



高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器

张文英 胡鹏 肖游 李浩 尤立星

High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector

Zhang Wen-Ying Hu Peng Xiao You Li Hao You Li-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 188501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210486

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210486>

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

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2017, 66(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198501>

探测器对量子增强马赫-曾德尔干涉仪相位测量灵敏度的影响

Effect of detection efficiency on phase sensitivity in quantum-enhanced Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(23): 234202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181193>

超导动态电感单光子探测器的噪声处理

Noise processing of superconducting kinetic inductance single photon detector

物理学报. 2021, 70(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210185>

基于亚波长光栅和三明治结构的偏振无关微环谐振器的设计与仿真

Design and simulation of polarization-insensitive ring resonator based on subwavelength grating and sandwiched structure

物理学报. 2021, 70(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201965>

高时间稳定性的雪崩光电二极管单光子探测器

Avalanche photodiode single-photon detector with high time stability

物理学报. 2020, 69(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191875>

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报. 2018, 67(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器*

张文英¹⁾²⁾³⁾ 胡鹏¹⁾²⁾³⁾ 肖游¹⁾²⁾³⁾ 李浩^{1)2)4)†} 尤立星¹⁾²⁾

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050)

3) (中国科学院大学, 北京 100039)

4) (中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200050)

(2021年3月12日收到; 2021年3月25日收到修改稿)

超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 因其优异的综合性能被广泛应用于量子通信等众多领域, 然而其独特的线性结构会导致 SNSPD 的探测效率对入射光的偏振态具有依赖性, 从而限制了 SNSPD 在非常规光纤链路或其他非相干光探测环境中的应用. 本文基于传统的回形纳米线结构设计制备了一种新型偏振不敏感 SNSPD, 在纳米线周围引入一层高折射率 Si 薄膜作为介质补偿层来提高纳米线对垂直偏振态入射光的吸收效率, 并将补偿层的上表面设计为光栅结构以减小不同波长下纳米线对不同偏振态入射光的吸收差异从而实现在特定波长范围内的偏振不敏感. 除此之外, 还采用介质镜和双层纳米线结构来提高器件的光吸收效率, 测试结果表明该器件在 1605 nm 波长处最大探测效率为 87%, 对应的偏振消光比为 1.06. 该工作为未来实现高探测效率的偏振不敏感 SNSPD 提供了参考依据.

关键词: 超导纳米线单光子探测器, 探测效率, 偏振不敏感

PACS: 85.25.Pb, 07.57.Kp, 85.60.Gz, 03.67.Hk

DOI: 10.7498/aps.70.20210486

1 引言

超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single photon detectors, SNSPD) 是利用超薄极窄的超导纳米线条吸收光子后产生的非平衡态热电子效应进行单光子探测的新型光子探测器. 自诞生以来, SNSPD 以其极高的探测效率 (system detection efficiency, SDE)、低暗计数 (dark count rate, DCR)、高计数率和低时间抖动而受到人们的广泛关注^[1-3]. 经过了近二十年的发展, 现阶段的 SNSPD 已经实现了 98% 的极限探测效率^[4]、小于 0.1 Hz 的暗计数^[5,6]、小于 3 ps 的时间抖动^[7,8] 和吉赫兹的计数率^[9,10].

与超导转变沿探测器^[11] 等传统面型结构的单光子探测器相比, SNSPD 的核心探测部分是由超薄极窄的纳米线周期性曲折排列构成. 根据 Anant 等^[12] 的研究, 这种独特的各向异性回形结构会导致 SNSPD 对不同偏振态入射光具有不同的光吸收效率: 对于横向电 (transverse electric, TE) 偏振光, 纳米线有着最大的光吸收效率; 对于横向磁 (transverse magnetic, TM) 偏振光, 纳米线的光吸收效率最低. 而 SNSPD 的探测效率一般表示为光吸收效率 η_{abs} 、光耦合效率 η_{couple} 和本征效率 η_{quant} 三者的乘积. 光吸收效率的偏振相关性直接导致了其探测效率也是偏振相关的. 通常将最大探测效率 (SDE_{max}) 与最小探测效率 (SDE_{min}) 的比值定义为偏振消光比 (polarization extinction ratio,

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304000)、国家自然科学基金 (批准号: 61971408, 61827823)、上海市市级科技重大专项 (批准号: 2019SHZDZX01)、上海市青年科技启明星项目 (批准号: 20QA1410900)、中国科学院青年创新促进会项目 (批准号: 2020241) 和中国科学院空间主动光电技术重点实验室开放课题资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lihao@mail.sim.ac.cn

PER), 用于评估 SNSPD 的偏振敏感性. SNSPD 的偏振敏感性限制了其在许多量子通信领域的应用, 比如在基于光子偏振态编码的量子密钥分发中^[13], 光子的偏振态在传播过程中会随着时间的推移而发生变化, 如果使用具有偏振敏感性的探测器作为接收端, 将会造成误码率的增大. 而在一些使用多模光纤或自由空间进行光耦合的应用中, 如卫星激光测距^[14,15]、深空激光通信^[16,17]、远距离单光子飞行时间成像^[18]等, 由于偏振敏感性的原因, SNSPD 的高探测效率优势将会被大大折损.

目前, 抑制 SNSPD 偏振敏感性的手段主要可以分为提高纳米线结构的几何对称性和采用高折射率材料包覆纳米线两种方法. 2008 年, Dorenbos 等^[19]首次将纳米线设计为平面相互正交的回形结构与螺旋结构, 其制备的 SNSPD 的 PER 为 1.1 左右, 但是器件的效率极低; 随后 Huang 等^[20]也采用了螺旋线结构的纳米线将器件的 PER 降低到 1.04, 且将 SDE_{\max} 提升到了 52%. Verma 等^[21]通过将两层非晶 WSi 材料制备的回形纳米线垂直叠放形成立体结构 SNSPD 来消除偏振依赖, 相应器件的 SDE_{\max} 达到了 87.7%, 且 PER 小于 1.02. 但因为每层纳米线需要单独制备, 所以很难保证基于 NbN 等多晶材料的纳米线进行高质量堆叠. 天津大学胡小龙团队^[22]利用分形理论将 NbN 纳米线设计成了高度对称的皮亚诺曲线形状, 采用该结构制备的器件 PER 为 1.1 左右, SDE_{\max} 为 67%. 随后, 为了改善该结构纳米线中的大量拐角导致的电流拥挤效应和进一步提高器件效率, 他们对器件的结构进行了改进^[23]: 采用弧形分形拓扑结构取代了原设计中的“U”形拐角和“L”形拐角, 并将基于 NbTiN 的纳米线设计成并联结构以获取较大的临界电流和较小的时间抖动; 为了进一步提高器件效率, 他们采用了布拉格反射镜和增透膜相组合的结构来提高纳米线的光吸收效率. 尽管结构相对复杂, 但是最终基于该结构制备出的 SNSPD 不仅具有逼近于 1 的 PER, 且 SDE_{\max} 被提升到 91%.

以上方案都是基于提高纳米线结构的几何对称性来减小入射光偏振态给器件带来的偏振敏感性, 而 Xu 等^[24]基于纳米线内部详细的电磁场分析, 提出使用高折射率 Si 材料包覆纳米线的方法来提高纳米线对 TM 偏振态入射光的光吸收效率, 采用此结构制备的器件 PER 为 1.09 左右, 同时

器件的 SDE_{\max} 为 61%. 该方法通常称为介质补偿法, 具体原理是因为纳米线的光吸收效率与纳米线中的电场强度有关, 对于 TM 偏振态入射光, 由于其电场方向与纳米线垂直, 当纳米线外侧介质的介电常数相较纳米线小很多时, 场强分布主要集中在纳米线外侧的介质中, 纳米线内部的电场强度很小且分布不均, 从而使纳米线对 TM 偏振光的吸收效率较低. 因此可以通过介质补偿减小介电常数差异, 提高纳米线内部电场强度, 进而提高纳米线对于 TM 偏振光的吸收效率, 降低器件的偏振敏感性.

本文沿用传统的回形纳米线结构, 基于介质补偿法设计了一种新型偏振不敏感 SNSPD 结构, 在引入高折射率 Si 补偿层补偿纳米线对 TM 偏振光的吸收效率后 (折射率与介电常数正相关), 将补偿层的上表面设计为正弦形亚波长光栅结构, 减小不同波长下纳米线对不同偏振态光子的吸收差异, 以实现一定波长范围内的偏振无关探测, 同时采用了双层纳米线结构和分布式布拉格反射镜来提高纳米线的光吸收效率, 同时达到高探测效率的目标.

2 器件的设计与制备

2.1 器件设计

图 1(a) 为本文设计的 SNSPD 的横截面示意图, 从下到上, 器件分别由 400 μm 厚的 Si 衬底、13 层 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 薄膜组成的分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)、双层纳米线结构、Si 补偿层和上表面的正弦形光栅构成. 采用 DBR 和双层纳米线结构是为了使纳米线具有较高的光吸收效率^[4]. 器件按照目标波长为 1550 nm 所设计, DBR 中 Ta_2O_5 层和 SiO_2 层的厚度分别为 180 nm 和 268 nm; 双层纳米线结构中每层 NbN 纳米线的厚度为 6 nm, 宽度和周期分别为 75 nm 和 150 nm, 双层纳米线之间采用 3 nm 厚的 SiO_2 作为绝缘层; 采用高折射率材料 Si ($n = 3.5$) 作为介质补偿层覆盖在纳米线侧边及上方.

不同波长下 NbN 薄膜的折射率采用椭偏仪测得, 在 1550 nm 处, 与空气 ($n = 1$) 相比, Si 材料和 NbN ($n = 4.67 - i3.32$) 之间的介电常数差异被大大降低. 图 1(b) 为利用有限元软件 (Comsol Multiphysics, RF module) 进行的不同结构 SNSPD 对 TE 和 TM 偏振光吸收效率随波长变化的数值

仿真, 考虑到 NbN 材料色散效应的影响, 将其折射率作为波长的函数进行了参数设置. 图中虚线为暴露于空气中的裸纳米线 SNSPD 对应的仿真结果, 实线为叠加 Si 补偿层但无上表面光栅结构的 SNSPD 的相应仿真结果. 可以看到叠加 Si 补偿层后器件对 TM 偏振光的吸收效率提高到了和 TE 偏振光吸收效率相当的水平.

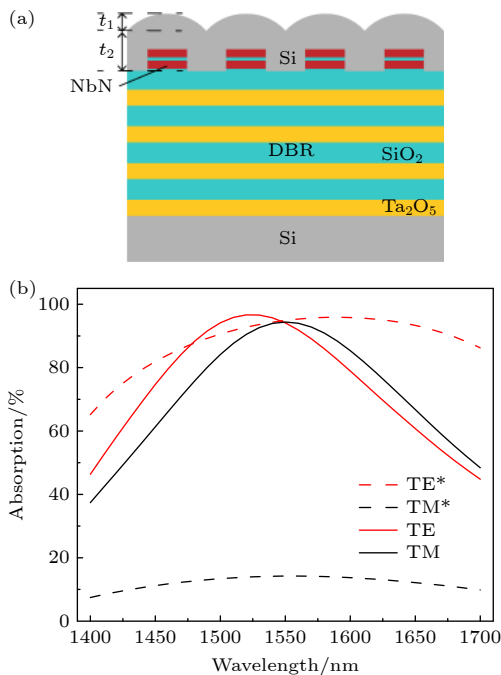


图 1 (a) 采用 Si 补偿层和正弦形光栅结构的 SNSPD 横截面示意图, 双层纳米线结构被制备在 DBR 上; (b) 双层纳米线 SNSPD 光吸收效率随波长变化的仿真结果, 实线代表只叠加 Si 补偿层的 SNSPD, 虚线代表裸纳米线 SNSPD

Fig. 1. (a) Cross-sectional schematic of the SNSPD with a Si compensation layer and a sinusoidal grating structure, the twin layer nanowire structure was prepared on a DBR; (b) simulated optical absorption as a function of the wavelength of the SNSPD with the twin-layer nanowires, solid lines denote the SNSPD only with a Si compensation layer, and dashed lines denote the SNSPD with bare nanowires.

在此基础上, 为了使纳米线对这两种偏振光的吸收效率峰值都位于目标波长处, 在补偿层上表面引入了亚波长光栅结构. 由于亚波长光栅尺寸远小于入射光波长, 根据亚波长光栅的等效介质理论, 其对 TE 和 TM 偏振态入射光具有不同的等效折射率^[25,26], 即对穿过光栅的透射光具有不同的相位调控作用. 通过合理的设计亚波长光栅尺寸, 可以使纳米线在不同波长下对两种偏振态光子的吸收效率都比较接近, 且都在目标波长处存在吸收峰

值. 值得注意的是, 为了保证纳米线的质量, 在制备纳米线时, 通常会对其下方的 SiO₂ 进行稍微过度刻蚀, 因此在双层 NbN 纳米线的边缘出现了一个高度至少为 15 nm 的台阶. 当在该台阶结构上沉积 Si 补偿层时, 补偿层的上表面会随着纳米线呈现出周期性的正弦形起伏^[27]. 结合该实际工艺结果, 采用正弦形的亚波长光栅结构, 在纳米线尺寸一定时, 通过改变纳米线的过刻深度即可改变光栅的高度, 该光栅可在沉积补偿层时自然形成, 无需单独制备, 简化了工艺流程.

为了确定最佳的补偿层厚度和光栅高度, 使用有限元软件进行仿真优化. 仿真发现光栅高度 t_1 和补偿层厚度 t_2 分别决定了两个吸收峰之间的相对波长差异和吸收峰的绝对位置, 所以分别对每个参数进行优化. 图 2 实线所示为优化后的器件光吸收效率随波长变化的仿真结果, 此时 t_1 和 t_2 分别为 35 nm 和 165 nm. 和图 1(b) 中只叠加补偿层的器件仿真结果相比, 引入正弦形光栅后, 由于光栅对不同偏振光的调控效果不同, TE 和 TM 偏振光的器件吸收效率曲线有明显相对移动的效果, 进而使得两种偏振态入射光的吸收效率峰值较好的重合于目标波长 1550 nm 处. 此外, 可以看出在 1400—1700 nm 较宽的波长范围内, 这两种偏振态入射光的器件吸收效率的变化趋势较为一致, 吸收效率的差异始终小于 8.5%, PER 小于 1.22, 即在该波长范围内器件始终是偏振不敏感的, 引入的光栅结构增强了器件的偏振不敏感特性.

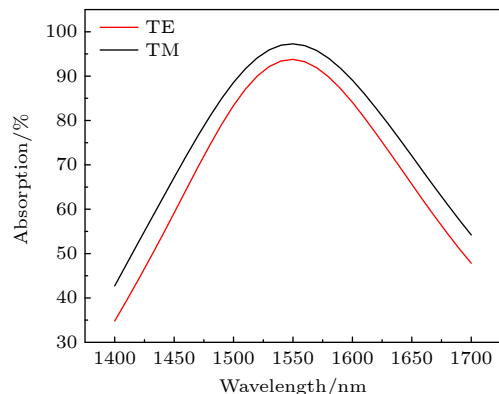


图 2 引入正弦形光栅的偏振不敏感 SNSPD 光吸收效率随波长变化的仿真结果

Fig. 2. Simulated optical absorption as a function of the wavelength of the polarization-insensitive SNSPD with the sinusoidal-shaped grating.

2.2 器件制备

依据上述仿真结果, 在 $400\ \mu\text{m}$ 厚的硅片上制备光敏面直径为 $18\ \mu\text{m}$ 的偏振不敏感 SNSPD. 首先在 Si 衬底上交替沉积 13 层 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ 薄膜作为四分之一中心波长布拉格反射镜; 在反射镜上依次沉积 $6\ \text{nm}$ 厚的 NbN 薄膜、 $3\ \text{nm}$ 厚的 SiO_2 薄膜和 $6\ \text{nm}$ 厚的上层 NbN 薄膜, 其中 NbN 薄膜采用室温直流磁控溅射法进行制备, SiO_2 薄膜则采用等离子体增强化学气相沉积法进行制备; 基于上述薄膜结构采用电子束曝光和反应离子刻蚀法制备了双层纳米线结构, 之后通过紫外曝光和反应离子刻蚀法制备电极微桥, 到此基础的器件结构已经成型, 最后为了实现偏振无关探测的效果, 在上述器件顶部采用热蒸发法沉积了一层 Si 薄膜, 完成了器件制备.

图 3(a) 和 3(b) 分别为器件的光敏面扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图和展示更多细节的纳米线高度放大 SEM 图, 从图 3(b)

可知纳米线的宽度和周期分别为 $65\ \text{nm}$ 和 $150\ \text{nm}$. 图 3(c) 为器件部分结构的透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 图, 其中沉积的 Si 材料总厚度为 $231\ \text{nm}$, Si 补偿层的厚度为 $187\ \text{nm}$. 图 3(d) 和图 3(e) 为高度放大的双层纳米线及正弦形光栅的 TEM 图. 为了能形成所需的光栅结构, 同时也为了保证上层纳米线的质量, 在采用反应离子刻蚀制备纳米线时, 对过刻的深度进行了控制. 从图 3(d) 和图 3(e) 可以看到, 纳米线间隔之间的深度约为 $6.5\ \text{nm}$, 基于该过刻深度制备的光栅高度为 $22\ \text{nm}$. 因为纳米线较窄且热蒸发沉积 Si 补偿层时存在一个蒸发角度, 导致光栅的形状偏离对称性的正弦形结构, 这对光栅的调控作用具有一定的影响.

3 器件测试及结果分析

为了对制备的器件进行性能表征, 搭建了图 4 所示的 SNSPD 测试系统. 首先将制备好的 SNSPD

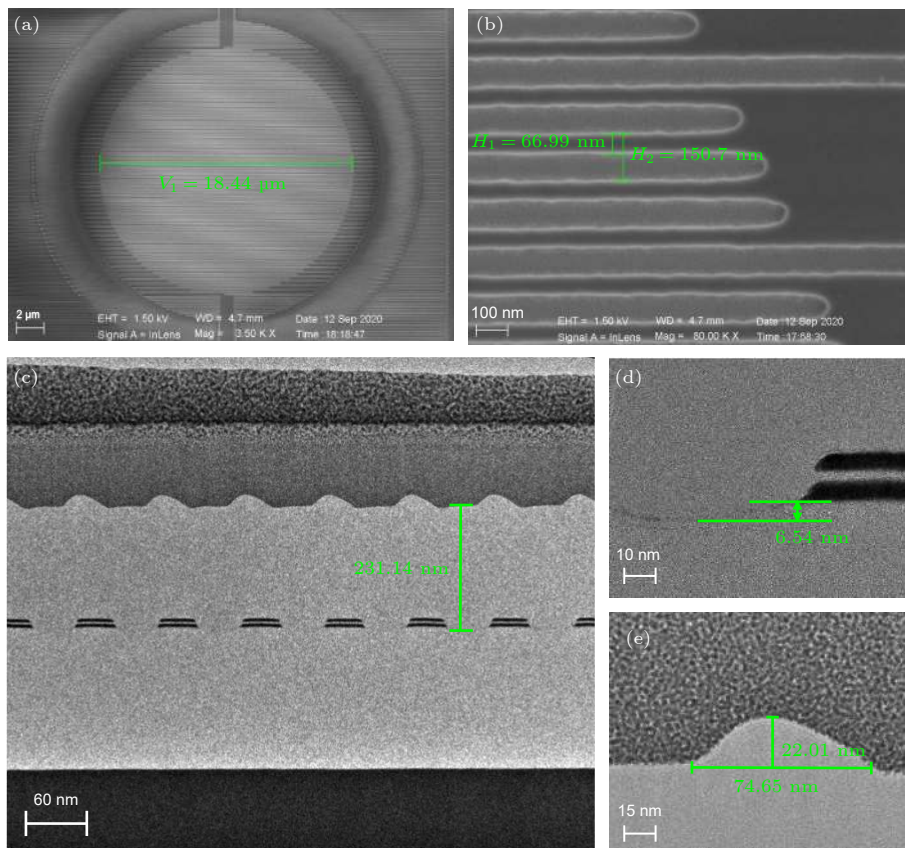


图 3 (a) SNSPD 光敏面 SEM 图; (b) 高度放大的双层纳米线 SEM 图; (c) SNSPD 横截面 TEM 图, Si 薄膜总厚度约为 $231\ \text{nm}$; (d) 高度放大的双层纳米线 TEM 图, 过刻深度约 $6.5\ \text{nm}$; (e) 高度放大的正弦形光栅 TEM 图, 光栅高度为 $22\ \text{nm}$

Fig. 3. (a) SEM image of the active area of the SNSPD; (b) magnified SEM image of the the twin-layer nanowires; (c) TEM image of the cross-section of the SNSPD with a $231\ \text{nm}$ -thick Si film; (d) magnified TEM image of the twin-layer nanowires with an over-etched depth of $6.5\ \text{nm}$; (e) magnified TEM image of the sinusoidal grating with a height of $22\ \text{nm}$.

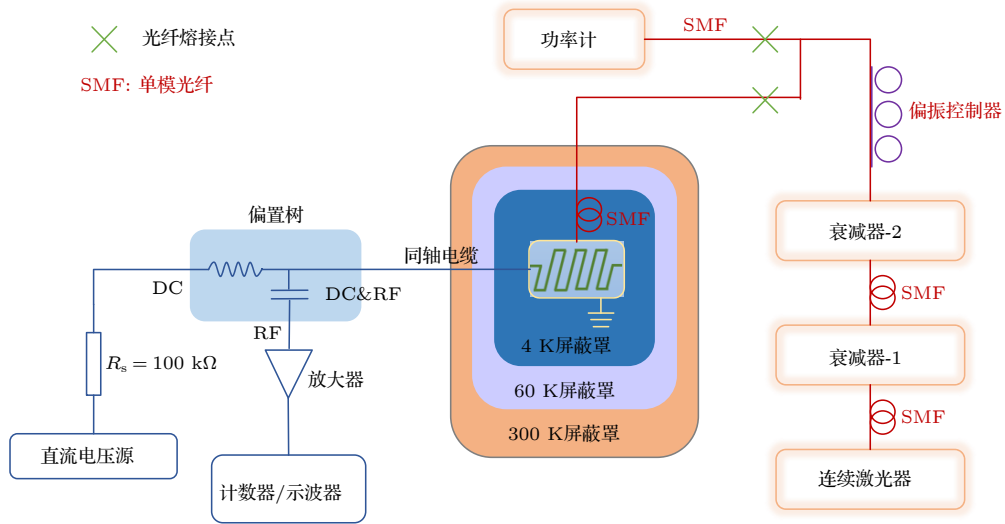


图 4 SNSPD 测试系统示意图

Fig. 4. Schematic of the measurement system used to characterize the SNSPD.

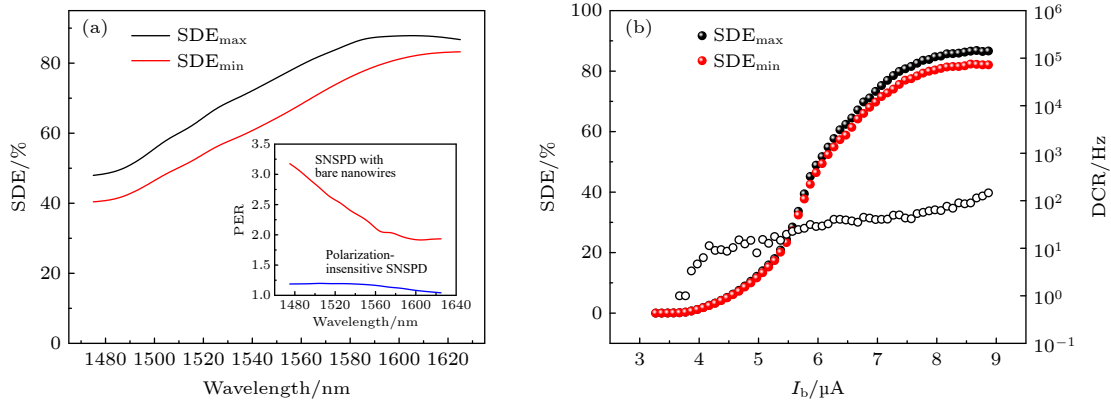


图 5 (a) 偏振不敏感 SNSPD 的 SDE 光谱响应, 插图显示了偏振不敏感 SNSPD 和裸纳米线 SNSPD 的 PER 光谱响应对比; (b) 偏振不敏感 SNSPD 在 1605 nm 处探测效率随偏置电流变化的曲线

Fig. 5. (a) Spectral responses of SDE for the polarization-insensitive SNSPD, the inset shows a comparison of the spectral responses of PER for the polarization-insensitive SNSPD and the SNSPD with bare nanowires; (b) system detection efficiency curves as a function of the bias current at 1605 nm for the polarization-insensitive SNSPD.

固定在 1 个铜制封装盒中并用 1 根单模光纤 (Corning:SMF-28e) 正面对准 SNSPD. 封装好的器件被安装在工作温度为 2.1 K 的 GM 制冷机的二级冷头上, 1 个偏置树 (Bias-Tee, Mini Circuit ZX85-12G-S+) 和阻抗为 50Ω 的同轴线用以为 SNSPD 提供直流偏置并把器件的交流响应信号输出. 偏置电路由 1 个独立的电压源 (Stanford SIM 928) 和 1 个 $100 \text{ k}\Omega$ 的电阻 R_s 串联而成, 并通过偏置树的直流端为 SNSPD 提供准恒流偏置. SNSPD 产生的电压脉冲通过常温低噪声放大器 (LNA-650, RF Bay, Inc.) 进行放大, 放大器的增益为 50 dB, 带宽为 30 kHz—600 MHz, 放大后的信号被输入到计数器或示波器. 对 SNSPD 进行光学性能表征时,

将连续激光器 (Keysight 81970: 1465—1575 nm; Keysight 81940: 1520—1630 nm) 产生的激光通过两台光功率衰减器 (Keysight: 81570A) 进行衰减, 以实现单光子水平的脉冲光信号, 随后通过三桨偏振控制器 (Thorlabs: FPC561) 对入射光的偏振态进行调节后再与器件的光纤熔接. 在测试前, 使用高精度的光功率计 (Keysight: 81624B) 和带有抗反射涂层的单模光纤进行了光功率的标定, 确保入射到 SNSPD 上的光子数为 0.1 MHz. 在测试过程中, 通过手动调节三桨偏振控制器得到 SDE_{\max} 和 SDE_{\min} , 即可通过计算得到对应的 PER.

在 1465—1630 nm 波长范围内对制备的 SNSPD 的探测效率和偏振敏感性进行了表征. 图 5(a)

给出了偏置电流 $I_b = 0.91I_{sw}$ 时器件的 SDE_{max} , SDE_{min} 和 PER 的光谱响应, 其中 I_{sw} 为临界电流. 可以看出, 该器件在 1605 nm 波长处存在最大的探测效率, 在 1505—1630 nm 波长范围内, SDE_{min} 都超过了 50%, SDE_{max} 和 SDE_{min} 之间的差异小于 11.5%, PER 小于 1.2. 最大探测效率对应的波长与设计值 1550 nm 之间的偏差可以认为是由光栅形状的偏移以及尺寸与折射率的差异造成的, 除此之外, 非理想的器件制备工艺和光学耦合也会导致器件光吸收效率的降低. 作为对比, 在同样的电流偏置下, 还对采用 80 nm 宽裸纳米线的 SNSPD 进行了 PER 的表征 (见图 5(a) 插图). 可以看到, 对没有采取任何抑制偏振敏感性手段的 SNSPD, 其 PER 随波长变化显著, PER 最小也大于 2, 若采用更窄纳米线, 该 PER 值会变得更大. 该结果证明了本文器件可以实现一定波长范围内的高效偏振无关探测.

图 5(b) 为 1605 nm 波长下器件探测效率随偏置电流的变化, 在 DCR 为 100 Hz 时, SDE_{max} 为 87%, SDE_{min} 也达到了 82%, 对应的 PER 为 1.06. 在整个探测光谱范围内, 器件的效率曲线都存在一段饱和区间, 即器件的本征效率为 100%. 在保证器件本征光子响应饱和的前提下, 还可以适度加大纳米线的宽度, 进一步提高探测效率的同时还可以降低 PER 值.

4 结 论

本文设计了一种新型偏振不敏感超导纳米线单光子探测器结构, 并对设计的器件进行了制备和性能表征, 在 1505—1630 nm 波长范围内, 器件的探测效率都超过 50%, PER 小于 1.2; 在 1605 nm 波长处探测效率最大可达到 87%, PER 仅有 1.06. Si 补偿层、正弦形光栅、双层纳米线结构和介质镜的结合不仅使 SNSPD 实现了高效、偏振不敏感探测, 且没有使器件的制备过程复杂化, 将有助于保证器件的良品率, 这对偏振无关器件的实际应用具有十分重要的意义.

参考文献

- [1] Engel A, Renema J J, Il'in K, Semenov A 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 114003
- [2] Miki S, Fujiwara M, Sasaki M, Baek B, Miller A J, Hadfield R H, Nam S W, Wang Z 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 061116
- [3] Zhang L B, Kang L, Chen J, Zhao Q Y, Jia T, Xu W W, Cao C H, Jin B B, Wu P H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 038501 (in Chinese) [张蜡宝, 康琳, 陈健, 赵清源, 郑涛, 许伟伟, 曹春海, 金彪兵, 吴培亨 2011 物理学报 **60** 038501]
- [4] Hu P, Li H, You L X, Wang H Q, Xiao Y, Huang J, Yang X Y, Zhang W J, Wang Z, Xie X M 2020 *Opt. Express* **28** 36884
- [5] Zhang W J, Yang X Y, Li H, et al. 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 035012
- [6] Shibata H, Shimizu K, Takesue H, Tokura Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 3428
- [7] Zadeh I E, Los J W N, Gourgues R B M, et al. 2017 *APL Photonics* **2** 111301
- [8] Zadeh I E, Los J W N, Gourgues R B M, et al. 2020 *ACS Photonics* **7** 1780
- [9] Zhang W J, Huang J, Zhang C J, et al. 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 2200204
- [10] Huang J, Zhang W J, You L X, Zhang C J, Lv C L, Wang Y, Liu X Y, Li H, Wang Z 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 074001
- [11] Zhang Q Y, Dong W H, He G F, Li T F, Liu J S, Chen W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 200303 (in Chinese) [张青雅, 董文慧, 何根芳, 李铁夫, 刘建设, 陈炜 2014 物理学报 **63** 200303]
- [12] Anant V, Kerman A J, Dauler E A, Yang J K W, Rosfjord K M, Berggren K K 2008 *Opt. Express* **16** 10750
- [13] Hadfield R H, Habif J L, Schlafer J, Schwall R E, Nam S W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 241129
- [14] Xue L, Li Z L, Zhang L B, Zhai D S, Li Y Q, Zhang S, Li M, Kang L, Chen J, Wu P H, Xiong Y H 2016 *Opt. Lett.* **41** 3848
- [15] Li H, Chen S J, You L X, et al. 2016 *Opt. Express* **24** 3535
- [16] Shaw M D, Marsili F, Beyer A D, et al. 2015 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) California, USA, May 10–15, 2015 pJTh2A.68*
- [17] Liu X M, Liu L R, Sun J F, Lang H T, Pan W Q, Zhao D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5149 (in Chinese) [刘锡民, 刘立人, 孙建锋, 郎海涛, 潘卫清, 赵栋 2005 物理学报 **54** 5149]
- [18] Zhou H, He Y H, You L X, Chen S J, Zhang W J, Wu J J, Wang Z, Xie X M 2015 *Opt. Express* **23** 14603
- [19] Dorenbos S N, Reiger E M, Akopian N, Perinetti U, Zwiller V, Zijlstra T, Klapwijk T M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 161102
- [20] Huang J, Zhang W J, You L X, et al. 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 074004
- [21] Verma V B, Marsili F, Harrington S, Lita A E, Mirin R P, Nam S W 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 251114
- [22] Chi X M, Zou K, Gu C, et al. 2018 *Opt. Lett.* **43** 5017
- [23] Meng, Y, Zou K, Hu Nan, Xu L, Lan X J, Steinhauer S, Gyger S, Zwiller V, Hu X L 2020 arXiv: 2012.06730v1[quant-ph]
- [24] Xu R Y, Z F, Qin D F, et al. 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 4707
- [25] Zhang X 2012 *M. S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [张曦 2012 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [26] Ma Y Q, Zhou J, Sun T T, Di M D, Ding H F 2010 *Acta Energetica Solaris Sinica* **31** 1353 (in Chinese) [马佑桥, 周骏, 孙铁围, 邸明东, 丁海芳 2010 太阳能学报 **31** 1353]
- [27] Li H, Zhang W J, You L X, et al. 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 198

High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector^{*}

Zhang Wen-Ying¹⁾²⁾³⁾ Hu Peng¹⁾²⁾³⁾ Xiao You¹⁾²⁾³⁾
Li Hao^{1)2)4)†} You Li-Xing¹⁾²⁾

1) (*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

2) (*Center for Excellence in Superconducting Electronics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

4) (*Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(Received 12 March 2021; revised manuscript received 25 March 2021)

Abstract

Superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) has been widely used in many fields such as quantum communication due to its extremely high detection efficiency, low dark count rate, high count rate, and low timing jitter. Compared with conventional single-photon detectors with planar structure, SNSPD is typically made a periodical meandering structure consisting of parallel straight nanowires. However, owing to its unique linear structure, the detection efficiency of SNSPD is dependent on the polarization state of incident light, thus limiting SNSPD's applications in unconventional fiber links or other incoherent light detection. In this paper, a polarization-insensitive SNSPD with high detection efficiency is proposed based on the traditional meandering nanowire structure. A thin silicon film with a high refractive index is introduced as a cladding layer of nanowires to reduce the dielectric mismatch between the nanowire and its surroundings, thereby improving the optical absorption efficiency of nanowires to the transverse-magnetic (TM) polarized incident light. The cladding layer is designed as a sinusoidal-shaped grating structure to minimize the difference in optical absorption efficiency between the transverse electric (TE) polarized incident light and the TM polarized incident light in a wide wavelength range. In addition, the twin-layer nanowire structure and the dielectric mirror are used to improve the optical absorption efficiency of the device. Our simulation results show that with the optimal parameters, the optical absorption efficiency of nanowires to both of the TE polarized incident light and TM polarized incident light has a maximum of over 90% at 1550 nm, and the corresponding polarization extinction ratio is less than 1.22. The fabricated device possesses a maximum detection efficiency of 87% at 1605 nm and a polarization extinction ratio of 1.06. The measured detection efficiency exceeds 50% with a polarization extinction ratio less than 1.2 in a wavelength range from 1505 nm to 1630 nm. This work provides a reference for high-efficiency polarization-insensitive SNSPD in the future.

Keywords: superconducting nanowire single photon detector, detection efficiency, polarization-insensitive

PACS: 85.25.Pb, 07.57.Kp, 85.60.Gz, 03.67.Hk

DOI: 10.7498/aps.70.20210486

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0304000), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61971408, 61827823), the Science and Technology Major Project of Shanghai, China (Grant No. 2019SHZDZX01), the Shanghai Rising-Star Program, China (Grant No. 20QA1410900), the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2020241), and the Open Project of Key Laboratory of Space Active Optical-electro Technology, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: lihao@mail.sim.ac.cn