

文章编号: 1007-4252(2006)04-0299-04

## 基于非线性介电薄膜的电调滤波器优化设计

吴达军, 何世明, 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:**采用脉冲激光沉积(PLD)法在(001)MgO基片上制备出高质量的SrTiO<sub>3</sub>(STO)薄膜,构建了Au/STO/MgO结构的叉指电容。在77K、10KHz条件下,对叉指电容的特性进行了测试,结果表明:在40kV/cm的直流电场作用下,电容值从1.75pF减小为1.25pF,电容值的相对变化率为28.5%。在此基础上,根据多层介质叉指电容保角变换模型。定量计算和仿真了STO薄膜的介电常数和微波频率下叉指电容的性能参数,并由此设计了一个三阶带通滤波器,该滤波器可实现13.50%的中心频率移动。

**关键词:** STO; 薄膜; 介电性质; 叉指电容; 滤波器

**中图分类号:** O484 **文献标识码:** A

### Optimized design of electrically tunable filter based on nonlinear dielectric film

WU Da-jun, HE Shi-ming, LIU Xing-zhao, LI Yan-rong

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

**Abstract:** Excellent (001) SrTiO<sub>3</sub>(STO) thin films were grown on (001) MgO substrates by pulsed laser deposition (PLD) method. Interdigital capacitors (IDC) were fabricated on the STO films. When the electric field increases from 0 kV/cm to 40 kV/cm, the capacitance drops from 1.75 pF to 1.25 pF at 77K and 10kHz. The permittivity  $\epsilon_r$  of STO films were calculated by the conformal mapping-based models. A three-pole bandpass filter based on the IDC was designed. Excellent performances of the filter are achieved.

**Key words:** STO; thin film; dielectric properties; IDC; filter

## 1 引言

SrTiO<sub>3</sub>(STO)是一种具有优良非线性介电特性的钙钛矿型铁电氧化物材料。由于它在压控振荡器(VCO)、电调滤波器、移相器和调谐匹配网络等微

波频移器件中具有巨大的应用前景,已成为当前电子薄膜与集成器件科学研究的热点之一。近几年来,国外研究机构采用溅射(Sputtering)、脉冲激光沉积(PLD)和化学气相沉积(CVD)等不同的制膜方法,在多种基片上研制基于STO薄膜的电调滤波

收稿日期:2005-08-16; 修订日期:2005-11-07

基金项目:四川省青年基金资助课题。

作者简介:吴达军(1974-),男,德阳人,博士生,从事电子材料薄膜及器件的研究(E-mail: zjncnyj@163.com)。

器<sup>[1-3]</sup>,但普遍存在调谐范围小( $< 10\%$ ),插入损耗大( $> 5\text{dB}$ ),中心频率移动过程中带宽保持性差等问题。鉴于此,本工作在制备出高质量 STO 介电薄膜的基础上,采用终端加载铁电叉指电容式滤波器结构,设计得到了低插损、高可调、带宽保持性良好的三级带通滤波器。

## 2 实验

STO 薄膜的生长采用脉冲激光沉积 (PLD) 方法,选用 (001) MgO 单晶基片,以  $\text{SrTiO}_3$  单晶为靶材, COMPEX-201 型 KrF 准分子激光器为光源 ( $\lambda = 248 \text{ nm}$ )。在 STO 外延薄膜的生长过程中,以纯氧为工作气氛,氧压为  $10 \text{ Pa}$ ,基片温度为  $780 \text{ }^\circ\text{C}$ ,激光脉冲能量密度为  $2 \text{ J/cm}^2$ ,脉冲重复频率为  $6 \text{ Hz}$ ,靶基距为  $45 \text{ mm}$ 。

STO 薄膜的结晶取向采用 X-Ray 衍射技术进行分析,STO 薄膜的表面形貌采用扫描探针显微镜 (SPM) 进行表征。

采用电子束蒸发法在 STO 薄膜表面沉积约  $1 \mu\text{m}$  厚的 Au 膜,再经光刻形成叉指电容,用 Agilent HP4284A 型 LRC 测试仪及标准四端对测量法测试叉指电容的性能。在整个测试过程中,叉指电容浸没在液氮中以获得  $77 \text{ K}$  的低温环境。

根据叉指电容的测试数据,利用多层介质叉指电容保角变换模型和 EDA 软件,定量计算了 STO 薄膜的介电常数及微波频率下叉指电容的性能参数,并以此设计了一个基于 STO 非线性介电特性的三级电调带通滤波器。

## 3 结果与讨论

实验对 STO/(001) MgO 薄膜的生长机理进行了详细的系列研究,得到了 PLD 法制备高质量 STO/MgO 薄膜的优化工艺条件。所制备 STO/MgO 薄膜的典型 XRD 谱如图 1 所示,由图 1 可见:STO 薄膜具有垂直于基片表面的单一 (001) 取向。STO 薄膜的晶粒大小均匀、结构致密、表面平整 ( $\text{RMS} = 5.922 \text{ nm}$ ),其 AFM 形貌图如图 2 所示。

将 STO 表面沉积的金膜采用光刻工艺刻蚀成叉指电容,其具体参数为:  $N = 30, 2s = 2g = g_{\text{end}} = 0.01 \text{ mm}, L = 0.2 \text{ mm}$ ,其中,  $N$  为叉指数,  $2s$  为叉指宽度,  $2g$  为叉指间距,  $g_{\text{end}}$  为单个叉指的终端缝隙,  $L$

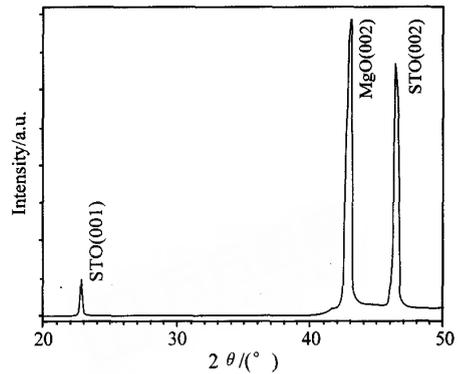


Fig. 1 XRD spectrum of STO thin film deposited on MgO substrate  
图 1 STO 薄膜的 XRD 扫描图谱

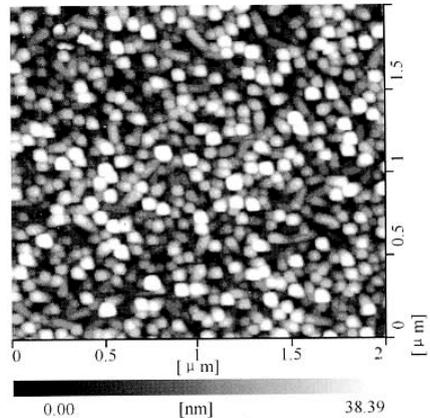


Fig. 2 AFM image of STO thin film  
图 2 STO 薄膜的 AFM 形貌图

为叉指长度,如图 3 所示。

在  $77 \text{ K}, 10 \text{ kHz}$  测试条件下,叉指电容的电容-电压特性曲线 ( $C-V$ ) 和介电损耗-电压关系曲线 ( $\tan\delta-V$ ) 如图 4 所示。在外加电场为零时,电容值和介电损耗分别为  $1.75 \text{ pF}$  和  $0.007$ ,随着电场强度的增加,电容和介电损耗都逐渐减小,当电场强度增加到  $40 \text{ kV/cm}$  时,电容值为  $1.25 \text{ pF}$ ,介电损耗减小为  $0.0013$ 。电容值的相对变化率 (Tunability)  $= \frac{C(0) - C(E_{\text{max}})}{C(0)}$  为  $28.5\%$ 。从图中可知,  $C-V$  曲线和  $\tan\delta-V$  曲线均保持良好的对称性,因此,在实际电路中可以根据需要加正向偏压或反向偏压。

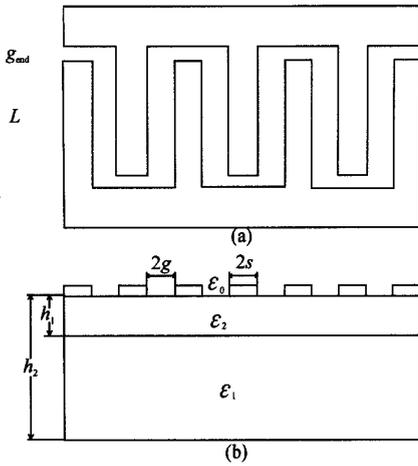


Fig. 3 Model of interdigital capacitor (a) top-view (b) cross section

图3 叉指电容模型(a)俯视图;(b)剖面图

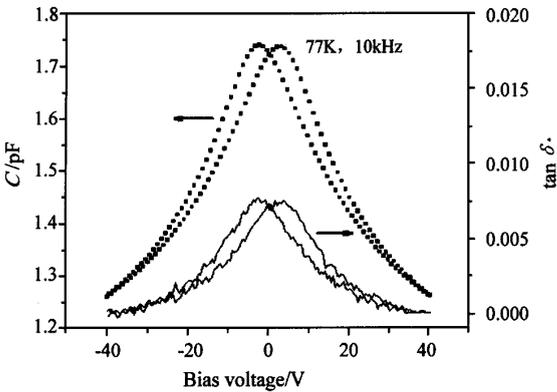


Fig. 4 Curves of capacitance and  $\tan \delta$  as functions of DC voltage for interdigital capacitor

图4 叉指电容的  $C-V, \tan \delta - V$  关系曲线

在进行滤波器设计之前,采用多层介质叉指电容容角变换模型<sup>[4]</sup>计算了STO薄膜的介电常数,当电容值为1.75 pF和1.25 pF时,介电常数分别为279和188。文献表明:当频率低于8 GHz时,STO薄膜的介电常数没有明显的频散效应,即:介电常数随频率的增加基本保持不变<sup>[5-7]</sup>。于是,使用EDA软件。建立叉指电容计算机模型,并抽取出了频率为1.25 GHz、介电常数为279和188时叉指电容器的电容值,分别为1.74 pF和1.26 pF,与10 kHz的测试值相比,偏差小于1%,这一结果与A. B. Kozyrev对STO电容在低频和微波频率下的研究结论相符<sup>[8]</sup>。因此,利用多层介质叉指电容容角变换模型进行计算与仿真,可以比较准确地得到STO薄膜的介电常数,从而为电调带通滤波器的设计奠定了基础。

#### 4 电调带通滤波器的设计与优化

根据上面叉指电容的计算结果,选用阻带特性好、结构紧凑、体积小的切比雪夫型梳状线带通滤波器进行设计<sup>[9]</sup>,如图5所示。其中, $C_1^S, C_2^S, C_3^S$ 是基于STO薄膜的集总参数叉指电容器。

滤波器的设计参数为:中心频率为 $f_0$ ,相对带宽 $FBW = 4\%$ ,带内插入损耗 $IL < 1.5 \text{ dB}$ ,带内波纹系数 $Ripple = 0.1 \text{ dB}$ ,带外抑制 $RJ > 40 \text{ dB}$ (在 $f_0 \pm 100 \text{ MHz}$ 处)。

先从理论上对滤波器的物理结构尺寸进行计算,根据计算结果采用EDA软件进行滤波器的建模、仿真和优化,得到一组优化值。表1列出了设计的三级梳状线带通滤波器电路参数理论值与优化值。

Table 1 Comparison of the calculated and optimized values of the electrical parameters and physical sizes of the filter

表1 滤波器电路参数的理论值与优化值对比

传输线 $j$	$J$ 变换器导纳归一化互电容		线间距 $S_{j,j+1}/\text{mm}$		传输线 $j$	归一化自电容		线宽 $W_j/\text{mm}$	
	$J_{j,j+1}/Y_A$	$C_{j,j+1}/\epsilon$	计算值	优化值		$C_j/\epsilon$	计算值	优化值	
0,3		1.384	3.840	3.4744	0,4	6.150	10.840	7.8040	
1,2	0.04	0.241	11.840	13.2160	1,3	3.730	6.496	5.3481	
					2	4.618	7.354	5.7560	

$n=3$  时,切比雪夫响应低通原型值为: $g_0 = g_4 = 1.0000, g_1 = g_3 = 1.0315, g_2 = 1.1474$

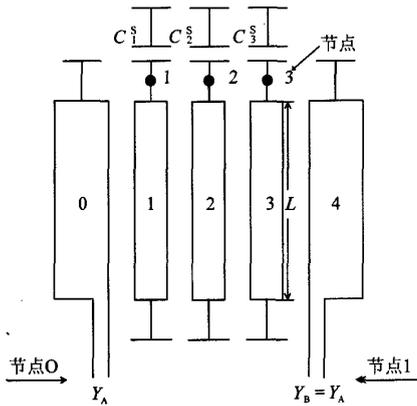


Fig. 5 Schematic diagram of 3 - pole combline bandpass filter  
图 5 三阶梳状线带通滤波器示意图

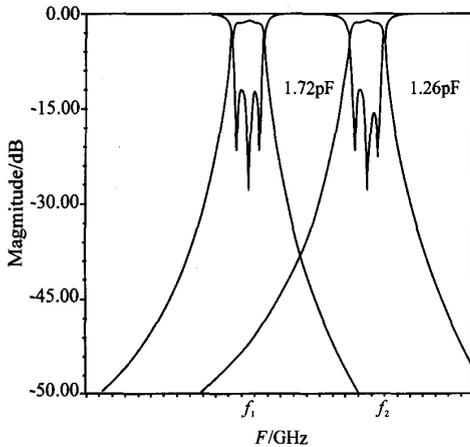


Fig. 6 Simulated results ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ) of the 3 - pole combline bandpass filter

图 6 三阶梳状线带通滤波器仿真结果

在加上不同的直流偏压时,叉指电容器的电容值将发生改变,单个谐振器的谐振频率也随之改变,滤波器的中心频率相应地发生移动,从而实现滤波器的电调,滤波器的仿真结果如图 6 所示。当叉指电容的容值由 1.72 pF 减小到 1.26 pF 时,滤波器的中心频率从  $f_1$  移动到  $f_2$ ,中心频率改变量  $\Delta f$  为 180 MHz,频率相对调谐率为 13.50%。而且,在整个频率移动过程中,带内插入损耗始终小于设计值 1.5 dB,回波损耗  $|S_{11}|$  大于 12 dB,相对带宽仅从设计值 4% 变化为 4.17%,带外抑制  $RJ > 41$  dB(在  $f_0 \pm 100$  MHz 处),所有指标均满足设计要求,保持了良好的滤波特性。

## 5 结论

采用脉冲激光沉积法制备出了(001)取向、结构致密、表面平整的 STO/MgO 薄膜,在 77k、10 kHz 条件下,对 Au/STO/MgO 结构的叉指电容器测试结果表明:在外加 40 kV/cm 直流电场作用时,获得 328.5% 的电容相对变化率。根据多层介质叉指电容保角变换模型,结合 EDA 软件,定量计算了 STO 薄膜的介电常数,并通过仿真抽取了叉指电容在微波频率下的性能参数,与测试结果相比,误差小于 1%。在此基础上设计了三阶带通滤波器,仿真结果表明:该滤波器具有良好的特性,其中心频率的相对频移达到了 13.50%。

## 参考文献:

- [1] Felix A Miranda, Guru Subramanyam, Frederick W Van Keuls, *et al.* Design and Development of Ferroelectric Tunable Microwave Components for Ku - and K - Band Satellite Communication Systems [J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2000,48:1181 - 1189.
- [2] Irina Vendik, Orest Vendik, Vladimir Pleskachev, *et al.* Tunable Microwave Filters Usinig Ferroelectric Materials [J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, 2003,13:716 - 719.
- [3] Vladimir Pleskachev, Irina Vendik. Figure of Merit of Tunable Ferroelectric Planar Filter [A]. 33rd European Microwave Conference - Munich [C]. 2003.191 - 194.
- [4] Spartak S Gevorgian, Torsten Martinsson, Peter L J, *et al.* CAD models for multilayered substrate interdigital capacitors [J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 1996, 44:896 - 904.
- [5] Peter Kr Petrov, Erik F Carlsson. Improved SrTiO<sub>3</sub> multilayers for microwave application: growth and properties [J]. **J Appl Phys**, 1998,84:3134 - 3140.
- [6] Nobuyuki Sugii, Hiroji Yamada, Osamu Kagaya, *et al.* High - frequency properties of SrTiO<sub>3</sub> thin - film capacitors fabricated on polymer - coated alloy substrates [J]. **J Appl Phys**, 1998,72:261 - 263.
- [7] Kozyrev A B, Samoilova T B, Golovkov A A, *et al.* Nonlinear behavior of thin film SrTiO<sub>3</sub> capacitors at microwave frequencies [J]. **J Appl Phys**,1998, 84:3326 - 3332.
- [8] Kozyrev A, Ivanov A, Keis V, *et al.* Ferroelectric films: nonlinear properties and applications in microwave devices [J]. **IEEE MTT - S Digest**, 1998: 985 - 988.
- [9] 甘本枝, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计 [M]. 北京:科学出版社, 1973. 191 - 197.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**  
网址：<http://www.edatop.com/peixun/hfss/>
- **CST 视频培训课程**  
网址：<http://www.edatop.com/peixun/cst/>
- **天线设计专业培训课程**  
网址：<http://www.edatop.com/peixun/antenna/>