

# 气体拉曼光谱检测系统中热电制冷 CCD 研究

赵俊 左都罗 王新兵

华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 拉曼光谱检测中常用的 CCD 对温度较为敏感, 降温可以有效降低其暗电流噪声。基于此, 设计了一套制冷系统, 采用有限元分析软件 ANSYS 分别模拟散热模块的导热情况及真空室内低、中真空度下气体流动热交换情况; 实验测量了低、中真空度范围内不同真空度下温度随制冷时间变化的特性曲线, 以及真空室内充入氩气、氦气、氮气作为保护气体时温度随制冷时间变化的特性曲线。结果表明氮气效果较好, 并非真空度越高制冷效果越好, 这与热模拟结果相符。测量了 CCD 在不同温度下的暗电流噪声, 结果显示 CCD 温度对暗电流噪声影响较大, 制冷可以有效减小暗电流噪声, 且暗电流噪声变化与温度变化呈类指数关系。

**关键词** 探测器; CCD; 暗电流噪声; 热模拟; 真空; 热电制冷

中图分类号 TN386.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.070401

## Study on Thermoelectrically Cooled CCD in Raman Spectrum Detection System for Gas Analysis

Zhao Jun Zuo Duluo Wang Xinbing

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** The commonly used CCD in Raman spectroscopy is sensitive to temperature, and cooling can effectively reduce its dark current noise. A cooling system is designed, and the finite element analysis software ANSYS is used to simulate the heat conduction of the heat sink and the heat exchange of gas flow in the vacuum chamber. The temperature change with the cooling time is measured at different vacuum degrees and with different buffer gas including Ar, Ne, N<sub>2</sub> and air. The experimental results show that better cooling effect can be realized when N<sub>2</sub> is used as buffer gas, and higher vacuum degree does not guarantee better cooling effect, which is consistent with the thermal simulation result. The measured dark current noise of CCD at different temperatures shows that CCD temperature has strong impact on its dark current noise, cooling can reduce the noise effectively, and the noise varies with temperature exponentially.

**Key words** detectors; CCD; dark current noise; thermal simulation; vacuum; thermoelectric cooling

**OCIS codes** 040.1520; 110.2970; 120.6780; 290.5860

## 1 引言

拉曼光谱检测是一种越来越受关注的物质检测及分析技术<sup>[1]</sup>。随着光谱技术的发展以及 CCD 探测器的引入, 拉曼光谱检测能够快速(毫秒量级)完成对光信号的探测, 获得完整的拉曼散射光谱图, 并通过对光谱图的分析定性或定量检测物质的具体成分。拉曼光谱检测技术几乎可用于所有物质的检测, 包括固态、气态、液态物质。目前, 拉曼光谱检测技术已经广泛用于生物医学、药品管理、工业探测、军事装备、外太空探

收稿日期: 2016-01-25; 收到修改稿日期: 2016-02-29; 网络出版日期: 2016-06-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ16000702)

作者简介: 赵俊(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事热电制冷 CCD 相关技术方面的研究。

E-mail: 525418495@qq.com

导师简介: 左都罗(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光技术与激光光谱等方面的研究。

E-mail: zuoduluo@hust.edu.cn(通信联系人)

测、科学研究等各个领域<sup>[2-6]</sup>。

在拉曼光谱检测技术中,激光光源的光束质量、拉曼散射信号强度、光路及光学元件、样品池以及光谱仪等是影响拉曼光谱纯净度的关键因素<sup>[7-9]</sup>。在气体拉曼光谱检测中,拉曼散射光的信号强度非常微弱,只有瑞利散射的千分之一,很容易淹没在杂散光以及各种噪声中,因此,检测气体微弱的拉曼信号相当困难<sup>[10]</sup>。

CCD是一种图像传感器,具有光电转换特性,可将光学信号转换为电学信号<sup>[11]</sup>。但由于其本身是半导体,无信号时会产生暗电流噪声。在多种 CCD 噪声中,暗电流噪声是一种很重要的噪声源,对温度和曝光时间都很敏感,即使在常温下,也很容易干扰微弱信号的检测。采用热电制冷技术降低 CCD 的温度是有效抑制暗电流噪声的常用方法。目前,国外的热电制冷技术已经趋于成熟,如美国 Princeton Instruments、英国 Andor 等公司,其产品的制冷温度能够达到  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下; Finger Lakes Instrumentation、Spectral Instruments、Quantum Scientific Imaging、Photonic Science 等公司的产品温度也可达到  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。但是这些产品的价格比较昂贵。我国对热电制冷 CCD 的研制较少,主要集中在科研机构 and 高校中。中国科学院紫金山天文台在 2008 年报道了一套制冷 CCD 相机系统<sup>[12]</sup>,制冷温度可比环境温度低  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2011 年中国科学院西安光学精密机械研究所报道了一套 E2V 公司带有集成热电制冷片 CCD 的温度控制系统<sup>[13]</sup>,制冷温度达到  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2012 年浙江大学也研制了一套制冷系统<sup>[14]</sup>,制冷温度比室温低  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。比较而言,我国在热电制冷 CCD 方面的研发相对落后,仅能满足实验或者教学需求,专业生产热电制冷 CCD 的公司较少,大部分都是代理国外产品,价格比较昂贵。

本文通过研究真空隔离的热电制冷 CCD,找到一种实现低成本深冷 CCD 探测器的方法,可提高现场拉曼光谱气体分析中 CCD 探测器的灵敏度并降低成本,以加速现场拉曼光谱气体分析的推广。

## 2 系统结构模型及数值模拟

### 2.1 热电制冷片

热电制冷片(TEC)是一种由半导体材料制成且具有热电能量转换功能的半导体器件。当有电流通过时,TEC 具有制冷和制热功能,且体积小、结构稳定、成本低、易调节控制、制冷效率高,易实现较大温差,适用于多种应用场合。采用热电制冷的方法对 CCD 芯片进行制冷,考虑到系统的整体尺寸以及 TEC 工作效率,选用二级 TEC(TEC2-14705 型,蔚县中天电子股份合作公司)制冷片作为制冷元件。在 TEC 表面对流的影响下,其导热方程为<sup>[15]</sup>

$$Q_c = h_c S_c (T_{NC} - T_c) = \alpha I T_c - I^2 R / 2 - K \Delta T, \quad (1)$$

$$Q_h = h_h S_h (T_h - T_{NH}) = \alpha I T_h + I^2 R / 2 - K \Delta T, \quad (2)$$

式中  $\alpha I T_c$  和  $\alpha I T_h$  项为帕尔贴热,  $I^2 R / 2$  项为焦耳热,  $K \Delta T$  项为傅里叶热。  $h_c$ 、 $h_h$  分别为冷端、热端对流系数,  $T_{NC}$ 、 $T_{NH}$  分别为冷端、热端的环境温度,  $S_c$ 、 $S_h$  分别为冷端、热端对流热交换面积,  $T_c$ 、 $T_h$  分别为冷端、热端温度,  $I$  为通过 TEC 的电流强度,  $\Delta T$  为冷热端温差,  $\alpha$ 、 $R$ 、 $K$  分别为 TEC 温差电动势、总电阻、总热导。由(1)、(2)式可知,TEC 的制冷性能较复杂,与冷热端的温度、冷热端与外界热交换、环境温度以及 TEC 自身温度、结构、材料都有关系。查阅 TEC 参数表,可知最大制冷功率为 22 W,为了简化计算,采用 20 W 的制冷功率进行散热计算,且 TEC 工作在 12 V、5 A 工况下,结合(1)、(2)式可得产热功率为 80 W。若在该工况下散热良好,则设计系统能满足散热要求,达到良好效果。

### 2.2 系统结构模型

为了满足制冷及热传导要求,设计了图 1 所示的冷却结构。在散热模块中,采用热管与风冷组合的方式进行散热,如图 1(a)所示,热管散热器通过基座与散热法兰紧密连接,散热法兰与基座法兰通过螺丝固定。热管散热器是一种热导率极高的导热元件,其热导率能够达到  $10^5\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  数量级。在热管散热器上固定有多层薄铝片(厚约 0.32 mm),铝片上安装有风扇,以加强外界空气的对流,实现良好的导热效果。散热法兰采用热导率大、质量轻的铝质材料。为便于电气真空穿通及真空阀门的焊接,基座法兰使用不锈钢材质。在真空室及制冷结构中[图 1(b)],整个外壁采用铝质结构,通过密封圈与散热法兰固定在一起。TEC 固定在散热法兰上,其冷端连接无氧铜冷指,冷指则与 CCD 直接相连,保证 TEC 能够对 CCD 有效制冷。

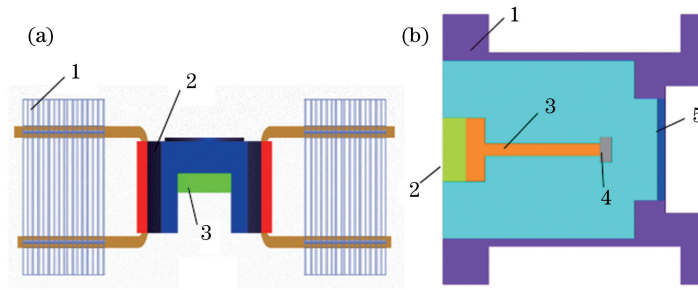


图 1 (a) 散热结构模型(1-热管散热器, 2-散热法兰, 3-基座法兰); (b) 真空室中心剖面二维结构  
(1-真空室壁, 2-TEC, 3-冷指, 4-CCD, 5-玻璃窗口)

Fig. 1 (a) Heat dissipating structure model (1-heat pipe, 2-heat dissipating flange, 3-pedestal flange);  
(b) two-dimensional cross-sectional structure of the vacuum chamber center  
(1-vacuum chamber wall, 2-TEC, 3-cold finger, 4-CCD, 5-glass window)

### 2.3 外部散热模块数值模拟

为了验证散热模块的导热能力,采用有限元分析软件 ANSYS 进行三维热传导模拟。考虑到 ANSYS 本身建模的局限性,使用绘图能力更强大的 PRO/E 建好散热模型之后,再导入 ANSYS 中进行模拟。

数值模拟前作如下假设:1)热传递有传导、对流、辐射三种方式,由于辐射的热量很小,因此,对散热结构进行数值模拟时,主要考虑传导和对流两种方式;2)忽略一些螺孔及微倒角结构的影响;3)为了便于计算,热管采用等效模型;4)具体分析参数如下:TEC 热端产热功率为 80 W,不锈钢、铝合金、热管的热导率分别为 16.2,170,12000 W/(m·K),靠近风扇的空气自然对流传热系数为 20 W/(m<sup>2</sup>·K),空气强制对流系数为 80 W/(m<sup>2</sup>·K),外界环境温度为 20 °C。

散热能力的好坏主要体现在散热系统上是否有热量的积累,即温差梯度是否较大,特别是 TEC 热端的接触面。由于真空室内安装有 CCD、TEC 以及温度传感器,且通过真空接头与真空室外控制电路相连,需要大量的电气连接线,在结构设计时与 TEC 热端接触的热沉厚度及面积较小,热负载能力相对较弱,因此,若此处热量无积累,则说明散热能力满足需求。从图 2(a)可以看出,散热法兰盘上的温度场分布逐渐变化,并且在热接触面温度梯度变化较小,也没有出现热量积累的情况,因此满足制冷需求。

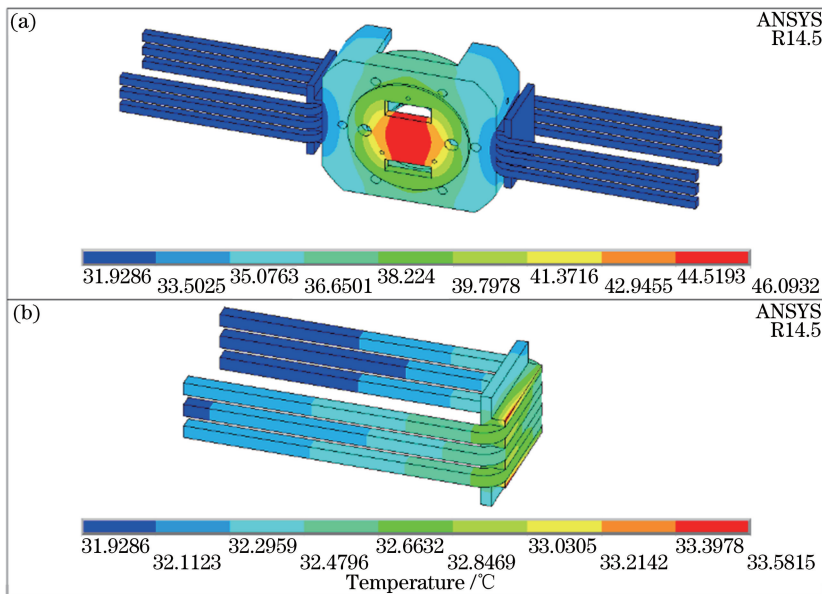


图 2 散热结构温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in heat sink structure

## 2.4 真空室内流-固热交换数值模拟

由于真空室内既存在热源又存在冷源,因此,当真空室内达到稳态时,腔内会出现温度梯度分布,这种温度分布导致腔内气体密度变化,进而引起腔内气体流动,而气体流动会增加热交换,进而影响 TEC 的制冷性能。为便于分析图 1(b)结构中 TEC 工作时真空室内的温度分布场以及在低、中真空度条件下腔体内气体流动热交换特性对制冷效果的影响,利用 ANSYS 软件的 FLOTRAN 模块对真空室中心二维结构进行流-固耦合分析。

分析前作如下约定:1)不考虑一些微小结构的影响,譬如螺孔、螺钉、微倒角;2)各种材料网格划分大小一致;3)腔体内流-固接触面上施加无滑移壁面约束条件,即流-固交界处流速为零;4)根据图 2 所示结果,TEC 热端温度设为 320 K,热沉温度设为 315 K,冷端温度设为 233 K,壁外的热对流交换系数为  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,环境温度为 293 K,重力加速度为  $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ ,CCD 产热率为  $3500 \text{ W}/\text{m}^3$ ;5)将复杂结构及材料作等效处理,即 CCD 材料等效为外壳封装陶瓷材料,TEC 等效为掺杂半导体材料,具体热物理参数如表 1 所示。

表 1 固体及等效模型热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of solid materials and equivalent models

Material	Thermal conductivity $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Specific heat capacity $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Al	170	900
TEC	1.3	700
Cold finger	380	385
CCD	16.7	840
Glass	0.8	750

图 3 为常压下的模拟结果图。图 3(a)表明,当腔体内大部分空间气体温度在 273 K 以下时,低温使得气体中的水蒸气冷凝成水滴,影响 CCD 及其他电子元件的正常工作;并且在重力的影响下,冷指下方的气体密度较高,热导率大,气体温度分布总体低于冷指上方。图 3(b)表明腔体内气体的流动形成 4 个漩涡,从漩涡中可看到,TEC 热沉与腔壁通过气体流动发生明显的热量交换,且冷、热气体交界处流速较快,冷热气体分子碰撞频繁,能量或动量交换更快,低温气流可将热端的热量运输到腔壁,通过热交换散出。图 3(c)显示了玻璃窗口的温度,稳态时最低温度不到 281 K,因此,其内外气体存在一定的温差,易在上面形成水雾,影响光信号的探测。

为提高 TEC 的制冷效率,避免窗口上的水气凝结,需对腔体抽真空,将 CCD 和 TEC 置于真空或低气压环境。根据热学中稀薄气体的输运过程<sup>[16]</sup>,计算空气在低、中真空度下的热物理性质,重新模拟后的结果如图 4~6 所示。

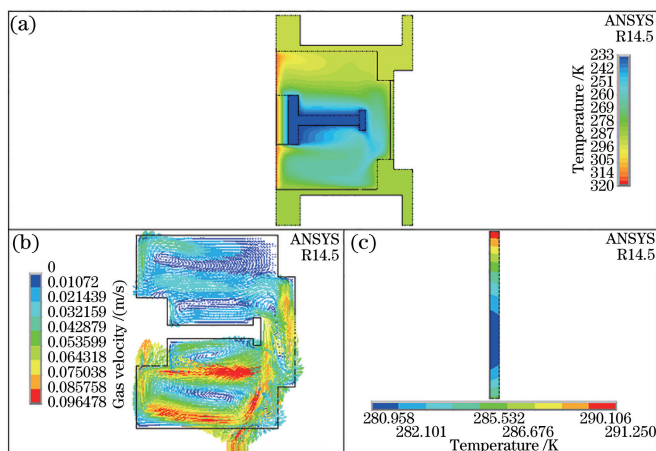


图 3 常压下的数值模拟结果。(a) 温度分布; (b) 气体速度矢量分布; (c) 玻璃窗口温度分布

Fig. 3 Numerical simulation result under normal pressure. (a) Temperature distribution; (b) gas velocity distribution;

(c) glass window temperature distribution



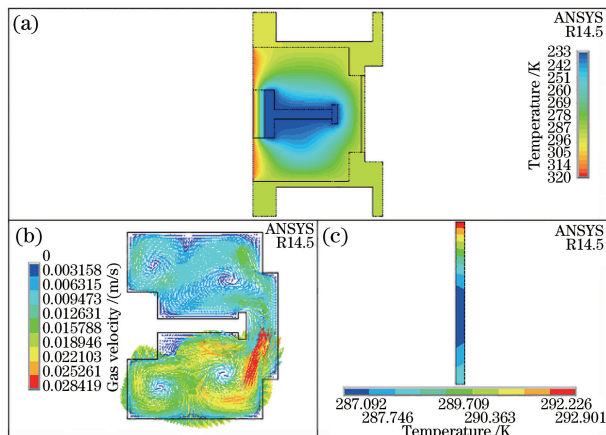


图4 气压为  $6 \times 10^3$  Pa 时的数值模拟结果。(a) 温度分布；(b) 气体速度矢量分布；(c) 玻璃窗口温度分布

Fig. 4 Numerical simulation result under  $6 \times 10^3$  Pa pressure. (a) Temperature distribution; (b) gas velocity distribution; (c) glass window temperature distribution

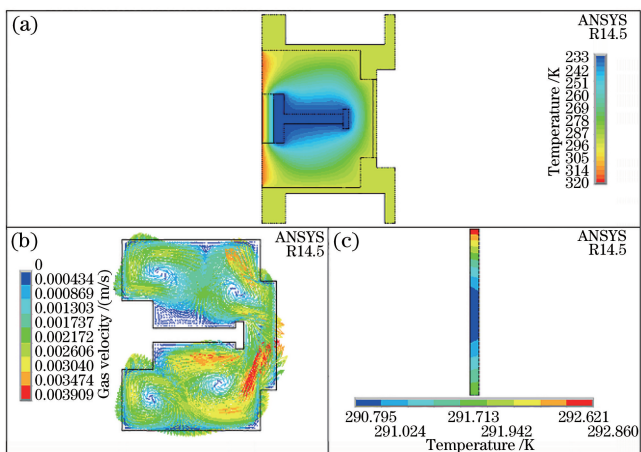


图5 气压为  $1 \times 10^3$  Pa 时的数值模拟结果。(a) 温度分布；(b) 气体速度矢量分布；(c) 玻璃窗口温度分布

Fig. 5 Numerical simulation result under  $1 \times 10^3$  Pa pressure. (a) Temperature distribution; (b) gas velocity distribution; (c) glass window temperature distribution

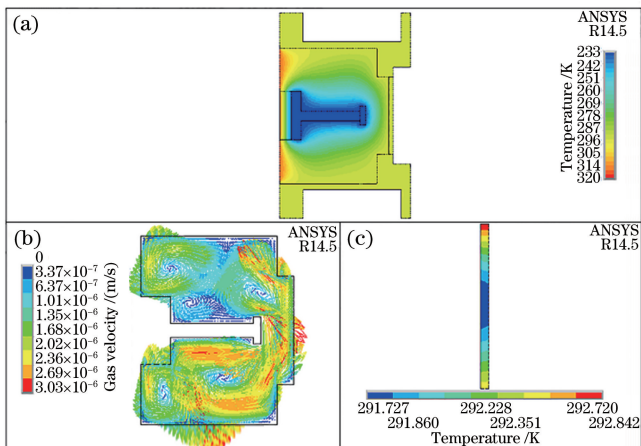


图6 气压为 1 Pa 时的数值模拟结果。(a) 温度分布；(b) 气体速度矢量分布；(c) 玻璃窗口温度分布

Fig. 6 Numerical simulation result under 1 Pa pressure. (a) Temperature distribution; (b) gas velocity distribution; (c) glass window temperature distribution

从图 4~6 的温度分布场和速度矢量分布场可以看出,随着真空度的提高,真空室内气体的总体温度升高,且温度驱动气体的流速越来越慢,气压为  $6.0 \times 10^3$  Pa 时流速与大气压时流速在一个数量级,而 1 Pa 时气体流速几乎可忽略不计,此时气体流体特性不明显,开始表现分子特性,气体之间热交换减少,低温气体对高温气体的冷却作用减弱,同时冷端气体与 TEC 热沉、腔壁、玻璃窗口的热交换减弱,不利于 TEC 制冷。图 3(c)~6(c)显示玻璃窗口的最低温度由大气压时的 281 K 上升到 291.7 K,与 293 K 的环境温度相差不大,可避免窗口的水气凝结。

### 3 实验及结果分析

CCD 的暗电流噪声与温度和积分时间密切相关,温度每降低  $5 \sim 6$  °C, CCD 暗电流噪声减小一半,并且积分时间越长,暗电流噪声越大。当温度达到  $-35$  °C 时, CCD 的暗电流噪声很小,几乎可以忽略不计。一些资料根据实际经验指出,温度达到  $-20$  °C 以下时 CCD 的暗电流噪声可以忽略不计<sup>[17]</sup>, CCD 可达到良好效果。因此,为了减小 CCD 暗电流噪声,需要尽可能将其温度降低到  $-25$  °C 以下。

#### 3.1 实验装置

按照前文所述,在设计的过程中,热源、冷源对真空室内的气体流动热交换及 TEC 工作性能有一定影响,高真空度反而会影响制冷效果,但为了防止制冷引起的结露,需保持真空室的真空度,按照图 7 所示装置进行抽真空实验。涡轮分子泵可用于抽真空,气瓶向真空腔内提供不同种类的高纯度气体,真空规显示真空室的真空度,真空室按图 1 所示结构进行组装。整个装置安装固定完成后,先抽真空并用检漏仪检测,使整个系统不漏气,密封性较好。

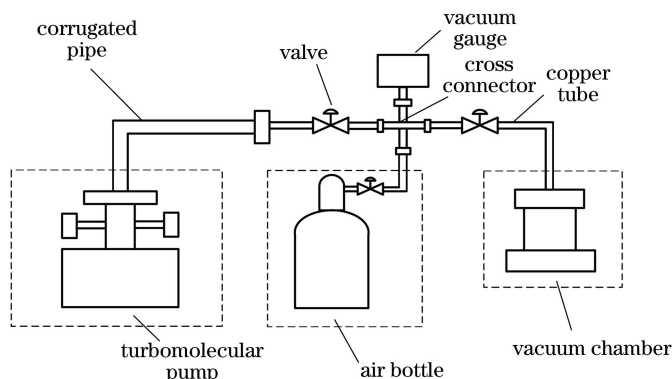


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic of experimental setup

#### 3.2 空气环境下制冷

首先测量空气环境下不同真空度的 TEC 制冷效果,结果如图 8 所示。图 8(a)表明,在 TEC 工作前 300 s 内,温度下降较快,之后慢慢趋于平缓,最后达到稳态,并且可以看出,真空度高时制冷效果不及真空度

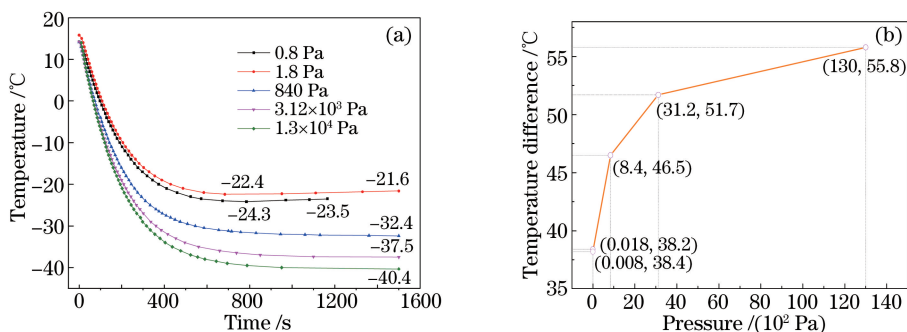


图 8 空气环境下的制冷

Fig. 8 Cooling in air environment

低时,在压强为  $1.3 \times 10^4$  Pa 的低真空度范围内,温度最低可以达到  $-40.4$  °C,最大温差达到  $55.8$  °C,而在真空度为  $0.8$  Pa 和  $1.8$  Pa 的中真空度范围内,两者制冷效果差别不大,但最低温度和最大温差都比  $1.3 \times 10^4$  Pa 时小很多,且出现温度先降到最低、而后又上升的现象。分析产生这种现象的原因如下。1) 文献[15]指出,TEC 制冷效率与热端、冷端的对流热交换系数有关。由 2.4 节热模拟结果可知,真空室内壁与 TEC 热沉之间的气体流动还具有冷却热端的作用,真空度越高,冷却作用越弱。因此,实验中随着真空度提高,冷指对气体冷却作用减弱,腔内气体温度升高,流速减慢,气体与散热模块、腔壁、玻璃窗口的热交换减弱,导致制冷过程中散热模块温度升高,TEC 热端温度升高,制冷效率降低。2) 在中真空度范围内,气体开始表现分子特性。根据文献[16],分子的平均自由程在  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  m 量级,而真空室内部的尺寸为  $\phi 70$  mm  $\times$  50 mm,此时腔内气体分子平均自由程与腔的线度相差不大,因此冷、热气体分子之间的碰撞作用减弱,部分高温气体分子直接与冷指作用,影响制冷。3) 真空度提高,热辐射增强,也对制冷有一定的影响。

### 3.3 不同保护气体环境下制冷

从 3.2 节可知,真空度低时 TEC 制冷效果好,为了防止空气真空度太低可能引起真空室内液滴凝结,可将真空室抽至  $0.1$  Pa 量级的真空度,然后再注入不同种类的高纯度(纯度大于等于 99.999%)保护气体,重复实验,研究不同种类气体对制冷的影响。结果如图 9 所示。

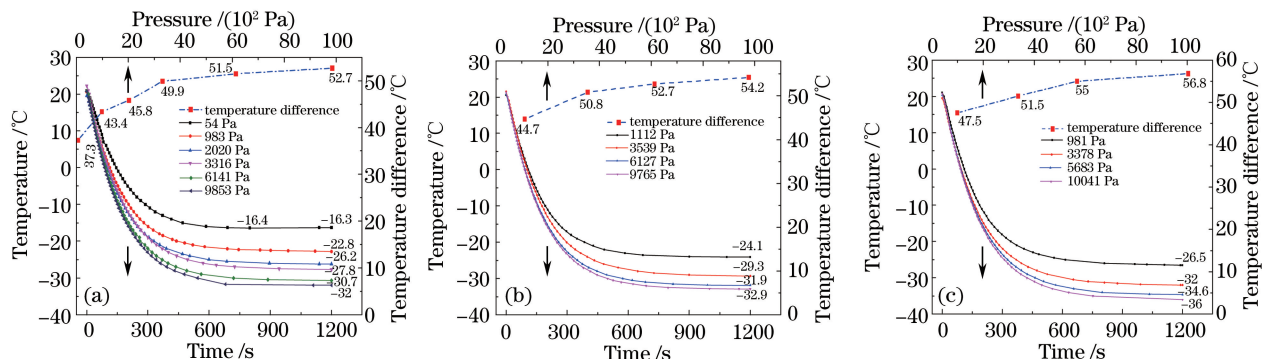


图 9 真空室中充入不同种类气体时的制冷效果图。(a) 氩气; (b) 氖气; (c) 氮气

Fig. 9 Cooling under different gas conditions. (a) Ar; (b) Ne; (c) N<sub>2</sub>

图 9(a) 为充入氩气时的制冷效果图,从图中可以看出,真空室内气压为  $50$  Pa 时效果较差,同样出现温度先降低后上升的现象。气压在  $6.0 \times 10^3$  Pa 以内时,温差变化较大,气压为  $6.1 \times 10^3$  Pa 和  $9.8 \times 10^3$  Pa 时,温差变化较小,制冷效果相差不大。图 9(b)、(c) 分别为充入氖气与氮气的实验结果,效果与充入空气和氩气时基本相似。从图中虚线表示的最大温差与气压关系曲线可以看出,充入氮气的效果最好,温度差可达  $56.8$  °C,比空气的温差略大。因此,在真空室中充入气压为  $6.0 \times 10^3$  Pa 的高纯度干燥氮气,既能保证良好的制冷效果,又可以保证没有液滴出现。

### 3.4 噪声测试

该设计方案的 CCD 芯片采用日本滨松公司的 S10420-01 系列产品,主要考虑其高空间分辨率( $2048 \times 64$  阵列)、低噪声、低标准具效应,并且在近红外光到紫外光范围的高量子效率和灵敏度,适用于光谱分析,并且价格较低。

按照文献[18]方法测量 CCD 暗电流噪声,得到不同温度下的暗电流噪声如图 10 所示。从图 10 看出,温度高于  $-20$  °C 时,CCD 的温度对其暗电流噪声影响较大;温度低于  $-20$  °C 时,暗电流噪声变化较小,几乎可以忽略不计。文献[19]指出,暗电流满足 Arrhenius 法则和 Meyer-Neldel 法则,计算公式为

$$I_D = a \exp \left[ \Delta E \left( \frac{1}{E_{MN}} - \frac{1}{kT} \right) \right], \quad (3)$$

式中  $a$ 、 $E_{MN}$  为正常数,  $\Delta E$  为激发能,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为温度。图 10 中实线是按(3)式拟合后的曲线,从图中可以看出,CCD 暗电流噪声变化趋势与 Meyer-Neldel 法则的特性曲线变化趋势基本吻合,与温度变化呈类指数关系。

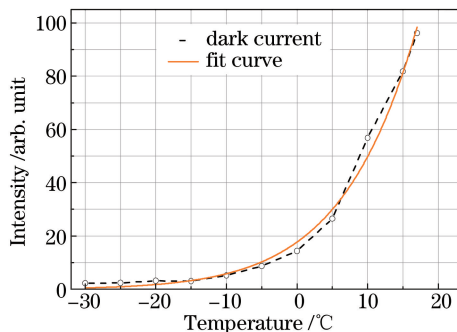


图 10 暗电流噪声随制冷温度的变化

Fig. 10 Dark current noise versus cooling temperature

## 4 结 论

完成了热电制冷 CCD 相机系统的初步研制工作。利用 ANSYS 数值模拟软件验证了散热模块的可行性,分析了低、中真空度下气体流动热交换对 TEC 制冷的影响;实验研究了真空室内充入不同气压、不同种类气体条件下 TEC 冷端的制冷特性,并测试了 CCD 芯片在不同制冷温度下的暗电流噪声。研究发现,在给出的设计结构中,真空室的真空度是影响 TEC 制冷性能的一个重要因素,高真空度时制冷效果变差,原因在于真空室内冷、热温差驱动气体流动影响了热交换;而在真空室内充入一定气压的高纯度气体可优化热电制冷 CCD 探测器的制冷特性;在冷却结构中,真空室内充入  $6.0 \times 10^3$  Pa 氮气时,2 级 TEC 制冷片的冷端最低温度接近  $-35$  °C,与外界环境温差达到  $55$  °C 以上;CCD 芯片的暗电流噪声与温度的关系与 Meyer-Neldel 法则吻合,说明 CCD 芯片确实得到冷却及降噪。该研究工作为研发拉曼散射气体分析仪器现场应用的低成本、低噪声探测器提供了参考。

## 参 考 文 献

- 1 Das R S, Agrawal Y K. Raman spectroscopy: Recent advancements, techniques and applications [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2011, 57(2): 163-176.
- 2 Tu Q, Chang C. Diagnostic applications of Raman spectroscopy [J]. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 2012, 8(5): 545-558.
- 3 Zhao L Z, Chen W G, Wan F, *et al.*. Laser Raman spectroscopy applied in detecting dissolved gas in transformer oil[C]. 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013: 1145-1148.
- 4 Ingle R, Hutchinson I B, Edwards H G M, *et al.*. ExoMars Raman laser spectrometer breadboard: Detector design and performance[C]. SPIE, 2011, 8152: 815215.
- 5 Hu Xiaohong, Zhou Jinchi. Application and progress of Raman spectroscopy[J]. *Analytical Instrumentation*, 2011(6): 1-4.  
胡晓红, 周金池. 拉曼光谱的应用及其进展[J]. *分析仪器*, 2011(6): 1-4.
- 6 Han Xiaozhen, Guo Zhengye, Kang Yan, *et al.*. Application of Raman spectroscopy in certification of chicken-blood stones[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0130003.  
韩孝联, 郭正也, 康 燕, 等. 拉曼光谱在鸡血石鉴定中的应用[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0130003.
- 7 Zuo D L, Xu Y Y, Wang X B, *et al.*. Studies on sensitive Raman gas detectors[C]. SPIE, 2013, 8718: 87180N.
- 8 Li Zhe, Yu Anlan, Zuo Duluo, *et al.*. Analysis and correction of slit curvature in spectrograph with high NA[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0630004.  
李 哲, 余安澜, 左都罗, 等. 大口径光谱系统狭缝弯曲的分析与矫正[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0630004.
- 9 Li Bin, Tu Pin, Xu Yongyue, *et al.*. Narrow linewidth diode laser with grating external cavity in 405 nm band[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 031404.  
李 斌, 涂 嫻, 徐勇跃, 等. 405 nm 波段光栅外腔窄线宽蓝紫光半导体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 031404.
- 10 Zhu Huadong, Luo Qin, Zhou Li, *et al.*. Application prospect of natural gas component analysis using laser Raman



- spectroscopy[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 110-114.
- 朱华东, 罗勤, 周理, 等. 激光拉曼光谱及其在天然气分析中的应用展望[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 110-114.
- 11 Lei Yutang, Wang Qingyou, He Jiaming, *et al.*. Optoelectric detection technology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007: 119-130.
- 雷玉堂, 王庆友, 何加铭, 等. 光电检测技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 119-130.
- 12 Zhang Dahai, Yao Dazhi, Liu Wei, *et al.*. System design of high-speed science-grade CCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(11): 87-92.
- 张大海, 姚大志, 刘伟, 等. 高速科学 CCD CAMERA 系统设计[J]. *光电工程*, 2005, 32(11): 87-92.
- 13 Gan Y Q, Ge W, Qiao W D, *et al.*. Design and application of TEC controller using in CCD camera[C]. SPIE, 2011, 8196: 81961E.
- 14 Wang Bing. The semiconductor cooled high speed USB3.0 camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 24-31.
- 王兵. 半导体制冷 USB3.0 高速相机的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 24-31.
- 15 Gao Xinhui, Deng Zhongmin, Wang Jingtao. Three-dimensional nonlinear temperature field analysis of TEC structure[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(1): 25-30.
- 高薪蕙, 邓忠民, 王静涛. TEC 结构的三维非线性瞬态温度场分析[J]. *计算机力学学报*, 2012, 29(1): 25-30.
- 16 秦允豪. 普通物理学教程: 热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 140-152.
- 17 Jing Zhijun, Jiang Jingying, Zhang Fan, *et al.*. Design of CCD grating spectrometer with refrigeration and application in Fourier-domain OCT[J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(24): 3820-3822.
- 经志军, 蒋景英, 张帆, 等. 带制冷的 CCD 光栅光谱仪设计及其在频域 OCT 中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(24): 3820-3822.
- 18 Cheng Shubo, Zhang Huige, Liu Hao, *et al.*. Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0204001.
- 程书博, 张惠鸽, 刘浩, 等. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0204001.
- 19 Widenhorn R, Blouke M M, Weber A, *et al.*. Temperature dependence of dark current in a CCD[C]. SPIE, 2002, 4669: 193-201.