

基于超导单光子探测器的红外光学系统噪声分析和优化*

周飞¹⁾ 陈奇¹⁾ 刘浩²⁾ 戴越¹⁾ 魏晨¹⁾ 袁杭¹⁾ 王昊¹⁾ 涂学凑¹⁾
康琳¹⁾ 贾小氢¹⁾ 赵清源¹⁾ 陈健¹⁾ 张蜡宝^{1)†} 吴培亨¹⁾

1) (南京大学电子科学与工程学院, 超导电子学研究所, 南京 210023)

2) (网络通信与安全紫金山实验室, 南京 211111)

(2023年9月19日收到; 2023年11月16日收到修改稿)

高灵敏度的红外探测系统对于远距离探测有巨大的潜力, 但光学系统内部的噪声会抑制探测系统的信噪比, 从而降低探测灵敏度与探测距离. 本文基于红外超导纳米线单光子探测器, 设计了一个工作中红外波段的光学系统, 构建了红外光学系统自发辐射计算模型, 理论分析了红外光学系统的信噪比和噪声特性. 首次提出了利用高性能超导单光子探测器精确表征红外光学系统的微弱背景辐射光信号, 为优化设计红外系统提供了依据. 并且基于超导单光子探测器的光子计数能力, 研究了光学系统的背景辐射对红外探测系统性能的影响, 并优化了光学系统的性能. 实验结果表明, 超导单光子探测器对于分析红外光学系统具有较高的灵敏度, 最小可分辨移动距离为 2.74×10^{-2} mm, 在黑体温度为 100 °C 时, 光子计数率提高了 6.4×10^4 cps (1 cps = 1 cycle per second), 光学系统的耦合效率提升了 97%; 在黑体温度为 102 °C 时, 光子计数率提高了 9.1×10^4 cps, 光学系统的耦合效率提升了 114%, 降低了杂散辐射对探测系统的影响, 同等条件下系统信噪比提升 2.7 倍, 对于超导红外探测系统的应用研究具有重要意义.

关键词: 红外光学系统, 超导单光子探测器, 灵敏度, 信噪比

PACS: 85.25.Pb, 07.89.+b, 95.85.Hp, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.73.20231526

1 引言

制冷型^[1-3]红外探测器相比较于非制冷型^[4-6]探测器具有更低的暗噪声, 从而可以获得更高的信噪比^[7], 在军事探测^[8]和安全监测^[9,10]领域中得到了广泛的应用. 制冷型红外探测器目前得到了广泛的研究, 超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD) 是一种制冷型光子计数探测器, 可以对极其微弱的光进行探测, 因此具有较高的灵敏度. 陈奇等^[11]制备

了一个工作频带为 5—10 μm 的 SNSPD, 该探测器在波长 6 μm 处可以实现饱和的量子效率, 在 1.55—5.07 μm 宽光谱处可实现近饱和量子效率. 此外, 当探测器工作在 0.9 倍于纳米线超导跃迁电流的偏置电流下, 在 10.2 μm 波长处量子效率达到 53%. 然而, 在常温下, 仪器自身的热辐射会对探测系统的灵敏度造成极大干扰, 严重时甚至会淹没探测目标信号. 因此, 提高红外探测的信噪比和降低背景噪声是提升红外探测系统灵敏度的关键.

高灵敏度的红外探测系统要求具有较低的噪声, 红外噪声的分析是当前红外领域的研究热点.

* 国家自然科学基金 (批准号: 12033002, 62101240, 62071218, 6207121461801206, 11227904)、国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304002) 和江苏省自然科学基金 (批准号: BK202010177) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzhang@nju.edu.cn

张立帅和吴平^[12]根据红外光子探测器的基本原理,推导了背景辐射的光子噪声,并根据理论分析提出了提高背景限制下比探测率的方法.杨宗耀等^[13]针对应用场景的噪声抑制需求,利用仿真软件对红外辐射进行了噪声模拟分析,揭示了结构设计对噪声特性的影响机制.贾天石等^[14]从线缆、采集电路、电源和偏压等部分分析了系统的噪声,并实现了对电路噪声的抑制,有效降低了系统噪声.唐国良等^[15]借助称重测量原理的噪声抑制效果,对短波红外高光谱成像系统探测器噪声和光子噪声进行了分析,并通过仿真计算了系统噪声抑制效果.马宁等^[16]对红外热像仪的空间噪声和时间噪声进行了分析,主要分析了积分时间和定标校正过程中标定点的温度对噪声的影响,通过不同像素对靶标区域的响应值的标准差来表征.

目前对红外辐射和红外噪声的抑制方案已经得到了广泛的研究,其中绝大部分采用软件分析来表征红外系统的噪声性能和噪声抑制水平^[17-19],一部分则是通过弥散斑和偏压噪声来表征^[20,21].本文中的红外光学系统自身产生的辐射到达探测器的辐通量远低于纳瓦量级,常规红外探测器灵敏度受限,很难定量研究. SNSPD 作为光子计数型探测器,可以对单个光子进行探测,利用 SNSPD 的光子计数能力可以对杂散辐射以及光学系统的噪声特性进行表征,所以红外 SNSPD 成为研究红外光子噪声的重要工具.本文基于 SNSPD 的光子计数能力,对红外 SNSPD 的光学系统的背景辐射进行了理论分析,并建立了基于 SNSPD 的红外光学系统自发辐射模型,分析了 SNSPD 红外光学系统与噪声等效温差 (noise-equivalent temperature difference, NETD) 的关系.通过 SNSPD 定量表

征了红外光学系统的背景光子计数特性,并基于此优化设计了光学系统,提高了红外 SNSPD 光学系统的信噪比.

2 实验部分

2.1 红外 SNSPD 测量系统

制冷型红外探测系统具有灵敏度高、暗噪声低的优点,更加适用于远距离探测和背景辐射严重的场景探测.本文借助 SNSPD 的光子计数能力对光学系统的性能进行表征与分析.搭建的红外 SNSPD 的测量系统结构示意图如图 1(a) 所示,包含黑体源、光学系统、制冷机、SNSPD 和电学读出部分组成.作为红外光源,黑体源采用的是 MIKRON 的 M305 红外光源,温度范围为 100—1000 °C.制冷机的 3 层窗口片均为在 0.6—16 μm 有较高透过率的硒化锌窗口片,制冷机结构由 4 层结构组成,为 SNSPD 提供可正常工作的超低温环境,4 层制冷结构由外到内的温度分别为 300 K, 40 K, 3 K 和 0.05 K. SNSPD 安装在制冷机的最内层 0.05 K 的制冷结构中,光敏区域的方向正对着窗口的方向.为减小能量损失,所有光学元件中心以及 SNSPD 的光敏区域的中心均都在同一光轴上.黑体源被固定在气浮减震平台上以减小结构扰动带来的干扰,黑体辐射经过光学系统和 4 层窗口片后,聚焦耦合至 SNSPD 的光敏面上, SNSPD 的光敏区域接收到光子后产生响应,并通过电学读出实现光子探测与光子计数.

2.2 仿真分析与模型建立

高灵敏的红外探测系统具备很高的温度分辨能

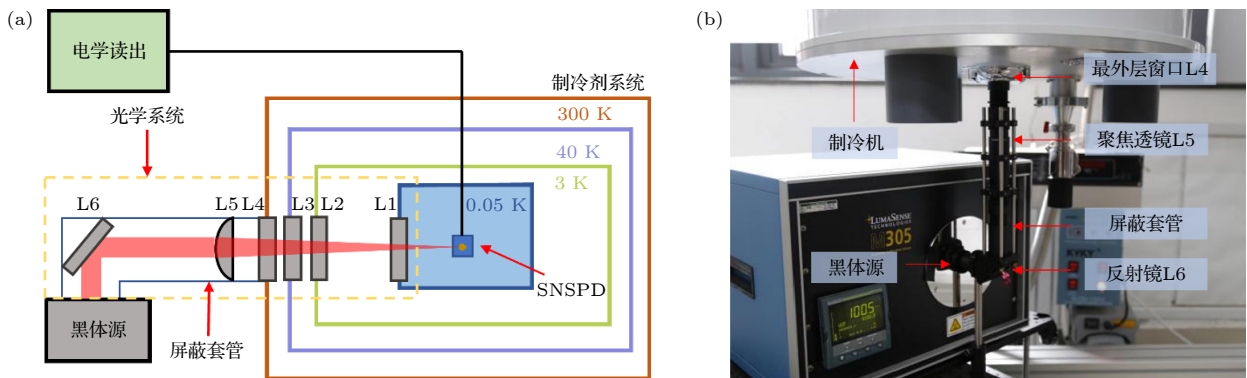


图 1 (a) 红外 SNSPD 的测量系统结构示意图; (b) 红外测量系统实物图

Fig. 1. (a) Schematic measurement system diagram of infrared SNSPD; (b) the optical part of an infrared measurement system.

力, 可实现更加精密的热红外探测, 相关探测灵敏度通常通过噪声等效温差 (NETD) 来表征. NETD 象征着探测器能探测到的目标物体与背景之间的最小温差, 其计算公式为

$$N_{\text{NETD}} = \frac{V_{\text{RMS}}}{\Delta V} \times \Delta T, \quad (1)$$

其中 V_{RMS} 代表噪声的均方根, ΔT 为目标与背景的表现温差, ΔV 为温度变化为 ΔT 时对应的电压信号变化量, N_{NETD} 为此时 NETD 的值. N_{NETD} 越小, 象征着探测系统的探测灵敏度越高, 探测系统的灵敏度主要受噪声的强度影响, 噪声的强度越低, 对信号光的影响就越小. 目前基于 SNSPD 的 NETD 的计算公式尚未见报道, 但可以确定的是, 在相同条件下, SNSPD 红外探测系统的灵敏度越高, 光子计数率越高, 噪声计数越低, 有利于提升 NETD 性能. 因此, 若要提升探测系统的灵敏度, 首先需要对探测系统的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 和噪声特性进行分析. SNSPD 通过光子计数率 (photon count rate, PCR) 来表征信号光的强度, PCR 的值越大, 信号光强度越大. 背景计数率 (background count rate, BCR) 用来表征背景辐射的强度, 故定义 SNSPD 探测系统的信噪比^[22] 模型为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{n_{\text{p}}}{\sqrt{n_{\text{p}} + n_{\text{B}}}}. \quad (2)$$

其中, n_{p} 为 PCR 的值, n_{B} 为 BCR 的值, R_{SNR} 为该时刻的信噪比的值. 根据 (2) 式, 若要提高探测系统的 R_{SNR} , 首先应确保 n_{B} 远小于 n_{p} , 降低背景辐射对探测目标带来的干扰. 其次是提高探测系统的 n_{p} , 增大目标辐射到达探测器光敏区域的光子数. 根据图 1(a) 所示的红外 SNSPD 探测系统可以得知, 探测系统的光学部分如黄色虚线部分所示. 光学系统由于其原子的热运动, 时刻向外辐射能量, 根据维恩位移定律, 黑体辐射光谱出射峰值波长 λ_{m} 与温度 T 之间的关系为

$$\lambda_{\text{m}} T = 2.898 \times 10^3 (\mu\text{m} \cdot \text{K}). \quad (3)$$

通过 (3) 式可以看出, 黑体辐射的峰值波长随温度的升高向短波长方向移动. 故对于室温的光学系统而言, 其在红外波段辐射量较大, 因此光学系统相当于探测器前的一个红外光源. 如果光学系统的噪声特性不够理想, 会导致光源淹没在探测系统本身产生的背景辐射中, 因此需要定量分析光学系统带来的辐射以及其对红外探测系统性能的影响.

黑体源产生的红外辐射在到达探测器光敏面

之前, 会经过光学系统和 4 层窗口片, 故红外探测系统的自发辐射分为两部分, 一部分是制冷机外部的光学系统带来的自发辐射, 另一部分是制冷机窗口片带来的自发辐射. 实验方案中的光学系统总共包含一个反射镜、一个耦合透镜和 4 层窗口片, 本文以这 6 片镜片作为对象, 建立光学系统自发辐射模型. 在系统光路上, 按照距离探测器由近到远的镜片的顺序依次为: 0.05 K 窗口片 L1, 3 K 窗口片 L2, 40 K 窗口片 L3, 300 K 窗口片 L4, 聚焦透镜 L5 和反射镜 L6. 设第 i 面镜片的发射率为 ε_i , 若为透射镜片, 透射率为 ρ_i , 若为反射镜片, 反射率为 ρ_i , 温度为 T_i . 对于窗口片 L1 而言, 两个面分别向两个相反的方向产生自发辐射, 故到达探测器的自发辐射是 L1 总自发辐射的一半, 则 L1 镜面产生的自发辐射传播到探测器的辐照度为

$$E_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_1 \frac{\pi L(T_1)}{4F^2}, \quad (4)$$

其中 F 为光学系统的相对孔径的倒数, L2 的自发辐射向探测器方向传播, 当通过 L1 时, 由于 L1 的透射率并不是 100%, 故有

$$E_2 = \frac{1}{2} \rho_1 \varepsilon_2 \frac{\pi L(T_2)}{4F^2}. \quad (5)$$

同理, 窗口片 L3 和 L4 的传播过程和 L2 类似, L3 和 L4 到达探测器上的辐射照度为

$$E_3 = \frac{1}{2} \rho_1 \rho_2 \varepsilon_3 \frac{\pi L(T_3)}{4F^2}, \quad (6)$$

$$E_4 = \frac{1}{2} \rho_1 \rho_2 \rho_3 \varepsilon_4 \frac{\pi L(T_4)}{4F^2}. \quad (7)$$

因此, 可以计算出 4 层窗口片到达探测器的总的红外辐射照度为

$$E_{\text{窗}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4, \quad (8)$$

其中, $L(T)$ 为温度为 T 时标准黑体的辐亮度.

对于耦合透镜 L5 和反射镜 L6, 其传播过程与窗口片自发辐射的传播过程类似, 故 L5 和 L6 到达探测器的红外辐射为

$$E_5 = \frac{1}{2} \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 \varepsilon_5 \frac{\pi L(T_5)}{4F^2}, \quad (9)$$

$$E_6 = \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 \rho_5 \varepsilon_6 \frac{\pi L(T_6)}{4F^2}. \quad (10)$$

故 L1—L6 的光学系统到达探测器总红外辐射照度为

$$E_{\text{总}} = E_{\text{窗}} + E_5 + E_6. \quad (11)$$

普朗克公式阐明了黑体辐亮度 $L(T)$ 与温度

T 之间的关系为

$$L(T) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi(e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda, \quad (12)$$

其中, c_1 是第 1 辐射常数, c_2 是第 2 辐射常数. 本方案中采用的硒化锌窗口片的厚度为 3 mm, 直径为 25.3 mm, 在 3—5 μm 波段的透射率约为 72%, 吸收系数为 $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$. 因此对于 4 层硒化锌窗口片而言, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 1.2 \times 10^{-4}$, 由于 L1 的内表面置于 0.05 K 温度下, L2 的内表面置于 3 K 温度下, 故 $T_1 = 0.05 \text{ K}$, $T_2 = 3 \text{ K}$, 由于 T_1 和 T_2 温度较低接近绝对零度, 故 L1 和 L2 产生的红外辐射可忽略不计. 根据 L3 和 L4 的内表面所处的环境温度和 (12) 式计算得到: $L(T_3) = 4.96 \times 10^{-28} \text{ W/m}^2$, $L(T_4) = 5.86 \text{ W/m}^2$, 可以看出 4 层窗口片的总红外自发辐射主要是最外层窗口片提供的, 故可以得到 $E_{\text{窗}} = 2.90 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$. 耦合透镜 L5 采用的是氟化钡镜片, 厚度为 3.8 mm, 直径为 25.3 mm, 在中红外波段的透光率约为 90%, 吸收系数为 $3.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$. 故可以得到 $E_5 = 2.14 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$, 而反射镜的反射率大于 99%, 故发射率小于 1%, 在理论计算自发热辐射时可以忽略不计. 通过对比发现, 虽然窗口片 L1—L4 距离探测器较近, 但由于其朝向探测器的发射面处于制冷环境中, 其产生的自发辐射远低于距离光敏面较远的处于常温环境中的 L5, 制冷环境抑制了光学系统的热辐射, 降低了红外光学系统的噪声.

通过以上计算, 可以得到光学系统的总辐照度 $E_{\text{总}} = 2.93 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$. 由于本方案中使用的探测器的光敏面大小为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 故光学系统在探测器光敏面上的辐通量为 $2.93 \times 10^{-16} \text{ W}$.

通过对光学系统中镜片的自发辐射的分析, 得到了光学系统镜面自发辐射与红外探测光敏面上辐照度之间的关系, 进而可以得到该红外 SNSPD 光学系统的自发辐射模型. 假设黑体源产生的红外辐射照度为 $E_{\text{源}}$, 则由光学系统的结构可知, 在理想情况下, 到达探测器的辐照度 $E_{\text{黑}}$ 为

$$E_{\text{黑}} = \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 \rho_5 \rho_6 E_{\text{源}}. \quad (13)$$

根据 (13) 式即可得知当黑体温度为 300 K 时, 黑体产生的红外辐射经光学系统和 4 层窗口片的辐照度为: $E_{\text{黑}} = 1.42 \text{ W/m}^2$, 结合探测器光敏面的大小可知, 在探测器光敏面上的辐通量为 $1.42 \times 10^{-10} \text{ W}$. 通过理论分析可以看出, 在黑体源温度为 300 K 时, 背景辐射在探测器上的辐通量远小

于辐射源在探测器上的辐通量, 该光学系统理论上具有较低的自发辐射和较高的信噪比, 对开展实际的实验测量具有一定的指导意义.

2.3 实验结果与分析

根据 (1) 式可知, 当温度变化 ΔT 时, N_{NETD} 随着输出电压噪声的均方根的增大而增大, 与 ΔT 内电压的变化量成反比. 从提高红外探测系统的灵敏度出发, 需要降低 N_{NETD} , 就需要降低输出电压噪声的均方根, 即降低光学系统的噪声对红外探测系统的影响, 同时需要提高 ΔT 内输出电压的变化量, 提高探测系统的信噪比. 对于 SNSPD 而言, 其光子计数能力对于定量地表征光学系统的噪声特性有着独特的优势. SNSPD 通过 n_{p} 来表征探测目标辐射的强度, 故对于 SNSPD 而言, ΔT 温度变化范围内光子计数率的变化量 Δn_{p} 即等效于半导体探测系统中输出电压的变化量 ΔV , 而噪声则是通过 n_{B} 来表征, 所以可以推出, SNSPD 探测系统的 N_{NETD} 与 Δn_{p} 正相关, 与 BCR 的均方根 σ_{BCR} 负相关, 同时与探测系统的 R_{SNR} 正相关.

图 1(b) 所示为本方案的红外 SNSPD 空间测量系统实物图, 黑体校准源出射口的直径大小为 25.4 mm. 黑体产生的红外光源经出射口到达反射镜, 再经反射镜反射后经过透镜聚焦, 并穿过 4 层窗口片后到达探测器的光敏区域. 为保证光学系统的稳定性, 从黑体源到制冷机最外层窗口之间采用 25.3 mm 的同轴光学系统. 为了避免外界杂散辐射进入光学系统, 本方案采用可调节屏蔽套管来阻止外界杂散辐射的进入, 从而确保 n_{B} 足够小. 本方案设计并制备了一个中红外 SNSPD, 器件采用双面抛光的硅衬底, 并且在硅衬底上制备了一层 MoSi 超导薄膜, 在超导薄膜上沉积了一层金作为 SNSPD 的电极, 最终经过电子束曝光刻蚀出纳米线, 图 2(a) 所示为该 SNSPD 的纳米线区域在扫描电子显微镜 (SEM) 的观测图. 所制备的 SNSPD 的光敏面的大小为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 电流-电压特性曲线如图 2(b) 所示, 器件的超导临界电流为 3.2 μA .

首先, 利用 SNSPD 的光子计数能力表征光学系统带来的背景辐射, 当黑体源关闭时, 偏置电流固定在 2.79 μA , 在 5 min 内观测光子计数情况如图 3(a) 所示, 5 min 内探测系统的 n_{B} 波动较小, 均值为 $1.0 \times 10^5 \text{ cps}$, 均方根 σ_{BCR} 为 454 cps, n_{B} 和 σ_{BCR} 以光子数的形式定量表征了光学系统自发

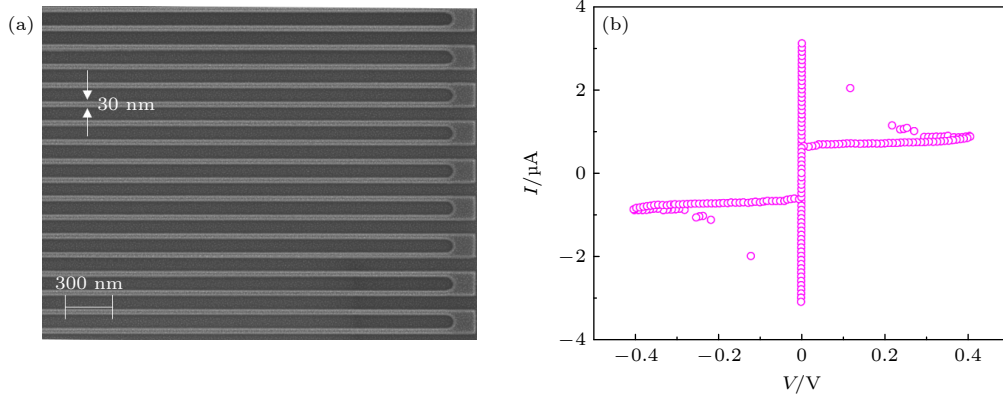


图 2 (a) SNSPD 的 SEM 观测图 (纳米线的线宽为 30 nm); (b) SNSPD 的电流-电压特性曲线

Fig. 2. (a) SEM image of SNSPD (the line width of the nanowire is 30 nm); (b) I - V characteristic curve for measurement of SNSPD.

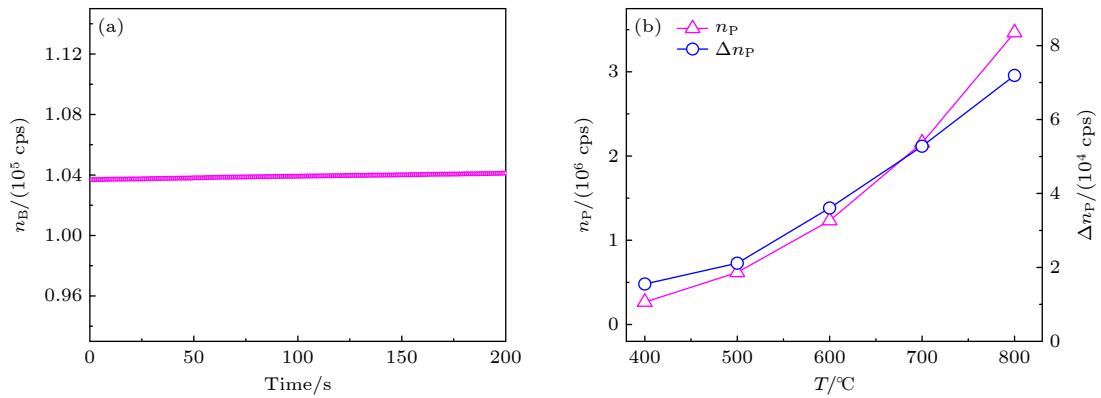

 图 3 (a) 探测系统的 n_B (200 s 内的标准差为 454 cps); (b) 不同温度下的 n_P 和 Δn_P

Fig. 3. (a) n_B of the infrared optical system (the standard deviation in 200 s is 454 cps); (b) n_P and Δn_P on different temperature.

辐射所产生的背景噪声及其抖动, 结果表明该光学系统本征热辐射较小, 与仿真分析较为吻合. 同时, 如仿真结果, 该系统接收的背景辐射功率非常低, 远小于 10^{-10} W, 很难用常规的光功率计测量. 因此, 我们采用高灵敏度的 SNSPD 对背景计数进行定量表征. 为探究黑体温度与 n_P 的关系, 保持偏置电流不变, 将黑体温度分别设置为 400, 500, 600, 700 和 800 $^{\circ}\text{C}$, 结果如图 3(b) 所示. 当黑体温度为 400 $^{\circ}\text{C}$ 时的 PCR 的均值为 2.7×10^5 cps, 标准差为 1.2×10^3 cps. 当黑体温度为 800 $^{\circ}\text{C}$ 时, n_P 均值为 3.5×10^6 cps, 标准差为 4.4×10^3 cps, 400 $^{\circ}\text{C}$ 的温差内 n_P 的变化量 Δn_P 为 3.2×10^6 cps, n_P 随着温度的升高而大幅度增大, 验证了超导单光子探测器在光学系统分析领域的的能力. 同时为了探究当 ΔT 较小时, Δn_P 的变化情况, 将黑体温度设置为 405, 505, 605, 705 和 805 $^{\circ}\text{C}$, 探究当 ΔT 为 5 $^{\circ}\text{C}$ 时, Δn_P 与温度之间的关系, 结果表明: Δn_P 随着温度的升高而增大, 同时可以看出, 在固定的温度下,

若要提高 Δn_P , 首先应该提高 n_P .

对于光子计数型探测器而言, n_B 越大, 表明探测系统中的噪声越大, 因此, 要想提高探测系统的灵敏度, 就要提高探测系统的 R_{SNR} , 一来通过提高探测系统的 n_P 来提高 Δn_P 的值, 二是通过降低 n_B , 减小光学系统由于自发辐射带来的噪声. 为了提高 n_P , 首先要确保光学系统的出射口的黑体辐射光斑与 SNSPD 的光敏区域尽可能同轴, 从而保证较高的空间耦合效率. 黑体出射口的直径为 25.3 mm, 而探测器光敏面的大小远小于黑体出射口的大小, 若在保证耦合聚焦之后的光斑都照射在探测器的光敏区域, 则需要确保探测器与黑体辐射光斑同轴, 从而确保尽可能少的能量损失. SNSPD 的光子计数能力能够对空间耦合效率实现确切的数值表征. 在黑体源开启且温度固定的情况下, SNSPD 所能探测到的光子数越多, 即 n_P 越大, 表明此时具有较低的能量损失和较高的空间耦合效率. 将偏置电流固定在 2.79 μA 时, 在光学系统中不

包含聚焦透镜的情况下, 将黑体温度设置为 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 通过微调黑体下方的光学平台来控制光学系统出射口光斑的位置, 探究光学系统出射口光斑位置与 n_p 之间的关系. 为进一步探究该系统的灵敏度特性, 将 ΔT 进一步缩小为 $2\text{ }^\circ\text{C}$, 探究 n_p 与黑体出射口位置之间的关系.

由于 SNSPD 安装在制冷机最内层, 无法实时观测 SNSPD 与光学系统出射口的耦合情况, 仅有窗口区域允许制冷机内部与外界进行通信. 然而较低的耦合效率会带来较大的能量损失, 导致 n_p 的降低, 从而影响 SNSPD 探测系统的 NETD 性能. SNSPD 的光子分辨能力可以通过光子数定量地表征辐射源与 SNSPD 的光敏区域的空间耦合的情况, 通过微调光学平台来移动光学系统和制冷机窗口的位置, 实时观测 n_p 的变化, 在水平面上向一固定方向平移, 在 2 mm 移动范围内, 如图 4(a) 所示, 当黑体温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 移动前 n_p 的均值为 $7.6 \times 10^4\text{ cps}$, 移动后 n_p 的均值为 $4.2 \times 10^4\text{ cps}$. 如图 4(b) 所示, 当黑体温度为 $102\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 移动前

n_p 的均值为 $7.9 \times 10^4\text{ cps}$, 移动后 n_p 的均值为 $4.7 \times 10^4\text{ cps}$. 通过对比可以得知, 当温度固定不变时, 黑体源出射口在 2 mm 的移动范围内, n_p 的变化达到 $3.4 \times 10^4\text{ cps}$, 由此可以看出, 系统微小的移动也会导致光子数产生较大的变化, 对表征光学系统的表征具有较高的灵敏度. 故可以推测, 当 n_p 的变化数值与 σ_{BCR} 相当时, 此时的移动距离即为 SNSPD 可分辨的系统最小移动距离, 由于该光学系统的 σ_{BCR} 为 454 cps , 故经过计算 SNSPD 可识别的系统最小移动距离为 $2.74 \times 10^{-2}\text{ mm}$, 可以实现对极其微小的抖动进行识别, 因而有望应用于精密仪器的监测领域.

由于黑体源出腔口的大小远远大于探测器光敏面的大小, 所以即使通过微调光学系统出射口与制冷机窗口的相对位置使光源与 SNSPD 的光敏面同轴, 也会存在大量红外辐射传播至探测器光敏面之外的位置, 导致大量的能量损失. 为降低能量损失, 使更多的红外辐射到达探测器光敏面, 需要使用聚焦透镜来缩小黑体辐射的光斑, 使得红外辐

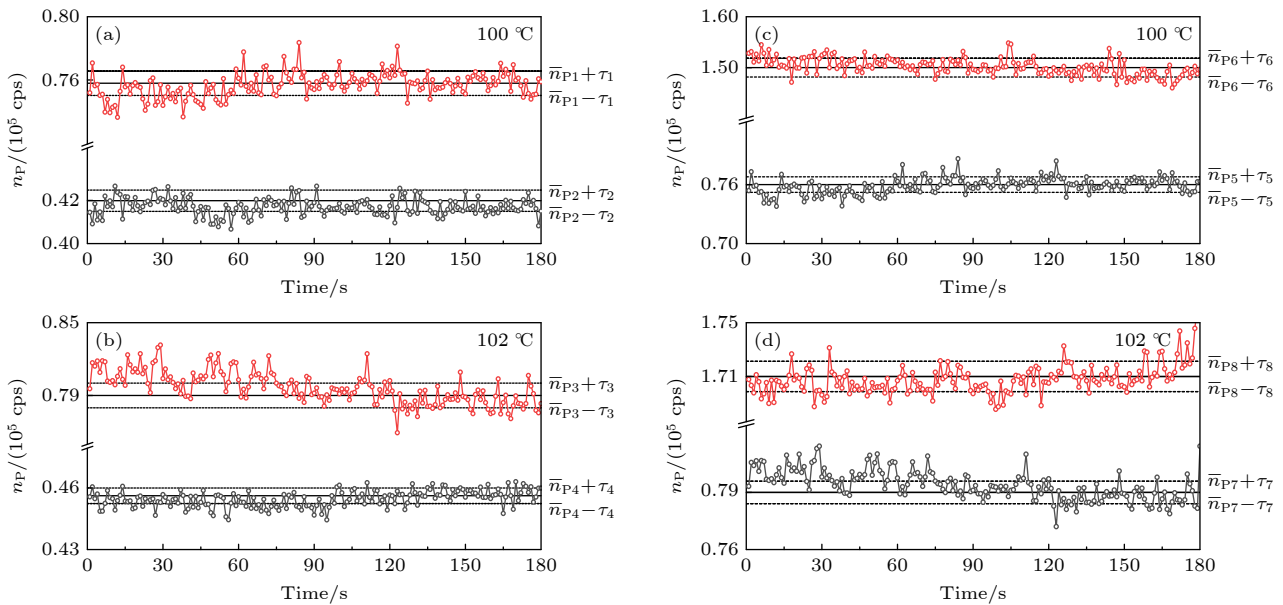


图 4 (a) $100\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下, 2 mm 移动范围内 n_p 的变化情况 (n_{p1} 为未移动时的光子计数率, n_{p2} 为水平移动 2 mm 后的光子计数率); (b) $102\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下, 2 mm 移动范围内 n_p 的变化情况 (n_{p3} 为未移动时的光子计数率, n_{p4} 为水平移动 2 mm 后的光子计数率); (c) $100\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下, 使用耦合透镜前后的 n_p (n_{p5} 为未使用聚焦透镜时的光子计数率, n_{p6} 为使用聚焦透镜时的光子计数率); (d) $102\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下, 使用耦合透镜前后的 n_p (n_{p7} 为未使用聚焦透镜时的光子计数率, n_{p8} 为使用聚焦透镜时的光子计数率). 图 (a)–(d) 中实线对应横坐标为各 n_p 对应的 180 s 内的均值, τ 为对应的标准差

Fig. 4. (a) At $100\text{ }^\circ\text{C}$, the changes of n_p within the 2 mm moving range at $100\text{ }^\circ\text{C}$ (n_{p2} is the photon count rate without moving, n_{p1} is the photon count rate after moving 2 mm horizontally); (b) changes of n_p within the 2 mm moving range at $102\text{ }^\circ\text{C}$ (n_{p4} is the photon count rate without moving, n_{p3} is the photon count rate after moving 2 mm horizontally); (c) n_p before and after using the coupled lens at $100\text{ }^\circ\text{C}$ (n_{p5} is the photon count rate when the focusing lens is not used, n_{p6} is the photon count rate when the focusing lens is used); (d) n_p before and after the coupling lens is used at $102\text{ }^\circ\text{C}$ (n_{p7} is the photon count rate when the focusing lens is not used, n_{p8} is the photon count rate when the focusing lens is used). In panels (a)–(d), the horizontal coordinate corresponding to the solid line is the mean value of each n_p within 180 s , and τ is the corresponding standard deviation.

射被尽可能地耦合至探测器光敏区域,从而提高 n_p .如图1(a)所示,黑体源产生的红外辐射经反射镜传播至SNSPD的光敏面上,其中出射口到反射镜中心的距离为6.5 cm,反射镜中心到制冷机内探测器位置的距离为38.3 cm.首先利用光功率计在制冷机最外层窗口处对红外辐射进行了测量,黑体温度固定在100 °C时,功率计10 mm × 10 mm的感光区域内接收到的辐射光功率为0.172 mW,根据光功率与光子数之间的关系,通过计算可以得知此时的光子数为 2.59×10^{15} 个,则此时经过4层窗口片后到达探测器光敏面的光子数为 6.90×10^8 个.当在制冷机最外层增加一片焦距为150 mm的聚焦透镜时,到达探测器光敏面的光子数应为 7.18×10^9 个,通过理论计算得知,聚焦透镜可以大幅提升黑体红外辐射与SNSPD的空间耦合效率.因此本实验中选用在红外波段具有高透光率的氟化钡聚焦透镜,加入到该测量系统当中,在保持偏置电流不变的情况下,将黑体源的温度分别固定在100 °C和102 °C时,在10 min内观察 n_p 的情况.通过图4(c)可以看出,当黑体温度为100 °C时且未对黑体光斑聚焦时, n_p 的均值为 7.6×10^4 cps,而当加入聚焦透镜后, n_p 的均值为 1.5×10^5 cps,通过加入聚焦透镜前后光子数的对比可以得知,耦合效率提升了大约97%.如图4(d)所示,当黑体温度为102 °C时且未对黑体光斑聚焦时, n_p 的均值为 7.9×10^4 cps,而当加入聚焦透镜后, n_p 的均值为 1.7×10^5 cps,透镜的加入使耦合效率提升了大约114%,在考虑到SNSPD的量子效率与吸收效率后,实验结果与仿真计算结果呈现出较高的吻合度.对比图4(c)与图4(d)可知,2 °C的温差范围内 Δn_p 的数值提升了 1.6×10^4 cps.通过设计的光学系统,将信噪比提升了2.7倍,并且对聚焦透镜给光学系统带来的影响进行了光子级别的表征.

为提升测量系统的 R_{SNR} ,除了提升 n_p ,有效抑制 n_B 也尤为重要.在红外聚焦透镜的下方,利用两端长度可调节套管将其构成三明治结构,其中上层套管有两个作用,一来用于调节焦距,二来根据焦距调节聚焦透镜到制冷机窗口之间的长度,下层套管负责调节焦距和根据焦距调节聚焦透镜到反射镜的距离,从而确保光学系统的常温部分没有外界杂散辐射的引入.除了本文所采用的在常温部分通过屏蔽套管抑制外界杂散辐射外,制冷机内部设计也能大大降低 n_B ,可以通过在探测器前端增加一个效率为100%的冷阑,只允许探测目标的辐

射通过该冷阑.还可以通过在制冷机最内层结构的内壁涂敷黑色金属图层,降低制冷机内部杂散辐射的干扰.

3 结论

SNSPD的光子计数能力是对红外光学系统噪声特性定量表征的一种新颖且重要的方式,对红外光学系统的发展具有重要的意义.本文理论分析了红外SNSPD光学系统的噪声的来源,并建立了基于SNSPD的红外光学系统的信噪比与背景辐射计算模型,首次提出了利用SNSPD表征红外光学系统的背景辐射强度,并且基于SNSPD的光子计数能力分析了SNSPD红外光学系统的性能与NETD和SNR的关系.实验表明SNSPD可识别的系统最小移动距离为 2.74×10^{-2} mm,并通过光学系统的分析与优化,在黑体温度为100 °C时,空间耦合效率提升了97%,信噪比提升了2.7倍,对高灵敏度的超导红外探测系统的研究具有一定的指导意义.

参考文献

- [1] Michalczewski K, Martyniuk P, Kubiszyn L, Wu C H, Wu Y R, Jurenczyk J, Rogalski A, Piotrowski J 2019 *IEEE Elec. Dev. Lett.* **40** 1396
- [2] Miki S, Miyajima S, China F, Yabuno M, Terai H 2021 *Opt. Lett.* **46** 6015
- [3] Xu R Y, Li Y C, Zheng F, Zhu G H, Kang L, Zhang L B, Jia X Q, Tu X C, Zhao Q Y, Jin B B, Xu W W, Chen J, Wu P H 2018 *Opt. Express* **26** 3947
- [4] Ryzhii V, Ryzhii M, Otsuji T, Leiman V, Mitin V, Shur M S 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 214503
- [5] Li C Y, Gu Z, Yao J, Kong H, Zan M H, Dong W F, Zhou L Q, Tang Y G 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 183505
- [6] Kimata M 2018 *Sensor. Mater.* **30** 1221
- [7] Rogalski M, Cywinska M, Ahmad A, Patorski K, Mico V, Ahluwalia B S, Trusiak M 2022 *Opt. Lett.* **47** 5793
- [8] Yang L, Liu H J, Dai S X, Lin C G 2023 *Opt. Lett.* **48** 1431
- [9] Wu J, Li D J, Zheng H, Sun Y L, Cui A J, Gao J H, Zhou K, Liu B 2022 *Appl. Opt.* **61** 10080
- [10] Bessho T, Ikeda Y, Yin W 2022 *Phys. Rev. D* **106** 095025
- [11] Chen Q, Dai Y, Li F Y, Zhang B, Li H C, Tan J R, Wang X H, He G L, Fei Y, Wang H, Zhang L B, Kang L, Chen J, Wu P H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 248502 (in Chinese) [陈奇, 戴越, 李飞燕, 张彪, 李昊辰, 谭静柔, 汪潇涵, 何广龙, 费越, 王昊, 张蜡宝, 康琳, 陈健, 吴培亨 2022 *物理学报* **71** 248502]
- [12] Zhang L S, Wu P 2016 *Infrared* **37** 33 (in Chinese) [张立帅, 吴平 2016 *红外* **37** 33]
- [13] Yang Z Y, Zhang J Z, Shan Y 2023 *Acta Aeronaut. Astron. Sin.* **44** 111 (in Chinese) [杨宗耀, 张靖周, 单勇 2023 *航空学报* **44** 111]
- [14] Jia T S, Cui K, Xue Y L, Su X F 2017 *Laser Infr* **47** 1373 (in Chinese) [贾天石, 崔坤, 薛玉龙, 苏晓锋 2017 *激光与红外* **47** 1373]

- [15] Tang G L, Li C L, Liu S J, Xu R, Xu Y, Yuan L Y, Wang J Y 2021 *J. Infrared Millim. Waves* **40** 847 (in Chinese) [唐国良, 李春来, 刘世界, 徐睿, 徐艳, 袁立银, 王建宇 2021 *红外与毫米波学报* **40** 847]
- [16] Ma N, Liu S, Li J Y *Laser* 2017 *Infrared* **47** 717 (in Chinese) [马宁, 刘莎, 李江勇 2017 *激光与红外* **47** 717]
- [17] Li J, Kirkwood R A, Baker L J, Bosworth D, Erotokritou K, Banerjee A, Heath R M, Natarajan C M, Barber Z H, Sorel M, Hadfield R H 2016 *Opt. Express* **24** 13931
- [18] Allmaras J P, Wollman E E, Beyer A D, Briggs R M, Korzh B A, Bumble B, Shaw M D 2020 *Nano Lett.* **20** 2163
- [19] Fardoost A, Wen H, Liu H, Vanani F G, Li G 2019 *Appl. Opt.* **58** D34
- [20] Zhang X L, Liu H, Yu H J, Zhang W H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 040303 (in Chinese) [张秀兰, 刘恒, 余海军, 张文海 2011 *物理学报* **60** 040303]
- [21] Wang X Z, Yin J F, Zhang K, Yan J 2019 *Optik* **185** 405
- [22] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, Wallace A M, Cova S 2000 *Meas. Sci. Technol.* **11** 712

Noise characteristics analysis and suppression of optical system based on infrared superconducting single-photon detector*

Zhou Fei¹⁾ Chen Qi¹⁾ Liu Hao²⁾ Dai Yue¹⁾ Wei Chen¹⁾ Yuan Hang¹⁾
 Wang Hao¹⁾ Tu Xue-Cou¹⁾ Kang Lin¹⁾ Jia Xiao-Qing¹⁾
 Zhao Qing-Yuan¹⁾ Chen Jian¹⁾ Zhang La-Bao^{1)†} Wu Pei-Heng¹⁾

¹⁾ (Research Institute of Superconductor Electronics, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

²⁾ (Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

(Received 19 September 2023; revised manuscript received 16 November 2023)

Abstract

Superconducting nanowire single-photon detector is a kind of refrigerated photon-counting detector with high performance, which can detect extremely weak signals. The noise of optical system is an important factor limiting the sensitivity of infrared superconducting nanowire single-photon detector. In order to improve the sensitivity of infrared detection system, the calculation model of signal-to-noise ratio and background radiation of infrared optical system based on superconducting single photon detector is established and the source of noise in optical system and the radiation emission of black body are analyzed theoretically. The noise characteristics of infrared optical system are quantitatively analyzed by photon counting capability of superconducting nanowire single-photon detector, and the relationship between the photon count rate and temperature under a small temperature difference is explored. An optical system based on infrared superconducting single photon detector is designed. The designed optical system improves the infrared photon coupling efficiency and the signal-to-noise ratio of the superconducting detection system, which are verified theoretically and experimentally, thus reducing the influence of background radiation on the detection system. The results show that the superconducting single-photon detector has high sensitivity to the analysis of the infrared optical system, and the minimum resolved movement distance is 2.74×10^{-2} mm. The physical coupling efficiency of the optical system and the photon count rate of the detection system are improved by optimizing the optical system, and the signal-to-noise ratio of the system increases by 2.7 times under the same conditions. It is expected that this infrared superconducting nanowire single-photon detector can be used in finer and higher precision detection field.

Keywords: infrared optic system, superconducting nanowire single-photon detector, sensitivity, signal-to-noise ratio

PACS: 85.25.Pb, 07.89.+b, 95.85.Hp, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.73.20231526

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12033002, 62101240, 62071218, 6207121461801206, 11227904), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0304002), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK202010177).

† Corresponding author. E-mail: lzhang@nju.edu.cn



基于超导单光子探测器的红外光学系统噪声分析和优化

周飞 陈奇 刘浩 戴越 魏晨 袁杭 王昊 涂学凑 康琳 贾小氢 赵清源 陈健 张蜡宝 吴培亨

Noise characteristics analysis and suppression of optical system based on infrared superconducting single-photon detector

Zhou Fei Chen Qi Liu Hao Dai Yue Wei Chen Yuan Hang Wang Hao Tu Xue-Cou Kang Lin
Jia Xiao-Qing Zhao Qing-Yuan Chen Jian Zhang La-Bao Wu Pei-Heng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 068501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231526

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231526>

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

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>

5—10 m波段超导单光子探测器设计与研制

Design and fabrication of superconducting single-photon detector operating in 510 μ m wavelength band

物理学报. 2022, 71(24): 248502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221594>

超导纳米线单光子探测器光子响应机制研究进展

Research progress of photon response mechanism of superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2021, 70(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210652>

自差分交流偏置超导纳米线单光子探测器

Superconducting nanowire single photon detector under AC-bias with self-differential readout

物理学报. 2022, 71(15): 158501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220373>

超大面积超导纳米线阵列单光子探测器设计与制备

Design and fabrication of single photon detector with ultra-large area superconducting nanowire array

物理学报. 2022, 71(24): 248501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221569>

高灵敏度的量子迈克耳孙干涉仪

High sensitivity quantum Michelson interferometer

物理学报. 2018, 67(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172563>