

基于钛相变边缘传感器的超导单光子探测器特性

耿悦^{1,2}, 钟家强¹, 李佩展^{1,2}, 张文^{1*}, 王争¹, 周康敏¹,
任远¹, 缪巍¹, 姚骑均¹, 史生才^{1*}

(1. 中国科学院紫金山天文台, 江苏南京 210023;

2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026)

摘要: 研究了基于钛 TES 的超导单光子探测器的特性, 器件尺寸范围为 $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ 到 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$, 集成光学腔体后在 $1550\ \text{nm}$ 波长实测的系统探测效率最高达到 72%, 最佳能量分辨率为 $0.26\ \text{eV}$ 。在此基础上, 采用二流体模型提取了基于钛 TES 的超导单光子探测器的特性参数(包括温度灵敏度、电流灵敏度、热容等), 并模拟计算了基于钛 TES 的超导单光子探测器的响应时间和能量分辨率, 与实验结果完全吻合。结果表明优化探测器尺寸和临界温度, 可以同时达到高探测效率和高能量分辨率, 实现光子数可分辨的高性能单光子探测器。

关键词: 相变边缘传感器(Transition-Edge Sensor, TES); 单光子探测器; 二流体模型; 能量分辨率

中图分类号: O43 文献标识码: A

Characteristics of Ti transition-edge sensor based superconducting single-photon detectors

GENG Yue^{1,2}, ZHONG Jia-Qiang¹, LI Pei-Zhan^{1,2}, ZHANG Wen^{1*}, WANG Zheng¹, ZHOU Kang-Min¹,
REN Yuan¹, MIAO Wei¹, YAO Qi-Jun¹, SHI Sheng-Cai^{1*}

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210023, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Ti TES-based superconducting single-photon detectors with different dimensions between $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$ and $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ were developed. The measured system detection efficiency (η_{sys}) is 72% at $1550\ \text{nm}$, and energy resolution (ΔE) is $0.26\ \text{eV}$ by integrating an optical cavity during the TES fabrication. Based on the two-fluid model, we extract the key parameters (i. e., temperature sensitivity, current sensitivity, heat capacity, et. al) of Ti TES-based superconducting single-photon detectors with different dimensions, and calculate the effective response time and ΔE , which are consistent with the measured ones. The obtained results show that it's possible to realize high η_{sys} and ΔE by optimizing TES dimension and critical temperature, paving the way for high performance single-photon detectors at telecommunication band.

Key words: transition-edge sensor(TES), single-photon detector, two-fluid model, energy resolution

PACS: 85.25.Oj, 85.25.Am

引言

基于相变边缘传感器(Transition-Edge Sensor, TES)的超导单光子探测器具有卓越的光子数分辨能力和高探测效率, 在量子信息、天文观测、生物成像等领域具有广阔的应用前景。基于相变边缘传

感器的超导单光子探测器是一种热探测器^[1], 由一层超导薄膜和两端的电极组成。通过一小阻值的并联电阻(R_c)恒压偏置在超导转变区, 超导薄膜吸收能量后电子温度(T)迅速升高, 导致器件电阻(R)急剧增加, 感应的电流变化通过低噪声超导量子干

收稿日期: 2021-12-04, 修回日期: 2022-01-28

Received date: 2021-12-04, Revised date: 2022-01-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0304003, 2020YFC2201703), 国家自然科学基金(U1831202, U1731119, U1931123, 11773083, 11873099), 江苏省“333 高层次人才培养工程”(BRA2020411)。

Foundation items: Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China (2017YFA0304003, 2020YFC2201703), National Natural Science Foundation of China (U1831202, U1731119, U1931123, 11773083, 11873099), Jiangsu Province, China (BRA2020411)

作者简介(Biography): 耿悦(1994-), 男, 河北秦皇岛人, 博士研究生, 主要研究领域为基于相变边缘传感器的超导单光子探测器

E-mail: gengyue@pmo.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: wzhang@pmo.ac.cn, scshi@pmo.ac.cn

涉器(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)放大读出。基于TES的超导单光子探测器吸收可见光/近红外光子后的响应高度直接反应光子的能量,不同的高度代表不同的光子数,因此对于探测特定波长的光子,基于TES的超导单光子探测器具有光子数分辨能力。近年来,基于TES的超导单光子探测器发展迅速,探测效率接近100%^[2-3],可分辨超过10个光子^[4],响应时间达到亚微秒量级^[5-6],在量子通信、量子光学、量子计算与天文观测等领域具有广阔的应用前景。2005年, Irwin和Hilton建立了较为完备的TES理论模型^[1]。通常 R_n 和SQUID的噪声贡献可以忽略不计,仅考虑TES器件的热起伏噪声和热噪声,其能量分辨率(ΔE)可以表示为^[7]。

$$\Delta E = 2.355 \sqrt{4k_B T_0^2 \frac{C}{\alpha} \sqrt{\frac{n(1+2\beta)}{2}} (1+M^2)}, \quad (1)$$

其中 k_B 是 Boltzmann 常数,温度灵敏度系数 $\alpha = T_0/R_0 \times \partial R/\partial T$,电流灵敏度系数 $\beta = I_0/R_0 \times \partial R/\partial I$, R_0, I_0, T_0 和 C 分别表示器件的电阻、电流、温度和热容, n 是与材料和结构相关的常数, M 表示超出噪声(Excess noise)与TES器件热噪声的比值。 ΔE 表示单光子探测器响应高度分布直方图中尖峰的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM),即探测器分辨不同能量光子的能力,因此数值越小,能量分辨率越高。基于TES的超导单光子探测器有效响应时间(τ_{eff})可以近似表达为^[5]

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\gamma}{n \Sigma T_0^{n-2} (1 + \alpha/n)}, \quad (2)$$

γ 是 Sommerfeld 常数, Σ 为与材料有关的电声耦合系数。式(1)和(2)表明器件体积与 τ_{eff} 无关,却与 ΔE 密切相关。TES工作在超导转变区, T_0 接近超导薄膜的临界温度(T_c),即 $T_0 \sim T_c$ 。相较于 T_c 约为100 mK的钨膜^[3],选择具有较高 T_c 的钛膜(Ti)研制基于TES的超导单光子探测器,以便获得更短的 τ_{eff} 从而提高计数率。为了计算 ΔE 和 τ_{eff} ,需要知道式(1)和(2)中所有的参数。通过电流-电压(I - V)特性可以获得 n, T_0 等参数,然而 α, β 和 C 一般通过复阻抗测量获得^[8-9]。基于Ti TES的超导单光子探测器的 τ_{eff} 为 μs 甚至亚 μs 量级^[5-6],要求复阻抗测量的频率高达数十 MHz^[10],但是在如此高频下寄生效应和传输线阻抗不连续引起的多重反射影响非常明显,大大增加了复阻抗测量的难度。

研究人员尝试通过理论模型间接获取TES的关

键参数。二流体模型将TES的 I_0 分解为超流和准粒子电流,即 $I_0 = C_1 I_c + V_0/(C_R R_n)$,其中 C_1 是超流与临界电流(I_c)的比值,而 C_R 与相转移有关, V_0 和 R_n 分别表示器件的电压和正常态电阻(即器件刚失去超导特性时的电阻)。根据实测的 I - V 特性得到 α 和 β 等参数^[11],并分析TES的各种特性^[12-13]。前期将 C_1 和 C_R 作为变量,基于二流体模型研究 C_1 和 C_R 随器件 R_0 的变化,从而得到 α, β 和 C 等参数,与复阻抗测量精度相当^[14]。本文进一步研究了不同尺寸的TES特性,并提取了 α, β 和 C 等参数。在此基础上,模拟计算了 τ_{eff} 与 ΔE 的尺寸和 T_c 相关性,为实现光子数可分辨的高性能超导单光子探测器奠定了基础。

1 基于TES的超导单光子探测器及二流体模型

1.1 基于TES的超导单光子探测器

通过电子束蒸发在高阻硅基板上制备了一层厚度为39 nm的Ti薄膜^[15],随后通过剥离(Lift-off)工艺定义正方形的有效区域(如图1(a)所示)。器件的电极为Nb, Nb/Ti重叠区域宽度(CP)为2 μm 。TES的有效区域边长设计为5 μm 、10 μm 和20 μm 。为了提高器件的吸收效率,在器件制备过程中集成了介质反射镜和防反射层组成的光学腔体。如图1(b)所示,介质反射镜为 SiO_2 和 Ta_2O_5 交替组成,一共15层,每层厚度为四分之一波长;防反射层为单层 TiO_2 ,根据钛膜的厚度进行优化设计并制备,实测的光学腔体吸收效率达到95%^[16]。如图1(c)所示,借助红外显微镜成像,在二维精密位移台的作用下实现单模光纤与TES有效区域的对准,获得高耦合效率。在偏置电路中并联一小电阻($R_s=0.11 \Omega$)实现恒压偏置。封装好后的TES安装于稀释制冷机中,最低温度可达20 mK。图1(d)是测试系统原理图,1550 nm皮秒脉冲激光器产生的光信号衰减到单光子水平,经过光纤引入稀释制冷机中并辐照到TES有效区域上,产生的电流响应首先由低噪声SQUID放大^[17],后续通过数字示波器直接测量响应波形,或者通过数字模拟采集卡(DAQ)转化为数字信号以便进一步分析处理。

1.2 二流体模型

在二流体模型中, TES的电阻描述为

$$R(T_0, I_0) = C_R R_n \left(1 - C_1 \frac{I_{c0} [1 - T_0/T_c]^{3/2}}{I_0} \right), \quad (3)$$

其中 I_{c0} 为零温下器件的临界电流^[18]。 α 和 β 可以表

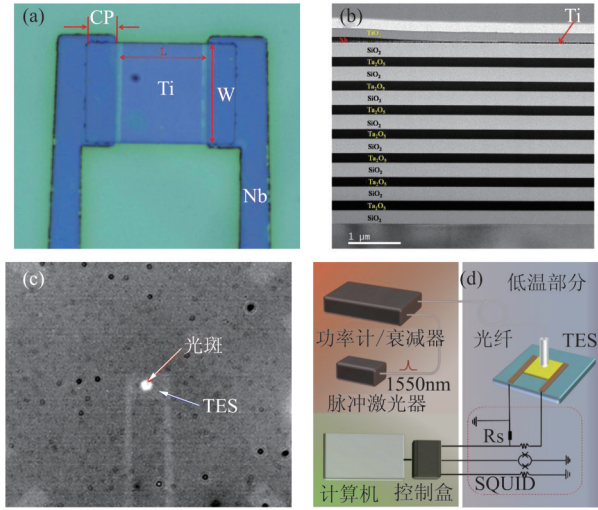


图1 (a) 基于钛 TES 的超导单光子探测器照片, L 和 W 表示器件长度和宽度, CP 为电极重叠宽度。(b) 钛 TES 剖面的 TEM 图像, 图中周期性 (SiO_2 和 Ta_2O_5) 分布结构为介质反射镜, 左侧为 Nb/Ti 重叠区域, 右侧为 Ti 有效区域。(c) 从单模光纤辐射的光斑与 TES 有效区域的对准图像。(d) 测试系统原理图, 皮秒脉冲激光器发出的光衰减后通过光纤照射到 TES 器件上, 产生的电流响应由低噪声 SQUID 放大

Fig. 1 (a) Photo of Ti TES-based superconducting single-photon detector, L and W present the device length and width, CP is the overlap of contact pads. (b) TEM images of Ti TES, the periodic distribution structure is the dielectric mirror, on the left is the Nb/Ti overlapping area, on the right is the Ti active area. (c) IR image of light spot from the single-mode fiber and TES active area. (d) Measurement setup of TES-based superconducting single-photon detectors responding to an attenuated pulse signal, induced current is firstly amplified by SQUID

示为^[11]

$$\alpha = \frac{3}{2} \frac{C_R R_n}{R_0} \frac{C_I I_{CO}}{I_0} \frac{T_0}{T_C} \left(1 - \frac{T_0}{T_C}\right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\beta = C_R \frac{R_n}{R_0} - 1. \quad (5)$$

TES 的热平衡方程为

$$I_0^2 R(T_0, J_0) = K(T_0^n - T_B^n), \quad (6)$$

其中 $K = \Sigma \Omega$ 是热导率, Ω 为器件体积, T_B 是环境温度。器件的热导为

$$G = nKT_0^{n-1}. \quad (7)$$

结合器件在不同 T_B 下的 I - V 特性, 根据式(6)可以获得器件在特定工作点 (R_0) 的 T_0 。随后即可拟合出 C_I 和 C_R 随工作点 (R_0/R_n) 的变化曲线, 进而根据式(4)和(5)获得 α 和 β ^[14]。TES 的 τ_{eff} 也表示为^[1]:

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{C}{G} \frac{1 + \beta + R_s/R_0}{1 + \beta + R_s/R_0 + (1 - R_s/R_0)\Lambda}, \quad (8)$$

其中环路增益 $\Lambda = I_0 V_0 \alpha / (GT_0)$ 。忽略 β 和 R_s 的作用, 式(8)可简化为式(2)。结合测量的 τ_{eff} 即可提取出器件的 C 。

2 基于 TES 的超导单光子探测器特性

2.1 直流特性

测量了三个不同尺寸的 Ti TES 器件。图 2(a) 为 $T_B = 100$ mK 下的 I - V 特性。选择 $R_0 = 0.3R_n$ 的焦耳功率 $P_0 = I_0 V_0$, 其随 T_B 的变化曲线如图 2(b) 所示。根据式(6)拟合得到 TES 的 K 和 T_C 参数。表 1 列出了获得的相关参数。器件 $T_C = (228 \pm 3)$ mK, G 近似与器件面积成正比。随后通过二流体模型和式(4)和(5)拟合得到 α 和 β , 分别为 146 和 0.5, 表明整批器件具有很好的一致性和均匀性。电声耦合系数 $\Sigma = \sim 0.7$ nW/(K⁵· μm^3), 与其他研究小组制备的钛膜 TES 吻合^[19]。

2.2 器件的有效响应时间和热容

在小信号模型下, TES 的脉冲响应可以表

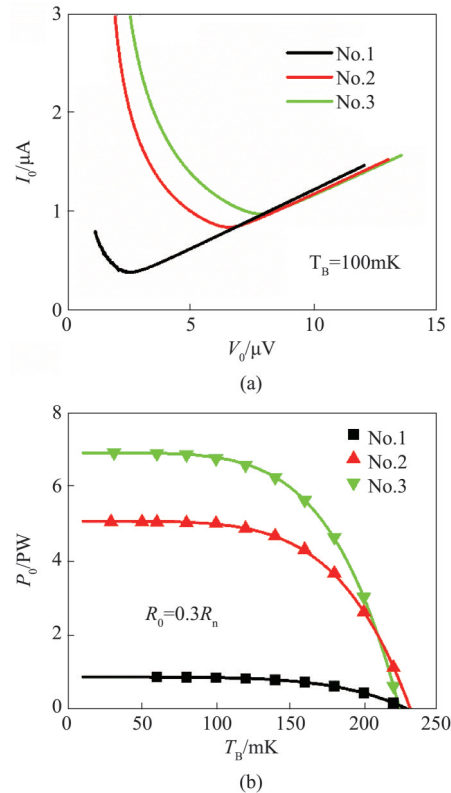


图2 (a) 基于 TES 的超导单光探测器的 I - V 曲线, 环境温度为 100 mK, (b) 基于 TES 的超导单光子探测器的焦耳功率-环境温度曲线, P_0 为 $0.3R_n$ 处的焦耳功率

Fig. 2 (a) Current-voltage characteristics of TES-based superconducting single-photon detectors, (b) Joule power ($P_0 = I_0 V_0$) at $0.3R_n$ as a function of T_B

示为^[1]:

$$\delta I(t) = \left(\frac{\tau_l}{\tau_+} - 1 \right) \left(\frac{\tau_l}{\tau_-} - 1 \right) \frac{1}{2 + \beta} \frac{C\delta T}{V_0\tau_l^2} \frac{e^{-t/\tau_+} - e^{-t/\tau_-}}{1/\tau_+ - 1/\tau_-}, \quad (9)$$

其中 $\tau_l = \tau_0/(1 - \Lambda)$, $\tau_0 = C/G$ 为器件固有响应时间, τ_+ 和 τ_- 分别为上升沿时间和下降沿时间。在小电感(L)近似下, $\tau_+ = \tau_{el} = L/(R_0 + R_n(1 + \beta))$ 为电响应时间, $\tau_- = \tau_{eff}$ 。测量了 TES 在不同 R_0/R_n 的 τ_{eff} 。如图 3(a) 所示, 三个器件虽然尺寸完全不同, 但是 τ_{eff} 随工作点 (R_0/R_n) 的变化曲线基本一致。在后面的计算中取器件的典型值 $T_c = 225$ mK, 根据获得的参数结合二流体模型计算出不同 R_0/R_n 的 τ_{eff} 。如图 3(a) 所示, 仿真结果与实测值完全吻合。

在 $0.3 R_n$ 处, τ_{eff} 约为 $2 \mu s$ 。根据式(8)计算出器件的 C 。如图 3(b) 所示, 基于 TES 的超导单光子探测器的 C 与 Ω 相关, 并且随着 R_0/R_n 增加而减小。器件 $C = \gamma\Omega T_0$ 。TES 工作在超导转变区, 根据 BCS 理论, 超导态的 C 是其正常态的 2.43 倍。在低偏置处 ($\sim 0.2 R_n$) 的 C 约为高偏置处 ($\sim 0.8 R_n$) 的两倍, 接近 BCS 理论的估计值, 同时与复阻抗测量结果基本吻合^[8-9]。根据 $0.8 R_n$ 的 C 估计出 γ , 约为 $0.6 \text{ mJ}/(\text{K}^2 \cdot \text{cm}^3)$, 大于块材料的 $0.3 \text{ mJ}/(\text{K}^2 \cdot \text{cm}^3)$ ^[11], 可能是因为超导薄膜与大块材料存在一定区别所致。

2.3 能量分辨率

图 4(a) 为器件 3 在 $0.3 R_n$ 处的脉冲响应高度分布直方图。对应不同的入射光子数, 响应高度集中在不同的区域, 形成一个一个的尖峰, 说明我们研制的 TES 具有光子数分辨能力, 至少可以分辨 6 个 1550 nm 光子。脉冲高度分布可以表示为泊松分布与高斯分布的卷积^[20]

$$y = \frac{Be^{-\mu}}{\sqrt{2\pi\sigma_E^2}} \left[\frac{\sigma_E}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{\mu^i}{i!} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma_E^2}\right) \right], \quad (10)$$

其中 B 是归一化因子, μ 是探测到的平均光子数, i 是

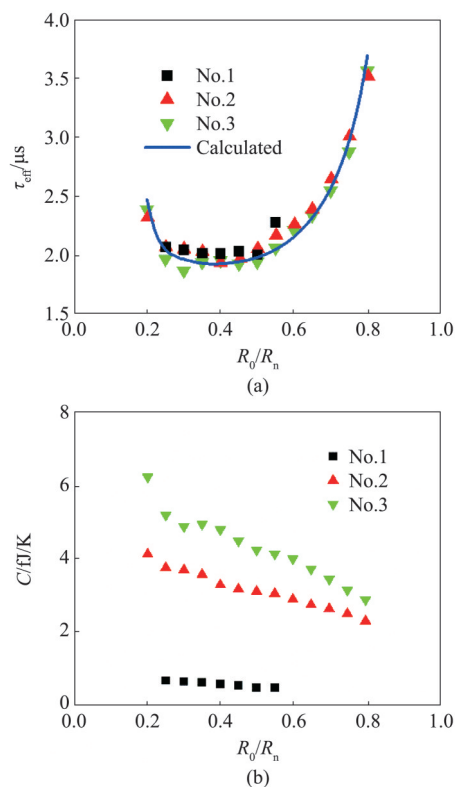


图3 (a)基于 TES 的超导单光子探测器的 τ_{eff} (点代表实测值,实线表示模拟计算结果), (b)计算的基于 TES 的超导单光子探测器的热容

Fig. 3 (a) Calculated and measured τ_{eff} of TES-based superconducting single-photon detectors, (b) calculated C of TES-based superconducting single-photon detectors

吸收光子数, x_i 是对应光子数 i 的峰值中心, σ_0 为零光子峰的方差, σ_E 为其余峰的方差, 因此能量分辨率表示为

$$\Delta E = 2.355 \frac{\sigma_E}{x_2 - x_1} E, \quad (11)$$

其中 $E_\gamma = 0.8 \text{ eV}$ 是 1550 nm 单光子的能量。

通过拟合式(10), 并将响应高度归一化到 1550 nm 单光子响应高度, 结果如图 4(a) 所示。拟合得到的平均光子数为 $\mu = 2.39$, 而器件的输入光子数根据光功率计和衰减器标定为 $\mu_{in} = 3.34$, 因此系统探

表1 基于 TES 的超导单光子探测器参数 ($R_0 = 0.3 R_n$, $T_b = 100 \text{ mK}$)

Table 1 Parameters of TES-based superconducting single-photon detectors with different dimensions measured at $0.3 R_n$ and 100 mK

No.	$L \times W$ / μm	CP / μm	T_c /mK	R_n / Ω	K /(pW/K ⁵)	Σ /(nW/(K ⁵ · μm^3))	G /(pW/K)	α	β	τ_{eff} / μs	C /(fJ/K)	η	ΔE /eV
1	5×5	2	229	8.19	1340	0.76	18.4	146	0.49	2.05	0.64	16%	0.26
2	15×15	2	231	8.55	7600	0.68	108.2	133	0.38	2.05	3.69	66%	0.46
3	20×20	2	224	8.65	12172	0.65	153.2	159	0.63	1.93	4.88	72%	0.54

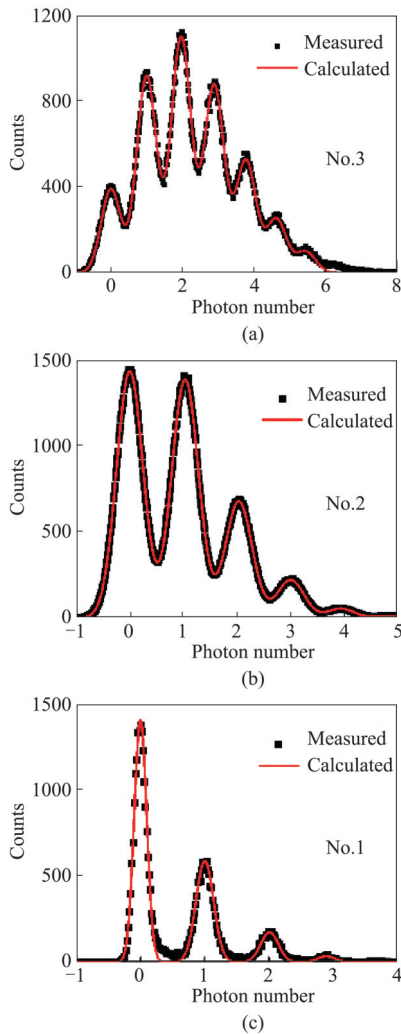


图4 基于TES的超导单光子探测器的响应高度直方图,横坐标归一化到1 550 nm单光子的响应高度,环境温度为100 mK,工作点为 $0.3R_n$ (a) 器件3, (b) 器件2, (c) 器件1

Fig. 4 Response height histogram of TES-based superconducting single-photon detectors at $0.3R_n$ and 100 mK, the response height is normalized to the one responding to one 1 550 nm photon (a) No.3, (b) No.2, (c) No.1

测效率 $\eta_{\text{sys}} = \mu/\mu_{\text{in}} = 71.6\%$ 。通过式(11), 获得器件3的 $\Delta E = 0.54$ eV。此外, 也测量了其余两个器件的 η_{sys} 和 ΔE 。图4(b)和(c)为器件2和器件1的响应高度直方图, 其 ΔE 分别为0.46 eV和0.26 eV, 而 η_{sys} 分别为66%和16%。三个器件的 ΔE 都小于1 550 nm的单光子能量(0.8 eV), 可以分辨1 550 nm的光子, 但是随着器件尺寸的增加, 能量分辨率逐渐恶化。当 ΔE 大于0.4 eV时, 两个相邻光子的响应峰之间已经出现比较明显的重叠, 出现误判的概率增加。从表1可以清晰地看到, 耦合效率随着器件尺寸的增加而提高, 从而 η_{sys} 提高, 但是 C 增加, 导致 ΔE 逐渐恶化。图5(a)为三个TES器件在不同工作点的

ΔE 。结果表明对于同一器件, 工作点在 $0.3R_n \sim 0.6R_n$ 之间, ΔE 基本保持不变, 而接近超导态和正常态时 ΔE 逐渐升高, 与式(1)完全相符。

TES中热起伏噪声一般占主导地位, 因此首先忽略式(1)中 M 因子, 结合测量的器件参数计算出理论 ΔE 。如图5(a)所示, 理论 ΔE 明显小于实测 ΔE , 说明还存在不可忽略的超出噪声, 通过引入 M 因子来表达。发现 M^2 和 α 与工作点的变化趋势基本吻合, 因此绘制 M^2/α 随 R_0/R_n 的变化曲线。如图5(b)所示, 在一定偏置范围内, TES的 M^2/α 基本保持不变, 其中器件1的数值略高一些(~ 0.3), 器件2和器件3的数值约为0.1, 比参考文献^[21]中的 M^2/α 大了两个数量级。主要原因是我们研制的TES由单层钛膜组成, 超导转变宽度较大(~ 10 mK), 导致 α 较小所致。后续可以通过制备TiAu双层膜TES, 将超导转变宽度降低到1~2 mK, 提高 α 从而降低超出噪声的贡献, 进一步提高 ΔE 。

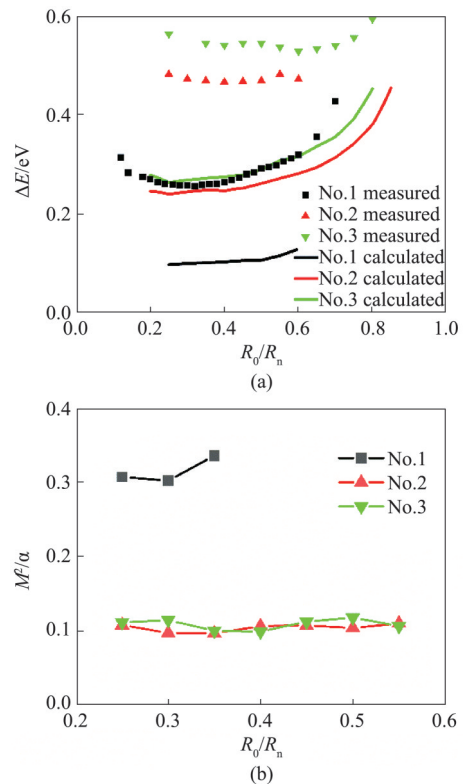


图5 (a) 基于TES的超导单光子探测器理论和实测 ΔE , (b) 基于TES的超导单光子探测器噪声因子 M^2/α

Fig. 5 (a) Calculated and measured ΔE of TES-based superconducting single-photon detectors, (b) M^2/α factor of TES-based superconducting single-photon detectors as a function of R_0/R_n

2.4 单光子响应高度

假设器件吸收了单个 1 550 nm 光子,即 $C\delta T=E_\gamma=0.8\text{ eV}$,根据式(9)计算出 TES 在 $R_0=0.3R_n$ 的单光子响应,如图 6(a)所示。根据实测的响应高度及输入光子数计算出单个光子引起的响应高度,同时考虑 η_{sys} 和能量转换效率($\sim 93\%$)^[16]的影响,得到实测的单光子响应高度。图 6(b)是器件 3 的理论和实测单光子响应高度随 R_0/R_n 的变化曲线,二者基本一致,说明根据二流体模型获得的参数很好描述了器件的特性。

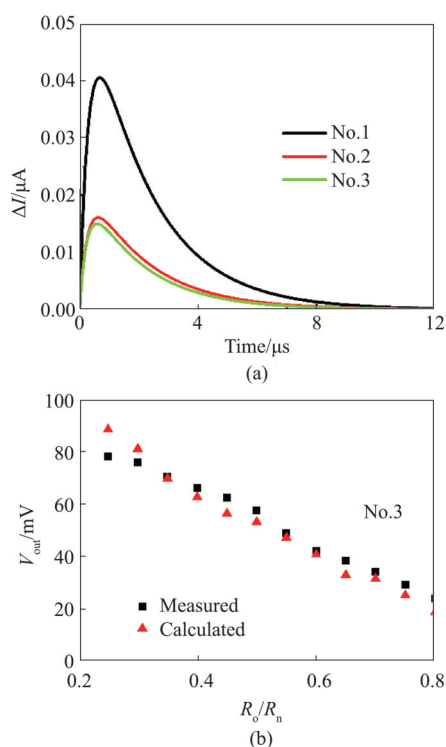


图 6 (a) 基于 TES 的超导单光子探测器理论单光子响应曲线(工作点为 $0.3R_n$), (b) 器件 3 的理论和测量单光子响应高度

Fig. 6 (a) Calculated response curves of TES-based superconducting single-photon detectors at $0.3R_n$ responding to a single 1 550 nm photon, (b) calculated and measured response height of No.3 as a function of R_0/R_n responding to a single 1 550 nm photon.

2.5 器件能量分辨率的估计

前面的实验中提取了电声耦合系数 Σ 、热容 C 、噪声因子 M^2/α 等参数,实验验证了相同厚度、不同尺寸的 TES 器件上述参数具有较好的一致性。为了进一步预测基于 TES 的超导单光子探测器特性,在实验结果和二流体模型基础上,模拟计算了 TES 的 ΔE 与 T_c 之间的相关性。为了确保

高探测效率,器件尺寸应足够大以获得高耦合效率,因此器件尺寸选择为 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ 。在模拟计算中,采用如下的基本参数:薄膜厚度 $d=39\text{ nm}$, $R_n=8.5\ \Omega$, $\Sigma=0.68\text{ nW}/(\text{K}^5\cdot\mu\text{m}^3)$, $M^2/\alpha=0.1$, 研究 ΔE 与 T_c 的相关性。结果如图 7 所示,如果要求 ΔE 达到 0.4 eV 以便很好分辨 1 550 nm 波长的单光子,那么器件的 T_c 就应该降低至 170 mK ,这可以通过烘烤^[22]、制备 TiAu 双层膜器件等方式实现。

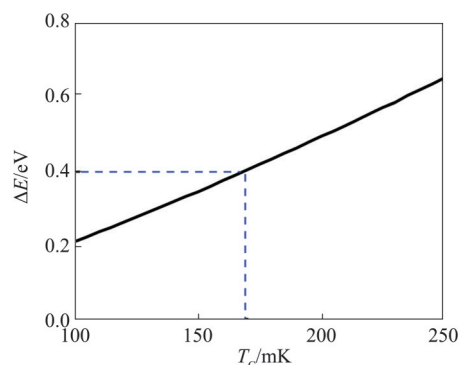


图 7 TES 在 $0.3R_n$ 处的 ΔE 与 T_c 的相关性,器件尺寸为 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$

Fig. 7 Calculated ΔE of TES with a dimension of $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ as a function of T_c

3 结论

研究了基于钛 TES 的超导单光子探测器,集成光学腔体后系统探测效率达到 72% ,小尺寸器件能量分辨率优于 0.3 eV 。采用二流体模型提取了基于 Ti TES 的超导单光子探测器的主要参数,获得了 α 、 β 和 C 等参数。模拟计算了基于 Ti TES 的超导单光子探测器的 τ_{eff} 和 ΔE ,结果表明 TES 尺寸为 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$, T_c 低于 170 mK 就可以同时获得足够高的 ΔE 和 η_{sys} ,为后续器件优化提供了指导。

致谢:感谢南京天文光学技术研究所的王晋峰副研究员和浙江大学的沈伟东教授提供镀膜服务。

References

- [1] Irwin K D, Hilton G C. Transition-edge sensors [J]. *Cryogenic particle detection*, 2005: 63-150.
- [2] Fukuda D, Fujii G, Numata T, et al. Titanium-based transition-edge photon number resolving detector with 98% detection efficiency with index-matched small-gap fiber coupling [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 870-875.
- [3] Lita A E, Miller A J, Nam S W. Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(5): 3032-3040.

- [4] Lolli L, Taralli E, Portesi C, *et al.* High intrinsic energy resolution photon number resolving detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(4):041107.
- [5] Portesi C, Taralli E, Lolli L, *et al.* Fabrication and characterization of fast TESs with small area for single photon counting[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, **25**(3):2101104.
- [6] Kobayashi R, Hattori K, Inoue S, *et al.* Development of a fast response titanium-gold bilayer optical TES with an optical fiber self-alignment structure[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, **29**(5):2101105.
- [7] Smith S J, Adams J S, Bailey C N, *et al.* Implications of weak-link behavior on the performance of Mo/Au bilayer transition-edge sensors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(7):074513.
- [8] Lindeman M A, Barger K A, Brandl D E, *et al.* Complex impedance measurements of calorimeters and bolometers: Correction for stray impedances[J]. *Review of scientific instruments*, 2007, **78**(4):043105.
- [9] Taralli E, Portesi C, Lolli L, *et al.* Impedance measurements on a fast transition-edge sensor for optical and near-infrared range[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2010, **23**(10):105012.
- [10] Hattori K, Kobayashi R, Takasu S, *et al.* Complex impedance of a transition-edge sensor with sub- μ s time constant [J]. *AIP Advances*, 2020, **10**(3):035004.
- [11] Bennett D A, Swetz D S, Horansky R D, *et al.* A two-fluid model for the transition shape in transition-edge sensors [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2012, **167**(3):102-107.
- [12] Wang T S, Guo G C, Zhu Q F, *et al.* Device modeling of superconductor transition-edge sensors based on the two-fluid theory[J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2012, **22**(4):2100212.
- [13] Wang T S, Chen J K, Zhang Q Y, *et al.* Simplified two-fluid current - voltage relation for superconductor transition-edge sensors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, **729**:474-483.
- [14] Geng Y, Li P Z, Zhong J Q, *et al.* Temperature and current sensitivity extraction of optical superconducting transition-edge sensors based on a two-fluid model[J]. *Chinese Physics B*, 2021, **30**(9):098501.
- [15] Wang Z, Zhang W, Miao W, *et al.* Electron-beam evaporated superconducting titanium thin films for antenna-coupled transition edge sensors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, **28**(4):2100204.
- [16] Geng Y, Zhang W, Li P Z, *et al.* Improving Energy Detection Efficiency of Ti-Based Superconducting Transition-Edge Sensors with Optical Cavity[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2020, **199**:556-562.
- [17] Zhang W, Geng Y, Wang Z, *et al.* Development of Titanium-based transition-edge single-photon detector [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, **29**(5):2100505.
- [18] Irwin K D, Hilton G C, Wollman D A, *et al.* Thermal-response time of superconducting transition-edge microcalorimeters [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **83**(8):3978-3985.
- [19] Fukuda D, Damayanthi R M T, Yoshizawa A, *et al.* Titanium based transition edge microcalorimeters for optical photon measurements[J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2007, **17**(2):259-262.
- [20] Lolli L, Brida G, Degiovanni I P, *et al.* Ti/Au TES as superconducting detector for quantum technologies[J]. *International Journal of Quantum Information*, 2011, **9**(supp01):405-413.
- [21] Wakeham N A, Adams J S, Bandler S R, *et al.* Thermal fluctuation noise in Mo/Au superconducting transition-edge sensor microcalorimeters[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, **125**(16):164503.
- [22] Zhang W, Wang Z, Zhong J Q, *et al.* Evidence for controllable reduction of critical temperature in titanium tess by baking in air[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, **31**(5):2101205.