

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.03.012

单光子探测器制冷系统研究

吕海燕^{1,2,3}, 洪占勇^{1,2,3*}, 杜先常^{1,2,3}

(1 安徽省航空结构件成型制造与装备实验室, 安徽 合肥 230009;

2 合肥工业大学工业与装备技术研究院, 安徽 合肥 230009;

3 科大量子技术股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 负反馈雪崩光电二极管是一款单片集成负反馈电阻的砷化镓雪崩光电二极管光子计数器件。在基于负反馈雪崩光电二极管的单光子探测器中, 高灵敏度的制冷系统是保障其正常工作的必备条件。采用被动制冷和主动制冷相结合的方式, 设计了一套高灵敏度制冷系统。通过理论计算、仿真和实测该制冷系统, 表明该系统内部功耗降低 58.63%, 且在室温 25 °C 和高温 65 °C 环境下, 该系统均能使负反馈雪崩光电二极管工作温度控制在 (-20 ± 0.3) °C, 具有环境适应性强、制冷温差大、制冷温度可控等优点。

关键词: 光电子学; 负反馈雪崩光电二极管; 单光子探测器; 半导体制冷

中图分类号: TN315

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)03-00400-07

Research on refrigeration system of single-photon detector

LYU Haiyan^{1,2,3}, HONG Zhanyong^{1,2,3*}, DU Xianchang^{1,2,3}

(1 Anhui Province Key Lab of Aerospace Structural Parts Forming Technology and Equipment, Hefei 230009, China;

2 Institute of Industrial & Equipment Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3 QuantumCTek Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: Negative feedback avalanche photodiode (NFAD) is an InGaAs avalanche photon diode counting device with monolithic integrated negative feedback resistance. In single photon detector based on NFAD, a high-sensitivity refrigeration system is a necessary condition to ensure its normal operation. Therefore, a set of refrigeration system with high sensitivity has been designed by combing passive and active refrigeration in this paper. Through theoretical calculation, simulation and measurement, it is shown that the internal power consumption of the refrigeration system is reduced by 58.63%. Moreover, at room temperature of 25 °C and high temperature of 65 °C, the system can control the working temperature of negative feedback avalanche photodiode at (-20 ± 0.3) °C, indicating that the designed refrigeration system has the advantages of strong environmental adaptability, large refrigeration temperature difference and controllable refrigeration temperature.

Key words: optoelectronics; negative feedback avalanche photodiode; single-photon detector; semiconductor refrigeration

基金项目: 安徽省重点实验室资助项目 (W2018JSKF0065)

作者简介: 吕海燕 (1995 -), 女, 江苏泰州人, 研究生, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: 929849974@qq.com

导师简介: 洪占勇 (1970 -), 安徽合肥人, 硕士, 副教授, 主要从事机器视觉与光电检测、现代检测技术及仪器智能化方面的研究。

E-mail: hongzhanyong@126.com

收稿日期: 2022-02-11; 修改日期: 2022-03-14

*通信作者。

0 引言

1984年, BB84协议作为第一个量子密钥分发(QKD)协议, 极大地推动了量子信息安全技术的发展^[1,2]。单光子探测器是QKD系统的核心设备, 其性能指标是影响QKD成码率的关键因素之一。目前基于雪崩光电二极管的半导体单光子探测器是实用化应用里最主流的单光子探测器^[3]。基于不同半导体材料制成的单光子雪崩二极管对光谱的响应不尽相同, 例如适用于探测900~1700 nm近红外波段的砷化镓铟/磷化铟(InGaAs/InP)材料的单光子雪崩二极管、适用于探测600~900 nm波段硅材料的单光子雪崩二极管等。

雪崩光电二极管(APD)工作在盖革模式时体现的噪声特性与工作在其他模式时不同^[4-6], 盖革模式下由光信息的光电子和热噪声引起的热电子都被增益放大, 因此不能通过阈值来判定是由光电子还是由热电子引起的雪崩效应。然而随着温度的降低, 由热噪声引起的热电子对雪崩效应的影响也随之降低, 因此若想减弱热噪声对APD工作的影响、提高APD工作的可靠性, 就要使APD工作在低温环境下^[7]。

以APD为核心器件制造的单光子探测器具有体积小、成本低和易于系统集成等优势, 成为相关实用化领域中最主流的选择。单光子探测器依据运行方式的不同可分为门控模式和自由运行模式, 相较于门控模式的单光子探测器, 自由运行单光子探测器可进行异步探测、通用性更强、应用场景更广。在基于负反馈雪崩光电二极管(NFAD)的自由运行单光子探测器中, 为降低热噪声对雪崩效应的影响, 需要设计一套制冷温差大的制冷系统, 以保障在常温和高温环境下NFAD管的工作温度依然保持在-20℃左右。半导体制冷器可有效地给APD提供冷量并实现精确控温, 从而保证APD的正常工作^[8,9]。

半导体制冷器具有制冷速度快、尺寸小、无噪声、无机械振动、温度可控等优点, 同时聚四氟乙烯具有很好的隔热性能, 是应用较为广泛的隔热材料。本文使用聚四氟乙烯被动隔热制冷与半导体制冷(TEC)的主动制冷相结合的方式, 设计了一套应用在单光子探测器中的制冷系统, 该系统具有制冷温差大、环境适用性强和制冷温度可控等优点。

1 方案设计

1.1 结构组成

制冷系统内部结构主要由NFAD管、TEC、聚四氟乙烯、腔体等部件组成。可伐合金是国际通用的典型Fe-Ni-Co封接合金, 在20~450℃范围内具有与硅硼硬玻璃有着相近的线膨胀系数, 可伐合金的居里点较高, 在低温环境下具有很强的组织稳定性。在对散热要求较高的地方, 一般使用无氧铜作为散热的主要材质进行设计, 无氧铜的导热系数为386 W/(m·K), 而可伐合金的导热系数仅为20.6 W/(m·K)。故制冷系统外壳腔体采用10号钢和无氧铜组合方式, 腔体底部区域采用无氧铜, 环框采用10号钢, 无氧铜和10号钢之间的表面连接处使用高温熔接, 以有利于系统的散热, 腔体表面镀镍处理, 以提高结构件的防腐性能; 对外引针采用可伐合金4J42, 直径为0.8 mm, 表面镀1.3~5 μm的金层; 选择玻璃绝缘子作为绝缘体。腔体尺寸为55 mm × 45 mm × 30 mm, 内部填充氮气, 采用平行封焊焊接盖板, 以确保制冷系统结构件的气密性。使用无氧铜将NFAD管包裹, 铜管夹表面与TEC冷端相连, 有利于TEC冷端温度快速传递至NFAD管内, 从而提高制冷系统的灵敏度; 使用聚四氟乙烯隔热包裹无氧铜管夹, 以降低其他组件对NFAD管的热影响。制冷系统内部结构如图1所示。

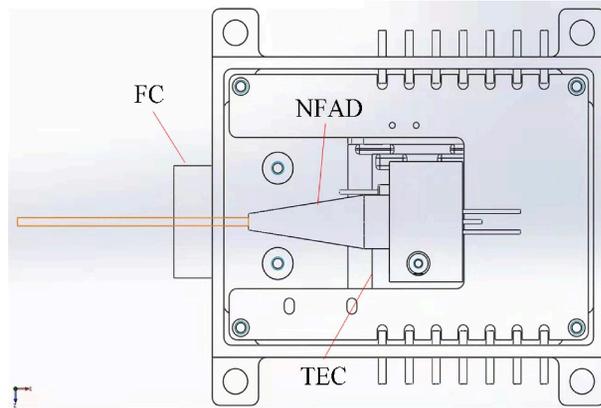


图1 制冷系统内部结构图

Fig.1 Internal structure diagram of refrigeration system

1.2 制冷盒内部热分析

在进行制冷系统的TEC选型时,需要对制冷系统内部结构进行功耗分析,从而使所选择的TEC满足制冷系统的需求。在如图1所示的制冷系统结构体中,其内部功耗主要由NFAD管功耗、热辐射和热传导三部分组成。

1.2.1 NFAD管功耗

NFAD管的功耗主要由单光子雪崩二极管(SPAD)和淬灭电阻 R_s 功耗组成,设定SPAD的功率为 Q_{SPAD} ,电阻 R_s 的功率为 Q_R ,NFAD管的功耗可表示为

$$Q = fE = \frac{1}{2} f \Delta U q, \quad (1)$$

式中: f 为重复频率, E 为单次发热量, ΔU 为电压值, q 为电荷量。由(1)式计算可得,对于所选用NFAD管, $Q_{\text{SPAD}} = 2 \times 10^{-6} \text{ W}$, $Q_R = 2 \times 10^{-6} \text{ W}$,因此NFAD管的总功耗为 $4 \times 10^{-6} \text{ W}$,基本可忽略不计。

1.2.2 热辐射

热辐射是一种以电磁波来传递热能的方式,不依赖于任何介质,辐射换热过程在真空中以光速进行传递。由图1可知,铜管夹包裹NFAD管置于隔热介质聚四氟乙烯材料内,铜管夹温度可等效为NFAD管温度,铜管夹外表面温度、黑度和表面积分别设为 T_1 、 ϵ_1 和 F_1 ,聚四氟乙烯隔热介质内表面温度、黑度和表面积分别设为 T_2 、 ϵ_2 和 F_2 ,依据斯蒂芬-玻尔兹曼定律(四次方定律)^[10],铜管夹外表面和聚四氟乙烯内表面之间的辐射热换量可表示为

$$Q_{12} = \frac{5.67 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}. \quad (2)$$

铜管夹外表面与聚四氟乙烯内表面之间贴合无间隙, $T_1 \approx T_2$,故增加聚四氟乙烯后 $Q_{12} \approx 0 \text{ W}$;不增加聚四氟乙烯隔热介质, $Q_{12} \approx 0.2753 \text{ W}$ 。因此增加聚四氟乙烯介质可以有效降低铜管夹和10号钢腔体内表面之间的辐射热换量。

1.2.3 热传导

热传导是指无宏观运动的介质因其内部温度差发生的热传递现象,常见于固体、液体和流体中,然而真

正意义上的热传导只在固体中才会发生。在制冷系统结构设计过程中, 内部密闭空间使用氮气填充, NFAD管表面与聚四氟乙烯接触, 同时通过3根引针(材质为可伐合金4J29)与PCB板相连接, 基于此在热传导的分析过程中主要从这两个方面进行分析。

在引脚的热传导分析过程中, PCB板的表面温度设为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, NFAD管内部温度设为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, PCB板厚度设为 6 mm , 依据热传导公式^[10], 3根引针对NFAD管的单位时间热传导功率可表示为

$$Q = \frac{t_w - t_N}{b_1 / (\lambda_1 A_1)}, \quad (3)$$

式中: $t_w = 338\text{ K}$, $t_N = 248\text{ K}$, PCB板厚度 $b_1 = 0.006\text{ m}$, 可伐合金4J29导热系数 $\lambda_1 = 20.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 传热面积 $A_1 = 4.77 \times 10^{-7}\text{ m}^2$ 。计算可得3根引脚对NFAD的热传导功率值约为 0.1474 W 。

对聚四氟乙烯与NFAD管之间的热传导进行分析, 聚四氟乙烯表面温度设为 T_a , NFAD管表面靠近TEC冷端温度 T_b 设为 238 K , 10号钢腔体内表面温度和内部气体温度 T_c 设为 338 K , 则聚四氟乙烯传导至NFAD管的热换量 Q_a 可表示为

$$Q_a = \frac{T_a - T_b}{b_2 / (\lambda_2 A_2)}, \quad (4)$$

式中: 聚四氟乙烯的厚度 $b_2 = 0.06\text{ m}$ (平均值), 聚四氟乙烯的导热系数 $\lambda_2 = 0.256\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 聚四氟乙烯的传热面积 $A_2 = 3.89 \times 10^{-4}\text{ m}^2$ 。

根据四次方定律, 10号钢腔体辐射到聚四氟乙烯表面的热换量 Q_b 可表示为

$$Q_b = \frac{5.67F_1 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_a} - 1 \right)}, \quad (5)$$

式中: T_a 为聚四氟乙烯表面温度, 聚四氟乙烯的黑度 $\varepsilon_a = 0.95$, 聚四氟乙烯的外表面积 $F_1 = 3.89 \times 10^{-4}\text{ m}^2$ (计算得到), 10号钢腔体内表面温度 $T_c = 338\text{ K}$, 10号钢腔体黑度 $\varepsilon_c = 0.28$, 10号钢腔体内表面积 $F_2 = 0.008475\text{ m}^2$ 。

根据对流换热公式^[10], 聚四氟乙烯表面对流到空气中的热量 Q_c 可表示为

$$Q_c = hA(T_c - T_a), \quad (6)$$

式中: T_a 为聚四氟乙烯表面温度, 腔体内部气体温度为 $T_c = 338\text{ K}$, 等同于10号钢腔体内表面温度, h 为表面对流传热系数。制冷盒内部填充氮气, 其体积为 $7.425 \times 10^{-5}\text{ m}^3$, $h \approx 5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 壁面面积 $A = 0.000207\text{ m}^2$ 。

依据能量守恒定律, $Q_a = Q_b + Q_c$, 由(4)~(6)式可解得聚四氟乙烯表面温度 $T_a = 275.35\text{ K}$, 同时依据(5)式解得聚四氟乙烯传导至NFAD管的热换量 $Q_a = 0.0617\text{ W}$, 因此增加聚四氟乙烯隔热介质对NFAD热传导的热换量略有影响。

综上所述, 使用聚四氟乙烯隔热介质将NFAD管进行包裹后, 外界环境对NFAD管的热辐射和热对流为0, NFAD管自身功耗为 $4 \times 10^{-6}\text{ W}$, 通过聚四氟乙烯隔热介质和引针传导至NFAD管内部的热换量分别为 0.0617 W 、 0.1474 W , 此时NFAD管的总功耗为 0.2091 W 。不增加聚四氟乙烯隔热介质, 热辐射功耗约为 0.2753 W , 此时NFAD管总功耗为 0.4844 W 。可见, 使用聚四氟乙烯隔热介质后, NFAD管总功耗下降了 0.2753 W , 整体功耗降低了 56.83% 。

1.3 TEC制冷方案设计

在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温环境下, NFAD 管工作温度需制冷至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同时 NFAD 管的总功耗为 0.21 W , 选择三级 TEC (最大制冷温差为 $117\text{ }^{\circ}\text{C}$) 进行主动制冷设计。通过规格书中的制冷量、电流、温差图, 按照 $Q_c = 0.21\text{ W}$, 选择 $DT=110\text{ }^{\circ}\text{C}@Th=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 曲线, 获知 TEC 工作电流为 2.1 A 、工作电压为 12 V , 此时 TEC 的功耗为 25.2 W , 该功耗值也是本研究进行热仿真的依据。在 TEC 制冷方案设计中, 使用热敏电阻 PT100 来实时反馈 NFAD 管工作温度, 使用 ADC、FPGA 和 DAC 进行温度采集与控制, TEC 制冷方案的框图如图 2 所示。

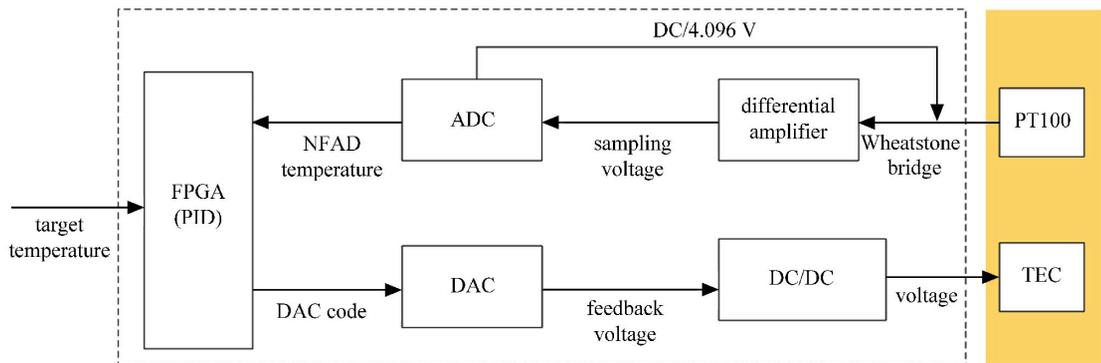


图2 制冷方案框图

Fig.2 Block diagram of refrigeration scheme

在上述制冷方案中, FPGA 通过热敏电阻、惠斯顿电桥、差分放大器和 ADC 采集 NFAD 管工作温度, 与目标温度比较后, 通过 PID 算法输出 DAC 码, 经过 DAC 和直流电压转换, 控制 TEC 进行精确控温, 其中惠斯顿电桥的参考电压为 ADC 输出的直流参考电压。

2 模型参数设计及仿真

为方便系统集成, 制冷系统腔体采用风冷散热方式。热仿真时, 腔体内部热功耗设置为 25.41 W (TEC 功耗为 25.2 W , NFAD 管总功耗为 0.2091 W), 环境温度设为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, TEC 温差设为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风量设为 $20\text{ m}^3/\text{h}$, 散热器选用无氧铜翅片, 尺寸设置为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 腔体内部填充氮气。在仿真模型建立时, 忽略了部分圆角弧面、螺钉孔以及与冷板传热关系不大的局部部件, 整体模型如图 3 所示。

热仿真采用 icepak 软件进行分析, 仿真计算表明, TEC 的热端温度为 $67.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冷端最低温度为 $-42.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷热端温差约为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 故所设计制冷系统能够达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的制冷目标, 热仿真腔体内部热仿真结果如图 4 所示。

3 实验验证

用温箱模拟单光子探测器使用时的室温和高温状态, NFAD 内置一个热敏电阻以实时监测 NFAD 的温度值。在进行实验验证时, 将 TEC 的制冷目标温度设为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下测试 35 min 后, 温箱温度上升至 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后继续进行测试, 热敏电阻实时上报 NFAD 管工作时的环境温度, 测试结果如图 5 所示, 其中红线为 TEC 制冷的目标温度, 蓝线为 NFAD 管所处的环境温度。由测试结果可见, 所实现的制冷系统在室温和高温阶段均能实现 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 精准控温, 满足基于 NFAD 管的单光子探测器工作制冷需求。

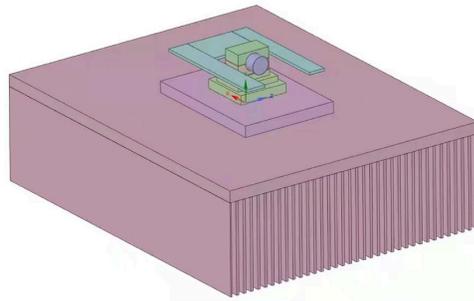


图3 热仿真模型图

Fig.3 Diagram of thermal simulation model

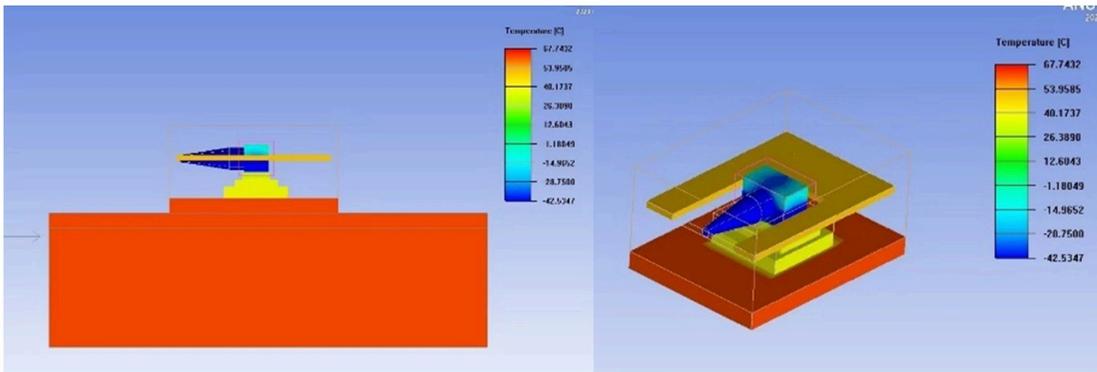


图4 热仿真结果示意图

Fig.4 Schematic diagram of thermal simulation results

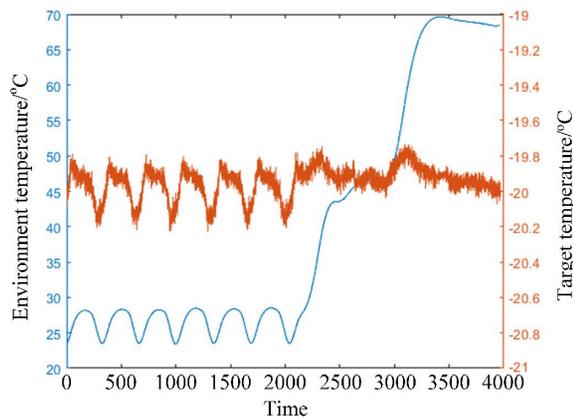


图5 制冷系统测试结果图

Fig.5 Test results of refrigeration system

4 结 论

实现了一种主动与被动相结合的制冷系统, 满足了基于NFAD管的单光子探测器制冷需求。使用聚四氟乙烯隔热介质进行被动制冷设计, 通过腔体内部热分析, 理论计算出NFAD管总功耗从0.4844 W降至0.2091 W, 整体功耗降低56.83%; 使用TEC进行主动制冷设计, 热仿真分析和实验验证表明: 在室温25 °C和高温65 °C环境下均能使NFAD管工作的环境温度控制在-20 °C左右, 满足基于NFAD管的单光子探测器制冷需求。所实现的制冷系统有望广泛应用于单光子探测器制冷领域。

参考文献:

- [1] Bennett C H. Quantum key distribution and coin tossing [C]. *International Conference on Computers*, 1984.
- [2] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, 1984: 175–179.
- [3] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, *et al.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(1): 381-393.
- [4] Ribordy G, Gisin N, Guinnard O, *et al.* Photon counting at telecom wavelengths with commercial InGaAs/InP avalanche photodiodes: Current performance [J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, 51(9–10): 1381–1398.
- [5] Lacaita A, Zappa F, Cova S, *et al.* Single-photon detection beyond 1 μm : Performance of commercially available InGaAs/InP detectors[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(16): 2986–2996.
- [6] Yin H, Hong Z Y, Ding C Y. Research of performance test system of avalanche diode [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(3): 321–327.
尹航, 洪占勇, 丁传杨. 雪崩光电二极管性能测试系统的研究 [J]. 量子电子学报, 2020, 37(3): 321–327.
- [7] Yao Y D, Hong Z Y, Luo C G. Study on the performance of vapor chamber for near infrared single photon detector [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(2): 227–231.
姚友丹, 洪占勇, 罗成刚. 用于近红外单光子探测器的均温板性能研究 [J]. 半导体光电, 2020, 41(2): 227–231.
- [8] Yan Z Z, Hamel D R, Heinrichs A K, *et al.* An ultra low noise telecom wavelength free running single photon detector using negative feedback avalanche diode [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7): 073105.
- [9] Chen Z L, Sun Z Q. The design of multi-stage semiconductor cooler [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2000, 31(11): 30–31.
陈振林, 孙中泉. 多级半导体制冷器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2000, 31(11): 30–31.
- [10] Yang S M, TAO W Q. *Heat Transfer* [M]. 4th edition, Beijing: Higher Education Press, 2006.
杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第4版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.