便携式 NV 色心测温仪的热致形变抑制*

孙洪胤[1)2)]，邢力[2†)]，刘玉冰[1)2)]，冯晓娟[2)] ，李小亭[1)]

1)（河北大学 质量技术监督学院，保定 071000）

2)（中国计量科学研究院 热工计量科学研究所，北京 100029）

摘 要

金刚石氮-空位（nitrogen-vacancy, NV）色心测温在原理上具有超高灵敏、快速响应和适应极宽温区等优点，被视为解决集成电路、微纳制造等领域高精度原位测温难题的重要方法之一。然而，现有 NV 色心测温装置存在精度低、体积大、抗干扰能力差等问题。为设计高精度、抗热扰的便携式 NV 色心测温仪，首先理论分析了热致形变对激光光斑位置、偏振态和功率稳定性的影响。其次，通过有限元仿真优化了镜架材料、有无陶瓷垫片和光学元件不同固定方式等工况条件，优化后关键光学元件热扰位移降低约 83%。而后，根据仿真优化方案搭建了便携式 NV 色心测温仪，并开展了测温灵敏度、Allan 方差和标准不确定度等测试。结构优化后 10 Hz 内的平均测温灵敏度达到了 0.05 K/ $Hz^{1/2}$，Allan 方差的零偏不稳定性相较于优化前减小约 56.4%，测温标准不确定度则降至 0.10 K。最后，实验展示了射频芯片表面的温度测量方面的实际应用。

关键词：金刚石氮-空位色心，便携式测温，热致形变，标准不确定度，射频芯片

基金：中国计量科学研究院重点领域基本科研业务费项目（批准号：AKYZD2604-2）；国家自然科学基金(批准号：62505304)(AKYJJ2609)；市场监管技术保障专项项目(批准号：2025YJ01) 。

† 通信作者.E-mail: xingli@nim.ac.cn

第一作者.E-mail: sunhongyin@stumail.hbu.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿

一 引 言

随着集成电路向高功率密度和 3D 堆叠方向发展，射频芯片、宽禁带芯片等大功率芯片容易因电流传输、阻抗损耗或局部功率耗散产生非均匀温升和局部热点[1,2]。局部温度异常升高不仅会影响芯片的电学性能和工作稳定性，还会加速材料老化并降低长期可靠性[3-5]，因此，准确获取芯片运行状态下的局部温度分布具有重要意义。然而，传统测温方法如热电偶、红外热成像等[6,7]在实际应用中各有局限，难以同时满足高精度、高抗扰的原位微纳米尺度测温的需求。随着量子精密测量技术的发展，基于金刚石氮-空位色心（nitrogen-vacancy, NV）传感技术在温度[8,9]、磁场[10,11]、应力[12,13]和电场[14]等测量中受到广泛关注。NV 色心可在室温环境下通过激光激发和微波操控实现对物理量的灵敏探测，其具有超高灵敏、快速响应、微纳米尺度空间分辨率和物理化学性质稳定等优势[15,16]，理论上有望解决集成电路等领域高精确度原位测温的问题。然而，要真正满足芯片表面原位、非侵入、复杂工况下的测温需求，测温仪还需兼具强抗干扰能力与便携性，因此亟需设计一种抗干扰能力强的便携式金刚石 NV 色心测温仪，促进芯片表面微纳测温技术的应用发展[17]。

近年来，基于 NV 色心的传感器正在向小型化、集成化方面发展。2019 年 Webb 等[18]设计了体积为 539 cm^3 的手持式金刚石 NV 色心磁强计，将光电二极管直接贴近金刚石表面以提高荧光收集效率，最终在 125 Hz 带宽下磁场灵敏度达到 10 $nT/Hz^{1/2}$。2021 年 Stürner 等[19]设计了光纤光激发式 NV 色心磁强计，并将金刚石样品、GRIN 透镜、微波谐振器和光电探测器集成于一体，磁场灵敏度达到了 344 $pT/Hz^{1/2}$。2025 年 Zhao 等[20]设计了集成在光波导内部的 NV 色心温度传感器，在含 NV 色心的金刚石晶片中制备了表面包层光波导，实现了光波导

录用稿件，非最终出版稿

内部的原位温度监测，其测温灵敏度达到 1.1 mK/Hz$^{1/2}$。上述研究推动了 NV 色心传感器向小型化和便携式方向发展，但激光源和微波源仍采用外部设备，尚未实现一体化集成。2022 年 Wang 等[21]采用小型 520 nm 激光二极管替代体积较大的固体激光器，并将激光二极管、金刚石样品和光电探测器集成于一体，传感器磁场测量灵敏度达到了 20.77 nT/Hz$^{1/2}$。2024 年 Pogorzelski 等[22]提出了一种集成 LED 的 NV 色心磁强计，采用堆叠式 PCB 结构，将激发光源、金刚石样品和光电二极管集成于一体，磁场测量灵敏度约为 28.32 nT/Hz$^{1/2}$。2026 年 Singh 等[23]提出了一种兼容商用内窥镜系统的光纤式 NV 色心磁强计，用同一根光纤实现激光传输和荧光收集，在 20 Hz 下磁场灵敏度约为 3 nT/Hz$^{1/2}$。综上，目前部分研究已尝试将激光器或微波源集成于传感器内部，但大多面向磁场测量，面向温度测量应用的集成化金刚石量子传感器尚缺乏系统研究。

本研究提出了一种基于热致形变抑制的便携式金刚石 NV 色心测温仪设计方法，并实现了射频芯片表面温度的测量。首先，阐明了金刚石 NV 色心的测温原理以及热致形变对激光位置、偏振态和稳定性的影响机理，并分析了光学元件介质的热膨胀系数、折射率等参数对热致形变的影响。而后，针对热源和环境温度引起的热致形变问题，建立了三维热-结构耦合有限元模型，进而提出了关键位置镜架差异化选材、氧化锆陶瓷垫片设置和光学元件侧面粘接固定的光机结构优化方案。其次，针对优化前后的测温仪进行了测温灵敏度、Allan 方差以及标准不确定度的分析对比，证明了方法的有效性。最终，利用射频芯片自身发射的微波场直接操控 NV 色心自旋，实现了射频芯片表面不同点位的温度测量。

二　理论分析

2.1 金刚石 NV 色心测温原理及连续式测温灵敏度

当金刚石晶格中的一个碳原子被氮原子替代，同时相邻的一个碳原子被空位替代时，可形成 NV 色心。NV 色心具有两种电荷态，即 NV^0 以及 NV^-。其中，带负电荷的 NV^-色心有两个自由电子，其基态为自旋三重态，包括 m_s=0 和 m_s=±1 子能级，电子自旋量子数为 $S=1$。金刚石 NV 色心对物理量的敏感性由其哈密顿量决定，其表达式为[24]：

$$H_s = DS_z^2 + E(S_x^2 - S_y^2) + \gamma_e \vec{B} \bullet \vec{S}\ , \tag{1}$$

其中，D 为零场劈裂能，室温无外磁场条件下约为 2.87 GHz，当温度发生变化时，m_s=0 与 m_s=±1 能级之间的间隔发生变化，从而使光探测磁共振（optically detected magnetic resonance, ODMR）谱线的 D 值频率偏移；$\vec{S} = (S_x, S_y, S_z)$ 为电子自旋算符矢量；E为横向零场劈裂参数，主要与晶格应变及横向电场有关；γ_e 为电子旋磁比；$\vec{B}$ 为外部矢量磁场。

在连续式 ODMR 测温中，NV 色心荧光强度 I_{fluo} 随微波频率变化形成的共振谱线可表示为[25]：

$$I_{\mathrm{fluo}}(f_w) = R_{\mathrm{fluo}}\left(1 - CF\left(\frac{f_w - f_0}{\Delta\nu}\right)\right), \tag{2}$$

其中，f_w 为微波频率，R_{fluo} 为荧光计数率，C为 ODMR 谱线对比度，f_0 为谱线共振中心频率，$\Delta\nu$ 为谱线半高全宽，F 为线型函数。此外，根据参考文献[25]，连续式 ODMR 温度测量灵敏度表达式为：

$$\eta = \frac{K_F}{\left|dD/dT\right|} \cdot \frac{\Delta\nu}{C\sqrt{R_{\mathrm{fluo}}}}, \tag{3}$$

其中，K_F 为洛伦兹线型的相关常数。因此，R_{fluo} 对 ODMR 谱线及灵敏度都有直接影响。此外，若将激光在样品表面的强度分布近似为高斯分布，则有：

录用稿件，非最终出版稿

$$I(x,y)=\frac{2P_{\mathrm{exc}}}{\pi w^2}\exp\left[-\frac{2\left((x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right)}{w^2}\right], \tag{4}$$

其中，P_{exc}为入射到样品表面的激发光功率；w为光斑半径；（x_0，y_0）为光斑中心位置。当光学元件发生微小倾斜或位移时，光斑中心会发生偏移，即$x_0 \to x_0+\Delta x_0$，$y_0 \to y_0+\Delta y_0$。考虑 NV 色心的空间分布和有限探测区域，实际测量区域内的有效激发功率P_{eff}可表示为：

$$P_{\mathrm{eff}}=\iint_S I(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\ 。 \tag{5}$$

当光斑中心发生偏移或激发光功率发生波动时，有效激发功率随之变化。在小扰动条件下，可近似写为：

$$\Delta P_{\mathrm{eff}}\approx\frac{\partial P_{\mathrm{eff}}}{\partial P_{\mathrm{exc}}}\Delta P_{\mathrm{exc}}+\frac{\partial P_{\mathrm{eff}}}{\partial x_0}\Delta x_0+\frac{\partial P_{\mathrm{eff}}}{\partial y_0}\Delta y_0\ 。 \tag{6}$$

因此，热致光学扰动会改变 NV 色心激发范围和样品端激发光功率，造成测量重复性变差及测点定位误差增大。在小扰动条件下，荧光计数率变化可近似表示为：

$$\Delta R_{\mathrm{fluo}}\approx\frac{\partial R_{\mathrm{fluo}}}{\partial P_{\mathrm{eff}}}\Delta P_{\mathrm{eff}}\ 。 \tag{7}$$

综上所述，热致形变会引起光斑偏移和有效激发光功率波动，进而转化为荧光计数率的波动，导致 ODMR 谱线对比度下降和荧光信号基线漂移，从而增大拟合误差并劣化测量灵敏度[26,27]。

2.2 热致形变对激光位置、偏振与功率稳定性的影响

NV 色心测温仪中包含的激光器与液晶相位延迟器（liquid crystal variable retarder, LCVR）等内部发热器件温度以及环境温度波动，均会导致镜架和光学元件发生微小形变，进而影响激光光斑位置、偏振态及功率稳定性。

当光学元件或镜架两端因热致形变产生相对位移差Δu时，其倾斜角β可近

录用稿件，非最终出版稿

似表示为：

$$\beta \approx \frac{\Delta u}{l}, \tag{8}$$

其中，l 为元件特征长度。若光束在该元件后继续传播距离 s，则光斑横向偏移量 Δx 可近似表示为 $\Delta x \approx s\beta$，因此微小热致形变会在后续激光传播中不断累积，形成光斑偏移，导致金刚石样品表面的激光聚焦位置发生漂移。此外，热致形变会改变双折射类元件的快轴角度和相位延迟量，从而影响激光的偏振态，该过程可通过 Jones 矩阵进行描述。

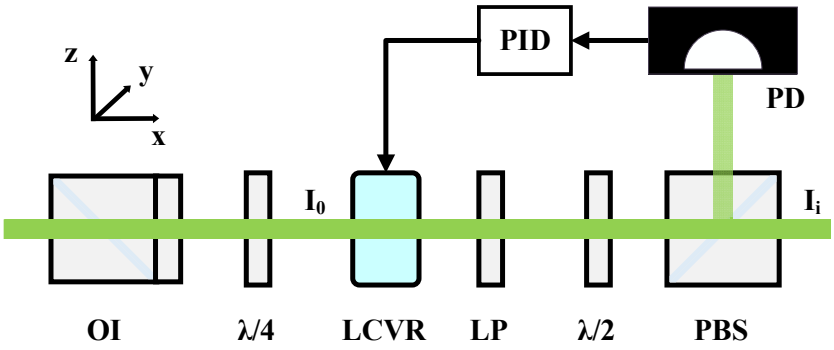


图 1 金刚石 NV 色心测温的激光激发光路

Fig.1. Optical path of laser excitation for NV centers in diamond temperature measurement

激发光路主要由光隔离器（PBS 和 1/4 波片胶合）、1/4 波片、LCVR、线偏振片、半波片和 PBS 组成，如图 1 所示。假设入射到 LCVR 的激光 Jones 矩阵为：

$$G_0 = E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

其中，E_0 为入射光的电场强度，且 $E_0^* E_0 = I_0$。LCVR 的相位延迟量为 δ_0 并且快轴角度 $\theta_0 = 45°$，当受到温度波动干扰时，假设其相位延迟量变化为 $\Delta\delta_0$，快轴角度变化为 $\Delta\theta_0$，LCVR 的 Jones 矩阵为：

$$G_{\mathrm{LCVR}}(\delta_0+\Delta\delta_0,\theta_0+\Delta\theta_0)=\begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) & -\sin(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) \\ \sin(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) & \cos(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\delta_0+\Delta\delta_0}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\delta_0+\Delta\delta_0}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) & \sin(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) \\ -\sin(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) & \cos(\frac{\pi}{4}+\Delta\theta_0) \end{bmatrix}。 \tag{10}$$

录用稿件，非最终出版稿

线偏振片初始方位角为 90°，假设结构热致形变引起的快轴角度变化为$\Delta\theta_1$，线偏振片的 Jones 矩阵为：

$$G_{\mathrm{LP}} \approx \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\theta_1 \\ -\Delta\theta_1 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{11}$$

假设半波片快轴角度为 67.5°，则半波片与 PBS 的 Jones 矩阵为：

$$G_{\mathrm{PBS}+\lambda/2} = \frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} 。 \tag{12}$$

根据马吕斯定律，当各变化量均很小时，忽略二阶及更高阶项，最终出射激光的光强I_i可近似表示为：

$$I_i = G_1^* G_1 \approx \frac{I_0}{2}\cos^2\frac{\delta_0}{2} + I_0\cos^2(\frac{\delta_0}{2})\Delta\theta_1 - \frac{I_0}{4}\sin\delta_0\Delta\delta_0 , \tag{13}$$

其中，$G_1 = G_{\mathrm{PBS}+1/2}G_{\mathrm{LP}}G_{\mathrm{LCVR}}G_0$。因此，激发光路中线偏振片、半波片及 PBS 的偏振态变化会引起样品端激发光的功率波动。进一步分析$\Delta\delta_0$和$\Delta\theta_1$受温度变化的原因，首先相位延迟量的变化量可表示为：

$$\Delta\delta = \Delta\delta_T + \Delta\delta_\sigma + \Delta\delta_\theta , \tag{14}$$

其中，$\Delta\delta_T$为均匀温度场变化引起的相位延迟量的变化量，可表示为：

$$\Delta\delta_T \approx \frac{2\pi L_0}{\lambda_0}\left[\left(\frac{\mathrm{d}n_s}{\mathrm{d}T} - \frac{\mathrm{d}n_f}{\mathrm{d}T}\right) + \alpha_L\Delta n_0\right]\Delta T , \tag{15}$$

其中，λ_0为激光波长；L_0为激光在光学元件中传播的有效长度；α_L为线膨胀系数；Δn_0为参考双折射率差；对于均匀温度场和近似均匀介质，快轴和慢轴折射率可分别表示为$n_f(T) \approx n_{f,0} + \mathrm{d}n_f/\mathrm{d}T \times \Delta T$和$n_s(T) \approx n_{s,0} + \mathrm{d}n_s/\mathrm{d}T \times \Delta T$，其中，$n_{f,0}$和$n_{s,0}$分别为参考温度下的快轴和慢轴折射率。$\Delta\delta_\sigma$则为由应力双折射引起的相位延迟量的变化量，可表示为：

$$\Delta\delta_\sigma \approx \frac{2\pi L_0}{\lambda_0}C_\sigma(\sigma_1 - \sigma_2) \approx \frac{2\pi L_0}{\lambda_0}C_\sigma E\alpha_L\Delta T , \tag{16}$$

录用稿件，非最终出版稿

其中，C_σ为等效光弹系数，E为材料的杨氏模量，σ_1和σ_2为垂直于光传播方向的横截面内的两个主应力。$\Delta\delta_\theta$则表示结构热致倾斜改变光束入射角与传播路径所带来的相位延迟量变化量。因此，相位延迟量的变化量直接受温度变化影响。

其次，光学元件介质自身或安装结构整体热致形变会造成快轴角度$\Delta\theta$的变化。在初始快轴方向上选取两个参考点 A 和 B，两点在垂直于初始快轴方向上的位移均可表示为温度的函数，即$u_{Ay}=u_{Ay}(T)$，$u_{By}=u_{By}(T)$。设两个参考点之间的距离为L_1，则温度引起的快轴角度变化可近似表示为：

$$\Delta\theta\approx\frac{\left[u_{By}(T)-u_{Ay}(T)\right]-\left[u_{By}(T_0)-u_{Ay}(T_0)\right]}{L_1}。\tag{17}$$

综上，温度变化主要引起相位延迟量漂移与快轴角度变化，从而改变光场的偏振传输特性及出射偏振状态，由公式（13）可知最终影响了激光功率的稳定性。

三　装置设计及仿真

3.1 便携式金刚石 NV 色心测温仪总体设计

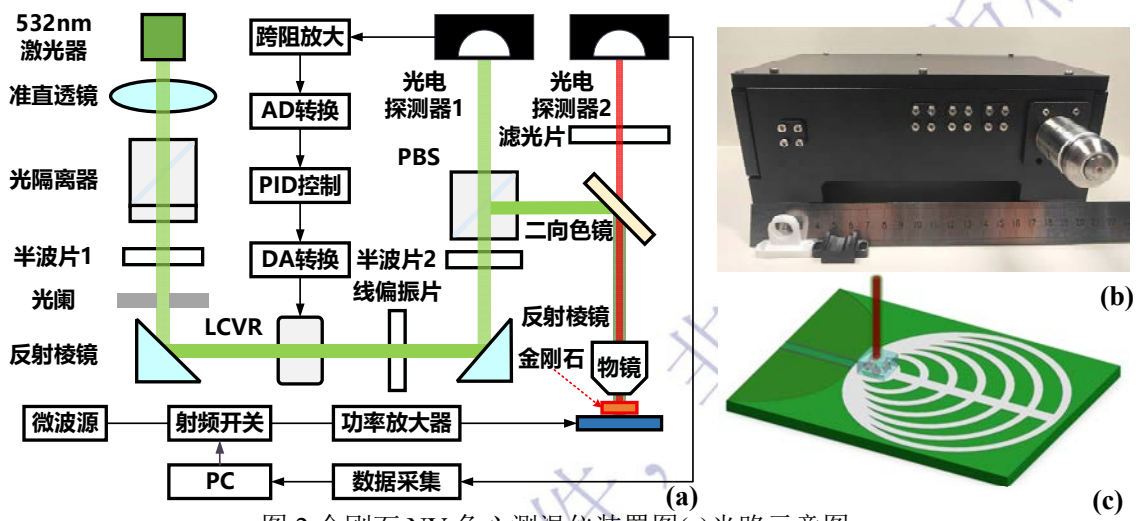


图 2 金刚石 NV 色心测温仪装置图(a)光路示意图
(b)实物图(c)射频芯片与金刚石位置示意图

Fig.2. Device diagram of NV centers in diamond thermometer (a) schematic diagram of optical path (b) physical diagram (c) schematic diagram of the position of the RF chip and diamond

如图 2 所示，金刚石 NV 色心测温仪主要由激光激发、激光功率稳定、微波操控、荧光收集和数据处理等模块组成。激发光路采用 532 nm 激光二极管作为

光源，并基于 LCVR 构建了激光功率闭环稳定控制模块，通过调节 LCVR 相位延迟量保持激光功率的稳定性。激光最终聚焦至 2.5 mm×2.5 mm×0.3 mm 内含 400 ppb NV 色心的块状金刚石样品表面，实现 NV 色心极化。微波操控模块由微波源（Rohde & Schwarz SMIQ06B）、射频开关（Mini-Circuits ZASWA-2-50DRA+）、功率放大器（Mini-Circuits ZHL-16W-43-S+）和微波天线组成，并且在射频芯片表面温度测量实验中省去了微波天线，直接用射频芯片本身发出的微波场来操控极化后的 NV 色心。最后通过自制光电探测器收集 NV 色心发出的荧光，获得 ODMR 谱线并拟合得到 D 值。在 D-T 关系标定方面，参照参考文献[28]的光纤式 NV 色心测温装置，将该金刚石样品贴于光纤上，并插入铜均温块恒温腔，用两支已校准的 PT100 铂电阻温度计（标准不确定度为 0.01 K）进行量值传递，得到该样品 D-T 关系如下：

$$D(\mathrm{MHz}) = -1.884\times10^{-4}(\mathrm{MHz/K^2})*T^2(\mathrm{K^2}) + 3.826\times10^{-2}(\mathrm{MHz/K})\times T(\mathrm{K}) + 2875.478(\mathrm{MHz})\ 。 \quad (18)$$

3.2 仿真模型设置

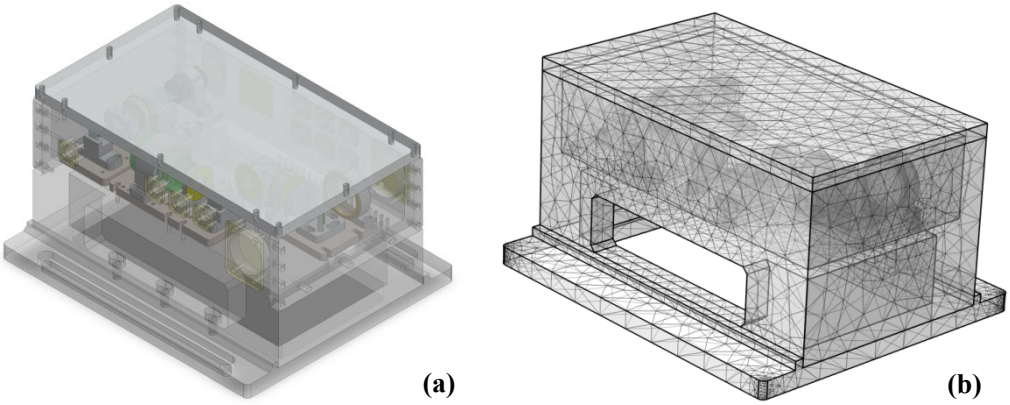


图 3 测温仪有限元模型与网格划分 (a) 有限元模型 (b) 网格划分模型

Fig.3. Finite element model and mesh partitioning of the NV centers thermometer (a) finite element model (b) mesh division model

仿真采用稳态热传导与固体力学单向顺序耦合分析方法，按 1:1 比例建立测温仪三维热-结构耦合有限元模型，如图 3(a)所示，将模型划分为 1.34×10^6 个四

面体单元，如图 3(b)所示。仿真分别针对不同镜架材料、有无陶瓷垫片及光学元件的不同固定方式设置了对比方案，并以光学元件中心位移和热应力作为评价指标。三组仿真基准温度均为 293.15 K，选取 233.15 K~353.15 K 环境温度范围内 7 个温度点（间隔均为 20 K）计算工况，仿真涉及的主要材料的热物性与力学参数如表格 1 所示。

表格 1 主要材料的热物性和力学参数

Table.1. Thermal and mechanical properties of main materials

参数（单位）	微晶玻璃	超硬铝 7050	纯铜
密度 $\rho(\mathrm{g/cm^3})$	2.50~2.60	2.80~2.83	8.93~8.96
杨氏模量 $E(\mathrm{GPa})$	90~92	70~72	110~120
泊松比 ν	0.24~0.25	0.32~0.33	0.34~0.35
热膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/\mathrm{K})$	0.1	23	17
比热容 C_p $(\mathrm{J/(kg\cdot K)})$	800	795~1000	385
导热系数 k $(\mathrm{W/(m\cdot K)})$	1.6	120~160	380~400

3.3 不同镜架材料工况仿真分析

光机系统的温度稳定性不仅取决于光学元件自身的特性，还与镜架材料的热膨胀系数、弹性模量、导热系数以及相邻元件之间热膨胀匹配程度有关[29]，为此，针对靠近内部热源的偏振、反射类关键光学元件，例如 1/4 波片、直角反射棱镜、二向色镜等，仿真分析了超硬铝 7050、纯铜和微晶玻璃作为镜架材料时，光学元件中心的热致形变情况。

录用稿件，非最终出版稿

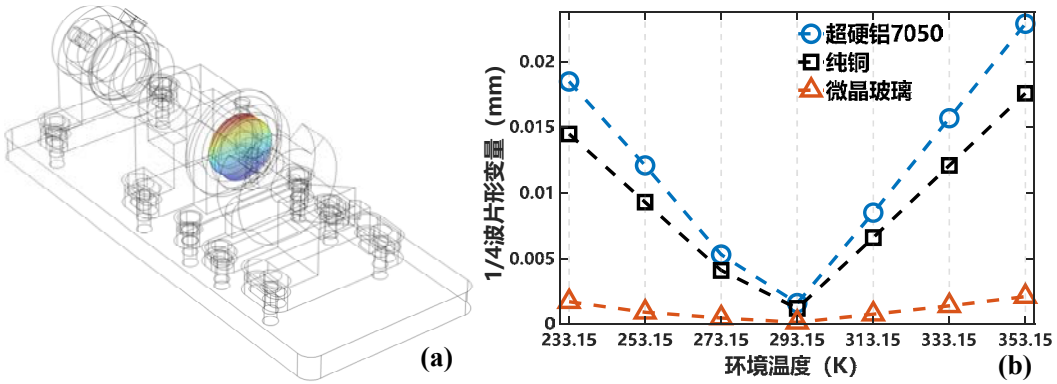


图 4 1/4 波片中心的形变仿真(a)仿真模型位置(b)形变量与环境温度

Fig.4. Deformation simulation for center of 1/4 wave plate

(a) simulation model position(b) deformation and ambient temperature

如图 4 所示，选 293.15 K 为环境参考温度，以 293.15 K~353.15 K 高温区间为例，装配在超硬铝 7050、纯铜和微晶玻璃镜架内的 1/4 波片，中心位移增量依次为 0.0213 mm、0.0164 mm 和 0.0020 mm，按 60 K 温差计算，该高温区间内的平均位移变化率分别为 0.355 μm/K、0.273 μm/K 和 0.033 μm/K，微晶玻璃的平均位移变化率仅为超硬铝 7050 的 9.3%。由公式(3)~(7)推导可知，上述三种选材方案导致荧光计数率分别下降约 5.4%、3.2%和 0.05%，灵敏度分别劣化约 2.8%、1.6%和 0.02%。

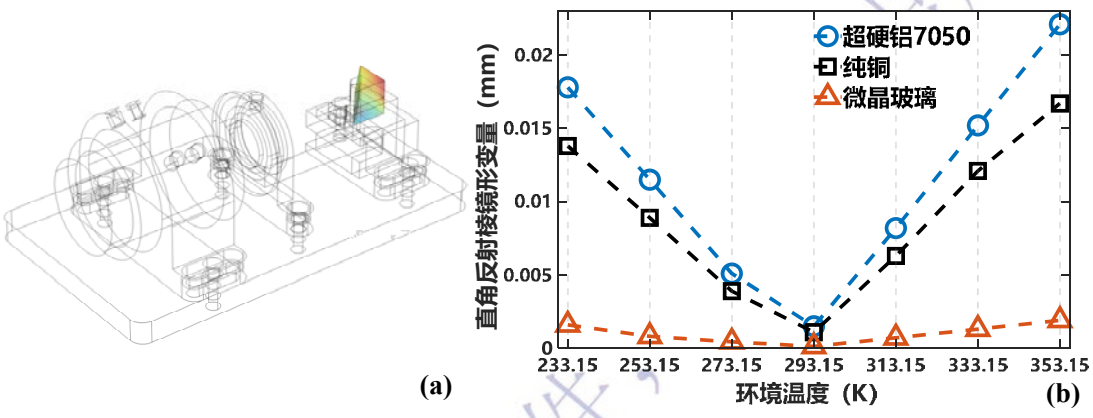


图 5 直角反射棱镜中心形变仿真(a)仿真模型位置(b)形变量与环境温度

Fig.5. Deformation simulation for center of right-angle retroreflector prism

(a) simulation model position (b) deformation and ambient temperature

录用稿件，非最终出版稿

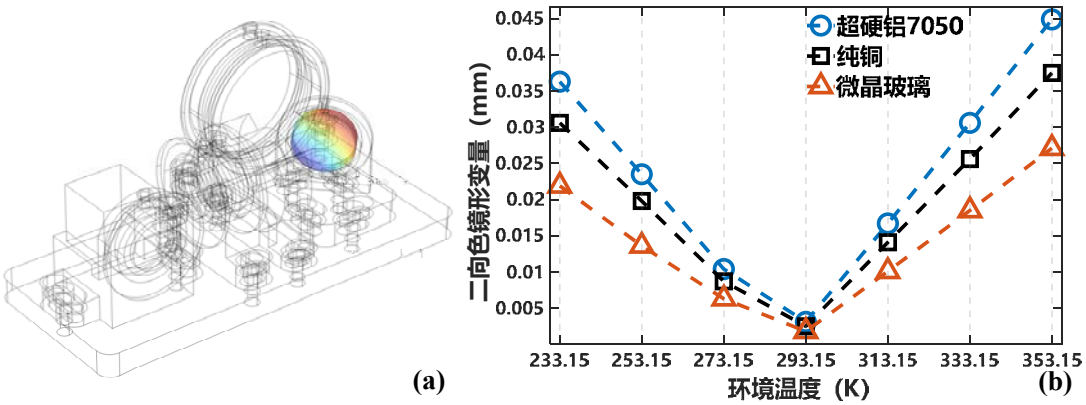


图 6 二向色镜中心形变仿真(a)仿真模型位置(b)形变量与环境温度

Fig.6. Deformation simulation for center of dichroic mirror center

(a) simulation model position (b) deformation and ambient temperature

图 4~图 6 表明，1/4 波片、直角反射棱镜和二向色镜等关键光学元件的中心位移随环境温度变化呈相似变化趋势。然而，在实际加工中，微晶玻璃虽然热膨胀系数最小，但加工成本较高且材料脆性较大。纯铜导热系数较高，热量会更快的向光学元件传递，且纯铜材料硬度较低，在长期装配应力作用下更易发生塑性形变。超硬铝 7050 虽然热致位移较大，但具有质量轻、机械强度高和易于加工的优点。综合仿真结果与工程加工性价比，对靠近测温仪内部热源且对温度较敏感的关键镜架采用微晶玻璃材料，其余镜架采用超硬铝 7050。

3.4 有无垫片工况仿真分析

为减小主结构形变对光学元件的影响，预将氧化锆陶瓷垫片置于主结构与光学镜架中间，并建立有、无陶瓷垫片的对比模型，仿真分析垫片对光学元件中心位移的改善效果。由于反射型光学元件的镜面发生微小倾斜时，反射光传播方向的偏转角近似为镜面倾斜角的两倍，进而放大了光斑位置的偏移量。因此，以激发光路中的直角反射棱镜为例，分析对比了有、无陶瓷垫片时光学元件所受应力的差异。

录用稿件，非最终出版稿

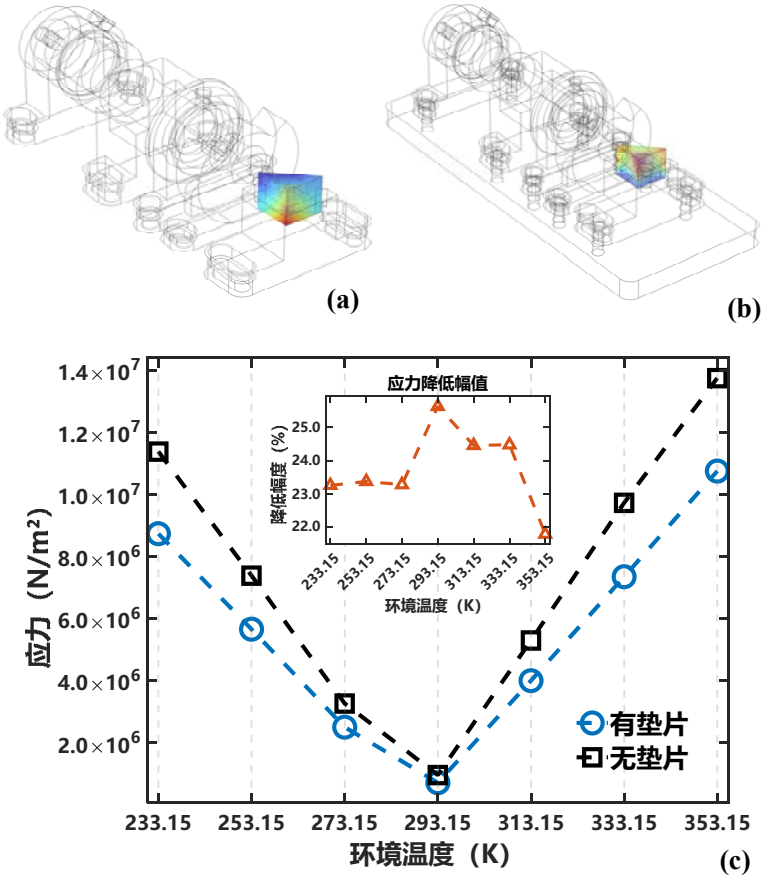


图 7 有无垫片时直角棱镜中心应力情况对比

(a)无垫片仿真模型(b)有垫片仿真模型(c)最大应力及应力降低幅度

Fig.7. Comparison of right-angle prism center stress with and without gaskets

(a) simulation model without gaskets(b) simulation model with gaskets

(c) maximum stress and the reduction amplitude of stress

如图 7 所示，设置氧化锆陶瓷垫片后，直角反射棱镜中心应力较未设置垫片的方案降低约 21%～26%。以环境温度为 353.15 K 为例，当无陶瓷垫片时，直角反射棱镜受应力产生的中心位移为 0.028 mm，对应样品表面实际光斑偏移量为 0.056 mm，该偏移将导致 NV 色心荧光计数率下降约 37.1%，测温灵敏度劣化约 26.1%。然而设置氧化锆陶瓷垫片后，棱镜中心位移量降至 0.022 mm，实际光斑偏移量为 0.044 mm，荧光计数率下降约 22.9%，灵敏度劣化约 13.9%，与无垫片方案相比，设置垫片后荧光计数率提升约 22.6%。由于氧化锆陶瓷相比于超硬铝 7050 具有更低的导热系数和线膨胀系数，因此设置氧化锆陶瓷垫片的方案，可降低主结构与镜架界面处的热失配应力，并减弱热载荷向光学元件的传递，减小

光学元件位移和荧光损失，从而提高装配可靠性。

3.5 光学元件不同固定方式仿真分析

光学元件与镜架之间的固定方式会改变界面约束刚度、接触范围以及热载荷传递路径，从而影响光学元件的热致位移和热应力响应[30]。为此，分别建立螺钉顶紧和侧面粘接的两种模型，对比两种固定方式下 1/4 波片与直角反射棱镜的中心位移差异。

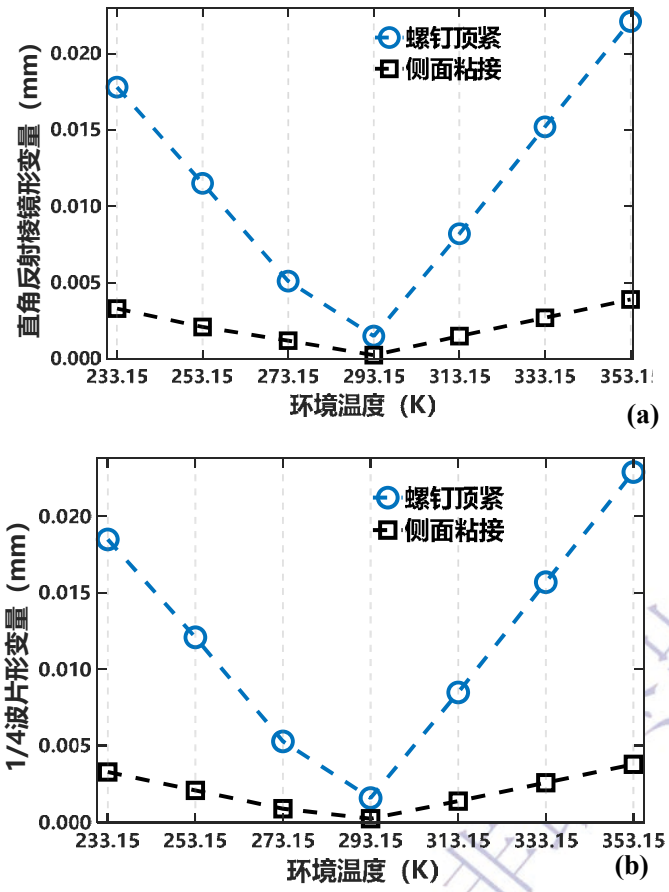


图 8 不同固定方式下 1/4 波片中心形变量对比

(a) 直角反射棱镜形变量对比 (b) 1/4 波片形变量对比

Fig.8. Comparison of central deformation of 1/4 wave plate under different fixing methods

(a) comparison of deformation of right-angle retroreflector prism

(b) comparison of deformation of 1/4 wave plate

由图 8 可知，在 353.15 K 时，螺钉顶紧方案下的 1/4 波片和直角反射棱镜的中心位移分别为 0.0229 mm 和 0.0221 mm。采用光学胶侧面粘接后，两者的中心位移分别降低至 0.0038 mm 和 0.0039 mm，相较于螺钉顶紧方案分别降低约 83.6%

和 82.4%。在螺钉顶紧方案下，直角反射棱镜的中心位移为 0.0221 mm，实际光斑偏移量为 0.0442 mm，该偏移导致 NV 荧光计数率下降约 23.1%，测温灵敏度劣化约 14.1%。而侧面粘接方案的棱镜中心位移仅为 0.0039 mm，实际光斑偏移量为 0.0078 mm，荧光计数率下降仅约 0.7%，灵敏度劣化约 0.4%，与螺钉顶紧方案相比，侧面粘接使荧光计数率提升了约 29.1%。螺钉顶紧主要在局部接触区域施加约束，使镜架的热致形变和接触载荷集中传递至光学元件，而侧面粘接方案采用侧面约束，约束面积大于螺钉顶紧方案，可减小光学元件的位移。综上，测温仪采用侧面粘接作为光学元件的固定方式。

四　实验验证

4.1 金刚石 NV 色心测温仪性能测试

为评价所设计的便携式金刚石 NV 色心测温仪的性能，对测温仪的温度灵敏度、Allan 方差以及标准不确定度等进行了测试和分析。首先，在激光功率为 5.5 mW、微波功率为 0 dBm 的条件下，测量了金刚石 NV 色心在 303 K、323 K、343 K 下的温度灵敏度。结果如图 9(a)所示，首先，在被测温度为 323 K 下，分别对按照仿真优化前、后方案所设置的测温仪进行了灵敏度分析，优化前 1 Hz 和 10 Hz 频段内的平均温度灵敏度分别为 0.15 K/ $Hz^{1/2}$ 和 0.10 K/ $Hz^{1/2}$，优化后分别为 0.08 K/ $Hz^{1/2}$ 和 0.05 K/ $Hz^{1/2}$，有效抑制了测温仪的低频随机噪声。此外，通过不同被测温度下的实验结果可知，按仿真优化方案设置后，测温仪的温度灵敏度不受被测温度变化的影响。

录用稿件，非最终出版稿

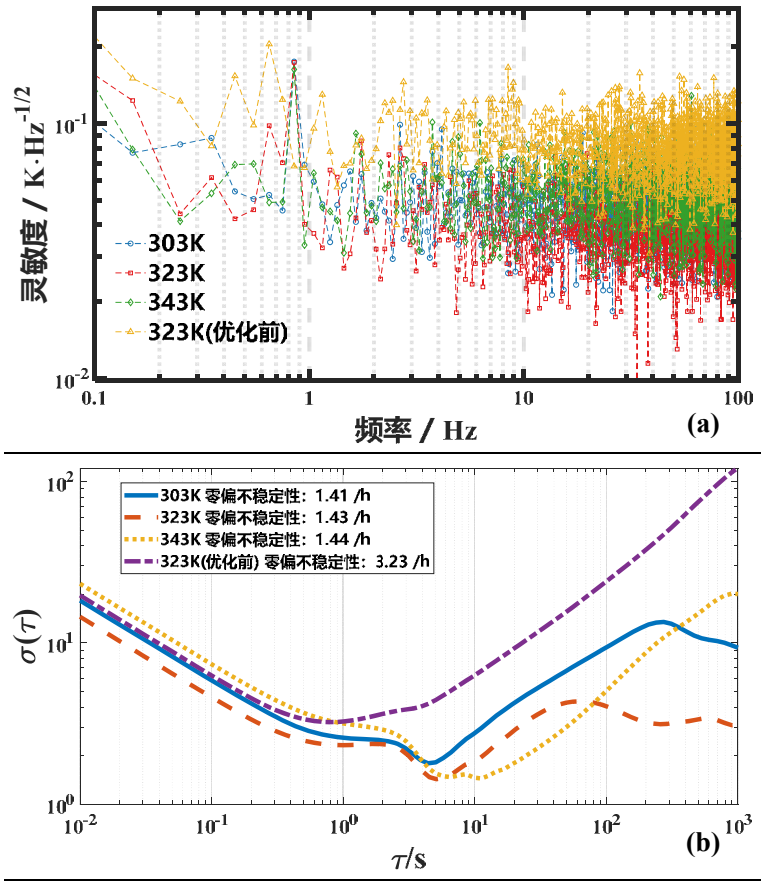


图 9 (a)303K、323K 和 343K 时测温灵敏度(b) 测量 303K、323K 和 343K 时 Allan 方差

Fig.9.(a)temperature sensitivity at 303K, 323K, and 343K
(b)Allan variance for temperature measurement at 303 K, 323 K, and 343 K

其次，采用 Allan 方差分析了测温仪在不同时间尺度上的噪声特性[31]，结果如图 9(b)所示。在被测温度为 323 K 时，优化后的零偏不稳定性为 1.41 /h（纵坐标单位归一化），相较于优化前减小约 56.4%，同时速率斜坡噪声也被明显抑制，因此，测温仪结构的优化有利于长期稳定性的提升。

最后，评定了 NV 色心测温仪的温度测量标准不确定度，如表 2 所示。根据参考文献[28]，NV 色心测温不确定度主要来源于 *D*-*T* 关系标定过程和 *D* 值测量过程。其中，*D*-*T* 关系标定过程引入的不确定度来源主要有：铂电阻温度计校准、MKT50 测温仪、恒温器温场不均匀性和温度波动。*D* 值测量过程引入的不确定度来源主要有：*D* 值测量重复性、微波源频率校准和外场自热效应修正。其中，恒温器温场不均匀性引入的不确定度，根据两支 Pt100 的温度实测数据之差，

结合两支 Pt100 间的距离进行估算。温度波动引入的不确定度按 ODMR 测量过程中恒温器内温度波动的最大值估算。*D* 值测量重复性的不确定度，则以多次测量 ODMR 拟合所得 *D* 值的平均值标准偏差表征。自热效应修正的不确定度则主要来源于激光和微波功率的加热效应[32]，实验分别标定了激光、微波功率引起的 *D* 值红移如图 10(a)和(b)所示，线性拟合得到的灵敏系数分别为 0.0144 MHz/mW 和 0.0199 MHz/dBm。而后，分别测量了结构优化前后的 3 小时激光功率波动情况，通过灵敏系数计算其引起的温度波动分别为 0.0146 K 和 0.0062 K，此外，微波功率在 0 dBm 下引起的温度波动为 0.0114 K，最终计算得到自热效应修正引起的不确定度分别为 0.0185 K 和 0.0130 K。通过对比结构优化前后不确定度评定结果可知，测温仪的热致形变主要影响了 *D* 值测量重复性与激光加热效应修正引入的不确定度，最终优化后的合成标准不确定度由 0.15 K 降低至 0.10 K。

表 2 测温仪温度测量不确定度分析

Table.2. Uncertainty analysis of temperature measurement using thermometers

影响因素	类型	分布	不确定度（K）			
			323K (优化前)	303K	323K	343K
铂电阻温度计校准	B	均匀分布	0.006	0.006	0.006	0.006
MKT50 测温仪	B	均匀分布	0.002	0.002	0.002	0.002
恒温器温场不均匀性	B	均匀分布	0.0124	0.0076	0.0124	0.0147
恒温器温度波动	B	均匀分布	0.0004	0.0004	0.0004	0.0007
D 值测量重复性	A	正态分布	0.1437	0.0910	0.0987	0.1403
微波源频率校准	B	均匀分布	0.0063	0.0071	0.0063	0.0047
自热效应修正	B	均匀分布	0.0185	0.0130	0.0130	0.0130
合成标准不确定度			0.15	0.09	0.10	0.14

录用稿件，非最终出版稿

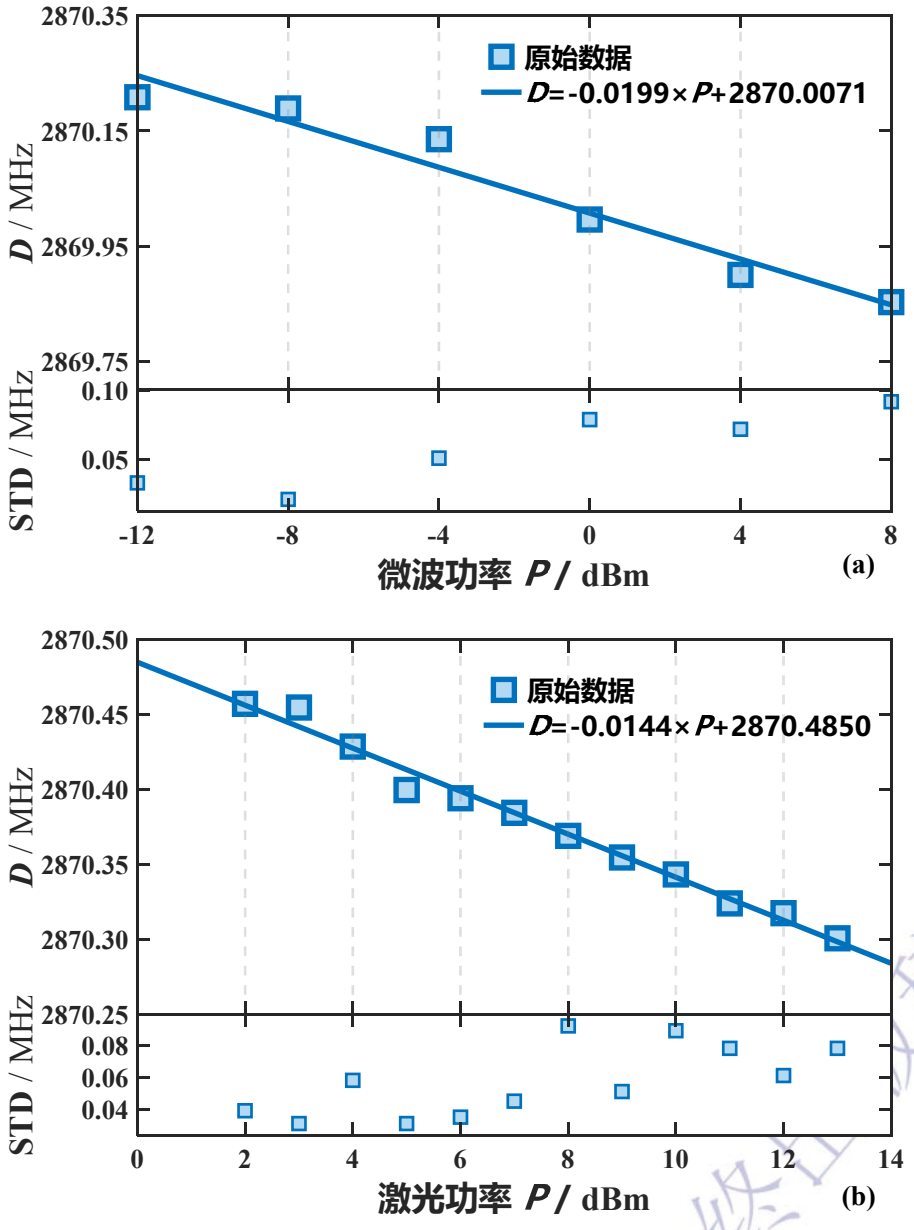


图 10 激光、微波功率与 *D* 值变化关系(a)激光功率与 *D* 值关系(b)微波功率与 *D* 值关系

Fig.10. Relationship between laser, microwave power and *D* value variation

(a) relationship between laser power and *D* values

(b) relationship between microwave power and *D* values

4.2 射频芯片表面多点温度测量

为验证所研制测温仪的实际应用能力，在射频芯片稳定运行条件下，选取 10 个特征点位，分布如图 11(a)所示。其中，点位 1~4 位于中心轴上，点位 5、6 位于金属环上，点位 7~10 位于两金属环间的非金属基底上。在激光功率为 5.5 mW、微波功率为 8.5 dBm 的条件下进行实验，无需额外设置微波天线，通过芯片自身

发射的微波场实现连续式 ODMR 测温。

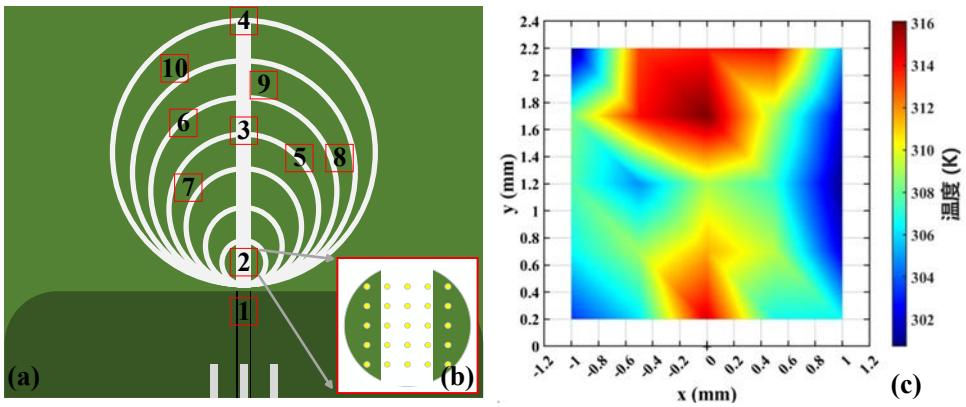


图 11 射频芯片示意图(a)芯片表面特征点位选取示意图
(b)局部温度测量点位(c) 块状金刚石内局部温度分布重建结果

Fig.11. Schematic diagram of RF chip
(a) schematic diagram of feature point selection on chip surface
(b) local temperature measurement points
(c) reconstruction results of local temperature distribution inside the diamond sample

补偿激光加热效应后的测温结果如图 12 所示，射频芯片表面的温度分布具有一定的规律性。10 个点位涉及温度范围为 294.9 K~343.8 K，其中点位 1 温度最高，点位 10 温度最低，温差为 48.9 K。沿中心轴线从点位 1 到点位 4 温度逐渐降低，温差为 43.1 K，点位 5、6 之间温差为 6.0 K，从点位 7 到点位 10 温度逐渐降低，温差为 9.9 K。总体上，射频芯片表面温度由下部馈电端向外部区域逐渐降低，两侧温差明显小于中心轴线方向的温差，该差异与两侧金属走线、馈电结构及局部散热边界有关。此外，采用热电偶对射频芯片表面相应点位进行测温，两种方法测得的温度结果变化趋势一致，验证了测温仪测温结果的有效性。

录用稿件，非最终出版稿

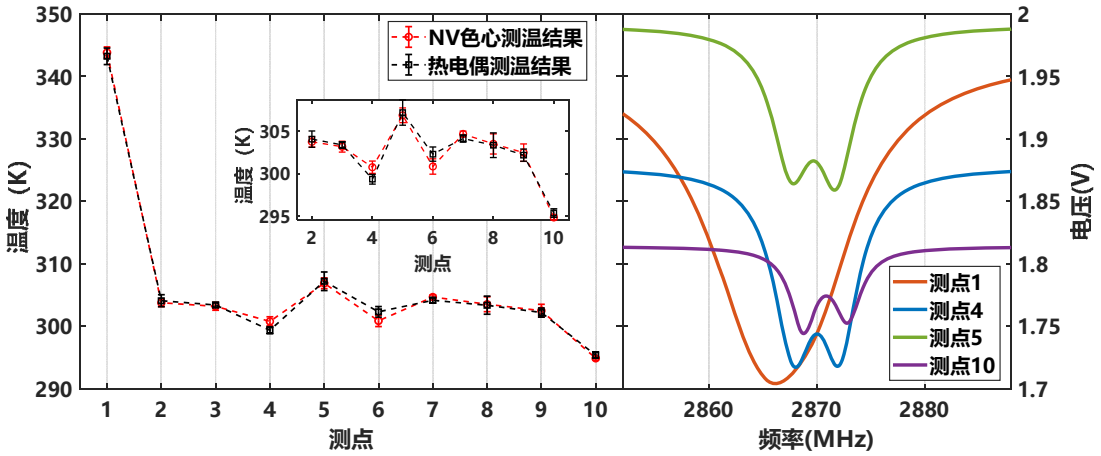


图 12 射频芯片温度测量结果和 ODMR 谱线

Fig.12. RF chip temperature measurement results and ODMR spectral lines

为研究块状金刚石内部温度的均匀性，将金刚石放置于图 11(a)中的点位 1 处，并在金刚石表面 2 mm×2 mm 区域内均匀设置 25 个点位，如图 11(b)所示。激光功率设为 5.5 mW，射频芯片微波功率设为 2 dBm，采用二维插值方法得到温度分布结果，如图 11(c)所示。25 个点位的温度测量结果存在明显的空间差异，块状金刚石内温差达到 14 K。实验结果未能充分体现出金刚石超高导热率（约 2000 W/(m·K)）的优势，可能是由于样品存在杂质以及使用光学胶固定导致导热率降低，从而未能实现快速均温，该现象有待进一步探索。

五　结论

本文基于 NV 色心温度测量原理，分析了测温仪内部热源和环境温度变化引起的热致形变对激光光斑位置、偏振态和功率的影响。建立了三维热-结构耦合有限元模型，对镜架材料、陶瓷垫片、固定方式进行优化，使结构应力降低约 26%，关键元件位移降低约 83%。根据仿真优化结果，设计了便携式 NV 色心测温仪，并对比了按仿真优化前后方案分别设置的测温仪的指标。其中，优化后的平均温度测量灵敏度（＜10 Hz）由 0.10 K/ $Hz^{1/2}$ 提升至 0.05 K/ $Hz^{1/2}$，证明测温仪的低频随机噪声得到了有效抑制。通过 Allan 方差分析可知，优化后测温仪的零偏不

稳定性由 3.23 /h 降至 1.41 /h，降低约 56.4%，证明其长期稳定性有所提升。而后，对测温仪进行了标准不确定度的评定，优化后测温仪的标准不确定度由 0.15 K 减小至 0.10 K，并证明了热致形变主要影响 *D* 值测量重复性与激光加热效应修正引入的不确定度分量。最后，利用射频芯片的自发微波场实现了芯片表面特征点位的温度测量，10 个点位的最大温差为 48.9 K，温度呈现由底部馈电区向外减小的趋势。在后续研究中，将进一步探索纳米金刚石测温方法，深入研究芯片表面纳米金刚石的涂覆技术，以消除块状金刚石均温效应的影响，提升芯片表面测温的空间分辨率。

录用稿件，非最终出版稿

参考文献

[1] Sharma M K, Ramos-Alvarado B 2026 *Commun. Eng.* **5** 28

[2] Wang Z Q, Dong R, Ye R H, Singh S S K, Wu S F, Chen C X 2024 *Int. J. Heat Mass Transfer* **235** 126212

[3] Li M, Li S X, Zhang Z H, Su C J, Wong B, Hu Y J 2025 *Acc. Mater. Res.* **6** 563

[4] Yu M, Zhang H, Huang M, Zhang H Z, Zhu J 2023 *Appl. Therm. Eng.* **230** 120681

[5] Cheng Z, Huang Z F, Sun J C, Wang J, Feng T L, Ohnishi K, Liang J B, Amano H, Huang R 2024 *Appl. Phys. Rev.* **11** 041324

[6] Hammiche A, Reading M, Pollock H M, Song M, Hourston D J. 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 4268.

[7] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, Molleda J, Bulnes F G. 2014 *Sensors* **14** 12305.

[8] Neumann P, Jakobi I, Dolde F, Burk C, Reuter R, Waldherr G, Honert J, Wolf T, Brunner A, Shim J H, Suter D, Sumiya H, Isoya J, Wrachtrup J 2013 *Nano Lett.* **13** 2738

[9] Kucsko G, Maurer P C, Yao N Y, Kubo M, Noh H J, Lo P K, Park H, Lukin M D 2013 *Nature* **500** 54

[10] Balasubramanian G, Chan I Y, Kolesov R, Al-Hmoud M, Tisler J, Shin C, Kim C, Wojcik A, Hemmer P R, Krueger A, Hanke T, Leitenstorfer A, Bratschitsch R, Jelezko F, Wrachtrup J 2008 *Nature* **455** 648

[11] Mamin H J, Kim M, Sherwood M H, Rettner C T, Ohno K, Awschalom D D, Rugar D 2013 *Science* **339** 557

[12] Hilberer A, Toraille L, Dailledouze C, Adam M P, Hanlon L, Weck G, Schmidt M, Loubeyre P, Roch J F 2023 *Phys. Rev. B* **107** L220102

[13] Kitagawa R, Nagata S, Arai K, Mizuno K, Tsuji T, Fujisaki I, Urashita S, Kohashi

录用稿件，非最终出版稿

T, Takamura Y, Iwasaki T, Nakagawa S, Hatano M 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 044089

[14] Iwasaki T, Naruki W, Tahara K, Makino T, Kato H, Ogura M, Takeuchi D, Yamasaki S, Hatano M 2017 *ACS Nano* **11** 1238

[15] Wu Y, Alam M N A, Balasubramanian P, Ermakova A, Fischer S, Barth H, Wagner M, Raabe M, Jelezko F, Weil T 2021 *Nano Lett.* **21** 378

[16] Plakhotnik T, Doherty M W, Cole J H, Chapman R, Manson N B 2014 *Nano Lett.* **14** 4989

[17] Chen R, Shi B N, Song K X, Lok M M Z G C, Jiang M, An S, Tao P, Fu B W, Song C Y, Wang J, Deng T, Shang W 2025 *Adv. Mater.* **37** e15604

[18] Webb J L, Clement J D, Troise L, Ahmadi S, Johansen G J, Huck A, Andersen U L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 231103

[19] Stürner F M, Brenneis A, Buck T, Kassel J, Rölver R, Fuchs T, Savitsky A, Suter D, Grimmel J, Hengesbach S, Förtsch M, Nakamura K, Sumiya H, Onoda S, Isoya J, Jelezko F 2021 *Adv. Quantum Technol.* **4** 2000111

[20] Zhao Y F, Ding S H, Wang S, Hu Y M, Liu H L, Shang Z, Gu Y J 2025 *Sensors* **25** 4123

[21] Wang X M, Zheng D D, Wang X C, Liu X Y, Wang Q M, Zhao J Z, Guo H, Qin L, Tang J, Ma Z M, Liu J 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 5580

[22] Pogorzelski J, Horsthemke L, Homrighausen J, Stiegekötter D, Gregor M, Glösekötter P 2024 *Sensors* **24** 743

[23] Singh S, Lee H, Nguyen N A, Kang S, Shim J H, Oh S, Lee K G 2026 *Phys. Rev. Appl.* **25** 044019

[24] Acosta V M, Bauch E, Ledbetter M P, Waxman A, Bouchard L S, Budker D 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070801

[25] Xing L, Feng X J, Zhang J T 2023 *Acta Metrol. Sin.* **44** 707 (in Chinese) [邢力，

录用稿件，非最终出版稿

冯晓娟，张金涛 2023 计量学报 **44** 707]

[26] Jensen K, Acosta V M, Jarmola A, Budker D 2013 *Phys. Rev. B* **87** 014115

[27] Fujiwara M, Dohms A, Suto K, Nishimura Y, Oshimi K, Teki Y, Cai K, Benson O, Shikano Y 2020 *Phys. Rev. Research* **2** 043415

[28] Ouyang K C, Wang Z, Xing L, Feng X J, Zhang J T, Ren C, Yang X T 2023 *Meas. Sci. Technol.* **34** 015102

[29] Pan Y R, Gao S H, Liao Y Q, Bai J, Wang K W 2023 *Appl. Opt.* **62** 9383

[30] Tan S N, Yu X, Xu Y S, Xu Y L, Jia P 2021 *Opt. Express* **29** 33665

[31] El-Sheimy N, Hou H, Niu X 2008 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **57** 140

[32] Wang Z, Zhang J T, Feng X J, Xing L 2022 *ACS Omega* **7** 31538.

Thermal Deformation Suppression for Portable NV Centers Thermometers*

SUN Hongyin[1) 2)], XING Li[2†)], LIU Yubing[1) 2)], FENG Xiaojuan[2)], LI Xiaoting[1)]

1)(College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071000, China)

2)(Division of Thermophysics, National Institute of Metrology, Beijing 100029,China)

Abstract

Thermometry based on nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond offers intrinsically high sensitivity, rapid response, and wide working range, and is regarded as a promising approach for in-situ temperature measurement in integrated circuits, micro-nanoscale fabrication, and related fields. However, existing NV centers thermometer is limited by low accuracy, large size, and poor resistance to environmental disturbances. To design a high-precision, highly disturbance-resistant portable NV centers thermometer, a thermal deformation suppression method based on optical path and structural design has been studied. Firstly, the effects of thermally induced deformation on the laser spot position, polarization state, and power stability are theoretically analyzed through the derivation of the Jones matrix of the pump light path. Secondly, a three-dimensional thermal

structural coupled finite element model of the thermometer is established, and the working conditions of different frame materials, the presence or absence of ceramic gaskets, and different fixing methods of optical components are simulated and optimized. Microcrystalline glass material is used for the key frame near the internal heat source, and zirconia ceramic gaskets are set between the main structure and the optical frame. Moreover, the optical elements are fixed using side bonding. The thermal disturbance displacement of critical optical components has been reduced by approximately 83%. Subsequently, a portable NV centers thermometer is built based on the simulation optimization scheme. Tests such as temperature measurement sensitivity and Allan variance have been conducted, and a complete standard uncertainty evaluation system has been discussed. The average thermometric sensitivity within 10 Hz reaches 0.05 $K/Hz^{1/2}$, the Allan variance is reduced by approximately 56.4% compared with that of the unoptimized system, the standard uncertainty of temperature measurement is 0.10 K after optimization. Finally, the NV centers are directly manipulated using the microwave field emitted by the radio-frequency chip, enabling temperature measurements on the chip surface. The temperature shows a decreasing trend from the bottom feeding area outward with a maximum temperature difference of 48.9 K at 10 points, and then reveals the uniformity of temperature within the bulk diamond.In the future, research will be conducted on the coating technology of nanodiamonds on the surface of chips, aiming to eliminate the influence of the temperature uniformity effect of bulk diamond and improve the spatial resolution of temperature measurement on the chip surface.

Keywords: NV centers in diamond, portable thermometry, thermally induced deformation, standard uncertainty, radio-frequency chips

Project supported by fundamental research program of National Institute of Metrology, China (Grant No.AKYZD2604-2), Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62505304)(No.AKYJJ2609), Project supported by technical support program of Market Regulation (Grant No.2025YJ01).

录用稿件，非最终出版稿

† Corresponding author.E-mail: xingli@nim.ac.cn
The first author.E-mail: sunhongyin@stumail.hbu.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿