部和虚部。由(6)式可解出

$$n = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \epsilon') \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$k = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon') \right]^{1/2}. \quad (8)$$

3 薄膜制备与测试

在实验中用银浆把细长形 Cu 片对称地贴到直径为 55.5 mm 的圆形 MgF₂ 靶上,根据靶中 Cu 和 MgF₂ 的面积比来控制样品中 Cu 的体积百分含量。用于椭偏光谱测量的样品基片为单抛 Si(111)晶片,用于透射电镜分析的样品淀积在 400 目铜网上的腹膜上。样品制备前将单抛 Si(111)晶片经超声清洗,后用烘箱烘干。用 JGP560 I 型超高真空多功能磁控溅射仪采用射频磁控溅射复合靶方法制备 Cu 体积分数分别为 15% 和 30% 的 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜(分别称为 1 号样品和 2 号样品)。基片温度为室温, MgF₂ 靶材和 Cu 片的纯度均为 99.99%,源基距为 6.0 cm,本底真空度为 5×10^{-4} Pa,氩气分压为 0.7 Pa,溅射电压为 RF650V,溅射电流为 0.2 A,溅射匹配功率为 100 W,反射功

率约为 6~10 W, 自偏压约为 -720 V, 薄膜沉积速

用 JEM-100SX 型透射电镜得到两样品的透射电镜明场形貌图像。用 RAP-I 型椭圆偏振光谱仪得到两样品在 270~830 nm 波段的椭圆偏振光谱(椭圆偏参量 ψ 、 Δ 随波长 λ 的变化)。由于样品属于环境介质-薄膜-基片系统, 椭圆偏参量与光学常数遵循的椭圆偏方程没有数值解^[14], 通过建立单层膜模型 (Air/Cu+MgF₂/Si), 用列维布格-麦奎尔特 (Levenberg-Marquardt) 全局优化算法拟合 Cu+MgF₂ 复合颗粒膜的厚度和光学常数, 用均方根误差 (RMSE) 作为检验拟合结果正确与否的标志。均方根误差的表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [(Y_{\text{target}_j} - Y_{\text{calc}_j})^2 \times \omega_j^2]}{\sum_{j=1}^n \omega_j^2}}, \quad (9)$$

其中 n 是实验值的个数, Y_{target} 是实验值, Y_{calc} 是计算值, ω 是每一个实验值对应的权重, 一般等于 1。通过计算机编程结合上述方法对样品的椭圆偏振光谱进行拟合和反演解谱得到两样品的厚度约为 600 nm。

4 结果与讨论

图 1 是两样品的透射电镜明场形貌图像。透射电镜图中的暗区代表 Cu 多晶, 亮区代表 MgF₂ 成分。结合微结构分析^[15]表明实验制备的薄膜由平均晶粒尺寸为 12.6 nm 和 17.8 nm, 具有不同颗粒形状的 fcc-Cu 晶态纳米微粒镶嵌于主要为非晶态的 MgF₂ 陶瓷基体中构成。从图 1(a) 可以看出, 含量较少的 Cu 纳米颗粒随机弥散于 MgF₂ 基体中, 大小不等的 Cu 纳米颗粒的形状都近似球体或椭球体。为方便计

率约为 0.4 nm/s。

算, 令 1 号样品中 Cu 纳米颗粒的去极化因子 L 分别为 0.2、0.33、0.4、0.5。图 1(b) 表明, 在 2 号样品中, Cu 含量明显增加, Cu 纳米颗粒迅速长大且分布密度增加, 同时大部分 Cu 纳米颗粒的形状从近似球体变成椭球体、圆柱体甚至部分发生联并。所以在理论计算时, 2 号样品中 Cu 纳米颗粒的去极化因子 L 分别取值 0.33、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8。

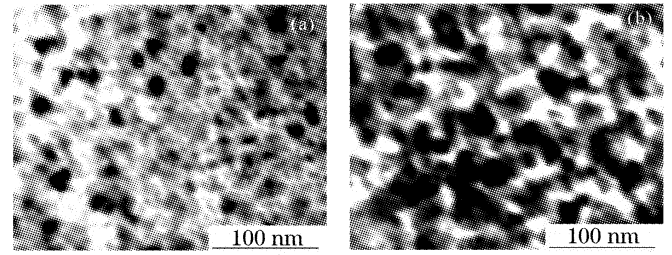


图 1 1 号样品(a)和 2 号样品(b)的透射电镜明场图像
Fig. 1 Transmission electron microscope (TEM) bright field image of sample 1 (a) and sample 2 (b)

使用有效介质近似模型计算样品的光学常数时, 还必须知道样品中各组分的介电函数。为保证结果的准确性, 分别采用直流溅射 Cu 靶和射频磁控溅射 MgF₂ 靶的方法制备了 Cu 厚膜和 MgF₂ 厚膜, 并利用椭圆偏振光谱技术计算得到二者的介电函数谱和光学常数谱, 光学常数谱见图 2。从图 2 可以发现, Cu 厚膜的消光系数很大, 折射率很小, 是一种吸收率很高的电学材料; 而 MgF₂ 厚膜的消光系数很小, 折射率很大, 是一种具有高透射率的光学材料。把 Cu 纳米颗粒去极化因子 L 的值、Cu 组分的体积分数和 Cu 厚膜及 MgF₂ 厚膜的介电函数代入 (2) 式~(4) 式, 得到两样品在 270~830 nm 波段的光学常数理论谱, 分别见图 3。两样品的的光学常

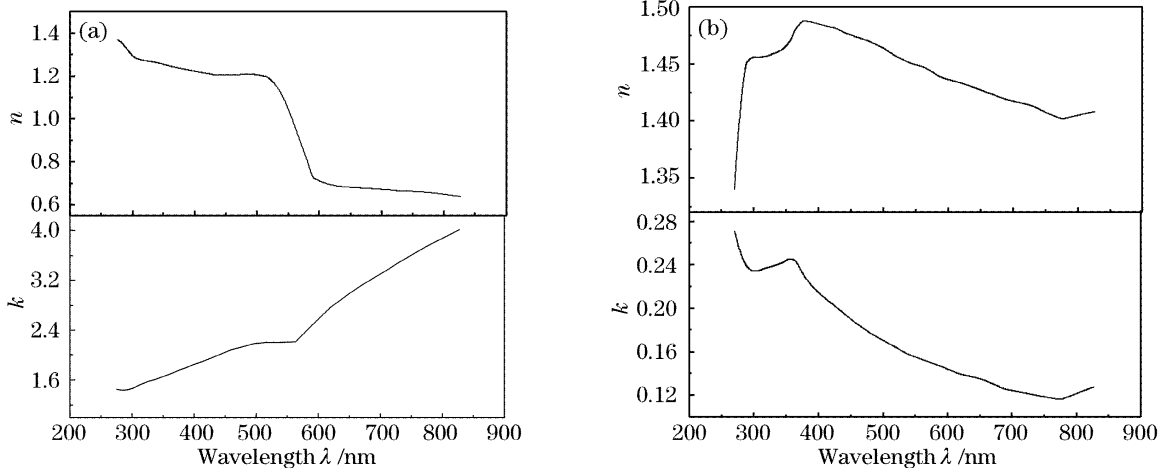


图 2 Cu 厚膜(a)和 MgF₂ 厚膜(b)的光学常数谱

Fig. 2 Optical constants spectra of Cu thick film (a) and MgF₂ thick film (b)

数实验谱在图 3(a)~图 3(f)中用实线表示,在图 3(g)~图 3(l)中用虚线表示。

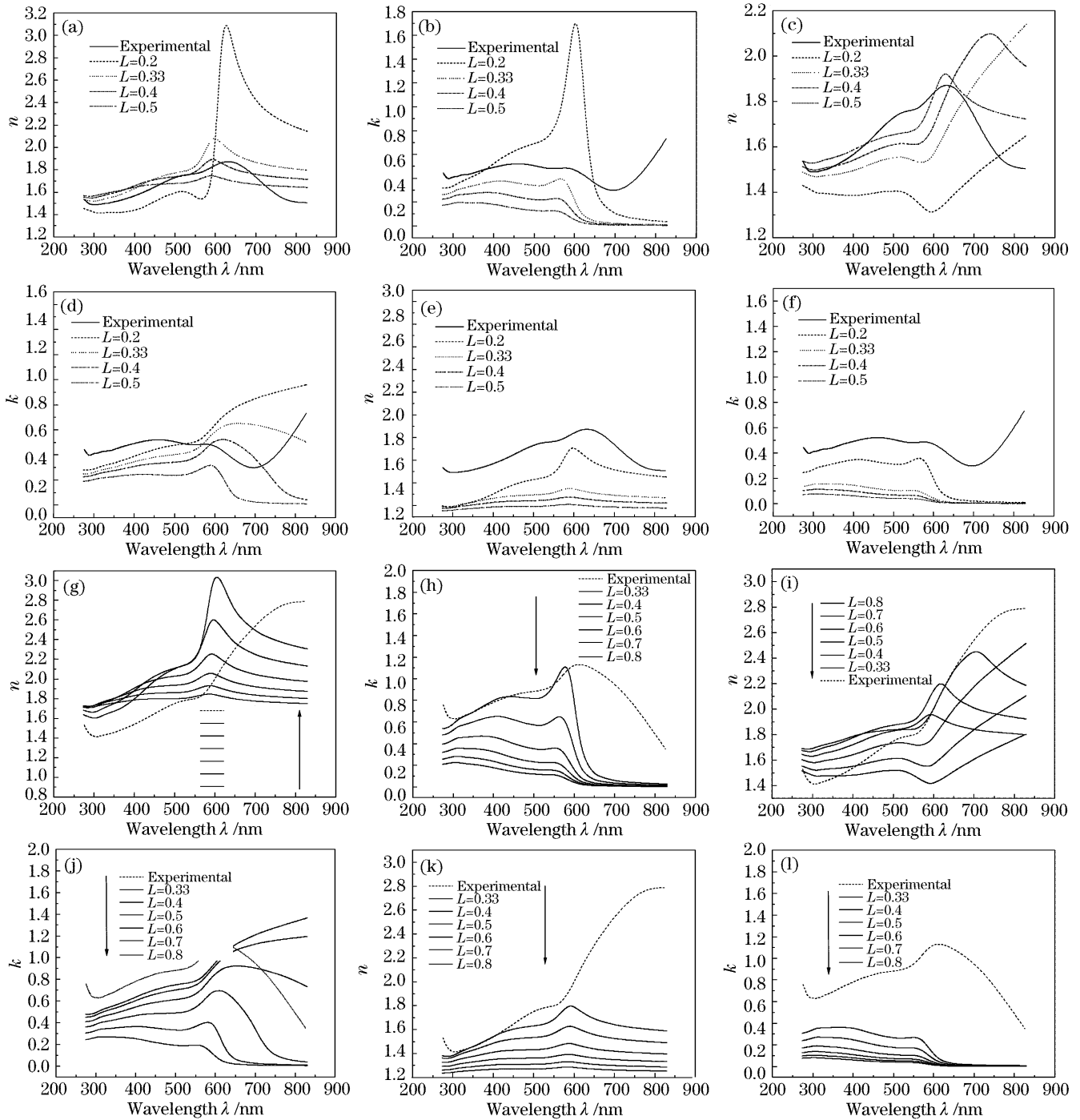


图 3 Cu 体积分数为 15% (a)~(f), 30% (g)~(l) 的 Cu-MgF₂ 复合薄膜光学常数的实验谱和由麦克斯韦-噶尼特模型 (a), (b), (g), (h), 布鲁格曼模型 (c), (d), (i), (j), 洛伦兹-洛伦茨模型 (e), (f), (k), (l) 计算得到的理论谱
Fig. 3 Experimental and Maxwell-Garnett (a), (b), (g), (h), Bruggeman (c), (d), (i), (j), Lorentz-Lorentz (e), (f), (k), (l), theoretical results of the optical constants of Cu volume fraction 15% (a)~(f), 30% (g)~(l) Cu-MgF₂ film

图 3(a), 图 3(b) 是 1 号样品的光学常数 (n, k) 实验谱和用麦克斯韦-噶尼特模型计算得到的理论谱。将实验谱线与理论谱线从曲线走势、峰位出现位置、数值接近程度等方面进行比较可以发现, $L=0.33$ 的麦克斯韦-噶尼特模型理论谱线与实验谱线整体上比较接近。图 3(c), 图 3(d) 是 1 号样品的光学常数实验谱和用布鲁格曼模型计算得到的理论谱。从曲线走势、极值出现位置、曲线是否存在交

叉等因素考虑可以发现, $L=0.5$ 的布鲁格曼模型理论曲线比较接近实验曲线。图 3(e), 图 3(f) 是 1 号样品的光学常数实验谱和用洛伦兹-洛伦茨模型计算得到的理论谱。从中明显看出, 只有 $L=0.2$ 的洛伦兹-洛伦茨模型理论曲线与实验曲线整体上比较接近。

每一种有效介质近似模型都有一条理论曲线比较接近实验曲线, 并不能确定哪一种理论更适合解

释 1 号样品的光学性质。但是,从 1 号样品的透射电镜分析中已知 Cu 颗粒确实呈大小不等的近似球形,而 $L=0.5$ 说明 Cu 颗粒的形状为一种伸长的椭球体(长短轴 $b/a \approx 0.2$)^[13]。理论计算中的颗粒形状与实际的颗粒形状明显存在差异,故不能用 $L=0.5$ 的布鲁格曼模型来解释 1 号样品的光学性质。另外,从 1 号样品的透射电镜分析中知道 Cu 纳米颗粒弥散于 MgF₂ 基体而非空气中,这与洛伦兹-洛伦茨模型的前提假设(基体材料为空气相)矛盾。所以,也不能用 $L=0.2$ 的洛伦兹-洛伦茨模型来解释 1 号样品的光学性质。因此,只有 $L=0.33$ 的麦克斯韦-噶尼特模型可以较好地解释 1 号样品的光学性质。

图 3(g),图 3(h)是 2 号样品的光学常数实验谱和用麦克斯韦-噶尼特模型计算得到的理论谱。从中可以看出,只有 $L=0.33$ 的理论曲线在 270~600 nm 波段比较接近实验曲线,但两者在 600 nm 之后差异太大。所以,麦克斯韦-噶尼特模型无法解释 2 号样品的光学性质。图 3(i),图 3(j)是 2 号样品的光学常数实验谱和用布鲁格曼模型计算得到的理论谱。 $L=0.5$ 和 $L=0.6$ 的理论曲线与实验曲线比较接近; $L=0.5$ 的理论曲线与实验曲线差别较大。所以, $L=0.6$ 的布鲁格曼模型理论谱线更接近实验谱线。图 3(k),图 3(l)是 2 号样品的光学常数实验谱和用洛伦兹-洛伦茨模型计算得到的理论谱。从中可以看出,无论是折射率,还是消光系数,每一条理论谱线都与实验谱线存在很大差异,而且这种差异随去极化因子的变大而增加。

通过上述分析比较可知, $L=0.6$ 的布鲁格曼模型理论谱线比较接近实验谱线,可以较好地解释 2 号样品的光学性质。同时,从前面对 2 号样品的透射电镜分析可以知道,2 号样品中 Cu 纳米颗粒的去极化因子 L 取值 0.6 应该是完全可行的。

从以上分析可以发现,单一的有效介质近似模型已经不能用来解释不同组分比的 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜的光学特性。在考虑了颗粒形状效应之后, $L=0.33$ 的麦克斯韦-噶尼特模型可以较好地解释 1 号样品的光学性质,而 $L=0.6$ 的布鲁格曼模型可以较好地解释 2 号样品的光学性质。但是两者的理论谱线与实验谱线都存在一定差距,其主要原因可能在于,样品中 Cu 纳米颗粒的形状不可能完全相同,用只有一位小数的去极化因子不能表示所有的颗粒形状,而且精度不够;理论模型未考虑复合薄膜体系中金属纳米颗粒的尺寸效应,但是当金

属微粒的粒径小于块材或者厚膜中传导电子的平均自由程时,金属微粒的介电函数与块材或厚膜介电函数之间的差异会明显加大;麦克斯韦-噶尼特模型和布鲁格曼模型都认为复合系统为二相系统,而实际的复合颗粒体系一般含有空气相,同时在薄膜制备及存放过程中 Cu 纳米颗粒可能发生一定的氧化,在薄膜中产生了 Cu 的氧化物;纳米颗粒在 MgF₂ 基体中不可能完全均匀分布,导致薄膜各部分的堆积密度不同。对上述原因的证实工作正在研究进行中。

5 结 论

采用射频磁控共溅射技术制备得到 Cu 体积分数分别为 15% 和 30% 的 Cu-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜。用椭偏光谱技术得到 Cu-MgF₂ 复合薄膜在 270~830 nm 波段的光学常数实验谱。用考虑颗粒形状效应的三种有效介质近似模型计算得到 Cu-MgF₂ 复合薄膜在相同波段的光学常数理论谱。本文将考虑颗粒形状效应的有效介质近似与样品的透射电镜形貌图象相结合分析讨论 Cu-MgF₂ 复合薄膜的光学性质。结果表明,去极化因子取值 0.33 的麦克斯韦-噶尼特模型可以较好地解释 Cu 体积分数为 15% 的 Cu-MgF₂ 复合薄膜的光学性质,而去极化因子取值 0.6 的布鲁格曼模型可以较好地解释 Cu 体积分数为 30% 的 Cu-MgF₂ 复合薄膜的光学性质。

参 考 文 献

- 1 E. Dobierzewska-Mozrzymas, J. Wójcik, P. Biegański *et al.*. Application of the effective medium theories to interpret the optical properties of Mn discontinuous films[J]. *Vacuum*, 1999, **54**(1~4): 289~293
- 2 F. Niu, B. Cantor, P. J. Dobson. Microstructure and optical properties of Si-Ag nanocomposite films prepared by co-sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 1998, **320**(2): 184~191
- 3 Zheng Yonglin, Zheng Ruilun. Research of magnetic granular film Faraday rotation angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1126~1130 (in Chinese)
郑勇林,郑瑞伦. 磁性颗粒膜法拉第转角的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1126~1130
- 4 C. Wongmanerod, S. Zangoie, H. Arwin. Determination of pore size distribution and surface area of thin porous silicon layers by spectroscopic ellipsometry[J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2001, **172**(1~2): 117~125
- 5 Jounghel Lee, R. W. Collins, V. S. Veerasamy *et al.*. Analysis of amorphous carbon thin films by spectroscopic ellipsometry[J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 1998, **227~230** (Part1): 617~621
- 6 Wu Zhongcheng, Peng Shuming, Yang Maonian *et al.*. Calculation of diffusion barriers for helium atom in vanadium by effective medium theory[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004,

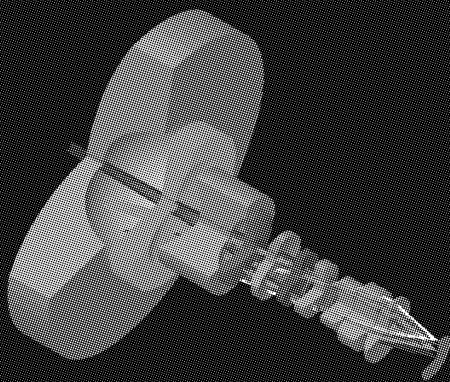
- 40(1): 36~39 (in Chinese)
 吴仲成, 彭述明, 杨茂年 等. 有效介质理论计算 He 原子在金属钒中的扩散行为[J]. 金属学报, 2004, 40(1): 36~39
- 7 Luo Renjun. Calculation of the reflectances of three-component composite films[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(7): 879~883 (in Chinese)
 罗仁俊. 三元复合表面膜反射光谱的计算[J]. 光学学报, 1997, 17(7): 879~883
- 8 Hao Du, Huang Chen, Jun Gong *et al.*. Use of effective medium theory to model the effect of the microstructure on dc conductivity of nano-titanium films[J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2004, 233(1~4): 99~104
- 9 Zhang Xu, Xue Zengquan, Wu Quande. Optical properties of very thin films of metal Ag[J]. *Acta Optica Sinica*, 1987, 7(7): 629~636 (in Chinese)
 张 旭, 薛增泉, 吴全德. 金属银极薄膜的光学特性[J]. 光学学报, 1987, 7(7): 629~636
- 10 J. C. Maxwell-Garnett. Colors in metal glasses and in metallic films[J]. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 1904, 203: 385~420
- 11 Jarkko J. Saarinen, Erik M. Vartiainen, Kai-Erik Peiponen. On tailoring of nonlinear spectral properties of nanocomposites having Maxwell-Garnett or Bruggeman structure[J]. *Opt. Rev.*, 2003, 10(2): 111~115
- 12 Salvador Bosch, Josep Ferré-Borrull, Norbert Leinfellner *et al.*. Effective dielectric function of mixtures of three or more materials: a numerical procedure for computations[J]. *Sur. Sci.*, 2000, 453(1~3): 9~17
- 13 Bao Keda. Effective-medium theory for electrical conductance of a two-phase composite medium with ellipsoidal-inclusions[J]. *Acta Physica Sinica*, 1992, 41(5): 833~840 (in Chinese)
 包科达. 含椭球包体多相复合介质电导率的有效介质理论[J]. 物理学报, 1992, 41(5): 833~840
- 14 R. M. A. Azzam, N. M. Bashrara. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. Liang Minji, Yin Shubai, Zhang Fuchu *et al.* transl., Beijing: Science Press, 1986. 179~198 (in Chinese)
 R. M. A. 阿查姆, N. M. 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光 [M]. 梁民基, 尹树百, 张福初 等译, 北京: 科学出版社, 1986. 179~198
- 15 Sun Zhaoqi, He Yuping, Song Xueping *et al.*. A study on the electrical conductivity of Cu-MgF₂ nanoparticle cermet films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(6): 1455~1460 (in Chinese)
 孙兆奇, 何玉平, 宋学萍 等. Cu-MgF₂ 复合纳米金属陶瓷薄膜的电导特性研究[J]. 物理学报, 2003, 52(6): 1455~1460

• 广告 •



光研科学有限公司

光学软件权威供应商



ZEMAX[®]
 光学设计软件

TFClac[®]
 薄膜设计软件

欢迎致电或浏览网页
 了解软件订购和课程安排详情

新加坡电话/传真: 65-65643659/65649627
 南京电话/传真: 025-57929358/57929359
 深圳电话: 0755-27698403

福州电话/传真: 0591-83730680/83721062
 北京电话/传真: 010-67126765/67113155
<http://www.wavelab-sci.com>