

“光子慧眼”：超导纳米线单光子探测器

张伟君

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 200050)

在我们日常生活中,我们所看到的光是由无数微小粒子——光子组成的,而单个光子的能量是如此微小,以至于我们肉眼不易察觉。然而,光子作为信息的重要载体,扮演着不可或缺的角色。超导纳米线单光子探测器(SNSPD)如同一双能够看到单光子的“慧眼”,使科学家不仅能够精确地知道每个光子到达的时间,还能够准确地数出光子的数量。在探索光量子的神秘世界上,SNSPD是科学家们的重要助手,帮助他们进行多种有趣的研究并实现新的科学发现。本文将深入浅出地探讨SNSPD探测器的原理和性能、制造封装技术以及发展趋势,最后介绍SNSPD在光量子科学技术、深空通信、生物医学等领域的应用。

一、故事的开始

光子纠缠和超导性是物理学中两个最重要的量子现象。光子是光的量子,是电磁辐射的基本单位。光子的概念最早由德国物理学家普朗克(M. Planck)在1900年提出,作为解释黑体辐射的量子假设。普朗克发现,为了解释黑体辐射的特性,电磁辐射的能量必须以离散的量子形式传播,即光子。1905年,爱因斯坦(A. Einstein)进一步发展了光子的概念,并用它来解释光电效应,从而证实了光子的实际存在。这一发现为量子力学的诞生打下了坚实的基础,并对现代物理学的发展产生了深远的影响。单光子的能量十分微弱,比如一个波长为1550纳米的近红外波段光子,它的能量约为 1.3×10^{-19} 焦耳(焦耳是一个很小的能量单位,比如一粒芝麻的热量约为87焦耳)。

人类的眼睛极为敏感,但是否能够观察到单个

光子呢?答案是肯定的。在1942年,科学家进行了一项具有里程碑意义的实验^[1],探究人眼的视觉极限。研究表明,当人类眼睛充分适应黑暗环境后,它们能够辨别出极微弱的光信号,其数量可低至5~9个光子。近年的研究进一步证明,人类的视网膜细胞能够对单个光子做出反应,但为了在大脑中形成有效的视觉信号,至少需要约6个单个光子,以触发神经网络的准确判断。尽管人眼是高灵敏度的光子探测器,但其探测效率小于10%,而且反应速度较慢(大约在100毫秒级别),因此难以用于处理高速、复杂的任务。为此,科学家们研发了单光子探测器,最早的是使用半导体材料研制的光电倍增管(PMT)、雪崩光电二极管(APD)等,它们都是基于光电效应的原理进行工作的。

单光子探测器是连接经典世界和量子世界的桥梁。随着研究的深入,人们发现两个或多个光子之间能发生量子纠缠,它们的状态存在着强烈的关联,不能独立描述;并且量子纠缠还具有“鬼魅般”的超距离相互作用(图1)。量子纠缠是量子力学的一个主要特征,这在经典力学中不存在,通过对这

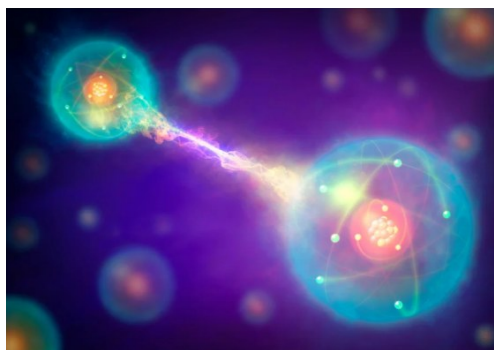


图1 两个量子物质之间的纠缠(概念图,来源 Sicence Photo Library/Alamy Stock Photo)

量子力学基本问题的研究,科学家们拉开量子信息技术的序幕。2022年,诺贝尔物理学奖授予法国的阿斯佩(A. Aspect)、美国的克劳泽(J. Clauser)和奥地利的塞林格(A. Zeilinger),以表彰他们在光子纠缠实验、验证贝尔不等式的违反和量子信息科学方面的开创性贡献。量子信息科学就像是科技界的“新星”,带来了一场技术和理论的革命,不仅开启了量子保密通信和量子计算的新篇章,还为传感、模拟和基础物理等多个领域打开了全新的大门。随着量子信息技术的飞速进步,传统的半导体单光子探测器在高效率、低噪声地探测单光子方面遇到了挑战,超导单光子探测器则应运而生。

超导单光子探测器的故事开始于奇特、非常酷(cool)的超导领域。超导,顾名思义,即“超级导体(superconductor)”。1911年,荷兰物理学家海克·昂尼斯(H. Onnes)在研究材料电阻在低温下变化时,发现金属汞在冷却到非常低的温度时(称为临界温度),电阻会突然消失,实现无电阻的导电现象(图2(a))。这一现象被称为超导转变,零电阻的特性被称为超导性。由于超导性的发现,昂尼斯很快获得了1913年的诺贝尔物理学奖。1933年,德国的迈斯纳(W. Meissner)等发现当超导体被冷却到其临界温度以下时,它会完全排斥磁场,这种现象被称

为迈斯纳效应(图2(b)),这是判断超导体的另一个关键特征。超导悬浮列车就是基于迈斯纳效应的原理实现的。随后,科学家们陆续发现了许多种超导材料,并且不断地提高了超导临界温度,但对于超导产生的根本机制,一直无法给出解释。直到1957年,美国的巴丁(J. Bardeen)、库珀(L. Cooper)和施里弗(R. Schrieffer)等提出了基于电子配对(Cooper pairs)、凝聚(condensation)的BCS理论,解释了电子如何由于晶格振动而形成库珀对,以及这些库珀对如何在低温下经历量子力学凝聚,从而形成超导状态。BCS理论成功解释了超导现象的微观机制,为后续研究和超导材料的开发提供了重要的理论基础。

超导单光子探测器,因为工作在低温下,温度涨落带来的热噪声会被强烈地抑制,天然地具有极低的探测噪声。因此,在需求高信噪比探测的领域,超导探测器始终占有重要地位。超导单光子探测器的种类也有不少,例如超导转变边沿传感器(TES, 1940年发现效应,1995年实现应用)、超导隧道结探测器(STJ, 1962年发现,20世纪90年代实现应用)以及近年来备受关注的SNSPD(2001年发明,2005年实现应用)。然而,由于性能、工作条件和成本等方面的限制, TES、STJ尚未能够实现大规模应用。

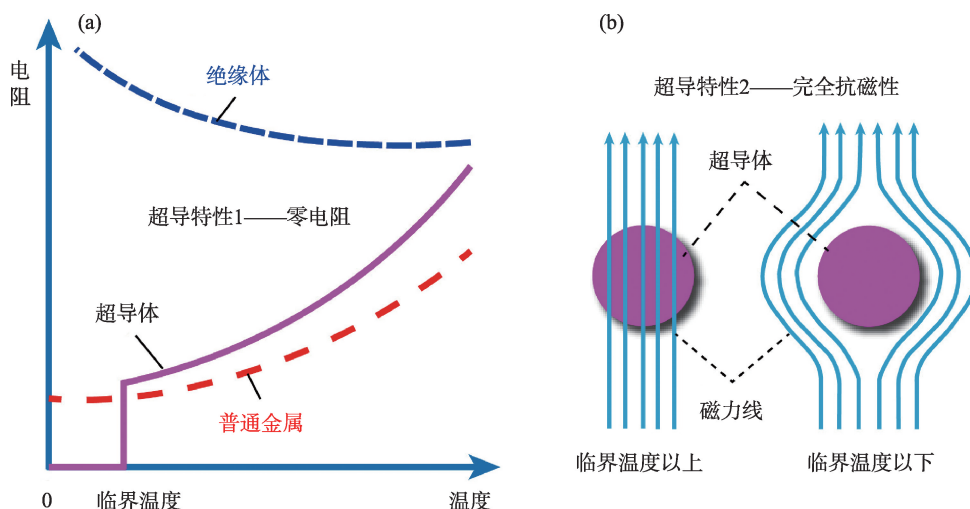


图2 超导特性示意图(a)不同材料的电阻随温度的变化曲线,其中超导体发生超导转变,并呈现出零电阻现象;(b)超导完全抗磁性:磁力线被完全排出

二、什么是SNSPD

超导纳米线单光子探测器(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector, 简称 SNSPD 或 SSPD)是一种高性能、高灵敏度的光子探测器。最初是由莫斯科国立师范大学戈尔兹曼(G. Gotzmann)等于2001年发明的^[2]。通常, SNSPD使用NbN(氮化铌)、WSi(硅化钨)等超导材料的超薄薄膜(厚度仅为3~10纳米,其中1纳米为 10^{-9} 米,相当于头发丝直径的六万分之一),经微纳米加工技术制备成宽度约为100纳米的线条,以提高探测器的灵敏度和探测响应速度;并采用蜿蜒曲折线的形式构成探测器的光敏面,以更高效地“捕捉”入射的光子(图3)。当纳米线被冷却到低于其临界温度时,它们将进入超导状态。

SNSPD就像是一个可以看到光量子的“眼睛”,

它的本质是一种将微弱的光子信号转化为可测量的电信号的装置。它的探测原理是利用超导纳米线偏置在临界电流附近时,对单个光子的吸收,非常敏感且响应快速。即,当一个光子被纳米线条某个位置吸收时,它的能量会破坏数百个库珀对(百飞秒时间尺度下的电子-电子散射过程),产生一个局域的电阻态(“热点”);在电流的辅助加热作用下,热点会继续长大,最终形成横跨纳米线条截面的完整电阻区域;使得偏置在纳米线的电流会被排出到读出电路上,产生一个可测量的电脉冲信号,表明探测到了一个光子;随后,纳米线条上的热点会通过基底散热,重新恢复到超导状态,等待下一个光子的到来(图4)。

SNSPD的探测机理使得它具有高内量子效率(吸收光子后触发光响应脉冲的概率)、高探测速度、低噪声的天然特性。通常, SNSPD对可见光-近红

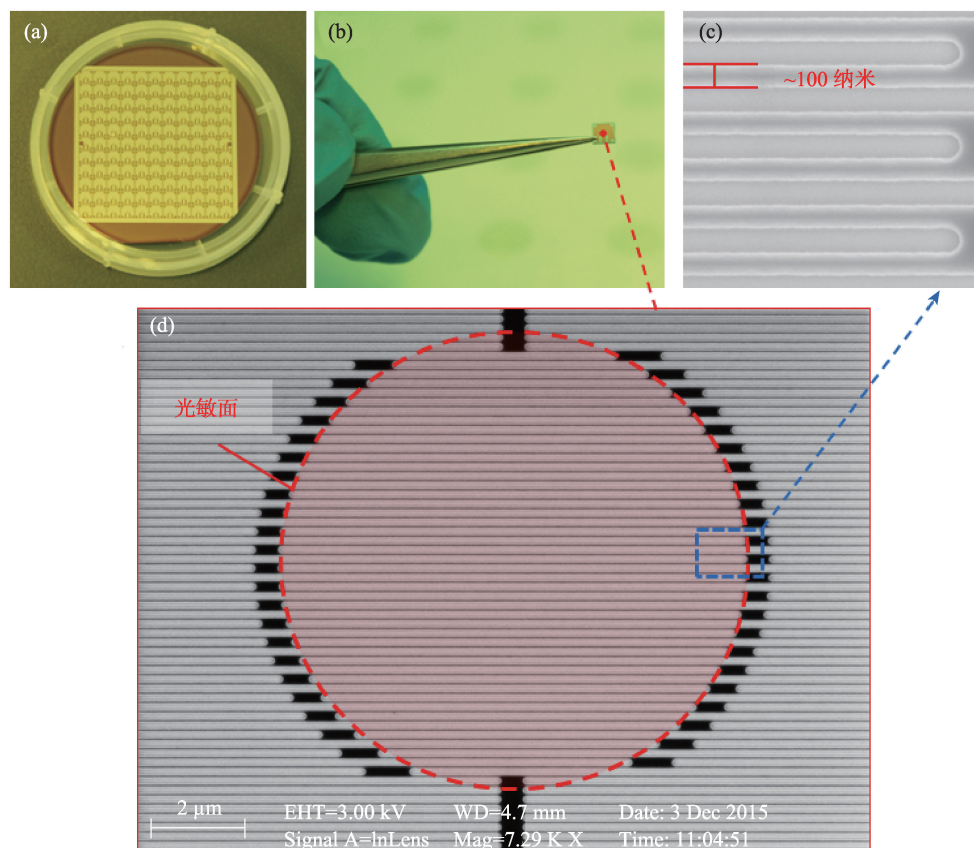


图3 SNSPD的芯片和纳米线结构的实物照片(a)两英寸晶圆;(b)单个芯片,边长约为3毫米;(c)曲折纳米线的局部放大照片;(d)光敏面的SEM照片

吸收了部分的可见光。此外, NbN 薄膜还有很多有趣的特性, 比如, 高度无序的 NbN 薄膜会呈现出绝缘状态, 甚至会变成超级绝缘体。

从 NbN、NbTiN(氮化钛铌)、WSi、MoSi(硅化钨)、MoGe(钼锗合金)、二硼化镁 (MgB_2), 再到高温超导材料, 研究人员不断探索着最适合 SNSPD 的材料。从应用的角度来看, 最理想的 SNSPD 材料应该具有高内量子效率(高光子探测灵敏度)、高工作温度、高工作电流等, 这样有助于实现高探测效率、降低制冷机成本、实现高电脉冲信号的信噪比(以获取更小的时间抖动)等。

然而, 随着研究的深入, 科学家们发现有时理想与现实之间存在一定的差距, 就像追求“鱼与熊掌不可兼得”一样。如何以最小的(可接受的)代价来实现目标的性能, 科学家们需要不断地选择、权衡和深入研究。

比如, 研究者发现超导薄膜的无序化(比如晶格缺陷), 甚至非晶化, 能够显著地提升 SNSPD 的高内量子效率, 但是会带来一些负面的效果, 比如降低薄膜超导临界温度和器件工作电流。2011年, 美国 NIST 研究者使用非晶的 WSi 材料, 实现 SNSPD 在近红外光波段光子的高灵敏度探测, 探测器的内量子效率接近于 100%, 不过探测器需要工作在 0.2K 的极低温下。2019年, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所(以下简称“上海微系统

所”)的科学家, 发现使用氦离子辐照技术处理 NbN 薄膜, 人工引入密度可控的空位缺陷, 能显著地提升 NbN 薄膜在更高工作温度($\sim 2.5K$)的光子探测灵敏度^[3]。

2023年, 美国 JPL 的研究者通过调节 WSi 材料的化学计量配比, 实现了迄今探测波长最长的中红外波段 SNSPD, 将探测范围扩展至 29 微米, 工作温度 $< 0.5K$ 。2023年, 美国 MIT 的研究者使用机械剥离的高温超导 BSCO 薄层, 经过氦离子辐照处理后, 实现了工作温度在 20K 的、具有红外单个探测能力的 SNSPD, 展示了向更高工作温度迈进的可能性。

四、SNSPD 有哪些关键性能指标及重要进展

系统探测效率

系统探测效率, 指探测到进入探测器系统的单光子的概率, 它通常为内量子效率、光吸收率和光耦合效率三者的乘积, 是 SNSPD 的最核心指标。要实现高的系统探测效率, 需要三者同时达到最优。而其中, “吸收是关键”。一般的, 5 纳米厚的 NbN 薄膜, 在近红外波段, 对光的吸收率为 10%~30%, 如与光学反射腔集成则能显著增强光吸收效率(图 6)。理论计算表明, 通过光学反射腔结构设

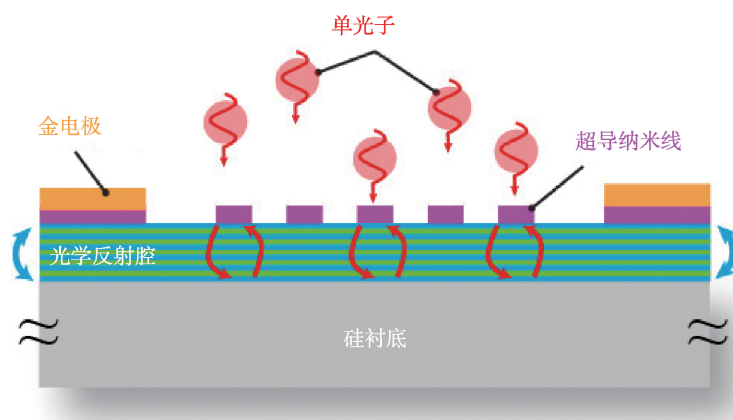


图 6 SNSPD 光学结构的截面示意图, 其中多层介质构成光学反射腔。光学反射腔, 是一种光学多层介质结构, 光子入射后腔后, 会在腔内来回反射; 如果腔内存在吸收材料, 光子在反射过程中会逐渐地被吸收掉

计,能将SNSPD的吸收率提升至接近100%。

2013年,美国NIST的研究者成功地利用非晶态WSi材料和光学双层腔结构设计,首次实现了系统探测效率达到93%的SNSPD,工作温度约为0.12K。这样的探测效率意味着,进入探测系统中100个光子的情况下,SNSPD可以探测到93个,仅丢失了7个光子。对于单光子探测器来说,这是一个十分出色的性能。然而,这一高效率的实现并非没有代价。研究者使用的WSi材料的超导转变温度和工作电流都显著地低于NbN材料,这要求他们的SNSPD必须在昂贵的、极低温系统中运行,这在一定程度上限制了该类探测器的应用范围。

到了2017年,上海微系统所的科学家采用细而厚的NbN纳米线条设计,结合介质镜面腔结构(一种DBR光学腔),成功实现了更高工作温度(>2K)、更大工作电流的SNSPD,其系统探测效率也超过了92%,为实用化SNSPD指明了方向^[4]。比如,目前市场上销售的商用SNSPD大多是由NbN系材料制备的。2020年,美国、中国和荷兰的科学家分别独立地实现了系统探测效率超过98%的新突破,这已经非常接近理想水平。

暗计数率

SNSPD的探测噪声使用暗计数率来描述,它是指在不存在信号光子时,由热噪声或其他源引起的错误探测计数率,减少暗计数率对于提高SNSPD探测信噪比至关重要。通常SNSPD暗计数率小于100个每秒,主要由背景辐射导致的暗计数贡献。

探测速度

SNSPD的探测速度,使用最大计数率来描述。在高速光通信和光子量子计算等领域,探测速度影响着信息传输和处理的最大速度。借助并行纳米线阵列的方式,SNSPD最大计数率可超过1Gcps(即 10^9 个每秒)。

时间抖动

SNSPD的时间抖动,是指探测器对周期光信号产生的电脉冲信号的时间位置波动,通常是相对于参考时钟信号而言。较低的时间抖动值,表明探测器的时间分辨率高,这在量子保密通信、时间分辨光谱学等应用至关重要。目前,SNSPD最小时间抖动已经降低到了3皮秒(10^{-12} 秒)级别。

新进展和趋势

科学家们正在积极探索更多通道和集成读出的SNSPD新技术,旨在在单一设备中实现多个探测单元,从而增强系统的灵活性和功能性。此外,由于SNSPD探测器的尺寸非常小,并且能够与多种基底良好地兼容,当前的研究重要趋势之一,是将SNSPD与波导进行集成(图7(a)),再进一步与其他量子技术集成(如量子光源和量子存储器等),创建所谓的“集成光量子芯片”。这种集成方法为量子计算和通信应用提供了更为紧凑、功能强大且性能卓越的解决方案,推动着光子量子技术向实用化发展。

与此同时,科学家们对SNSPD的探测机理的理解也在不断地加深。2018年,俄罗斯科学家成功

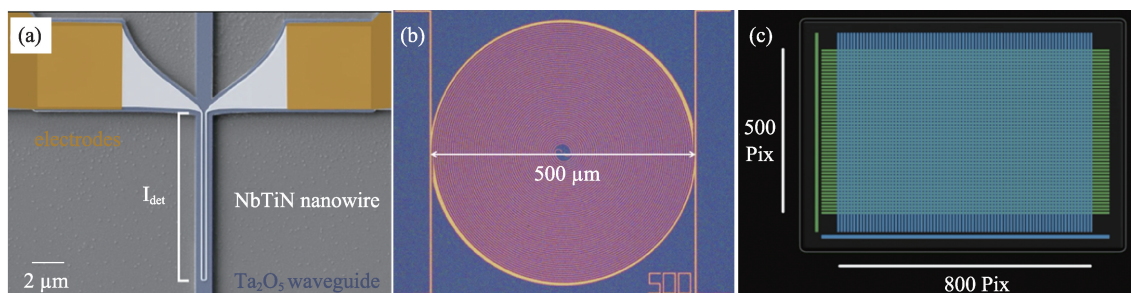


图7 SNSPD新趋势:波导集成(来源 doi.org/10.1038/s41598-020-74426-w);大光敏面的微带探测器;40万像素单光子相机(来源美国NIST, doi.org/10.1038/s41586-023-06550-2)

地从理论和实验两方面证实了线宽至微米级的超导条带仍具备探测单个光子的能力。这一新型探测器被命名为“超导微米带单光子探测器”(SMSPD)(图 7(b))。与传统的 SNSPD 相比, SMSPD 的探测机制有所差异。在宽条带中, 当施加的偏置电流接近于超导拆对电流时, 微弱的光子能量就能触发宽条带中形成热点, 触发光子响应。微米级的线宽使得采用光学曝光工艺制备 SMSPD 成为现实。相较于电子束曝光, 光学曝光在大面积制造时具有更高的制备效率和生产速度, 能够显著提高器件的制造产量, 同时也有助于降低芯片成本。

此外, SMSPD 技术为制造超大光敏面积的探测器打开了新的路径。目前, 最大单个 SMSPD 光敏面积已超过 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}^{[9]}$ 。2023 年, 美国 NIST、JPL 等团队成功开发出首个拥有 40 万像素的超导单光子相机, 相较于之前最大的 1024 像素 SNSPD 阵列, 其像素数量提升了约 400 倍(图 7(c))。更值得一提的是, 该相机仅需 8 根低温同轴线来作为电流偏置和信号读取。这一重要突破为天文观测、生物成像等多种应用领域带来了全新的发展机遇。

五、如何制造和封装 SNSPD

SNSPD 制造是一个复杂而又精密的过程(图 8), 需要使用高精度的纳米加工工艺, 以确保纳米线条的几何尺寸(厚度、宽度)的高度一致性。这一过程

通常从超导薄膜材料的沉积开始, 比如, 使用磁控溅射系统在适当的基底上沉积超导 NbN 薄膜。在完成薄膜沉积后, 需要使用“光刻”和“刻蚀”工艺来实现 SNSPD 的图形化(比如制造电极、纳米线等功能单元)。

“光刻”(optical lithography)是一种制造微芯片的技术, 它允许我们把微小的图案转移到硅片或其他材料上, 这些图案最终构成了微电子设备中的电路和功能单元。这个过程通常使用一种叫做光刻胶的特殊化学物质。首先, 一块平坦的硅片(或晶圆)被涂上一层光刻胶。然后, 使用一种称为掩模的模板, 通过光照把具有特定图案的光投影到光刻胶上。这个图案由微影模式形成, 可以设计成各种形状, 例如电路中的导线和电极等。一旦光照完成, 光刻胶就会根据光照的模式发生化学变化, 使得胶层中的一部分变得容易溶解。接下来, 通过一个叫做显影的步骤, 溶解了的部分被清除掉, 留下了所需的图案。这之后, 硅片经过一系列的化学和物理处理, 通常采用“刻蚀”(etching)工艺, 将图案转移到硅片表面或内部, 最终形成微电子器件的结构。

根据使用光源波长不同, 光刻有紫外曝光(UV)、极紫外曝光(EUV)等。与光刻稍有不同, 电子束曝光(EBL, Electron-beam lithography)是使用高能电子扫描的方式来实现电子抗蚀胶的图形化, 因此它的曝光耗时一般较长, 主要用在科学研究中, 曝光精

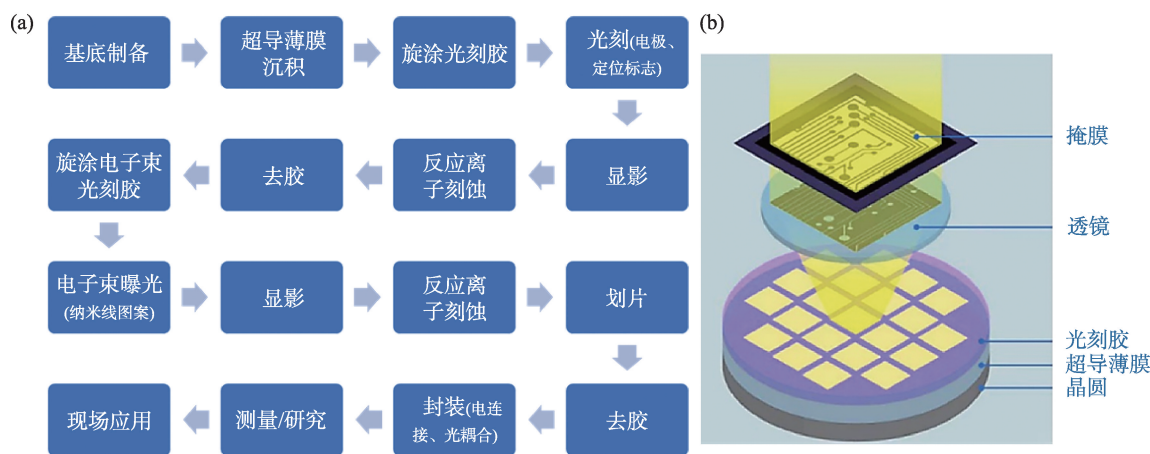


图 8 (a) SNSPD 的制造到应用的简化流程图; (b) “光刻”原理示意图(来源 Samsung 公司网站)

度可达10纳米以下。

在SNSPD芯片制造过程中,使用紫外曝光工艺形成电极图案、使用反应离子刻蚀将光刻胶的图案转移到NbN薄膜上,形成大块电极区;使用电子束曝光、反应离子刻蚀来制备纳米线的图案。最终形成器件的微纳米结构。通常将器件的曝光图形重复曝光在大片的晶圆上,以提高制造效率和芯片良率。

在芯片微纳米加工完成后,接下来就是将大片晶圆中的芯片单元精确切割成独立的芯片,然后使用超声引线仪将芯片电极与封装盒上的电路精确连接。

随后的光纤封装和光耦合对准是一个有趣而重要的环节,它确保光纤入射的光斑与器件的光敏面完美对准,这一过程称为“光耦合”(图9)。光耦合效率,是指入射光子被探测器光敏面接收的概率。高的光耦合效率,是实现高系统探测效率的关键因素。它的挑战主要在于耦合精度以及确保在低温工作环境下仍然具有稳定可靠的耦合效果。比如,直径约10微米的大小的光斑要精确地与15微米左右的光敏面对准,而对准的偏差要小于3微米以下。通常情况下,这个过程在室温环境下进行,借助光学显微镜观察,使用精准移动的对准位移平台来完成。当然,为了方便地对准,美国NIST的研究者发明了巧妙的自对准技术,通过将芯片加工成特殊的“棒棒糖”形状,这样芯片就可以嵌入标准化的光纤陶瓷套管中,实现自对准;对准精度也能达到小于5微米以下。

最后,将器件安装在低温恒温器的冷台上,通过制冷机降温,经过大约10个小时的降温过程,系统可以降至低温下,使得SNSPD进入超导状态。接下来,科学家们既可以对SNSPD进行深入研究;也可以将高性能SNSPD应用到各种前沿实验研究中。这一切的努力都是为了揭示自然界的秘密,推动科学技术的发展。

六、SNSPD 有哪些重要的应用

光量子信息科学与技术(包括量子保密通信、量子模拟/计算)是SNSPD最核心的应用场景^[6],因为这些应用通常需要高探测效率、低噪声、高速等性能的探测器,以实现更高效的量子信息处理。其次是,深空通信、天文探测、生物医学、暗物质探测、安全检测等方面的应用。接下来,将主要介绍几个代表性的应用。

量子保密通信

量子保密通信,是一种利用量子叠加态和纠缠效应进行信息加密的安全通信协议。与传统的、依赖于数学加密的方式不同,量子保密通信基于量子力学中的不确定性、测量塌缩和不可克隆三大原理,提供了无法被窃听和计算破解的绝对安全性保证。量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)是目前最接近实用化的方式。密钥,顾名思义,就是一把能解锁信息的钥匙,只有持有正确密钥的人

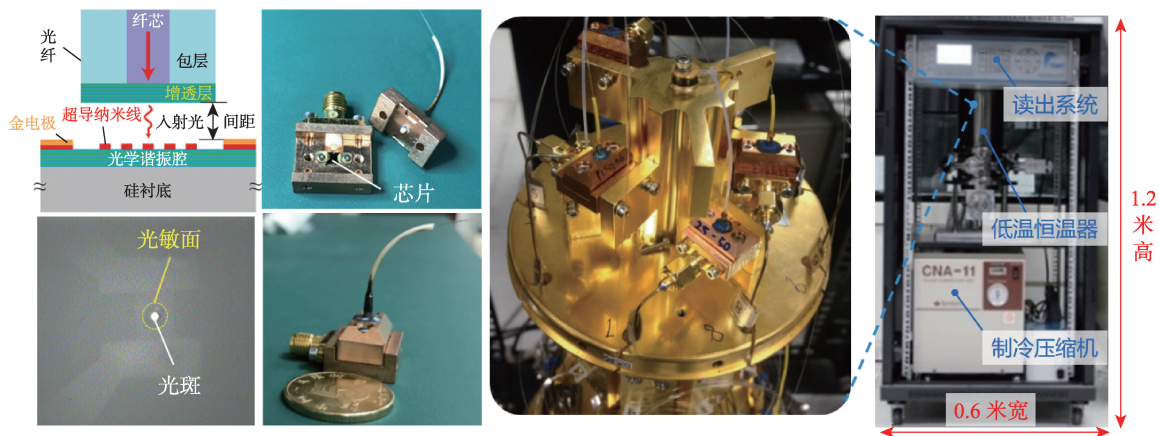


图9 SNSPD光耦合封装示意图及实物、低温恒温器2K冷台及探测器系统

才能解密和阅读数据。

在量子保密通信中,安全性和可靠性是关键考虑因素。SNSPD因其高灵敏度和低噪声特性,被广泛应用于QKD的科学研究中。2005年,由美国NIST和BBN公司首次将SNSPD应用于DARPA量子保密网络的演示,这也是SNSPD首个原型机的应用演示。其次,远距离的量子密钥分发是量子保密通信领域的重要挑战之一,需要克服光纤传输中的巨大损耗和噪声问题。2023年,上海微系统所的科学家发明了基于低温贴片滤波器技术、高效率、极低暗计数的SNSPD,并将这种新型SNSPD应用于与中科大合作实验中,成功地实现了超过1000千米的无中继光纤QKD演示,创造了光纤传输距离的世界纪录^[7]。

量子计算/模拟

量子计算机是一种使用量子逻辑进行通用计算的设备。与经典计算机不同,它使用量子比特来存储数据,使用量子算法来进行运算,目的是用来解决经典计算机难以求解的复杂问题。通用型量子计算机,可以处理任何计算任务,迄今还面临着许多挑战,还处在研发阶段。此外,有一部分科学家另辟蹊径,研发技术难度相对较低的、为解决某些复杂问题而设计的专用量子计算机——量子模拟器或量子加速器。比如,美国D-Wave公司的超导量子退火计算机是解决某些组合优化问题的专用机器。

在量子计算机的研发路径上,可存储和操纵的量子比特类型有多种,比如超导量子比特(基于超

导约瑟夫森结)、离子阱量子比特(带电离子),超冷原子自旋比特(不带电原子),以及光量子。高效率的SNSPD能显著地提升光量子计算的速度、准确率,有助于实现更大规模的光量子比特计算系统。比如,2020年,在“九章”光量子计算机中,求解了最高达76光子的高斯玻色采样问题,上海微系统所研制的SNSPD及系统发挥了关键的作用(100个SNSPD,平均效率>80%),助力中国实现首个光量子计算优越性的演示(图10)。

深空通信

随着人类对太空探测手段的不断进步,飞行器携带的科学仪器所产生的数据量越来越庞大,迫切需提升跨深空的高速数据传输能力。举例来说,即使以每秒5.2兆比特(Mb/s)的最大数据速率,火星勘测轨道飞行器(MRO)也需要1.5小时将单个高分辨率图像发送回地球进行处理。

为了满足更高速、更可靠的太空通信需求,美国NASA正在开发和测试最先进的深空激光通信技术。在不增加飞行器的质量、体积或功率情况下,这项技术的下行链路通信性能比传统的射频技术能提高10至100倍。2013年,NASA成功实现了月球到地球的激光通信演示(LLCD),其中,SNSPD作为高速、高效率、低噪声的接收机被用于接收从月球卫星发射的激光信号,实现了622Mb/s的高速数据接收。2024年4月,NASA的JPL实验室使用SNSPD作为接收器,成功与距离2.2亿千米的Psyche飞船进行通信,这是迄今为止距离最远的深空通信测试。Psyche探测器预计于2029年抵达火

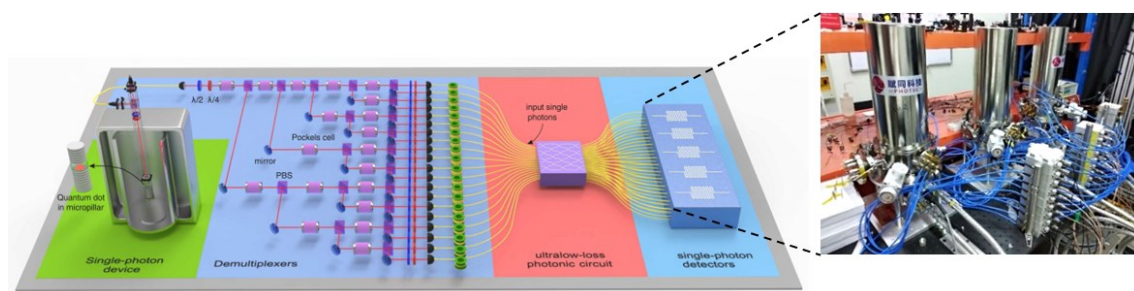


图10 “九章”光量子计算机示意图(来源 doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.250503)、现场应用的SNSPD系统(局部)

星和木星之间的 Psyche 小行星,并对其进行探索(图 11)。

生物医学应用

在生物医疗领域,光学诊断具有无创伤、生物活性、快速成像、高分辨率等优点。而与人们日常生活最紧密的 SNSPD 应用,将会出现在光学医疗诊断领域。比如,2021 年,在一项新研究中,来自美国马萨

诸塞州综合医院的研究人员开发了一种基于 SNSPD 扩散相关光谱(DCS)设备,具有高信噪比和高灵敏度,用于脑部血流的无创伤、更精确地测量(图 12)。其次,在生物医学的荧光显微成像中,结合高信噪比、低时间抖动的 SNSPD 探测器,能够更高效地探测荧光标记物发射出来的红外光子,实现对深层组织中的免疫反应的跟踪和成像,这为脑科学、肿瘤表征和精准切除等研究或应用提供了强大工具。



图 11 Psyche 飞行器和目标小行星(概念图,来源美国 NASA 网站)

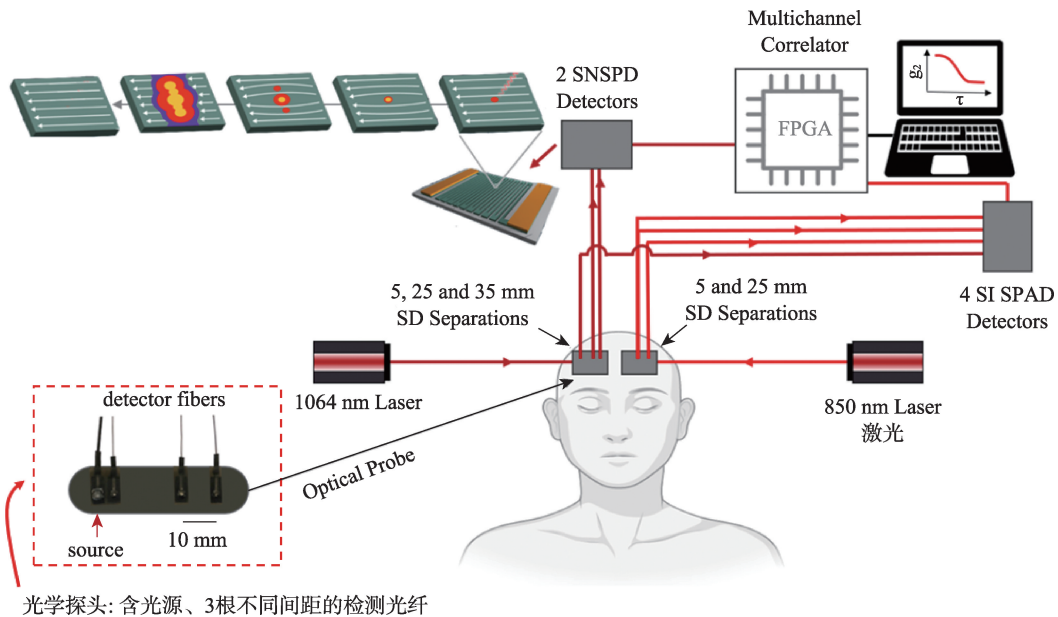


图 12 基于 SNSPD 的扩散相关光谱装置示意图,用于无损伤地检测大脑血流状况。信号采集时,使用两个对称光学探头同时照射受试者前额上的不同位置。左下插图展示了其中一个光学探头。(来源 doi.org/10.1117/1.NPh.8.3.035006)

七、SNSPD 领域有哪些重要的研究机构及公司

SNSPD 作为量子信息、光子学和超导电子学的明星组件,在全球范围内都受到了广泛关注和研究。目前全世界有几十家研究团队和公司致力于 SNSPD 技术的研究。其中,国外的主要研究机构包括,美国的 NIST、MIT、JPL 等,俄罗斯的莫斯科国立师范大学、荷兰的 TU Delft、瑞典的 KTH 大学、瑞士的苏黎世大学、意大利的 CNR-SPIN 研究所、日本的 NICT 研究所等。我国的研究机构,如上海微系统所、南京大学、天津大学等,都在 SNSPD 技术上取得了积极进展,并在 SNSPD 某些应用领域,比如光量子信息技术等,走在了世界前列。

随着 SNSPD 技术的日渐成熟, SNSPD 商用化和产业化也发展迅速,全球陆续出现了至少 6 家 SNSPD 为核心产品的高科技公司^[6],包括俄罗斯 Scontel 公司(2004 年)、荷兰 Single quantum 公司(2012 年)、德国 Pixel Photonics 公司(2020 年)、美国 Photonspot 公司(2009 年)和 Quantum Opus 公司(2013 年),以及由上海微系统所孵化出来的赋同量子科技公司(2016 年)。此外,有些半导体单光子探测器公司,比如,瑞士 ID Quantique 也于 2019 年推出了 SNSPD 探测系统。值得一提的是,赋同公司目前占领了国内 70% 以上的 SNSPD 市场份额,并积极地拓展海外市场,产品远销意大利、德国和新加坡等国家。

八、总结及展望

SNSPD 作为一种先进和可靠的光子探测技术,是光量子科学技术、极限光探测等领域的重要工具,为我们揭示了光子世界的奥秘。科学家们通过持续地研究和创新,不断加深着对 SNSPD 探测机制的理解,并不断地拓展着 SNSPD 功能和应用场景。

当然,作为超导探测器, SNSPD 需要低温制冷,导致体积大、重量重、成本高。但幸运的是,近十年

里,低温制冷技术有了巨大进步。未来,我们将有望看到:更小、更轻、桌面式的 SNSPD 系统,甚至是运行于太空的系统;集高探测效率、高速、低暗计数及低时间抖动等多种指标于一身的、高综合性能 SNSPD;超过百万像素、超大光敏面的 SNSPD 阵列及其应用。此外,伴随着材料、微纳米制造技术和系统集成技术等进步,具有极限探测性能指标的 SNSPD 将在更广泛的领域发挥重要作用,如医疗诊断、大气环境监测、遥感探测、天文观测等。产业化进程将随着技术成熟和市场需求的增长而加速。相信 SNSPD 在未来将发挥更加重要的作用,为相关领域的发展做出更大贡献。

致谢: 本文获得了量子科技创新 2030 重大项目(No. 2023ZD0300100)、国家自然科学基金委员会(NSFC, No. 62371443)、中国科学院青年创新促进会优秀会员等项目支持。感谢尤立星、张容嘉等人的认真审阅,并提出了宝贵的修改建议。

参考文献

- [1] HECHT S, SHLAER S, PIRENNE M H, Quanta, and Vision [J]. *Journal of General Physiology*, 1942, 25(6): 819.
- [2] GOL'TSMAN G N, OKUNEV O, CHULKOVA G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(6): 705.
- [3] ZHANG W-J, JIA Q, YOU L-X, et al. Saturating Intrinsic Detection Efficiency of Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors via Defect Engineering [J]. *Phys Rev Appl*, 2019, 12(4): 044040.
- [4] ZHANG W-J, YOU L-X, LI H, et al. NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature [J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2017, 60(12): 120314.
- [5] XU G-Z, ZHANG W-J, YOU L-X, et al. Millimeter-scale active area superconducting microstrip single-photon detector fabricated by ultraviolet photolithography [J]. *Opt Express*, 2023, 31(10): 16348-16360.
- [6] 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.
- [7] LIU Y, ZHANG W-J, JIANG C, et al. *physical Review Letters*, 2003, 130(21): 210801.