

# MEMS 电容式超声传感器设计

于佳琪<sup>1,2</sup>, 何常德<sup>1,2</sup>, 张永平<sup>1</sup>, 苗静<sup>2</sup>, 李玉平<sup>2</sup>, 薛晨阳<sup>1,2</sup>, 张文栋<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:**在传统的电容式超声传感器(CMUT)制造过程中,用低压化学气相沉积技术形成的氮化硅薄膜残余应力大且机械性能难以预知。为此,设计了一种基于阳极键合技术的CMUT,传感器薄膜和空腔分别定义在均匀性好、残余应力低的SOI片和玻璃片上。建立了一个简化的分析模型对该结构进行机械性能分析,采用有限元分析软件ANSYS仿真验证该所建立的分析模型并预估传感器的性能。利用ANSYS静电-结构耦合仿真给出了塌陷电压。介绍了敏感单元的工艺流程。所设计的传感器频率为1.48 MHz,灵敏度为0.24 fF/Pa,塌陷电压为70 V,量程为48 kPa。

**关键词:**电容式超声传感器;微机电系统(MEMS);阳极键合;ANSYS;工艺流程

**中图分类号:** TN552 **文献标识码:** A

## Design of MEMS Capacitive Ultrasonic Transducer Based on Anodic Bonding Technology

YU Jiaqi<sup>1,2</sup>, HE Changde<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongping<sup>1</sup>, MIAO Jing<sup>2</sup>, LI Yuping<sup>2</sup>,  
XUE Chenyang<sup>1,2</sup>, ZHANG Wendong<sup>1,2</sup>

(1. North University of China, National Key Lab. of Electronic Measurement Technology, Taiyuan 030051, China; 2. North University of China, Key Lab. of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In traditional micromachined capacitive ultrasonic transducer (CMUT) fabrication process, the silicon nitride membrane is deposited by low pressure chemical vapor deposition (LPCVD), which result in unpredictable mechanical properties and more residual stress in the membrane. Therefore a novel CMUT structure based on anodic bonding technology is designed. The transducer membrane and cavity are defined on an even thickness and low residual stress SOI wafer and glass wafer, respectively. A simplified analytical model is established to describe the mechanical properties of the structure. Finite element model in ANSYS is also conducted to verify the analytical model and evaluate the performance of the device. The collapse voltage is simulated by coupling analysis of electrostatic-structure. Process flow is presented. The frequency of the structure is 1.48 MHz, sensitivity is 0.24 fF/Pa, collapse voltage is 70 V, range is 48 kPa.

**Key words:** capacitive ultrasonic transducer; MEMS; anodic bonding technology; ANSYS; process flow

### 0 引言

近几年,随着微机电系统的蓬勃发展,基于微机电系统(MEMS)的超声传感器逐渐受到了人们的关注。超声传感器主要应用于医疗成像、无损检测及水下声波探测等方面<sup>[1]</sup>。目前超声传感器主要分为压电式和电容式两种。基于压电材料的压电效应所制备的压电式超声传感器是应用较广的声电转换元件,但近年来,其地位已逐步被电容式超声器取代<sup>[2]</sup>。与传统的压电式超声传感器相比,电容式超

声传感器有以下优点:

1) 电容式超声传感器可用标准 IC 工艺批量制造,则其前端处理电路可与传感器集成在一起,从而减少寄生电容及信号干扰的引入,这是传统的压电式超声传感器无法比拟的。

2) 电容式超声传感器的温度适用范围比压电式超声传感器广,应用领域广<sup>[3-4]</sup>。

此外,由于电容式超声传感器的薄膜阻抗与空气的声阻抗更接近,即机电转换效率更高。

收稿日期:2012-11-03

基金项目:“基于纳机电矢量听器面阵的水下目标成像机理与技术研究”基金资助项目(61127008);“水陆交通安全传感器及系统”基金资助项目(2011AA040404)

作者简介:于佳琪(1989-),女(满族),辽宁省凤城市人,硕士生,主要从事 MEMS 传感器与执行器、超声传感器的设计与制造的研究。

表面微加工技术虽已成功制备出电容式超声传感器,但仍有很多不足。首先,由于牺牲层不易移除,空腔刻蚀难,以表面微加工技术所制备的器件在空腔形成和薄膜尺寸方面都有很大限制,导致传感器灵敏度低,频率范围窄<sup>[5]</sup>。其次,以表面微加工技术制备电容式超声传感器时,由于对刻蚀孔填充密封时在薄膜内表面引入很多不必要的材料,如 LTO 或 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,会导致单个薄膜厚度不均匀,薄膜间厚度一致性较差<sup>[6]</sup>。

本文利用阳极键合工艺制备的超声传感器可控性高,灵敏度大,杂散电容小的特点,设计了一种由 SOI 片顶层导电硅为上电极、玻璃腔体、玻璃腔体内金属化的下电极构成的采用阳极键合工艺制备的电容式超声传感器。用绝缘性好的玻璃作衬底避免了以导电硅为衬底的传感器的杂散电容大的缺点。用 SOI 片作振动薄膜,可达到很好的厚度均匀性,同时薄膜内应力更可控,工艺重复性好,便于批量生产。

### 1 结构设计及工作原理

#### 1.1 结构设计

本设计以器件灵敏度高,杂散电容小,满足频率及量程要求为出发点,采用阳极键合工艺制备的上、下电极引线互错的电容式超声传感器如图 1 所示。此结构由图形化上电极、互联腔体、绝缘层及一体化下电极构成。与传统的电容式超声传感器相比,所设计的超声传感器图形化的上电极避免了与下电极金属互联部分形成不必要的杂散电容,在上、与下电极互联部分采用了交错十字的方式减小了导体正对面积,减少了杂散电容。

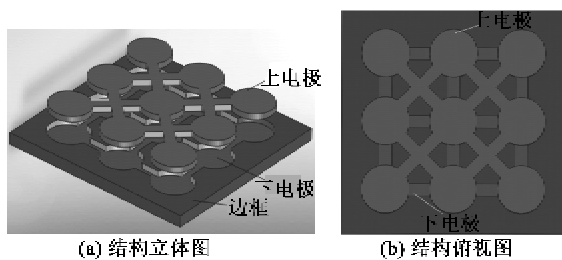


图 1 电容式超声传感器

在图 1 中,边框和衬底为玻璃材料,在衬底上刻蚀出腔体,腔体非密闭(工作环境为空气中,若工作于液体中则需要密封),通过沟槽相互连接,下电极为金属 Al,在下电极上淀积二氧化硅绝缘层避免上、下电极接触造成器件损坏,SOI 顶层导电硅薄膜同时充当上电极。

#### 1.2 工作原理

电容式超声传感器的工作依赖于静电力。当在薄膜电极和下电极间施加直流电压时,薄膜发生形

变,向衬底运动,随着薄膜应变增加,薄膜内机械回复力增长,与静电力平衡,此时若有超声波作用在薄膜上,薄膜失去平衡将会上、下运动,导致上下极板间距发生变化,从而电容值发生变化。超声传感器用作接收探头时的工作原理如图 2(a)所示。当超声传感器用作发射探头时,在直流偏压上施加一交流小信号,交流小信号的作用打破了薄膜在直流电压下所建立的平衡关系使薄膜运动,产生超声波如图 2(b)所示。

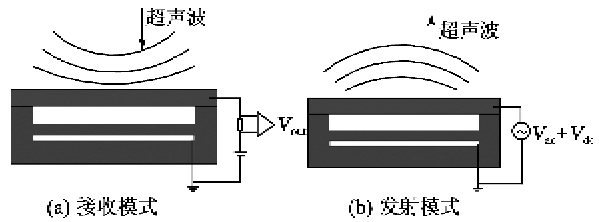


图 2 电容式超声传感器工作原理图

### 2 理论分析

#### 2.1 薄膜机械性能分析

从工作原理上可看出,薄膜是电容式超声传感器最主要的结构,通过对薄膜的机械建模可计算出薄膜的最大位移、最大应力,根据薄膜位移可求得器件的灵敏度,根据固定载荷下的最大应力来计算器件的量程。

半径为  $a$  的圆板承受着均匀分布在板上强度为  $p$  的载荷,其薄膜位移变化剖面图如图 3 所示。图中  $r$  为距离板中心的距离, $D$  为平板的弯曲刚度, $E$  为材料的弹性模量, $\gamma$  为材料的泊松比, $h$  为薄膜厚度。

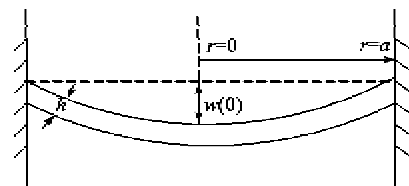


图 3 圆板膜位移变化剖面图

薄膜挠度  $w(r)$  的偏微分方程在极坐标<sup>[7]</sup>中可写为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ \frac{d}{dr} w(r) \right] \right] \right] = \frac{p}{D} \quad (1)$$

其中

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\gamma^2)} \quad (2)$$

周边固支的圆膜的边界条件为

$$\begin{cases} w(a) = 0 \\ w'(a) = 0 \\ w'(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可解得位移解析式为

$$w(r) = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) = w(0) \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \quad (4)$$

其中  $w(0)$  为薄膜中心点即最大位移量, 则

$$w(0) = \frac{pa^4}{64D} \quad (5)$$

固支圆板的弯矩  $M_r$  和  $M_r^{\perp}$  为

$$M_r = \frac{p}{16} [a^2(1+\gamma) - r^2(3+\gamma)] \quad (6)$$

$$M_r^{\perp} = \frac{p}{16} [a^2(1+\gamma) - r^2(1+3\gamma)] \quad (7)$$

将  $r=a$  代入式(6)、(7), 即求得板边界上的弯矩:

$$(M_r)_{r=a} = -\frac{pa^4}{8} \quad (8)$$

$$(M_r^{\perp})_{r=a} = -\frac{\gamma pa^4}{8} \quad (9)$$

在板的中心,  $r=0$ , 则

$$M_r = M_r^{\perp} = -\frac{pa^4}{16} (1+\gamma) \quad (10)$$

由式(8)~(10)可见, 最大应力是在板的边界上且其值为

$$(\sigma_r)_{\max} = -\frac{6M_r}{h^2} = \frac{3}{4} \frac{pa^2}{h^2} \quad (11)$$

## 2.2 薄膜自然频率分析

周边固支的圆形薄板半径为  $a$ , 厚为  $h$ 。由文献[9]可知, 薄板自然频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha_{(n,s)}}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (12)$$

式中:  $\rho$  为薄膜密度;  $\alpha_{(n,s)}$  为振动因子, 在所需振形下  $\alpha_{(n,s)} = 9.076$ 。

通过跟中国电子科技集团第 55 研究所讨论确定键合工艺下薄膜厚为  $1 \mu\text{m}$ , 根据式(5)、(11)、(12)用 MATLAB 编程得到最大位移、最大应力、固有频率随薄膜半径变化曲线, 如图 4 所示。

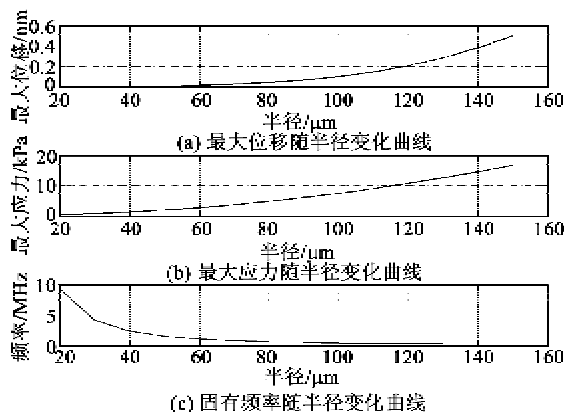


图 4 最大位移、最大应力、固有频率随半径变化曲线图

由图 4 可看出, 随着薄膜半径的增加, 薄膜上最大位移及最大应力逐渐增大, 固有频率逐渐减小; 我们设计的目的是在保证频率 1 MHz 以上, 量程 100 kPa 以上的情况下提高薄膜的灵敏度。在综合考虑灵敏度、频带和量程的情况下, 最终确定了电容式超声传感器的具体参数如表 1 所示。

表 1 电容式超声传感器结构设计参数

半径/ $\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	腔高/ $\mu\text{m}$	$E/\text{GPa}$	密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	泊松比
50	1	0.3	169	2 332	0.299

单元的静态电容

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d + d_0/\epsilon_r} \quad (13)$$

式中:  $A$  为薄膜面积;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $d$  为腔高;  $d_0$  为绝缘层厚度;  $\epsilon_r$  为绝缘层相对介电常数。

将式(3)代入式(13)进行积分可以得到  $30 \times 30$  个单元的传感器的灵敏度为  $0.24 \text{ fF}/\text{Pa}$ ; 固定载荷下薄膜的最大应力应小于硅的屈服强度的 0.2 倍 (90 MPa), 根据式(11)可以得到结构的量程为 48 kPa, 根据式(12)计算出薄膜的一阶固有频率为 1.48 MHz。

## 3 有限元仿真

通过理论分析得到了超声传感器的力学特性和动态特性, 为验证上述结果的正确性, 选用有限元分析软件 ANSYS14.0 对电容式超声传感器的结构建立有限元分析模型, 然后对其进行静力分析及模态分析, 得到结构的力学特性和频率特性。

### 3.1 静力分析

静力分析是在固定载荷作用下薄膜的各部分位移和应力的变化结果。根据所设尺寸建立有限元模型, 在薄膜上施加沿  $z$  方向的载荷, 可得该模型的等效应力云图和薄膜位移云图如图 5(a)、(b) 所示。由图可看出, 最大应力出现在薄膜边界处, 而最大位移则出现在薄膜的中心处, 与理论分析相符。ANSYS 仿真计算薄膜灵敏度的方法: 通过定义路径将薄膜位移映射到路径 AB 上再将其导出, 路径 AB 上薄膜位移图如图 5(c) 所示。通过定义 100 条路径近似得到薄膜的平均位移为  $3.05 \mu\text{m}$ , 再代入式(13)中, 得到仿真灵敏度为  $0.19 \text{ fF}/\text{Pa}$ , 比理论值偏小。理论计算求灵敏度时是对薄膜位移进行积分, 而仿真计算时是计算薄膜的平均位移, 所以仿真值没有计算值精确可信。

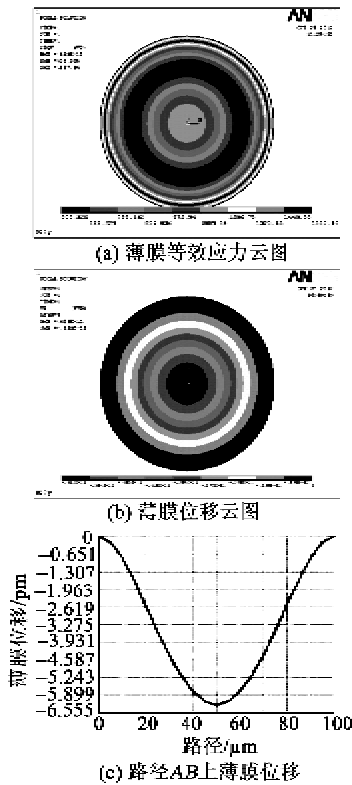


图 5 静力仿真结果

3.2 模态分析

对该结构进行四阶模态分析得到四阶频率的计算结果和薄膜的振动方式如图 6 所示。其中,一阶频率为 1.544 1 MHz,二阶频率 3.503 5 MHz,三阶频率为 3.503 6 MHz,四阶频率为 5.744 3 MHz。仿真结果表明,一阶频率与二、三阶频率相差较大,说明该结构的抗干扰能力强。理论计算频率为 1.48 MHz,与仿真值 1.54 MHz 误差在 5% 以内。

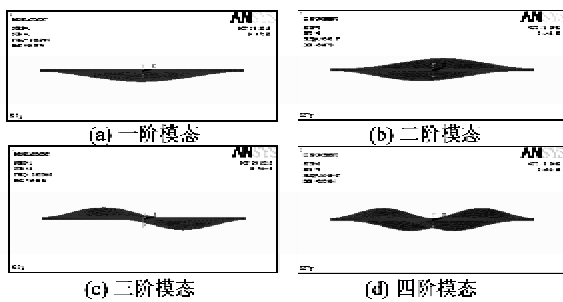


图 6 模态仿真结果

由图 6(a)可看出,一阶频率下该结构的振动方式为薄膜上、下运动,且中心振幅最大,沿径向振幅逐渐减弱,符合超声波收发状态。由图 6(b)可看出,结构分为上、下半圆,上半圆向下振动同时下半圆向上振动,依次交替。由图 6(c)可看出,与二阶频率下振动方式类似,结构分为左、右半圆,左半圆

向下振动同时右半圆向上振动,依次交替。二、三阶频率振动方式类似则其频率值也相差无几。由图 6(d)可看出,结构分为 4 部分,对角方向的 2 个部分向下振动的同时,另外对角的两部分向上振动,依次交替。通过振动方式的分析,最终确定一阶频率为传感器的工作频率。

3.3 塌陷电压的仿真

ANSYS 静电-结构耦合分析是为了确定硅薄膜在电压下挠度的变化,并以此来确定传感器工作时所加的偏置电压。

为提高电容式超声传感器的转换效率,所施加的偏置电压尽可能大,但不能无限大。因为过高的直流偏压将导致静电力过大而把薄膜直接拉向衬底。越接近衬底,两极板间距越小,静电力与距离成反比,则静电力越大,而薄膜的机械回复力与薄膜位移成正比,当存在一个偏压,薄膜回复力不能克服平衡静电力导致塌陷,该电压就是薄膜的塌陷电压。当施加的偏压大于塌陷电压时,薄膜塌陷到衬底上,不再以其基本模式振动。电容式超声传感器器件设计的一个重要方面就是让所加偏压低于塌陷电压而使器件在低压(未塌陷模式)下工作。然而,为增加器件的转换效率,器件偏压最好接近但不超过塌陷电压。低压(未塌陷模式)能量消耗低,电子电路简单、安全。

通常电容式超声传感器在薄膜的形变是其空腔间隙的 1/3 时发生塌陷,据此,通过 ANSYS 静电-结构耦合分析得到器件的塌陷电压。薄膜采用 Tet187 单元建模,空气隙采用 Tet227 单元建模,电压加在薄膜底部即空气隙上、下部,得到电势分布等值线图和薄膜位移曲线,如图 7 所示。将图 7(b)的数据导出可得位移变化为空腔高度 1/3 时的电压,即为塌陷电压(70 V)。

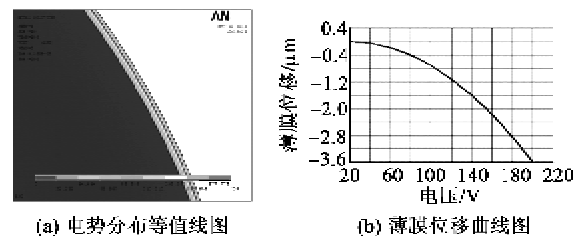


图 7 静电结构仿真结果

4 工艺流程

图 8 为用阳极键合制造 CMUT 工艺流程。起始材料一是玻璃,材料二是 SOI 片(器件层厚 1 μm,

埋氧层厚  $2\ \mu\text{m}$ , 衬底厚  $675\ \mu\text{m}$ , 其器件层是低阻硅即导电硅, 电阻率为  $0.008\sim 0.020\ \Omega\cdot\text{cm}$ , N型  $\langle 100\rangle$ , 顶层硅将来用作上电极。

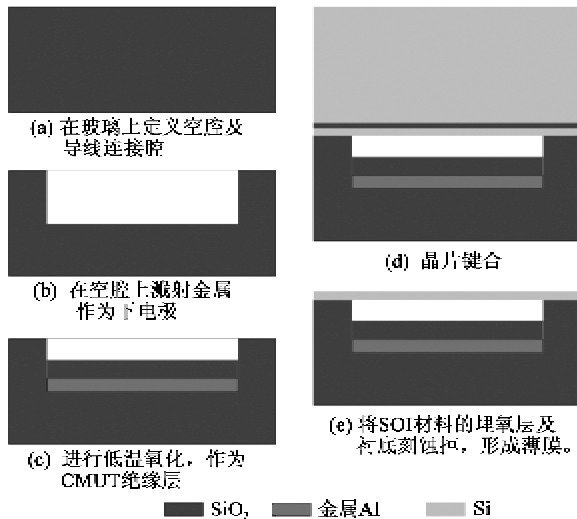


图8 工艺流程

## 5 结束语

本文设计了基于阳极键合技术的电容式超声传感器, 建立了简单的超声传感器的机械模型。对器件的机械和电特性进行仿真, 仿真结果表明与理论建模结构相符。基于阳极键合技术所制备的超声传感器与以硅-硅键合技术所制备的超声传感器相比, 其具有更小的杂散电容, 便于后续电路检测的实现。与表面微加工技术相比, 阳极键合技术所制备的薄膜有高度的预见性; 同时工艺流程步骤少, 工艺周期短, 并可使器件批量化生产。

(上接第705页)

- [6] DEGIRON A, EBBESEN T W. The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodsub-wavelength apertures[J]. *Opt Pure Appl*, 2005, 7(2): 90-96.
- [7] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans Antennas Propagate*, 1966, 14(3): 302-307.
- [8] TAFLOVE A. Computational electrodynamics; the finite-difference time-domain method[M]. Boston: Artech House, 1995: 82-83.
- [9] 葛德彪, 阎玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 50-80.
- [10] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994.

## 参考文献:

- [1] 官志坚. 电容式微加工超声传感器(CMUT)仿真与制造流程[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] LADABAUM I, JIN Xuecheng, SOH H T. Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers [J]. *IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, 45(3): 678-690.
- [3] ECCARDT P, NIEDERER K, SCHEURER T. Surface micromachined ultrasound transducers in CMOS technology [C]//S. I.; *IEEE Ultrasonics Symposium Texas*, 1996: 959-962.
- [4] 彭东林, 熊强强, 刘小康, 等. 基于超声电机技术的新颖时栅传感器原理分析[J]. *重庆理工大学学报: 自然科学版*, 2010(7): 95-99. PENG Donglin, XIONG Qiangqiang, LIU Xiaokang, et al. Principle investigation of novel time-grating displacement sensor based on ultrasonic motor[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2010(7): 95-99.
- [5] MASTRANGELO C H, HSU C H. Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces-part I: basic theory[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1993, 2(1): 33-43.
- [6] JIN Xuecheng, LADABAUM I, BUTRUS T. Microfabrication of capacitive ultrasonic transducers[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1998, 7(3): 295-302.
- [7] 李忻. 低量程电容式压力传感器及相关技术研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院, 2002.
- [8] TIMOSHENKO S, WOINOWSKY S. Theory of plates and shells[M]. McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [9] 莫尔斯. 振动与声[M]. 南京大学《振动与声》翻译组, 译. 北京: 科学出版社, 1974.
- [11] GRAY S K, KUPKA T. Propagation of light in metallic nanowire arrays: finite-difference time-domain studies of silver cylinders[J]. *Phys Rev B* 68, 2003, 68(4): 454-456.
- [12] BARNE S, DEBREU W L, EBBESEN T W. Surface plasmon's sub-wavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(14): 824-830.
- [13] CHEN Yuegang, WANG Yanhua, ZHANG Yan, et al. Numerical investigation of the transmission enhancement through sub-wavelength hole array[J]. *Opt Commun*, 2007, 274(1): 236-240.
- [14] 宋磊, 李康, 孔繁敏, 等. PML-FDTD法在分析负折射率材料中的应用[J]. *光子学报*, 2007, 36(8): 1-2.
- [15] 高仁璟, 王国明, 刘书田, 等. 具有特定频段的左手材料构造与设计优化[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 133-139.