

文章编号: 0258-7025(2006)06-0832-05

飞秒脉冲激光沉积 Si 基 a 轴择优取向的 钛酸铋铁电薄膜

周幼华^{1,2}, 郑启光¹, 杨 光¹, 戴能利¹, 陆培祥^{1*}

(¹ 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; ² 江汉大学物理与信息工程学院, 湖北 武汉 430056)

摘要 在钛酸铋($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$)薄膜的制备过程中容易获得晶粒 c 轴垂直于基片表面的薄膜, 而压电和铁电存储器主要利用 a 轴的自发极化分量, 因而制备 a 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 铁电薄膜具有特别的意义。采用飞秒脉冲激光作用在钛酸铋陶瓷靶上, 采用 Si(111) 作为衬底, 制备了 a 轴择优取向的钛酸铋薄膜。采用 X 射线衍射(XRD)的薄膜附件和场发射扫描电镜(FSEM)研究了薄膜的结构和形貌; 采用傅里叶红外光谱仪测量了室温(20 °C)下在石英基片上沉积的样品的光学特性; 室温下沉积的钛酸铋薄膜呈 c 轴择优取向, 晶粒的平均大小为 20 nm, 其光学禁带宽度约为 1.0 eV。在 500 °C 沉积的钛酸铋薄膜呈 a 轴择优取向, 晶粒大小在 30~300 nm 之间, 薄膜的剩余极化强度 P_r 为 15 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 矫顽力 E_r 为 48 kV/cm。

关键词 薄膜; 铁电薄膜; 钛酸铋; 脉冲激光沉积法; 飞秒

中图分类号 O 484.1 文献标识码 A

a -Axis Oriented $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Thin Films Deposited on Si(111) by Femtosecond Laser Ablation

ZHOU You-hua^{1,2}, ZHENG Qi-guang¹, YANG Guang¹, DAI Neng-li¹, LU Pei-xiang¹

¹ State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Physics & Information School, Jianghan University, Wuhan, Hubei 430056, China

Abstract The crystalline grains of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films are tended to c -axis-orientation in a usually deposited process on planar substrates, but the piezoelectric and ferroelectric storage devices largely utilize the a -axis-oriented component of spontaneous polarization. So, it is importance to investigate the way to gain a -axis-oriented $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films. The polycrystalline $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films successfully prepared by femtosecond laser deposition on Si(111) wafers are reported in this paper. The structural properties and crystallographic orientation of the films were investigated by X-ray diffraction (XRD) method in 2θ only scan, the surface morphology of the films was observed using the field scanning electron microscope (FSEM). The $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin film deposited at room temperature (20 °C) was highly c -axis-oriented; but the film deposited at 500 °C was highly a -axis-oriented. It was observed that the films were composed of well-distributed grains, the grains of the 20 °C-sample was about 20 nm in diameters, the grains of the 500 °C-sample was 30~200 nm, large particles ($\geq 1 \mu\text{m}$) were not found in the surface of the two samples. A Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) was used to measure the transmittance and reflectance of the film deposited on quartz at room temperature, and then to determine the optical forbidden gap of the film, the optical forbidden gap of it was 1.0 eV. The remnant polarization (P_r) of the a -axis-oriented sample was measured to be 15 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ by RT-66A the coercive force (E_r) was 48 kV/cm.

Key words thin film; ferroelectric film; $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$; pulsed laser deposition; femtosecond

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-02-17

基金项目: 武汉市政府晨光计划(20035002016-15)和华中科技大学激光国家重点实验室基金资助项目。

作者简介: 周幼华(1969—), 男, 湖北嘉鱼人, 华中科技大学博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用、功能材料方面的研究。E-mail: yhzhou@jhun.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lupeixiang@mail.hust.edu.cn

1 引言

钛酸铋($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$)作为典型层状结构的铁电材料,具有优良的压电、铁电、热释电和电光等性能,其居里温度高达 $675\text{ }^\circ\text{C}$,同时还具有较高的耐击穿强度和相对低的介电常数,可广泛应用于动态随机存取存储器(DRAM)、熔丝式随机存取存储器(FRAM)、铁电场效应晶体管(FEFET)、光存储器和光显示器等光电子器件^[1]。 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 晶体的自发极化在 a - c 平面,在 a 轴的极化分量占主要部分。压电和铁电存储器主要利用 a 轴的自发极化分量,然而, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 晶粒在 a 轴和 b 轴生长比 c 轴快,实际制备薄膜的过程中容易获得晶粒 c 轴垂直于衬底平面的薄膜材料,因而制备 a 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 铁电薄膜具有特别的意义^[2,3]。

常用的制备 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的方法有金属有机化学气相沉积法(MOCVD)^[4,5]、溶胶-凝胶(Sol-Gel)法^[6,7]、溅射法(Sputtering)和脉冲激光沉积法(PLD)等^[8~10]。已经在多种衬底上外延生长出 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 铁电薄膜,并对薄膜的铁电性、开关特性、疲劳特性和记忆保持力进行了研究。脉冲激光沉积法以其生长速率快、沉积参数易调、适合生长复杂组分薄膜等优点,首先在高温超导薄膜的研制上获得成功,现已被广泛用于其他氧化物薄膜材料的制备^[11,12]。但是脉冲激光沉积技术制备的薄膜中存在一些微米级的微粒,制约了它的应用;近来飞秒激光系统被引入到沉积固体薄膜,与纳秒脉冲激光相比,功率密度远高于材料剥离的阈值功率密度。激光对靶材的作用不再对激光光斑的大小过于敏感,其相互作用主要以多光子电离为主,沉积过程中的热扩散效应比纳秒脉冲激光沉积要弱得多。目前飞秒激光技术用于制备化合物薄膜的报道不多,主要集中在用飞秒脉冲激光沉积氮化物(TiN, BN), ZnO, SnO_2 , $\beta\text{-FeSi}_2$ ^[13~15]。国内外少见飞秒激光技术制备 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的报道。

本文通用脉冲激光沉积系统引入飞秒脉冲激光束制备了硅基 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜,获得了高 a 轴取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜;采用X射线衍射(XRD)和场发射扫描电镜(FSEM)研究了薄膜的结构特性和表面形貌;通过测量薄膜的 P - E 特性证实了 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的铁电性。

2 薄膜的制备

实验采用通用型的脉冲激光沉积镀膜机(如图

1),用一台钛宝石飞秒激光器作为激光源。激光的输出波长 800 nm ,脉宽 50 fs ,重复频率 1000 Hz ,最大输出单脉冲能量 2 mJ 。沉积过程中激光的单脉冲能量 0.5 mJ ,靶面上光斑大小不超过 $0.5\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$,相应的能量密度为 1.4 J/cm^2 ;激光束与靶面成 45° 角。为了避免靶材被激光烧蚀过快,以及由此而造成的激光束离焦,薄膜生长过程中靶材以 10 circle/min 速度自转。由于飞秒脉冲激光束在 1 s 内在靶材同一位置引起的刻蚀 $<10\text{ }\mu\text{m}$,在薄膜沉积时间(10 min)内,同时引入靶材的公转就不会造成较大的离焦量,从而保证沉积层的均匀性和工艺的重复性。

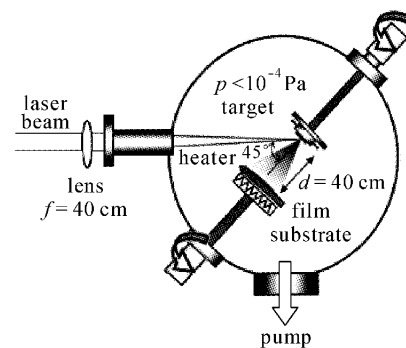


图1 脉冲激光沉积薄膜装置的剖面图

Fig. 1 Sketch of pulse laser deposition system

采用 p 型 $\text{Si}(111)$ ($8\sim 13\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$)作为基片,衬底固定在可以旋转的衬托上,转动的基台使得等离子体羽辉在衬底上均匀扫描;真空室气压小于 $3.0 \times 10^{-4}\text{ Pa}$,沉积时间为 20 min ,薄膜的厚度约 300 nm 。

靶材采用分析纯 Bi_2O_3 , TiO_2 为原料,按物质的量比 $n(\text{Bi}) : n(\text{Ti}) = 1.40 : 1$, Bi 过量 7% 配制,按标准陶瓷工艺制备 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 陶瓷圆片,并在马弗炉中在 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结 2 h ,然后自然冷却到室温,表面抛光后备用。

一个 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜样品在室温($20\text{ }^\circ\text{C}$)下沉积在 $\text{Si}(111)$ 衬底上,另一薄膜样品则是在 $500 \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 下沉积在 $\text{Si}(111)$,并保温 30 min 后自然冷却至室温。

薄膜的结构用带有薄膜附件的X射线衍射(χ 'Pert PRO, PANalytical B. V.)分析,薄膜的表面形貌用场发射扫描电镜(FSEM Sirion 200 FEI.)观察,薄膜的光学性能用傅里叶红外光谱仪(FT-IR NEXUS Thermo Nicolet)测量,薄膜的铁电性能由RT66A专用铁电测试仪(Radiant Technologies)在

虚地模式下测得。

3 结果与讨论

3.1 飞秒激光与靶材的相互作用

飞秒激光束聚焦在靶材上,在光斑区产生的等离子体羽的颜色有3层,内芯为白色,紧跟在内芯外面的是浅蓝色,最外层是暗黄色。图2是用数码相机在黑暗环境下拍摄的等离子体羽照片(灰度),曝光时间为8 s,对应的飞秒脉冲次数为 8×10^3 个脉冲。从图2中可看出聚焦后的光斑8 s内的总效果:靶材表面喷出的等离子体羽均匀地扫过基片,这说明利用该装置可以在衬底所在区域获得均匀的薄膜。飞秒激光与靶材的相互作用主要以多光子电离为主,从等离子体羽的颜色和亮度变化可以推断薄膜沉积的大致机制:图中内芯对应的是高温等离子体区,主要以等离子体的形态存在;紧跟内芯的浅蓝色区是等离子体的复合形成中性粒子的区域;暗黄色的区域是较高温度的中性粒子和低温等离子体区,然后沉积在基片上形成薄膜。

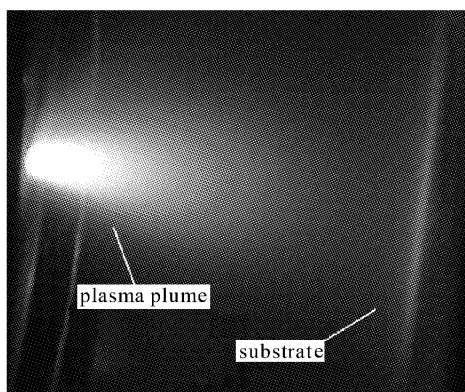


图2 曝光8 s(8×10^3 个脉冲)的等离子体羽照片
Fig. 2 Image of plasma plume (exposal time=8 s)

3.2 薄膜样品的 X 射线衍射分析

薄膜样品的 X 射线衍射分析采用 χ' Pert PRO 装置的薄膜附件,单一 2θ 模式扫描。图3是在室温(20 °C)和 500 ± 0.5 °C下,在 Si(111)基片上制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜样品的 X 射线衍射谱。图3中显示室温样品最强的峰为 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 的(0010)晶面衍射峰,还有(008), (0014), (0016), (0020), (0024)晶面衍射峰。此外,也出现了(125)和其他几个较小的衍射峰,没有靶材的(117)峰。说明了在室温下生长的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜是高 c 轴取向的多晶膜。根据 Lotgering 定义^[3],取向度 $F = (P - P_0)/(1 - P_0)$,

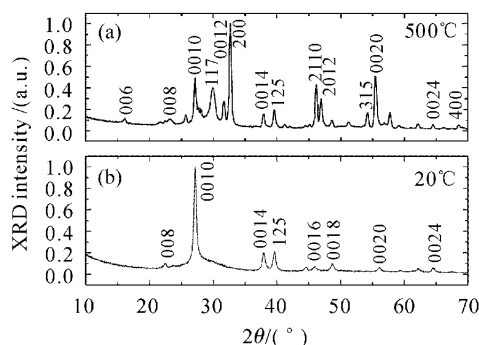


图3 室温(a)和500 °C(b)制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的衍射图

Fig. 3 XRD pattern of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films deposited on Si(111) at 20 °C (a) and 500 °C (b)

其中 P_0 为无择优取向时某晶面的衍射强度与全部衍射强度之比, P 为有择优取向时的同一比值。计算出室温下制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜样品的(001)取向度为0.71。

由于在室温下制备的薄膜基片之间的热应力小,可以忽略由薄膜应力而引起 X 射线衍射峰的宽化,可用谢乐(Scherrer)公式估算薄膜的晶粒大小,将主峰的半高宽代入 χ' Pert Data Viewer(数据浏览器)中的计算器(size calculator),并考虑到仪器的误差,可得出两个样品的晶粒的平均大小均为20.4 nm。

在基片温度为 500 ± 0.5 °C 制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜样品的 X 射线衍射谱图中,最强的衍射峰是 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (200) 晶面的衍射峰。此外,还有(400), (0010), (117), (2110), (0020) 等晶面衍射峰,结果表明该薄膜是 a 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜,计算表明 a 轴取向度 $F = 0.52$ 。这一结果说明,采用飞秒脉冲激光沉积法可以通过选择合适的条件获得高 a 轴取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜。

3.3 薄膜的表面扫描电镜形貌

图4(a)为室温沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜的场发射扫描电镜照片,室温沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 膜是由大量小于20 nm的小颗粒堆砌而成的层状结构,这与谢乐公式计算室温薄膜样品 X 射线衍射的数据所得的结果是一致的;薄膜的表面有大量100 nm左右的缝隙,而没有单个微米级的大颗粒。

图4(b)所示的薄膜样品是在 500 ± 0.5 °C 温度下沉积,并原位保温30 min的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜,从中可以清晰地看出晶粒的分布比室温样品均匀,颗粒大小在30~300 nm之间,晶界清晰。膜的

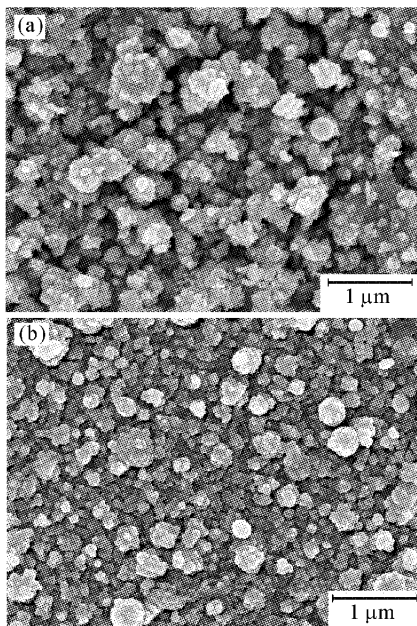


图 4 在 20 °C (a) 和 500 °C (b) 沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 的场发射扫描电镜照片

Fig. 4 FSEM images of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ thin films deposited on Si(111) at 20 °C (a) and 500 °C (b)

表层也有少许层状结构颗粒,但没有室温样品明显。晶粒之间的间隙小于 20 nm,构成薄膜的晶粒结晶状况好于室温样品。

这些现象可以和等离子体羽的形状联系起来,聚焦后的飞秒激光束在靶材上,在光斑附近形成了高温等离子体而发出白光,并形成等离子体羽。在到达衬底前等离子体复合呈中性粒子,并发出蓝光,最终在基台附近生成了大量纳米颗粒。基片所处的区域等离子体比较稀薄,因而对基片的作用较弱,在室温下沉积时的薄膜主要是由这些纳米颗粒团聚而成的;由于温度较低,晶粒间传质不充分,因而晶粒之间的界限模糊,没有形成大的晶粒,晶粒间也存在较大的间隙。

较高的基片温度有利于晶核的长大形成较大晶粒,有利于晶粒间的充分传质,从而减小了缝隙。在靶材上,高能量密度飞秒激光产生等离子体羽,等离子体复合形成了高活性的超微颗粒,在较高的基片温度下颗粒间的传质充分。二者同时共同的作用可能是 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜 α 轴择优取向形成的原因,其形成的微观机制还有待进一步研究。

在图 4 中没有发现纳秒脉冲激光沉积法制备薄膜时常见的微米级大颗粒,即使是在 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 的场发射扫描电镜照片中也没有发现。这说明了飞

秒脉冲激光沉积法能够有效地克服纳秒脉冲激光沉积薄膜的这一缺陷。二者与靶材的作用机制有很大的差别,飞秒激光的功率密度远高于材料剥离的阈值功率密度,与靶材的相互作用主要以多光子电离为主,沉积过程中靶材的热扩散效应比纳秒脉冲激光沉积要弱得多。由于飞秒脉冲激光沉积法过程中没有经历靶材的熔化过程,从而消除了微滴 (micro-drop) 现象,避免了在薄膜表面形成微米级的大颗粒。

3.4 薄膜的铁电性

薄膜的铁电性采用 RT-66A 专用铁电测试仪在室温下测量,上电极的面积为 $0.1\ \text{mm} \times 0.1\ \text{mm}$ 的探针,硅衬底作为下电极。

室温制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜没有观测到铁电回线。可能的原因是室温条件下,薄膜中的晶粒太小,还没有形成铁电畴,因而不具有铁电性;也可能是薄膜的缺陷较多损耗较大造成的。为了弄清铁电性弱的原因,在相同的室温条件下,在石英玻璃片上沉积了 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜,其光学性能用傅里叶红外光谱仪 (FT-IR NEXUS Thermo Nicolet) 测量。通过测量该薄膜样品的透过率和反射率随频率的变化,找到薄膜的吸收边带,计算出薄膜的禁带宽度。如图 5 所示, α 为薄膜的吸收系数, d 为薄膜的厚度, E 为相应频率的光子能量,得出薄膜的能隙约为 1.0 eV。而通常的绝缘体的禁带宽度大于 3 eV,这说明该条件下制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜呈现半导体特征,这与施主型掺杂有关,可能是 Bi 过量引起的。没有观测到铁电性的原因也可能与半导体特性有关,但也不能完全排除与组成薄膜的纳米颗粒的界面及其他缺陷有关。

图 6 是在 500 °C 沉积 α 轴取向 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜样品的电滞回线,其剩余极化 $P_r =$

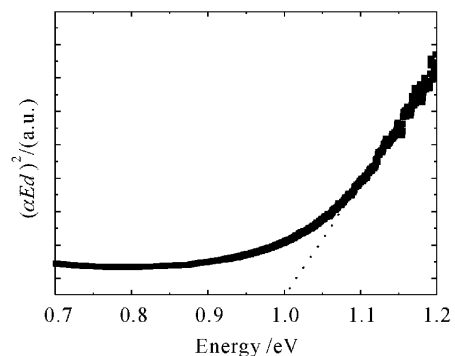


图 5 室温下沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的吸收边带
Fig. 5 Plot of $(\alpha d)^2$ against the photon energy for $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ on quartz deposited at 20 °C

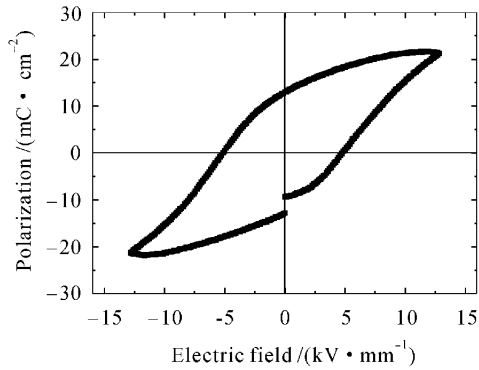


图 6 基片温度为 500 °C $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 的电滞回线

Fig. 6 Ferroelectric hysteresis loop of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ deposited on Si (111) at 500 °C

$15 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 矫顽力 $E_r = 48 \text{ kV}/\text{cm}$ 。对比图 4, 不难得薄膜结晶的程度好、缺陷少有利于提高薄膜的铁电性; 在 500 °C 温度下 Bi 的挥发有利于降低杂质浓度, 降低了薄膜的损耗, 也有利于提高薄膜的铁电性能。

4 结 论

采用飞秒脉冲激光沉积法, 成功地在 Si(111) 基片上制备了 a 轴择优取向的和 c 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜。飞秒脉冲激光沉积法沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜是均匀连续的, 没有看到纳秒脉冲激光沉积技术中常见的微米级的大颗粒。室温下沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜是 c 轴择优取向的, 晶粒的平均大小为 20 nm, 其能隙约为 1.0 eV。在 500 °C 下沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜是 a 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 铁电薄膜, 薄膜的剩余极化 $P_r = 15 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 矫顽力 $E_c = 48 \text{ kV}/\text{cm}$ 。

参 考 文 献

- 1 Uong Chon, Hyun M. Jang, M. G. Kim *et al.*. Layered perovskites with giant spontaneous polarization for nonvolatile memories [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(8): 87601-1 ~ 87601-4
- 2 C. J. Lu, Y. Qiao, Y. J. Qi *et al.*. Large anisotropy of ferroelectric and dielectric properties for $\text{Bi}_{3.15}\text{Nd}_{0.85}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin

- films deposited on Pt/Ti/SiO₂/Si [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(22): 222901-1 ~ 222901-3
- 3 Mao Xiangyu, Chen Xiaobing. Ferroelectric and dielectric properties of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ceramics with grain orientation [J]. *J. Chin. Ceramic Society*, 2004, **32**(11): 1330 ~ 1334
毛翔宇, 陈小兵. $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 取向陶瓷的铁电和介电性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2004, **32**(11): 1330 ~ 1334
- 4 H. Wang, L. W. Fu, S. X. Shang. Preparation and properties of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ single-crystal thin films by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(11): 7963 ~ 7965
- 5 Jie Si, Seshu B. Desu. Ferroelectric bismuth titanate films by hot wall metalorganic chemical vapor deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(11): 7910 ~ 7913
- 6 P. C. Joshi, Abhai Mansingh, M. N. Kamalasanan *et al.*. Structural and optical properties of ferroelectric $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films by sol-gel technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(19): 2389 ~ 2390
- 7 Haoshuang Gu, Anxiang Kuang, Shimin Wang *et al.*. Synthesis and ferroelectric properties of c -axis oriented $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films by sol-gel process on platinum coated silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(9): 1209 ~ 1210
- 8 T. K. Song, J.-K. Lee, H. J. Jung. Structural and ferroelectric properties of the c -axis oriented $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ thin films deposited by the radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(24): 3839 ~ 3841
- 9 A. Garg, A. Snedden, P. Lightfoot *et al.*. Investigation of structural and ferroelectric properties of pulsed-laser-ablated epitaxial Nd-doped bismuth titanate films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(6): 3408 ~ 3412
- 10 N. Maffei, S. B. Krupanidhi. Electrical characteristics of excimer laser ablated bismuth titanate films on silicon [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(8): 3617 ~ 3621
- 11 Zhao Jianhong, Liu Jianshe, Huang Xin *et al.*. Preparation of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.45})\text{O}_3$ thin films on YBCO/LaAlO₃ using excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 319 ~ 322
赵建洪, 刘建设, 黄 歆 等. 准分子激光扫描沉积 PZT/YBCO 结构铁电薄膜 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4): 319 ~ 322
- 12 Tong Xinglin, Zheng Qiguang, Hu Shaoliu *et al.*. Pulsed laser two-beam deposition of Mg-doped GaN thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 332 ~ 336
童杏林, 郑启光, 胡少六 等. 脉冲激光双光束沉积掺 Mg 的 GaN 薄膜的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 332 ~ 336
- 13 E. Millon, O. Albert, J. C. Loulergue *et al.*. Growth of heteroepitaxial ZnO thin films by femtosecond pulsed-laser deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(11): 6937 ~ 6939
- 14 Peixiang Lu, Youhua Zhou, Qiguang Zheng *et al.*. Single-phase $\beta\text{-FeSi}_2$ thin films prepared on Si wafer by femtosecond laser ablation and its photoluminescence at room temperature [J]. *Phys. Lett. A*, 2006, **350**(3-4): 293 ~ 296
- 15 J. E. Dominguez, X. Q. Pan, L. Fu *et al.*. Epitaxial SnO₂ thin films grown on $(\bar{1}012)$ sapphire by femtosecond pulsed laser deposition [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(3): 1060 ~ 1065