第 45 卷第 2 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 45, No. 2
2024 年 4 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Apr. 2024

文章编号:1008-1542(2024)02-0141-09

基于超表面的宽带太赫兹热释电探测器设计

张　明[1],张俊垚[1],张娜娇[1],董　朋[1],王保柱[1],尚　燕[1],段　磊[2]

(1. 河北科技大学信息科学与工程学院,河北石家庄　050018;
2. 河北博威集成电路有限公司,河北石家庄　050200)

摘　要:为了解决传统太赫兹(THz)探测器吸收效率低,频率范围小的问题,提出将双层超表面吸收阵列结构与钽酸锂热释电探测器相贴合,构成宽带太赫兹超表面热释电探测器。采用 MATLAB 和 CST 联合仿真的优化方法对超表面结构进行按需优化;使用 ANSYS 对热释电探测器进行仿真分析,得到敏感层、绝热层等特征参数对太赫兹热释电探测器的温度变化率以及响应电流的影响。结果表明,采用超表面阵列结构提高了全 THz 波段的探测性能,凳型热释电探测器在给定条件下的平均热释电电流输出为 31.52 pA。使用超表面作为吸收结构可以使热释电探测器具有连续且高效的吸波特性,为宽带太赫兹探测器的设计提供参考。

关键词:半导体物理学;热释电探测器;超表面;太赫兹;联合仿真;遗传算法

中图分类号:O441.4　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2024yx02004

Design of wideband terahertz pyroelectric detector based on metasurface

ZHANG Ming[1], ZHANG Junyao[1], ZHANG Najiao[1], DONG Peng[1], WANG Baozhu[1], SHANG Yan[1], DUAN Lei[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. Hebei Bowei Integrated Circuits Company Limited, Shijiazhuang, Hebei 050200, China)

Abstract: In order to solve the problems of low absorption efficiency and small frequency range of traditional terahertz (THz) detectors, a broadband terahertz metasurface pyroelectric detector was proposed by combining a dual metasurface absorption array structure with the $LiTaO_3$ pyroelectric detector. The optimization method of MATLAB and CST co-simulation was used to optimize the metasurface structure on demand. ANSYS was used to simulate and analyze the pyroelectric detector, and the influence of characteristic parameters such as sensitive layer and adiabatic layer on the temperature change rate and response current of terahertz pyroelectric detector was obtained. The results show that the use of metasurface array structure improves the detection performance of the whole THz band, and the average pyroelectric current output of the stool-type pyroelectric detector under given conditions is 31.52 pA. The use of metasurface as an absorption structure can make the pyroelectric

收稿日期:2023-11-01;修回日期:2024-01-28;责任编辑:冯民
基金项目:国家自然科学基金(62105093);河北省教育厅科学研究项目(BJK2023036);河北科技大学引进人才科研启动基金(1181382)
第一作者简介:张明(1991—),男,河北邯郸人,副教授,博士,主要从事太赫兹探测器、超表面光电器件方面的研究。
通信作者:尚燕,讲师。E-mail: shangyan62580@163.com

张明,张俊垚,张娜娇,等.基于超表面的宽带太赫兹热释电探测器设计[J].河北科技大学学报,2024,45(2):141-149.
ZHANG Ming, ZHANG Junyao, ZHANG Najiao, et al. Design of wideband terahertz pyroelectric detector based on metasurface[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(2): 141-149.

detector have continuous and efficient wave absorption characteristics, which provides some reference for the design of broadband terahertz detectors.

Keywords: semiconductor physics; pyroelectric detector; metasurface; terahertz (THz); co-simulation; genetic algorithm

太赫兹(THz)波具有频带范围大、穿透能力强以及抗干扰能力高等优异的电磁特性,在医学成像、生物传感、安全检查和下一代通信等领域具有广泛的应用前景[1-5]。在太赫兹检测和通信系统中,太赫兹探测器主要用于信息和图像的获取,是最重要的部件之一。在实际应用中,探测器的工作频段需要覆盖常用太赫兹源的频率范围,应当具有连续宽带的吸收特性。此外,现有的太赫兹源功率较低,在低温环境下也仅有毫瓦量级[6],探测器需要具有较高的吸收效率,实现微弱信号的检测。THz探测器实现信号的获取分为2个阶段:一是高效吸收THz波,二是将光信号转化成可检测输出的电信号。

对于吸波结构,传统探测器的吸收材料包括碳系材料[7]和超薄金属[8]。这两种材料虽然能够实现对太赫兹波的吸收,但吸收效率和带宽有限,难以检测连续微弱的太赫兹源信号。区别于碳系材料和超薄金属,超表面作为超材料的一种二维形式可以获得常规材料所不具备的超常物理性质。LANDY等[9]首次设计了超表面电磁吸收器,利用阻抗匹配实现了高效的电磁吸收。SONG等[10]利用二氧化钒超表面实现了0.52~1.04 THz的宽带吸收和偏振转换。上述超表面器件一般采用有限元建模的方法来设计[11],其耗时且难以获得最优的按需性能。研究表明,超表面波(M波)的电磁场分布和频散可以用悬链线模型很好地描述[12],这为表征超表面的电磁特性提供了一个近乎精确的数学模型。基于该模型,提出一种简单但功能强大的解析设计方法,简化了基于超表面宽带器件的设计[13-14]。虽然悬链线场理论应用于设计超表面器件已经得到了实验验证,但是在宽带频率范围内表征超表面电磁特性的理论模型并不十分准确[15]。

而在THz波信号转化方面,研究者通过吸收结构吸收THz波后实现光电转换。MITROFANOV等[16]利用GaAs纳米光栅阵列结合布拉格反射镜设计了全介质超表面,并将其集成到光电探测器中实现了高效率且高灵敏度的太赫兹探测。黄文超等[17]研究了一种在室温下快速响应基于二维碲烯工作的太赫兹光电探测器,实验验证了器件能够在毫米波和太赫兹波段工作并且有优异的性能。王杨涛等[18]提出了新的基于圆环孔阵列超材料的钽酸锂热释电太赫兹探测器,在0.315 THz频点处的等效噪声功率为4.64 μW/Hz,实现了太赫兹波探测。目前太赫兹探测器的研究频率范围多集中于低频并且探测范围较小,针对宽带且连续太赫兹源信号探测的相关研究较少。

基于上述研究现状,本文提出将双层吸收器阵列结构与钽酸锂热释电探测器相贴合,构成宽带太赫兹超表面热释电探测器。使用MATLAB和CST联合仿真对超表面结构优化,仿真过程使用3D模型,与理论模型相比可以在最大程度上保证结果的准确性。采用超表面阵列结构可以使热释电探测器具有连续且高效的吸波特性,同时提高全THz波段的探测性能。仿真分析了敏感层、绝热层等特征参数与太赫兹热释电探测器温度变化率以及响应电流的关系,以期为设计宽带太赫兹探测器提供参考。

1 热释电探测器工作原理

热释电探测器具有结构简单、成本低、室温可工作和探测频带宽的特点[19],可以很好地用于被动成像等领域[20]。热释电探测器主要由吸收层、上电极、敏感层、下电极和衬底组成。探测器通常使用永久极化的铁电晶体材料作为敏感元。钽酸锂($LiTaO_3$)晶体具有较大的热释电系数,居里点高,相对介电常数小,探测率优值大,制造成本低,材料性能稳定。由钽酸锂制备的器件能在室温条件下工作,是一种较为理想的热释电材料,因此广泛用于制作热释电探测器[21-25]。热释电探测器的探测机理(如图1所示)是:当一定调制频率的热辐射入射在探测器吸收层上时,吸收层吸收太赫兹波并转化为热能,该热能经由上电极传导至敏感层,使它的热学和电学特性发生变化,从而产生热释电效应。通过引线外接放大电路,将电流信号转化为电压信号,以实现电学量的读出。

2　太赫兹探测器设计

2.1　超表面吸收结构设计

2.1.1　联合仿真设计方法

联合仿真的主要原理是使用 MATLAB 丰富的库函数控制 CST 绘制模型和处理数据。具体流程如下：首先，通过 GDS 构建初代参数的结构模型，然后导入到 CST 进行仿真，得到初始的 S 参数。将 CST 中的 S 参数数据导入到 MATLAB 中，利用遗传算法对模型参数进行优化。新一代的结构参数在遗传算法优化后生成，并且在 CST 中构建新的模型并继续仿真。优化仿真在整个过程是自动进行的，相当于一个周期，直到完成迭代次数。联合仿真的流程图如图 2 所示。

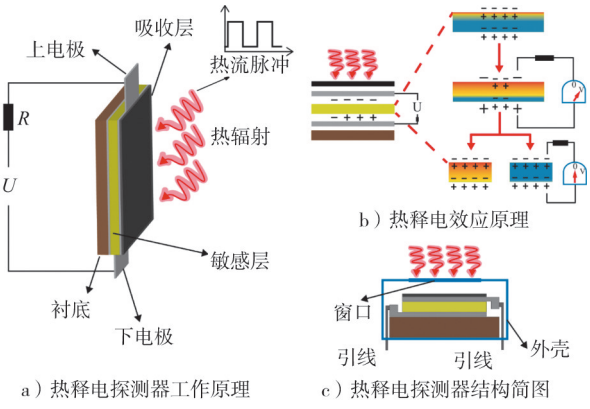


图 1　热释电探测器探测机理

Fig. 1　Pyroelectric detector detection mechanism

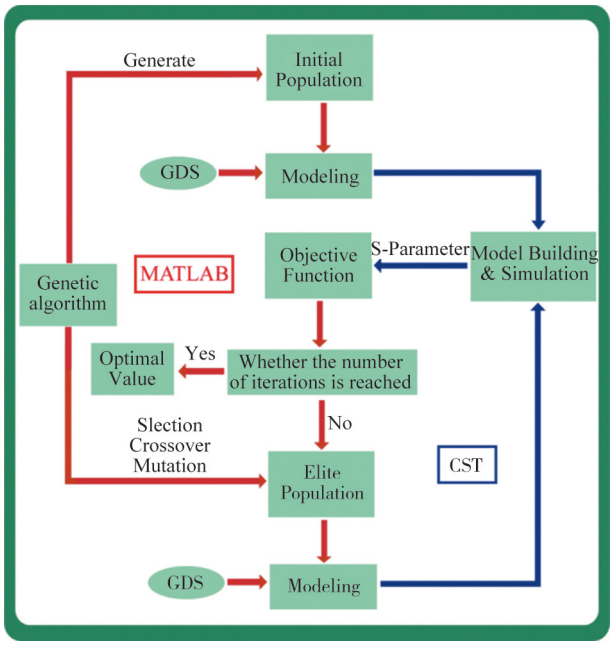
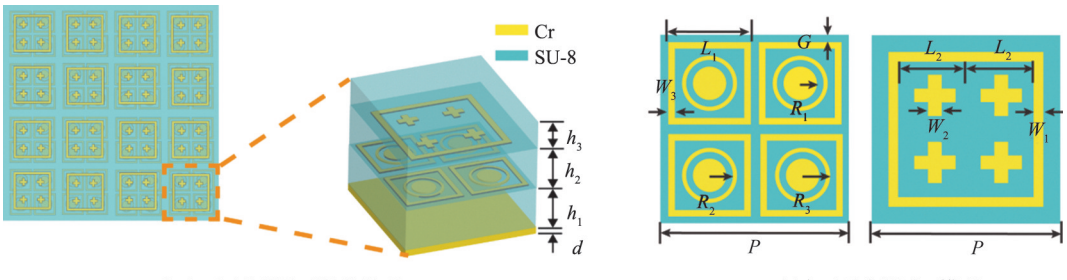


图 2　联合仿真设计方法流程图

Fig. 2　Flow chart of the co-simulation

2.1.2　双超表面吸收器

超表面是人工设计的周期性结构，可以通过改变模型形状和结构尺寸来调控其在太赫兹波段的吸收率。将超表面结构引入热释电探测器，利用超表面调控探测器对太赫兹波的吸收，以此来提升太赫兹探测器的性能。为实现在太赫兹波段的高吸收，设计了双层超表面结构，如图 3 所示。吸收结构由不同厚度的 SU-8 光刻胶与金属铬的双层超表面组成。衬底的厚度 $d=1\ \mu m$，介质层的厚度分别为 $h_1=25\ \mu m$，$h_2=25\ \mu m$，$h_3=18\ \mu m$。



a) 双超表面吸收器阵列结构模型　　b) 双超表面吸收器平面模型

图 3　双超表面吸收器模型

Fig. 3　Dual metasurface absorber model

初始模型结构的几何参数是依据式(1)所示的参数范围生成的，

$$P \in [100,110], L_1 \in [50,55], L_2 \in [35,45], W_1 \in [1,6], W_2 \in [3,8],$$
$$W_3 \in [2,9], R_1 \in [2,8], R_2 \in [9,14], R_3 \in [15,18], G \in [1,5], \tag{1}$$
$$\text{count}: i \geqslant 1 \ \& \ i \leqslant 1\,001 \ \& \ \text{tranA}(i) \geqslant 0.9; \text{count} = \text{count} + 1,$$
$$\text{value} = \text{count} * 10。 \tag{2}$$

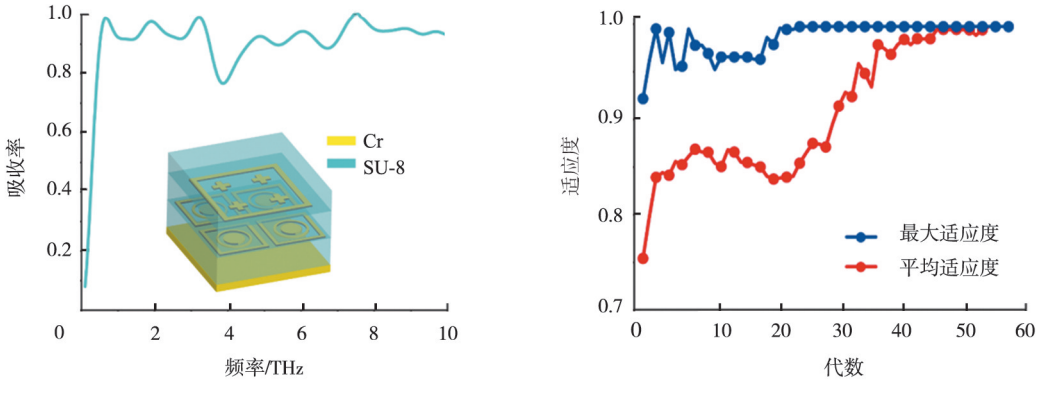
使用 GDS 构建模型并导入到 CST 进行仿真。将得到的 S 参数导入到 MATLAB 中，使用式(2)所示的适应度函数进行分析。将 0.1～10 THz 频率范围平均分为 1 001 个点，使用加权方法计算适应度值。将该频率范围内吸收率超过 90%的频率点记录为良好，频率点数记录为 count，最终适应度值是 1 001 个频率点的加权求和。所以，更高的适应度值意味着有更好的效率。之后，遗传算法将经历选择、交叉和变异的步骤。程序根据适应度函数是否满足设计要求来确定输出最优值或生成下一代种群，然后继续运行程序进行仿真，直到满足判断条件。

经过联合仿真的优化，得到了超表面单元结构的最优结构参数，如表 1 所示。超宽带太赫兹吸收器在 0.1～10 THz 频率范围内的吸收光谱如图 4 a)所示。它可以有效吸收 0.1～10 THz 的入射太赫兹波，平均吸收率高于 90%。遗传算法的参数设置如下：种群大小为每代 40 个，交叉概率设置为 0.7，突变率设置为 0.005，停止条件设置为 60 代截断。适应度值的变化记录在图 4 b)中，经过 31 代的迭代，最终平均适应度值与最大适应度值相等并保持稳定，充分验证了结果的鲁棒性。

表 1 双超表面的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of dual metasurface

模型参数	数值/μm	模型参数	数值/μm
L_1	53.5	P	107
R_1	6.6	L_2	38.1
R_2	13.3	W_1	5
R_3	15.6	W_2	4.3
G	1.3	W_3	3.4



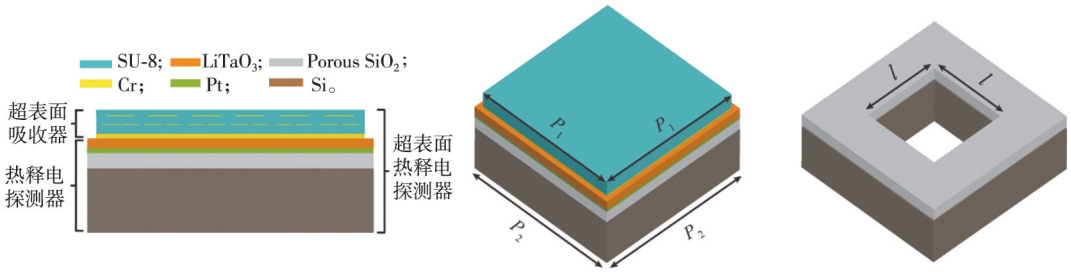
a) 吸收率曲线　　b) 适应度变化曲线

图 4 吸收率曲线以及适应度值变化

Fig. 4 Absorptivity curve and the change of fitness value

2.2 探测器结构设计

将超表面吸收阵列结构与热释电探测器贴合构成超表面热释电探测器，如图 5 a)所示。吸收结构和探测器结构的边长分别为 $P_1 = 963$ μm，$P_2 = 1$ mm。结构从上到下依次为超表面吸收结构、钽酸锂敏感层、铂下电极、多孔氧化硅绝热层和硅基底。其中，双超表面吸收结构可实现太赫兹波的超宽带吸收，进而形成宽带探测器。吸收层吸收率和衬底的导热效率是影响热释电探测器探测带宽与灵敏度的重要因素。因此，吸收层需要表现出卓越的吸收性能。其次，需要降低探测器的热损耗，探测器的热损耗主要是经过硅衬底的热传导损耗。薄膜热释电探测器通常制作在硅衬底上，由于硅衬底热导率高导致大量的热散失，会产生严重的温度噪声，降低探测器的灵敏度。为了减小硅衬底的热传导损耗，本文采取了 2 种策略：一是在衬底上沉积多孔二氧化硅作为绝热层，另一种方法是减少衬底与敏感层的接触面积。基于这些考虑，将衬底和绝热层设计成内边长 $l = 500$ μm 的空心管状结构，如图 5 b)所示，从而减少了它们之间的接触面积。



a) 探测器结构模型　　b) 衬底结构模型

图 5　热释电探测器结构模型

Fig. 5　Structure model of pyroelectric detector

3　热释电探测器的热学仿真分析

3.1　边界条件

薄膜探测器的横向尺寸远大于各层膜的厚度，可以忽略它的横向散热，因此对太赫兹探测器进行一维的瞬态热仿真分析。在对热释电探测器结构进行仿真时，采用黑体辐射源作为太赫兹源。根据黑体辐射普朗克公式，计算出所加载的热流密度值：

$$M=\int_{\lambda_2}^{\lambda_1}\frac{2\pi hc}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}-1}},\tag{3}$$

式中：h 为普朗克常数，$h=6.626\times10^{-34}$ J·s；k 为玻尔兹曼常数，$k=1.38\times10^{-23}$ J/K；c 为光速，$c=3\times10^8$ m/s。由式(3)可得，当 $T=500$ K 时，黑体辐射在 0.1～10 THz 波段的功率密度为 110.084 9 pW/μm^2。近似地认为黑体辐射源平行辐射到探测器，探测器吸收的辐射功率密度为

$$F=M\cdot\alpha,\tag{4}$$

式中 α 为探测器的辐射吸收率。根据吸收率结果，得到探测器吸收的辐射为 100.177 2 pW/μm^2。因此，在仿真时为了模拟太赫兹辐射，对模型加载一个周期 2 s 的热流密度为 100 pW/μm^2 的稳恒热流来代替太赫兹辐射，作为第二类边界条件，并将衬底底面的背景温度设置为 22 ℃作为第一类边界条件。定义材料的厚度以及热学参数如表 2 所示。

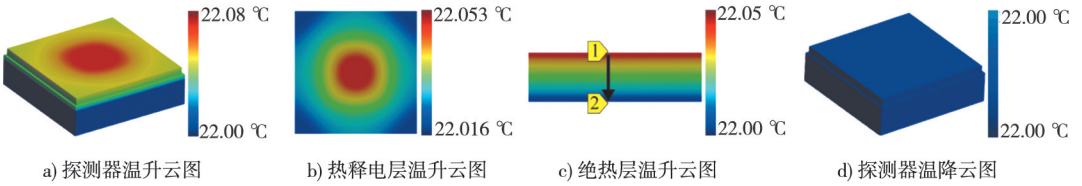
表 2　材料的热学参数以及厚度

Tab. 2　Thermal parameters and thickness of the material

复合膜结构	厚度/μm	比热/(J/(g·K))	密度×10^{12}/(g/μm^3)	热导率×10^4/(W/(μm·K))
Si	200	0.702	2.328	1.24
Porous SiO_2	30	0.787	1.320	0.008
Pt	0.1	0.134	21.45	0.716
$LiTaO_3$	1	0.25	7.45	0.46
Cr	0.1	0.421	7.18	0.94
SU-8	25/25/18	1.5	1.2	0.002

3.2　太赫兹热释电探测器热仿真分析

使用有限元软件 ANSYS19.2 对探测器进行瞬态热分析[26]，施加周期的热流脉冲后探测器各结构温度变化如图 6 所示。其中红色表示高温，蓝色表示低温。从图 6 a)可以看出，探测器单元的中心温度最高，最高温升为 0.08 ℃。边缘衬底温度最低，探测器温度场从顶端中心向四周以及底部呈梯度减小。图 6 b)为热



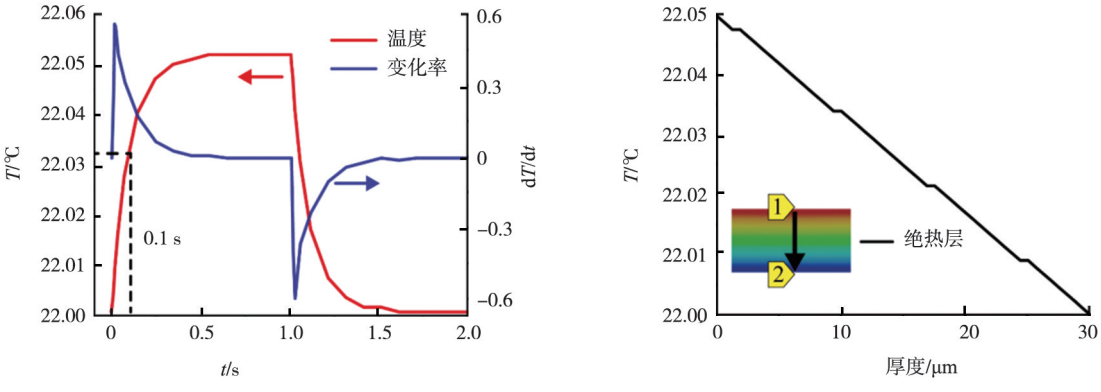
a) 探测器温升云图　　b) 热释电层温升云图　　c) 绝热层温升云图　　d) 探测器温降云图

图 6　探测器温度场分析

Fig. 6　Detector temperature field analysis

释电层的温升云图，单元中心温度最高，边缘温度最低。图 6 c)为绝热层的指向路径 1 到 2 的温度变化。由图 6 d)可以看出冷却后探测器整体温度降低至 22.00 ℃。

图 7 为热释电层和绝热层的温度变化曲线。从图 7 a)可以看出在一个周期内，探测单元接收辐射后温度开始上升，随着时间的推移与环境逐渐趋于热平衡状态。当辐射为 0 时，探测单元的温度逐渐降低到室温。热释电层最高温度为 20.05 ℃，当停止施加热流脉冲后，温度逐渐降低到 22.00 ℃。定义热释电探测器的热时间常数为温升到最大峰值$(1-1/e)$时所需时间，从图 7 a)的红色曲线可知敏感元的热时间常数为 0.1 s。蓝色曲线为热释电层的温度变化率曲线，接收辐射初始时刻温度上升最快，温度变化率最大。随着温度的上升，传热方式由非稳态传热变为稳态传热，温度变化率逐渐变小，到热平衡状态时温度变化率趋于 0。图 7 b)为绝热层的温度变化率曲线。绝热层最高温度为 22.05 ℃，最低温度为 22.00 ℃，有明显的温度梯度变化，最低温度为室温，阻止了温度向衬底的传递，起到了隔热的作用。绝热层与硅衬底接触的部分温度已经接近衬底温度 22.00 ℃，说明硅衬底的热传导损耗是主要的热传导损耗，越靠近硅衬底，温度升高幅度越小。

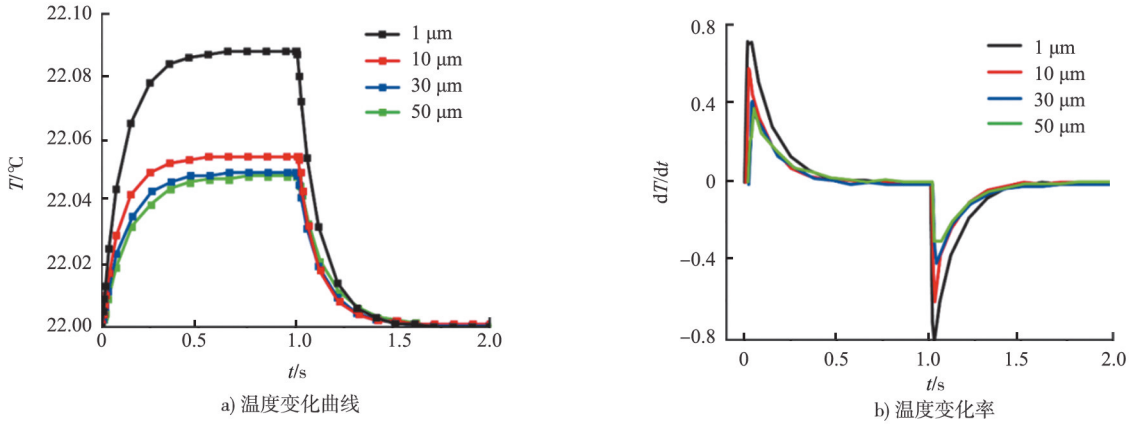


a) 热释电层温度变化曲线　　b) 绝热层温度变化曲线

图 7　温度变化曲线

Fig. 7　Temperature curve

为了确定热释电层厚度对响应速率 dT/dt 的影响，将绝热层厚度设置为 30 μm，分别对热释电层厚度为 1，10，30 和 50 μm 的模型进行瞬态热分析，将其结果进行对比。如图 8 a)所示，当热释电层厚度为 1 μm 时，探测单元的温升最大，最高温度为 22.088 ℃。探测单元的温升随着厚度增加而减小。温度变化率如图 8 b)所示，dT/dt 在最初的时间段内迅速增大。随着时间的增加，dT/dt 逐渐减小，0.5 s 以后传热方式由非稳态传热变为稳态传热，dT/dt 慢慢趋于 0。由分析结果可以看出，热释电层越薄，温升越高，温度变化率越大，也即电流响应率越大。所以，为了提高器件的探测率，需要利用超薄的钽酸锂薄膜作为热释电探测器的敏感层。

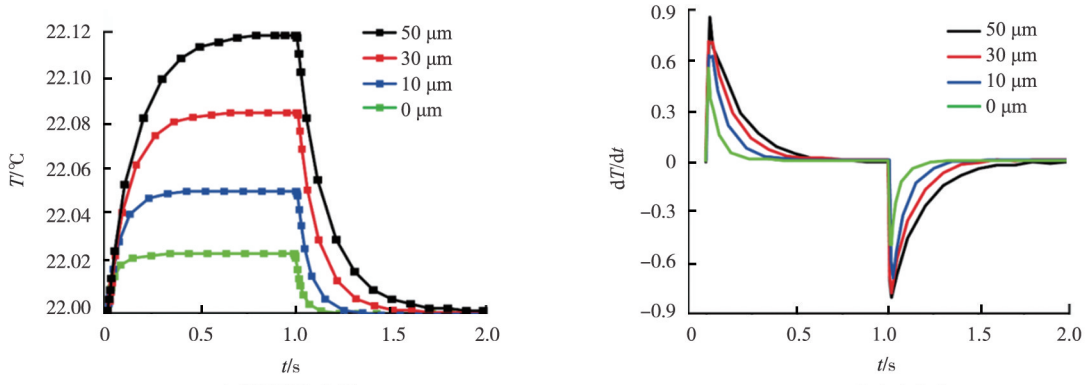


a) 温度变化曲线　　b) 温度变化率

图 8　不同厚度 $LiTaO_3$ 薄膜的温度变化曲线

Fig. 8　Temperature change curves of $LiTaO_3$ films with different thickness

为了探究绝热层厚度对响应速率 dT/dt 的影响，将热释电层厚度设置为 1 μm，分别对绝热层厚度为 0，10，30 和 50 μm 的模型进行热分析，结果对比如图 9 所示。从图 9 a)可以看出：当绝热层厚度为 50 μm 时，探测单元的温升最大，最高温度为 22.12 ℃；当绝热层厚度为 0 μm，探测单元的最高温度为 22.026 ℃。这表明绝热层可以有效阻止衬底的热损耗，探测单元的温升随着绝热层厚度的增加而增大。从图 9 b)可以看出：绝热层越厚，温度变化率越高；dT/dt 越大，表明电流响应越大，探测器的灵敏性越高。所以，可以采用较厚的绝热层来阻止热量的流失，从而提高器件的探测率。

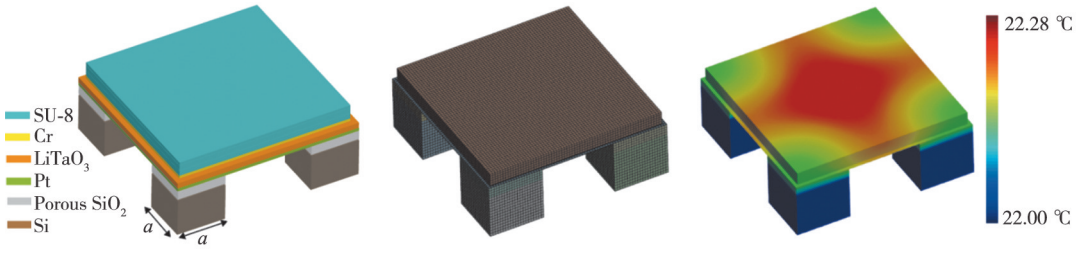


a) 温度变化曲线　　b) 温度变化率

图 9　不同厚度绝热层的温度变化曲线

Fig. 9　Temperature variation curve of insulation layer with different thickness

器件的热损耗主要是经过衬底的热传导损耗。从结构热学性能角度来说，降低衬底的热传导导致的损耗，就需要减少衬底与敏感层的接触面积。因此，将空心管状衬底结构进行优化，将管状衬底设计为凳型结构，如图 10 a)所示。基于上述的分析结果，将钽酸锂热释电层的厚度设置为 1 μm，多孔二氧化硅绝热层的厚度设置为 50 μm。衬底为 4 个相同的矩形柱，边长 $a=300$ μm，厚度设置为 200 μm。对模型加载周期 4 s 的热流密度为 100 pW/μm^2 的稳恒热流。将衬底底面的背景温度设置为 22.00 ℃，对探测器进行瞬态热分析。凳型探测器的网格模型以及温升云图如图 10 b)、图 10 c)所示。



a) 结构模型　　b) 网格模型　　c) 温升云图

图 10　凳型探测器结构模型及温升云图

Fig. 10　Structure model of bench detector and temperature rise cloud image

图 11 示出了凳型探测器的温度变化曲线。从图 11 a)可知：探测单元从 0.01 s 开始升温，在 1.5 s 时达到热平衡态；热释电层的最高温度为 22.25 ℃，热时间常数为 0.29 s；探测单元整体从 $t_1=0.01$ s 开始升温，在 $t_2=1.5$ s 时达到热平衡态，达到热平衡所用时间为 1.49 s。图 11 b)为热释电层温度变化率曲线：初始时刻温度变化率最大；随着温度的上升，温度变化率逐渐减小并趋于 0。因为热释电探测器工作在非平衡态会产生热释电电流，所以为了使热释电探测器输出连续的电信号，需要控制热流脉冲的脉冲持续时间。一般情况下脉冲持续时间需要介于热时间常数和热平衡时间之间，这样就可以保证在温升-温降过程形成连续的交流电输出。

$$I_S=pA\frac{dT}{dt}, \tag{5}$$

式中：A 为接触面积；p 为热释电材料的热释电系数。在 p 和 A 不变的条件下，响应电流的大小与 dT/dt 成正比。dT/dt 越大，探测器的响应电流就越大，电流响应率就越高，探测器的灵敏性越好。凳型热释电探测器在给定条件下，其平均热释电电流输出为 31.52 pA。

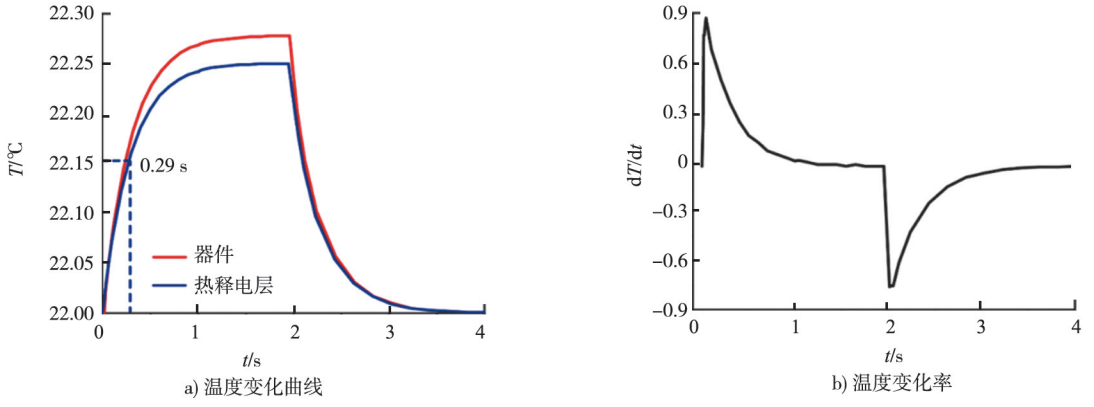


图 11 凳型探测器温度变化曲线

Fig. 11 Temperature curve of the stool-type detector

表 3 对比了 2 种结构的热仿真结果。从仿真结果可以看出，凳型结构相较于管状结构在温升、温度变化率和热释电电流 3 个方面都有显著的改善。这表明，使衬底悬空是降低探测器热传导损耗的有效途径。同时，最大温升的提高会导致热时间常数相应的增加。由于热释电探测器工作在非平衡态，在热平衡态时没有信号输出，因此，热时间常数的增加相当于在温升与温降过程中输出交流电信号的持续时间得到了增加。在表 4 中，根据吸波效果与文献[25,27-28]中的探测器进行了比较，结果表明本文结构在吸收效率和频带范围方面有明显的改善。

表 3 不同结构热仿真结果对比

Tab. 3 Comparison of thermal simulation results of different structures

结构	温升/℃	dT/dt	热释电电流/pA
管状结构	0.120	0.862	28.37
凳型结构	0.250	0.880	31.52

表 4 不同吸波结构效果对比

Tab. 4 Comparison of the effect of different absorbing structures

结构	频带范围	吸收效率/%	材料	结构
文献[25]	98 GHz	80.0	Au	单层
文献[27]	1.643～1.702 THz	99.0	Au	单层
文献[28]	1.0 THz	99.7	Au,Bi	单层
本文方法	0.1～10 THz	90.0	Cr,SU-8	双层

4 结 语

将超表面吸波器引入到太赫兹探测器的设计中，并利用热释电材料将吸收的太赫兹波转换成可检测的电信号，实现了高效宽带的太赫兹探测，为设计和优化宽带太赫兹探测器提供了重要参考，主要结论如下。

1)吸波结构通过使用 MATLAB 与电磁场仿真软件 CST 联合仿真进行优化，基于严格的电磁仿真和遗传算法，可以实现高可靠性的自动和逆向设计。

2)基于双超表面的宽带太赫兹热释电探测器，提高了 0.1～10 THz 频段的太赫兹波探测性能，吸收结构在全 THz 频段的平均吸收率超过了 90.0%。引入双超表面吸收器使得探测器在整个 THz 频段具有连续且高效的吸波特性。

3)仿真分析敏感层、绝热层等特征参数对太赫兹热释电探测器温度变化率以及响应电流的关系，表明敏感层越薄，温升越高，温度变化率越大，电流响应越大；绝热层越厚，温度变化率越高，电流响应越大，探测器的灵敏性越高；凳型热释电探测器的平均热释电电流输出为 31.52 pA。

4)对比不同结构的模拟结果，衬底悬空是减小探测器热传导损耗的有效途径。

本文提出的设计方法仅通过仿真结果进行了验证，尚未进行实验验证。未来拟开展器件制备和性能表征研究，进一步改进高效率、大带宽太赫兹探测器的设计。

参考文献/References：

[1] BERUETE M，JÁUREGUI-LÓPEZ I. Terahertz sensing based on metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials，2020，8(3). DOI：10.1002/adom.201900721.

[2] CHEN Houtong，KERSTING R，CHO G C，et al. Terahertz imaging with nanometer resolution[J]. Applied Physics Letters，2003，83(15)：3009-3011.

[3] ZHOU Ruiyun，WANG Chen，XU Wendao，et al. Biological applications of terahertz technology based on nanomaterials and nanostructures[J]. Nanoscale，2019，11(8)：3445-3457.

[4] YANG Wei，LIN Yusheng. Tunable metamaterial filter for optical communication in the terahertz frequency range[J]. Optics Express，2020，28(12)：17620-17629.

[5] ALVES F，GRBOVIC D，KEARNEY B，et al. Microelectromechanical systems bi-material terahertz sensor with integrated metamaterial absorber[J]. Optics Letters，2012，37(11)：1886-1888.

[6] HUANG Zhiming，ZHOU Wei，TONG Jinchao，et al. Extreme sensitivity of room-temperature photoelectric effect for terahertz detection[J]. Advanced Materials，2016，28(1)：112-117.

[7] PORTNOI M E，KIBIS O V，ROSENAU da COSTA M. Terahertz applications of carbon nanotubes[J]. Superlattices and Microstructures，2008，43(5/6)：399-407.

[8] THOMAN A，KERN A，HELM H，et al. Nanostructured gold films as broadband terahertz antireflection coatings[J]. Physical Review B，2008，77. DOI：10.1103/PhysRevB.77.195405.

[9] LANDY N I，SAJUYIGBE S，MOCK J J，et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters，2008，100(20). DOI：10.1103/PhysRevLett.100.207402.

[10] SONG Zhengyong，ZHANG Jiahe. Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies[J]. Optics Express，2020，28(8)：12487-12497.

[11] DEIBEL J A，ESCARRA M，BERNDSEN N，et al. Finite-element method simulations of guided wave phenomena at terahertz frequencies[J]. Proceedings of the IEEE，2007，95(8)：1624-1640.

[12] ZHANG Ming，MA Xiaoliang，PU Mingbo，et al. Large-area and low-cost nanoslit-based flexible metasurfaces for multispectral electromagnetic wave manipulation[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications，2019，7(23). DOI：10.1002/adom.201900657.

[13] PU Mingbo，GUO Yinghui，LI Xiong，et al. Revisitation of extraordinary young's interference：From catenary optical fields to spin-orbit interaction in metasurfaces[J]. ACS Photonics，2018，5(8)：3198-3204.

[14] PU Mingbo，GUO Yinghui，MA Xiaoliang，et al. Methodologies for on-demand dispersion engineering of waves in metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials，2019，7(14). DOI：10.1002/adom.201801376.

[15] ZHANG Ming，ZHANG Najiao，ZHANG Junyao，et al. Automatic and inverse design of broadband terahertz absorber based on optimization of genetic algorithm for dual metasurfaces[J]. Optics Express，2022，30(13)：22974-22985.

[16] MITROFANOV O，SIDAY T，THOMPSON R J，et al. Efficient photoconductive terahertz detector with all-dielectric optical metasurface[J]. APL Photonics，2018，3(5). DOI：10.1063/1.5011420.

[17] 黄文超，张凯旋，李云霞，等. 基于二维碲烯的太赫兹光电探测器[J]. 红外与毫米波学报，2022，41(4)：721-725.
HUANG Wenchao，ZHANG Kaixuan，LI Yunxia，et al. Terahertz photodetector based on two-dimensional tellurene[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves，2022，41(4)：721-725.

[18] 王杨涛，景蔚萱，韩枫，等. 圆环孔阵列超材料对热释电太赫兹探测器性能影响关系研究[J]. 物理学报，2023，72(4)：321-330.
WANG Yangtao，JING Weixuan，HAN Feng，et al. Study on influence of ring hole array metamaterial on performance of pyroelectric terahertz detectors[J]. Acta Physica Sinica，2023，72(4)：321-330.

[19] MÜLLER R，GUTSCHWAGER B，HOLLANDT J，et al. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz[J]. Journal of Infrared，Millimeter and Terahertz Waves，2015，36(7)：654-661.

[20] LIANG Zhiqing，LIU Ziji，JIANG Yadong，et al. High responsivity of terahertz detector based on ultra-thin $LiTaO_3$ crystal material[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves，2016，35(5)：520-524.

[21] ZHOU Libing，HE Yaoyi，ZHANG Qing. Carbon dioxide sensor module based on NDIR technology[J]. Micromachines，2021，12(7). DOI：10.3390/mi12070845.

[22] HE Hongying，LU Xin，HANC E，et al. Advances in lead-free pyroelectric materials：A comprehensive review[J]. Journal of Materials Chemistry C，2020，8(5)：1494-1516.

[23] WANG Jun，GOU Jun，LI Weizhi. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film[J]. AIP Advances，2014，4(2). DOI：10.1063/1.4865097.

[24] ZHANG Kaisheng，LUO Wenbo，ZENG Xiaohan，et al. Integration and characterization of $LiTaO_3$ single crystal film pyroelectric sensor using mid-infrared metamaterial perfect absorber[J]. IEEE Sensors Journal，2022，22(11)：10381-10387.

[25] FAN Kebin，STENGER V，PADILLA W J. Pyroelectric metamaterial millimeter-wave detector[J]. Applied Physics Letters，2022，121(2). DOI：10.1063/5.0094201.

[26] 匡秀娟，钱益心. 基于 ANSYS 热仿真的通风孔模型简化合理性分析[J]. 机电元件，2022，42(5)：41-43.

[27] TANTIWANICHAPAN K，DURMAZ H. Improvement of response time and heat-transfer capacity of metamaterial absorber for terahertz detector applications[J]. IEEE Sensors Journal，2023，23(5)：4700-4706.

[28] BAI Jinjun，PANG Ziqian，SHEN Pengyan，et al. A terahertz photo-thermoelectric detector based on metamaterial absorber[J]. Optics Communications，2021，497. DOI：10.1016/j.optcom.2021.127184.