

超导转变边沿单光子探测器研究进展

王朝阳¹, 梁子华¹, 葛品仕¹, 王亚哲^{2*}, 郑其斌¹

¹上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

²杭州乾晶半导体有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月15日; 发布日期: 2023年3月22日

摘要

单光子探测技术作为推动前沿科技发展的重要支撑技术之一, 在核物理学中微子观测、绿色荧光蛋白检测、用于生物成像的超高分辨率显微镜以及量子信息通信等领域中均发挥着重要作用。因此, 更高性能单光子探测器的研制一直受到极大关注。与传统单光子探测器相比, 超导转变边沿单光子探测器在量子效率、暗计数、能量分辨和光子数分辨等方面提供了更加卓越的性能。本文从超导转变边沿单光子探测器的工作原理、性能测试系统、主要性能及研究进展等方面进行了简要综述, 对该探测器未来的研究具有重要的参考意义。

关键词

超导转变边沿传感器, 单光子探测器, 超导量子干涉仪(SQUID)

Research Progress of Superconducting Transition-Edge Sensor Based Single-Photon Detector

Zhaoyang Wang¹, Zihua Liang¹, Pinshi Ge¹, Yazhe Wang^{2*}, Qibin Zheng¹

¹School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Hangzhou Qianjing Semiconductor Co. Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 15th, 2023; published: Mar. 22nd, 2023

Abstract

As one of the important supporting technologies to promote the development of cutting-edge

*通讯作者。

文章引用: 王朝阳, 梁子华, 葛品仕, 王亚哲, 郑其斌. 超导转变边沿单光子探测器研究进展[J]. 应用物理, 2023, 13(3): 27-37. DOI: 10.12677/app.2023.133004

science and technology, single-photon measurement plays an important role in observing neutrinos in nuclear physics, detecting photons from green fluorescent protein, super-resolution microscopes for bioimaging, and quantum information communication. Therefore, the development of higher-performance single-photon detectors has been receiving great attention. Compared with traditional single-photon detectors, superconducting transition-edge based single-photon detectors provide superior performance in terms of quantum efficiency, dark count rate, energy resolution, and photon number resolving capability. In this paper we review the operating principle, measurement system, main performance and research progress of superconducting transition-edge based single-photon detectors, which has important reference significance for the future research.

Keywords

Superconducting Transition-Edge Sensor, Single Photon Detector, Superconducting Quantum Interference Device

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光子是量子化后的电磁场的一个单模激发[1]。量子思想[2]最早由德国物理学家普朗克在 1900 年提出,用来解释黑体辐射谱[3] [4]。爱因斯坦在 1905 年用它来解释光电效应[5],康普顿在 1923 年用它来解释散射 X 射线的波长漂移[6]。“光子”一词最早是由美国物理学家化学家吉尔伯特·路易斯在 1926 年正式命名[7]。1927 年狄拉克首次实现电磁场的正式量子化[8] [9]。单光子探测器是单光子探测技术的核心器件,是检测极微弱单光子信号的一类器件的统称,属于超低噪声器件,凭借其超高的灵敏度完成对单个光子的检测和计数,被广泛用于探测信号强度只有几个单光子能量级的应用中,基本功能是将光信号转换为电信号[10]。过去,光电倍增管和半导体雪崩光电二极管等被广泛应用于单光子探测[11]。由于光量子信息技术对探测器性能要求极高,传统的单光子探测器已经难以满足需求[12]。近年来,基于超导材料的单光子检测技术得到了快速发展。超导单光子探测器在探测效率[13] [14]、暗计数率[15] [16]、能量分辨力[17]和响应速率等方面提供了卓越的性能。目前有两种类型超导单光子探测器,超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD) [18]和超导转变边缘单光子探测器(superconducting transition-edge sensor, TES)。超导 TES 单光子探测器具有独特的特性,既能够测量特定入射光子的能量,同时也可分辨该光子的数量[19]。基于以上特性,超导 TES 单光子探测器被广泛应用于单光子光谱成像领域。本篇综述中,我们主要介绍超导 TES 单光子探测器原理及其研究进展。

2. TES 探测器工作原理

超导 TES 单光子探测器是一种由超导薄膜和位于薄膜两端的电极组成的热探测器。图 1 描述了超导转变边缘传感器用于光子检测的工作原理。在 TES 中,可通过 TES 薄膜电阻的变化来测量光子的能量值。当一个能量为 E 的光子在温度转变区域内入射到处于平衡态(图 1(a))的 TES 上时,超导薄膜的温度因吸收的光子能量而略有升高。超导薄膜在转变区间内快速地由平衡态转变为正常态,其电阻急剧变大[20]。由于 TES 薄膜电阻的变化和吸收的光子能量成正比[21],从而可以由电阻的变化推断出能量 E 的大小。在一定的时间内,吸收的能量 E 进一步从 TES 薄膜中耗散出去, TES 薄膜温度恢复到原来的平衡状态。

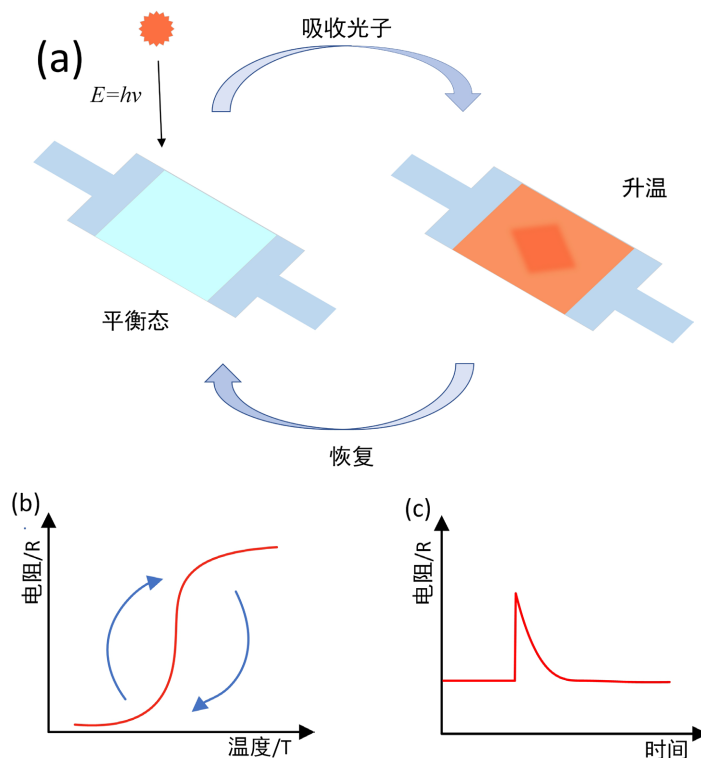


Figure 1. (a) Phase diagram of the TES superconducting state; (b) TES resistance depending on the temperature; (c) Change in resistance with time in case of the absorption of photons

图 1. (a) TES 超导相变转换图; (b) TES 电阻随温度变化曲线; (c) 吸收光子前后, TES 随温度变化曲线

如图 1(c)所示, 超导 TES 单光子探测器在吸收入射的可见光或者近红外光子能量后, 其响应曲线的高度可直接反映出入射光子束的能量信息。光子束的能量与光子的数量成正比, 因此对于固定波长的入射光子束, 可由探测器输出的响应波形解析出具体入射的光子数量[22]。

3. TES 探测器性能测试系统

表征超导 TES 单光子探测器性能的测试系统由 TES 的偏置和读出电路组成。对于低温传感器来说, 传感器类型不同, 所适用的信号读出方法也不相同。超导 TES 单光子探测器的读出总是依赖于超导量子干涉仪(superconducting quantum interference device, SQUID) [23], 其中一个重要的原因就是 SQUID 可以实现超导转变边沿传感器的复用读出, 从而有效节约硬件资源。对于大型传感器阵列, 多路复用技术尤为不可或缺, 因为它不仅可以减少放大器通道的数量还可以降低多像素点读出电路中的机械损耗和热损耗[24] [25]。超导环作为 SQUID 的核心器件, 其作用是将微弱变化的磁通转变为电信号输出[26], 同时也大大减小了前端读出电路的噪声。所以 SQUID 读出系统是 TES 器件读出技术中的一种更为先进的方法。

在实际 TES 实验中使用的测试系统电路如图 2 所示[27]。通常探测器芯片置于由制冷机产生的 mK 温区上, 从而保证探测器处于可正常工作的环境温度。处于室温下的探测器偏置电流源 I 与并联在 TES 薄膜旁的电阻 R_{SH} 共同作用提供偏置电压[28], 从而确保 TES 正常工作。并联电阻 R_{SH} 阻值一般为 m Ω 级别, 而处于超导态的 TES 薄膜阻值 R_{TES} 一般为 Ω 级别, 即 $R_{SH} \ll R_{TES}$ 。由分流原理可知, 超导态 TES

薄膜两端电压 $V_{TES} = I \cdot R_{TES}$ ，即为超导 TES 探测器正常工作时的偏置电压。当光子入射到 TES 薄膜上导致其温度升高后，TES 由超导态转变为正常态， R_{TES} 急速增大，之后 TES 从正常态恢复到平衡态， R_{TES} 又逐渐减小。输入电感线圈中的电流在这一过程中也随之变化，从而引起磁通的改变，并被耦合到 DC-SQUID 系统读出[29]。

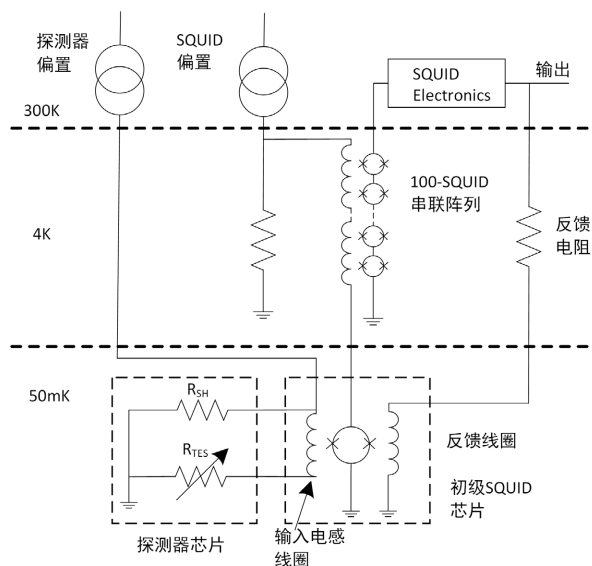


Figure 2. Readout principle of SQUID [27]
图 2. 超导量子干涉仪读出原理[27]

如图 2 所示，DC-SQUID 系统由初级 SQUID 芯片和次级 SQUID 串联阵列组成。输入电感线圈中变化的磁通首先被初级 SQUID 芯片转换为电流信号并输出到次级 SQUID 串联阵列，但是此时的电流信号幅值很小并且信噪比较低。次级 SQUID 串联阵列将小电流信号进一步放大，并对噪声进行平均化处理从而提高信噪比[30]。放大后的低噪声电流信号会被进一步转化为电压信号，然后被后端数据采集电路读出。

4. TES 单光子探测器性能及研究进展

超导 TES 单光子探测器的性能一直是各个研究团队关心的重要指标，目前国内外的研究团队也在为提高超导 TES 单光子探测器性能做出不懈努力。TES 单光子探测器最重要的几个性能分别为探测器的探测效率、响应速度和能量分辨力。本文根据超导 TES 单光子探测器的性能及其研究进展分别进行介绍。

4.1. 探测效率

在各类应用超导 TES 单光子探测器的系统中，系统的能量探测效率(η_{sys})为探测到的能量(E_{det})与入射能量(E_{in})的比值，可由以下公式来表示[31]：

$$\eta_{sys} = E_{det} / E_{in} = \eta_{fiber} * \eta_{absorp} * \eta_{coup} * \eta_{col} \tag{1}$$

其中 η_{fiber} 表示连接到探测器的光纤的传输效率， η_{absorp} 表示探测器对入射到器件上的光子的吸收效率， η_{coup} 表示入射光子与 TES 活性区域的光耦合效率， η_{col} 表示探测器能量收集效率。在应用超导 TES 单光子探测器的系统中， η_{absorp} 作为 TES 的固有特性，对整个系统的探测效率具有决定性影响。探测器研发团队大多以提高 TES 探测器的光子吸收效率的方式来提高整个系统的探测效率。

第一个超导 TES 单光子探测器于 1998 年在斯坦福大学问世，由 Cabrera 等[32]研发制备。Cabrera 等

测量了该探测器的响应速度和能量分辨力,然而并没有测量探测器的光子吸收效率。由于探测器超导薄膜的材料是 W, Cabrera 等推测对波长为 350 nm~1 μm 光子的吸收效率约为 50%。第二年,该课题小组的 Miller 等[33]再次制备了一款超导 W TES 单光子探测器并测得其探测效率为 42%,与 Cabrera 等的推测极为接近,证实较低的探测效率是由于 W 的吸收效率低导致。此后,如何提高探测器光子吸收效率成为各团队的研究关注重点。2000 年,意大利的 Rajteri [34]指出导致吸波材料量子性能损失的主要原因之一是光反射,如 W、Nb、Al,在 0.5~1.5 μm 范围内的反射率都高于 50%。利用合适的反射涂层,在一定波长范围内,可以使探测器的探测效率得到明显提升。2004 年,美国 NIST 的 Rosenberg 等[35]基于上述原理,提出了一种增强 TES 薄膜对光子吸收效率的方法,即将超导薄膜集成在光学谐振腔里。光学谐振腔的结构从上到下分为三层,分别是增透层、W 超导薄膜和高反射率(>98%)的反射镜。Rosenberg 等制备了该光学谐振腔并在 1550 nm 波长进行测试,测得 W 薄膜的光子吸收效率大于 97%。次年,Rosenberg 等[36]制备出首个集成有光学谐振腔的超导 TES 单光子探测器,并进行了更加完善的测试。Rosenberg 等人在 1550 nm 波长下,使用不同光功率的光脉冲对探测器进行测试,测得了极为相近的系统探测效率,平均值为 88.6%。结果表明集成光学谐振腔的超导 TES 单光子探测器不受入射光功率变化的影响,更为重要的是,集成光学谐振腔也没有影响探测器的基本特性,如响应速度和能量分辨力等。

由于金属 Ti 在通信波段具有较低的光反射率[37],基于 Ti 的超导 TES 单光子探测器同样广受关注,比如日本 AIST 的科研团队一直专注于此类探测器的研究。2008 年,Damayanthi 等[33]研制了一款超导 Ti TES 单光子探测器,其探测效率仅有 20%。为提高探测效率,Damayanthi 等单独设计了光学谐振腔,将光子的吸收效率提高到 75%以上。此外,他们还设计仿真了一款多介质增透层的光学谐振腔,仿真结果显示该谐振腔对 1550 nm 光子吸收率达 99%。2009 年,AIST 的 Fukuda 等[38]对光学谐振腔做了进一步优化,展示了两个 Ti TES 单光子探测器,分别在 850 nm 和 1550 nm 波长测量得到系统的探测效率为 81%和 64%。1550 nm 波长的探测效率远低于其吸收效率的原因是受到入射光子和 TES 活性区域的光耦合效率限制。AIST 在光学谐振腔研制方面一直处于世界领先地位。Fukuda 等[20]在 2019 年又构建了一款高吸收效率的光学谐振腔,采用二氧化硅和氧化钽交替叠层制造的光学腔,每一层的厚度约为目标光子的四分之一。该腔结构将光子吸收效率提升到几乎 100%。

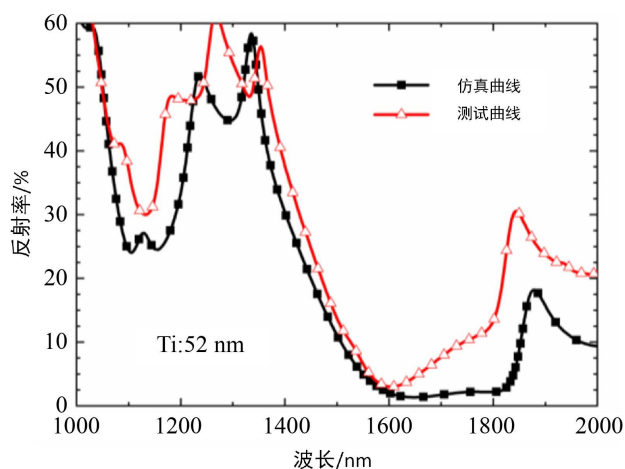


Figure 3. Simulated and measured reflection of optical cavity [39]
图 3. 光学腔对不同波长光的反射率仿真曲线与测试曲线[39]

近几年,国内超导 TES 单光子探测器也取得了长足进展。2018 年,中国科学院紫金山天文台射电天

文重点实验室张文团队[39]制备了一款超导 Ti TES 单光子探测器,并利用光学谐振腔提高光子吸收效率。集成光学谐振腔中的 Ti 薄膜在不同波长对光子的反射率如图 3 所示。可以看出集成光学谐振腔的超导 Ti TES 单光子探测器在 1550 nm 处的反射率小于 5% (反射率与吸收效率之和等于 1)。由于只有不到 4% 的入射光子在反射镜被吸收,这便意味着张文等制备的集成光学谐振腔的 Ti TES 量子效率大于 90%。2020 年,紫金山天文台与中国科学技术大学[31]共同合作,对 Ti TES 光学谐振腔进行了优化。其原理如图 4 所示,反射层和增透层分别集成了 4 和 16 层介电膜,介电膜材料为 SiO_2 和 Ta_2O_5 。通过调整反射层中每层介电膜的厚度,在 1550 nm 波长处达到 95% 光子吸收效率。

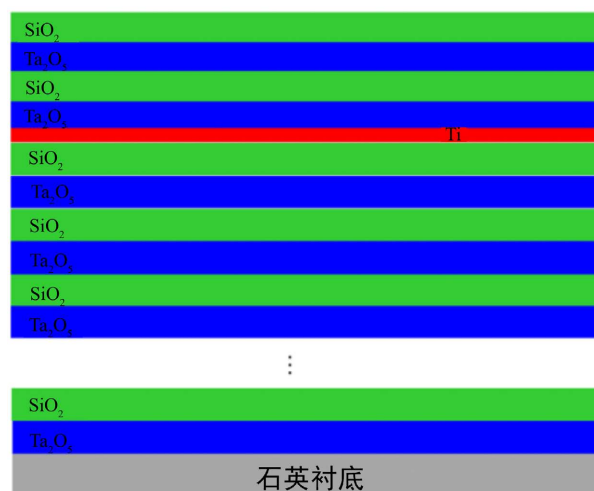


Figure 4. Schematic of the design of optical cavity [31]

图 4. 光学腔的设计原理[31]

综上,由于各种材料的光子吸收效率不同,基于不同超导薄膜材料制备的 TES 单光子探测器的探测效率也各有区别,而且普遍效率低下。可通过对超导薄膜集成光学谐振腔的方法解决这一问题。目前 W、Ti 薄膜集成光学谐振腔后,其光子吸收效率均可达到 95% 以上,且不会影响探测器其他基本特性。

4.2. 响应速度

超导 TES 单光子探测器的响应速度受电时间常数(electrical time constant)和有效恢复时间(effective recovery time)影响。有效恢复时间表示 R_{TES} 电阻从正常态峰值恢复至超导态的过程,在响应曲线上可由其下降沿时间常数表示。电时间常数则为响应信号上升沿时间常数[40]。在实际响应曲线中,上升沿时间常数一般远小于下降沿时间常数,所以探测器的响应速度主要由有效恢复时间决定。下面介绍超导 TES 单光子探测器在有效恢复时间上的研究进展。

1998 年,首个问世的超导 TES 单光子探测器[32]以 W 生长成 TES 薄膜,临界温度 T_c 为 80 mK,尺寸是 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,其有效恢复时间为 60 μs 。2003 年,NIST 的 Miller 等[33]制备了一个薄膜材料同样为 W 的超导 TES 单光子探测器,该探测器的尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$,临界温度为 125 mK,恢复时间缩短至 15 μs 。探测器响应速度的变快,是由于临界温度的提高,即临界温度越高,探测器响应速度越快。但临界温度不是影响探测器响应速度的唯一因素。例如,Rosenberg 等[36]于 2005 年制备的 W TES 单光子探测器,虽然其 110 mK 的临界温度低于上述 Miller 等的探测器,但却获得了短至 5 μs 的恢复时间。这是由于该探测器中 TES 具有较高的热敏参数 α 。热敏参数 α 的增大同样对提高探测器的响应速度具有积极作用[36]。AIST 的 Fukuda 等[41]在 2007 年制备了一个超导 Ti TES 探测器,在响应速度方面性能十

分卓越, 其有效恢复时间短至 300 ns, 位于当时世界范围内的最高水平。2009 年 Lita 等[42]制备出了基于 Hf (铪)的 TES 单光子探测器, 有效恢复时间为 500 ns。该探测器响应速度较快的原因是由于其临界温度较高, T_c 为 195 mK。同年 AIST 的 Fukuda 等[38]发现调节 Ti 薄膜的厚度可改变探测器的临界温度。据此原理, Fukuda 等制备出新的一款超导 Ti TES 单光子探测器, 其临界温度为 444 mK, 有效恢复时间为 190 ns。该探测器刷新了他们在 2007 年创下的响应速度的记录。2013 年, 意大利 INRIM 小组 Lolli 等[17]制备出一个基于 Ti/Au 双层金属薄膜的 TES 单光子探测器, 其 T_c 值为 300 mK, 有效恢复时间为 186 ns。2015 年, 意大利 INPIM 的 Portesi 等[43]制备了面积 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的 Ti TES, 其响应时间分别为 153 ns 和 168 ns。尽管两个探测器的面积差异很大, 但是其响应速度是相当的。2018 年, 中国科学院紫金山天文台的张文等[39]制备了从 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 到 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ 尺寸的 Ti TES 单光子探测器, 平均响应时间约为 4 μs 。比 AIST 的 Fukuda 等制作的 Ti TES 单光子探测器的响应时间要长。张文等人分析其原因可能为 Ti TES 是在涂有 600 nm 厚度的 SiO_2 的硅基板上制备的, 这会阻止热从 TES 活性区域扩散。日本 AIST 的 Fukuda 团队一直在超导 TES 单光子探测器领域居于世界前列, 2019 年 Fukuda 等[20]开发了一款基于超导钛金双层 TES 单光子探测器, Ti 厚度为 20 nm, Au 厚度为 10 nm, 获得了 100 ns 的响应时间, 又一次刷新了该研究小组的记录。2022 年, 中国计量科学研究院团队和意大利 INRIM 小组[44]共同合作研制出了一款基于钛金双层 TES 单光子探测器, 有效面积为 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 。通过改变钛和金薄膜厚度比, 可将临界温度 T_c 从 162 mK 调节到 72 mK。有效时间常数在 95 mK 时为 107 μs 。

综上, TES 单光子探测器的临界温度 T_c 会影响其有效恢复时间。临界温度更高的探测器, 其响应速度往往会更快。但临界温度不是决定响应速度的唯一因素, 探测器热敏参数 α 对响应速度也有影响。

4.3. 能量分辨力和光子数分辨力

理论上, TES 单光子探测器的能量分辨力 ΔE 可以由以下公式[31]求出:

$$\Delta E_{FWHM} = 2.36\sqrt{4k_B T_C^2 (C/\alpha)\sqrt{n/2}} \quad (2)$$

其中 k_B 是玻尔兹曼常数, T_C 是临界温度, C 是 TES 超导薄膜电子系统的热容, α 是热敏参数。但在实验测试中, 能量分辨力往往由可实际测出的探测器响应曲线幅度分布谱推导而来。当入射的光子数目固定, 即入射光脉冲能量不变, TES 单光子探测器的响应曲线幅度呈高斯分布[45]。由于在一定的入射能量范围内, TES 单光子探测器的响应曲线具备优异的线性度, 所以响应曲线幅度高斯分布的中心值与入射光子能量也存在良好的线性关系[45] [46]。由此线性关系, 可将探测器的响应信号幅度分布谱转换为能量分布谱, 其高斯分布的半高全宽即为能量分辨力 ΔE 。

1998 年, Cabrera 等[32]开发出了世界上第一个超导 TES 单光子探测器, 并针对不同波长光子(480、540、600、660、720 和 780 nm)进行测试, 其能量分辨力在 0.15~0.17 eV 之间。2003 年, NIST 的 Miller 等[33]展示了一款临界温度在 125 mK 的超导 W TES 单光子探测。在 1550 nm (单个光子能量为 0.8 eV) 波长下对该探测器进行测试, 得到的能量分辨力为 0.28 eV。2005 年, NIST 的 Rosenberg 等[36]制备出的超导 W TES 单光子探测器由于集成了光学谐振腔的原因, 从而获得了更好的特性, 其能量分辨力为 0.20 eV。2009 年, 日本 AIST 研究小组[38]制备出两个临界温度不同的超导 Ti TES 单光子探测器, 它们的临界温度分别为 444 mK 和 316 mK。两个探测器在 850 nm 和 1550 nm 波长所测得的光子能量分辨力分别为 0.39 eV 和 0.30 eV。意大利 INRIM 研究小组研发的超导 TES 单光子探测器的性能在能量分辨力方面表现尤为突出。2013 年展示的超导 Ti/Au TES 单光子探测器, 其工作温度为 106 mK, 对 1570 nm 光子的能量分辨力为 0.113 eV [17]。2015 年同 INRIM 研究小组的 Portesi 等[43]制备了面积为 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的 Ti TES, 两个探测器的能量分辨力分别为 0.12 eV 和 0.19 eV。继续增大 Ti TES 的面积($5\ \mu\text{m} \times 5$

μm)后,在临界温度为 423 mK 时,能量分辨力为 0.32 eV。Portesi 等人的实验数据表明,能量分辨力并不像 Avella 等[47]预期的那样随 TES 的大小而缩放。2018 年,国内超导 TES 单光子探测器的研制取得了较好的进展,中国科学院紫金山天文台的张文等[39]研制 Ti TES 单光子探测器获得了 0.23 eV 的能量分辨性能,足以探测到 1550 nm 的光子。2020 年,紫金山天文台研究小组[31]制备一款集成光学谐振腔的超导 Ti TES 单光子探测器,虽然提高了探测器光子吸收效率,但是由于存在较大的输出噪声,其能量分辨力仅有 2 eV,远低于理论计算的 0.346 eV 的能量分辨力。2022 年,日本 AIST 的 Hattori 等[48]制备的超导 Ti/Au TES 单光子探测器达到了 0.067 eV 的能量分辨力,再次刷新了 AIST 单光子探测器研发团队的记录,也是当年全球范围内的最高记录。同年,中国计量科学研究院团队和意大利 INRIM 小组[44]共同合作研制出超导 Ti/Au TES 单光子探测器,其能量分辨力为 0.19 eV,在国内研制的超导 TES 单光子探测器中处于领先水平。

综上, TES 单光子探测器的临界温度会影响其能量分辨力,临界温度越高能量分辨力越差,这一点也可以在能量分辨力理论公式上得到印证。除临界温度外, TES 单光子探测器的输出噪声对能量分辨力的影响也不可忽略。

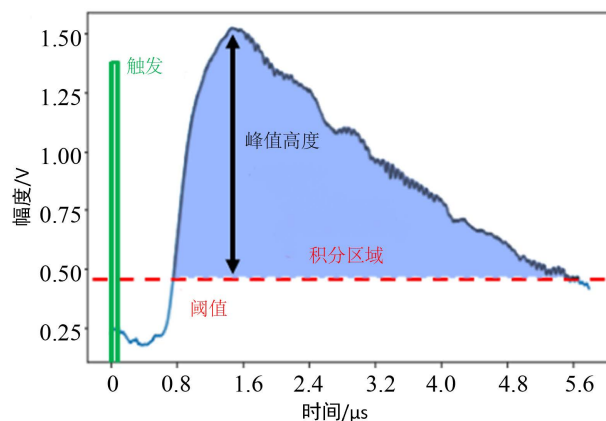


Figure 5. The case pulse after triggering [49]

图 5. 触发后的事例脉冲[49]

传统上,在低光子数(几个光子)响应中,由于信号的峰值与吸收的能量成正比,故而可以根据峰高度计算光子数量。然而在光子数较多的情况下(10 个光子以上),峰高度早已达到饱和,这种测量方式便不再适用。昆士兰大学 Morais 等[45]研究发现虽然在较多光子入射时,波形峰值达到饱和,但是当 TES 薄膜重新冷却到超导状态的过程中,电阻继续变化,这表明在峰值之后还包含有用信息。如图 5 所示,在预先定义的噪声阈值以上的区域对信号进行积分,所得峰面积比仅靠峰值高度可以分辨出更多的光子。2020 年, Morais 等[45]基于此原理制备了一套单光子探测分析系统,将超导 TES 单光子探测器的光子数分辨能力提高到 16 个光子。2022 年,弗吉尼亚大学的 Eaton 等[50]在单个 TES 探测器的光子分辨力方面取得了进一步提升,达到了 37 个光子水平。之后,他们将三个探测器级联到一个系统中,实现了对 0~100 光子的分辨。这是到目前为止可分辨光子数最多的单光子探测系统。

5. 结论

超导 TES 单光子探测器凭借其卓越的性能在各类单光子探测器中脱颖而出,在高分辨率生物成像、量子通信、量子光学和天文观测等研究领域具有重要的应用价值。超导 TES 单光子探测器最好的能量分

辨力已经达到了 0.067 eV。通过集成光学谐振腔，超导 TES 单光子探测器在 850 nm、1550 nm 等多个波长下吸收效率已经接近 100%。单个探测器对入射光子数的分辨能力已经高达 37 个，多个探测器级联组成的探测系统更是可分辨多达 100 个光子。随着近年来对超导 TES 探测器更加深入的研究，它的响应速度同样取得了大幅度的提高，目前响应速度最快的探测器已达到 100 ns。超导 TES 单光子探测器的能量分辨力和响应速度都与临界温度 T_C 有关，临界温度越低能量分辨力越高，但是响应速度也会随之变慢。因此，未来还需就如何在维持高能量分辨力的前提下，提高探测器响应速度进行深入研究。

参考文献

- [1] Cohen-Tannoudji, C., Dupont-Roc, J. and Grynberg, G. (1997) *Photons and Atoms-Introduction to Quantum Electrodynamics*. Wiley-VCH, Hoboken, 486. <https://doi.org/10.1002/9783527618422>
- [2] Loudon, R. (1974) *The Quantum Theory of Light*. *American Journal of Physics*, **42**, 1041. <https://doi.org/10.1063/1.3128806>
- [3] Miller, M.M. and Mishkin, E.A. (1966) Characteristic States of the Electromagnetic Radiation Field. *Physical Review*, **152**, 1110. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.152.1110>
- [4] Ter Haar, D. (2016) *The Old Quantum Theory*. Elsevier, Amsterdam.
- [5] Arons, A.B. and Peppard, M.B. (1965) Einstein's Proposal of the Photon Concept—A Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905. *American Journal of Physics*, **33**, 367-374. <https://doi.org/10.1119/1.1971542>
- [6] Compton, A.H. (1923) A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements. *Physical Review*, **21**, 483. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483>
- [7] Lewis, G.N. (1926) The Conservation of Photons. *Nature*, **118**, 874-875. <https://doi.org/10.1038/118874a0>
- [8] Dirac, P.A.M. (1927) The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **114**, 243-265. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0039>
- [9] Fermi, E. (1932) Quantum Theory of Radiation. *Reviews of Modern Physics*, **4**, 87. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.4.87>
- [10] 程碑彤, 代干, 谢修敏, 等. 单光子探测器的研究进展[J]. 激光技术, 2022, 46(5): 601-609.
- [11] 梁创, 廖静, 梁冰, 等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器[J]. 光子学报, 2000, 29(12): 1142-1147.
- [12] 尤立星. 光量子信息利器——超导纳米线单光子探测器[J]. 物理, 2021, 50(10): 678-683.
- [13] Miller, A.J., Lita, A.E., Calkins, B., *et al.* (2011) Compact Cryogenic Self-Aligning Fiber-to-Detector Coupling with Losses below One Percent. *Optics Express*, **19**, 9102-9110. <https://doi.org/10.1364/OE.19.009102>
- [14] Fukuda, D., Fujii, G., Numata, T., *et al.* (2011) Titanium-Based Transition-Edge Photon Number Resolving Detector with 98% Detection Efficiency with Index-Matched Small-Gap Fiber Coupling. *Optics Express*, **19**, 870-875. <https://doi.org/10.1364/OE.19.009102>
- [15] Fukuda, D., Fujii, G., Numata, T., *et al.* (2010) Titanium Superconducting Photon-Number-Resolving Detector. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **21**, 241-245. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2089953>
- [16] Miller, A.J., Nam, S.W., Martinis, J.M., *et al.* (2003) Demonstration of a Low-Noise Near-Infrared Photon Counter with Multiphoton Discrimination. *Applied Physics Letters*, **83**, 791-793. <https://doi.org/10.1063/1.1596723>
- [17] Lolli, L., Taralli, E., Portesi, C., *et al.* (2013) High Intrinsic Energy Resolution Photon Number Resolving Detectors. *Applied Physics Letters*, **103**, Article ID: 041107. <https://doi.org/10.1063/1.4815922>
- [18] Paolucci, F., Buccheri, V., Germanese, G., *et al.* (2020) Development of Highly Sensitive Nanoscale Transition Edge Sensors for Gigahertz Astronomy and Dark Matter Search. *Journal of Applied Physics*, **128**, Article ID: 194502. <https://doi.org/10.1063/5.0021996>
- [19] Hummatov, R., Adams, J.S., Bandler, S.R., *et al.* (2020) Quantum Efficiency Study and Reflectivity Enhancement of Au/Bi Absorbers. *Journal of Low Temperature Physics*, **199**, 393-400. <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02424-3>
- [20] Fukuda, D. (2019) Single-Photon Measurement Techniques with a Superconducting Transition Edge Sensor. *IEICE Transactions on Electronics*, **102**, 230-234. <https://doi.org/10.1587/transele.2018SDI0001>
- [21] Harder, G., Bartley, T.J., Lita, A.E., *et al.* (2016) Single-Mode Parametric-Down-Conversion States with 50 Photons as a Source for Mesoscopic Quantum Optics. *Physical Review Letters*, **116**, Article ID: 143601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.143601>

- [22] Lita, A.E., Reddy, D.V., Verma, V.B., *et al.* (2022) Development of Superconducting Single-Photon and Photon-Number Resolving Detectors for Quantum Applications. *Journal of Lightwave Technology*, **40**, 7578-7597. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3195000>
- [23] Hirayama, F., Kohjiro, S., Fukuda, D., *et al.* (2013) Microwave SQUID Multiplexer for TES Readout. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **23**, Article ID: 2500405. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2237474>
- [24] Mitsuda, K., Fujimoto, R., Miyazaki, T., *et al.* (1999) Multi-Pixel Readout of Transition-Edge Sensors Using a Multi-Input SQUID. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **436**, 252-255. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00630-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00630-0)
- [25] Yamasaki, N.Y., Masui, K., Mitsuda, K., *et al.* (2006) Design of Frequency Domain Multiplexing of TES Signals by Multi-Input SQUIDS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **559**, 790-792. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.12.141>
- [26] Levi, M., Hoppensteadt, F.C. and Miranker, W.L. (1978) Dynamics of the Josephson Junction. *Quarterly of Applied Mathematics*, **36**, 167-198. <https://doi.org/10.1090/qam/484023>
- [27] Irwin, K.D. and Hilton, G.C. (2005) Transition-Edge Sensors. In: Enss, C., Ed., *Cryogenic Particle Detection*, Springer, Berlin, 63-150. https://doi.org/10.1007/10933596_3
- [28] 姜稣仆. 面向超导转变边缘探测器高精度可控电流源的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2021. <https://doi.org/10.27585/d.cnki.gkshs.2021.000071>
- [29] Fominov, Y.V. and Mikhailov, D.S. (2022) Asymmetric Higher-Harmonic SQUID as a Josephson Diode. *Physical Review B*, **106**, Article ID: 134514. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.134514>
- [30] Schuster, C., Wegner, M., Enss, C., *et al.* (2022) Flux Ramp Modulation Based Hybrid Microwave SQUID Multiplexer. *Applied Physics Letters*, **120**, Article ID: 162601. <https://doi.org/10.1063/5.0087994>
- [31] Geng, Y., Zhang, W., Li, P.Z., *et al.* (2020) Improving Energy Detection Efficiency of Ti-Based Superconducting Transition-Edge Sensors with Optical Cavity. *Journal of Low Temperature Physics*, **199**, 556-562. <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02383-9>
- [32] Cabrera, B., Clarke, R.M., Colling, P., *et al.* (1998) Detection of Single Infrared, Optical, and Ultraviolet Photons Using Superconducting Transition Edge Sensors. *Applied Physics Letters*, **73**, 735-737. <https://doi.org/10.1063/1.121984>
- [33] Miller, A.J., Cabrera, B., Clarke, R.M., *et al.* (1999) Transition Edge Sensors as Single Photon Detectors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **9**, 4205-4208. <https://doi.org/10.1109/77.783952>
- [34] Rajteri, M., Rastello, M.L. and Monticone, E. (2000) Antireflection Coatings for Superconducting Photodetectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **444**, 461-464. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)01423-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)01423-0)
- [35] Rosenberg, D., Nam, S.W., Miller, A.J., *et al.* (2004) Near-Unity Absorption of Near-Infrared Light in Tungsten Films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **520**, 537-540. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.308>
- [36] Rosenberg, D., Lita, A.E., Miller, A.J., *et al.* (2005) Performance of Photon-Number Resolving Transition-Edge Sensors with Integrated 1550 nm Resonant Cavities. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **15**, 575-578. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.849925>
- [37] Damayanthi, R.M.T., Fukuda, D., Takahashi, H., *et al.* (2008) Design of an Optical Absorption Cavity for Titanium Transition Edge Sensors. *Journal of Low Temperature Physics*, **151**, 46-50. <https://doi.org/10.1007/s10909-007-9707-0>
- [38] Fukuda, D., Fujii, G., Numata, T., *et al.* (2009) Photon Number Resolving Detection with High Speed and High Quantum Efficiency. *Metrologia*, **46**, S288. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/S29>
- [39] Zhang, W., Geng, Y., Wang, Z., *et al.* (2019) Development of Titanium-Based Transition-Edge Single-Photon Detector. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **29**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2948993>
- [40] 张青雅, 董文慧, 何根芳, 等. 超导转变边缘沿单光子探测器原理与研究进展[J]. 物理学报, 2014(20): 14.
- [41] Fukuda, D., Damayanthi, R.M.T., Yoshizawa, A., *et al.* (2007) Titanium Based Transition Edge Microcalorimeters for Optical Photon Measurements. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **17**, 259-262. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.897393>
- [42] Lita, A.E., Calkins, B., Pellochoud, L.A., *et al.* (2009) High-Efficiency Photon-Number-Resolving Detectors Based on Hafnium Transition-Edge Sensors. *AIP Conference Proceedings*, **1185**, 351-354. <https://doi.org/10.1063/1.3292350>
- [43] Portesi, C., Taralli, E., Lolli, L., *et al.* (2014) Fabrication and Characterization of Fast TESs with Small Area for Single Photon Counting. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **25**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2367455>
- [44] Xu, X., Rajteri, M., Li, J., *et al.* (2022) Investigation of Ti/Au Transition-Edge Sensors for Single-Photon Detection.

-
- Journal of Low Temperature Physics*, **209**, 372-378. <https://doi.org/10.1007/s10909-022-02818-5>
- [45] Lolli, L., Taralli, E. and Rajteri, M. (2012) Ti/Au TES to Discriminate Single Photons. *Journal of Low Temperature Physics*, **167**, 803-808. <https://doi.org/10.1007/s10909-012-0473-2>
- [46] Lolli, L., Taralli, E., Rajteri, M., *et al.* (2013) Characterization of Optical Fast Transition-Edge Sensors with Optimized Fiber Coupling. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **23**, Article ID: 2100904. <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2238981>
- [47] Avella, A., Brida, G., Degiovanni, I.P., *et al.* (2011) Self Consistent, Absolute Calibration Technique for Photon Number Resolving Detectors. *Optics Express*, **19**, 23249-23257. <https://doi.org/10.1364/OE.19.023249>
- [48] Hattori, K., Konno, T., Miura, Y., *et al.* (2022) An Optical Transition-Edge Sensor with High Energy Resolution. *Superconductor Science and Technology*, **35**, Article ID: 095002. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac7e7b>
- [49] Morais, L.A., Weinhold, T., de Almeida, M.P., *et al.* (2020) Precisely Determining Photon-Number in Real-Time.
- [50] Eaton, M., Hossameldin, A., Birrittella, R.J., *et al.* (2022) Resolving 100 Photons and Quantum Generation of Unbiased Random Numbers. *Nature Photonics*, **17**, 106-111. <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01105-9>