

脉冲激光沉积法合成 $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 介电薄膜及其上转换发光

梁立容, 王 凤, 邱泽敏

中山大学新华学院信息科学系, 广东 广州 510520

摘要 采用脉冲激光沉积法在透明导电(ITO)玻璃衬底上制备 $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 介电薄膜。当沉积温度范围控制在 $500\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,均可获得纯度较高的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜。常温下, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的介电常数的范围为 $166\sim 178$,随频率和温度变化比较稳定,介电损耗低于 0.05 。通过分析光谱,发现薄膜的上转换光谱包含发光中心为 527 nm 和 548 nm 的绿光带及发光中心为 660 nm 的红光带,分别对应 Er^{3+} 离子从发射能级 $^2\text{H}_{11/2}$ 、 $^4\text{S}_{3/2}$ 和 $^4\text{F}_{9/2}$ 向基态能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 的跃迁。 $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜是一种多功能材料,有望在透明光电器件中得到广泛应用。

关键词 薄膜; 介电性能; 上转换发光; 脉冲激光沉积法

中图分类号 O484.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.013101

Synthesization of $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ Dielectric Thin Films by Pulse Laser Deposition Method and Its Up-Conversion Luminescence

Liang Lirong, Wang Feng, Qiu Zemin

Department of Information Science, Xinhua College of Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510520, China

Abstract $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ dielectric thin films are synthesized on indium-tin-oxide (ITO) glass substrates by the pulse laser deposition method. The pure $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films can be obtained when the deposition temperature is controlled in the range of $500\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$. The range of dielectric constant of $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin film is $166\sim 178$ and the dielectric loss is less than 0.05 at room temperature. When the frequency and the temperature are changing, the dielectric constant remains stable. The spectral analysis shows that the up-conversion luminescence spectra of thin films contain two green light emission bands centered at 527 nm and 548 nm and a red light emission band centered at 660 nm . These emission bands correspond to the transition of Er^{3+} from $^2\text{H}_{11/2}$, $^4\text{S}_{3/2}$ and $^4\text{F}_{9/2}$ levels to the ground level $^4\text{I}_{15/2}$. $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films can be considered as a kind of multifunctional material, which will be widely applied to transparent optoelectronic devices in the future.

Key words thin films; dielectric properties; up-conversion luminescence; pulse laser deposition method

OCIS codes 310.6860; 160.2540

1 引言

随着微电子、光电子技术的快速发展,电子器件正朝着集成化、微型化的方向发展。金属氧化物半导体(MOS)晶体管是硅基半导体集成电路中构成记忆元件、微处理器及逻辑电路的基本单元,它的尺寸直接关系到超大规模集成电路的集成度^[1-2]。因此,寻找介电常数较大、耐击穿强度高和温度稳定性好的新材料成为当今微电子材料的研究热点。1993年,Takeshima等^[3]利用 $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ 薄膜制作了内存为 256 M 的动态随机存取存储器(DRAM), $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ 薄膜的相对介电常数较大(约为 $400\sim 590$),高温下相结构易改变,与半导体工艺的兼容性较差。纯度较高的五氧化二钽(Ta_2O_5)薄膜可与半导体工艺兼容,但是其相对介电常数较小,仅为 25 左右,并且集成密度存储容量较低。Cava等^[4]在 Ta_2O_5 陶瓷中掺杂二氧化钛(TiO_2),

收稿日期: 2016-08-25; 收到修改稿日期: 2016-09-29; 网络出版日期: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61672546)、广东省专业综合改革试点资助课题(2015Z004)

作者简介: 梁立容(1986—),女,硕士,助教,主要从事光电功能材料、电子技术方面的研究。E-mail: lrliang06@163.com

使其相对介电常数提高至 126 左右(测试频率为 1 MHz, 室温)。钛酸铋($\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$)系材料具有优异的性能和广泛的用途,已经越来越引起人们的重视^[5-7]。

($\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$)薄膜具有较高的介电常数和很低的漏电流,成为取代 MOS 晶体管中传统二氧化硅(SiO_2)栅绝缘层的潜在材料,也可作为存储单元应用于 DRAM 中,减小了器件面积,从而实现集成电路的超大规模集成^[2]。此外, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 常用来作为 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 和锆钛酸铅(PZT)等薄膜制备的缓冲层,可较好地改善这些材料的电学性能^[5,9]。然而, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的相结构不稳定,在高温下很难得到纯的烧绿石相。Yang 等^[10-12]在 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜中掺入稀土元素,制得如 $(\text{Bi},\text{La})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 、 $(\text{Bi},\text{Ce})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 及 $(\text{Bi},\text{Sm})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 等材料,从而大幅改善了薄膜的电学性能及相稳定性。稀土发光材料(包括稀土掺杂薄膜、荧光粉等)具有纯度高、能量转换效率高、附加值高以及荧光寿命长等优点,成为可应用于固体激光器、三维立体显示器、光电通信、生物荧光标识等新领域的潜在材料^[13-18]。楚琳琳等^[19]报道了铒(Er)掺杂晶体绿光上转换连续波激光的研究。Gao 等^[20]报道了 Er 掺杂的 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 薄膜,此薄膜具有较好的上转换光致发光性能。然而,这些薄膜大多采用化学溶液沉积法在硅或铂衬底上制得。采用脉冲激光法沉积薄膜时,沉积条件容易控制,沉积速率高,实验周期短,目前该方法已经被用来沉积高温超导薄膜、铁电薄膜、介电薄膜、合金等^[21-23]。

本文利用氟化铀(KrF)准分子激光器控制合适的温度、氧压,在透明导电(ITO)玻璃衬底上合成了 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 介电薄膜,并研究了其介电性能和上转换发光特性。

2 实 验

在真空腔中进行镀膜实验,沉积前预抽真空至 10^{-5} Pa,沉积过程中氧气压为 3 Pa。以铋元素物质的量分数超过 10% 的 $\text{Bi}_{3.95}\text{Er}_{0.05}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 陶瓷作为靶材, KrF 准分子激光器发射的激光束(波长为 248 nm,脉冲宽度为 25 ns)作为蒸发加热源,脉冲频率为 5 Hz,激光能量密度为 3 J/cm^2 ,沉积时衬底温度范围为 $500\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$,沉积时间为 60 min,沉积后的薄膜在 200 Pa 氧气压下冷却至室温。

采用 X 射线衍射(XRD, D/MAX 2200 VPC, Rigaku Corp, Japan)分析薄膜的晶体结构。使用 LCR 测试仪(HP4284A Precision LCR Meter, Agilent 公司,美国)测量介电性能,测试介电频谱时所加的信号偏压为 100 mV。使用波长为 980 nm 的半导体激光器作为激发光源,利用组合式荧光寿命与稳态荧光光谱仪(FLSP 920, Edinburgh 公司,英国)测试薄膜的上转换发光谱。使用紫外可见光光度计(UV-3150, 岛津公司,日本)测试样品的透射谱。

3 结果和讨论

图 1 为 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的 XRD 图,图中衍射峰的强度较强,表明制备的薄膜结晶较好。通过对比 JCPDS (粉末衍射标准联合委员会)(32-0118)数据卡片,可确定衍射峰属于烧绿石结构的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 晶相,其中晶相(444)和(222)的衍射峰较强且尖锐,表明薄膜具有很强的(111)择优取向。

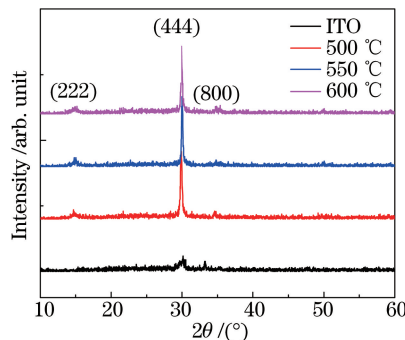


图 1 ($\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films

在 ITO 导电玻璃衬底上容易制备出烧绿石结构的钛酸铋薄膜,而采用相同条件在其他衬底上较难得到烧绿石结构薄膜,因此烧绿石结构的钛酸铋薄膜的制备与钛酸铋薄膜晶格是否匹配有关,表 1 为 2 种结构的

钛酸铋薄膜和常用衬底的晶格常数,晶胞的各边尺寸用 a 、 b 、 c 表示。

表 1 晶格常数比较

Table 1 Comparison of lattice constants

Substrate	$\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$	$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$	ITO	Pt	Quartz glass
Lattice constant	$a=b=c=2.068\text{nm}$	$a=b=0.546\text{ nm}$ $c=3.281\text{ nm}$	$a=b=c=1.023\text{ nm}$	$a=b=c=0.392\text{ nm}$	$a=b=0.499\text{ nm}$ $c=0.554\text{ nm}$

$\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 晶体属于立方晶系,晶格常数 $a = 2.068\text{ nm}^{[24]}$; $(\text{La}_{0.05}\text{Bi}_{0.95})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 的晶格常数 $a \approx 2.074\text{ nm}^{[10]}$, 约为立方结构 ITO 层晶格常数(1.023 nm)的 2 倍。因此,在 PLD 沉积过程中,良好的晶格匹配使薄膜更容易形成立方相烧绿石结构。此外,烧绿石结构钛酸铋薄膜的形成和(111)取向生长还与薄膜、ITO 层的表面自由能及沉积过程中粒子(等离子体)的能量有关。

由 XRD 图可知,薄膜具有良好的结晶性,通过扫描电子显微镜(SEM)观察薄膜的形貌,ITO 玻璃衬底上不同衬底温度(500~600 °C)下制备的 $(\text{Bi,Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的 SEM 图如图 2 所示。由图可见,所有薄膜表面平整、致密,无裂缝、孔洞;沉积温度越高,薄膜表面颗粒越少,表明薄膜的结晶质量越好。图 2 (d)为衬底温度为 550 °C 时制备得到的薄膜断面 SEM 图,由图中可以看出,薄膜与衬底的界面清晰,薄膜厚度均匀,约为 180 nm。

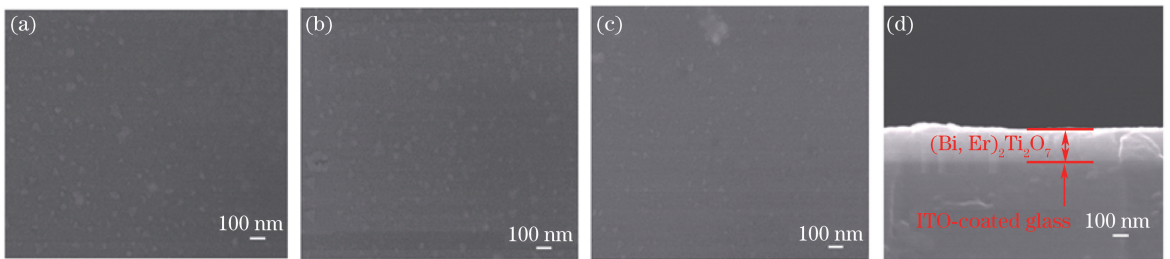


图 2 $(\text{Bi,Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜表面在(a) 500 °C、(b) 550 °C、(c) 600 °C和 (d) 650 °C下的断面 SEM 图

Fig. 2 SEM graphs of section of $(\text{Bi,Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films at (a) 500 °C, (b) 550 °C, (c) 600 °C and (d) 650 °C

图 3 为薄膜的介电频谱,当测试频率从 100 Hz 增加到 100 kHz 时,薄膜的介电常数稍有减小。当测试频率为 1 kHz 时,在沉积温度为 500, 550, 600 °C 条件下制备的 $(\text{Bi,Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的介电常数分别为 166, 174, 178, 与化学溶液沉积法在 P 型 Si 衬底上制备的 160 nm $(\text{La}_{0.05}\text{Bi}_{0.95})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的介电常数(157)^[10] 相当,远高于林元华等^[18]使用脉冲激光法沉积合成的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的介电常数(18)。这主要是由于在 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 材料中掺入的稀土离子稳定了材料的晶相结构,从而改善了材料的电学性能。薄膜的介电常数随着沉积温度的升高而增大,这是由于在沉积过程中,衬底温度越高,表面迁移率越大,粒子便越容易到达理想位置,从而使得结晶质量更好,晶粒增大,最终引起介电常数的增大。另外,由图 3 可知,薄膜具有较小的介电损耗,当测试频率为 1 kHz 时,介电损耗约为 0.03。

理想的电子材料应当在较宽的温度范围内具有稳定的性能,因此电容随温度的变化成为人们关注的一

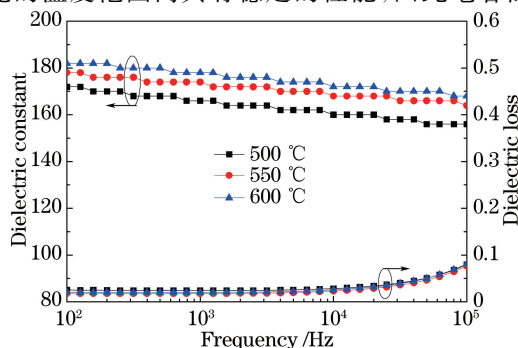


图 3 介电常数和介电损耗随频率的变化

Fig. 3 Variations in dielectric constant and dielectric loss with frequency

项指标,这一性能常用电容温度系数(T_{cc})表征,可定义为^[25]

$$T_{cc} = \frac{C - C_0}{C_0(T - T_0)} = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta T}, \quad (1)$$

式中 C 、 C_0 分别为 T 、 T_0 温度下的电容, ΔC 为电容的变化量, ΔT 为温度的变化量。根据介电常数与电容率的关系,电容温度系数也可表示为^[20]

$$T_{cc} = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0 \Delta T}, \quad (2)$$

式中 $\Delta \epsilon$ 为介电常数的变化, ϵ_0 为 T_0 温度下的介电常数。

衬底温度为 550 °C 时制备的薄膜的介电常数和介电损耗与温度的关系曲线如图 4 所示。由图可见,薄膜在 -110 ~ 180 °C 的温度范围内表现出稳定的介电性能,其中 $T_{cc} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 与文献报道的 $(\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{0.5})(\text{Zn}_{0.5}\text{Nb}_{1.5})\text{O}_7$ 的 T_{cc} 值相当^[26]。 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 晶体属立方晶系,晶格参数 $a = b = c = 2.068 \text{ nm}$, 晶体结构影响薄膜介电性能随温度的变化程度^[10,24]。Ren 等^[26] 通过研究发现在 100 K (-173.15 °C) 温度以下的 $(\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{0.5})(\text{Zn}_{0.5}\text{Nb}_{1.5})\text{O}_7$ 介电常数和介电损耗随温度发生剧烈变化。Zhao 等^[27] 发现 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺杂的 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜在 150 K (-123.15 °C) 温度下出现了介电弛豫现象,可见铋系立方晶体材料的相变温度很低(小于 -110 °C)。 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的介电常数在 -110 ~ 180 °C 温度区间内表现出良好的温度稳定性,使得由 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜构成的器件可在较宽的温度范围内稳定工作。

图 5 为薄膜的上转换荧光光谱,图谱中包括绿光和红光两个发光带,两个绿光带的中心波长分别为 527 nm 和 548 nm,红光带的中心波长为 660 nm。从图中可以看出,沉积温度越高,薄膜的上转换荧光强度越小。这种现象是由薄膜表面粗糙度引起的。沉积温度越低,薄膜表面越粗糙,较为粗糙的表面有利于激发光的进入和发射光的散射,从而产生更强的荧光强度。

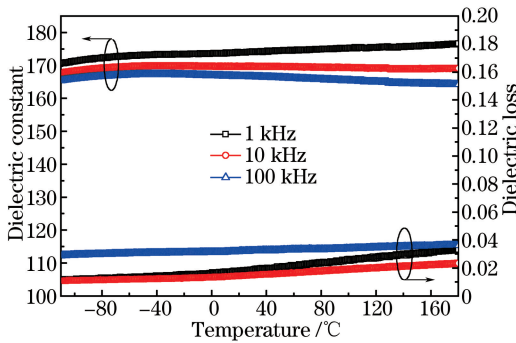


图 4 介电常数和介电损耗随温度的变化

Fig. 4 Variations in dielectric constant and dielectric loss with temperature

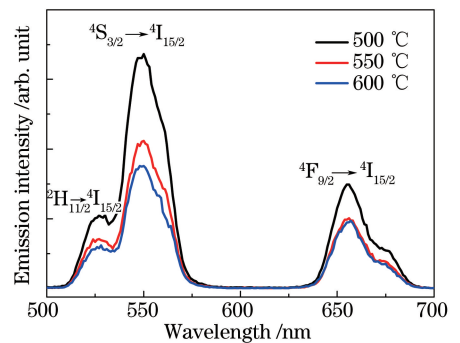


图 5 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的上转换荧光光谱

Fig. 5 Up-conversion luminescence spectra of $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films

$(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的上转换发光过程如图 6 所示,在激光波长为 980 nm 的激发下,处于基态的 Er^{3+} 吸收抽运源[基态吸收(GSA)]或邻近 Er^{3+} [能量传递(ET)]的能量并跃迁到 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级,处于 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级的 Er^{3+} 发生激发吸收($\text{ESA}, ^4\text{I}_{11/2} + h\nu \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$)或能量传递($^4\text{I}_{11/2} + ^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2} + ^4\text{F}_{7/2}$)并跃迁到 $^4\text{F}_{7/2}$ 能级;紧接着 Er^{3+} 发生多声子交叉弛豫(CR)并分别跃迁到 $^2\text{H}_{11/2}$ 、 $^4\text{S}_{3/2}$ 和 $^4\text{F}_{9/2}$ 能级,发射能级 $^2\text{H}_{11/2}$ 、 $^4\text{S}_{3/2}$ 和 $^4\text{F}_{9/2}$ 的 Er^{3+} 向基态能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁,从而发射出中心波长为 527 nm 和 548 nm 的绿光带和中心波长为 660 nm 的红光带^[20]。产生红光的另一个途径是:激发态 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级的 Er^{3+} 由于多声子弛豫衰退到 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级,然后经过基态吸收($^4\text{I}_{13/2} + h\nu \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$)或能量传递($^4\text{I}_{11/2} + ^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2} + ^4\text{F}_{9/2}$)过程跃迁到 $^4\text{F}_{9/2}$ 能级,进而跃迁回基态 $^4\text{I}_{15/2}$ 能级并发射红光^[20]。图中 h 为普朗克常数, ν 为辐射电磁波常数。

图 7 为透明导电 ITO 玻璃衬底上 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的光学透射率,同时测试了 ITO 玻璃衬底的透射率并将其作为对比曲线。通过与未生长薄膜的 ITO 玻璃衬底进行对比,发现 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜透射率曲线的波峰与衬底本征的光谱分离较小,说明 $(\text{Bi},\text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜具有较低的吸收率和能量损失。经计算可得,制备得到的样品在 380 ~ 780 nm 的可见光区间内的平均透射率达到 75% 以上,可作为制作如薄膜太阳

能电池、平板显示、半导体照明等透明光电器件的潜在材料。

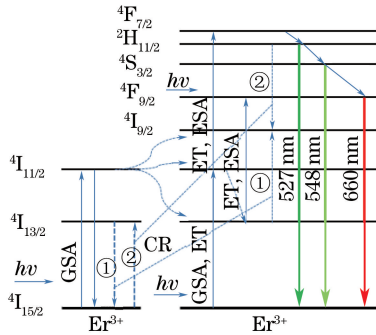


图 6 薄膜上转换发光原理示意图

Fig. 6 Diagram of up-conversion luminescence principle of thin film

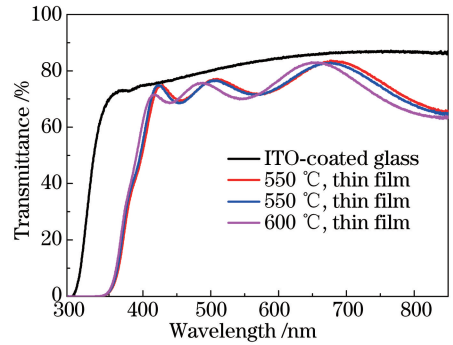


图 7 不同衬底温度下样品的光学透射谱

Fig. 7 Optical transmittance spectra of samples under different substrate temperatures

4 结 论

利用 KrF 准分子激光器控制激光能量密度为 3 J/cm^2 , 脉冲频率为 5 Hz , 沉积过程中的氧气压为 3 Pa , 衬底温度范围为 $500 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$, 合成了纯度较高的 $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜, 薄膜表面比较均匀, 厚度约为 180 nm . 通过测试可以发现, $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜的介电常数范围为 $166 \sim 178$, 比较稳定, 介电损耗低于 0.05 . 此外, $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜具有较好的上转换发光特性, 且样品在可见光区间的平均透射率达到 75% 以上. $(\text{Bi}, \text{Er})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜具有较好的介电、光学性质, 有望在微电子、集成光电子器件方面得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Spearing S M. Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS) [J]. Acta Materialia, 2000, 48(1): 179-196.
- [2] Cagnon J, Boesch D S, Finstrom N H, *et al.* Microstructure and dielectric properties of pyrochlore $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(4): 044102.
- [3] Takeshima Y, Shiratsuyu K, Takagi H, *et al.* Preparation and dielectric properties of the multilayer capacitor with $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ thin layers by metalorganic chemical vapor deposition [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(9B): 5870-5873.
- [4] Cava R F, Peck W F, Krajewski J J. Enhancement of the dielectric constant of Ta_2O_5 through substitution with TiO_2 [J]. Nature, 1995, 377: 215-217.
- [5] Guo Y, Fan H, Long C, *et al.* Electromechanical and electrical properties of $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_{3-\delta}$ ceramics with high remnant polarization [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 610: 189-195.
- [6] Long C, Fan H, Li M, *et al.* Crystal structure and enhanced electromechanical properties of Aurivillius ferroelectric ceramics, $\text{Bi}_4\text{Ti}_{3-x}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_x\text{O}_{12}$ [J]. Scripta Materialia, 2014, 75: 70-73.
- [7] Long C, Chang Q, Wu Y, *et al.* New layer-structured ferroelectric polycrystalline materials, $\text{Na}_{0.5}\text{Nd}_x\text{Bi}_{4.5-x}\text{Ti}_4\text{O}_{15}$: Crystal structures, electrical properties and conduction behaviors [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(34): 8852-8864.
- [8] Wang S W, Wang H, Shang S X, *et al.* PZT thin films prepared by chemical solution decomposition using a $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ buffer layer [J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 217(4): 388-392.
- [9] Wu W, Fumoto K, Oishi Y, *et al.* Bismuth titanate thin films on Si with buffer layers prepared by laser ablation and their electrical properties [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(2B): 1560-1563.
- [10] Yang X N, Wang H B, Huang B B, *et al.* La-substitution $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films grown by chemical solution deposition [J]. Materials Research Bulletin, 2005, 40(5): 724-730.
- [11] Xu G H, Jiang X Y, Zhang Y, *et al.* Properties of $(\text{Bi}_{0.92}\text{Ce}_{0.08})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films prepared on Si (100) by chemical solution deposition [J]. Surf Rev Lett, 2009, 16(6): 869-873.

- [12] Yang D M, Yang C H, Yuan C X, *et al.* Preparation and characteristics of Sm-doped $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films[J]. Surface Review and Letters, 2007, 14(1): 147-150.
- [13] Yang Kuisheng, Zhang Xiyang, Liang Hailian. Preparation of co-doped $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ upconversion luminescence glass ceramics[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(s1): 97-99.
杨魁胜, 张希艳, 梁海莲. $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 双掺上转换玻璃陶瓷的制备[J]. 中国激光, 2003, 30(s1): 97-99.
- [14] Lu Longjun, Nie Qihua, Xu Tiefeng, *et al.* Upconversion emission of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ glasses [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1117-1121.
陆龙君, 聂秋华, 徐铁峰, 等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 玻璃的上转换发光[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1117-1121.
- [15] Heumann E, Bär S, Kretschmann H, *et al.* Diode-pumped continuous-wave green upconversion lasing of Er^{3+} : LiLuF_4 using multipass pumping[J]. Optics Letters, 2002, 27(19): 1699-1701.
- [16] Downing E, Hesselink L, Ralston J, *et al.* A three-color, solid-state, three-dimensional display[J]. Science, 1996, 273(5279): 1185-1189.
- [17] Qian Guoquan, Tang Guowu, Qian Qi, *et al.* Study on mid-infrared spectral properties of $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fluorogermanate glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0616002.
钱国权, 唐国武, 钱奇, 等. $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺杂氟锗酸盐玻璃中红外光谱性质研究[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0616002.
- [18] Zhao Fen, Jiang Zhongwei, Feng Wenlin, *et al.* Study on H_2S gas sensor based on fluorescence quenching of ZnS:Eu^{2+} gas-sensitive film[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0916001.
赵芬, 江中伟, 冯文林, 等. 基于 ZnS:Eu^{2+} 气敏薄膜的荧光猝灭型硫化氢气体传感器研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0916001.
- [19] Chu Linlin, Li Linjun, Yu Xiaoyang, *et al.* Research progress on the up-conversion continuous wave green laser with Er^{3+} doped crystal[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2016, 53(2): 020004.
楚琳琳, 李林军, 于晓洋, 等. Er^{3+} 掺杂晶体绿光上转换连续波激光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020004.
- [20] Gao F, Ding G, Zhou H, *et al.* Bright up-conversion photoluminescence of $\text{Bi}_{4-x}\text{Er}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ferroelectric thin films[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(4): 043106.
- [21] Hu Pan, Tong Xinglin, Hu Wei, *et al.* Research on the technology of pulsed laser deposition of Pd/Ag films[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2015, 52(1): 013102.
胡畔, 童杏林, 胡巍, 等. 脉冲激光法沉积 Pd/Ag 膜的工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 013102.
- [22] Lin Yuanhua, Wang Jianfei, He Hongcai, *et al.* Preparation of dielectric $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films by pulsed laser deposition method and its optical absorption properties[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(s): 74-77.
林元华, 王健飞, 何泓材, 等. 脉冲激光法沉积合成 $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 薄膜及其光吸收特性[J]. 半导体学报, 2005, 26(s): 74-77.
- [23] Hegde R I, Maiti B, Rai R S, *et al.* Surface and interface roughness of ultrathin nitric oxide oxynitride gate dielectric [J]. Journal of The Electrochemical Society, 1998, 145(1): L13-L15.
- [24] Wu X M, Wang S W, Wang H, *et al.* Preparation and characterization of $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ thin films by chemical solution deposition technique[J]. Thin Solid Films, 2000, 370(1): 30-32.
- [25] Cole M W, Ngo E, Hirsch S, *et al.* The fabrication and material properties of compositionally multilayered $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films for realization of temperature insensitive tunable phase shifter devices [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(3): 034104.
- [26] Ren W, Trolrier-McKinstry S, Randall C A, *et al.* Bismuth zinc niobate pyrochlore dielectric thin films for capacitive applications[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(1): 767-774.
- [27] Zhao J, Zhang Q, Qin N, *et al.* Color-tunable up-conversion emission and infrared photoluminescence and dielectric relaxation of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ pyrochlore thin films[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96(4): 1214-1219.