

铋铟合金薄膜的光学常数

姜来新¹ 逯鑫淼¹ 王阳¹ 吴谊群^{1,2}

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储实验室, 上海 201800)
(²黑龙江大学无机功能材料化学重点实验室(教育部), 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 铋铟合金薄膜是一种新型超分辨光学功能材料,了解它的基本光学性质对其在光学信息存储及光子器件应用方面具有重要意义。用磁控溅射法制备了不同成分的铋铟合金薄膜($\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x$, $X=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.88, 1$),用椭圆偏振法测量了薄膜的光学常数(折射率 n 和消光系数 k)。研究表明,在可见光波段(300~850 nm),铋铟合金膜的折射率和消光系数都随着铋含量的增加而减小,且薄膜折射率和消光系数同时随波长的增加而增加,折射率呈现反常色散特性。用原子力显微镜、X 射线衍射仪研究了成分变化对薄膜表面形貌和微结构的影响。研究表明,铋铟合金薄膜的微观结构呈现多晶态,晶化程度随着铋含量的增加而增加,这可能是影响其光学常数变化的主要因素。

关键词 薄膜;铋铟合金;光学常数;磁控溅射

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0907001

Optical Constants of Antimony-Bismuth Alloy Films

Jiang Laixin¹ Lu Xinmiao¹ Wang Yang¹ Wu Yiqun^{1,2}

(¹Laboratory of High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(²Key Laboratory of Functional Inorganic Material Chemistry, Ministry of Education,
Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract Antimony-Bismuth alloy is a new functional material for optical super-resolution. It is very important to understand its fundamental optical properties for its applications in optical memory and other photonic devices. Antimony-bismuth alloy films: $\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x$ ($X=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.88, 1$) are prepared by magnetron sputtering method. Optical constants (refractive index and extinction coefficient k) of these films are measured by spectroscopic ellipsometer. Results indicate that both refractive index n and extinction coefficient k of the SbBi alloy films decrease with rising concentration of bismuth in the visible wavelength range. The refractive index n of SbBi alloy films increase with increasing wavelength, showing the films possessed anomalous dispersion characteristics. The effects of bismuth composition on the surface morphology and microstructure of the films are studied by atomic force microscope and X-ray diffraction analysis respectively. The SbBi alloy films are at polycrystalline states and its crystallization extent increases with rising concentration of bismuth. This may be the major factor influencing its optical constants.

Key words thin films; antimony-bismuth alloy; optical constants; magnetron sputtering

OCIS codes 310.1860; 310.3840; 310.6860

1 引言

光学薄膜已广泛应用于激光器件、图像信息、信

息存储、光纤通信等诸多领域,而现代科学技术特别是信息存储、光纤通信技术的发展,对光学薄膜的性

收稿日期: 2012-05-02; **收到修改稿日期**: 2012-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61137002, 61178059)和上海市基础重点项目(11jc1413300)资助课题。

作者简介: 姜来新(1978—),男,博士研究生,主要从事光电功能材料方面的研究。E-mail: jiangshanwen@siom.ac.cn

导师简介: 吴谊群(1957—),女,博士,研究员,主要从事高密度光存储材料和光电子学功能材料与器件等方面的研究。

E-mail: yqw@siom.ac.cn(通信联系人)

能、可靠性及寿命的要求越来越高。因此,寻找满足相应技术领域性能要求的新型薄膜材料是一项重要的课题。在光信息存储领域,单单缩短读写激光波长或增加激光头的数值孔径,已经不能满足高密度信息存储的需要^[1],亟待发展突破光学衍射极限的超分辨技术。而从光学薄膜材料出发,合理设计超分辨薄膜结构可大大地提高存储密度^[2]。

铋是较早研究用作超分辨掩膜的材料^[2~4],Sb膜具有快速的相变转换时间,是优良的掩膜材料。但是,Sb膜只读式光盘较普通只读式光盘具有较高的超分辨读出阈值^[5,6]。铋具有优异的光学非线性性质,能会聚光斑减小记录点尺寸^[7,8]。但Bi的熔点较低,激光辐照时易受热熔融。铋铍合金是一种连续固溶体,依据成分比例的不同,它的物理性质在半金属和半导体间转变^[9,10],且熔点依成分不同在Sb和Bi之间。因此可以通过对成分的控制来剪裁合金薄膜的物理学性质以达到针对性应用的目的。由于SbBi合金具有较高的热电效率,目前对SbBi合金的研究多集中于热电和磁电性能的研究^[11~14]。研究表明,SbBi合金还是一种优良的光学薄膜材料^[15~17]。当SbBi合金薄膜作为光存储器件的超分辨读出的掩膜材料时,能在保证超分辨效果的前提下有效降低激光的读出功率^[6]。光学常数是光学薄膜重要的基本物理特性,是进行光学器件设计所必须的参数之一。然而,对SbBi合金薄膜的光学常数及其影响因素的系统研究报道甚少。本文报道了不同铋含量的SbBi合金薄膜的光学常数,用原子力显微镜(AFM)、X射线衍射仪(XRD)研究了成分变化对薄膜表面形貌和微结构的影响,讨论了SbBi薄膜光学常数与微观结构的相关性。

2 实验

使用中国科学院沈阳科学仪器厂的JGP450型高真空磁控溅射仪,以单晶硅为基片,采用Sb₉₀Bi₁₀、Sb₈₀Bi₂₀、Sb₇₀Bi₃₀和Sb₁₂Bi₈₈合金靶和Sb靶、Bi靶(纯度均为99.99%),在背景真空度为 1×10^{-4} Pa、溅射气压约为0.6 Pa,溅射功率为80 W,得到SbBi薄膜。测定不同组分SbBi薄膜的溅射速率,通过控制溅射时间,控制薄膜的厚度在50 nm左右。薄膜厚度用Alpha-Step 200(Tencor, USA)台阶仪测定,薄膜表面形貌采用原子力显微镜(USA Digital Instrument InC.)表征。

利用全自动椭圆偏振光谱仪(GES5E,法国Sopra公司)测得薄膜的椭圆偏参数,使用椭圆仪自带

的Winelli II软件对测量数据进行建模、拟合得到薄膜的光学常数。测量波长范围在300~850 nm,使用的光斑尺寸为3.5 μ m,测试步长为5 nm。采用D/MAX2550V型X射线衍射仪对合金薄膜进行微结构分析,衍射条件为:Cu靶射线($\lambda=0.154$ nm),加速电压40 kV,工作电流130 mA,扫描速度2($^{\circ}$)/min。

3 结果与讨论

3.1 铋铍合金薄膜的优化制备

溅射的各种工艺参数例如本底气压、工作气体的分压比、溅射气压、溅射功率、衬底与靶之间的距离、靶的结构及尺寸等都会影响薄膜的质量,从而影响薄膜的光学性能。沉积高质量的纯Bi和高Bi含量的合金薄膜一直是技术难点,经多次工艺摸索发现,对于不同比例成分的Sb₉₀Bi₁₀、Sb₈₀Bi₂₀、Sb₇₀Bi₃₀和Sb₁₂Bi₈₈合金薄膜制备,控制好溅射功率的大小,对获得高质量的合金膜是至关重要的。图1是在功率为130 W时,制备的约50 nm厚Sb₉₀Bi₁₀、Sb₈₀Bi₂₀、Sb₇₀Bi₃₀和Sb₁₂Bi₈₈膜的AFM图片,可以看到随着铋含量的增加薄膜的粗糙度依次增大。这是因为采用蒸镀和磁控溅射的方法制备铋薄膜容易产生与薄膜厚度量级相当的柱状晶粒,薄膜越厚,这种柱状晶粒越多而且越大,粗糙度也越大^[18]。图2是4种铋铍合金薄膜的均方根(RMS)粗糙度随铋含量增加时的变化情况,可以清楚地看到,Sb₉₀Bi₁₀膜的粗糙度为2 nm,膜面较光滑,而随着Bi含量的增加,粗糙度依次增加到。对于Sb₁₂Bi₈₈薄膜,构成连续固溶体的Bi含量占绝大部分,Sb₁₂Bi₈₈薄膜的粗糙度最大达到13 nm,这样粗糙度的薄膜是不能满足光学器件应用要求的。实验证明,当调低溅射功率到80 W时,Sb₁₂Bi₈₈膜的粗糙度得到显著改善,Sb₇₀Bi₃₀、Sb₈₀Bi₂₀、Sb₉₀Bi₁₀的均方根粗糙度能控制在3 nm以下。

3.2 铋铍合金薄膜的光学常数及微结构的影响

椭圆偏振光谱仪通过检测斜入射于样品的偏振光经反射后偏振态的变化来实现对薄膜材料光学参数的测量。定义复反射率比率 ρ 为

$$\rho = R_p/R_s = \tan \psi \exp(i\Delta), \quad (1)$$

式中 R_p 和 R_s 分别为偏振取向平行p和垂直s于入射平面的斜入射光的复偏振反射系数。 $\tan \psi$ 和 Δ 分别表示经过整个系统反射后光波中p分量和s分量的振幅比和相位差, ψ 和 Δ 为椭圆角。根据光在三相界面(空气/薄膜/基底)中的传播模型, ρ 为复折射率 $N(N=n-ik)$, n 和 k 分别为折射率和消光系

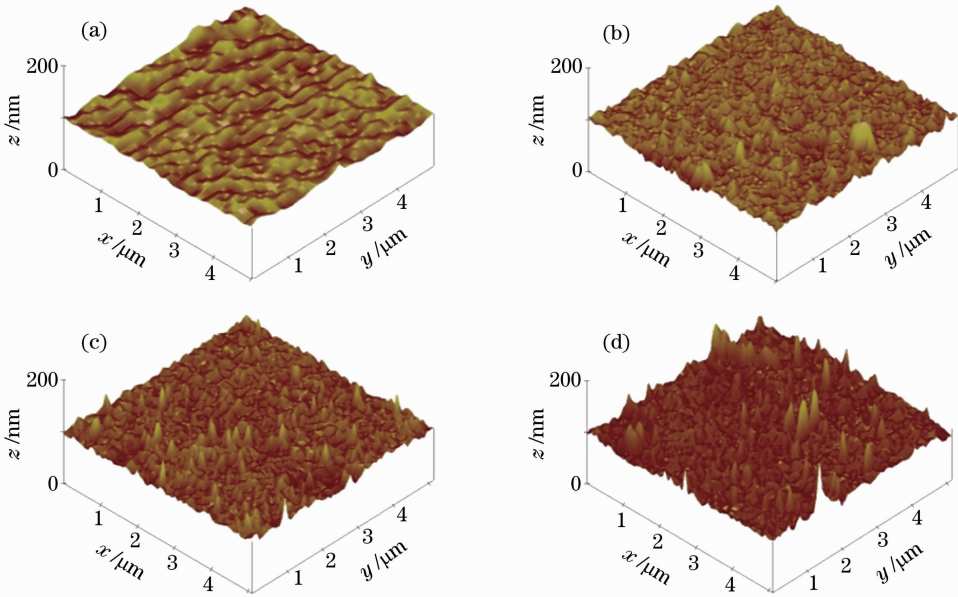


图 1 功率为 130 W 时,不同成分铋铟合金膜的表面粗糙度。(a) $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$; (b) $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$; (c) $\text{Sb}_{70}\text{Bi}_{30}$; (d) $\text{Sb}_{12}\text{Bi}_{88}$

Fig. 1 Surface roughness of SbBi alloy films with different compositions at power of 130 W. (a) $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$;

(b) $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$; (c) $\text{Sb}_{70}\text{Bi}_{30}$; (d) $\text{Sb}_{12}\text{Bi}_{88}$

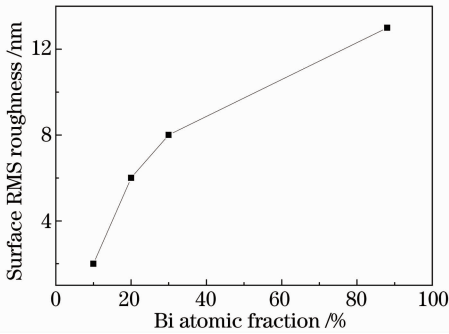


图 2 溅射功率为 130 W 时,铋铟合金薄膜的均方根粗糙度和铋含量间关系

Fig. 2 Root mean square roughness of SbBi films versus bismuth concentration at sputtering power of 130 W

数)和薄膜厚度 d 的函数。借助仪器自带的 WinElli_II 软件,主要利用洛伦兹色散理论、标准介电函数(柯西色散)和德鲁德散射来构造模型,对椭圆函数拟合,求得复折射率 N 。

图 3 给出了厚度都约 50 nm 的纯 Sb、纯 Bi 及各种成分 SbBi 合金薄膜的椭圆参数 ($\tan \psi$ 和 $\cos \Delta$) 的测试谱同理论计算拟合谱的比较,实线表示实验测试值,虚线表示用理论模型计算拟合时得到的值。使用均方根误差 σ 来表示实验测试值和拟合值之间的差别,6 个样品 Sb、 $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$ 、 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 、 $\text{Sb}_{70}\text{Bi}_{30}$ 、 $\text{Sb}_{12}\text{Bi}_{88}$ 和 Bi 薄膜的均方根误差 σ 值分别为 7.87×10^{-4} 、 6.59×10^{-4} 、 5.04×10^{-4} 、 4.67×10^{-4} 、 8.11×10^{-4} 和 10.00×10^{-4} ,表明这 6 个样品的测试值和拟合值间的误差很小。由图 3 也能看

出,椭圆参数的测试谱同理论拟合谱基本吻合,表明采用的薄膜样品结构模型和光学常数色散模型是合适的。

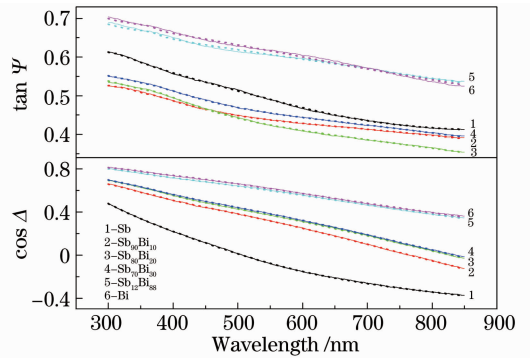


图 3 薄膜的光学参数 $\tan \psi$ 和 $\cos \Delta$ 随波长变化情况

Fig. 3 Optical parameter $\tan \psi$ and $\cos \Delta$ versus wavelength

图 4 和图 5 分别是拟合得到的 Sb、Bi、 $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$ 、 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 、 $\text{Sb}_{70}\text{Bi}_{30}$ 和 $\text{Sb}_{12}\text{Bi}_{88}$ 薄膜在 300~850 nm 波段范围的折射率 n 和消光系数 k 曲线。可以看出,薄膜的光学常数有以下基本变化规律:折射率和消光系数均随着波长的增加而增大,呈现反常色散特性;折射率和消光系数基本都随着铋含量的增加而减小,但在不同波段处表现出细微不同。

为更清楚地了解合金薄膜成分和光学常数间关系的波长依赖性,选取了 405、500、650、780 nm 等几个光存储常用波长处的折射率和消光系数随铋含量增加时变化情况,如图 6 和图 7 所示。4 种波长

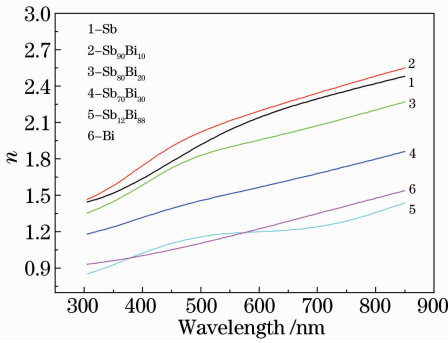


图 4 不同成分比例铋锑合金薄膜的折射率
Fig. 4 Refractive index of SbBi alloy films with different concentrations

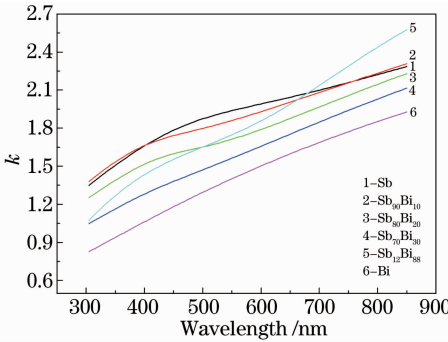


图 5 不同成分比例铋锑合金薄膜的消光系数
Fig. 5 Extinction coefficient of SbBi alloy films with different concentrations

下对应薄膜折射率随着铋含量增加有着相似变化趋势,如图 6 所示。当 Bi 的原子数分数从 0 增加至 10% 时, SbBi 合金薄膜的在 405、500、650、780 nm 波长下折射率分别由 1.65、1.92、2.23、2.40 增加至极大值 1.75、2.02、2.27、2.45; 而当 Bi 原子数分数增加至 30% 时, 薄膜的折射率各自迅速下降至 1.32、1.46、1.63、1.77, 较 10% 原子数分数时的折射率下降幅度分别达到 24.6%、27.7%、28.2%、27.8%; 当 Bi 原子数分数继续增加时, 薄膜的折射率也继续下降, 但下降幅度减缓; 当 Bi 原子数分数增至 88% 时, 折射率降至 1.03、1.16、1.21、1.33。当为纯 Bi 时, 薄膜折射率变化趋势略有不同: 波长在红光波段时, 薄膜折射率有小幅上升, 而波长为绿光和紫光时, 薄膜折射率继续小幅下降。如图 7 所示, SbBi 合金薄膜在不同波长下的消光系数随 Bi 原子数分数的变化趋势也基本相似: 当 Bi 的原子数分数在 0~30% 时, 薄膜的消光系数随 Bi 含量的增加而下降。但波长不同时, 下降幅度不同: 23.2% (405 nm)、21.4% (500 nm)、14.1% (650 nm) 和 9.55% (780 nm), 即波长越短, 下降幅度越大。当 Bi 的原子数分数在 30%~88% 时, 薄膜的消光系数随

Bi 含量的增加而增加。增加幅度随波长增加而增大。当 Bi 的原子数分数从 88% 到纯 Bi 时, 薄膜的消光系数随 Bi 含量的增加而减小。

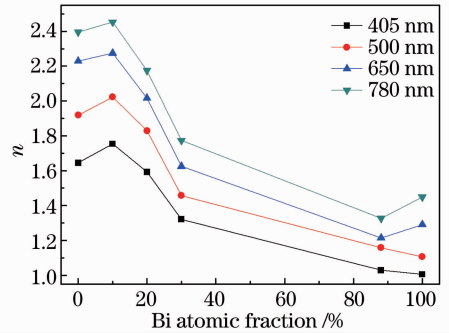


图 6 不同波长下折射率和 Bi 成分间的关系
Fig. 6 Refractive index of films versus Bi concentration with different concentrations

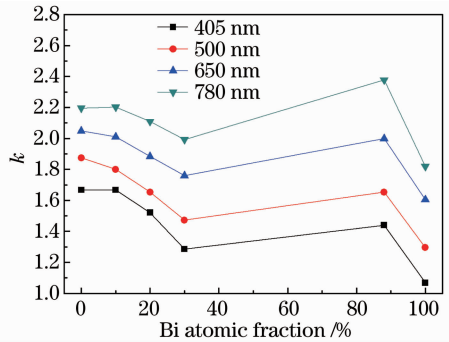


图 7 不同波长下消光系数和 Bi 成分间的关系
Fig. 7 Extinction coefficient of films versus Bi concentration with different concentrations

薄膜的光学常数取决于薄膜的微观结构, 特别和构成元素的离子种类、大小以及离子的排列状态(晶态、晶型、晶化程度)密切相关。所以不同化学成分二元合金薄膜的光学常数不能利用有效介质理论从单质薄膜光学常数按原子比简单计算获得, 这从图 6 和图 7 所示的不同成分薄膜光学常数随单质原子比的增加并不成线性变化即可看出。为了更好地理解光学常数的变化规律, 分析了成分对 SbBi 薄膜微结构的影响。

图 8 所示为厚度同为 50 nm, 未退火的, 沉积态的 $Sb_{90}Bi_{10}$, $Sb_{80}Bi_{20}$, $Sb_{70}Bi_{30}$ 和 $Sb_{12}Bi_{88}$ 薄膜的 XRD 衍射图谱。SbBi 合金和元素原子 Sb、Bi 一样, 都属于 Rm 空间点阵, 可以通过六角晶胞来描述^[19]。由图可以看出 SbBi 合金薄膜主要以多晶的形式存在, 虽然有些衍射峰没有出现, 但所有出现衍射峰位对应的晶面都符合六角晶系的特征。随着 Bi 含量的增加, 合金薄膜衍射图谱呈现两个明显的特征。首先是相同晶面的衍射峰的峰位发生偏移,

随着 Bi 含量的增加,峰位向左移动,即衍射角度 2θ 值变小。比如 Bi 原子数分数为 10% 时,(012) 晶面衍射角度为 28.624° ,原子数分数增加到 20% 时,角度减小到 28.221° ,原子数分数增加到 30% 时,角度继续减小到 28.019° ,当 Bi 的原子数分数一直增加到 88% 时,(012) 晶面的衍射角度减小到 27.280° 。晶面(003)对应的衍射峰位也有相同变化趋势, $Sb_{90}Bi_{10}$ 膜的衍射峰的角度为 23.430° ,而 $Sb_{12}Bi_{88}$ 膜的角度减小到 22.473° 。晶面间距 d 可由布拉格公式 $2d\sin\theta=\lambda$ 计算得到, θ 是 X 射线与晶面的交角, λ 是 X 射线的波长。表 1 列出经计算得到的 4 种成分的合金薄膜的各晶面间距和纯 Sb、纯 Bi 的 XRD 标准卡片的对比。可以看出,合金的各个晶面间距 d 的变化趋势正好和 2θ 相反,即随着 Bi 含量的增

加,从纯 Sb 到纯 Bi 薄膜,各晶面的晶面间距 d 依次增大。这与文献[20]的报道相一致。

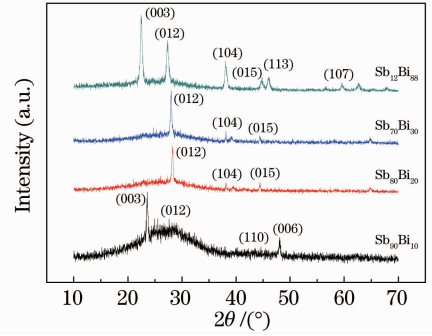


图 8 $Sb_{90}Bi_{10}$, $Sb_{80}Bi_{20}$, $Sb_{70}Bi_{30}$, $Sb_{12}Bi_{88}$ 薄膜的 XRD 表征

Fig. 8 XRD characterization of $Sb_{90}Bi_{10}$, $Sb_{80}Bi_{20}$, $Sb_{70}Bi_{30}$, $Sb_{12}Bi_{88}$ films

表 1 $Sb_{90}Bi_{10}$, $Sb_{80}Bi_{20}$, $Sb_{70}Bi_{30}$, $Sb_{12}Bi_{88}$ 薄膜的 XRD 结果

Table 1 XRD data of $Sb_{90}Bi_{10}$, $Sb_{80}Bi_{20}$, $Sb_{70}Bi_{30}$, $Sb_{12}Bi_{88}$ films

Sb in PDF # 35-0732				$Sb_{90}Bi_{10}$		$Sb_{80}Bi_{20}$		$Sb_{70}Bi_{30}$		$Sb_{12}Bi_{88}$		Bi in PDF # 85-1329		
d /nm	hkl	Int-f		d /nm	Error	d /nm	Error	d /nm	Error	d /nm	Error	d /nm	hkl	Int-f
1	0.3753	003	25	0.3794	± 0.00022					0.3953	± 0.00001	0.3954	003	6
2	0.3538	101	4									0.3737	101	2
3	0.3109	012	100	0.3116	± 0.00009	0.3160	± 0.0001	0.3182	± 0.0001	0.3266	± 0.00037	0.3280	012	100
4	0.2248	104	70			0.2356	± 0.0012	0.2357	± 0.0005	0.2363	± 0.00010	0.2369	104	27
5	0.2152	110	56	0.2151	± 0.00004							0.2273	110	29
6	0.1929	015	12			0.2037	± 0.0028	0.2040	± 0.0011	0.2027	± 0.00004	0.2032	015	5
7	0.1878	006	35	0.1896	± 0.00019							0.1976	006	6
8	0.1770	202	26							0.1967	± 0.00080	0.1971	113	6
9	0.1479	107	13									0.1869	202	13
10	0.1416	116	63							0.1552	± 0.00030	0.1557	107	3
11	0.1368	122	67									0.1515	205	1
12	0.1318	018	30									0.1492	116	8

Sb、Bi 及它们的合金都属于六角晶系,对于纯 Sb, a 为 0.4308 nm , c 为 1.1274 nm ;对于纯 Bi, a 为 0.4547 nm , c 为 1.1862 nm ^[21],以上数值都对应的是块体材料。XRD 测试结果发现, a 值基本在 Sb 和 Bi 所对应 a 值之间,但 c 值多超出了纯的 Sb、Bi 所对应值,且 a 和 c 值同成分间没有严格的变化规律,这说明 SbBi 合金薄膜与块体材料相比产生严重的晶格畸变。但是,它们的晶胞体积 $V=\frac{\sqrt{3}}{2}ca^2$,它随着 Bi 含量的增加而增大,如图 9 所示。这主要是由于 Sb 和 Bi 两种元素原子半径不同,经传统方法测量得到的半径分别为 145 pm 和 160 pm ^[22],Bi 的原子半径略大,两者原子半径误差 $\Delta r=|r_A-r_B|/r_A=0.09<0.14$,因此形成连续固溶体。对于 $Sb_{90}Bi_{10}$, $Sb_{80}Bi_{20}$ 和 $Sb_{70}Bi_{30}$ 薄膜,Bi 为溶质原子,Sb 为

溶剂原子,引起晶格膨胀,产生晶格正畸变,所以 $Sb_{90}Bi_{10}$ 薄膜各晶面的间距 d 值都大于纯 Sb,反映在 XRD 图谱上,相对应晶面的衍射峰的峰位向左移,晶胞体积也大于 Sb;而对于 $Sb_{12}Bi_{88}$,正相反,Sb 为溶质原子,Bi 为溶剂原子,溶质原子半径小于溶剂

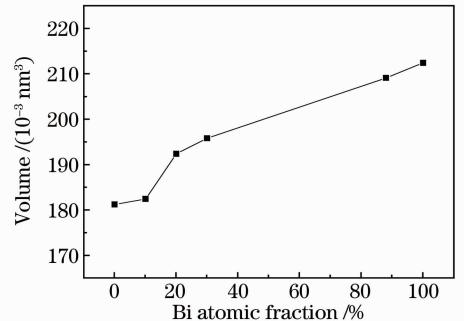


图 9 晶胞体积随铋含量变化情况

Fig. 9 Crystal cell volume versus Bi concentration

原子半径,引起晶格收缩,产生晶格负畸变,因此 $\text{Sb}_{12}\text{Bi}_{88}$ 薄膜的各晶面间距都小于纯 Bi,但仍然大于 $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$ 和 Sb,导致峰位向右移,晶胞体积小于纯 Bi。

图 8 所反映的另一个明显特征是,随着 Bi 含量的增加,沉积态的合金薄膜的晶化程度增加。 $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$ 膜衍射图在 20° 到 35° 间呈现一个很大的非晶包,说明此合金膜中,非晶态占有相当大的比例。当 Bi 原子数分数增加到 20% 和 30% 时,非晶包逐渐变小,薄膜的晶化程度大大增加。当 Bi 原子数分数占到 88% 时,衍射峰不仅数量增多,其强度也比前面三种合金强。文献[23]报道,当 Bi 的原子数分数高于 15% 时, SbBiTe 膜在室温条件下即由非晶态转变为晶态。Bi 在 SbBi 合金中也表现出类似的性质,说明 Bi 原子的加入使沉积态的 SbBi 合金膜的晶化程度逐渐增加。

晶态具有严格周期性格点排列,电子运动是公有化的,其 Bloch 波函数扩展在整个晶体中,这种态被称为扩展态。对于非晶态,存在随机的无序杂质,晶格的周期性被破坏,此时电子波函数不再扩展在整个晶体中,而是局域在杂质的周围,在空间中按指数形式衰减,这种态称为局域态。局域态是和无序关联着,如纯 Sb 薄膜,对应着高浓度的不饱和键或者缺陷。当 Bi 的含量增加时,沉积态薄膜晶化程度逐渐增加,不饱和键浓度降低,缺陷减少,局域化密度降低,如纯 Bi 薄膜。因此, SbBi 合金薄膜的光学常数 n 和 k 会随着 Bi 含量的增加而降低。这与文献[23,24]中所报道的薄膜局域态对光学常数的影响规律相符。

4 结 论

SbBi 合金薄膜是一种新型的超分辨光学薄膜材料,在信息存储等方面具有重要的应用价值。用磁控溅射方法制备了 Sb 、 $\text{Sb}_{90}\text{Bi}_{10}$ 、 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 、 $\text{Sb}_{70}\text{Bi}_{30}$ 、 $\text{Sb}_{12}\text{Bi}_{88}$ 和 Bi 薄膜。通过溅射工艺优化有效地降低了含 Bi 合金薄膜的表面粗糙度。用椭圆偏法研究了 SbBi 合金薄膜在可见光波段的光学常数 n 和 k 随成分的变化规律,基本上随 Bi 含量的增加, n 和 k 值均减小,XRD 分析表明,这和合金薄膜的晶化程度紧密相关。研究结果为 SbBi 合金在功能器件上的应用起参考作用。

参 考 文 献

- 1 J. Tominaga, T. Nakano. Optical Near-Field Recording[M]. Berlin; Springer-Verlag, 2005. 1~3
- 2 J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato *et al.*. The characteristics and

- the potential of super resolution near-field structure[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**(2B): 957~961
- 3 J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato *et al.*. The near-field super-resolution properties of an antimony thin film[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(11A): L1323~L1325
- 4 D. P. Tsai, C. W. Yang, C. L. Wei *et al.*. Dynamic aperture of near-field super resolution structures [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**(2B): 982~983
- 5 P. Asthana, B. Finkelstein, A. A. Fennema. Rewritable optical disk drive technology[J]. *IBM J. Res. Dev.*, 1996, **40**(5): 543~558
- 6 L. X. Jiang, Y. Q. Wu, Y. Wang *et al.*. Low-power super-resolution readout with antimony bismuth alloy film as mask layer [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(2): 024214
- 7 Z. Pan, S. H. Morgan, D. O. Henderson *et al.*. Linear and nonlinear optical response of bismuth and antimony implanted fused silica: Annealing effects[J]. *Opt. Mater.*, 1995, **4**(6): 675~684
- 8 F. Zhang, W. D. Xu, Y. Wang *et al.*. Static optical recording properties of super-resolution near-field structure with bismuth mask layer [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(11A): 7802~7806
- 9 N. B. Brandt, Y. G. Ponomarev, S. M. Chudinov. Investigation of the gapless state in bismuth-antimony alloys[J]. *J. Low Temperature Physics*, 1972, **8**(5): 369~420
- 10 Y. M. Lin, O. Rabin, S. B. Cronin *et al.*. Semimetal-semiconductor transition in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloy nanowires and their thermoelectric properties[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(13): 2403~2405
- 11 S. Cho, A. DiVenere, G. K. Wong *et al.*. Thermoelectric transport properties of n-doped and p-doped $\text{Bi}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ alloy thin films[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(7): 3655~3660
- 12 R. C. Mallik, V. D. Das. Study of structural-, compositional-, and thickness-dependent thermoelectric and electrical properties of $\text{Bi}_{93}\text{Sb}_7$ alloy thin films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(2): 023710
- 13 R. C. Mallik, V. D. Das. Size- and temperature-dependent thermoelectric and electrical properties of $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ alloy thin films [J]. *Vacuum*, 2005, **77**(3): 275~285
- 14 S. Muller, C. Schotz, O. Picht *et al.*. Electrochemical synthesis of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ nanowires with simultaneous control on size, composition, and surface roughness [J]. *Crystal Growth & Design*, 2012, **12**(2): 615~621
- 15 T. F. Wu, C. H. Zhou, L. X. Jiang *et al.*. Ultrafast dynamics of $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$ film studied by femtosecond pump-probe technique [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(21): 4383~4386
- 16 Jiang Laixing, Wu Yiqun, Wang Yang *et al.*. Super-Resolution Read-Only-Memory Disc with Antimony Bismuth Alloy Phase-Change Mask[P]. China Patent; 200810202974. 2
姜来新, 吴谊群, 王 阳 等. 铋铟相变合金掩膜只读式超分辨光盘[P]. 中国专利; 200810202974. 2
- 17 Lu Xinmiao, Wu Yiqun, Wang Yang *et al.*. Super-Resolution Read-Only-Memory Disc with Bismuth-Doped Antimony-Based Mask[P]. China Patent Application; 201110148478. 5
逯鑫淼, 吴谊群, 王 阳 等. 铋掺杂铋基掩膜只读式超分辨光盘 [P]. 中国专利申请号; 201110148478. 5
- 18 T. Missana, C. N. Afonso. Microstructure and roughness improvement of polycrystalline Bi thin films upon pulsed-laser melting[J]. *Appl. Phys. A-Mater. Sci. & Process.*, 1996, **62**(6): 513~518
- 19 C. Suryanarayana, M. Grant Norton. X-Ray Diffraction: a Practical Approach[M]. Netherlands; Springer, 1998. 27
M. J. Buerger. X-Ray Crystallography[M]. New York; John Wiley & Sons, 2007. 68
- 20 H. Berger, B. Christ, J. Troschke. Lattice parameter study in

- the $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ solid-solution system[J]. *Cryst. Res. & Technol.*, 1982, **17**(10): 1233~1239
- 21 D. Schiferl, C. S. Barrett. The crystal structure of arsenic at 4.2, 78 and 299 K[J]. *J. Appl. Cryst.*, 1969, **2**(1): 30~36
- 22 J. C. Slater. Atomic radii in crystals[J]. *J. Chem. Phys.*, 1964, **41**: 3199~3204
- 23 R. E. Simpson, D. W. Hewak, P. Fons *et al.*. Reduction in crystallization time of Sb:Te films through addition of Bi[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(14): 141921
- 24 Xinsen Lu, Yiqun Wu, Yang Wang *et al.*. Optical characterization of antimony-based bismuth-doped thin films with different annealing temperatures[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(10): 102101

栏目编辑:韩 峰