

BST 薄膜的制备工艺与太赫兹介电特性测试

董博文, 马 华[✉], 王 军, 娄 菁, 冯明德

(空军工程大学基础部, 西安, 710051)

摘要 经过多组对比实验,通过 XRD、AFM、SEM 等表征手段优化了 BST 薄膜的制备工艺。结合 BST 基薄膜器件的电极制备、微结构加工制备了太赫兹频段电可调的频率选择表面。通过太赫兹测试系统验证了在太赫兹频段 BST 薄膜的可调性,在电场作用下通带频率可以从 0.85 THz 调节到 0.87 THz,结合仿真研究给出了确定铁电薄膜在 THz 频段介电参数的方法。相关研究可用于精确测定铁电薄膜在 THz 频段的介电特性,为铁电薄膜功能器件的研制提供精确的介电参数测试方法。

关键词 钛酸锶钡薄膜;太赫兹;介电特性;工艺参数;磁控溅射

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.016

中图分类号 TN304 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0097-06

Preparation Technology and Terahertz Test of BST Thin Film Devices

DONG Bowen, MA Hua[✉], WANG Jun, LOU Jing, FENG Mingde

(Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The preparation technology of BST thin film, electrode preparation, microstructure fabrication and terahertz band measurement method of BST thin film devices are systematically studied. The optimum preparation process of BST thin films is obtained by XRD, AFM and SEM. The electrically tunable frequency selective surface (FSS) in terahertz band is fabricated by electrode fabrication and microstructure fabrication of BST-based thin film devices. Under condition of the action in electric field, the pass-band frequency is adjusted from 0.85 THz to 0.87 THz, proving the tune-ability of BST thin films in THz band, and the method to determine the dielectric parameters of ferroelectric thin films in THz band is given. The related research can be used to accurately measure the dielectric properties of ferroelectric thin films in THz band, and provide accurate dielectric parameters for the development of functional devices of ferroelectric thin films.

Key words: barium-strontium-titanium thin film; terahertz; dielectric properties; process parameters; magnetron sputtering

太赫兹波通常是指频率范围在 0.1~10 THz、波长 3 mm~30 μm 的电磁波,波长范围位于微波频段和红外频段之间,属于电子学和光子学的交叉研究领域^[1]。近年来随着研究的不断深入,太

收稿日期: 2018-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(61671467)

作者简介: 董博文(1994—),男,吉林松原人,硕士生,主要从事超材料研究。E-mail: dongdeduo@163.com

通信作者: 马 华(1974—),男,甘肃会宁人,教授,博士生导师,主要从事超材料研究。E-mail: mahuar@163.com

引用格式: 董博文,马华,王军,等. BST 薄膜的制备工艺与太赫兹介电特性测试[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(6): 97-102. DONG Bowen, MA Hua, WANG Jun, et al. Preparation Technology and Terahertz Test of BST Thin Film Devices[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 97-102.

赫兹器件有了十分广泛的应用,如太赫兹成像^[2]、生物传感器^[3]、太赫兹滤波器^[4]、生物检测^[5]、断层成像^[6]等。同时随着微纳加工技术的日益成熟和系统小型化的设计需求,太赫兹功能器件的尺寸逐步下降到亚微米量级,对于薄膜型器件的需求也日益凸显。

钛酸锶钡($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$)作为一种典型的钙钛矿结构铁电材料,因其具有高介电常数、低介电损耗,介电常数可调、居里温度可调等特点,使其在动态随机存储器^[7]、移相器^[8]、可调频率选择表面^[9]、变容二极管^[10]等领域具有广泛的应用前景。并且,BST薄膜在THz频段仍然具有较高的介电常数和显著的介电可调特性,因此使用BST作为薄膜器件的功能层,实现在太赫兹频段下的可调,是一种潜在的、可行的设计方法。因此对于BST基薄膜型器件的制备工艺及测试方法的研究十分必要。

1 BST薄膜的制备及表征

目前,钛酸锶钡薄膜的主要制备方法有:脉冲激光沉淀法(PLD)^[11],溶液-凝胶法(Sol-Gel)^[12-13],金属有机化学气相沉积法(MOCVD)^[14],和射频磁控溅射法^[15]。相比较而言,射频磁控溅射方法制备的薄膜结晶性能更好,和其他工艺兼容程度高,也是目前发展最为成熟的方法。但是薄膜的沉积速度慢,制备的薄膜组分和靶材组分有一定的偏差,对工艺参数依赖较为严重。需要通过对工艺的系统研究来确定可以稳定成膜质量的工艺参数。

影响成膜质量的工艺参数有很多,溅射气压、氧氩比、衬底温度、溅射功率等都和薄膜质量直接相关^[16]。在溅射过程中,溅射气压关系到起辉的电压,也决定了溅射物与气体分子的碰撞频率,从而决定了溅射物抵达基片时的能量。当溅射气压升高时,溅射物与气体分子碰撞频率增大,沉积速率减慢,同时由于能量较低,晶相也会发生一定程度的改变。当溅射气压降低时,溅射物与气体分子碰撞频率降低,沉积速率加快,但是由于成核时间不够充足,导致成膜不够致密。适中的溅射气压设置,可得到致密的结晶效果好的薄膜^[17]。在BST的溅射过程中,为了抑制氧空位的形成,从而减小薄膜的漏电流,一般都会将氧、氩混合气体氛围中溅射。通入氩气的目的是与电子碰撞形成 Ar^+ 轰击靶材,逸散出的中性粒子在磁场的作用下抵达基片表面逐渐沉积成膜。当氧氩比增大的时候, Ar^+ 浓度降低,沉积速度减慢;当氧氩比降低的时候, O^{2-} 产生的份额较低,抑制氧空位作用不明

显。因此合适的氧氩比对薄膜的介电性能的提高有着显著的影响^[18]。

在溅射过程中,通常情况下会对基片加热,促进溅射物沉积后的成核和生长过程,从而影响薄膜的微观结构和介电性能。温度较低时,溅射物获得的动能不足而无法迁移,不能很好地成核和生长,导致介电常数小、损耗较大;当温度过高时,获得的动能过于充足,晶核过分生长,导致表面粗糙、介电常数小、损耗较大。溅射功率不仅直接影响到薄膜的沉积速度,还对微观结构会产生一定的影响。在一定范围内,溅射功率大,沉积速度较快,晶粒小致密性好,介电常数增大。但是当溅射功率过大时,沉积速度过快,溅射物扩散不充分,晶粒间隙变大,会导致介电常数减小。

在溅射成膜后需要对薄膜进行退火处理,在促进晶核生长的同时释放薄膜的内应力,促使薄膜由非晶态向晶态转换。并且在氧气氛围下退火,还可以填补氧空位,减小漏电流,提升薄膜的电性能^[19-20]。本文选取使用同样的工艺参数在硅片上制备的BST薄膜在不同温度下进行退火处理,通过对比XRD图谱研究结晶性能。在纯氧氛围下,以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率缓慢升温到退火温度,然后保温1h,再以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降低到室温后测试。在图1中我们可以看出,经过1h的退火处理后,不同温度下退火的样品其结晶程度不尽相同,但都是110峰最强,表示晶粒沿(110)方向择优生长。通过对比可以发现650 $^\circ\text{C}$ 纯氧气氛下退火时衍射峰最强,结晶效果最好。

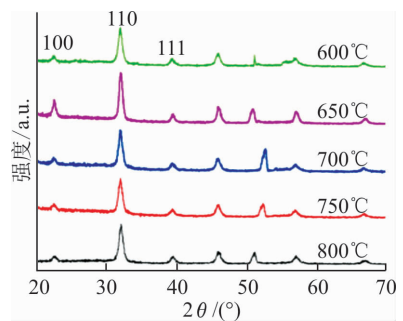


图1 不同退火温度退火的BST薄膜的XRD图谱
Fig. 1 XRD patterns of BST films annealed at different temperatures

图2是BST薄膜在650 $^\circ\text{C}$ 退火后的原子力显微镜扫描图。从图中可以看到在退火前,BST薄膜是非晶态,表面十分光滑,起伏不足1nm。在经过退火处理后,晶粒生长,薄膜表面呈现出5nm的起伏。同时依据XRD图谱,可以确定得到了比较致密的、平整的、结晶效果很好的BST薄膜,可以用于后续的BST基薄膜器件的设计。

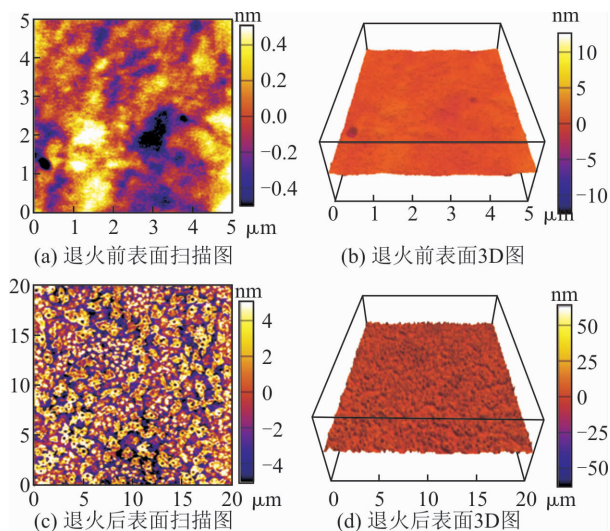


图 2 BST 薄膜退火前、后的原子力显微镜扫描
Fig. 2 AFM images of BST thin film before and after annealing

在经过多组对比实验后,通过 XRD, SEM, AFM 等表征手段,得到了目前使用的最优的一组工艺参数,见表 1,并且使用该组参数制备的 BST 薄膜进行后续的薄膜器件的加工及测试。

表 1 制备钛酸锶钡薄膜的优化工艺参数

Tab. 1 Optimum technological parameters for BST thin film

本底真空/mT	成膜压力/mT	氧氮比	衬底温度/°C	溅射功率/W	退火温度/°C
6E-6	6	1 : 4	400	150	650

2 BST 薄膜器件的制备及表征

由于薄膜器件一般是设计成多层膜结构,并且需要在薄膜表面进行图形化处理,因此还要考虑基础工艺和后续加工工艺的兼容问题。在本文中,我们参照 BST 薄膜典型的器件的设计,对加工工艺流程进行设计,如图 3 所示。在清洗硅片后,首先在硅片上溅射金属底电极,然后溅射 BST 薄膜,进行退火处理,随后在 BST 薄膜上溅射顶电极,这样就获得了夹层结构。对于透射型薄膜器件而言,则不需要溅射底电极,或者先对电极进行图形化处理,然后再进行后续流程。使用光刻工艺对顶电极图形化处理是制备薄膜器件中的一个关键工艺,包括光刻胶旋涂厚度、旋涂转速、曝光时间、显影时间在内的诸多因素都对光刻流程的质量产生直接影响,这些因素都将直接影响器件的性能。

在有底电极 BST 基薄膜器件的实际制备过程中,由于在电极材料选取上存在的问题,导致工艺的不兼容,其结果是 BST 薄膜的表面并不平整,如图 4(a)所

示。在底电极的选取上需要注意以下 3 个问题:①由于工艺兼容问题,在后续加工条件下要足够稳定,不与其他膜层反应。②在经过一系列的加工流程后仍然能保持良好的导电性。③底电极要与薄膜晶格匹配,且在加工后表面要足够平整。在最初的设计中,底电极选用典型的 Ti/Pt 型电极,对比图 4(a)和(b)可以发现,直接制备 BST 薄膜时表面十分光滑致密,但是底电极经过一系列的加工流程后,BST 薄膜表面明显粗糙。这是因为 Ti 在 BST 退火过程中被氧化,在表面形成微小的“山丘状”凸起,这样的凸起导致电极形貌发生严重改变,使电极的导电性下降。为解决这样的问题,我们在材料的选取上需要重新考虑。

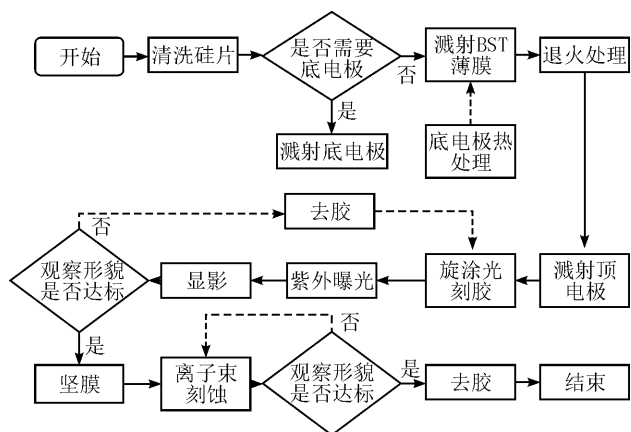


图 3 BST 基薄膜器件制备流程

Fig. 3 Fabrication process of BST based thin film devices

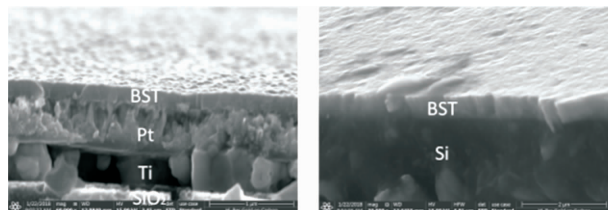


图 4 BST 基薄膜器件的 SEM 断面图

Fig. 4 SEM cross section of BST based thin film devices

Ti 层的主要目的是作为粘附层,因此可以将 Ti 使用其他金属材料作为替代。在本文中选用 Cr 作为 Ti 的替代材料。在制备了 Cr/Pt 电极后,在 650 °C 的纯氧氛围下进行退火处理。图 5(a)和(b)是 Ti/Pt 电极在退火处理后的 AFM 图,可以看出表面出现了 100 nm 左右的明显凸起。这和 SEM 的断面图所显示的情况是一致的,但是 AFM 图中显示的凸起幅度要明显大于 SEM 图中的凸起。这可能是由于表面有 BST 薄膜束缚导致,SEM 图中的凸起没有 AFM 图中的凸起明显。图 5(c)和(d)是使用 Cr 作为 Ti 的替代粘附层的 AFM 图。可以看出,Cr/Pt 型的底电极的表面并没有明显的凸起,只有 5 nm 左右的起伏。基本上验证了 Cr/Pt 型电极可以在一定程度上代替 Ti/Pt 型电极。

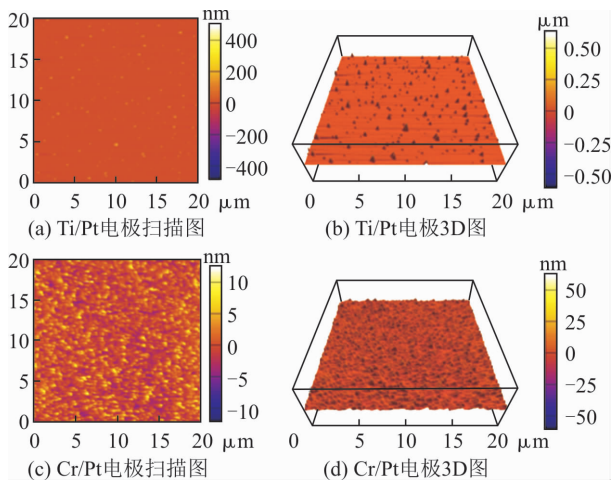


图5 Ti/Pt和Cr/Pt电极的原子力显微镜扫描

Fig. 5 AFM images of Ti/Pt and Cr/Pt electrodes

除了可以采用Cr替代Ti的方案来解决Ti/Pt电极带来的工艺不兼容问题外,还可以使用非金属材料制备的底电极解决工艺兼容问题。 LaNiO_3 薄膜不仅具有良好的导电性能,而且与BST薄膜具有相近的晶体结构和热膨胀系数,是一种十分理想的电极材料^[21]。经过对比研究优化了 LaNiO_3 的制备工艺参数,见表2。

表2 优化后的制备 LaNiO_3 薄膜的工艺参数

Tab. 2 Optimum technological parameters for LaNiO_3 thin film

本底真空/mT	成膜压力/mT	氧氮比	衬底温度/°C	溅射功率/W	退火温度/°C
6E-6	6	4:1	300	120	700

经700 °C退火处理后, LaNiO_3 的结晶效果很好,如图6(b)所示。相比较金属底电极而言, LaNiO_3 电极在退火后的表面平整度更好,也不会出现金属电极的疲劳性问题,而且由于更好的晶格匹配,器件的损耗更小,因此采用 LaNiO_3 制备BST基薄膜器件的底电极也是一个十分理想的选择。

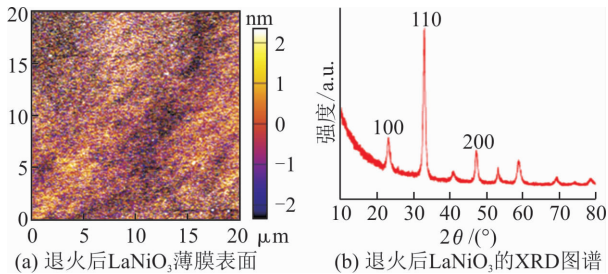


图6 LaNiO_3 的AFM扫描图和XRD图谱

Fig. 6 AFM images and XRD patterns of LaNiO_3 films

3 BST薄膜器件的THz测试及铁电薄膜电磁参数反演

由于BST薄膜在太赫兹频段下仍然具有较高

的介电常数,且具备一定的介电可调性,因此BST薄膜可用于太赫兹器件的功能层的设计。目前,关于铁电薄膜材料的低频测试方法已很成熟^[22-23],但太赫兹频段的测试手段仍然有限。鉴于BST等具有介电非线性的铁电薄膜对THz可调功能器件的重要意义,本文提出了一种可调的太赫兹频率选择表面的设计方案,利用THz-TDS设备进行了测试,通过测试结果的反演,能够提供一种可行的测试太赫兹频段介电常数的方法。

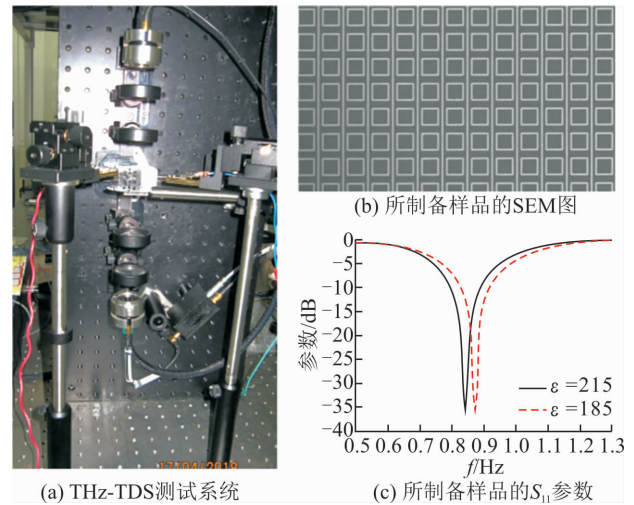


图7 太赫兹测试设备、制备的样品及 S_{11} 参数

Fig. 7 Terahertz test equipment, samples and S_{11} parameters

图7(a)是太赫兹测试系统的实物图,从图中可以看到太赫兹波束经过透镜聚焦照射到位于中间位置的样品上,透过样品的太赫兹波束再次经过透镜聚焦被接收器接收,这样就可以得到样品的时域信号。首先我们在1.2 mm厚的硅片上制备了650 nm厚的BST薄膜,然后上面镀一层500 nm厚的铂金薄膜,然后对铂金薄膜图形化处理,得到如图7(b)所示的待测试样品。在周期为50 μm的方型环单元之间插入5 μm宽的插指电极,从而提供可控的电场。通过控制输入电压来控制金属线之间的场强,从而实现对介电常数的控制,进而改变频率选择表面的工作频率。选用1.2 mm厚的硅片是为了获得更为密集的信号采集点,使得到的频域信号更加平滑,准确反应出真实的传输曲线,以便反演出所需的电磁参数。图7(c)是使用CST仿真得到的样品的 S_{11} 参数,可以看出当介电常数降低时,透射频率会增大,同时透射强度会小幅增加。因为BST在电场作用下介电常数会变小,如果在测试过程中传输曲线表现出相同的变化趋势,即场强增大透射频率增高且透射强度小幅增大时,可以认为BST在电场作用下的介电常数变小。

在测试过程中,首先测试作为衬底硅片的时域信号,将其作为参考信号,然后使用带有薄膜的样品替换硅片,再次测量得到一组时域信号,如图 8(a)所示。然后对 2 组时域信号进行傅里叶变换能够获得频域信号,见图 8(b)。从图中看到,由于信号最强的频率是在 0.3~1.3 THz 之间(即 I 区域),这段频率内的信号信噪比很高,能真实的反应出传输特性;在 2~3 THz(即 II 区域)之间的信号强度很低,噪声和信号处于一个量级,得到信息出现了十分严重的波动,难以高精度的给出传输特性。在测试过程中,对不加电压的样品和加 50 V 电压的样品分别进行测试,得到的时域信号图 8(c)。在经过傅里叶变换获得频域信号后,使用参考频域信号对样品频域信号做归一化处理,得到的传输曲线图 8(d)。通过实验数据发现,在施加 10 kV/cm 的场强后,通带的频率升高,透过率小幅增大。通过对比实验和仿真的传输曲线,可以发现当介电常数降低时,通带频率会增大,透射率会小幅增加,这与仿真结果的变化趋势是一致的。通过透射峰值频率和仿真数据相对应,能够反演出铁电薄膜在不同偏压下的 THz 频段的介电常数,进而获得介电常数在 THz 频段的变化范围及介电非线性等特性。

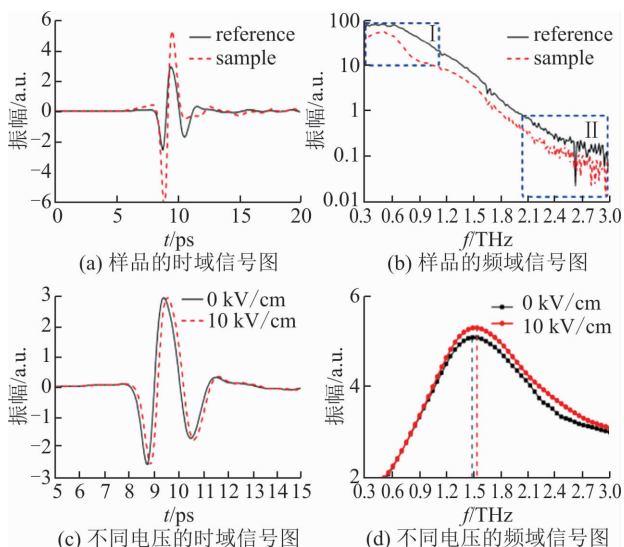


图 8 测试得到的时域信号和频域信号

Fig. 8 Time domain signals and frequency domain signals

4 结语

本文介绍了制备 BST 基薄膜器件的工艺流程,研究了在磁控溅射过程中各个参数对于薄膜质量的影响,以及其他工艺流程中对影响器件质量的关键步骤,最终优化得到了 BST 基薄膜的制备工艺流程。并且在 BST 基薄膜器件的衬底、电极材料的选择

上进行了研究,最终确定了 Cr/Pt 型电极可以很好地替代 Ti/Pt 型电极,并且 LaNiO_3 也是一种理想的底电极材料。在文章的最后设计了一种基于 BST 薄膜的频率选择表面,同时给出了其在 THz 频段的测试方法。通过结合仿真研究可以确定铁电薄膜在 THz 频段的介电参数,相关研究可用于精确测定铁电薄膜在 THz 频段的介电特性,为铁电薄膜功能器件的研制提供了一种介电常数的测试方法。

参考文献(References):

- [1] FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for Terahertz Science and Technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] MITTLEMAN D M, GUPTA M, NEELAMANI R, et al. Recent Advances in Terahertz Imaging[J]. Applied Physics B, 1999, 68(6): 1085-1094.
- [3] NESHAT M, SAEEDKIA D, SABRY R, et al. An Integrated Continuous-Wave Terahertz Biosensor[C]// Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2007, 6549: 65490E.
- [4] LIBON I H, BAUMGÄRTNER S, HEMPEL M, et al. An Optically Controllable Terahertz Filter[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(20): 2821-2823.
- [5] MICKAN S P, MENIKH A, LIU H, et al. Label-Free Bioaffinity Detection Using Terahertz Technology [J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(21): 3789-3795.
- [6] WANG S, ZHANG X C. Pulsed Terahertz Tomography[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2004, 37(4): R1-R36.
- [7] SCOTT J F. High-Dielectric Constant Thin Films for Dynamic Random Access Memories (DRAM)[J]. Annual Review of Materials Science, 1998, 28(1): 79-100.
- [8] VELU G, BLARY K, BURGNIES L, et al. A 360° BST Phase Shifter with Moderate Bias Voltage at 30 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(2): 438-444.
- [9] SAZEGAR M, ZHENG Y, KOHLER C, et al. Beam Steering Transmitarray Using Tunable Frequency Selective Surface with Integrated Ferroelectric Varactors [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(12): 5690-5699.
- [10] CHUN Y H, HONG J S, BAO P, et al. BST-Varactor Tunable Dual-Mode Filter Using Variable Transmission Line[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(3): 167-169.
- [10] CHUN Y H, HONG J S, BAO P, et al. BST-Varactor Tunable Dual-Mode Filter Using Variable Trans-

- mission Line[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(3): 167-169.
- [11] LU S G, ZHU X H, MAK C L, et al. High Tunability in Compositionally Graded Epitaxial Barium Strontium Titanate Thin Films by Pulsed-Laser Deposition [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82 (17): 2877-2879.
- [12] TAHAN D M, SAFARI A, KLEIN L C. Preparation and Characterization of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, TiO_3 Thin Films by a Sol-Gel Technique[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(6): 1593-1598.
- [13] 李彩霞,王进美,李杨. 低密度 SiO_2 气凝胶的常压制备工艺[J]. 西安工程大学学报, 2015, 29(6): 683-687.
- LI C X, WANG J M, LI Y. Preparation Process of Low Density Silica Aerogels by Ambient Pressure Drying [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2015, 29(6): 683-687. (in Chinese)
- [14] BEITEL G, WENDT H, FRITSCH E, et al. A Novel Low-Temperature (Ba, Sr) TiO_3 (BST) Process with TiTiN Barrier for Gbit DRAM Applications [J]. Microelectronic Engineering, 1999, 48(1-4): 299-302.
- [15] PADMINI P, TAYLOR T R, LEFEVRE M J, et al. Realization of High Tunability Barium Strontium Titanate Thin Films by RF Magnetron Sputtering [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(20): 3186-3188.
- [16] 穆海宝,虞春艳. 大气压氩等离子体射流对聚丙烯表面改性的影响 [J]. 西安工程大学学报, 2016, 30(2): 150-157.
- MU H B, YU C Y. Effect of Atmospheric Pressure Argon Plasma Jet Flow on PP Film Surface Modification [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2016, 30(2): 150-157. (in Chinese)
- [17] 林明通, 陈国荣, 杨云霞, 等. 溅射工艺参数对 $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ 薄膜沉积速率和介电性能的影响 [J]. 真空, 2005, 42(6): 39-42.
- LIN M T, CHEN G R, YANG Y X, et al. Effect of Sputtering Process on Deposition Rate and Dielectrical Properties of $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ Thin Films [J]. Vacuum, 2005, 42(6): 39-42. (in Chinese)
- [18] 唐逸, 杨春生, 张丛春. 氧分压对磁控溅射 BST 薄膜及其介电性能的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(1): 108-111.
- TANG Y, YANG C S, ZHANG C C, et al. The Effect of Oxygen Partial Pressure on RF Sputtered (Ba, Sr) TiO_3 Thin Film and Its Electrical Properties [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(1): 108-111. (in Chinese)
- [19] 郭杰, 普朝光, 杨明珠, 等. 退火温度对铁电薄膜钛酸锶钡的影响 [J]. 红外技术, 2003, 25(4): 88-91.
- GUO J, PU C G, YANG M Z, et al. Effect of Annealing Temperature on Ferroelectric Barium Strontium Titanate Thin Films [J]. Infrared Technology, 2003, 25(4): 88-91. (in Chinese)
- [20] 韦其红, 赵振华, 付兴华, 等. 退火温度对铁电薄膜钛酸锶钡的影响 [J]. 陶瓷学报, 2006, 27(1): 92-96.
- WEI Q H, ZHAO Z H, FU X H, et al. Effect of Annealing Temperature on Ferroelectric Barium Strontium Titanate Thin Films [J]. Journal of Ceramics, 2006, 27(1): 92-96. (in Chinese)
- [21] LI A, GE C, LYU P, et al. Fabrication and Electrical Properties of Sol-Gel Derived $BaTiO_3$ Films with Metallic $LaNiO_3$ Electrode [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(12): 1616-1618.
- [22] 张崇辉, 王晓娟, 张晓娟, 等. 0.9PMN-0.1PT 弛豫铁电陶瓷制备及介电性能 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2014, 27(3): 351-354.
- ZHANG C H, WANG X J, ZHANG X J, et al. Fabrication and the Dielectric Properties of 0.9PMN-0.1PT Relaxor Ferroelectric Ceramic [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2014, 27(3): 351-354. (in Chinese)
- [23] 张崇辉, 王晓娟, 朱长军. 掺 La 的锆锡钛酸铅陶瓷制备及介电性能 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2016, 29(1): 77-81.
- ZHANG C H, WANG X J, ZHU C J. Fabrication and Dielectric Property of La Modified Lead Zirconate Titanate Stannate Ceramics [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2016, 29(01): 77-81. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)