

文章编号: 1000-324X(2006)05-1230-07

飞秒脉冲激光沉积 Si 基 a 轴择优取向的钛酸铋铁电薄膜及 I - V 特性研究

周幼华^{1,2}, 郑启光¹, 杨 光¹, 龙 华¹, 陆培祥¹

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

摘 要: 采用飞秒脉冲激光沉积系统, 在 Si(111) 衬底上制备了 a 轴和 c 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜. X 射线衍射 (XRD) 表明: 室温 (20°C) 下沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜呈 c 轴择优取向, 晶粒的平均直径为 20nm. 在 500°C 沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜呈 a 轴择优取向. 测量了薄膜的电滞回线和 I - V 特性曲线, 并用分布参数电路研究了 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的 I - V 特性曲线和铁电性的关联性. a 轴择优取向 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的剩余极化强度 $P_r=15\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 矫顽力 $E_c=48\text{kV}/\text{cm}$.

关 键 词: 飞秒; 脉冲激光沉积法 (PLD); 钛酸铋; 铁电薄膜

中图分类号: O484 **文献标识码:** A

1 引言

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 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°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 DRAM、FRAM、FEFET、光存储器和光显示器等光电子器件^[1~3]. 由于 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 在结构上的各向异性, 单晶样品在 a 、 b 方向上的剩余极化强度 ($2P_r$) 为 $90\sim 100\mu\text{C}/\text{cm}^2$, c 方向上的剩余极化强度 ($2P_r$) 较小, 仅为 $8\sim 10\mu\text{C}/\text{cm}^2$, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 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, 由于 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 晶粒在 a 轴和 b 轴生长比 c 轴快, 因此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^[4,5].

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)^[6,7] 溶胶 - 凝胶 (Sol-Gel) 法^[8,9], 溅射法 (Sputtering) 和脉冲激光沉积法 (PLD) 等^[10~12]. 利用这些工艺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了成功, 现已被广泛用于其他氧化物薄膜材料的制备^[13,14]. 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 PLD 的应用; 近来飞秒激光系统被引入到沉积固体薄膜, 由于飞秒级的超短脉冲激光和纳秒脉冲激光相比, 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

收稿日期: 2005-10-10, 收到修改稿日期: 2006-01-13

基金项目: 武汉市青年晨光计划 (20035002016-15)

作者简介: 周幼华 (1969-), 男, 博士研究生. 通讯联系人: 陆培祥. E-mail: lupeixiang@mail.hust.edu.cn

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) 和 ZnO 薄膜^[15~17].

本文在通用 PLD 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 a 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜; 采用 X 射线衍射研究了薄膜的结构. 并通过测量薄膜的 P - E 特性证实了 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的铁电性, 测量了薄膜的 I - V 曲线, 并采用等效的分布参数电路分析了 I - V 和铁电性的相关性.

2 薄膜的制备

采用分析纯 Bi_2O_3 , TiO_2 为原料, 按摩尔比 $\text{Bi}:\text{Ti}=1.40:1.00$, Bi 过量 7% 配制, 按标准陶瓷工艺制备 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 陶瓷靶, 并在马弗炉中 1100°C 下烧结 2h, 然后自然冷却到室温, 表面抛光后备用.

采用通用型的脉冲激光沉积镀膜机, 用一台钛宝石飞秒激光器作为激光源, 激光的输出波长 800nm, 脉宽 50fs, 重复频率 1000Hz, 最大输出单脉冲能量 2mJ. 沉积过程中激光的单脉冲能量 0.5mJ, 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 $1.4\text{J}/\text{cm}^2$; 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 10r/min 速度自转. 由于飞秒脉冲激光束在 1s 内在靶材同一位置引起的刻蚀 $<10\mu\text{m}$, 在薄膜沉积时间 (10min) 内, 即使不引入靶材的公转也不会造成较大的离焦量.

采用 p 型 Si(111)($8\sim 13\Omega\cdot\text{cm}$) 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羽辉在衬底上均匀扫描; 真空室气压 $<3.0\times 10^{-4}\text{Pa}$, 沉积时间为 10min, 薄膜的厚度约 150nm.

在室温 (20°C) 下, 在 Si(111) 衬底上沉积 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜, 同时在 Si(100) 衬底上沉积一个样品作为对照; 另一薄膜样品则是在 $500\pm 0.5^\circ\text{C}$ 沉积在 Si(111) 上, 并保温 30min 后自然冷却至室温. 所得样品作后期分析. 薄膜的结构用带有薄膜附件的 XRD (x'Pert PRO, PANalytical B.V.) 分析, 薄膜的铁电性能由 RT66A 专用铁电测试仪 (Radiant Technologies) 在虚拟模式下测得. 薄膜的电学性能的测量采用固体铟 (In) 在薄膜的表面压成直径约 2mm 薄层作为上电极, 硅衬底为下电极, 采用 I - V 特性测试仪 (Keithley 2400) 测量 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的 I - V 特性.

3 结果和讨论

3.1 薄膜样品的 XRD 分析

利用 XRD 装置的薄膜附件采用单一 2θ 模式扫描. 图 1 是同时在 Si(111) 和 Si(100) 基片上室温 (20°C) 下制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜样品的 XRD 图谱, 二者衍射峰的位置完全重合, 最强的峰为 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 的 (0 0 10) 晶面, 其次为 (0 0 8), (0 0 14), (0 0 16), (0 0 20), (0 0 24) 晶面的衍射峰; 此外, 也出现了 (1 2 5) 和其他几个较小的衍射峰, 说明在室温下生长的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜是高 c 轴取向的多晶膜. 根据 Lotgering 定义^[18], 取向度 $F = (P - P_0)/(1 - P_0)$, 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. 计算得到两个 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜样品的 (0 0 1) 取向度分别为: 0.71 和 0.70, 说明在室温下沉积的硅基 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的取向与基片的取向没有相关性.

由于上述薄膜是在室温下制备的, 薄膜和基片之间的热应力小, 所以可以忽略由薄膜

应力而引起的 XRD 衍射峰的宽化, 可以利用谢乐 (Scherrer) 公式估算薄膜的晶粒大小, 将主峰的半高宽代入 \times' Pert Data Viewer 中的 size calculator, 并考虑到仪器的误差, 可得出两个样品的晶粒平均直径均为 20.4nm.

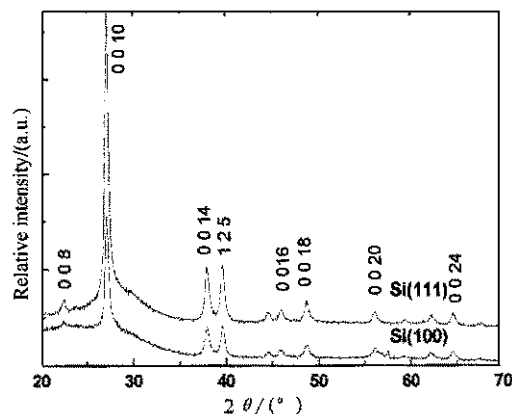


图 1 室温 (20°C) 制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films deposited on Si(111) and Si(100) at 20°C

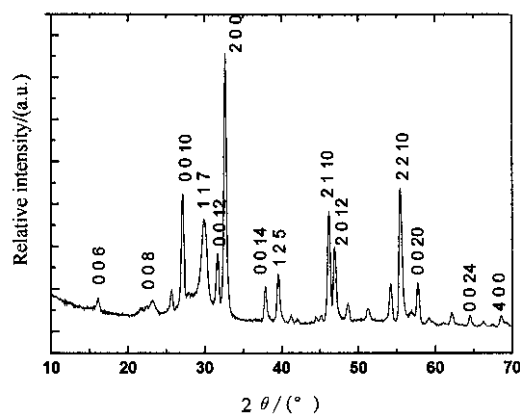


图 2 500°C 制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films deposited on Si(111) at 500°C

图 2 是在基片温度为 $500 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜样品的 XRD 图谱, 图中表明最强的衍射峰是 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}(200)$ 晶面的衍射峰, 此外, 还有 (400)、(0010)、(117)、(2110)、(0020) 等晶面衍射峰, 表明薄膜是 a 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜, a 轴取向度 $F=0.52$. 这一结果说明: 采用 fsPLD 可以通过选择合适的条件获得 a 轴择优取向 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜.

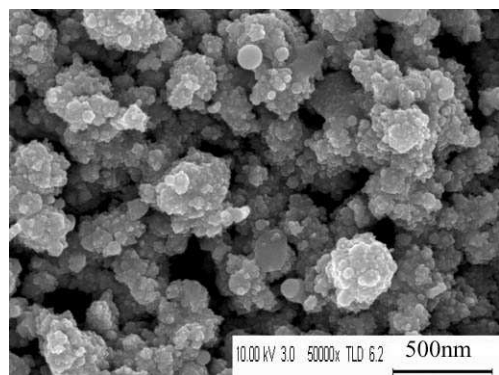


图 3 在 20°C 沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 的 FSEM 照片

Fig. 3 FSEM images of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films deposited on Si(111) at 20°C

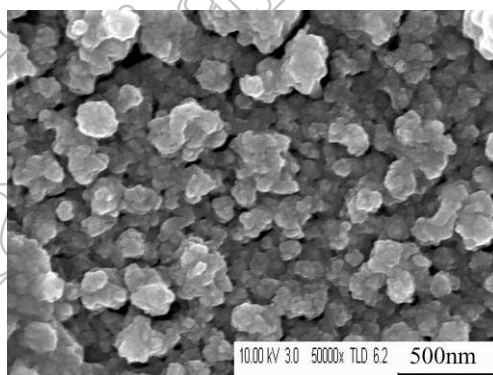


图 4 在 500°C 沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 的 FSEM 照片

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

3.2 薄膜的表面 SEM 形貌

薄膜的表面形貌用场发射扫描电镜 (FSEM Sirion 200 FEI.) 观察, 图 3 是室温沉积的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜的 FSEM 照片, 可以看出是由大量 $<30\text{nm}$ 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的结果是一致的; 薄膜的表面有大量 100nm 左右的缝隙, 没有单个微米级的大颗粒.

图 4 为在 500°C 温度下沉积, 并原位保温 30min 的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜, 可以看出晶粒的分布比室温样品均匀, 颗粒大小在 $30\sim 150\text{nm}$ 之间, 晶界清晰; 膜的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 $< 30\text{nm}$.

3.3 薄膜的铁电性

薄膜的铁电性采用 RT-66A 在室温下测量, 上电极的面积为 $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}$. 室温制备的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜没有观测到电滞回线, 这可能与薄膜表面缺陷有关. 图 5 是在 500°C 沉积 a 轴取向 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 薄膜样品的电滞回线, 样品的剩余极化 $P_r=15\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 矫顽力 $E_c=48\text{kV}/\text{cm}$.

3.4 薄膜的 I - V 特性曲线

将固体铟 (In) 粒在薄膜的表面压成直径约 2mm 薄层作为上电极, 硅衬底为下电极, 采用专用 I - V 特性测试仪 (Keithley 2400) 测量 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的 I - V 特性, 下电极接 + 时电压取正值. 实验中电压范围和步长设定后, 由程序控制每秒改变 2 个步长, 从负向最大值开始逐步加压. 图 6 是室温制备 c 轴取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜 (样品 1) 和 500°C 制备的 a 轴取向的 (样品 2) 在 $-15\sim 15\text{V}$ (步长为 0.2V) 条件下测量的归一化 I - V 曲线. 图 7 是 500°C 制备的 a 轴取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (与图 5 为同一个样品) 的 I - V 特性, 实验时首先测量 $-10\sim 10\text{V}$ (步长为 0.2V), 然后依次为 $-15\sim 15\text{V}$ (步长为 0.2V), $-18\sim 18\text{V}$ (步长为 0.4V), $-20\sim 20\text{V}$ (步长为 0.4V).

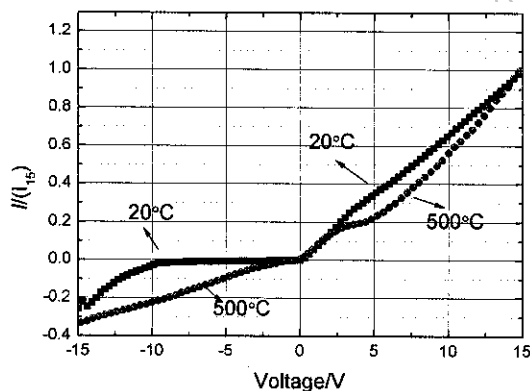


图 6 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 的 I - V 特性
Fig. 6 I - V characteristic curves of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$

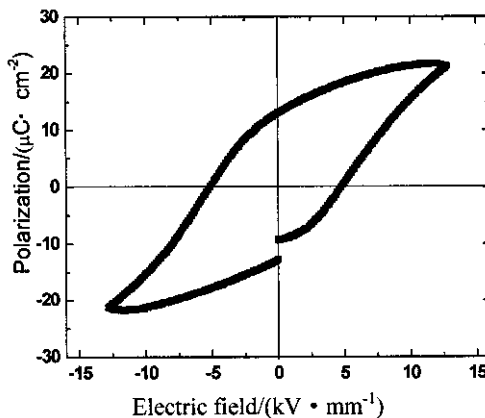


图 5 基片温度为 500°C $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ 的电滞回线

Fig. 5 Ferroelectric hysteresis loop of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ deposited on $\text{Si}(111)$ at 500°C

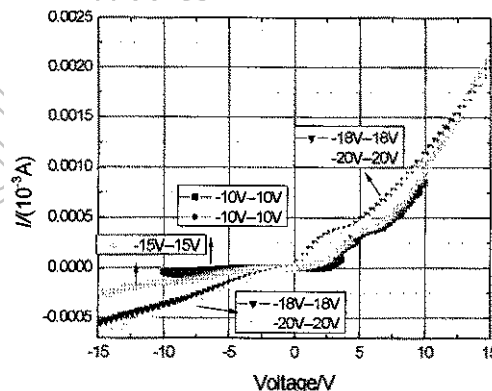


图 7 500°C 制备的 a 轴取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 的 I - V 特性

Fig. 7 I - V characteristic curves of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}(111)$ at 500°C

从图 6 中可以看出样品 1 与 2 在 $-2.4\sim 2.4\text{V}$ 区间, I - V 曲线几乎重合; 在测量电压下样品 1 正向电流 I 随电压 V 近似线性增加, 图中显示二者的较高电压下的导电机理有很大的差别. 反向时电流小于正向, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}$ 结构存在单向导电性.

样品 2 在 $-10\sim 10\text{V}$ (步长为 0.2V) 条件下, 测量两次的结果是可以重现的, 可以算出薄膜的电阻率 $>10^{11}\Omega\cdot\text{m}$.

$-15\sim 15\text{V}$ (步长为 0.2V) 的 $I-V$ 曲线和 $-10\sim 10\text{V}$ (步长为 0.2V) 正向几乎重合, 前者在反向高压区 ($<-2.8\text{V}$), 电流随电压增大而增大.

$-20\sim 20\text{V}$ (步长为 0.4V) 的 $I-V$ 曲线和 $-18\sim 18\text{V}$ (步长为 0.4V) 几乎重合. 反向电流随电压增大快于较低电压的 3 条曲线.

样品 1 的反向电流与初始电压值有关, 初始电压越高, 反向 $I-V$ 曲线的斜率越大. 对反向的 $I-V$ 曲线对电压作微分计算发现: 初值反向电压 $<15\text{V}$ 的 3 条曲线, $-6\sim -2.8\text{V}$ 间, $I \propto V^2$, 导电机理与空间电荷限制电流相合, $-2.8\sim 0\text{V}$ 间, $I \propto V$ 对应于欧姆型导电; 初值反向电压 $>15\text{V}$ 的 2 条曲线, 从 $-6\sim 0\text{V}$ 间 $I \propto V^2$, 对应于空间电荷限制电流.

正向电压在 $0\sim 13\text{V}$ 之间时, 电流随电压变化是非线性的, 正向电压 $>13\text{V}$ 时, 电流随电压线性增加, $I-V$ 的正向非线性区间与图 3 所示的电滞回线非线性区相对应, 在图 5 中, 电滞回线的饱和电压为 13V .

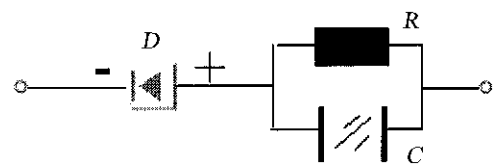


图 8 薄膜的等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit with distributed constants of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Si}$

由于薄膜的电阻率远大于衬底, 可以忽略硅衬底的电阻, 下面讨论中忽略薄膜与衬底、膜与电极的结电容, 硅基底上沉积 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜 (MFS 或 MIS 结构) 的 $I-V$ 特性曲线可用图 8 所示的等效电路来说明. 二极管 D 代表薄膜和硅衬底界面形成的异质结, R 代表损耗, C 代表薄膜的介电特性. 下面将就这一模型来分析薄膜的导电特性.

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 膜与衬底结电流密度与总电流密度相等可用 (1) 式表示

$$J = J_s(e^{eU'/k_B T} - 1) = \sigma E + J_d \quad (1)$$

(1) 式中 J 是总电流密度、 J_d 是位移电流密度 (对应于薄膜电容器的充电和放电电流密度)、 σ 是 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜电导率、 σE 是薄膜的传导电流密度 (欧姆电流)、 U 是外加电压、 J_s 是二极管的饱和电流、 U' 是 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 膜与衬底结电压. U_c 对应于 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜上的电压降. 且

$$U = U_c + U'$$

$$E = \frac{U_c}{d}$$

$$J_d = \frac{d(\epsilon_0 E + P)}{dt} = \left(\epsilon_0 + \frac{dP}{dE} \right) \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

代入 (1) 式, 得

$$J = \frac{1}{d} \left(\epsilon_0 + \frac{dP}{dE} \right) \frac{d(U - U')}{dt} + \frac{\sigma}{d} (U - U') \quad (3)$$

(3) 式右边第一项是电压均匀变化引起的位移电流密度, 第二项对应于薄膜的漏电流, dP/dE 是图 3 中电滞回线的斜率.

由 (3) 式, $J=0$ 对应于:

$$U \approx U' - \frac{1}{\sigma} \left(\epsilon_0 + \frac{dP}{dE} \right) \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

dU/dt 是常量, $1/\sigma$ 以 $10^{11}\Omega\cdot\text{m}$ 的量级, 从 (4) 式可以得出: 薄膜的介电特性使得 I - V 特性的 0 点向左移动, 当 (4) 式第二项大于 (或相当于) 第一项时, I - V 曲线就通过 (或接近于) 原点.

对于顺电材料

$$\begin{aligned} dP/dE &= \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) = \text{常量} \\ d(U - U')/dt &\approx dU/dt = \text{常量} \end{aligned}$$

(3) 式右边第一项为常量, 则 J 随 U 线性变化. 20°C 沉积的 c 轴取向 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜 I - V 曲线 (图 6) 表现为顺电性特征 (或者铁电性很弱), 这与 RT-66A 没有观测到 c 轴取向 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的电滞回线的结果是一致的.

对于铁电体

$$dP/dE = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) \neq \text{常量}$$

由 (3) 式, 铁电体的介电常数 ε 的非线性导致了正向的 I - V 曲线的非线性, 说明正向的 I - V 曲线的非线性和电滞回线的非线性有相同的起源. 图 7 所示的 I - V 曲线的正向非线性区间与图 5 所示的电滞回线非线性区相对应, 这一实验结果与上述模型的解释相符.

综上所述, 图 8 所示模型较好地解释了 500°C 制备的 a 轴取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 膜的正向 I - V 特性曲线和铁电性的关联性, 也解释了 20°C 制备的 c 轴取向的没有铁电性的原因. 尚不能很好说明反向的 I - V 特性曲线和铁电性的关联性, 有待于进一步完善.

4 结论

采用飞秒脉冲激光沉积法, 在 Si(111) 制备了 a 轴和 c 轴择优取向的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜. 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, 晶粒的平均直径为 20nm. 在 500°C 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. 在 500°C 的 Si(111) 上获得了 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 $E_c = 48\text{kV}/\text{cm}$. 针对 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜的 I - V 特性曲线, 通过简单的分布参数电路模型解释了 I - V 特性曲线和铁电性的关联性.

致谢 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 陶瓷靶材是湖北大学物电学院顾豪爽教授和刘国珍同学的帮助, 特此致谢!

参考文献

- [1] Scott J F, Arujo C A. *Science*, 1989, **246**: 1400-1406.
- [2] Subbarao E C. *Phys Rev*, 1961, **122** (3): 804-807.
- [3] Chou U, Jang M G, Kim M G, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89** (8): 87601-87604.
- [4] Lu C J, Zhu J S, Qiao Y, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**: 222901-222903.
- [5] 毛翔宇, 陈小兵 (MAO Xiang-Yu, et al). 硅酸盐学报 (Journal of the Chinese Ceramic Society), 2004, **32** (11): 1330-1334.
- [6] Wang H, Fu L W, Shang S X. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73** (11): 7963-7965.
- [7] Jie Si, shu Se, Desu B. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73** (11): 7910-7913.
- [6] Maffei N, Krupanidhi S B. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72** (8): 3617-3621.
- [8] Joshi P C, Mansingh Abhai. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59** (19): 2389-2390.
- [9] Haoshang Gu, Wenhua Sun, Anxiang Kuang, et al. *J. Matt. Sci. Lett.*, 1996, **15** (1): 53-54.
- [10] Song T K, Lee J K, Sung H J. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69** (24): 3839-3841.
- [11] Garg A, Snedden A, Scott J F, et al. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96** (6): 3408-3412.
- [12] Maffei N, Krupanidhi S B. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72** (8): 3617-3621.

- [13] Karl H, Stritzker B. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**: 2939–2942.
- [14] Tantigate C, Lee J, Safari A. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66** (13): 1611–1613.
- [15] Millon E, Albert O, Loulergue J C, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2000, **88** (11): 6837–6839.
- [16] Pronko P P, VanRompay P A, Zhang Z, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**: 2596–2599.
- [17] Zhang Z, VanRompay P A, Nees J A, *et al.* *Appl. Surf. Sci.*, 2000, **154-155**: 165–171.
- [18] Lotgering F K, Inorg J. *Nucl. Chem.*, 1959, **9**: 113–123.

***a*-axis Oriented Bi₄Ti₃O₁₂ Thin Films Deposited on Si(111) by Femtosecond Laser Ablation and Its Characteristic of *I*-*V* Curve**

ZHOU You-Hua^{1,2}, ZHENG Qi-Guang¹, YANG Guang¹, LONG Hua¹, LU Pei-Xiang¹

(1. State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China, 2. Physics & Information School of Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: The polycrystalline Bi₄Ti₃O₁₂ thin films were successfully prepared by femtosecond laser deposition on Si(111) wafers. X-ray diffraction (XRD) showed that Bi₄Ti₃O₁₂ thin film was highly *c*-axis-oriented deposited at room temperature (20°C), but the film was highly *a*-axis-oriented deposited at 500°C. The remanent polarization (P_r) and coercive force (E_c) of *a*-axis-oriented samples were measured to be 15 μC/cm² and 48 kV/cm respectively. An equivalent circuit with distributed constants of Bi₄Ti₃O₁₂/Si was introduced to interpret the relationship between the *I*-*V* characteristic curve and the ferroelectric hysteresis loop of Bi₄Ti₃O₁₂ deposited on Si.

Key words femtosecond; pulsed laser deposition; Bi₄Ti₃O₁₂; ferroelectric thin film