

# 腔体型超表面非制冷红外探测器

杨 君, 杨春丽, 方 辉, 袁 俊, 鄢善入, 李华英, 黎秉哲  
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 随着非制冷红外探测器像元尺寸的逐步缩小, 提高探测器吸收率变得越来越重要。本文基于现有的制备工艺, 提出了一种 IMIAM (Insulator-Metal-Insulator-Air-Metal) 腔体型超表面非制冷红外探测器结构, 在增强探测器吸收的同时有效改善了光敏层受热的均匀性。通过系统的仿真优化, 其在长波红外波段 (8~14 $\mu\text{m}$ ) 的平均吸收率超过了 97%, 使器件几乎实现了百分百的完美吸收, 同时在中红外波段也表现出了优异的吸收特性。本文还通过工艺验证了该结构的可靠性, 对于改进现有非制冷红外探测器工艺具有一定的启示意义。

**关键词:** 非制冷红外探测器; VO<sub>x</sub> 微测辐射热计; 超表面; 光吸收增强

**Abstract:** Cavity-type metasurface uncooled infrared detector YANG Jun, YANG Chun-Li, FANG Hui, YUAN Jun, YAN Shan-Ru, LI Hua-ying, LI Bing-Zhe (Kunming Institute of Physics, Kunming Yunnan 650223, China) As the cell size of uncooled infrared (IR) detectors progressively shrinks, it becomes increasingly important to increase detector absorption. here, an IMIAM (Insulator-Metal-Insulator-Air-Metal) cavity type metasurface uncooled IR detector structure is proposed, which effectively improves the uniformity of the photosensitive layer while enhancing the absorption of the detector. Utilizing systematic simulation and optimization, it has achieved almost perfect absorption in the Long Wavelength Infrared range (8~14 $\mu\text{m}$ ), meanwhile, it also shows excellent absorption performance in Mid Wavelength Infrared band. In this paper, the reliability of the structure is also verified by the process. this research may provide alternatives for optimizing conventional uncooled IR detectors.

**Key words:** uncooled IR detector, VO<sub>x</sub> microbolometer, Metasurface, Optical absorption enhancement

**PACS:**

## 0 引言

非制冷红外探测器是一种工作在室温环境下, 可将外界入射的红外热辐射信号转化为电信号的探测器。其无需制冷装置, 能够在室温状态下工作, 具有启动快、功耗低、体积小、重量轻、寿命长、成本低等诸多优点。其中 VO<sub>x</sub> 微测辐射热计是市场占有率最高的非制冷红外探测器<sup>[1]</sup>, 无论是在军用领域还是在民用领域都得到了广泛的应用<sup>[2][3]</sup>。然而随着探测器像元尺寸的不断减小<sup>[4]</sup>, 其有效吸收面积随边长的二次方锐减, 使得保持探测器响应率的难度越来越高, 严重制约着非制冷红外探测器的发展。

目前增强探测器像元吸收能力的方法主要可以分为两种, 一是通过集成吸收增强结构, 例如表面等离子共振结构<sup>[5-9]</sup>, 光栅结构<sup>[10-13]</sup>, 超表面结构<sup>[14-18]</sup>等等, 以达到调整吸收光谱的目的; 二是采用双层工艺<sup>[19-22]</sup>, 以提高吸收面积。传统的吸收增强

结构往往都是窄带光谱吸收, 对非制冷红外探测器总吸收能力增强的贡献有限; 传统的双层工艺大多采用伞状上层结构, 如图 1(a) 示, 其吸收的辐射是通过“伞墩”传递到光敏层的, 这也导致了光敏层吸收的热量并不均匀, 影响最终的成像质量。本文提出了一种如图 1(b) 所示的 IMIAM 腔体型超表面非制冷红外探测器结构, 该结构将超表面集成在伞状上层, “伞墩”底部增加了一层超薄金属, 使得上层传递下来的热量大部分被金属层吸收, 再较为均匀的传递到下面的光敏层, 在增强吸收的同时大大增加了光敏层吸收热量分布的均匀性。

本文将首先对此结构展开介绍, 对必要的参量进行定义以便后面的讨论分析, 接着结合阻抗匹配吸收机理和必要的力学、热学前提, 通过 FDTD 仿真软件对此结构进行系统优化 (包括上下两个腔体高度, 各层膜系厚度, “伞状”上层超表面结构的各参量等), 从而得出最优条件。仿真结果表明, 此结构在改善探测器吸收均匀性的同时也使其在工作波

段(8–14 $\mu\text{m}$ )达到了几乎完美的吸收。最后通过器件制备与测试,证明了该结构的可靠性和可行性。

## 1 IMIAM腔体型超表面非制冷红外探测器结构

如图 1(h), IMIAM腔体型超表面非制冷红外探测器结构从下到上包括 Al 反射层, SiN<sub>x</sub> 金属钝化层, SiN<sub>x</sub> 桥面支撑层, VO<sub>x</sub> 光敏层, SiN<sub>x</sub> 光敏钝化层, SiO<sub>2</sub> 调节层和 IMIAM 腔体型超表面结构。

其中, Al 在长波红外对电磁波具有极高的反射率, 膜厚设定为 100nm 即可满足探测器透射率为零

的要求, SiN<sub>x</sub> 在红外波段有较高的吸收率<sup>[23]</sup>, 同时还具有较低的热导率、较高的杨氏模量和极好的抗酸碱腐蚀能力, 这使得它既可以作为良好的热阻材料和钝化层材料, 又可以作为结构的支撑层材料; VO<sub>x</sub> 具有较高的 TCR 值和较宽的电阻率范围, 普遍应用于非制冷红外探测器中。对于 SiN<sub>x</sub>/VO<sub>x</sub>/SiN<sub>x</sub> 吸收层膜系, 通常 SiN<sub>x</sub> 总厚度为 400nm 时, 吸收效果较好, 综合考虑选取其下层 SiN<sub>x</sub> 厚度为 200nm, 上层钝化层 SiN<sub>x</sub> 厚度为 200nm (为工艺上光敏钝化层, 连接电极钝化层等几层的总和), 在确定 VO<sub>x</sub> 光敏层厚度时, 更多的要考虑它的方阻值, 一般其厚

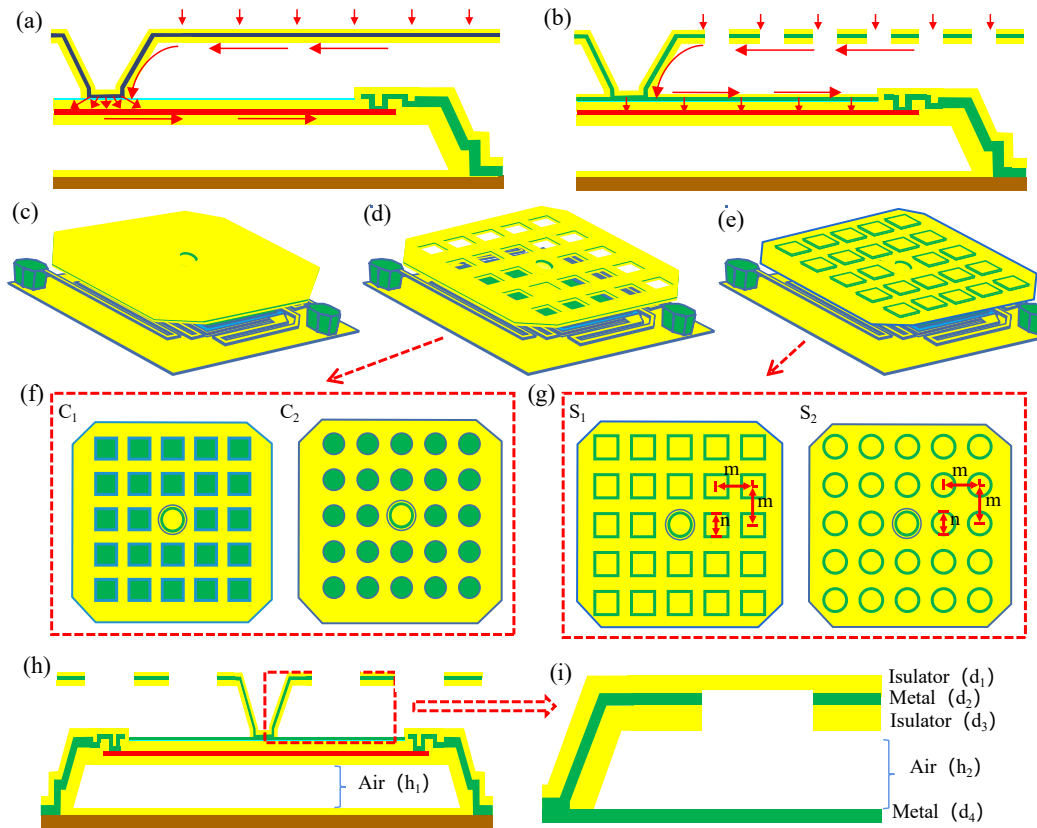


图 1 器件结构示意图: (a)常见的伞状双层非制冷红外探测器结构热传导示意图; (b)IMIAM腔体型超表面非制冷红外探测器结构热传导示意图; (c)常见的伞状双层非制冷红外探测器结构立体图; (d)孔洞型 IMIAM 超表面非制冷红外探测器结构立体图; (e)天线型 IMIAM 超表面非制冷红外探测器结构立体图; (f)孔洞型 IMIAM 超表面结构俯视图 (其中  $C_1$  为方块状孔洞型,  $C_2$  为圆柱状孔洞型); (g)天线型 IMIAM 超表面结构俯视图 (其中  $S_1$  为方块状天线型,  $S_2$  为圆柱状天线型); (h)IMIAM腔体型超表面非制冷红外探测器结构截面图; (i)IMIAM腔体型超表面结构截面图

Fig. 1 Schematic diagram of device structure: (a) Schematic diagram of thermal conduction of common "umbrella" double-layer uncooled IR detector structure; (b) Schematic diagram of the thermal conduction of the IMIAM cavity metasurface uncooled IR detector structure; (c) Stereogram of common "umbrella" double-layer uncooled IR detector; (d) Stereogram of a "hole" type IMIAM metasurface uncooled IR detector; (e) Stereogram of the "antenna" type IMIAM metasurface uncooled IR detector; (f) Top view of the "hole" type IMIAM metasurface structure (where  $C_1$  is a cube-shaped "hole" type and  $C_2$  is a cylindrical "hole" type); (g) Top view of the "antenna" type IMIAM metasurface structure (where  $S_1$  is a cube-shaped "antenna" type and  $S_2$  is a cylindrical "antenna" type); (h) Cross-sectional view of the IMIAM cavity-type metasurface uncooled IR detector; (i) Cross-sectional view of the IMIAM cavity-type metasurface structure

度在 50nm~200nm 之间,这里选取其厚度为 100nm。 $\text{SiO}_2$ 不仅是一种优良的钝化材料,而且也在调节光谱、应力方面起着关键作用,这里采用一层 20nm 的薄  $\text{SiO}_2$  层,可以起到拓宽长波红外吸收光谱的作用。

IMIAM 腔体型超表面结构如图 1(i)所示,这里 Ti 是一种高损耗金属,可以使等离子体共振范围变宽,拓宽吸收带宽,且 Ti 在长波红外波段的消光系数使 Ti 薄膜的厚度在生长时较易控制<sup>[24]</sup>,故 Ti 是金属吸收材料的良好选择,其结构膜系从上到下为  $\text{SiNx}/\text{Ti}/\text{SiNx}/\text{Air}/\text{Ti}$ ,如图 1(f)、(g), $\text{SiNx}/\text{Ti}/\text{SiNx}$  上层可以被灵活的设计成各种不同的孔洞或天线形状,同时其与下层均匀 Ti 传热层充当两面“反射镜”,组成谐振腔。为了下面章节的表示方便,这里对各参数做如下定义:IMIAM 腔体型超表面结构各层从上到下  $\text{SiNx}$ 、Ti、 $\text{SiNx}$ 、Ti 膜系厚度分别定义为  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ ;上下两个腔体高度分别定义为  $h_2$ 、 $h_1$ ;本文中设计的四种  $\text{SiNx}/\text{Ti}/\text{SiNx}$  上层结构分别命名为

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ ,其中每种结构的孔洞或天线直径为  $n$ ,整个周期为  $m$ 。

## 2 仿真与优化

当光线垂直于像元表面入射时,整个器件的透射率  $T$ 、反射率  $R$ 、吸收  $A$  存在如下关系:

$$A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

其中,  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别为超表面结构的反射系数和传输系数。而  $S_{21}^{-1}$  为<sup>[25]</sup>:

$$S_{21}^{-1} = \left[ \sin(nkd) - \frac{i}{2} \left( Z + \frac{1}{Z} \right) \cos(nkd) \right] \cdot e^{ikd} \quad (2)$$

其中,  $d$  为超表面结构的厚度,  $n$  为超表面结构的复

折射率,  $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$  为超表面结构的复阻抗,  $k$  为波矢。而复折射率与复阻抗都与超表面结构的等效介电常数与等效磁导率有关。

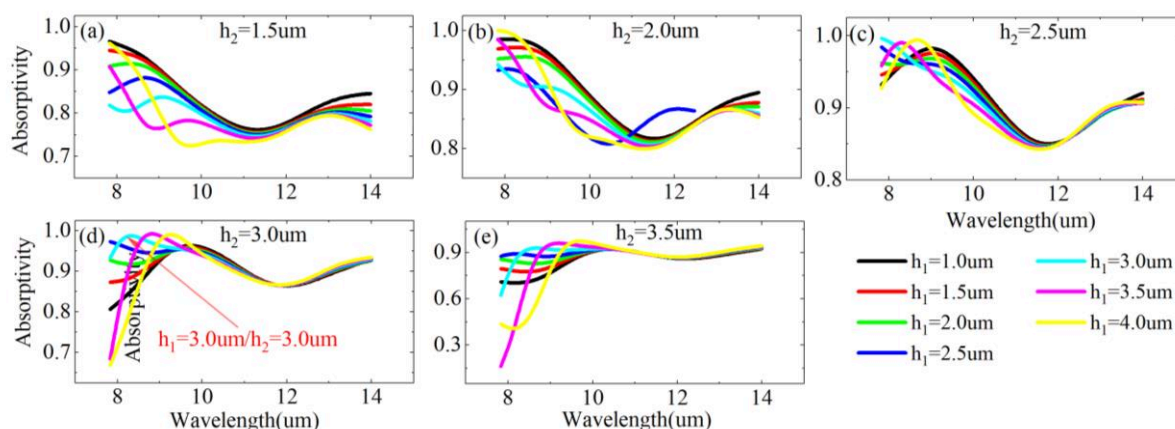


图 2  $h_2$  给定的条件下,探测器工作波段吸收率随  $h_1$  变化的曲线图:(a)  $h_2=1.5\mu\text{m}$ ; (b)  $h_2=2\mu\text{m}$ ; (c)  $h_2=2.5\mu\text{m}$ ; (d)  $h_2=3\mu\text{m}$ ; (e)  $h_2=3.5\mu\text{m}$

Fig. 2 Under the given condition of  $h_2$ , Graph of the absorptivity of the detector operating band as a function of  $h_1$ : (a)  $h_2=1.5\mu\text{m}$ ; (b)  $h_2=2\mu\text{m}$ ; (c)  $h_2=2.5\mu\text{m}$ ; (d)  $h_2=3\mu\text{m}$ ; (e)  $h_2=3.5\mu\text{m}$

为了提高超表面结构的吸收效率,需要尽量减小透射率 $T$ 和反射率 $R$ 。在该结构中,因为有反射层的存在,透射率几乎为零,而超表面结构的反射率可以表示为<sup>[26]</sup>:

$$R = \frac{Z - \eta_0}{Z + \eta_0} \quad (3)$$

其中,  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  为自由空间的阻抗。当超表面结构的等效表面阻抗满足

$$Z = \eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 377\Omega$$

时,反射率 $R$ 为0,从而使得吸收率变为1,达到完美吸收的效果。

为了获得最佳的结构参数,本文通过基于时域有限差分法的仿真软件FDTD对IMIAM腔体型超表面结构进行仿真优化,具体包括双层腔体高度优化,各膜系厚度优化, SiNx/Ti/SiNx 上层结构结构优化。

在腔体高度方面,由于新增加了一个上层腔体,故其物理特性并不同于单层腔体,故这里在给定上层腔体高度的条件下,通过仿真得到如图2(a)~(e)所示的探测器工作波段吸收率随 $h_1$ 变化的曲线。可以看出,无论是上层腔体还是下层腔体,吸收波峰都会随着其高度增加发生右移;与下层腔体相比,上腔所起到的作用更显著。从图2(c)、(d)可以看出,当上层腔体高度为2.5 $\mu\text{m}$ ~3 $\mu\text{m}$ 当时,探测器在工作波段的整体吸收效果最好,其中上下两层腔体高度都为3 $\mu\text{m}$ 时,其吸收效果达到最佳。

接着对IMIAM腔体型超表面结构进行优化。在各层膜系厚度进方面。这里SiNx要能在力学上支持起整个上层伞结构,故其厚度不能太薄,而膜厚过厚则会使得到达下层的光线较少,难以形成有效的谐振所以综合考虑取上层SiNx膜厚范围为20~100nm,下层SiNx膜厚范围为50~150nm进行仿真;上层Ti通常是一层超薄Ti,因为膜厚过厚会使辐射被直接反射,而现有工艺技术又限制了厚度不能过薄,所以取其范围为5~50nm,其仿真结果如图3(a)~(c)所示,可以发现对于SiNx/Ti/SiNx上层膜系,各层膜厚越薄,探测器吸收效果越好。故这里取 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 分别为20nm、5nm、50nm。对于下层Ti,厚度也不应太厚以减少反射,故取范围为5~100nm进行仿真,由图3(d)可知,其膜厚的最优值为10nm。

而在结构方面,由图4(a)~(d)的仿真结果可以看出, SiNx/Ti/SiNx 上层结构对探测器吸收影响很大,凹的图形( $C_1$ 和 $C_2$ ),在单元结构周期为1.5 $\mu\text{m}$ 的条件下,单元直径为0.8 $\mu\text{m}$ 时的吸收效果最好;凸的图形( $S_1$ 和 $S_2$ ),单元直径为1.2 $\mu\text{m}$ ~1.4 $\mu\text{m}$ 时的吸收效果最好。而由图4(e)可知单元结构周期的改变并不会太多的影响到探测器的吸收效果,这说明我们在设计时应该重点关注的是单元结构直径与周期的比值。由图4(f)可以看出,几种SiNx/Ti/SiNx上层结构在8~14 $\mu\text{m}$ 范围内平均吸收率都超过了95%,同时几种结构在中红外波段的吸收率也十分可观。

需要说明的是,由于仿真数据量较大,本文采用的仿真样本是单个特定像元,如图4(f)中f-3与

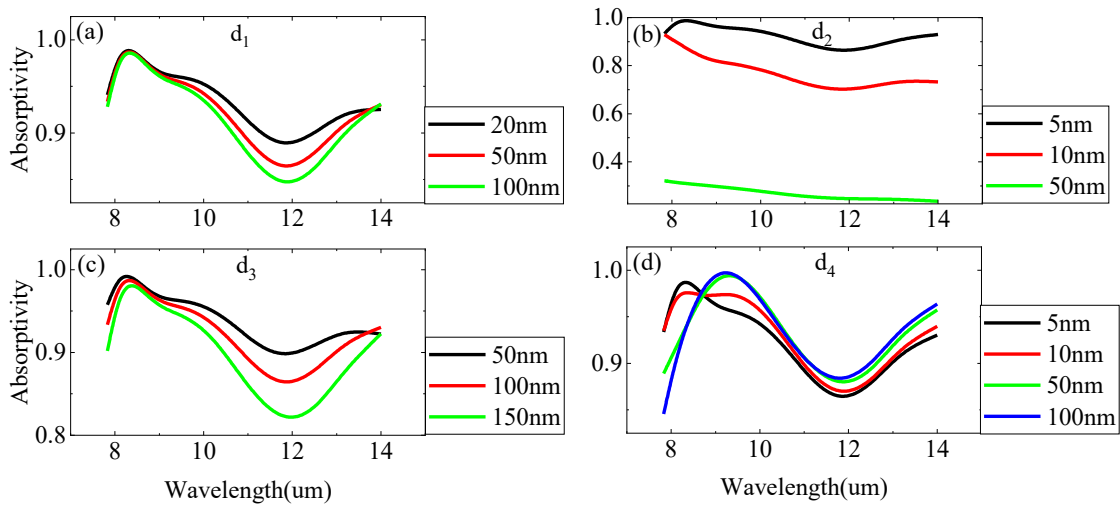


图3 探测器随超表面结构各层膜系厚度变化时的吸收曲线:(a) $d_1$ ;(b) $d_2$ ;(c) $d_3$ ;(d) $d_4$

Fig. 3 The absorption curve of the detector with the thickness of each layer of the metasurface structure: (a)  $d_1$ ; (b)  $d_2$ ; (c)  $d_3$ ; (d)  $d_4$

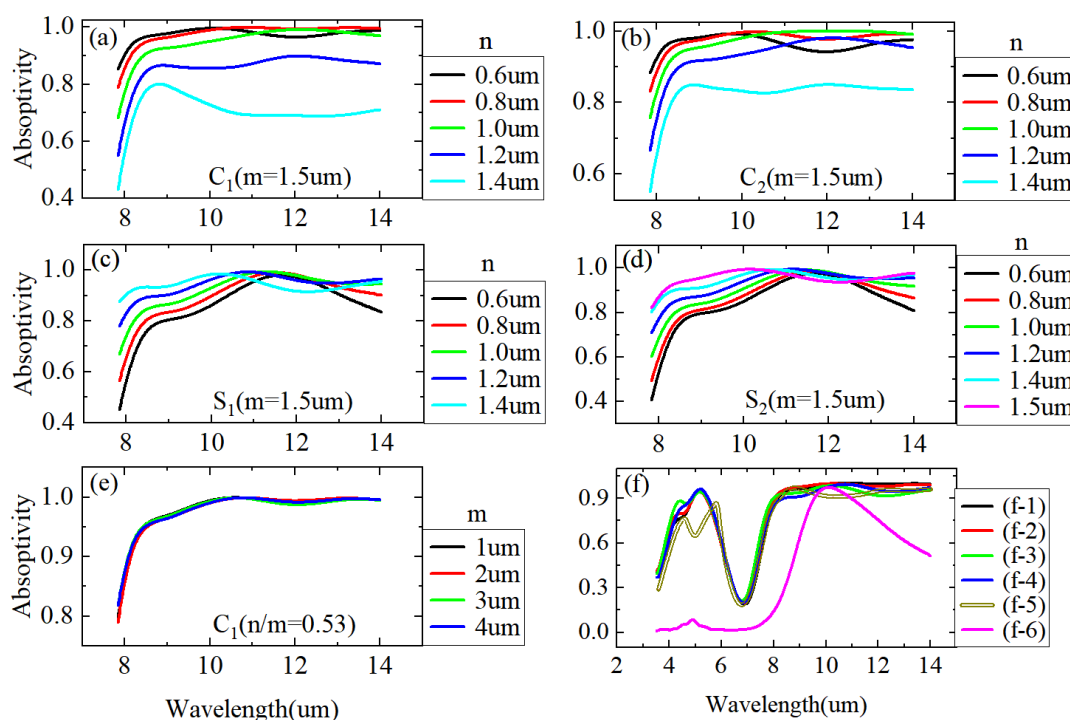


图4 SiNx/Ti/SiNx上层结构参数变化时探测器的吸收曲线:(a) $C_1$ 结构在 $m=1.5\mu\text{m}$ 时探测器随 $n$ 变化的吸收曲线;(b) $C_2$ 结构在 $m=1.5\mu\text{m}$ 时探测器随 $n$ 变化的吸收曲线;(c) $C_3$ 结构在 $m=1.5\mu\text{m}$ 时探测器随 $n$ 变化的吸收曲线;(d) $C_4$ 结构在 $m=1.5\mu\text{m}$ 时探测器随 $n$ 变化的吸收曲线;(e) $C_1$ 结构在 $n/m=0.53$ 时探测器随 $m$ 变化的吸收曲线;(f)不同结构下探测器吸收曲线(f-1为最优时的 $C_1$ 结构;f-2为最优时的 $C_2$ 结构;f-3为最优时的 $S_1$ 结构;f-4为最优时的 $S_2$ 结构;f-5为多像元最优时的 $S_1$ 结构;f-6为传统的非制冷红外探测器结构)

Fig. 4 Detector absorption curve when the parameters of the superstructure of SiNx/Ti/SiNx change: (a) the absorption curve of the detector with  $n$  change when the  $C_1$  structure is  $m=1.5\mu\text{m}$ ; (b) The absorption curve of the detector with  $n$  when the  $C_2$  structure is  $m=1.5\mu\text{m}$ ; (c) The absorption curve of the detector with  $n$  when the  $C_3$  structure is  $m=1.5\mu\text{m}$ ; (d) The absorption curve of the detector with  $n$  when the  $C_4$  structure is  $m=1.5\mu\text{m}$ ; (e) The absorption curve of the detector with  $m$  when the  $C_1$  structure is  $n/m=0.53$ ; (f) Detector absorption curves under different structures (f-1 is the optimal  $C_1$  structure; f-2 is the optimal  $C_2$  structure; f-3 is the optimal  $S_1$  structure; f-4 is the optimal  $S_2$  structure; f-5 is the  $S_1$  structure when multi-pixel is optimal; The f-6 is a traditional uncooled IR detector structure)

f-5所示,由于不同像元间存在一定的间隔,多像元共振吸收光谱与采用单个特定像元进行仿真的结果会存在一定差异,这种差异主要体现在:多像元仿真吸收峰值一般比单个特定像元小,且多像元仿真吸收低谷出现的波长要比单个特定像元短一些。但从整体来看,两种模型仿真结果具有一定的可替代性,这对于减小计算量来说十分有利,故也说明采用单个特定像元进行仿真所得结果的可行性。

### 3 实验与分析

本文所提出的结构将依托于现有的非制冷红外探测器制造工艺来实现,包括反射层制备、腔体牺牲层制备、微桥结构、热敏/钝化层制备、电极连接、牺牲层释放等成熟工艺,在微测辐射热计标准

MEMS工艺之后进行超表面吸收结构的集成。

这里将制备过程分为四步进行简要论述:1. 如图5(a)所示,首先在含有读出电路的硅片上沉积Al(100nm)/SiNx(20nm)制作出相对应的反射层,接着在其上旋涂聚酰亚胺制作下层腔体牺牲层,厚度为3um,采用光刻掩膜制作出桥墩与读出电路的接触孔图形,通过刻蚀露出连接电极孔,而后在牺牲层上沉积200nm的SiNx,形成对应的SiNx桥面支撑层。2. 如图5(b)所示,在SiNx桥面支撑层上分别沉积100nm的VOx,200nm的SiNx,20nm的SiO<sub>2</sub>,

通过相应的光刻刻蚀工艺作出对应的VOx光敏层,SiNx光敏钝化层,SiO<sub>2</sub>调节层。3. 如图5(c)所示,在步骤1所述连接电极处以及VOx两端开孔,刻蚀所沉积的材料露出底部电极和端部VOx,分步

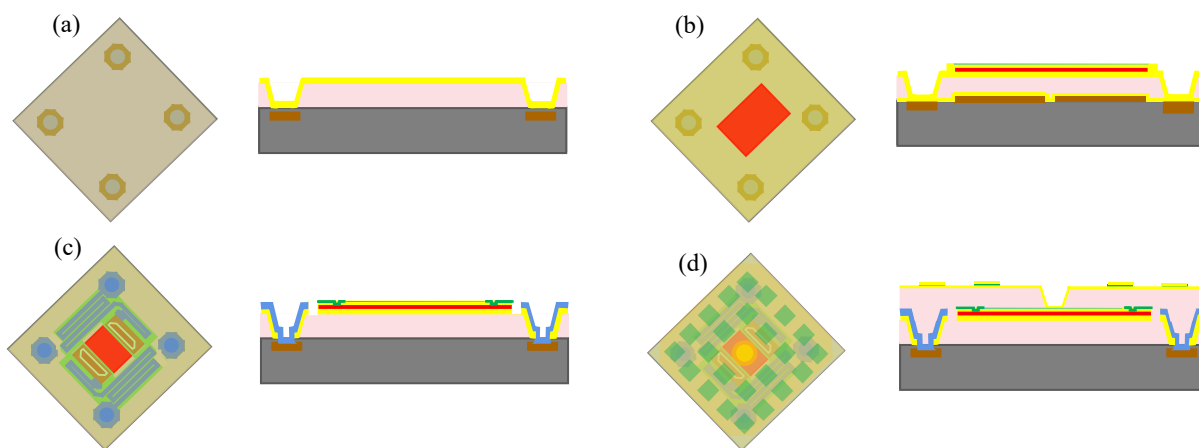


图5 工艺制备过程俯视图(左)和截面图(右):(a)微桥结构搭建;(b)光敏层制备;(c)电极连接;(d)腔体型超表面制备  
Fig. 5 Top view (left) and cross-section view (right) of the process preparation process: (a) Micro-bridge structure construction; (b) Preparation of photosensitive layers; (c) Electrode connection; (d) Cavity-type metasurface preparation

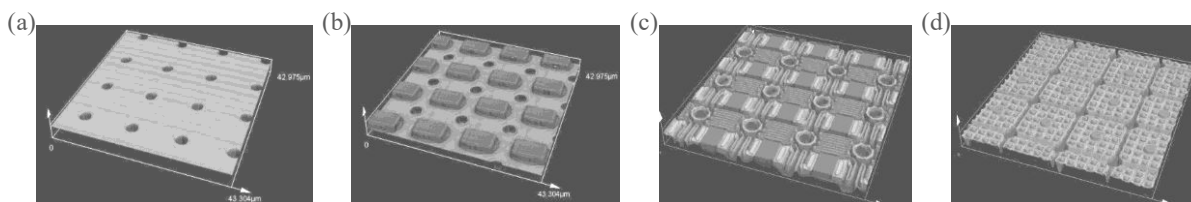


图6 共聚焦显微镜图(与图5对应)  
Fig. 6 Confocal microscopy image (corresponding to Fig. 5)

沉积一定厚度的Ti和SiN<sub>x</sub>,配合光刻刻蚀工艺,实现桥面与底部电路的连通。4.如图5(d)所示,首先沉积10nm的超薄Ti,制作出对应的下层导热层,接着在其上旋涂聚酰亚胺制作上层腔体牺牲层,厚度同为3μm,采用光刻刻蚀工艺露出整个上层超表面的支撑孔。而后分别沉积50nm的SiN<sub>x</sub>,5nm的Ti,20nm的SiN<sub>x</sub>,采用光刻掩膜制作出所述块状/圆柱状SiN<sub>x</sub>/Ti/SiN<sub>x</sub>膜系天线/孔洞图形(本文采用S<sub>1</sub>结构),刻蚀多余Ti、SiN<sub>x</sub>材料,形成所述IMIAM腔体型超表面结构。最后去除牺牲层,完成器件的制备。图6是上述制备过程的共聚焦显微镜图。

通过对器件的光谱测量,可以得到如图7中所示的实验结果,可以发现,其结果与仿真结果基本符合。同设想一致,由于仿真2模型更接近与真实器件,故仿真2的数值也要更接近实验值,这也进一步验证了仿真结果的可靠性。同时实验结果表面,本文所提出IMIAM腔体型超表面非制冷红外探测器在工作波段(8~14μm)的平均吸收率超过了95%,在中红外波段也表现出了优异的吸收特性,在多光谱应用方面有一定的潜力。

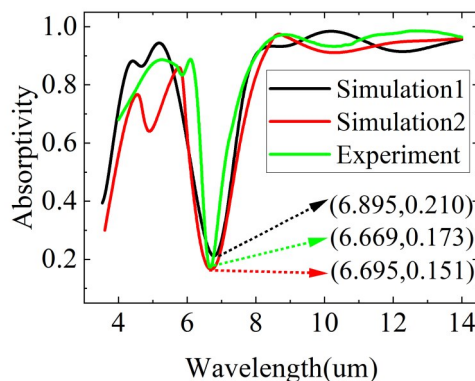


图7 仿真与实验吸收光谱对比图(其中simulation1对应图4中f-3;simulation2为对应图4中f-5。)

Fig. 7 Comparison of simulated and experimental absorption spectra (where simulation1 corresponds to f-3 in Figure 4; simulation2 corresponds to f-5 in Figure 4.)

## 4 结论

随着大规模集成电路与微机电系统的迅猛发展,非制冷红外探测器技术日新月异。如今非制冷红外焦平面的像元尺寸已经进入波长-亚波长范围,像元吸收能力的极速下降严重制约着探测器的性能。故如何提升非制冷红外探测器的吸收能

力成为了一个十分关键的研究课题。

本文结合超表面吸收器与伞状双层吸收结构的优势与特点,提出了一种 IMIAM 腔体型超表面结构,并将其集成于 VOx 非制冷红外探测器上。通过系统的腔体型超表面膜系、结构仿真优化,使探测器在工作波段实现了近乎百分之百的完美吸收,同时在中红外波段也能满足较高的吸收率,通过实验也进一步证明了该结构的可行性与可靠性。此腔体型超表面结构无论是对于长波红外非制冷红外探测器还是双波段(长波和中波)非制冷红外探测器的光学性能改善都具有一定的实际意义。

## 5 参考文献

- [1] Black S H, Sessler T, Gordon E, *et al.* Uncooled Detector Development at Raytheon [C]. SPIE, 2011, **8012**: 80121A.
- [2] Niklaus F, Vieider C, Jakobsen H. MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays A Review [C] //Conference on MEMS/MOEMS Technologies and Applications. 2008.
- [3] Wood R A. Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal planes [J]. *Proc. SPIE*, 1993, 2020. DOI: 10.1117/12.160553.
- [4] Becker S, Imperinetti P, Yon J J, *et al.* Latest Pixel Size Reduction of Uncooled IRFPA at CEA, LETI [C]. SPIE, 2012, **8541**: 85410C.
- [5] Palanchoke U, Jovanov V, Kurz H, *et al.* Plasmonic effects in amorphous silicon thin film solar cells with metal back contacts [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6): 6340–6347.
- [6] Liang Q, Wang T, Lu Z, *et al.* Metamaterial-based two dimensional plasmonic subwavelength structures offer the broadest waveband light harvesting [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, **1**(1): 43–49.
- [7] Li Q, Yu B Q, Li Z F, *et al.* Surface plasmon-enhanced dual-band infrared absorber for VO<sub>x</sub>-based microbolometer application [J]. *Chinese Physics B*, 2017(08): 269–274.
- [8] Gallacher K, Millar R W, Gilbert V, *et al.* Mid-infrared n-Ge on Si Plasmonic Based Microbolometer Sensors [C] // IEEE International Conference on Group IV Photonics. IEEE, 2017: 3–4.
- [9] Ogawa S, Takagawa Y, Kimata M. Polarization-selective uncooled infrared sensor using a one-dimensional plasmonic grating absorber [J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2015, **9451**(12): 992–999.
- [10] Cui Y, Xu J, Fung K H, *et al.* A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(25): 253101.
- [11] Liu X Y, Gao J S, Yang H G, *et al.* Silicon-based multilayer gratings with a designable narrowband absorption in the short-wave infrared [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(22): 25103–25110.
- [12] Popov E, Enoch S, Bonod N. Absorption of light by extremely shallow metallic gratings: metamaterial behavior [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(8): 6770–6781.
- [13] Mahpeykar S M, Xiong Q, Wang X. Resonance-induced absorption enhancement in colloidal quantum dot solar cells using nanostructured electrodes [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(S6): A1576.
- [14] Stewart J W, Vella J H, Li W, *et al.* Ultrafast pyroelectric photodetection with on-chip spectral filters [J]. *Nature materials*, 2020, **19**(2): 158–162.
- [15] Jung J Y, Lee J, Choi D G, *et al.* Wavelength-Selective Infrared Metasurface Absorber for Multispectral Thermal Detection [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(6): 1–1.
- [16] Jung J Y, Song K, Choi J H, *et al.* Infrared broadband metasurface absorber for reducing the thermal mass of a microbolometer [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 430.
- [17] Swett D W. Near Zero Index Perfect Metasurface Absorber using Inverted Conformal Mapping [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 9731.
- [18] Liu T, Abdullah A A, Alkorjia O, *et al.* Device architecture for metasurface integrated Uncooled SixGeyO1-x-y Infrared Microbolometers (Conference Presentation) [C] // Infrared Technology and Applications XLV. 2019.
- [19] Fitzgibbons E T, Han C J. Pixel Structure Having a Bolometer with Spaced Apart Absorber and Transducer Layers and an Associated Fabrication Method, U.S. Patent US6307194B1(2001).
- [20] Li C, Han C J, Skidmore G. Overview of DRS uncooled VO<sub>x</sub> infrared detector development [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(6): p.061017.1–061017.7. DOI: 10.1117/1.3593155.
- [21] Skidmore G D, Howard C G. A Pixel structure having an umbrella type absorber with one or more recesses or channels sized to increase radiation absorption. U.S. patent US7622717B2, (2009).
- [22] Wang P, Chen S, Gan X, *et al.* High Sensitivity 17  $\mu$ m Pixel Pitch 640x512 Uncooled Infrared Focal Plane Arrays Based on Amorphous Vanadium Oxide Thin Films, IEEE Electron Device Lett. 36(9), 923–925 (2015).
- [23] Hsieh S W, Chang C Y, Lee Y S, *et al.* Properties of plasma-enhanced chemical-vapor-deposited a-SiNx: H by various dilution gases [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **76**(6): 3645–3655.
- [24] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd [J]. *Phys. rev. b*, 1974, **9**(12): 5056–5070. DOI: 10.1103/PhysRevB.9.5056.
- [25] Wang Guo-dong. Research on the design and absorption properties of electromagnetic metamaterials [D]. Huazhong University of Science and Technology (王国栋. 电磁超材料的设计及其吸波性能的研究 [D]. 华中科技大学) 2014.
- [26] Pham V T, Park J W, Vu D L, *et al.* THz-metamaterial absorbers [J]. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, **4**(1): 015001. DOI: 10.1088/2043-6262/4/1/015001.