

引用格式: LI Peizhan, ZHONG Jiaqiang, ZHANG Wen, et al. High-performance Superconducting Transition-edge Single-photon Detectors (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552201

李佩展, 钟家强, 张文, 等. 高性能超导相变边缘单光子探测器(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552201

※封面论文※

## 高性能超导相变边缘单光子探测器(特邀)

李佩展<sup>1,2</sup>, 钟家强<sup>1</sup>, 张文<sup>1</sup>, 王争<sup>1</sup>, 耿悦<sup>1,2</sup>, 姚骑均<sup>1</sup>, 缪巍<sup>1</sup>, 任远<sup>1</sup>, 李婧<sup>1</sup>,  
史生才<sup>1</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023)

(2 中国科学技术大学 天文与空间科学学院, 合肥 230026)

**摘要:**研究了钛膜的特性及调控机制,通过烘烤后处理工艺分析了临界温度随烘烤时间和烘烤温度的变化关系,发现临界温度随烘烤时间对数降低,但是随烘烤温度指数降低。拓展了二流体模型提取了超导相变边缘单光子探测器的温度灵敏度系数和电流灵敏度系数,并结合脉冲响应得到了器件的热容,进一步理论计算了能量分辨率对器件临界温度的依存性。最终,在器件制备过程中集成光学腔体,在 1 550 nm 波长的光子吸收效率接近 100%。研制的超导相变边缘单光子探测器系统探测效率超过 90%,能量分辨率约为 0.5 eV,可分辨至少 10 个 1 550 nm 光子,满足快速时变天体的观测需求。

**关键词:**相变边缘探测器;单光子探测;能量分辨率;量子效率

中图分类号:O43

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235205.0552201

### 0 引言

天文观测研究逐渐发展成为全波段天文学,通过多个波段的协同观测可获取研究对象更多维度的信息。近年来可见光/近红外天文蓬勃发展,在暗物质、暗能量、第一代恒星、星系和超大质量黑洞等研究方面取得了许多令人激动人心的成果。此外,国际上已建成多台 10 米级光学/红外望远镜,正在建设 30 米级的 TMT(Thirty Meter Telescope)望远镜<sup>[1]</sup>,充分说明可见光/近红外波段天文观测的重要科学意义和丰富的应用前景。光学望远镜通常配备大规模电荷耦合器件(Charge Coupled Detector, CCD)阵列相机<sup>[2]</sup>。CCD 相机在可见光波段具有接近 100% 的量子效率,但是读出噪声随着速度增加而升高<sup>[3]</sup>,很难用于观测快速时变的暂现源。当波长从可见光扩展到红外, HgCdTe 探测器阵列具有更高的灵敏度<sup>[4]</sup>,成功应用到最新发射的詹姆斯韦伯太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)上<sup>[5]</sup>,并对木星等天体进行了详细的观测。

超导相变边缘探测器(Transition-Edge Sensor, TES)具有极高的探测灵敏度,在可见光/近红外波段具有光子数分辨能力,在 X 射线等高能波段能量分辨率极高<sup>[6]</sup>。与前述的半导体探测器(硅基 CCD, InSb, HgCdTe 等)比较,超导 TES 探测器的探测效率更高,响应速度更快,暗计数更低,能量分辨率更高<sup>[7]</sup>,在可见光/近红外时域天文观测中具有独特的优势。美国斯坦福大学研制了基于超导 TES 探测器的成像光谱仪并对 Crab 脉冲星进行了观测,成功获取其能谱和时变特性<sup>[8-9]</sup>。随后研制了 32 像元的超导 TES 探测器阵列并集成到绝热去磁制冷机中,为后续天文观测奠定了良好的基础<sup>[10]</sup>。

在系外行星研究中,判断是否宜居的一条重要线索就是搜索行星大气中的生物信号(H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>等),迫切需求紫外-可见光-近红外波段(400 nm~1 800 nm)的高能量分辨率探测器。同时待测信号极其微弱,即使 12 米的光学望远镜收集到的光子流量也只有 0.006 光子/秒/像元,超导 TES 单光子探测器有望发挥独一无

**基金项目:**国家重点研发计划(Nos. 2017YFA0304003, 2020YFC2201703),国家自然科学基金(Nos. U1831202, U1731119, U1931123, 11773083, 11873099),中科院项目(Nos. XPB2303, QYZDJ-SSWSLH043, GJSTD20180003),江苏省 333 工程(No. BRA2020411)

**第一作者:**李佩展, pzli@pmo.ac.cn

**通讯作者:**张文, wzhang@pmo.ac.cn; 史生才, scshi@pmo.ac.cn

**收稿日期:**2022-10-10; **录用日期:**2022-11-21

<http://www.photon.ac.cn>

二的作用<sup>[11]</sup>。Origin空间望远镜(Origin Space Telescope, OST)是美国2020天体物理十年规划中的四大旗舰项目之一,覆盖近红外、中红外和远红外的整个红外波段,其灵敏度将超过以往任何望远镜1000倍以上。美国正在为OST研制10000像元量级的超导TES探测器阵列相机,噪声等效功率将低至 $10^{-20}$  W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[12]</sup>。

美国标准技术研究所研制了基于20 nm钨膜的超导TES单光子探测器,临界温度( $T_c$ )约为100 mK,通过集成光学腔体和精确对准实现了0.29 eV的能量分辨率( $\Delta E_{\text{FWHM}}$ )并在1560 nm波长获得95%的量子探测效率<sup>[13]</sup>。日本国立高级工业科学技术研究所研制了850 nm波长的钛超导TES单光子探测器,其探测效率达到98%,而能量分辨率为0.42 eV<sup>[14]</sup>。国内清华大学与中国科学技术大学合作,研制了基于Al/Ti双层膜的超导TES单光子探测器,有效响应时间为3.9  $\mu\text{s}$ ,响应高度与光子数成正比<sup>[15]</sup>。中国计量科学研究院详细研究了Ti/PdAu等超导薄膜的特性,并制备出了超导TES单光子探测器<sup>[16]</sup>。中科院紫金山天文台成功研制了350 GHz频段的 $8 \times 8$ 像元超导TES探测器阵列,满足地面观测背景极限灵敏度的要求<sup>[17]</sup>,进一步将超导TES探测器扩展到光学/近红外波段,研制了超导TES单光子探测器,实现了80%的系统探测效率,可分辨至少10个1550 nm的光子<sup>[18-20]</sup>。

本文在上述研究基础上详细研究了钛膜的特性调控机制,拓展了二流体模型获得了超导TES单光子探测器的关键参数。进一步优化了光学腔体的设计和器件制备工艺,并改进测量系统,从而成功研制出了高性能超导TES单光子探测器,系统探测效率超过90%,最低能量分辨率仅为0.26 eV,满足时域天文观测和量子信息领域的应用需求。

## 1 超导TES单光子探测器的工作原理

如图1(a)所示,超导相变边缘探测器是一种热探测器,由吸收体(热容 $C$ )、弱热连接(热导 $G$ )和热沉(温度 $T_b$ )组成。当吸收能量为 $E_\gamma$ 的入射光子后,超导TES探测器的电子温度( $T$ )升高, $\delta T = E_\gamma / C$ 。超导TES探测器恒压偏置在超导转变区,电子温度的变化引起超导TES电阻 $R(T, I)$ 的变化,进而流经TES的电流( $I$ )发生改变。经超导量子干涉仪(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)电流放大器放大后,由室温电子学读出,可获得入射光子的能量。根据基尔霍夫定理,其电路方程为

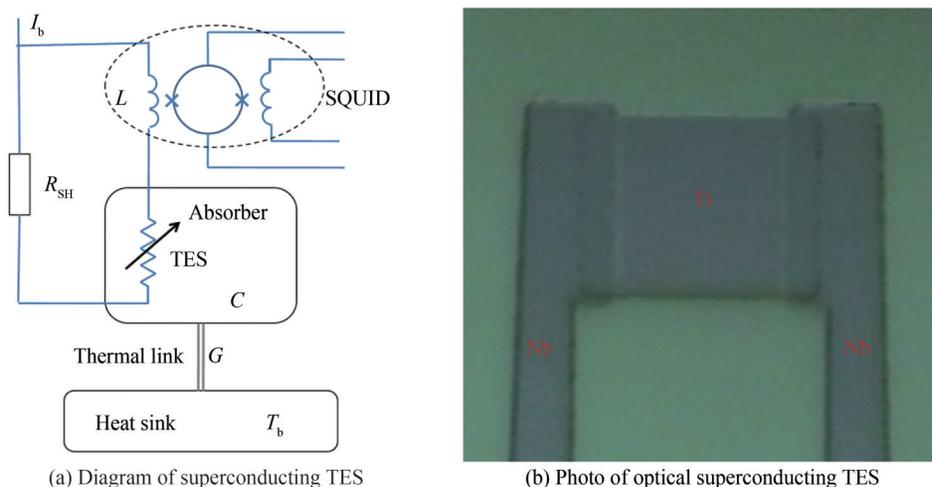


图1 超导TES探测器的原理图和照片

Fig.1 Diagram and photo of superconducting TES

$$L \frac{dI}{dt} = V_b - IR_L - IR(T, I) \quad (1)$$

式中, $L$ 是SQUID的输入电感,由戴维南等效原理可知负载电阻包括并联电阻( $R_{\text{sh}}$ )和寄生电阻( $R_{\text{par}}$ ),即 $R_L = R_{\text{sh}} + R_{\text{par}}$ ,电压源为 $V_b = I_b R_{\text{sh}}$ 。根据能量守恒定律,传热方程为

$$C \frac{dT}{dt} = I^2 R(T, I) - K(T^n - T_b^n) + E_\gamma(t) \quad (2)$$

式中, $K$ 是与器件材料和结构有关的参数,而 $n$ 是热导指数。结合式(1)和(2),即可求得超导TES探测器的

脉冲响应<sup>[6]</sup>

$$\delta I(t) = \left( \frac{\tau_1}{\tau_+} - 1 \right) \left( \frac{\tau_1}{\tau_-} - 1 \right) \frac{1}{(2 + \beta)} \frac{C \delta T}{I_0 R_0 \tau_1^2} \frac{\left( e^{-\frac{t}{\tau_+}} - e^{-\frac{t}{\tau_-}} \right)}{\left( \frac{1}{\tau_+} - \frac{1}{\tau_-} \right)} \quad (3)$$

式中,  $\tau_+$  和  $\tau_-$  分别是超导 TES 探测器的上升沿时间和下降沿时间,  $\tau_1 = \frac{\tau_0}{1 - \frac{P_J \alpha}{GT}}$  是器件在电流偏置下的时

间常数,  $\tau_0 = C/G$  是超导 TES 探测器的固有响应时间,  $\alpha = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$  和  $\beta = \frac{I}{R} \frac{dR}{dI}$  分别是温度灵敏度系数和电流灵敏度系数,  $I_0$ 、 $V_0$  和  $R_0$  分别是器件的电流、电压和电阻,  $P_J = I_0 V_0$  为焦耳功率。

可见光/近红外波段的超导 TES 单光子探测器结构如图 1(b) 所示, 吸收体和温度计为同一层超导薄膜, 通过电子-声子之间的弱相互作用实现弱热连接的同时可以降低热容从而提高  $\Delta E_{\text{FWHM}}$ 。为此, 一般选择低临界温度 ( $T_c < 1 \text{ K}$ ) 的超导材料, 如单层钨、单层钛或者钛金双层膜等, 直接在介质基板上制备一层超导薄膜, 通过剥离或者刻蚀工艺形成小面积的有效区域, 最后利用更高临界温度的超导材料(如铝或者铌)形成电极, 其有效响应时间为

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{P_J \alpha}{GT}} \quad (4)$$

超导 TES 单光子探测器的  $\alpha$  为正, 表明任何偏离平衡态的因素都会被抑制, 从而增强其稳定性。另外,  $\tau_{\text{eff}} < \tau_0$ , 表明探测器的响应时间因负电热反馈而缩短。在强电热反馈的情况下 ( $\alpha/n \gg 1$ ),  $\tau_{\text{eff}} \approx \frac{n}{\alpha} \tau_0$ , 表明探测器吸收光子后恢复热平衡过程中焦耳功率降低的作用远大于声子制冷机制, 即探测器主要依靠迅速降低焦耳功率, 而不是通过电子-声子相互作用将热量传递到介质基板而恢复到平衡态。

超导 TES 探测器的能量分辨率为

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2 \sqrt{2 \ln 2} \sqrt{4 k_B T_c^2 \frac{C}{\alpha} \sqrt{\frac{n}{2}}} \quad (5)$$

式中,  $k_B$  是玻尔兹曼常数。式(5)说明可以通过降低探测器的  $T_c$  提高能量分辨率。如果  $T_c$  从 0.3 K 降低到 0.1 K, 能量分辨率可以提高约一倍。其他噪声源, 如并联电阻的热噪声、SQUID 放大器的噪声等会降低探测器的能量分辨率, 因此式(5)是探测器的理论最小值。  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  还受到探测器的能量收集效率 ( $\epsilon$ ) 影响, 因此有效能量分辨率  $\Delta E_{\text{eff}} = \Delta E_{\text{FWHM}} / \epsilon$ 。

## 2 超导钛膜的特性调控

采用电子束蒸发在单晶硅基板上制备超导钛膜, 测量其应力、面电阻 ( $R_s$ ) 及  $T_c$ <sup>[21]</sup>。所有样品都表现出压应力, 并且随着沉积速率的增加压应力逐渐减小。当沉积速率高于 1 nm/s 时, 压应力基本上保持不变。  $R_s$  随着沉积速率增加而降低, 当沉积速率超过 0.1 nm/s 后  $R_s$  基本保持不变。因此, 研制超导 TES 单光子探测器时沉积速率选择为 1~1.5 nm/s。

超导钛膜的  $T_c$  和  $R_s$  具有很强的厚度 ( $d$ ) 相关性。随着厚度的增加  $T_c$  升高,  $R_s$  降低。但是这两个参数还受其他因素的影响, 导致数据呈现出一定的离散性。采用 IVRY Y 提出的模型<sup>[22]</sup>描述  $T_c$  与  $R_s$  的相关性为  $dT_c = aR_s^{-b}$ , 其中  $a$  和  $b$  是拟合参数, 分别为 228.951 和 0.961。如图 2 所示, 拟合曲线与实测结果完全吻合,  $dT_c$  随着  $R_s$  的增加而减小。据此可以预计钛膜的临界温度  $T_c = 228.951/dR_s^{0.961}$ , 有助于改进钛膜  $T_c$  的控制精度并提高制备工艺的一致性和重复性<sup>[21]</sup>。

针对制备好的超导 TES 单光子探测器, 为了精确调控其  $T_c$  从而实现高能量分辨率, 本文提出了一种烘烤后处理工艺<sup>[23]</sup>: 将样品置于常规烤箱中, 在设定的温度下烘烤。通过高温烘烤, 钛膜表面会氧化从而降低有效厚度, 致使  $T_c$  降低。进一步定量研究了烘烤对 Ti 膜和 TiAu 双层膜  $T_c$  的调控作用: 1) 固定烘烤温度

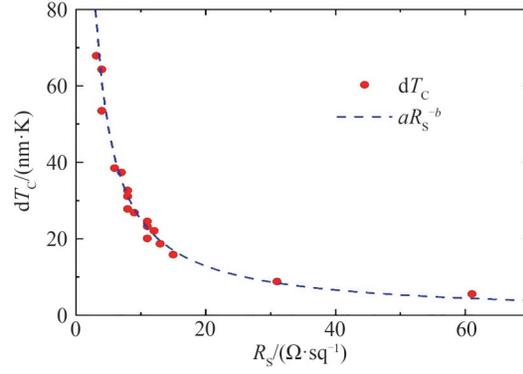


图2 制备的超导钛膜 $dT_C$ 随 $R_S$ 的变化曲线  
Fig.2  $dT_C$  of fabricated titanium films as a function of  $R_S$

( $T_{\text{baking}}$ ), 2) 固定烘烤时间( $t_{\text{baking}}$ )。如图3所示, Ti膜和 TiAu 双层膜的  $T_C$  随着烘烤温度和烘烤时间的增加而逐渐降低。为了进一步定量研究其下降的规律, 固定烘烤温度( $T_{\text{baking}}=120^\circ\text{C}$ ),  $T_C$  随烘烤时间  $t_{\text{baking}}$  的变化满足

$$T_C(t_{\text{baking}}) = T_{C0} - c \times \log(t_{\text{baking}}) \quad (6)$$

式中,  $c$  为拟合参数。固定烘烤时间( $t_{\text{baking}}=10\text{ h}$ ),  $T_C$  随烘烤温度  $T_{\text{baking}}$  的变化满足

$$T_C(T_{\text{baking}}) = T_{C1} \left[ 1 - \left( \frac{T_{\text{baking}}}{T_0} \right)^2 \right] \quad (7)$$

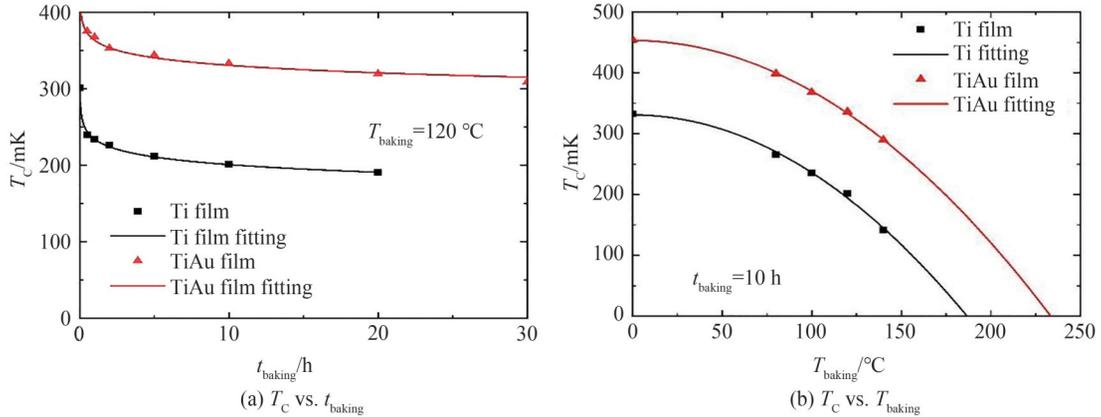


图3 Ti膜和 TiAu 双层膜临界温度随烘烤时间和烘烤温度的变化曲线  
Fig.3  $T_C$  of Ti and TiAu bilayer as a function of baking time and baking temperature

结果表明  $T_C$  随  $t_{\text{baking}}$  对数降低, 而随  $T_{\text{baking}}$  指数降低。在高温下烘烤, 钛膜表面会氧化, 同时会扩散进入钛膜深处, 从而导致  $T_C$  降低。透射电子显微镜观察发现烘烤后  $\text{TiO}_x$  层的厚度略大于烘烤前, 而且能量色散 X 射线谱表明烘烤后的氧峰宽度略大于烘烤前<sup>[23]</sup>, 表明钛膜表面由于烘烤而氧化。氧化层并不超导, 其厚度为 2~5 nm, 对吸收的影响可以忽略不计。此外, Ti膜和 TiAu 双层膜的常温电阻基本保持不变, 但是  $T_C$  随着时间自然老化而降低, 其变化规律与随烘烤时间降低类似。该研究提供了一种灵活方便的方法实现光子数可分辨的高效率超导 TES 单光子探测器。

### 3 超导 TES 单光子探测器的传热机制及建模

制备了超小有效面积( $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ )的超导 TES 单光子探测器, 表征其电/热特性<sup>[24]</sup>。实测  $G$  和估计的  $\tau_{\text{eff}}$  表明除了声子扩散制冷机制之外, 电子扩散制冷机制也具有很大的贡献。超小面积的超导 TES 单光子探测器具有高灵敏度、快速和低热容的特点, 适合于天文观测中的功率探测和要求光子数分辨能力的量子信息等领域。

将相转移系数近似为连续变化的参数从而拓展二流体模型<sup>[19]</sup>,成功提取了超导 TES 单光子探测器的  $\alpha$  和  $\beta$ (如图 4(a)所示),计算的电流-电压曲线和脉冲响应曲线与实测结果完全吻合,证明了拓展二流体模型的有效性。在此基础上,表征了不同尺寸的超导 TES 单光子探测器的主要参数<sup>[20]</sup>,并分析了其主要参数的变化规律。考虑了其他噪声对能量分辨率的贡献,引入噪声因子( $M$ ),理论计算了超导 TES 单光子探测器的  $\Delta E_{\text{FWHM}}$ ,获得了  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  与器件尺寸和  $T_c$  的相关性。如图 4(b)所示,表明器件尺寸为  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ ,  $T_c$  低于  $170\ \text{mK}$  可以同时获得高探测效率和高  $\Delta E_{\text{FWHM}}$ ,为后续优化器件指明了方向。

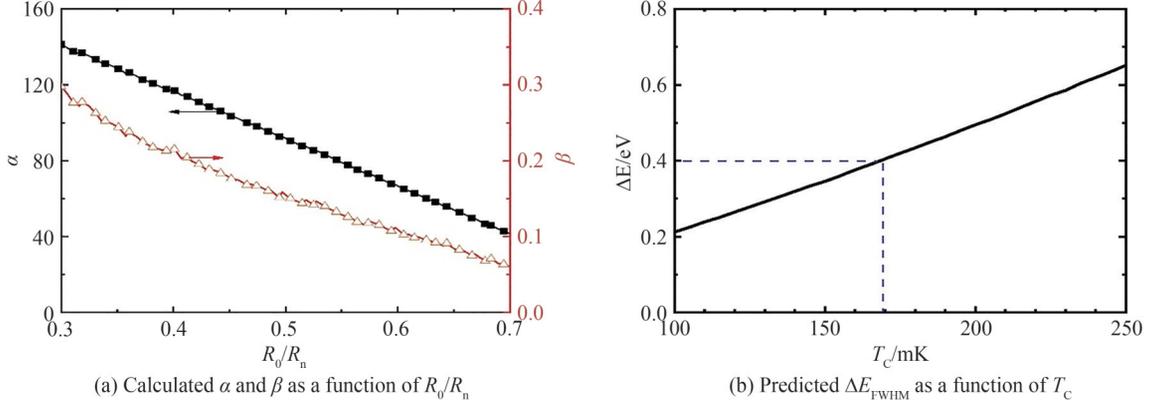


图 4 超导 TES 单光子探测器的温度和电流灵敏度系数及能量分辨率  
Fig.4  $\alpha$  and  $\beta$  of Ti superconducting TES as a function of  $R_0/R_n$ , and  $T_c$  dependence of  $\Delta E_{\text{FWHM}}$

#### 4 1550 nm 波段高性能超导 TES 单光子探测器

制备了基于钛膜的超导 TES 单光子探测器,表征了其电阻转变特性和电流-电压特性。实测的  $G$  与有效面积成正比。对于  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的器件,  $G$  为  $288\ \text{pW/K}$ ,  $T_c$  为  $285\ \text{mK}$ 。声子噪声主导的噪声等效功率 ( $\text{NEP}_{\text{phonon}}$ ) 表示为  $\text{NEP}_{\text{phonon}} = (4k_B T_c^2 G)^{0.5}$ , 因此  $\text{NEP}_{\text{phonon}} = 2.8 \times 10^{-17}\ \text{W/Hz}^{0.5}$ , 而  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  为  $0.23\ \text{eV}$ , 远小于  $1550\ \text{nm}$  单光子的能量 ( $E_\gamma = 0.8\ \text{eV}$ ), 可以分辨  $1550\ \text{nm}$  的光子数目<sup>[18]</sup>。

为了获得超导 TES 单光子探测器的高吸收效率从而实现高探测效率,在超导 TES 单光子探测器研制中需要集成光学腔体<sup>[14]</sup>。光学腔体由介质反射镜、超导薄膜和防反射层组成。各层薄膜尤其是钛膜折射率的精确值对于设计光学腔体尤为重要。我们采用光学椭偏仪研究了超导钛膜的折射率及其在整个基板上的分布均匀性。发现超导钛膜在光学波段的折射率与文献一致<sup>[25]</sup>,但在近红外波段折射率随着波长依然缓慢增加。此外,在硅基板上制备的超导钛膜一致性较好,但是表面形成约  $3\ \text{nm}$  厚的氧化层<sup>[26]</sup>。在此基础上设计了  $1550\ \text{nm}$  波段的光学腔体。如图 5(a)所示,介质反射镜和防反射层分别由 8 个周期和 2 个周期的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  交替堆叠组成。介质反射镜每层的厚度为  $1/4$  波长,而防反射层每层的厚度通过优化确定,保证在  $1550\ \text{nm}$  波长的高效吸收。测量结果表明集成光学腔体后吸收效率达 ( $\eta_{\text{absorption}}$ ) 到  $95\%$ 。随后研制了集

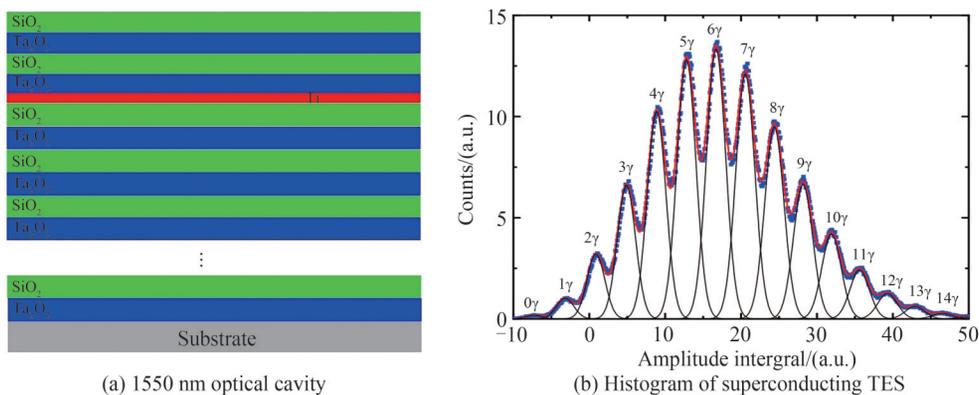


图 5  $1550\ \text{nm}$  波段超导 TES 单光子探测器的光学腔体和响应高度直方图  
Fig.5 Optical cavity and histogram of  $1550\ \text{nm}$  superconducting TES single-photon detector

成 1 550 nm 光学腔体的超导 TES 单光子探测器。镀防反射层后,  $G$  降低为 60 pW/K, 实测的  $\tau_{\text{eff}}$  为 5.9  $\mu\text{s}$ , 系统能量探测效率达到 40%<sup>[27]</sup>。

进一步优化并制备了 1 550 nm 光学腔体, 精确控制各层薄膜的厚度,  $\eta_{\text{absorption}}$  超过 95%。同时将钛膜的厚度降低到 22 nm, 器件尺寸为 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ , 远远大于单模光纤的光斑, 保证耦合效率接近 100%。器件  $T_c$  降低到 160 mK, 完全能够分辨 1 550 nm 的光子, 但是其暗计数较高, 约为 kcps。通过光纤熔接技术消除裸光纤上的低温接头, 提高了光信号的传输效率( $\eta_{\text{fiber}}$ )。分光器和衰减器组合的分光比( $R$ )为  $0.676 \times 10^{-4}$ 。设置皮秒脉冲激光器的重复频率( $f$ )为 20 kHz, 改变光衰减器的衰减量, 记录监视功率计的读数( $P_{\text{mon}}$ )。结合标定的分光比  $R$ , 平均输入光子数可以表示为  $\mu_{\text{in}} = \frac{P_{\text{mon}} R}{f E_{\gamma}}$ , 计算出平均输入光子数为 6.86。图 5(b) 是超导

TES 单光子探测器响应高度直方图, 检测到的平均光子数为 6.33, 因此系统探测效率为  $\eta_{\text{sys}} = 92.2\%$ ,  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  为 0.55 eV。此外, 超导 TES 单光子探测器可分辨至少 12 个 1 550 nm 光子。值得注意的是, 超导 TES 单光子探测器的  $\eta_{\text{sys}}$  主要由  $\eta_{\text{fiber}}$ 、 $\eta_{\text{absorption}}$ 、光纤耦合效率( $\eta_{\text{coupling}}$ )和 TES 器件本身的探测效率( $\eta_{\text{TES}}$ )组成, 即  $\eta_{\text{sys}} = \eta_{\text{fiber}} \times \eta_{\text{coupling}} \times \eta_{\text{absorption}} \times \eta_{\text{TES}}$ 。超导 TES 器件本身的  $\eta_{\text{TES}}$  为 100%, 而测量结果表明  $\eta_{\text{absorption}}$  达到 95%,  $\eta_{\text{fiber}}$  为 98%。后续将制备更完善的光学腔体来提高  $\eta_{\text{absorption}}$ 、降低光纤端面与器件之间的距离提高  $\eta_{\text{coupling}}$ , 从而进一步提高超导 TES 单光子探测器的  $\eta_{\text{sys}}$ 。

在此基础上, 进一步优化了超导 TES 单光子探测器的测试系统, 增加了光纤屏蔽, 并在低温下将光纤绕成直径为 35 mm 的圆圈(圈数为 10), 形成长波滤波器, 阻止红外光辐射。选择小尺寸器件(5  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ), 提高超导 TES 单光子探测器的电流响应率,  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  仅为 0.26 eV, 系统探测效率为 36%, 暗计数为  $4 \pm 2$  cps, 同样可分辨至少 12 个 1 550 nm 光子, 从而实现了低暗计数的超导 TES 单光子探测器。

## 5 可见光波段超导 TES 单光子探测器

在超导 TES 单光子探测器制备过程中集成了 850 nm 光学腔体, 钛膜厚度为 53 nm, 成功研制了可见光波段的超导 TES 单光子探测器。器件  $T_c$  为 400 mK, 正常态电阻( $R_n$ )为 13  $\Omega$ 。通过红外显微镜和精密二维移动平台实现 SM800 单模光纤(模场直径为 5.6  $\mu\text{m}$ )与超导 TES 单光子探测器的精确对准。采用脉冲激光器作为光源, 通过光衰减器将每个脉冲中的光子数衰减到小于一个光子, 利用数字示波器记录响应波形。在 300 mK 环境温度, 器件偏置在  $0.74R_n$ , 对应单光子、双光子和三光子的情况分别记录了响应波形。如图 6(a) 所示, 响应高度随着光子数的增加而升高, 表明超导 TES 探测器具有光子数分辨能力。随后利用数据采集卡采集信号高度, 对响应高度进行统计分析得到响应高度分布直方图。结果表明器件工作在 300 mK,  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  为 0.75 eV,  $\eta_{\text{sys}}$  为 13%, 至少可以分辨 10 个 850 nm 光子。研制的 850 nm 波段超导 TES 单光子探测器提供给中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 应用于具有光子数分辨能力的单光子辐射基准测量装置(如图 6(b) 所示), 服务于光子精密测量与光辐射计量基准技术研究。

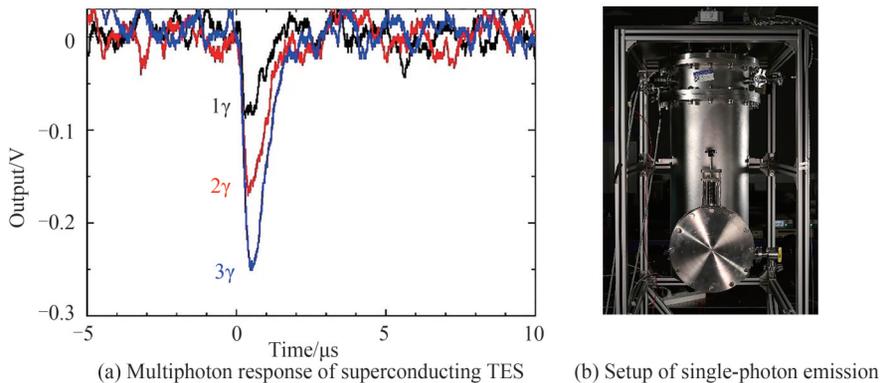


图 6 超导 TES 单光子探测器的多光子响应及单光子辐射基准测量装置

Fig. 6 multiphoton response of superconducting TES and setup of single-photon emission

## 6 结论

高灵敏度超导探测器是天文研究的重要探测器之一。在可见光/近红外波段,超导 TES 单光子探测器在探测效率、能量分辨率、可分辨光子数、暗计数等方面具有明显的优越性,在研究微弱天体信号源和快速时变源方面可以最大限度地获取光子信息。我们详细研究了钛膜的特性和临界温度调控机理,拓展了二流体模型提取了超导 TES 单光子探测器的关键参数,理论计算了临界温度与能量分辨率的依存性。在此基础上,集成光学腔体并研制了基于钛膜的超导 TES 单光子探测器,系统探测效率大于 90%,可分辨至少 10 个 1 550 nm 光子。研制的超导 TES 单光子探测器响应时间为微秒量级,可满足高时间分辨天文观测的需求。未来将研制超导 TES 单光子探测器阵列满足天文观测成像需求,同时为量子信息、生物成像、光子精密测量等领域提供高灵敏度的探测手段。

### 参考文献

- [1] SANDERS G H. The Thirty Meter Telescope (TMT): an international observatory [J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2013, 34(2): 81-86.
- [2] SMITH G E. The invention and early history of the CCD [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 102421.
- [3] LESSER M. A summary of charge-coupled devices for astronomy [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127: 1097.
- [4] ROGALSKI A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54: 136-154.
- [5] LI Jiaxi, DENG Jingsong, XU Chun, et al. Development of the infrared space astronomical observatory [J]. *Progress in Astronomy*, 2016, 34: 327-340.  
李佳席, 邓劲松, 许春, 等. 红外空间天文发展 [J]. *天文学进展*, 2016, 34: 327-340.
- [6] IRWIN K D, HILTON G C. Transition-edge sensors in cryogenic particle detection (topics in applied physics) [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2005, 99: 63-150.
- [7] CABRERA B, CLARKE R M, COLLING P, et al. Detection of single infrared, optical and ultraviolet photons using superconducting transition edge sensors [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73: 735-737.
- [8] ROMANI R W, MILLER A J, CABRERA B, et al. First astronomical application of a cryogenic transition edge sensor spectrophotometer [J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, 521: L153-L156.
- [9] ROMANI R W, MILLER A J, CABRERA B, et al. Phase-resolved crab studies with a cryogenic transition-edge sensor spectrophotometer [J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, 563: 221-228.
- [10] BAY T J, BURNEY J A, BARRAL J, et al. The optical imaging TES detector array: considerations for a cryogenic imaging instrument [J]. *Nuclear Instruments and Method in Physics Research A*, 2006, 559: 506-508.
- [11] NAGLER P C, GREENHOUSE M A, MOSELY S H, et al. Development of transition edge sensor detectors optimized for single-photon spectroscopy in the optical and near-infrared, high energy [C]. *Optical And Infrared Detectors For Astronomy*, SPIE, 2019, 10709: 1070931.
- [12] NAGLER P C, SADLEIR J E, WOLLACK E J. Transition-edge sensor detectors for the origin space telescope [J]. *Journal of Astronomical Telescope, Instruments, and Systems*, 2021, 7(1): 011005.
- [13] LITA A E, MILLER A J, NAM S W. Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency [J]. *Optics Express*, 2008, 16: 3032-3040.
- [14] 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: 870-875.
- [15] ZHANG Qingya, WANG Tianshun, LIU Jianshe, et al. Optical response of Al/Ti bilayer transition edge sensors [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(11): 118502.
- [16] XU Xiaolong, RAJTERI M, LI Jinjin, et al. Investigation of the superconducting Ti/PdAu bilayer films for transition edge sensors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, 32: 2100404.
- [17] ZHANG Wen, MIAO Wei, WANG Zheng, et al. Twin-slot antenna coupled Ti transition-edge sensor at 350 GHz [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2018, 193: 276-281.
- [18] ZHANG Wen, GENG Yue, WANG Zheng, et al. Development of titanium-based transition-edge single-photon detector [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 2100505.
- [19] GENG Yue, LI Peizhan, ZHONG Jiaqiang, 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.
- [20] GENG Yue, ZHONG Jiaqiang, LI Peizhan, et al. Characteristics of Ti transition-edge sensor based superconducting single-photon detectors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(4): 678-684.  
耿悦, 钟家强, 李佩展, 等. 基于钛相变边缘传感器的超导 TES 单光子探测器特性 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(4): 678-684.

- [21] WANG Zheng, ZHANG Wen, MIAO Wei, et al. Electron-beam evaporated superconducting titanium films for antenna-coupled transition edge sensors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 2100204.
- [22] IVRY Y, KIM C S, DANE A E, et al. Universal scaling of the critical temperature for thin films near the superconducting-to-insulating transition[J]. Physical Review B, 2014, 90: 214515.
- [23] ZHANG Wen, WANG Zheng, ZHONG Jiaqiang, 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.
- [24] ZHONG Jiaqiang, ZHANG Wen, MIAO Wei, et al., Fast-response superconducting titanium bolometric detectors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 2100205.
- [25] DAMAYATHI R M T, FUKUDA D, TAKAHASHI H, et al. Design of an optical absorption cavity for Titanium transition edge sensors[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2008, 151: 46.
- [26] LI Peizhan, ZHANG Wen, GENG Yue, et al. Improvement of Ti-based superconducting transition edge sensors with dielectric mirror[C]. 2019 44th International conference on infrared, millimeter, and terahertz (IRMMW-THz), 2019: 1-2.
- [27] GENG Yue, ZHANG Wen, LI Peizhan, 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.

## High-performance Superconducting Transition-edge Single-photon Detectors (Invited)

LI Peizhan<sup>1,2</sup>, ZHONG Jiaqiang<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>1</sup>, GEN Yue<sup>1,2</sup>, YAO Qijun<sup>1</sup>,  
MIAO Wei<sup>1</sup>, REN Yuan<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, SHI Shengcai<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Superconducting Transition-edge Sensor (TES) is a thermal detector that measures the deposited energy by changing the superconducting film's resistance. Superconducting TES-based single-photon detectors with high detection efficiency, low dark count rate, photon-number and arriving-time resolving capability, are ideal detectors for faint and rapidly varying sources, playing a unique role in studying pulsars, neutron stars, white dwarfs and exoplanets. The critical temperature ( $T_C$ ) is the key parameter that determines the energy resolution ( $\Delta E_{\text{FWHM}}$ ) of superconducting TES single-photon detectors, which can be finely tuned by baking the superconducting film or fabricated devices in the air. We studied the characteristics of titanium and titanium/gold bilayer films and the dependence of  $T_C$  on baking time ( $t_{\text{baking}}$ ) and baking temperature ( $T_{\text{baking}}$ ). It was found that the  $T_C$  is logarithmically decreased with  $t_{\text{baking}}$  for a fixed  $T_{\text{baking}}$ , while it is exponentially decreased with  $T_{\text{baking}}$  for a fixed  $t_{\text{baking}}$ . By treating the phase-slip parameters as variables, we extended the two-fluid model to extract the key parameters of superconducting TESs including temperature and current sensitivity coefficients from the measured current-voltage curves at different bath temperatures. By adding an  $M$  factor to take the excess noise into account, the simulated  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  is consistent with the measured one. We then calculated the  $T_C$  dependence of  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  for a  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  Ti TES device and found that superconducting TESs with a  $T_C$  of less than 170 mK can easily discriminate the photon numbers with a good  $\Delta E_{\text{FWHM}}$ . Finally, we designed and fabricated titanium-based superconducting TES single-photon detectors, which were embedded in an optical cavity to improve the absorption efficiency. The optical cavity is composed of a dielectric mirror with 8 periods of  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  layers and an anti-reflection coating with 2 periods of  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  layers. The refractive index of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$  and titanium film were measured with an ellipsometer, thus the calculated absorption efficiency of the optical cavity at 1 550 nm is nearly 100%, which is in agreement with the measured value with an IR spectrometer. The fabricated superconducting TES single-photon detector with an active area of  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  is aligned to a single-mode fiber with the help of an IR microscope and a two-dimensional moving stage, which reached a coupling efficiency of nearly 100%. A 1 550 nm pulsed light source is used to measure the optical response. To measure the system detection efficiency ( $\eta_{\text{sys}}$ ), we used a calibrated power meter and two precision attenuators to determine the average photon numbered incident ( $\mu_{\text{in}}$ ) on the superconducting TES. The detected photon number ( $\mu_{\text{out}}$ ) was obtained from the

height histogram with a large count of pulse responses. Then  $\eta_{\text{sys}}$  is the ratio of  $\mu_{\text{out}}$  to  $\mu_{\text{in}}$ ,  $\eta_{\text{sys}} = \mu_{\text{out}} / \mu_{\text{in}}$ . We realized high-performance superconducting TES single-photon detectors with a  $\eta_{\text{sys}}$  of higher than 90% and an  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  of 0.5 eV at 1 550 nm. In addition, we developed a superconducting TES single-photon detector to detect 850 nm photons. The thickness of titanium film was chosen to be 53 nm and its  $T_{\text{C}}$  is beyond 400 mK, which makes possible to cool it with just a He-3 sorption cooler instead of a dilution refrigerator. While working at 300 mK, the superconducting TES single-photon detector with a  $\eta_{\text{sys}}$  of 13% and an  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  of 0.75 eV can still resolve 850 nm photon numbers. Such superconducting TES single photon detectors with high  $\eta_{\text{sys}}$ , good  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  and short recovery time pave the way for the detection of rapidly varying sources.

**Key words:** Transition-edge sensor; Single-photon detection; Energy resolution; Quantum efficiency

**OCIS Codes:** 040.1880; 040.5160; 040.3060; 040.6808