

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*

王杨涛 景蔚萱[†] 韩枫 孟庆之 林启敬 赵立波 蒋庄德

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2022年6月13日收到; 2022年11月20日收到修改稿)

本文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, 以提高 0.1—1 THz 频段太赫兹波探测性能. 仿真分析了内外径、周期、厚度等特征参数对圆环孔阵列超材料太赫兹波透射带宽及透射率的定量影响关系, 阐明了圆环孔阵列超材料与热释电探测器的不同结合方式对探测器的带宽及噪声等效功率的作用机理; 制备了两种圆环孔阵列超材料钽酸锂热释电太赫兹探测器; 测试了圆环孔阵列超材料的透射特性和两类热释电探测器的噪声等效功率. 结果表明, 所制备的圆环孔阵列超材料在 0.25—0.65 THz 频段透射率大于 40%, 实现了带通滤波. 当圆环孔阵列超材料与热释电探测器保持足够间距时, 在 0.315 THz 点频其噪声等效功率为 $11.29 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 是带通波段外 0.1 THz 噪声等效功率的 6.3%, 实现了带通探测; 当圆环孔阵列超材料与热释电探测器贴合时, 在 0.315 THz 点频其噪声等效功率为 $4.64 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 是无圆环孔阵列超材料探测器噪声等效功率的 29.4%, 实现了窄带探测. 上述结论可用于生物成像、大分子探测等领域中特定太赫兹波段的带通与窄带探测.

关键词: 太赫兹, 热释电探测器, 圆环孔阵列超材料, 探测带宽

PACS: 87.50.U-, 77.70.+a, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.72.20221174

1 引言

热释电太赫兹探测器具有体积小、价格低、宽频带响应、易阵列化等优势^[1-4], 常被应用于生物成像^[5]、大分子测量^[6]、无损检测^[7]等领域. 一般地, 热释电太赫兹探测器主要由吸收层、上电极、介质层、下电极和绝热层组成, 其探测机理为吸收层将太赫兹波转化为热能, 该热能经由上电极传导至介质层, 从而产生热释电效应, 实现电学量的读出. 吸收层热吸收效率、上电极和绝热层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^[8-10]. 吸收层(如碳纳米管、石墨烯等)主要用于吸收电磁波并转化为热能, 可调控探测器的探测带

宽. 现有热释电太赫兹探测器的吸收层对红外和高频太赫兹波吸收率高, 但对低频太赫兹波 (<1 THz) 的吸收率较差^[11,12]. 超材料是一种人工设计的周期阵列结构^[13], 可通过改变超材料的形状、几何尺寸及表面形貌等参量实现太赫兹波透射^[14]、吸收^[15]、衍射^[16]、偏振^[17]等电磁特性的调控. 因此, 将超材料引入热释电探测器来调控太赫兹波的吸收带宽与吸收率, 可进一步提升超材料热释电探测器的探测性能.

目前超材料热释电探测器的研究主要聚焦于探索超材料与探测器的结合方式, 以提升太赫兹波吸收率或抑制环境噪声, 进而提高超材料探测器的探测性能. 2016年, Kuznetsov等^[18]将超薄方形窄带超材料吸收器贴合在商用红外热释电探测器上

* 国家自然科学基金(批准号: 51975466)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wxjing@mail.xjtu.edu.cn

电极, 实验验证了其对 0.13—0.15 THz 太赫兹波的吸收增强. 2019 年, Liu 等^[19] 将纳米结构金属膜涂在探测器吸收层上, 通过抑制噪声来提升信噪比, 实现了热释电探测器在太赫兹波段的高灵敏探测. 2020 年, Zhang 等^[8] 设计了十字形波长选择红外探测器, 通过将十字阵列超材料沉积到热释电探测器上电极, 实现了 100 THz 红外波的选择探测. 2022 年, Zhang 等^[20] 在钽酸锂单晶薄膜上沉积 Au/SiO₂/Au 超材料完美吸收体结构, 制备了在 80.3 THz 波长选择探测的红外热释电传感器. 从已发表的相关研究成果中可知^[18,20–23], 超材料热释电探测器的研究主要集中于红外和深红外波段, 对 0.1—1 THz 低频太赫兹波段的研究较少, 且结合方式主要为超材料与吸收层(或上电极)直接贴合, 缺乏超材料与探测器之间作用机理的系统性阐述, 难以精确调控太赫兹波探测带宽与降低噪声等效功率.

为精确调控探测带宽与提升探测器性能, 本文提出了两种基于圆环孔阵列超材料的钽酸锂热释电太赫兹探测器. 采用高频电磁仿真软件明确了圆环孔阵列超材料的透射特性及其与热释电探测器不同结合方式下的探测性能影响关系; 利用微纳分体加工工艺, 研制了基于圆环孔阵列超材料和钽酸锂热释电太赫兹探测器的两种超材料热释电太赫兹探测器; 在圆环孔阵列超材料不同结合方式下, 测试了探测器在 0.1 THz 和 0.315 THz 点频对应的噪声等效功率, 实现了圆环孔阵列超材料热释电太赫兹探测器的带通与窄带探测.

2 实验部分

2.1 理论分析

热释电太赫兹探测器的探测机理为吸收层将一定功率的太赫兹波吸收并转化为热能, 该热能经由金上电极传导至介质层(由热平衡方程描述), 使介质层产生热释电效应(用热释电方程表征), 并通过放大电路实现电压读出. 当本底噪声为 V_N 时, 通过热平衡方程和热释电方程^[24], 可得到热释电太赫兹探测器的噪声等效功率 (noise equivalent power, NEP) 如 (1) 式所示:

$$\text{NEP} = \frac{V_N}{\alpha} \frac{G_T \sqrt{1 + (\omega\tau_T)^2}}{p\omega K(\omega)}, \quad (1)$$

其中, α 为探测器太赫兹波吸收率, G_T 为介质层热导, ω 为斩波频率, τ_T 为热时间常数, p 为热释电系数, $K(\omega)$ 为电路放大系数.

由 (1) 式可知太赫兹波吸收率 α 是影响探测器噪声等效功率的重要因素. 超材料是人工设计的周期性结构, 可通过结构形状和特征尺寸参数调控其在太赫兹波段的透射率 β . 将超材料引入热释电太赫兹探测器, 超材料和吸收层的共同作用可调控超材料探测器对太赫兹波的吸收率 α , 并进一步改进探测器的性能.

当超材料与热释电太赫兹探测器保持足够距离 (>100 倍入射波长) 时, 由于近电场作用距离限制, 两者之间不发生近电场耦合^[25]. 太赫兹波先透过超材料, 再经由热释电太赫兹探测器吸收转化为热能. 可设计带通滤波超材料, 组合形成带通超材料探测器. 根据 (1) 式可得到带通超材料探测器的 NEP 为

$$\text{NEP} = \frac{V_N}{\alpha_{\text{CNTs}}\beta} \frac{G_T \sqrt{1 + (\omega\tau_T)^2}}{p\omega K(\omega)}, \quad (2)$$

其中, β 为超材料的透射率, α_{CNTs} 为热释电太赫兹探测器碳纳米管吸收层的吸收率. 由 (2) 式可知, 超材料的透射率 β 是影响带通超材料探测器 NEP 的关键因素, 可通过调控其透射带宽与透射率来改善探测器的探测带宽与 NEP.

当超材料与热释电太赫兹探测器保持贴合时, 超材料、碳纳米管吸收层和金上电极可组成金属-介质-金属型窄带太赫兹吸收器^[26], 使得超材料探测器对太赫兹波的吸收率变为 α' , 实现太赫兹波窄带高效吸收, 进而得到窄带超材料探测器. 根据 (1) 式可得到窄带超材料探测器的 NEP 为

$$\text{NEP} = \frac{V_N}{\alpha'} \frac{G_T \sqrt{1 + (\omega\tau_T)^2}}{p\omega K(\omega)}, \quad (3)$$

由 (3) 式可知, 窄带超材料探测器对太赫兹波的吸收率 α' 是决定其探测带宽和 NEP 的关键因素.

2.2 结构设计

为实现太赫兹波的带通滤过, 设计具有圆环孔阵列结构的超材料, 如图 1 所示. 圆环孔阵列在 x 与 y 平面的阵列周期相同, 均为 $P = 200 \mu\text{m}$, 阵列单元的内径 $r = 70 \mu\text{m}$, 外径 $R = 90 \mu\text{m}$. 选择

厚度 $T = 170 \mu\text{m}$ 的光学石英作为基底, 在此基底上蒸镀金圆环孔阵列超材料. 其中, 金膜厚度 $t = 200 \text{ nm}$, 保证金膜厚度大于其太赫兹波趋肤深度^[27].

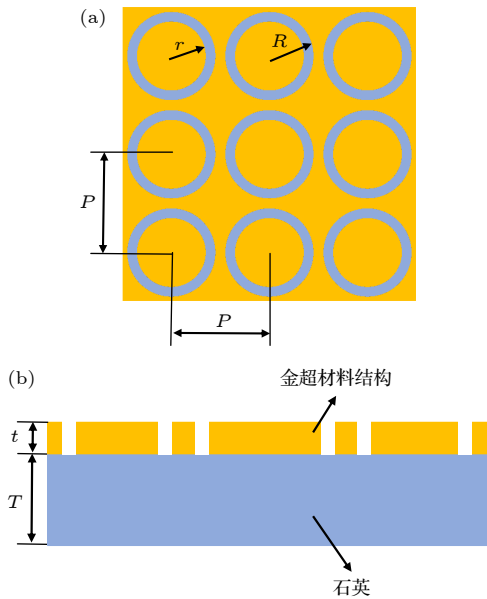


图 1 圆环孔阵列超材料结构设计图 (a) 俯视图; (b) 左视图
Fig. 1. Diagram of an Au ring hole array metamaterial structure: (a) Top view; (b) left view.

将圆环孔阵列超材料引入热释电太赫兹探测器, 得到基于圆环孔阵列超材料的热释电太赫兹探测器. 图 2(a) 为保持一定距离的圆环孔阵列超材料与热释电太赫兹探测器. 当两者距离大于 100 倍太赫兹入射波长时, 圆环孔阵列超材料仅发挥自身的带通滤波特性, 形成带通超材料探测器. 图 2(b) 为超材料贴合下的热释电太赫兹探测器, 结构从上到下依次为: 金超材料结构、石英、碳纳米管吸收层、金上电极、钽酸锂介质层、金下电极、氧化硅绝热层、硅基底

热层和硅基底. 其中, 金超材料结构、石英、碳纳米管吸收层和金上电极组成了窄带太赫兹吸收器, 可实现太赫兹波的窄带耦合吸收, 进而成为窄带超材料探测器.

2.3 仿真计算

当圆环孔阵列超材料与热释电太赫兹探测器保持足够距离时, 由 (2) 式可知圆环孔阵列超材料的透射率是影响超材料探测器 NEP 的重要因素, 采用高频电磁仿真软件 (high frequency structure simulator, HFSS) 仿真其在垂直入射太赫兹波下的透射特性. 金的电磁特性在太赫兹波段遵循 Drude 模型, 在仿真中采用完美电导体代替计算^[24,28]. 在太赫兹波辐射下, 圆环孔阵列超材料主要实现带通滤波功能^[29]. 仿真建立圆环孔内径 r 、圆环孔外径 R 、阵列周期 P 和石英基底厚度 T 对圆环孔阵列超材料透射性能的影响关系, 优化上述特征参数以实现圆环孔阵列超材料在 0.25—0.65 THz 频段的带通滤波.

当圆环孔阵列超材料与热释电太赫兹探测器贴合时, 由 (3) 式可知窄带超材料探测器的吸收率是决定超材料探测器 NEP 的重要因素, 需要仿真研究窄带超材料探测器在不同频率下的吸收特性, 计算得到吸收峰对应的窄带频点. 本文采用的多壁碳纳米管吸收层直径为 20—30 nm, 长度为 10—20 μm , 厚度为 1—2 μm . 根据 30° 入射角下碳纳米管薄膜吸收率实验数据, 并结合文献设置碳纳米管薄膜的电学参数 (吸收层相对介电常数为 20, 相对磁导率为 8, 介电损耗正切为 0.4), 进一步仿真垂直入射太赫兹波下窄带超材料探测器的吸收特性^[30,31].

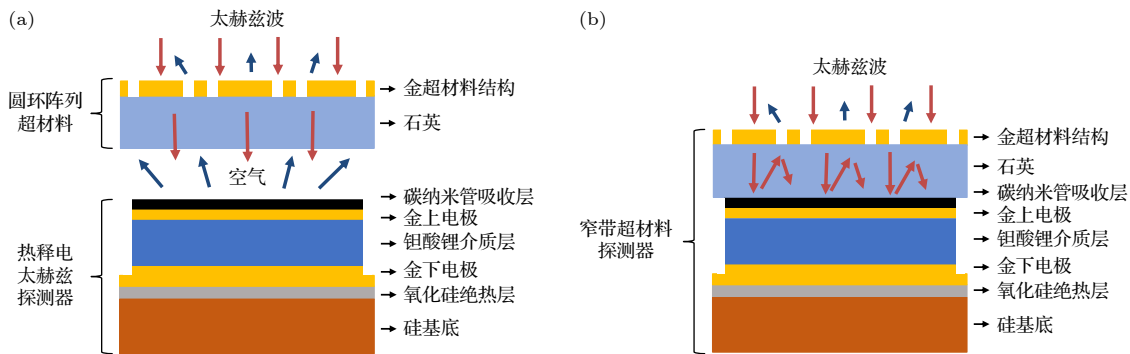


图 2 不同结合方式的圆环孔阵列超材料热释电太赫兹探测器原理图 (a) 带通超材料探测器; (b) 窄带超材料探测器
Fig. 2. Schematic diagram of ring hole array metamaterial pyroelectric terahertz detectors with different combinations: (a) Band-pass metamaterial detector; (b) narrowband metamaterial detector.

2.4 器件制备

图 3(a) 所示为圆环孔阵列超材料热释电太赫兹探测器的微机电系统 (micro electro mechanical system, MEMS) 制备工艺流程. 在探测器加工过程中, 光刻与旋涂、刻蚀等工艺存在相互干扰, 本实验中采用分体加工再键合的工艺进行超材料探测器的制备. 具体工艺流程包括: 1) 采用光刻、蒸镀、剥离等工艺在 170 μm 厚的石英基底上制备了 200 nm 厚的圆环孔阵列超材料结构. 2) 在 100 μm 厚的钽酸锂介质层上下表面均蒸镀 200 nm 厚的金电极, 并在上电极旋涂 1.5 μm 厚的碳纳米管吸收层, 用以制备探测部件. 3) 在 500 μm 厚的硅片上生长 500 nm 厚的氧化硅膜, 并在其表面蒸镀 200 nm 厚的金膜形成绝热部件, 且绝热部件的尺寸比探测部件的边缘大 1 mm, 便于下电极引线. 4) 将探测部件与绝热部件键合, 制备得到热释电太赫兹探测器. 对圆环孔阵列超材料与热释电太赫兹探测器采用分离和贴合的两种结合方式, 分别制

备带通超材料探测器和窄带超材料探测器, 如图 3 所示.

2.5 性能测试

如图 4(a) 所示, 采用太赫兹时域光谱仪 (Advantest TAS7500 TS) 测试圆环孔阵列超材料的透射率, 并将测试结果与 HFSS 仿真结果对比. 采用太赫兹时域光谱仪测试 30° 入射角下的碳纳米管薄膜吸收率, 便于仿真计算中碳纳米管电学参数的选择. 为降低斩波器对探测器噪声电压的干扰, 搭建了反射式测试光路. 如图 4(b) 所示, 0.1 THz 和 0.315 THz 商用太赫兹源发射太赫兹波信号, 经由光阑、斩波器、离轴抛物面镜到达待测探测器, 由探测器响应并转化为电信号输出. 在 5 Hz 斩波频率下, 记录热释电太赫兹探测器、带通超材料探测器和窄带超材料探测器的本底噪声 V_N 与响应电压 V_R , 计算探测器在不同频点的噪声等效功率.

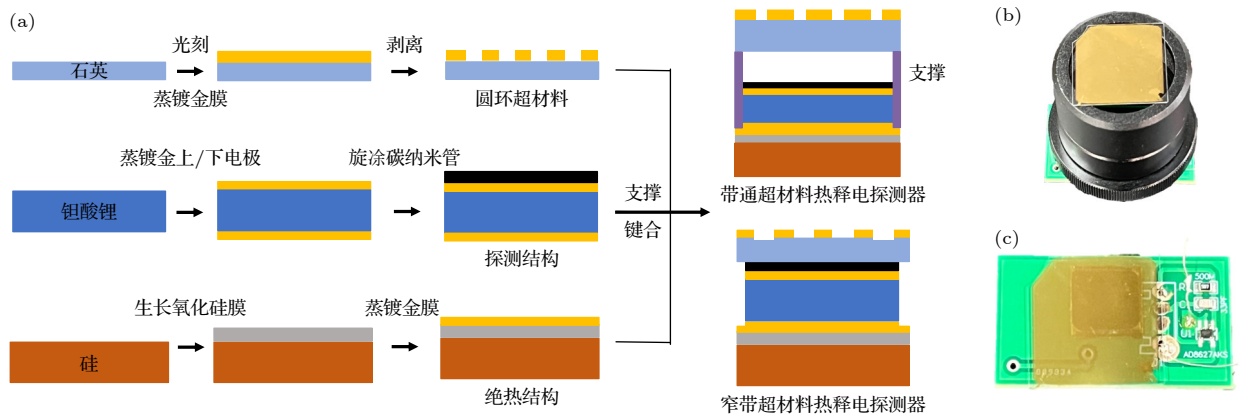


图 3 圆环孔阵列超材料热释电太赫兹探测器的制备 (a) 制备工艺流程图; (b) 带通超材料探测器; (c) 窄带超材料探测器
Fig. 3. Fabrication of ring hole array metamaterial pyroelectric terahertz detector: (a) Fabrication process flow chart; (b) bandpass metamaterial detector; (c) narrowband metamaterial detector.

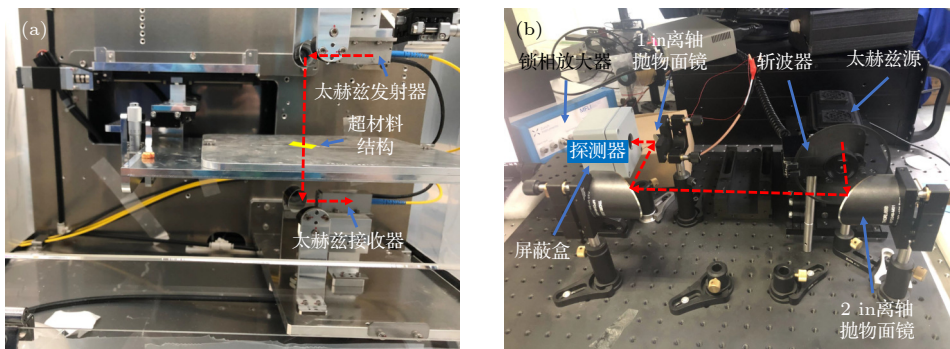


图 4 实验测试示意图 (a) 太赫兹时域光谱仪 Advantest TAS7500TS 实验测量示意图; (b) 频域反射式测试光路示意图
Fig. 4. Schematic diagram of test: (a) Experimental measurement of terahertz time-domain spectrometer Advantest TAS7500 TS; (b) frequency domain reflectometry test system.

3 结果与讨论

3.1 圆环孔阵列超材料带通滤波的影响研究

分别改变圆环孔阵列超材料的内径 r 、外径 R 、阵列周期 P 和基底厚度 T , 采用 HFSS 仿真计算得到不同特征参数下圆环孔阵列超材料的透射特性, 如图 5 所示. 从图 5 可以发现, 随着内径 r 增大, 透射峰频率逐渐红移, 且低频段透射峰从双峰透射变成三峰透射, 因此内径尺寸 r 可以显著调节圆环孔阵列超材料的透射带宽和透射峰频率; 随外径 R 增大, 圆环孔阵列超材料透射率不断增大, 透射峰频率轻微红移, 因此选择更大的外径更为合理; 随着阵列周期 P 增加, 太赫兹波诱导激发出局域型表面等离子体对应的透射峰 2 频率在 0.45 THz 保持不变, 激发出传播型表面等离子体对应的透射峰 1 和 3 频率向透射峰 2 移动, 导致透射带宽减小, 实现了特定透射峰频点下的带宽调节^[29]. 此外, 透射峰频率随基底厚度 T 的增大改变不明显, 且透射波形未发生改变, 因此基底厚度 T 仅可微调带通滤波性能. 为实现圆环孔阵列超材料在 0.25—0.65 THz 频段的带通滤波 (尤其抑制

0.25 THz 以下), 且考虑超材料与吸收层、金上电极的耦合作用, 本文设计圆环孔阵列超材料的特征参数为 $r = 70 \mu\text{m}$, $R = 90 \mu\text{m}$, $P = 200 \mu\text{m}$, $T = 170 \mu\text{m}$.

3.2 基于圆环孔阵列超材料的热释电太赫兹探测器探测性能研究

3.2.1 带通超材料探测器的探测性能研究

将圆环孔阵列超材料置于反射式测试光路中, 保持其与热释电探测器间距为 30 mm, 进行带通超材料探测器的性能测试. 为明确带通超材料探测器的探测机理, 首先对圆环孔阵列超材料的带通滤波特性进行研究, 得到圆环孔阵列超材料的时域光谱透射率实验结果和 HFSS 仿真结果如图 6(a) 所示. 从仿真结果可知: 圆环孔阵列超材料在 0.1 THz 的透射率为 16%, 在 0.25—0.65 THz 的透射率均大于 50%, 特别是 0.45 THz 的透射率接近 100%, 实现了 0.25—0.65 THz 的带通滤波. 从太赫兹时域光谱实验测试结果可知: 圆环孔阵列超材料在 0.1 THz 的透射率为 3%, 在 0.25—0.65 THz 的透射率大于 40%. 与仿真结果相比, 圆环孔阵列超材料的透射率有所下降, 但带通滤波特性仍然存在且

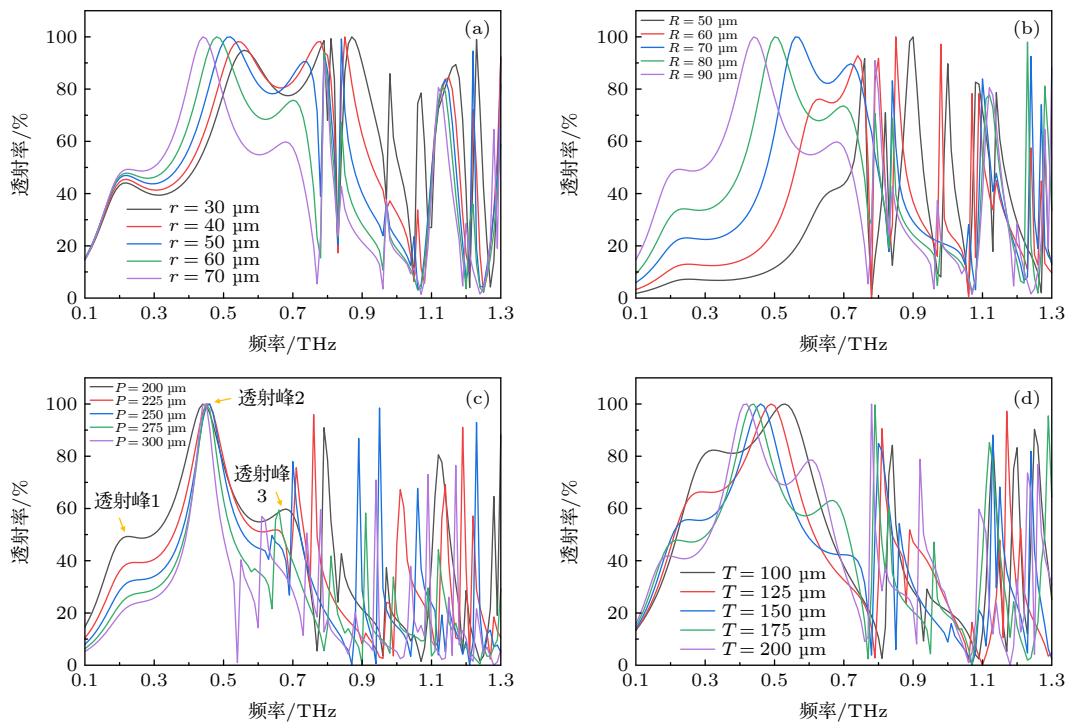


图 5 不同特征参数下圆环孔阵列超材料 HFSS 仿真透射曲线 (a) 内径 r ; (b) 外径 R ; (c) 周期 P ; (d) 基底厚度 T

Fig. 5. HFSS simulation transmission curve of ring hole array metamaterials under different characteristic parameters: (a) Inner diameter; (b) outer diameter; (c) period; (d) the thickness of the substrate.

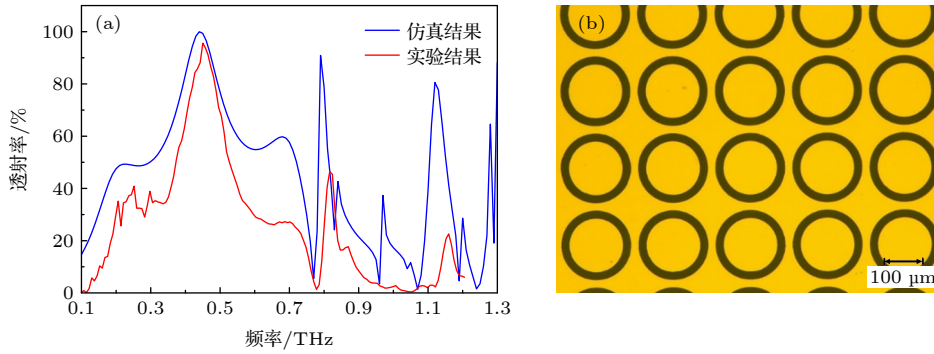


图 6 圆环孔阵列超材料的性能与表征 (a) 0.1—1.3 THz 波段 HFSS 仿真与时域光谱实验的透射率曲线; (b) 圆环孔阵列超材料光学显微图

Fig. 6. Test properties of the ring hole array metamaterial: (a) 0.1–1.3 THz transmission curve; (b) optical micrograph of the ring hole array metamaterial.

表 1 热释电太赫兹探测器和带通超材料探测器在 0.1 THz 和 0.315 THz 频率下性能对比

Table 1. Performance comparison of the pyroelectric terahertz detector and the bandpass metamaterial detector at frequencies of 0.1 THz and 0.315 THz.

探测器类型	0.315 THz			0.1 THz		
	$V_N/\mu\text{V}$	$V_R/\mu\text{V}$	$\text{NEP}/(\mu\text{W}\cdot\text{Hz}^{-0.5})$	$V_N/\mu\text{V}$	$V_R/\mu\text{V}$	$\text{NEP}/(\mu\text{W}\cdot\text{Hz}^{-0.5})$
热释电太赫兹探测器	2.96	220.0	15.80	3.03	220.0	16.17
带通超材料探测器	1.06	110.3	11.29	0.95	6.2	179.94

频段相同, 可用于带通超材料探测器. 此外, 引入的带通滤波圆环孔阵列超材料可以减弱其他频段电磁波的透过, 降低碳纳米管的热吸收响应, 进而减小探测器的噪声电压.

引入的圆环孔阵列超材料可选择透过 0.25—0.65 THz 频段电磁波, 透过的太赫兹波再经过碳纳米管吸收层进行太赫兹波-热能转换, 进而引起介质层的热释电效应产生电荷差. 由 (2) 式可知, 带通超材料探测器对太赫兹波的吸收率可被认为是圆环孔阵列超材料的透射率与碳纳米管吸收层吸收率的乘积, 由于碳纳米管吸收层在 0.1—1 THz 的电磁波均为宽频吸收, 即可通过圆环孔阵列超材料的结构设计实现超材料探测器特定频段带通探测.

为了验证超材料探测器的带通探测特性, 选择带通波段外的 0.1 THz 和带通波段内的 0.315 THz 点频进行带通超材料探测器性能测试. 采用中国计量院标定后的高莱探测器在原位测量入射功率, 并通过入射功率计算待测超材料热释电太赫兹探测器在 0.1 THz 和 0.315 THz 点频的噪声率, 计算公式如下:

$$R_v = \frac{V_R S_e}{P_1 S_0}, \quad (4)$$

$$\text{NEP} = \frac{V_N \sqrt{B_s}}{R_v}, \quad (5)$$

其中, R_v 为待测探测器电压响应度, V_R 为待测探测器响应电压, S_e 为待测探测器有效面积, P_1 为高莱探测器测试功率, S_0 为高莱探测器有效面积, V_N 为待测探测器噪声电压, B_s 为锁相放大器 3 dB 带宽.

通过高莱探测器得到探测器入射功率 $P_1 = 2.22 \text{ mW}$, 高莱盒有效面积 $S_0 = 95.03 \text{ mm}^2$, 待测探测器有效面积为直径 8 mm 的圆, 即 $S_e = 50.27 \text{ mm}^2$, 锁相放大器 3 dB 带宽 $B_s = 1 \text{ Hz}$. 由图 4(b) 频域反射式光路实验测试与 (5) 式 NEP 理论计算, 得热释电太赫兹探测器和带通超材料探测器在 0.1 THz 和 0.315 THz 的探测性能对比 (表 1). 从表 1 可知, 引入的圆环孔阵列超材料抑制了其他波段电磁波透过, 使得探测器的噪声电压大约下降为原来的三分之一, 在响应不变的前提下可提升约三倍信噪比. 与无超材料热释电太赫兹探测器相比, 带通超材料探测器在 0.1 THz 的响应电压降为 $6.2 \mu\text{V}$, 为前者的 2.8%, 在 0.315 THz 的响应电压降为 $110.3 \mu\text{V}$, 为前者的 50.1%, 电压下降比例与图 6(a) 的圆环孔阵列超材料实验测试透射曲线中 0.1 THz 和 0.315 THz 频点透射率基本一致, 实现了带通滤波效果. 圆环孔阵列超材料带

通滤波作用下, 带通超材料探测器在 0.1 THz 带阻频点的噪声等效功率为 $179.94 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 为无超材料热释电太赫兹探测器的 11.1 倍, 隔绝了 0.1 THz 频点的探测; 在 0.315 THz 带通频点的噪声等效功率为 $11.29 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 较无超材料热释电太赫兹探测器下降了 28.5%, 探测率有所提升. 0.25—0.65 THz 频段带通超材料探测器在带通波段外 0.1 THz 的噪声等效功率为带通波段内 0.315 THz 的 15.9 倍 (抑制比大于 10 倍), 实现了带通探测.

3.2.2 窄带超材料探测器探测性能研究

对太赫兹波的吸收特性是决定探测器探测性能的重要因素. 为进一步阐述圆环孔阵列超材料与热释电探测器的不同结合方式对太赫兹波探测带宽及噪声等效功率的影响机理, 进行窄带超材料探测器吸收特性研究. 由 HFSS 软件仿真和太赫兹时域光谱实验, 得到窄带超材料探测器与碳纳米管吸收层吸收率曲线, 如图 7(a) 所示. 从图 7(a) 可以发现, 碳纳米管吸收层对太赫兹波的吸收率随其频率的增大而增大, 与文献 [30,31] 结论一致, 且窄带

超材料探测器在 0.32 THz, 0.52 THz, 0.68 THz, 0.86 THz 和 1.14 THz 时形成了高吸收率的窄带太赫兹波吸收峰. 与碳纳米管吸收层相比, 窄带超材料探测器在特定频率的太赫兹波实现了数倍甚至数十倍的吸收增强, 显著提升了特定太赫兹频率的信号探测灵敏度. 在器件中的金上电极不仅可以传导介质层电荷, 又作为吸收器底层金属板与金圆环孔阵列超材料结构感应产生的电偶极子共振实现相互耦合, 组成了圆环孔阵列 (金)-石英/碳纳米管 (介质)-上电极 (金) 新型窄带太赫兹吸收器, 如图 7(b) 所示. 为进一步探究窄带太赫兹吸收器的作用机理, 仿真石英厚度为 125—250 μm 的圆环孔阵列窄带太赫兹吸收器, 如图 7(c) 所示. 从图 7(d) 可以看出, 随着石英厚度的增大, 存在 2 种类型的吸收峰: 移动频率吸收峰 (峰 1、峰 2), 对应频率随着基底厚度增大出现红移 (频率下降), 主要受介质层干涉理论影响; 固定频率吸收峰 (峰 3), 对应频率不随基底厚度增大而变化, 主要受圆环孔阵列超材料特征参数影响.

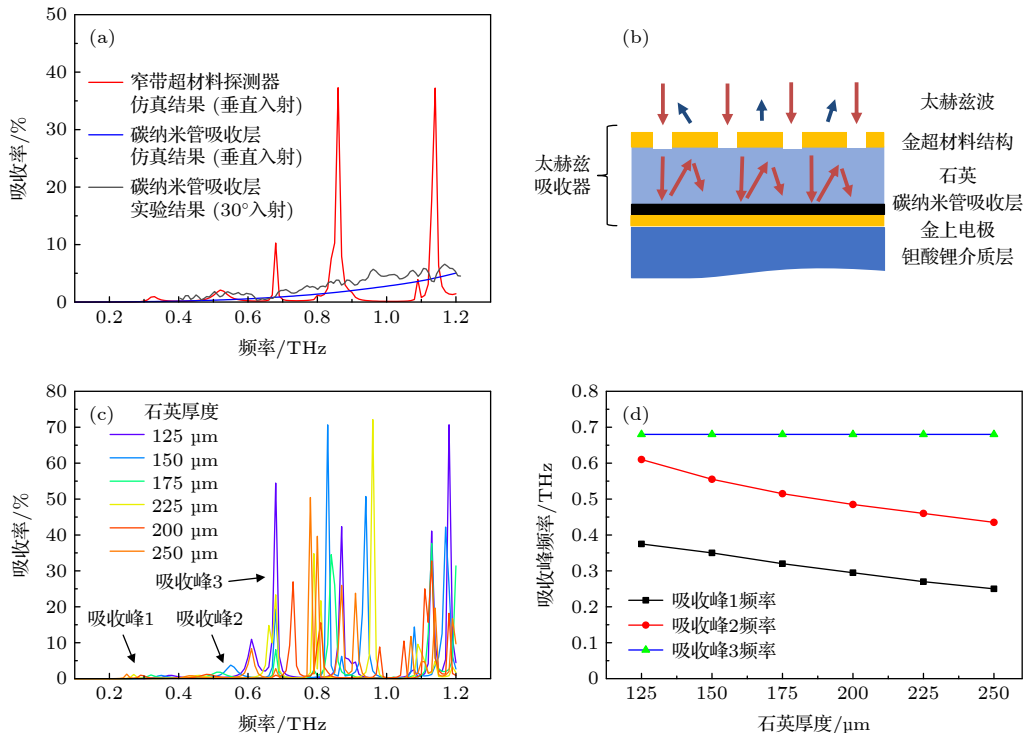


图 7 窄带超材料探测器和碳纳米管吸收特性 (a) 窄带超材料探测器与碳纳米管吸收层的吸收率曲线; (b) 窄带太赫兹吸收器原理图; (c) 125—250 μm 石英厚度下的窄带太赫兹吸收器吸收特性; (d) 吸收峰频率随石英厚度的变化规律

Fig. 7. Narrowband terahertz detector and carbon nanotube absorption properties: (a) Absorption curve of narrowband terahertz detector and carbon nanotube absorber; (b) schematic of the Narrowband terahertz absorber; (c) absorption characteristics of narrowband metamaterial absorber at 125–250 μm quartz thickness; (d) variation of absorption peak frequency with quartz thickness.

表 2 热释电太赫兹探测器和窄带超材料探测器在 0.1 THz 和 0.315 THz 频率下性能对比

Table 2. Performance comparison of the pyroelectric terahertz detector and the narrowband metamaterial detector at frequencies of 0.1 THz and 0.315 THz.

探测器类型	0.315 THz			0.1 THz		
	$V_N/\mu\text{V}$	$V_R/\mu\text{V}$	NEP/ $(\mu\text{W}\cdot\text{Hz}^{-0.5})$	$V_N/\mu\text{V}$	$V_R/\mu\text{V}$	NEP/ $(\mu\text{W}\cdot\text{Hz}^{-0.5})$
热释电太赫兹探测器	2.96	220.0	15.80	3.03	220.0	16.17
窄带超材料探测器	1.03	260.6	4.64	1.02	48.5	24.70

将圆环孔阵列超材料与碳纳米管吸收层紧密贴合并置于反射式测试光路, 进行窄带超材料探测器的性能测试. 采用与表 1 同样的测试方法和计算过程, 得到热释电太赫兹探测器和窄带超材料探测器在 0.1 THz 和 0.315 THz 的探测性能对比 (表 2). 窄带超材料探测器噪声电压大约下降为原来的三分之一, 说明圆环孔阵列超材料探测器反射了其他波段电磁波, 降低了入射信号的噪声. 与无超材料热释电太赫兹探测器相比, 窄带超材料探测器在 0.1 THz 的响应电压下降了 78%, 在 0.315 THz 提升了 18.5%, 与圆环孔阵列超材料在对应点频的透射率完全不同. 该结果与图 7(a) 的窄带超材料探测器吸收曲线相似, 即在 0.1 THz 的吸收率较低, 在 0.315 THz 的吸收率大于碳纳米管吸收层, 这是由窄带太赫兹吸收器对太赫兹波的窄带吸收增强导致的. 圆环孔阵列超材料贴合热释电太赫兹探测器实现窄带吸收作用下, 窄带超材料探测器在 0.315 THz 吸收频点的噪声等效功率为 $4.64 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 较无超材料热释电太赫兹探测器下降了 70.6%, 探测性能提升了 3.5 倍, 实现了窄带高效探测.

4 结 论

本文对新型圆环孔阵列超材料热释电太赫兹探测器进行了仿真、制备与性能测试. HFSS 仿真分析结果显示, 随着内径增大, 太赫兹波的透射峰频率和透射带宽均减小; 阵列周期增加时, 其透射带宽减小, 透射峰频率不变; 内径 $70 \mu\text{m}$ 、外径 $90 \mu\text{m}$ 、阵列周期 $200 \mu\text{m}$ 和基底厚度 $170 \mu\text{m}$ 的圆环孔阵列超材料可实现 0.25—0.65 THz 频段的带通滤波, 透射率超过 50%. 调节圆环孔阵列超材料与热释电探测器的结合方式, 基于微纳工艺制备了两种超材料热释电探测器, 进行时域光谱系统与频域光学系统测试. 测试结果表明, 圆环孔阵列超材料在 0.25—0.65 THz 频段的透射率大于 40%, 与仿真结果基本一致; 当圆环孔阵列超材料与热释电探测

器保持足够间距时, 圆环孔阵列超材料对太赫兹波实现带通滤波, 滤波后的太赫兹波被碳纳米管吸收层吸收, 超材料探测器在 0.315 THz 时的噪声等效功率为 $11.29 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 为带通波段外 0.1 THz 的 6.3%, 探测率比值与对应频点圆环孔阵列超材料透射率比值一致, 实现了带通探测; 当圆环孔阵列超材料与热释电探测器贴合时, 圆环孔阵列超材料与碳纳米管吸收层、金上电极组成了窄带太赫兹吸收器, 其在 0.32 THz, 0.52 THz 等频点的太赫兹波吸收率显著提升, 进而使得新型圆环孔阵列超材料热释电探测器在 0.315 THz 的噪声等效功率较原探测器从 $15.80 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$ 降低到了 $4.64 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, 实现了窄带高效探测. 此研究通过调整圆环孔阵列超材料特征参数及其与热释电探测器的结合方式, 实现了高灵敏度带通和窄带探测, 可应用于生物成像、大分子识别等领域的太赫兹信号探测.

参考文献

- [1] Lewis R 2019 *J. Phys. D Appl. Phys.* **52** 433001
- [2] Liang Z Q, Liu Z J, Wang T, Jiang Y D, Zheng X, Huang Z H, Wu X F 2015 *40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* Hongkong, China, August 23–28, 2015 p1
- [3] Ding S H, Qi L, Li Y D, Wang Q 2011 *Opt. Lett.* **36** 1993
- [4] Grant J, Escorcía-Carranza I, Li C, McCrindle I J, Gough J, Cumming D R 2013 *Laser Photonics Rev.* **7** 1043
- [5] Kolenov I, Nesterov P, Nesterov I, Lukash A, Bezborodov V, Mizrakhly S 2020 *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)* Kharkiv, Ukraine, September 21–25, 2020 p866
- [6] Liu W, Zhao P G, Wu C S, Liu C H, Yang J B, Zheng L 2019 *Food Chem.* **293** 213
- [7] Yu H T, Anthony J F, Vincent P W 2020 *Sensors* **20** 712
- [8] Zhang K S, Luo W B, Huang S T, Bai X Y, Shuai Y, Zhao Y, Zeng X Q, Wu C G, Zhao Y, Zeng X Q, Wu C Q, Zhang W 2020 *Sensor. Actuat. A Phys.* **313** 112186
- [9] Zhang Z W, Hu S Q, Nakayama T, Chen J, Li B W 2018 *Carbon* **139** 289
- [10] Zhang Z W, Hu S Q, Xi Q, Nakayama T, Volz S, Chen J, Li B W 2020 *Phys. Rev. B* **101** 081402
- [11] Müller R, Gutschwager B, Hollandt J, Kehrt M, Monte C, Müller R, Steiger A 2015 *J. Infrared Millim. Te.* **36** 654
- [12] Deng T, Zhang Z H, Liu Y X, Wang Y G, Su F, Li S S, Zhang Y, Li H, Chen H J, Zhao Z R, Li Y, Liu Z W 2019

- Nano Lett.* **19** 1494
- [13] Chen J, Yang M S, Li Y D, Cheng D K, Guo G L, Jiang L, Zhang H T, Song X X, Ye Y X, Ren Y P, Ren X D, Zhang Y T, Yao J Q 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 47802 (in Chinese) [陈俊, 杨茂生, 李亚迪, 程登科, 郭耿亮, 蒋林, 张海婷, 宋效先, 叶云霞, 任云鹏, 任旭东, 张雅婷, 姚建铨 2019 *物理学报* **68** 47802]
- [14] Devi K M, Sarma A K, Chowdhury D R, Kumar G 2017 *Opt. Express* **25** 10484
- [15] Lv T T, Dong G H, Qin C H, Qu J, Lv B, Li W J, Zhu Z, Li Y X, Guan C Y, Shi J H 2021 *Opt. Express* **29** 5437
- [16] Hoof N, Huurne S, Vervuurt R, Bol A A, Rivas J G 2019 *APL Photonics* **4** 036104
- [17] Zi J C, Xu Q, Wang Q, Tian C X, Li Y F, Zhang X X, Han J G, Zhang W 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 101104
- [18] Kuznetsov S A, Paulish A G, Navarro-Cía M, Arzhannikov A V 2016 *Sci. Rep.* **6** 21079
- [19] Liu Z J, Liang Z Q, Zheng X, Jiang Y D 2019 *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* Maison de la Chimie, France, September 1–6, 2019 p1
- [20] Zhang K S, Luo W B, Zeng X H, Huang S T, Xie Q, Wan L M, Shuai Y, Wu C H, Zhang W L 2022 *IEEE Sensor. J.* **22** 10381
- [21] Suen J Y, Fan K, Montoya J, Bingham C, Padilla W J 2017 *Optica* **4** 276
- [22] Tan X C, Li J Y, Yang A, Liu H, Yi F 2018 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* San Jose Convention Center, United States, May, 13–18, 2018 p4
- [23] Ranacher C, Consani C, Tortschanoff A, Rauter L, Jakoby B 2019 *Sensors* **19** 2513
- [24] Ebrahim S, Elshaer A, Soliman M, Tayl M 2016 *Sensor. Actuat. A Phys.* **238** 389
- [25] Han F Y, Liu P K 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901331
- [26] Wang B X, Wang G Z, Wang L L, Zhai X 2016 *IEEE Photonic. Tech. Lett.* **28** 307
- [27] Guo W L, Dong Z, Xu Y J, Liu C L, Wei D C, Zhang L B, Shi X Y, Guo C, Xu H, Chen G, Wang L, Zhang K, Chen X S, Lu W 2020 *Adv. Sci.* **7** 1902699
- [28] Rodrigo S G, Martín-Moreno L 2016 *Opt. Lett.* **41** 293
- [29] Xia S, Yang D X, Li T, Liu X, Wang J 2014 *Opt. Lett.* **39** 1270
- [30] Wu Z R, Wang L, Peng Y T, Young A, Seraphin S, Hao X 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 56
- [31] Wang Y, Cui Z J, Zhu D Y, Zhang X B, Qian L 2018 *Opt. Express* **26** 15343

Study on influence of ring hole array metamaterial on performance of pyroelectric terahertz detectors*

Wang Yang-Tao Jing Wei-Xuan[†] Han Feng Meng Qing-Zhi
Lin Qi-Jing Zhao Li-Bo Jiang Zhuang-De

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 13 June 2022; revised manuscript received 20 November 2022)

Abstract

In order to improve the detection performance of 0.1–1 THz terahertz wave, a new lithium tantalate pyroelectric terahertz detector based on ring hole array metamaterial is proposed. The quantitative influences of the characteristic parameters such as inner diameter, outer diameter, period and thickness on the transmission bandwidth and transmittance of ring hole array metamaterials are analyzed by simulation. The mechanisms of the influences of different combinations of ring hole array metamaterials and pyroelectric detectors on the detection bandwidth and detection rate of terahertz waves are clarified. The lithium tantalate pyroelectric terahertz detectors of the ring hole array metamaterial were fabricated by the MEMS technology. The transmission of the ring hole array metamaterial and the noise equivalent power of the metamaterial detector at different frequencies are tested. The results show that the transmittance of the fabricated ring hole array metamaterial is greater than 40% at 0.25–0.65 THz, and bandpass filtering is realized. When the ring hole array metamaterial and the pyroelectric detector maintain a sufficient distance, the noise equivalent power of the detector at 0.315 THz is $11.29 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, which is 6.3% of the 0.1 THz noise equivalent power (outside the bandpass band), so the bandpass detection is achieved. When the ring hole array metamaterial is attached to the detector, the noise equivalent power of the metamaterial detector at 0.315 THz is $4.64 \mu\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$, which is 29.4% that of the detector without the ring hole array metamaterial, so the narrowband detection is achieved. The above conclusions show that the pyroelectric terahertz detector based on the ring hole array metamaterial can realize the bandpass and narrowband detection of specific frequency band in applications such as biological imaging and macromolecular detection.

Keywords: terahertz, pyroelectric detector, ring hole array metamaterial, detection bandwidth

PACS: 87.50.U-, 77.70.+a, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.72.20221174

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51975466).

[†] Corresponding author. E-mail: wxjing@mail.xjtu.edu.cn



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

王杨涛 景蔚萱 韩枫 孟庆之 林启敬 赵立波 蒋庄德

Study on influence of ring hole array metamaterial on performance of pyroelectric terahertz detectors

Wang Yang-Tao Jing Wei-Xuan Han Feng Meng Qing-Zhi Lin Qi-Jing Zhao Li-Bo Jiang Zhuang-De

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 048701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221174

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221174>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高速太赫兹探测器

Ultrafast terahertz detectors

物理学报. 2018, 67(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180226>

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2022, 71(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

物理学报. 2021, 70(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>

双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性

Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2021, 70(16): 168101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210062>

基于太赫兹脉冲加速及扫描电子束的高时间分辨探测器

High time-resolution detector based on THz pulse accelerating and scanning electron beam

物理学报. 2022, 71(2): 028501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210871>

基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure

物理学报. 2022, 71(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212400>