

〈材料与器件〉

氧化钒非制冷探测器吸收特性研究

杨君, 杨春丽, 袁俊, 尹树东, 李华英, 白兰艳, 马敏
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 随着氧化钒非制冷红外焦平面的像元尺寸的减小, 导致探测器的吸收面积呈边长的二次方锐减, 如何提高氧化钒非制冷红外焦平面阵列的吸收效率成为一个非常关键的研究课题。本文从材料和结构角度出发, 分别在单层材料吸收特性、不同吸收结构、腔体高度、膜系厚度等几个方面对影响单层、双层氧化钒非制冷探测器光学吸收的各因素进行了全面系统的仿真。通过对各因素进行量化比较, 同时结合仿真结果给出了提高氧化钒非制冷探测器吸收的系统方法, 对于氧化钒非制冷探测器的设计与研究具有一定的参考意义。

关键词: 氧化钒非制冷探测器; 吸收特性; 光学仿真; 膜厚分析; 腔体优化

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)03-0261-08

Study on Absorption Characteristics of VO_x Uncooled Detectors

YANG Jun, YANG Chunli, YUAN Jun, YIN Shudong, LI Huaying, BAI Lanyan, MA Min
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: As the pixel size of the vanadium oxide (VO_x) uncooled infrared focal plane decreased, the absorption area of the detector exhibited a sharp quadratic decrease in the edge length. Improving the absorption efficiency of the VO_x uncooled infrared focal plane arrays has become a crucial research topic. In this study, a comprehensive and systematic simulation of the factors affecting the optical absorption of single-layer and double-layer VO_x uncooled detectors was conducted from the aspects of material and structure, in terms of the absorption characteristics of single-layer material, different absorption structures, height of the cavity, and thickness of the film system. A systematic approach to improve the absorption of VO_x uncooled detectors is provided by quantitatively comparing the factors with the simulation results, which have certain reference significance for the design and research of VO_x uncooled detectors.

Key words: VO_x uncooled detectors, absorption characteristics, optical simulation, film thickness analysis, cavity optimization

0 引言

非制冷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件。随着大规模集成电路和微机电系统的快速发展, 非制冷红外焦平面阵列技术日新月异, 已广泛应用于军事和民用领域。其中氧化钒非制冷探测器是目前技术最成熟、市场占有率最高的主流非制冷探测器^[1]。如今, 氧化钒非制冷红外焦平面的像元尺寸已经进入亚波长尺寸, 但像元尺寸的减小会导致探测器的吸收面积

呈边长的二次方减小, 而吸收率的快速降低严重制约了探测器的性能。故研究氧化钒非制冷探测器吸收对于提高探测器性能具有十分重要的意义。

最早采用的提高红外吸收的方法是增加黑化层^[2-3]。但其吸收率对高性能热探测器而言偏低。利用光在多层介质中的干涉效应, 可以增强在某一波长或某一波段的吸收率。在此概念基础上, 发展出了具有共振吸收结构的辐射吸收层^[3-4], 其能大大增强氧化钒非制冷探测器在特定波段的吸收效率。而后学者们又提出了许多表面吸收增强结构来提升氧化钒非制冷探测器

收稿日期: 2023-07-13; 修订日期: 2023-11-22。

作者简介: 杨君(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向是非制冷探测器超表面结构技术研究。E-mail: yangjun_wulisuo@163.com。

通信作者: 杨春丽(1980-), 女, 正高级工程师, 主要从事红外探测器研究。E-mail: 149578363@qq.com。

的吸收率,如:表面纹理吸收结构^[5-6]、金属陶瓷吸收结构^[7]、光子晶体吸收结构^[8]、光栅吸收增强结构^[9-10]、超表面吸收增强结构^[11-12]等。随着氧化钒非制冷探测器像元尺寸的减小,采用双层工艺成为了提高探测器吸收效率最为普遍的一种方法^[13-16]。

本文将首先从材料角度出发,对氧化钒非制冷探测器单层材料的吸收特性进行研究,分析目前较为常用的氧化钒非制冷探测器材料以及他们对探测器的吸收影响;接着从结构角度出发,对探测器的填充系数、反射层、谐振腔、表面吸收结构4个因素分别展开分析;最后拓展到双层结构,对双层氧化钒非制冷探测器的腔体高度、膜系厚度进行讨论。通过对上述研究的量化比较,结合目前工艺上的普遍方法和较为前沿的技术路线,给出提升氧化钒非制冷探测器吸收的系统方法。

1 氧化钒非制冷探测器单层材料吸收研究

为了研究氧化钒非制冷探测器的吸收,我们首先需要对探测器各层材料进行一些基本的研究。

目前普遍的氧化钒非制冷探测器材料膜系除电路部分外从下到上普遍包括反射层、金属钝化层、桥面支撑层、光敏层、光敏钝化层。

在选材方面,Al在长波红外对电磁波具有较高的反射率,且成本较低,故是一种极佳的反射层材料;SiN_x材料,在红外波段有较高的吸收率^[17],同时还具有优良的热学、力学性质,这使得它既可以作为探测器金属和光敏材料的钝化层,又可以作为桥面支撑层;而光敏材料VO_x具有较高的TCR值,普遍应用于非制冷探测器中;在设计氧化钒非制冷红外探测器时,通常还会用到SiO₂,其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。

当光线由空气入射到光学系统的光学零件表面时,一部分光被反射,一部分光被折射,而其余部分则被光学系统吸收,通常我们获取光学系统的反射率、透射率相对容易,故有下式求得其吸收率:

$$A(\lambda)=1-R(\lambda)-T(\lambda)$$

式中:R(λ)、T(λ)、A(λ)分别表示光学系统的反射率、透射率、吸收率。

薄膜体系的红外吸收率,通常采用光学导纳矩阵法^[18-19]。考虑到器件的实际工作情况,可以做以下假设:①各层是各向同性的均匀薄膜,②输入光是横波(S波),③输入光垂直入射。根据薄膜光学理论,膜系中第j层膜的特征矩阵M_j为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:i为虚部单位;η_j和δ_j(j=1,2,3)分别为各层膜的修正导纳和相位厚度:

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j \quad (2)$$

式中:N_j为各层膜的复折射率,N_j=n_j-ik_j,n_j和k_j都与波长λ有关,d_j和θ_j分别为各层膜的厚度和折射角,对于S波且光垂直入射时,θ_j=0。

整个膜系的特征矩阵M为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:η_{k+1}为出射介质的光学导纳。从上式可知,多层薄膜的组合导纳为Y=C/B,反射率R(λ)和透射率T(λ)分别为:

$$R(\lambda) = \left(\frac{\eta_0 \mathbf{B} - \mathbf{C}}{\eta_0 \mathbf{B} + \mathbf{C}} \right) \left(\frac{\eta_0 \mathbf{B} - \mathbf{C}}{\eta_0 \mathbf{B} + \mathbf{C}} \right)^* \quad (4)$$

$$T(\lambda) = \frac{4 \eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 \mathbf{B} + \mathbf{C})(\eta_0 \mathbf{B} + \mathbf{C})^*} \quad (5)$$

从以上分析可知,影响光学薄膜吸收的主要因素有:折射率n_j、消光系数k_j、薄膜厚度d_j、入射角度θ_j等,这里光学参数n_j和k_j由材料自身决定,本文通过椭偏移测量出上述材料的光学参数如图1(a)所示。

通过FFTD仿真软件,仿真单层材料不同厚度的吸收情况,可以得到各材料的光学特性,从而为确定器件各层薄膜的厚度值提供参考。

如图1(b)、(c)可以看出,光经过SiN_x时主要被吸收和透射,反射量较少,吸收波段集中在9~14μm。随着厚度的增加,SiN_x的吸收率也在逐步提高,且吸收峰向短波方向移动,当薄膜厚度超过200nm时,吸收增速明显下降较快;SiO₂在9.5μm处有一个很强的吸收峰,其他波段吸收较弱,这对于探测器吸收光谱具有一定的调控作用(可以解决探测器在8~10μm范围内吸收不够强的问题),其主要由吸收和透射决定,反射量较少,故可以降低探测器在可见-近红外波段的反射率,采用SiN_x和SiO₂的双层复合材料作为微桥支撑结构还能较好地缓解表面残余应力问题^[20]。VO_x吸收波段在9μm以上。超薄金属薄膜由于金属表面的自由载流子浓度很高,金属体材料对于太赫兹的反射率接近100%。但是当金属薄膜的厚度减小到纳米量级时,薄膜中的载流子受到束缚而浓度降低,这使得电子与太赫兹波相互作用增强而吸收太赫兹辐射。Ti在整个波段都有吸收,波长越长吸收效果越好,随着厚度的增加,其吸收先增加后减小,这主要由透射

引起。当其厚度为5~50 nm时,吸收效果最好,当其厚度超过200 nm时,光线几乎全部被反射。而Al的消光系数特别大,薄膜对光线几乎不产生吸收,膜厚在4 nm以下有一定的透射,但膜厚超过50 nm时,光线几乎全部被反射。

当然在确定器件各膜层厚度时不能只考虑其吸收特性,比如作为支撑微桥的 SiN_x 层必须超过一定值才能在力学上满足结构要求, VO_x 在设计厚度时还要考虑其TCR、方阻等问题,整个探测器膜系还要满足相应的热学要求等等。

2 氧化钒非制冷探测器不同结构吸收研究

提高氧化钒非制冷探测器吸收效率的方法有很多,在没有外部吸收增强装置辅助的情况下,本文将其归纳为4个方面:提高探测器的填充系数;增加反射层减小光的透射;增加谐振腔增加所需波段吸收;表面吸收结构的集成。

结合上一章所讨论的材料性质与目前普遍的氧化钒非制冷探测器膜系结构,本文以如图2所示的

$\text{SiN}_x/\text{VO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 结构进行氧化钒非制冷探测器不同结构吸收研究。

填充系数定义为微测辐射热计对红外辐射的有效吸收面积占其总面积的百分比^[21]。氧化钒非制冷探测器是由多个探测像元组成,假设每个像元的总面积为 A ,有效探测面积为 A_D ,则填充因子为 $\beta = A_D/A$ 。填充系数越大则探测器的吸收能力越强。

微桥的桥臂、相邻微桥之间的空隙、连接微桥与读出电路的开孔等所占的面积对敏感材料吸收都没有直接贡献,所以桥腿与有效吸收面积的设计尤为重要,桥腿类型大致可以分为如图3(a)~(e)的几种类型,可以看出,桥腿长度越短,桥腿截面积越小,则其填充系数越大,但另一方面为使微测辐射热计与其衬底间的热导尽量小,需要尽可能增加桥腿长度,而桥腿截面积过小则会带来许多工艺上的问题。所以在设计桥腿分布时,需要综合考虑,单层微桥结构填充系数一般是60%~70%,且随着像元尺寸的减小,单层结构的填充系数会进一步下降。研究者们还提出了一种如图3(f)所示的双层隐藏桥腿结构^[22],但这种结构由于信号互连失效的概率较大等因素并未被大多数制造商采用^[23]。

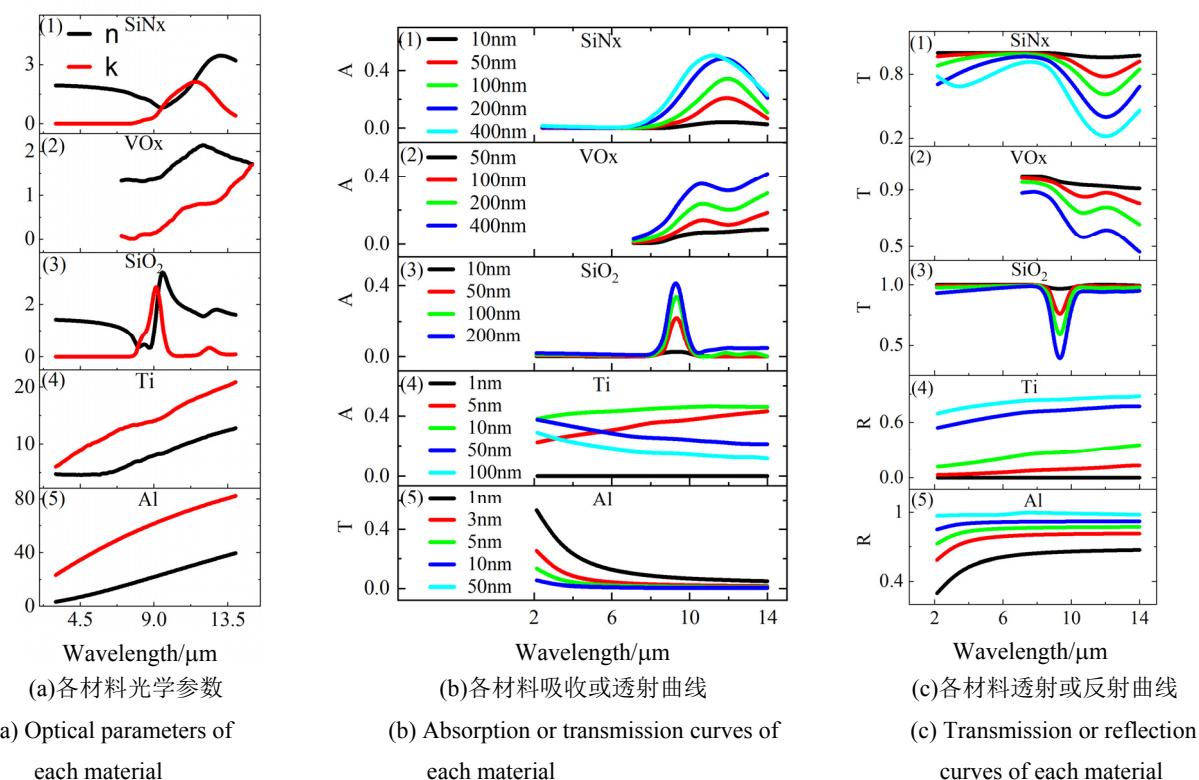


图1 各材料光学参数及光学性质(图(b)、(c)中A、T、R分别表示吸收率(Absorptivity)、透射率(Transmissivity)、反射率(Reflectivity),图(c)与图(b)共用一个图例)

Fig.1 Optical parameters and optical properties of each material (A, T, and R in Figures (b) and (c) represent Absorptivity, Transmissivity, and Reflectivity, respectively. Figures (c) and (b) share the same legend)

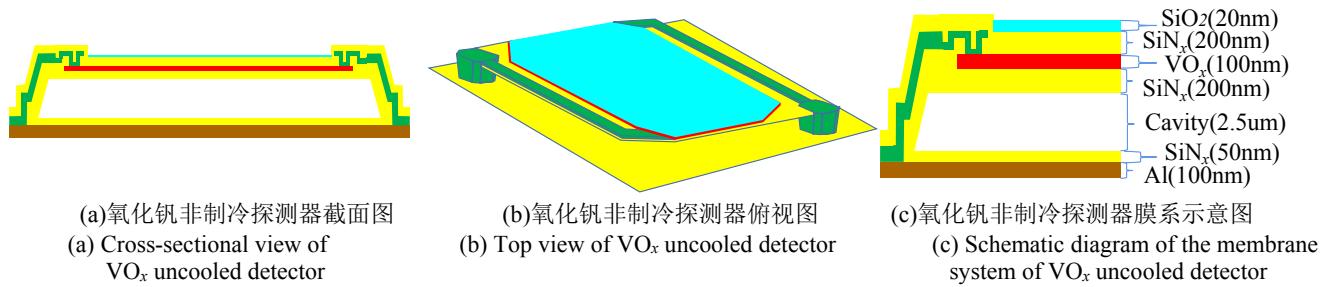


图2 氧化钒非制冷探测器示意图
Fig.2 Schematic of an VO_x uncooled detector

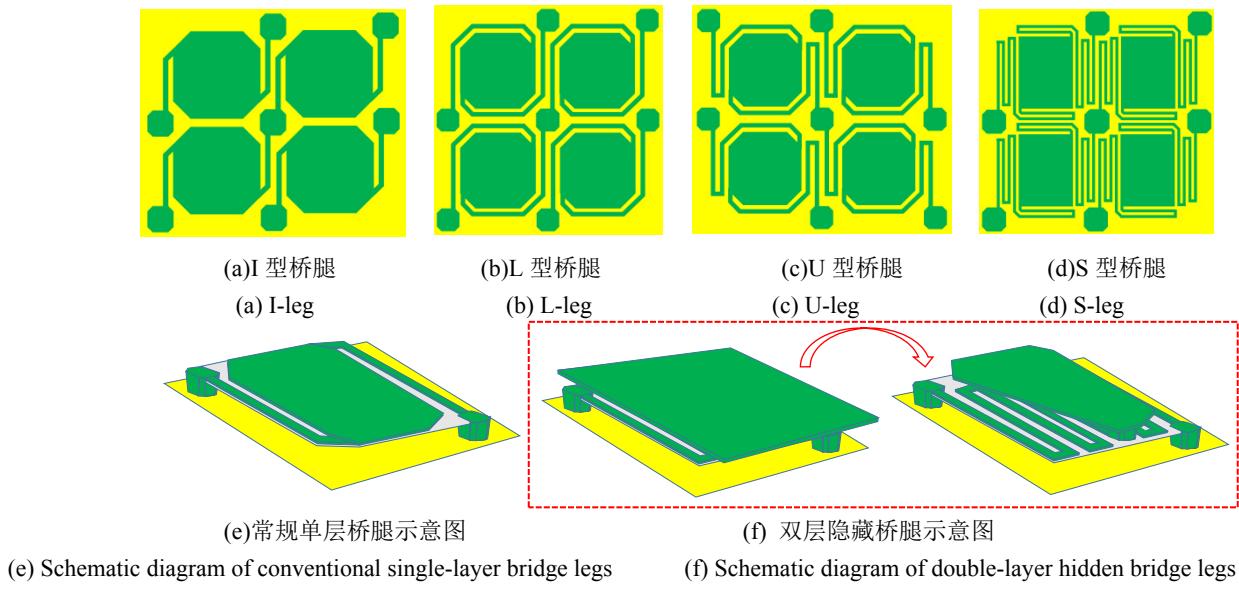


图3 氧化钒非制冷探测器桥腿类型
Fig.3 VO_x uncooled detector bridge leg types

反射层、谐振腔、表面吸收结构, 如图 4 所示, 我们可以单独讨论它们各自的以及其互相组合之后的结构, 通过 FDTD 仿真软件对图中各结构进行仿真, 可以得到相应的吸收贡献率。

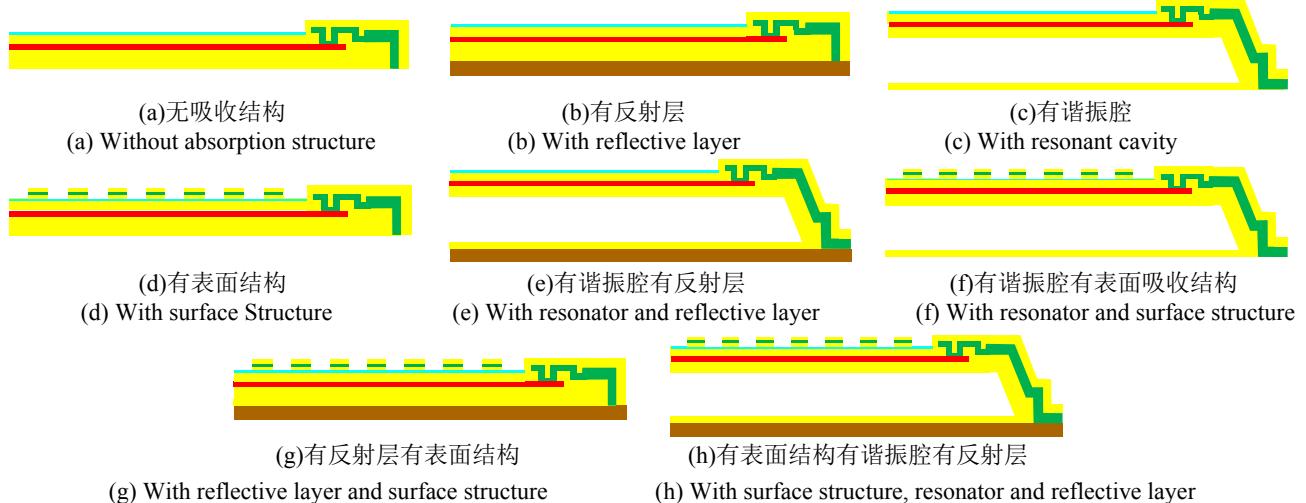


图4 氧化钒非制冷探测器不同吸收结构示意图 (其中表面结构为 $\text{SiN}_x/\text{Ti}/\text{SiN}_x$ 夹层柱状超表面天线结构, $\text{SiN}_x/\text{Ti}/\text{SiN}_x$ 夹层厚度分别为 50 nm/10 nm/50 nm; 天线周期为 2.5 μm , 柱状天线直径为 1.5 μm ; 其他结构各膜系参数同图 2 所示)

Fig.4 Schematic diagram of different absorption structures of VO_x uncooled detectors (The surface structure is a $\text{SiN}_x/\text{Ti}/\text{SiN}_x$ sandwich columnar metasurface antenna structure, with a thickness of 50nm/10nm/50nm for $\text{SiN}_x/\text{Ti}/\text{SiN}_x$ interlayers; the antenna period is 2.5 μm , and the diameter of the columnar antenna is 1.5 μm ; the parameters of other structures and film systems are shown in Figure 2)

从图5(a)、(b)中可以看出,单探测器(无吸收结构)吸收情况下大部分光线被透射,吸收率较低,故需要增加反射层以减小透射,当增加反射层后,透射率几乎下降为零,但另一方面反射率也显著增加,对于探测器的吸收效率并没有正面的效益,故其需要配合谐振腔进行吸收增强。

谐振腔可等效为一个耦合系统^[24]。当有反射层存在时,下层金属充当一个镜面的作用,能反射部分入射电磁波;同样上层也会充当一个局部的反射镜,这样上下金属镜面反射的多重波会发生干涉效应。通过来回的振荡反射消耗,使得入射光波完全被“约束”在中间介电耗尽层内。腔体的厚度,也就是微桥悬空的高度,根据探测器吸收结构的设计公式: $d=\lambda_0/4n$, 空气的折射率为 $n=1$, 长波红外(工作波段)的波长范围 λ_0 为 $8\sim12\text{ }\mu\text{m}$, 因此,牺牲层厚度一般设计为 $2\sim3\text{ }\mu\text{m}$ 就能满足谐振腔高度的要求。从图5(c)、(e)可以看出,在反射层和谐振腔的共同作用下,探测器的吸收效率得到了大幅度的增加,如果单是谐振腔,吸收效果要远差于反射层和谐振腔搭配的效果。另外腔体存在的另一个必要原因在于降低了光敏面与衬底间的热交换,故在氧化钒非制冷探测器设计时显得尤为重要。

表面吸收结构方面我们以超表面为例,超表面是一种在平面上按照特定需求排列的亚波长单元组合结构。通过对单元结构、排布方式、用材选择等的合理设计,可以实现对光的各种属性的调控。超表面有着“人工原子”的特点,这意味着我们可以微观地去独立设计每一个单元的结构和排布方式,从而实现光的独立调控。因此,超表面为开发探测器件提供了一个通用的平台。通过图5(d)、(f)我们可以看出,将超表面集成到探测器上,有效增加了探测器的吸收光谱范围,起到了调节光谱的作用,而从图5(g)可以看出,通过搭配反射层,探测器的中波波段吸收得到了极大的增强。这说明超表面结构能够有效调节吸收波段,增强峰值吸收。

热辐射规律是自然界普遍规律之一,正常人体辐射的峰值波长一般在 $9.5\text{ }\mu\text{m}$ 处,辐射分布在 $8\sim14\text{ }\mu\text{m}$ 波段的能量占约总能量的 46%^[25]。对于温度低于室温的物体,75%的热辐射能集中在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上的红外区。在设计制备红外探测器的时候,控制其工作区间在 $8\sim14\text{ }\mu\text{m}$ 波段,便能接收室温下物体辐射的主要能量。因此这里我们重点关注这一波段的吸收情况,可以得到如表1的结果。

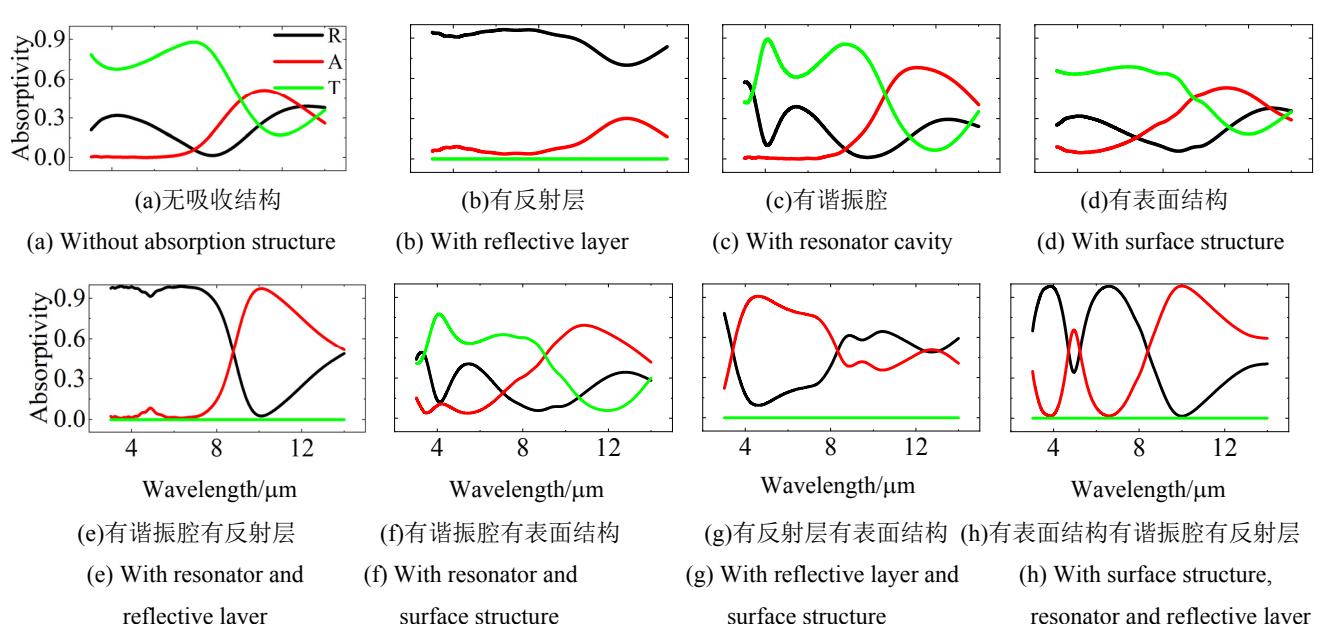


图5 氧化钒非制冷探测器不同吸收结构吸收情况(图(a)~(h)共用图(a)的图例,其中R、A、T分别表示反射率(Reflectivity)、吸收率(Absorptivity)、透射率(Transmittivity))

Fig.5 Absorption of different absorption structures of VO_x uncooled detectors (Figures (a) to (h) share the legend of Figure (a), where R, A, and T respectively represent Reflectivity, Absorptivity, and Transmittance)

表1 氧化钒非制冷探测器不同吸收结构吸收情况对比

Table 1 Comparison of absorption structures of VO_x uncooled detectors

Serial number	Fill factor	Resonator	Reflective layer	Surface structure	8–14 μm Effective average absorption
1	50%	without	without	without	16%
2	70%	without	without	without	22%
3	70%	with	without	without	30%
4	70%	without	with	without	11%
5	70%	without	without	with	29%
6	70%	with	with	without	44%
7	70%	with	without	with	36%
8	70%	without	with	with	32%
9	70%	with	with	with	49%

可以看出单层氧化钒非制冷探测器吸收效率始终有限,故学者们构思出了双层结构来增强氧化钒非制冷探测器的吸收率。

3 双层氧化钒非制冷探测器吸收研究

这里在以上仿真结果的基础上提出一种基于现有工艺可实现的双层氧化钒非制冷探测器结构,如图6,在单层探测器的基础上增加了一层带腔体的 $\text{SiN}_x/\text{Ti}/\text{SiN}_x$ 夹层“伞状”表面吸收结构,并对其腔体高度,膜系厚度等进行仿真优化。

在腔体高度方面,由于新增加了一个上层腔体,故其物理特性与单层腔体相比肯定会发生一定的变化,在 $\text{SiN}_x/\text{Ti}/\text{SiN}_x$ 夹层“伞状”表面吸收结构膜系厚度为100 nm/10 nm/50 nm的条件下,通过FDTD软

件,我们可以得到如图7(a)~(g)所示的仿真结果(这里我们令上层腔体高度为 h_t ,下层腔体高度为 h_b)可以看出,随着上下腔体的高度增加,吸收波段发生右移,这也符合腔体吸收公式。与下层腔体相比,上腔所起到的作用更显著,我们可以根据氧化钒非制冷探测器工作波段的不同来灵活地设计两个腔体的高度。

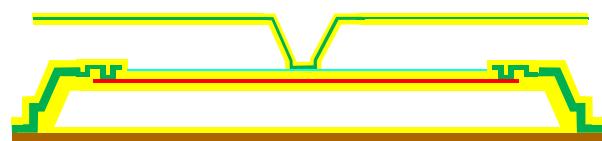


图6 双层氧化钒非制冷探测器结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of the structure of the double-layer VO_x uncooled detector

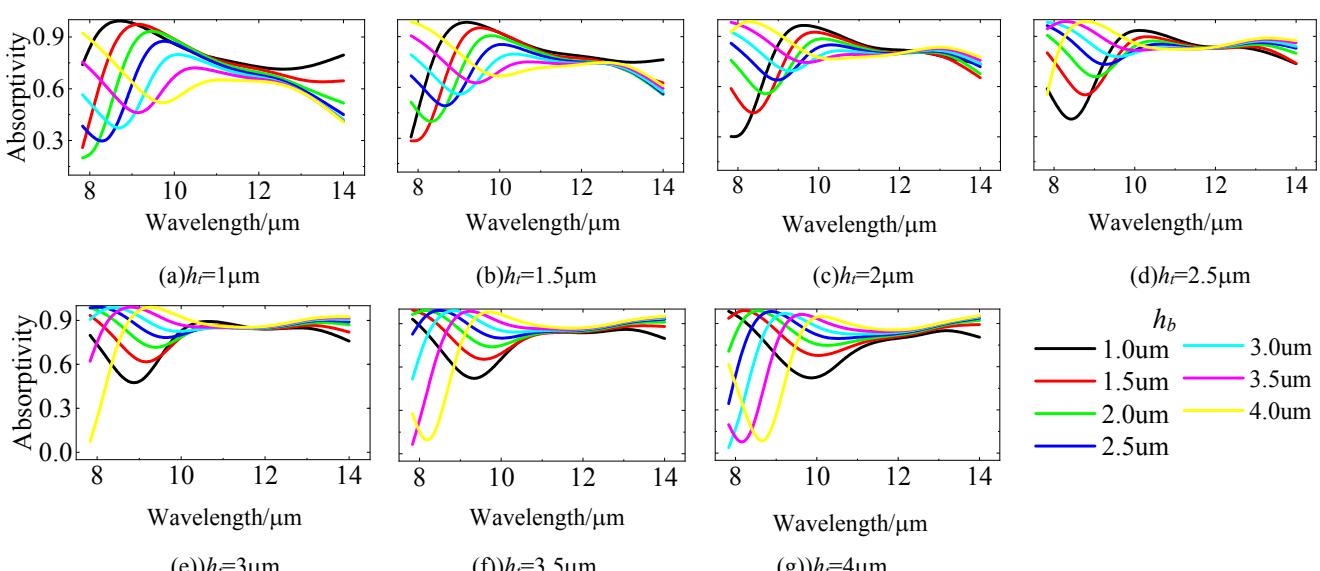


图7 不同腔体吸收曲线(上层腔体固定时,吸收随下层腔体变化的曲线)

Fig.7 Absorption curves of different cavities (curves of absorption with lower chamber when the upper cavity is fixed)

接着针对各层膜系厚度进行仿真优化。为了方便表示, 这里我们令上层表面结构顶层 SiN_x 厚度为 t_1 ; 上层表面结构中间层 Ti 厚度为 t_2 ; 上层表面结构底层 SiN_x 厚度为 t_3 ; 光敏层膜系顶层 SiN_x 厚度为 b_1 ; 光敏层膜系中间层 VO_x 厚度为 b_2 ; 光敏层膜系底层 SiN_x 厚度为 b_3 。

首先对于上层表面吸收结构, 由图 8(a)~(c)可知, 上层表面吸收层膜系厚度对于探测器吸收的影响十分显著, 且在一定范围内, 各层膜系越薄探测器吸收效果相对越好, 就底层 SiN_x 而言, 因为它要肩负起支

撑整个腔体的重任, 故应控制其厚度在 100 nm 左右; 金属 Ti 层因工艺限制无法长太薄, 目前通常工艺上可实现的厚度在 5 nm 左右; 顶层 SiN_x 为了保证其有效的钝化保护作用, 厚度一般在 50 nm 左右; 而对于下层光敏吸收层膜系, 由图 8(d)~(f)可知, 在一定范围内, 随着膜厚的增加, 探测器吸收峰值会有所增加, 但对应的峰值吸收波段将发生右移。如前所述, 我们在考虑探测器膜系厚度时, 需要结合力学, 热学综合讨论, 当两个参数发生冲突时, 我们通常需要对其进行综合取舍。

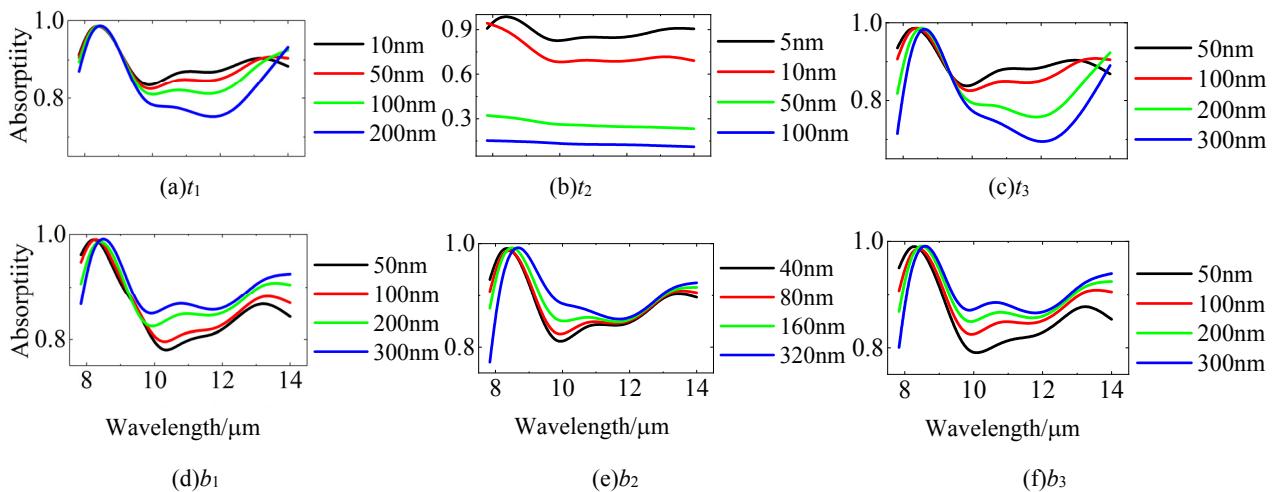


图 8 氧化钒非制冷探测器双层结构各层膜系不同厚度下吸收曲线

Fig.8 Absorption curves of different thicknesses of each layer film system in the double layer structure of VO_x uncooled detectors

4 结论

通过以上仿真分析, 我们可以得出一些提高氧化钒非制冷探测器吸收的系统方法。

首先从材料膜系角度出发, 应该尽量选择吸收波段在工作波段的材料, 同时综合考虑膜系厚度, 通常膜系厚度增加, 器件的吸收波段会往长波方向移动, 双层结构中, 上层“伞”结构各层膜厚通常需要比较薄, 而下层光敏层膜系, 通常需要在一定的中间值, 需要结合工作波段, 热学力学性能进行综合取舍。

而在结构方面, 在没有外部吸收增强装置辅助的情况下, 可以将提高氧化钒非制冷探测器吸收率的方法归纳为 4 个方面: 提高探测器的填充系数 (主要关注桥腿与光敏面的设计分布); 增加反射层减小光的透射; 增加谐振腔增加所需波段吸收; 表面吸收结构的集成, 如图 9 所示, 单探测器 (无吸收结构) 吸收

情况下大部分光线被透射, 吸收率较低, 当增加反射层后, 透射率几乎下降为零, 但另一方面反射率也显著增加, 故其需要配合谐振腔进形吸收增强。谐振腔对于氧化钒非制冷探测器的光学吸收影响极大, 同时在热学方面也发挥着重要作用, 是氧化钒非制冷探测器中不可或缺的重要结构。在表面吸收增强结构方面, 学者们提出了许多十分有效的结构, 如: 表面纹理吸收结构; 金属陶瓷吸收结构; 光子晶体吸收结构; 超表面吸收增强结构等。表面吸收结构可以应用到吸收增强, 吸收波段控制, 偏振控制等各方面。

而双层甚至多层结构的利用将氧化钒非制冷探测器吸收率提升到了新的维度, 大大拓宽了吸收波段, 使得结构的设计具有了更多的灵活性。从图 9 中我们可以很直观地看到这种比较。而将更多的吸收增强结构用简单的方式集成到氧化钒非制冷探测器上, 必将成为下一个提高其吸收率的重要课题。

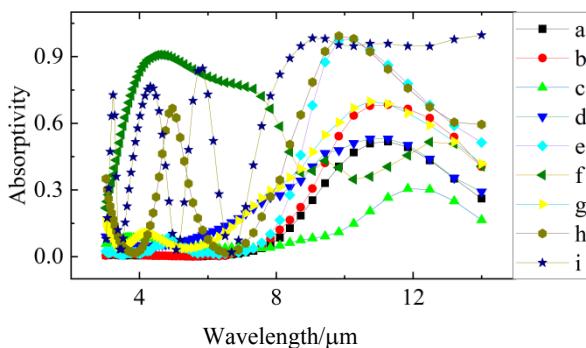


图9 基于上述仿真结果的氧化钒非制冷探测器不同吸收结构吸收情况对比图（其中图例表示如下：a—无吸收结构；b—有反射层；c—有谐振腔；d—有表面结构；e—有腔有反射层；f—有腔有表面结构；g—有反射层有表面结构；h—有表面结构有腔有反射层；i—双层结构）

Fig.9 Comparison diagram of different absorption structures of VO_x uncooled detectors based on the above simulation results (the legend is shown below: a—without absorption structure; b—with reflective layer; c—with resonant cavity; d—with surface structure; e—with cavity and reflective layer; f—with cavity and surface structure; g—with reflective layer and surface structure; h—with surface structure, cavity, and reflective layer; i—Two-layer structure)

参考文献：

- [1] 李静, 宋广, 董珊, 等. 非制冷红外焦平面探测器研究进展与趋势[J]. 红外, 2020, 41(10): 8-24.
LI Jing, SONG Guang, DONG Shan, et al. Research progress and trends in uncooled infrared focal plane detectors[J]. *Infrared*, 2020, 41(10): 8-24.
- [2] Blevin W R, Geist J. Influence of black coatings on pyroelectric detectors[J]. *Appl. Opt.*, 1974, 13: 1171-1178.
- [3] 刘卫国, 金娜. 集成非制冷热成像探测阵列[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 250-256.
LIU Weiguo, JIN Na. *Integrated uncooled Thermal Imaging Detection Array* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 250-256.
- [4] Bly V T, Cox T J. Infrared absorber for ferroelectric detectors[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33: 26-30.
- [5] Lampert C M. Coatings for enhanced photothermal energy collection I. selective absorbers[J]. *Solar Energy Materials*, 1979, 1(5-6): 319-341.
- [6] ZHU J, YU Z, Burkhard G F, et al. Optical absorption enhancement in amorphous silicon nanowire and nanocone arrays[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 279-282.
- [7] Sathiaraj T S, Thangaraj R, Sharbati H A, et al. Ni-Al₂O₃ selective cermet coatings for photothermal conversion up to 500°C[J]. *Thin Solid Films*, 1990, 190(2): 241-254.
- [8] Rephaeli E, Fan S. Tungsten black absorber for solar light with wide angular operation range[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(21): 211107.
- [9] 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: A1576-A1588.
- [10] LIU X, GAO J, YANG H, et al. Silicon-based multilayer gratings with a designable narrowband absorption in the short-wave infrared[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25103-25110. DOI:10.1364/OE.24.025103.
- [11] Stewart JW, Vella JH, LI W, et al. Ultrafast pyroelectric photodetection with on-chip spectral filters[J]. *Nat. Mater.*, 2019, 19: 158-162.
- [12] Swett D W. Near zero index perfect metasurface absorber using inverted conformal mapping[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9731.
- [13] Fitzgibbons E T, Han C J. Pixel structure having a bolometer with spaced apart absorber and transducer layers and an associated fabrication method [P]. United States Patent 6307194, [2023-07-12]. DOI: US6307194 B1.
- [14] LI Chuan C, HAN C J, Skidmore G. Overview of DRS uncooled VO_x infrared detector development[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 061017.
- [15] Skidmore G D, Howard C G. Pixel structure having an umbrella type absorber with one or more recesses or channels sized to increase radiation absorption[P]. United States Patent 7622717, [2023-07-12]. DOI:US7622717 B2.
- [16] WANG P, CHEN S, GAN X, et al. High sensitivity 17 μm pixel pitch 640×512 uncooled Infrared focal plane arrays based on amorphous vanadium oxide thin films[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(9): 923-925.
- [17] Hsieh S W, CHANG C Y, LEE Y S, et al. Properties of plasma-enhanced chemical vapor deposited a-SiN_x: H by various dilution gases[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 76(6): 3645-3655.
- [18] 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 39-81.
TANG Jinfa, ZHENG Quan. *Applied Thin Film Optics* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984: 39-81
- [19] 董良, 岳瑞峰, 刘理天. 微辐射热计的光学与热学设计[J]. 红外与毫米波学报, 2003(2): 109-113.
DONG Liang, YUE Ruifeng, LIU Litian. Optical and thermal design of microbolometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003(2): 109-113.
- [20] 许路加, 胡明, 杨海波, 等. 非制冷微测辐射热计支撑层厚度比研究[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(4): 251-254.
XU Lujia, HU Ming, YANG Haibo, et al. Study on thickness ratio of support layer in uncooled microbolometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(4): 251-254.
- [21] 苏君红. 红外材料与探测技术[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2015: 3.
SU Junhong. *Infrared Materials and Detection Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2015: 3.
- [22] Murphy D, Ray M, Wyles R, et al. High sensitivity (25 μm pitch) microbolometer FPAs[C]//Proc. SPIE, 2001, 4454: 147-159.
- [23] 王宏臣. 氧化钒薄膜及非致冷红外探测器阵列研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. DOI:10.7666/d.d048209.
WANG Hongchen. Research on vanadium oxide thin film and uncooled infrared detector array[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. DOI: 10.7666/d.d048209.
- [24] CHEN H. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. *Optics Express*, 2012, 20: 7165-7172.
- [25] 吴宗凡. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 20-50.
WU Zongfan. *Infrared and Low-Light Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 20-50.