

介电可调薄膜材料及压控微波器件研究

蒋书文, 李汝冠, 王鲁豫, 刘兴钊, 李言荣

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】利用介电可调薄膜材料的调谐特性研制的介质压控微波器件高频特性好、功率容量大、响应速度快, 还有易集成、功耗小、成本低、可靠性高的特点, 相比半导体管、铁氧体以及MEMS器件有明显的优势。该文系统介绍了近年来国内外介电可调薄膜材料及压控微波器件的研究进展, 并结合作者的工作评述了介电可调薄膜材料和压控微波器件的应用情况。除研究最为集中的钛酸锶钡 $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST)材料, 还介绍了具有较高调谐率的铋基焦绿石铋酸铋镁 $Bi_{1.5}MgNb_{1.5}O_7$ (BMN)薄膜材料, 该材料介电损耗低(约0.002), 介电常数适中(约86), 温度系数小, 是一种极具发展前景的微波介电可调材料。

关键词 钛酸锶钡BST薄膜; 铋酸铋镁BMN薄膜; 介电可调薄膜材料; 压控微波器件

中图分类号 TN604; TN61

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.017

Investigations of Tunable Dielectric Thin Film Materials and Voltage-Controlled Microwave Devices

JIANG Shu-wen, LI Ru-guan, WANG Lu-yu, LIU Xing-zhao, and LI Yan-rong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Voltage-controlled devices based on tunable dielectric thin film materials are attractive for microwave applications for their excellent high frequency performance, power handling capability, and fast tuning speed. Dielectric voltage-controlled microwave devices offer advantages over semiconductor varactor diodes, ferrite, and MEMS devices with potential integration with microelectronic circuits, small power consumption, low cost, and high reliability. In this paper, based on the recent work of the authors, the recent development of tunable dielectric thin film materials and voltage-controlled microwave devices is introduced. Besides the intensively investigated $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) thin films, the alternative tunable $Bi_{1.5}MgNb_{1.5}O_7$ (BMN) thin films with cubic pyrochlore structure are introduced due to relatively high tunability, low loss dielectric loss (~0.002), moderate permittivity (~86), and small temperature coefficient. BMN thin films may be one of potential tunable materials for microwave applications.

Key words barium strontium titanate (BST) thin films; bismuth magnesium niobate (BMN) thin films; tunable dielectric thin film materials; voltage-controlled microwave devices

微波电子系统正向宽频带、高容量、体积更加小型化的方向发展, 对集成化、高性能的微波元器件的需求日益迫切。介电可调材料具有介电常数随外加电场变化而变化的介电非线性特性, 利用这种特性可以调制微波信号的频率、相位、幅度, 制成压控微波器件^[1-4], 如移相器、自适应匹配网络、电调滤波器、压控振荡器、电控衰减器、微波开关、限幅器等。介质压控微波器件具有易集成、成本低、功耗小、承受功率大、响应速度快、可靠性高的特点, 在移动通信、卫星系统、雷达系统等军事和民用电子系统中有着巨大应用前景。

早在20世纪60年代^[5], $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST)铁电材

料的微波介电调谐性能就引起了人们的广泛兴趣。与块体材料相比, 薄膜器件工作电压低、响应速度快、能够与微带线电路技术和半导体技术集成, 因此, 过去近20年, BST薄膜材料的制备、结构和性能得到集中深入的研究。BST薄膜材料的特点是介电调谐率高, 但介电损耗较大。近年来, 研究发现某些铋基焦绿石结构薄膜材料具有介电调谐性能, 介电损耗小, 有可能成为另一类有发展前景的候选介电可调材料^[6-8]。

目前, 关于介电可调材料的综述文章较多^[1-4], 本文结合作者的研究工作, 围绕压控器件对介电可调薄膜材料的性能要求, 介绍介电可调薄膜材料及

收稿日期: 2009-06-24

基金项目: 自然科学基金(60871049); 教育部博士点基金(20060614009)

作者简介: 蒋书文(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电子薄膜材料与集成器件方面的研究。

压控器件的研究现状。

1 压控微波器件对介电可调薄膜材料的性能要求

介电调谐率是衡量可调材料的介电常数随外加电场变化能力的指标。一般电场越强,调谐率越大,但是,过高的电场会降低器件的可靠性。调谐率直接关系到微波调谐器件的调谐能力,在一定电场下,调谐率越大越好。介质材料的介电损耗越小,器件的插入损耗就越低,因此材料介电损耗越低越好。

一般情况下,介质可调材料应有较大的介电调谐率和低的介电损耗。其综合性能可用优质因子(FoM)表示。优质因子定义为介电调谐率与介电损耗的比值,没有明确的物理意义。文献[9]提出的交换品质因子(CQF)能更准确地描述介质可调材料的综合性能:

$$CQF = \frac{(n-1)^2}{n \tan \delta_1 \tan \delta_2} \quad (1)$$

式中 n 为介电调谐率; $\tan \delta_1$ 、 $\tan \delta_2$ 分别是零偏压和非零偏压的介电损耗。CQF越大,综合性能越好。

不同类型的微波器件对可调材料的性能要求侧重是不同的。对传输型器件,介电调谐率越高越好。如相控阵天线用移相器中,可调材料的介电调谐率越高,移相器相移能力越强,雷达波束扫描范围也就越宽。移相器的优质因子 F_{PH} 定义为移相度与插损之比,与材料性能参数CQF的关系如下^[10-11]:

$$F_{PH} = 6.6 \frac{\Delta\varphi/2}{\sin(\Delta\varphi/2)} \sqrt{CQF} \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi$ 是期望的相移。为实现 $F_{PH} \geq 200$ 的优质因子,由式(2)可知,要求可调材料的交换品质因子 $CQF \geq 900$ 。假如材料的介电调谐率 $n=3$,那么只需介电损耗 $\tan \delta < 0.035$ 就足以满足移相器的使用要求。

而对于谐振型微波器件,材料应具有尽量低的介电损耗。以带通滤波器为例, M 阶滤波器的优质因子表示为^[12]:

$$F_{BPF} = \frac{1}{2N^2} \sqrt{CQF} \quad (3)$$

为实现 $F_{BPF}=5$ 的优质因子,对一个三阶滤波器而言,材料的CQF应在8 000以上,而对五阶滤波器来说,CQF在60 000以上,意味着如果材料的介电调谐率 $n=2$,那么介电损耗 $\tan \delta$ 必须分别不大于0.008和0.003。

此外,材料介电性能受温度影响越小越好,适

中的相对介电常数能使微波电路阻抗匹配更加容易实现。

2 介电可调薄膜材料研究现状

下面分别介绍BST薄膜材料和铋基焦绿石薄膜的介电性能及研究现状。

2.1 BST薄膜材料

BST薄膜材料的特点是介电调谐率高,但介电损耗大。BST薄膜材料性能优化的主要目标是降低介电损耗,在某些应用场合,也需要更高的介电调谐率。

BST薄膜的介电损耗包括本征损耗与非本征损耗两部分。本征损耗由晶格的介电极化或弛豫引起,而非本征损耗主要由结构缺陷、界面空间电荷等因素造成^[13-18]。为降低损耗,主要途径是改善薄膜微结构和各种界面,主要技术手段有掺杂、多层复合、各种后处理等。

掺杂较多采用受主掺杂。受主掺杂是指取代离子氧化数低于被取代离子的掺杂,它能接受电子,受主掺杂离子在结构中平衡氧空位 $V_O^{\cdot\cdot}$ 产生的电荷。常用的受主掺杂离子有 Mg^{2+} 、 Co^{3+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Au^+ 、 Ag^{+} ^[19-42]等。 Mn^{2+} 掺杂可以减少氧空位,中和自由电子,降低自由电子浓度,由此降低薄膜的漏电流和介电损耗。另外,受主杂质的掺入可以在价带中形成带正电的空穴,降低薄膜的费米能级,提高势垒高度,这对降低BST薄膜的漏电流密度也有帮助。采用 Al_2O_3 掺杂^[34],得到了介电损耗为0.011的BST薄膜;采用 MgO 掺杂的多层梯度薄膜^[43-44],介电损耗低至0.008。

后处理可修复薄膜中的缺陷、改善界面,除了退火处理外,采用高活性的氧等离子体处理薄膜,在较低的温度下可以补偿薄膜中的氧缺陷,从而降低薄膜的介电损耗^[45-48]。

多层复合薄膜主要是通过薄膜与电极间增加一层缓冲层从而改善薄膜的生长特性和降低薄膜的漏电流和介电损耗;或者通过增加一层低损耗的介质层从而降低薄膜介电损耗。文献[49]采用 MgO 作为下电极缓冲层得到了介电可调为30%、介电损耗为0.009的BST薄膜;文献[50]将 $Bi_{1.5}Zn_{1.0}Nb_{1.5}O_2$ 与BST复合,将介电损耗降低到0.005以下。

综合采用掺杂、多层复合、氧等离子体处理等手段可以制备满足应用要求的低损耗BST薄膜。作者将低损耗的 SiN 薄膜与 Mn^{2+} 掺杂的 $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$

薄膜复合, 研究总结了多层复合薄膜介电损耗和调谐率随薄膜结构变化的规律^[51]。在此基础上, 采用磁控溅射方法研制了具有较高调谐率、极低介电损耗的BST/BZN复合薄膜, 其品质因子($Q=1/\tan\delta$)达200以上, 如图1所示, 满足压控振荡器(VCO)的性能要求。

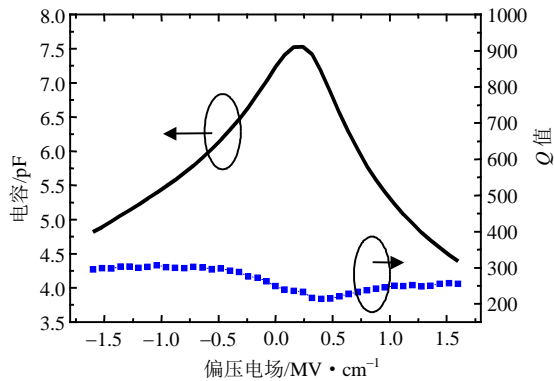


图1 BST/BZN复合薄膜的介电性能($f=100$ kHz)

BST薄膜材料的介电调谐率与薄膜组成^[52-53]和结构^[54-62]有关。BST是钛酸钡(BaTiO_3)和钛酸锶(SrTiO_3)的无限固溶体, 其铁电居里温度随着Ba和Sr的比率增加而降低, 介电调谐率也随之增大, 为获得介电调谐率大的BST薄膜材料, 应适当增加Ba的比例。研究也表明, 介电调谐率还随薄膜中(Ba+Sr)/Ti比例的增加而增大^[52-53], 在磁控溅射中, 薄膜组成可通过工艺参数得以控制。BST薄膜中晶粒具有不同的取向, 其介电性能也不一样。文献[54]的研究结果表明, 具有(100)织构的BST薄膜介电调谐率接近4:1。

作者调整溅射靶材组成, 优化工艺条件和薄膜结构, 制备了介电调谐率 $n>3$ 、介电损耗介于0.005~0.01的 $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ 薄膜, 如图2所示。该薄膜可用于介质移相器的研制。在移相器中, 高的调谐率能够减少级联节数, 从而降低器件插入损耗。

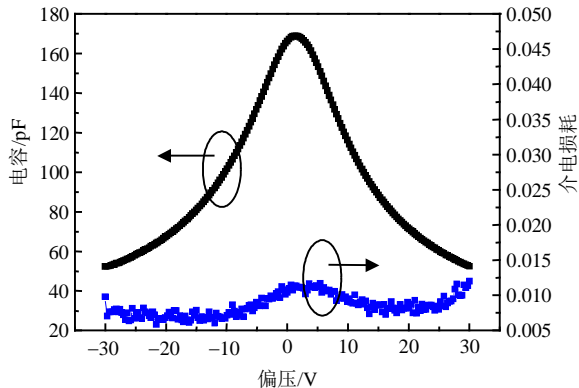


图2 高调谐率、较低介电损耗的BST薄膜($f=100$ kHz)

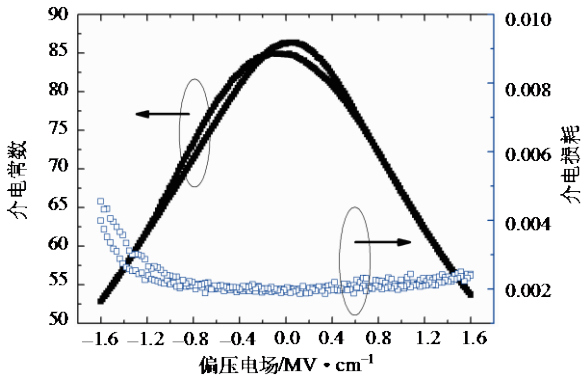
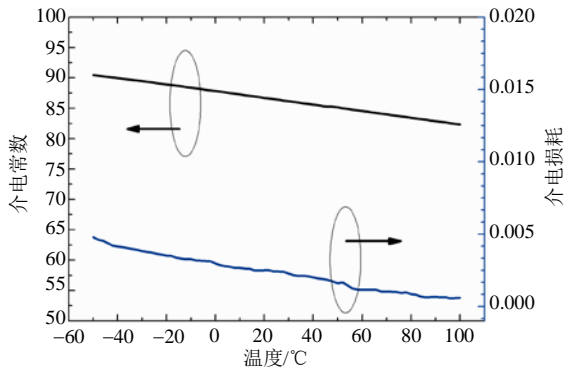
2.2 铋基焦绿石薄膜材料

组成为 $\text{Bi}_{1.5}\text{ZnNb}_{1.5}\text{O}_7$ 的铋基BZN材料具有焦绿石结构, 介电常数适中(~ 150)^[63-65]。文献[6]首先报道了BZN薄膜材料的介电可调现象。但是, BZN薄膜材料调谐率低, 要达到一定的调谐率, 调谐电场要求很高。但由于这种材料介电损耗很低, 各研究机构纷纷开展了BZN薄膜材料的研究^[66-72]。文献[9]报道了BZN薄膜迄今观察到的最大介电调谐率, 在调谐率约55%的情况下, 调谐电场达到2.4MV/cm。

为提高调谐率、降低调谐电场, BZN薄膜材料的性能改性研究主要有两类方法。一是将BZN材料与BST材料复合或进行多层结构设计^[73-76], 前已述及BZN与BST薄膜构成的BZN/BST复合薄膜在损耗和调谐率之间有较好的折中^[50,76], 适当调整复合结构还可进一步优化性能。另外, 是在BZN薄膜中引入强极性组分^[77-80]。BZN中引入强极性组分可以增强介电极化, 介电常数增大, 介电调谐性能增强, 这些强极性组分通常取代B位的 Nb^{5+} 离子。如引入 Ti^{4+} 离子取代部分 Nb^{5+} 离子后, 因为 TiO_4 八面体中 Ti^{4+} 离子在电场作用下的极化能力强而可以增大BZN的调谐率^[79-80]。但是, 极性组分的引入也会增大介电损耗。

与BST材料相比, BZN薄膜材料的介电调谐机理仍然没有系统的研究和认识, 但一般认为可能与立方焦绿石结构中A位离子的无序结构及其介电响应有关^[81-83], 作者的相关研究表明BZN薄膜调谐性能受A位离子的影响。由此看来, 为提高这类铋基焦绿石材料的介电调谐性能, 从调谐机理入手, 研究A位离子构成、无序分布以及电场作用下的弛豫运动和极化响应将是一种有效的途径。

基于以上思路, 作者用 Mg^{2+} 取代BZN材料中的 Zn^{2+} 离子, 制备了 $\text{Bi}_{1.5}\text{MgNb}_{1.5}\text{O}_7$ (BMN)铋基焦绿石薄膜^[8]。研究发现, 在A位, Zn被Mg所取代, BMN薄膜材料具有比BZN薄膜更高的介电调谐率^[8], 如图3所示, 在电场强度为1.6 MV/cm下, 调谐率为39.2%, 非线性介电系数比BZN薄膜高近1个数量级^[7-8]。而且BMN薄膜介电损耗小(约0.002), 介电常数适中(约86), 随温度变化较小(介电温度系数TCC约-500 ppm/K), 如图4所示。由于不含易挥发的Zn, 薄膜制备相对BZN材料而言比较容易, 重复性较好。BMN铋基焦绿石材料是一种非常有前途的新型微波介质可调材料。

图3 BMN薄膜的介电调谐性能和介电损耗 ($f=100$ kHz)图4 BMN薄膜介电温度特性 ($f=100$ kHz)

3 介质压控微波器件研究现状

各种类型的微波控制电路实现对微波信号的频率、相位、幅度等的控制功能,是相控阵雷达、多波束雷达、电子对抗技术、微波通讯和微波测量技术的关键技术,压控微波器件是微波控制电路的关键元器件。

压控微波器件常用的有微波半导体器件和铁氧体器件, MEMS器件发展也很快。相对半导体管、铁氧体以及MEMS器件,介质压控器件有明显的优势。与半导体管器件相比,介质压控器件高频损耗小、功率容量高, IP3可达70 dBm以上。与铁氧体器件和MEMS器件相比,介质调谐微波器件调谐响应速度快(几个微秒),特别适合在要求快速波束扫描的相控阵雷达装置中应用。介质压控器件易集成、功耗小、成本低、可靠性高,能够与微带线电路技术、半导体技术集成,构成微波混合集成电路(HMIC)和单片微波集成电路(MMIC)。

最简单的压控介质微波器件是介质变容管,它可取代小变比($<3\sim 4$)的半导体PIN管,也是构成移相器、滤波器、振荡器等微波器件的核心。

3.1 介质变容管

介质变容管结构大体上有插指型(IDC)、共面波导型(CPW)与平板型(PPC)3种结构。平板型变容管

能有效地把外加电场限制在薄膜上,抑制边缘电容效应,电场利用率高,故可以获得较高的调谐率。

采用微细加工工艺,作者研制了平板型结构的介质变容管,如图5所示。该变容管采用低损耗BST/BZN复合介质薄膜,介质厚度为250 nm, 150 nm厚度的Pt作为上下电极。该变容管调谐率较高($>40\%$)。

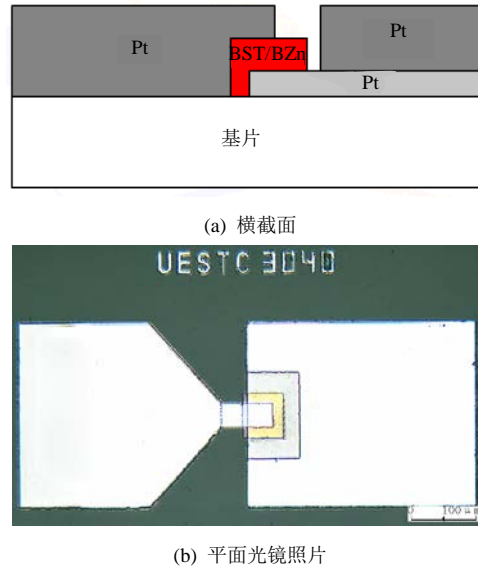


图5 研制的BST/BZN介质变容管

不同尺寸的介质变容管在1~100 MHz下的性能如图6所示。可看到基于低损耗BST/BZN复合薄膜的变容管具有较高的 Q 值(>200 , $f=1$ MHz)。据文献报道,目前批量产品化的加拿大Gennum公司所报道的BST变容管在1 MHz下的 Q 值约100^[84],瑞典查尔姆斯理工大学(Chalmers University of Technology)BST变容管在同样频率下 Q 值为200左右^[85]。

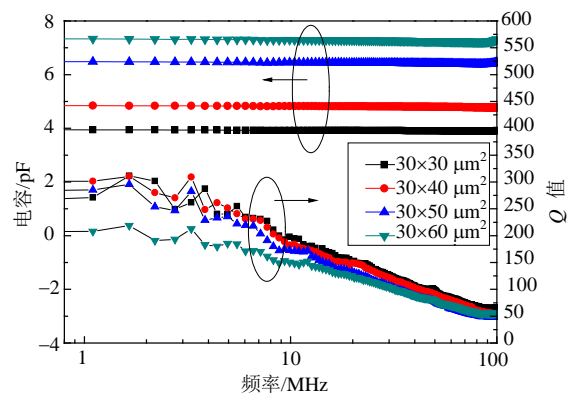


图6 BST/BZN介质变容管的性能

从图6看到,变容管的电容值随频率变化很稳定,但 Q 值随频率的增加而下降,在100 MHz时 Q 值约为50左右,由于金属电极厚度小(150 nm),高频下器件 Q 值的下降是由电极损耗引起的。

变容管的 Q 值与介质损耗和金属电极损耗的关系表示为:

$$\frac{1}{Q_{\text{total}}} = \frac{1}{Q_{\text{BST/BZN}}} + \frac{1}{Q_{\text{electrodes}}} = \tan \delta_d + \tan \delta_c \quad (4)$$

式中 电极损耗 $\tan \delta_c$ 又与频率和金属电极表面电阻 R_s 有关, 表示为^[1]:

$$\tan \delta_c = \frac{2}{3} R_s \omega C \quad (5)$$

式中 金属电极表面电阻 R_s 与电极厚度 t 的关系为:

$$R_s = \frac{1}{\sigma \delta_{\text{skin}} (1 - e^{-t/\delta_{\text{skin}}})} \quad (6)$$

式中 δ_{skin} 是电极材料的趋肤深度, 其含义是高频下电磁场趋向于传输导体表面。趋肤深度 δ_{skin} 与频率、材料磁导率和电导率有关^[1,86]:

$$\delta_{\text{skin}} = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2} \quad (7)$$

式(5)~式(7)表明, 电极损耗随着频率的增加而增大, 高频情况下器件的 Q 值主要决定于电极损耗。为提高高频 Q 值, 应采用较厚的电极, 较理想的电极厚度 t 应为趋肤深度 δ_{skin} 的3~5倍。

3.2 介质移相器

移相器是相控阵天线系统的核心器件之一, 也是介质可调材料最重要的应用之一。对于移相器性能的要求是移相度足够大而插入损耗尽量小, 有些场合还要求移相器具有大的功率承载能力。

关于介质移相器的报道大多基于BST薄膜, 覆盖频段从数百兆赫兹到30 GHz以上。美国佐治亚理工学院研制出S波段的反射型移相器和全通网络移相器^[87]。反射型移相器由一个3 dB耦合器和两个相同的反射终端构成, 面积为4 mm×4 mm, 实现的移相度为0°~178°, 2.7 GHz下的插入损耗为2.9 dB。单节全通网络移相器的尺寸仅为2.6 mm×2.2 mm, 在2.4 GHz时移相度为121°, 最大插入损耗为1.8 dB。两节全通网络移相器可以实现250°的相移, 插入损耗为2.2~3.75 dB。美国加州大学圣塔芭芭拉分校(UCSB)基于平板型BST变容管的X波段传输型移相器在频率为10 GHz时, 能实现0°~240°的连续移相, 插入损耗为3 dB, 优质因子在6.3 GHz时为93°/dB, 在8.5 GHz时有87°/dB^[88]。集总结构BST移相器在5.2 GHz移相度为63°而插入损耗仅为1.1 dB^[89]。采用共面波导结构的BST介质移相器, 在30 GHz下也实现了45°/dB的优质因子^[90]。

基于BZN薄膜的介质移相器的研制也取得了较好的结果^[91]。在9.3 GHz频率下, 其优质因子为64.2°/dB, 在13.9 GHz下仍然达到57.6°/dB。

作者在470 MHz移相器中应用BST/BZN介质变容管, 实现的单节相移为15°, 插入损耗小于0.5 dB。

介质移相器在国外已经形成了产品。代表性的如美国Agile Materials公司的铁电移相器系列, 工作频率从1 GHz以下直到40 GHz, 360°移相器的插损为6~7 dB, 甚至将天线单元与电调移相器集成在了一起^[92]。早在2001年美国Paratek微波公司也推出了世界上首台基于介质移相器的相控阵扫描阵列天线DRWiN系统^[93]。

3.3 电调滤波器

滤波器完成微波电路中重要的选频功能, 采用电调介质滤波器可以简化电路, 减小体积, 提高性能和可靠性。

基于平板型BST变容管可以实现低插损、高调谐带宽的低通和带通滤波器^[94]。据美国密歇根大学安阿伯校区(The University of Michigan at Ann Arbor)和北卡罗莱纳州立大学报道, 他们研制的低通滤波器(LPF)插入损耗为2 dB, 在0~9 V外加偏压下, 3 dB截止频率从120 MHz移动到170 MHz(40%调谐率)。对于带通滤波器(BPF), 插入损耗为3 dB, 在0~6 V外加偏压下, 中心频率从176 MHz移动到276 MHz(57%调谐率)。

美国Paratek微波公司已经实现两种BST压控带通滤波器的商业化, 包括2 GHz下工作的混合微带线谐振滤波器^[95]以及工作在22.5 GHz和38.5 GHz的鳍线波导谐振滤波器^[96]。二者均采用插指型BST变容管结构, 前者在200 V偏压下通带插损为7.7 dB, 中心频率从2.16 GHz移动到2.36 GHz(调谐率9.3%)。工作在22.5 GHz下三极鳍线波导谐振滤波器, 最大插损只有2 dB, 300 V电压下调谐带宽为2.2%。中心频率为38.5 GHz的两极鳍线滤波器, 插损为3 dB, 200 V下调谐带宽为1%。

钛酸锶(STO)薄膜在低温下具有介电调谐特性, 作者以STO/YBCO薄膜为基础研制的三阶梳状滤波器, 采用插指型电容结构。在77 K下, 滤波器中心频率可由2.64 GHz移动到2.93 GHz, 调谐带宽为290 MHz, 带内插损为2.8 dB。

3.4 压控振荡器

介质变容管器件高频性能好, 可以用来研制低相位噪声、调谐带宽大的压控振荡器。文献[97]报道了基于平板型BST变容管的压控振荡器, 其振荡频率从205 MHz到216.3 MHz变化, 相位噪声为-140 dBc/Hz@1 MHz。文献[98]报道了具有较大调谐带宽的压控振荡器, 在30 V外加偏压下振荡频率从

34.40 GHz移动到36 GHz, 调谐带宽为1.6 GHz, 相对带宽约5%。

作者基于BST/BZN变容管研制的压控振荡器, 中心频率为9 GHz, 调谐带宽约140 MHz, 相位噪声为-95 dBc/Hz@100 kHz。

此外, 基于BST变容管的阻抗匹配网络^[99]和微波开关^[100]都已有报道。美国Paratek微波公司、加拿大Gennum公司的阻抗匹配网络已形成系列产品, 并为用户批量供货。

4 结束语

介质压控微波器件高频特性好、功率容量大、响应速度快, 还具有易集成、功耗小、成本低、可靠性高的特点, 相比半导体管、铁氧体以及MEMS器件有明显的优势。国外已经出现了系列化、产品化的器件甚至系统。国内与国外差距较大, 当前应精心组织研究队伍、进行相关平台的建设和投入。

介质压控微波器件的发展, 目标是研制更高性能的器件, 满足高性能微波电子系统的需求。迫切需要在薄膜材料制备、微细加工、微波系统设计、仿真以及测量和调试技术等方面取得突破。

介质压控微波器件发展的另一个方向是集成化。一方面, 与微带线电路技术、微波固态电路集成, 利用低温共烧技术(LTCC)和多芯片组装技术(MCM), 向微波混合集成电路(HMIC)发展; 另一方面, 是与有源器件技术集成, 发展单片微波集成电路(MMIC)。据报道, Paratek微波公司与意法半导体公司合作, 利用该公司无源有源器件一体化(IPAD)技术, 将介质变容管与有源器件集成, 并将于2009年底为市场提供可压控调谐的微波器件。

参 考 文 献

- [1] BAO P, JACKSON T J, WANG X, et al. Barium strontium titanate thin film varactors for room-temperature microwave device applications[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41: 063001.
- [2] TAGANTSEV A K, SHERMAN V O, ASTAFIEV K F, et al. Ferroelectric materials for microwave tunable applications [J]. *J Electroceramics*, 2003, 11: 5.
- [3] SETTER N, DAMJANOVIC D, ENG L, et al. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications [J]. *J Appl Phys*, 2006, 100: 051606.
- [4] GEVORGIAN S S, KOLLBERG E L. Do we really need ferroelectrics in paraelectric phase only in electrically controlled microwave devices?[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2001, 49: 2117-2124.
- [5] DOMENICO M D, JOHNSON D A, PANTELL R H. Ferroelectric harmonic generator and the large-signal microwave characteristics of a ferroelectric ceramic[J]. *J Appl Phys*, 1962, 33: 1697.
- [6] REN W, TROLIER-MCKINSTRY S, RANDALL C A, et al. Bismuth zinc niobate pyrochlore dielectric thin films for capacitive applications[J]. *J Appl Phys*, 2001, 89: 767.
- [7] LU J, STEMMER S. Low-loss, tunable bismuth zinc niobate films deposited by rf magnetron sputtering[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 2411.
- [8] JIANG S W, LI Y R, LI R G, et al. Dielectric properties and tunability of cubic pyrochlore $\text{Bi}_{1.5}\text{MgNb}_{1.5}\text{O}_7$ thin films[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 162908.
- [9] VENDIK I B, VENDIK O G, KOLLBERG E L. Commutation quality factor of two-state switchable devices[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48: 802.
- [10] VENDIK O G, VENDIK I B, SHERMAN V O. Commutation quality factor as a working tool for optimization of microwave ferroelectric devices[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2002, 43: 81.
- [11] VENDIK I, VENDIK O, KOLLBERG E, et al. Theory of digital phase shifters based on high-Tc superconducting films[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1999, 47: 1553.
- [12] VENDIK I, VENDIK O, PLESKACHEV V, et al. Design of tunable ferroelectric filters with a constant fractional band width[J]. *IEEE MTT-S Dig*, 2001, 3: 1461.
- [13] ANURANJAN S, KUMAR D, RAJIV K. LaNiO_3 as contact material for (Ba, Sr) TiO_3 dielectric thin films. *electrochem[J]. Solid-State Lett*, 1999, 2: 294-296.
- [14] AKCAY G, MISIRLIOGLU I B, ALPAY S P. Dielectric and pyroelectric properties of barium strontium titanate films on orthorhombic substrates with (110)/(100) epitaxy[J]. *J Appl Phys*, 2007, 101: 104110-104117.
- [15] TOMOAKI Y, VLADIMIR O S, ANDREAS N. Epitaxial/amorphous $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ film composite structure for tunable applications[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 032905-032907.
- [16] VOROBIEV A, RUNDQVIST P, KHAMCHANE K, et al. Microwave loss mechanisms in $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$ thin film varactors[J]. *J Appl Phys*, 2004, 96: 4642.
- [17] PARK B H, PETERSON E J, JIA Q X. Effects of very thin strain layers on dielectric properties of epitaxial $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ films[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 533-535.
- [18] HYUN S, LEE J H, KIM S S, et al. Anisotropic tuning behavior in epitaxial $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 3084-3086.
- [19] LEE S Y, TSENG T Y. Electrical and dielectric behavior of MgO doped $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ thin films on Al_2O_3 substrate[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1797.
- [20] JOSHIA P C, COLE M W. Mg doped $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films for tunable microwave applications[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 289.
- [21] COLE M W, GEYER R G. The dependence of dielectric properties on compositional variation for tunable device applications[J]. *Mechanics of Mater*, 2004, 36: 1017.
- [22] COLE M W, JOSHI P C, ERVINA M H, et al. The influence of Mg doping on the materials properties of $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films for tunable device applications[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 374: 34-38.

- [23] COLE M W, NOTHWANG W D, HUBBARD C, et al. Low dielectric loss and enhanced tunability of $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ based thin films via material compositional design and optimized film processing methods[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 93 (11): 9218.
- [24] COLE M W, HUBBARD C, NGO E, et al. Structure property relationships in pure and acceptor doped $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films for tunable microwave device applications[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 92 (1): 475.
- [25] WANG S Y, CHENG B L, WANG C, et al. Reduction of leakage current by Co doping in Pt/ $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ / $\text{Nb}_2\text{Sr}_2\text{TiO}_3$ capacitor[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84 (20): 4116.
- [26] 高丽娜, 杨晓静, 张良莹, 等. Co掺杂对BST薄膜介电性能的影响[J]. *电子元件与材料*, 2005, 24 (11): 49.
GAO Li-na, YANG Xiao-jing, ZHANG Liang-ying, et al. Influence of Co doping on the properties of BST thin film[J]. *Electronic Components & Materials*, 2005, 24(11): 49.
- [27] 张训栋, 杨晓静, 姚 熹, 等. Ni掺杂对钛酸锶钡铁电薄膜性能的影响[J]. *压电与声光*, 2005, 27 (4): 401.
ZHANG Xun-dong, YANG Xiao-jing, YAO Xi, et al. The influence of Ni doping on the properties of BST ferroelectric thin film[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(4): 41.
- [28] AHN K H, BAIK S. Significant suppression of leakage current in (Ba, Sr) TiO_3 thin films by Ni or Mn doping[J]. *J Appl Phys*, 2002, 92: 2651.
- [29] 鲍军波, 任天令, 刘建设, 等. Mn掺杂BST薄膜的制备与表征[J]. *压电与声光*, 2002, 24 (5): 389.
BAO Jun-Bo, REN Tian-ling, LIU Jian-she, et al. Preparation and characterization on the Mn-doped BST thin film[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2002, 24(5): 389.
- [30] KANG K, LIM M H, KIM H G. Mn doped $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ high K gate dielectrics for low voltage organic transistor on polymer substrate[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 242908.
- [31] ZHU X H, ZHENG D N, PENG W, et al. Enhanced dielectric properties of Mn doped $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films fabricated by pulsed laser deposition[J]. *Mater Lett*, 2006, 60: 1224.
- [32] LORENZ M, HOCHMUTH H, SCHALLNER M, et al. Dielectric properties of Fe doped $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ thin films on polycrystalline substrates at temperatures between -35 °C and +85 °C[J]. *Solid-State Electron*, 2003, 47: 2199.
- [33] RADHAPIYARI L, THAKUR O P, PRAKASH C, et al. Structural and dielectric properties of the system $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Fe}_{0.01}\text{Ti}_{0.99}\text{O}_3$ [J]. *Mater Lett*, 2003, 57: 1824.
- [34] CHONG K B, KONG L B, CHEN L, et al. Improvement of dielectric loss tangent of Al_2O_3 doped $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films for tunable microwave devices[J]. *J Appl Phys*, 2004, 95: 1416.
- [35] LIANG X, WU W, MENG Z, et al. Dielectric and tunable characteristics of barium strontium titanate modified with Al_2O_3 addition[J]. *Mater Sci Eng*, 2003, B99: 366.
- [36] WANG S Y, CHENG B L, WANG C, et al. Influence of Ce doping on leakage current in $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ films[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2005, 38: 2253.
- [37] KIM K T, KIM C. Electrical and dielectric properties of Ce-doped $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films[J]. *Surf Coat Technol*, 2006, 16-17: 4708-4712.
- [38] SWARAJ B, ANKUR V, AGRAWA D C, et al. Effect of uniform and periodic doping by Ce on the properties of barium strontium titanate thin films[J]. *J Electroceram*, 2007, 19: 229-236.
- [39] ZHANG T, WANG J, JIANG J, et al. Microstructure and photoluminescence properties of Ho-doped (Ba, Sr) TiO_3 thin films[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515: 7721-7725.
- [40] KIM J K, KIM S S, KIM W J, et al. Improved ferroelectric properties of Cr-doped $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ thin films prepared by wet chemical deposition[J]. *Mater Lett*, 2006, 60: 2322-2325.
- [41] WANG H, NIEN L, LEE K. Enhanced tunability and electrical properties of barium strontium titanate thin films by gold doping in grains[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 2874-2876.
- [42] SRIVASTAVA A, KUMAR D, SINGH R K, et al. Improvement in electrical and dielectric behavior of (Ba,Sr) TiO_3 thin films by Ag doping[J]. *Phys Rev*, 2000, B 61: 7305.
- [43] COLE M W, WEISS C V, NGO E, et al. Microwave dielectric properties of graded barium strontium titanate films[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 182906.
- [44] COLE M W, NGO E, HIRSCH S, et al. Dielectric properties of MgO-doped compositionally graded multilayer barium strontium titanate films[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 072906.
- [45] SHYE D C, HWANG C C, LAI M J, et al. Effects of post-oxygen plasma treatment on Pt/(Ba,Sr) TiO_3 /Pt capacitors at low substrate temperatures[J]. *Jpn J Appl Phys Part 1*, 2003, 42: 549-553.
- [46] HWANG C C, LAI M J, JIANG C C, et al. Low-temperature process to improve the leakage current of (Ba, Sr) TiO_3 films on Pt/TiN/Ti/Si substrates[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 39: 1314-1316.
- [47] TSAI K C, WU W F, CHAO C G, et al. Repairing of etching-induced damage of high-k $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films by oxygen surface plasma treatment[J]. *Jpn J Appl Phys Part 1*, 2006, 45: 5490-5494.
- [48] LEU C C, CHAN S H, CHEN H Y, et al. Effects of O_2 plasma treatment on the electric and dielectric characteristics of $\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ thin films[J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40: 679-682.
- [49] ZHU W, CHENG J, YU S, et al. Enhanced tunable properties of $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films grown on Pt/Ti/SiO₂/Si substrates using MgO buffer layers[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 032907.
- [50] FU W, WANG H, CAO L, et al. Bi_{1.5}Zn_{1.0}Nb_{1.5}O₇/Mn-doped $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ heterolayered thin films with enhanced tunable performance[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 182910.
- [51] XIONG Nian-deng, JIANG Shu-wen, LI Yan-rong, et al. Dielectric properties of $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3/\text{SiN}$ bilayered thin

- films grown on Pt-coated sapphire substrates[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93: 232905.
- [52] IM J, AUCIELLO O, BAUMANN P K, et al. Composition-control of magnetron-sputter-deposited $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{Ti}_{1+y}\text{O}_{3+z}$ thin films for voltage tunable devices[J]. Appl Phys Lett, 2000, 76: 625.
- [53] PERVEZ N K, HANSEN P J, YORK R A. Optimization of high tunability barium strontium titanate thin films grown by rf magnetron sputtering[C]// 2004 IEEE international ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control joint 50th anniversary conference. [S. l.]: IEEE, 2004, 278-280.
- [54] PADMINI P, TAYLOR T R, LEFEVRE M J, et al. Realization of high tunability barium strontium titanate thin films grown by rf magnetron sputtering[J]. Appl Phys Lett, 1999, 75: 3186-3188.
- [55] KIM H S, HYUM T S, KIM H G, et al. Orientation effect on microwave dielectric properties of Si-integrated $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin films for frequency agile devices[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89: 052902.
- [56] MOON S E, KIM E K, KWAK M H, et al. Orientation dependent microwave dielectric properties of ferroelectric $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ thin films[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83: 2166.
- [57] LI H, FINDER J, LIANG Y, et al. Dielectric properties of epitaxial $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ films on amorphous SiO_2 on sapphire[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87: 072905.
- [58] CHEN C L, FENG H H, ZHANG Z, et al. Epitaxial ferroelectric $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films for room-temperature tunable element applications[J]. Appl Phys Lett, 1999, 75: 412.
- [59] CHEN C L, SHEN J, CHEN S Y, et al. Epitaxial growth of dielectric $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ thin film on MgO for room temperature microwave phase shifters[J]. Appl Phys Lett, 2001, 78: 652.
- [60] YI Wang, BAOTING L, FENG W, et al. Fabrication and electrical properties of (111) textured $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ film on platinumized Si substrate[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90: 042905.
- [61] CHRISTOPHE D, JAEHO O H, MOHAMED C. Correlation between the lattice parameter and the dielectric tunability in nonepitaxial $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91: 063513.
- [62] CHANG W, POND J M, KIRCHOEFER S W, et al. Strain-induced anisotropy in microwave dielectric properties of (Ba, Sr) TiO_3 thin films with directly applied uniaxial $\langle 100 \rangle$ stress[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87: 242904.
- [63] WANG X, WANG H, YAO X. Structure, phase transformation and dielectric properties of pyrochlore containing bismuth[J]. J Am Ceram Soc, 1997, 80: 2745.
- [64] WANG H, WANG X, YAO X. Phase equilibrium in $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5$ system[J]. Ferroelectrics, 1997, 195: 19.
- [65] WANG X, WANG H, YAO X. Structural study of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5$ based pyrochlores[J]. Mater Sci Eng, 2003, B99: 20.
- [66] JIANG S W, JIANG B, LIU X Z, et al. Laser deposition and dielectric properties of cubic pyrochlore bismuth zinc niobate thin films[J]. J Vac Sci Tech, 2006, A24: 261.
- [67] HONG Y P, HA S, LEE H Y, et al. Voltage tunable dielectric properties of rf sputtered $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5$ pyrochlore thin films[J]. Thin Solid Films, 2002, 419: 183.
- [68] LU Ji-wei, CHEN Zhi-qiang, TAYLOR T R, et al. Composition control and dielectric properties of bismuth zinc niobate thin films synthesized by radio-frequency magnetron sputtering[J]. J Vac Sci Tech, 2003, A21: 1745.
- [69] LU J, KLENOV D O, STEMMER S. Influence of strain on the dielectric relaxation of pyrochlore bismuth zinc niobate thin films[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84: 957.
- [70] HA S, LEE Y S, HONG Y P, et al. The effect of substrate heating on the tunability of rf-sputtered $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5$ thin films[J]. Appl Phys, 2005, A80: 585.
- [71] LU J, SCHMIDT S, BOESCH D S, et al. Low-loss tunable capacitors fabricated directly on gold bottom electrodes[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88: 112905.
- [72] CAO L Z, FU W Y, WANG S F, et al. Effects of film thickness and preferred orientation on the dielectric properties of $(\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{0.5})(\text{Zn}_{0.5}\text{Nb}_{1.5})\text{O}_7$ films[J]. J Phys D: Appl Phys, 2007, 40: 2906.
- [73] YAN L, KONG L B, CHEN L F, et al. $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5}\text{O}_7$ composite thin films with promising microwave dielectric properties for microwave device applications[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85: 3522.
- [74] TIAN Hu-yong, WANG Yu, WANG Dan-yang, et al. Dielectric properties and abnormal C-V characteristics of $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-Bi}_{1.5}\text{ZnNb}_{1.5}\text{O}_7$ composite thin films grown on MgO (001) substrates by pulsed laser deposition[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89: 142905.
- [75] YAN Xin, REN Wei, SHI Peng, et al. $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3/\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5}\text{TiO}_7$ multilayer thin films prepared by sol-gel method[J]. Appl Surf Sci, 2008, 255: 2129.
- [76] FU Wang-yang, Cao Ling-zhu, Wang Shu-fang, et al. Dielectric properties of $\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5}\text{O}_7$ /Mn-doped $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ heterolayered films grown by pulsed laser deposition[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89: 132908.
- [77] DU Hui-ling, Yao Xi, WANG Hong. Dielectric properties of pyrochlore $(\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{0.5})(\text{Nb}_{0.5}\text{M}_{1.5})\text{O}_7$ (M=Ti, Sn, Zr, and Ce) dielectrics[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88: 212901.
- [78] ZHANG Shan-tao, ZHANG Yi, LU Ming-hui, et al. Structures and dielectric properties of $\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5-x}\text{Ti}_x\text{O}_7$ ($x=0, 0.05, \text{ and } 0.10$) thin films[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90: 042903.
- [79] JIN Y K, KIM D W, HYUN S J, et al. Voltage-tunable dielectric properties of pyrochlore Bi-Zn-Nb-Ti-O solid-solution thin films[J]. Jpn J Appl Phys, 2005, 44: 6648.
- [80] JIN Y K, JUN H N, SANGWOOK L, et al. Seed-layer mediated orientation evolution in dielectric Bi-Zn-Ti-Nb-O thin films[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91: 232903.
- [81] KAMBA S, POROKHONSKYY V, PASHKIN A, et al. Anomalous broad dielectric relaxation in $\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{1.0}\text{Nb}_{1.5}\text{O}_7$ pyrochlore[J]. Phys Rev, 2002, B66: 054106.
- [82] THAYER R L, RANDALL C A, TROLIER-MCKINSTRY S. Medium permittivity bismuth zinc niobate thin film capacitors[J]. J Appl Phys, 2003, 94: 1941.
- [83] TAGANTSEV A K, LU J, STEMMER S. Temperature dependence of the dielectric tunability of pyrochlore

- bismuth zinc niobate thin films[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86: 032901.
- [84] KOUTSAROFF I P, BERNACKI T, ZELNER M, et al. Microwave properties of parallel plate capacitors based on (Ba,Sr)TiO₃ thin films grown on SiO₂/Al₂O₃ substrates [J]. Mat Res Soc Symp Proc, 2003, 784: 319-325.
- [85] VOROBIEV A, RUNDQVIST P, KHAMCHANE K, et al. Silicon substrate integrated high Q-factor parallel-plate ferroelectric varactors for microwave/millimeterwave applications[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83: 3144-3146.
- [86] REINHOLD L, PAVEL B. 射频电路设计——理论与应用[M]. 张肇仪, 徐承和, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- REINHOLD L, PAVEL B. RF circuit design theory and applications[M]. Translated by ZHANG Zhao-yi, XU Cheng-he. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [87] ACIKEL B, TAYLOR T R, HANSEN P J, et al. A new high performance phase shifter using Ba_xSr_{1-x}TiO₃ Thin Films[J]. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2002, 12: 237.
- [88] DONGSU K. Monolithic analog phase shifters based on barium strontium titanate coated sapphire substrates for WLAN applications[D]. USA: Georgia Institute of Technology, 2004.
- [89] ACIKEL B, LIU Y, NAGRA A S, et al. Phase shifters using (Ba, Sr)TiO₃ thin films on sapphire and glass substrate[C]// IEEE MTT-S International on Microwave Symposium Dig. [S. l.]: IEEE, 2001, 2: 1191-1194.
- [90] CARLSON C M, RIVKIN T V, PARILLA P A, et al. Large dielectric constant ($\epsilon/\epsilon_0 > 6000$) Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO₃ thin films for high-performance microwave phase shifters[J]. Appl Phys Lett, 2000, 76: 1920.
- [91] PARK J, LU J, BOESCH D S, et al. Distributed phase shifter with pyrochlore bismuth zinc niobate thin films[J]. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2006, 16: 264.
- [92] Agile materials Corporation. Available[EB/OL]. [2009-03-24]. <http://www.agilematerials.com>.
- [93] Paratek Microwave Company. Available[EB/OL]. [2009-04-02]. <http://www.paratek.com>.
- [94] TOMBAK A, MARIA J P, AYGUAVIVES F T, et al. Voltage-controlled RF filters employing thin-film barium strontium titanate tunable capacitors[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2003, 51: 462.
- [95] LIANG X P, ZHU Y. Hybrid resonator microstrip line electrically tunable filter[C]//IEEE MTT S Int Microwave Symp Dig. [S.l.]: IEEE, 2001, 1: 1457-1460.
- [96] XU J, LIANG X P, KHOSRO S. Full wave analysis and design of RF tunable filters[C]//IEEE MTT S Int Microwave Symp Dig. [S.l.]: IEEE, 2001, 1: 1449-1452.
- [97] JAMIL A, KALKUR T S, CRAMER N. Tunable ferroelectric capacitor-based voltage controlled oscillator[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54:2.
- [98] AL-AHMAD M, LOYEZ C, ROLLAND N, et al. Wide BST-based tuning of voltage controlled oscillator[C]// Microwave Conference, APMC 2006. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [99] CHEN L Y V, FORSE R, CHASE D, et al. Analog tunable matching network using integrated thin-film BST capacitors[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig. [S. l.]: IEEE, 2004.
- [100] SUBRAMANYAM G, AHAMED F, BIGGERS R. A Si MMIC compatible ferroelectric varactor shunt switch for microwave applications[J]. IEEE Microw Wirel Compon Lett, 2005, 15: 739.

编辑 税红



蒋书文, 副教授, IEEE学会会员。2002年博士毕业于四川大学材料科学与工程学院, 现在电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室从事教学、科研工作。主要研究方向是微波电子薄膜材料、新型介质薄膜微波器件的集成技术及应用, 现承担国防预研、国家自然科学基金、国防973等项目。在Appl. Phys. Lett., Jpn. J. Appl. Phys., Ferroelectrics等国内外刊物上发表论文30余篇, 他引60余次。申请国家发明专利3项, 获得省部级科技进步奖二等奖2次。