

拉曼光谱用热电制冷 CCD 探测器的设计与性能

唐文武**, 余安澜, 姚中一, 左都罗*, 王新兵

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 设计了一种热电制冷电子耦合元件(CCD)探测器,并对其特性进行了分析。介绍了该 CCD 探测器的真空制冷结构、电路、应用软件,并对各个部分的设计思路、功能、效果进行了详细论述。对该探测器的暗电流噪声和读出噪声进行了测试,结果表明:在温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、读出频率为 250 kHz 的条件下,该探测器的读出噪声为 56 e^{-} ,其暗电流噪声为 $0.232\text{ e}^{-}\cdot(\text{pixel}\cdot\text{s})^{-1}$;使用该热电制冷 CCD 探测器测试空气的自发拉曼散射信号,在温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、曝光时间为 10 s 的条件下, O_2 、 N_2 和 H_2O 的自发拉曼散射峰的相对高度分别为 $3303, 7768, 843\text{ ADU}$,其中 N_2 峰的信背比和信噪比分别为 14.8 和 24.9 。所设计的 CCD 探测器具有探测微弱自发拉曼散射信号的能力。

关键词 探测器;拉曼分析仪;热电制冷;暗电流噪声;读出噪声

中图分类号 TN386.5; TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090401

Design and Performance of Thermoelectric Cooling CCD
Detector Used for Raman Spectroscopy

Tang Wenwu**, Yu Anlan, Yao Zhongyi, Zuo Duluo*, Wang Xinbing

WuHan National Research Center for Optoelectronics, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A kind of thermoelectric cooling charge-coupled device (CCD) detector is designed and its performance is analyzed. The vacuum refrigeration structure, electric circuit, application software of this CCD detector and their design thoughts, functions and effects are introduced. The dark current noise and the readout noise of this detector are tested. The results show that, the readout noise is 56 e^{-} and the dark current noise is $0.232\text{ e}^{-}\cdot(\text{pixel}\cdot\text{s})^{-1}$ at the temperature of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the reading frequency of 250 kHz . The spontaneous Raman scattering signal of the ambient atmosphere is obtained by this detector. Under the temperature of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the exposure time of 10 s , the relative heights of the spontaneous Raman scattering peaks for the O_2 , N_2 and H_2O are $3303, 7768, 843\text{ ADU}$, respectively, in which the signal-background-ratio and the signal-noise-ratio of the N_2 peak are 14.8 and 24.9 , respectively. The designed CCD detector possesses a detection ability for the weak spontaneous Raman scattering signals.

Key words detectors; Raman analyzer; thermoelectric refrigeration; dark current noise; readout noise

OCIS codes 040.1520; 250.0040; 300.6450; 120.4640

1 引言

拉曼光谱由于测定方法简单且能够对物质进行快速、可重复、无损伤检测,近年来已经成为一种常用的物质检测手段,被广泛应用于材料科学、生物技术、环境监测等领域。但拉曼散射的散射截面小,产生的信号弱,强度约为入射光的 10^{-7} 。为了检测到拉曼信号,一般采用低噪声、高灵敏度、高量子效率、

大动态范围的低温制冷电子耦合元件(CCD)探测器。低温制冷 CCD 探测器采用的制冷方式主要有两种:热电制冷和液氮制冷,热电制冷具有体积小、噪声低、制冷快等优点^[1],因此成为低温制冷 CCD 探测器的首选。

国外关于热电制冷 CCD 探测器的研究大多集中于航空航天和天文观测领域^[2-6],这些探测器均需要根据具体的探测目的进行特殊设计和制作,一般

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-03-28

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2012YQ16000702)

* E-mail: zuoduluo@mail.hust.edu.cn; ** E-mail: tangwenwu@mail.hust.edu.cn

具有较低的暗电流噪声和读出噪声。目前几家科学仪器公司具有生产制冷温度低、暗电流和读出噪声小的热电制冷 CCD 探测器的能力,这些探测器虽然性能较好,但价格昂贵^[7]。国内关于热电制冷 CCD 探测器的研究报道较少,张大海等^[8]报道了一套制冷型科学级 CCD 探测器,重点介绍了该探测器的数据采集模块,并测试了暗电流和读出噪声;金伟其等^[9]介绍了一种制冷 CCD 成像组件,但并未对其制冷温度、噪声特性、成像性能等作出说明和评价;张泉等^[10]介绍了一套 CCD 探测器的热电制冷系统,并测试了 CCD 探测器的暗电流噪声;张娜等^[11]对应用于弱光探测的制冷 CCD 探测器的各个组成部分进行了介绍,并测试了探测器的最低照度。由于这些探测器的制冷温度通常在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右^[8-11],暗电流噪声大约为 $1\text{ e}^{-}\cdot(\text{pixel}\cdot\text{s})^{-1}$ (e^{-} 表示电子数),读出噪声大约为 15 e^{-} (均方根值),在制冷温度和暗电流噪声抑制等方面与国外相比还存在较大差距。设计并制作制冷温度低、暗电流噪声和读出噪声小的热电制冷 CCD 探测器对拉曼光谱现场应用的推广有重要的价值。

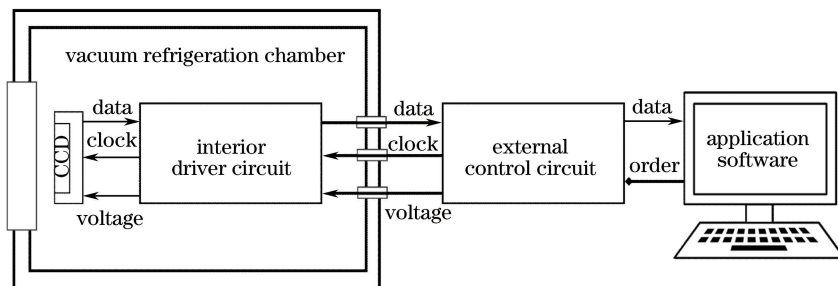


图 1 成像系统原理框图

Fig. 1 Schematic of imaging system

与其他 CCD 探测器驱动电路的设计^[12-14]不同,该探测器的驱动电路分为内部驱动电路和外部控制电路两个部分,分别放置于真空制冷腔室的内部和外部。将模数转换器放在内部电路中靠近 CCD 电荷输出管脚的地方,将功率较大、产热较明显的直流电源系统放置在外部控制电路中,这样既可以缩短 CCD 输出像素模拟信号的传输距离,减少像素模拟信号在传输过程中引入的噪声,又可以减小真空制冷腔室内部的热负载,节省真空制冷腔室的空间。

2.1 真空制冷结构的设计

真空制冷结构主要由玻璃窗口、真空腔壁、CCD、冷指、TEC、导热基座、电器接口法兰、散热器等九部分组成,如图 2 所示。

本文根据热电制冷 CCD 探测器的特点,对探测器的制冷结构、电路、应用软件等进行了设计,使其能够达到较低制冷温度、较小的暗电流噪声和读出噪声。通过测试暗电流噪声、读出噪声和空气的自发拉曼散射信号等数据来评价探测器的性能。

2 热电制冷 CCD 探测器的设计

该热电制冷 CCD 探测器主要由 CCD、真空制冷结构、内部驱动电路、外部控制电路和应用软件等五部分组成,其原理框图如图 1 所示。CCD 采用滨松光子学商贸(中国)有限公司的 S10420-1106-01 型背照式全帧转移型面阵图像传感器,它具有低噪声、高量子效率、宽光谱响应范围等特点,适用于光谱探测。CCD 工作于多钳相位(MPP)模式,暗电流噪声可以得到有效抑制。为了进一步降低暗电流噪声,使用热电制冷器(TEC)对 CCD 制冷。真空制冷腔室一方面是为了防止 CCD 的玻璃窗口由于制冷而发生低温结露现象,另一方面是为了改善 TEC 的制冷环境,从而进一步降低制冷温度。

真空制冷结构采用二阶 TEC 制冷,TEC 的冷端通过冷指与 CCD 传感器的外壳连接,热端则与导热性能良好的铝制导热基座相连;散热器通过散热法兰与导热基座相接,在散热器上方用风扇加强空气对流;在散热法兰与导热基座的空隙之间通过填充硅脂的方式加强两者之间的热传递。采用美国 Thorlabs 公司的 TED4015 型高精度温控器控制 TEC 的工作电压和电流,用德国爱普科斯生产的 B57703 型热敏电阻产生温度反馈信号。为了尽可能准确地获取 CCD 传感器的温度,将热敏电阻放置于冷指上端靠近 CCD 传感器的位置。该真空制冷结构的气密性和制冷效果良好^[15],真空度可达 $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$,实验过程中最低制冷温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

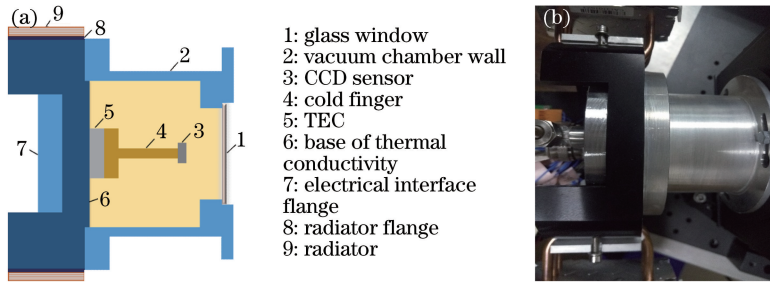


图2 真空制冷结构。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 2 Vacuum refrigeration structure. (a) Schematic; (b) practical picture

2.2 内部驱动电路

内部驱动电路由时序驱动器、模数转换器(ADC)、并串转换器等组成,其主要功能是完成时序的驱动、模数转换和并串转换,其原理图如图3所示。

S10420-1106-01的驱动时序包括两路垂直时序(P1V, P2V)、四路水平时序(P1H, P2H, P3H, P4H)、复位时序(RG)、转移时序(TG,与P2V相同)、加和时序(SG,与P4H相同)共九路时序^[16],根据专门用于驱动S10420-11106-01的驱动电路Cl1287的电压标准^[17],该设计将S10420-1106-01

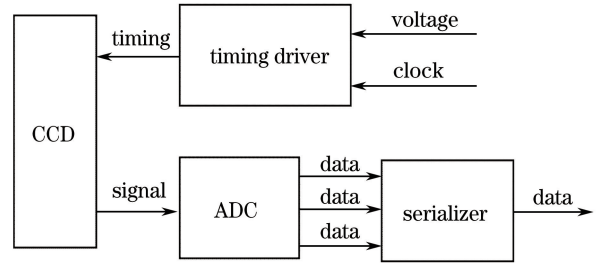


图3 内部驱动电路原理图

Fig. 3 Schematic of interior driving circuit

的所有偏置电压和驱动时序电压升高8 V,升高后的驱动时序电压见表1。

表1 S10420-1106-01的驱动时序电压

Table 1 Driving time sequence voltage of S10420-1106-01

Time sequence	Voltage type	Minimum voltage /V	Typical voltage /V	Maximum voltage /V
P1V, P2V, TG	High	12	14	16
	Low	-1	0	1
P1H, P2H, P3H, P4H, SG	High	4	14	16
	Low	2	3	4
RG	High	12	14	16
	Low	2	3	4

从表1可以看出,CCD的驱动时序高电平的典型值为14 V,低电平的典型值为0 V或3 V。由于CCD的驱动时序的电压与复杂可编程逻辑器件(CPLD)输出的互补金属氧化物半导体(CMOS)电平不符,且需要较大的驱动电流,因此CPLD输出的时序信号不能直接用于驱动CCD,需要增加额外的时序驱动芯片。这里采用EL7457作为时序驱动芯片,其最高工作频率为40 MHz,输出时序的最大摆幅为21.5 V,输出的峰值电流为2 A,可满足CCD对驱动时序的要求。与此同时,该芯片有四个通道,相同电压幅度的时序可以共用一片芯片,减小了电路的规模和尺寸。

采用模数转换芯片AD9824处理CCD输出的像素模拟信号。由于CCD输出信号的电压符合AD9824模数转换芯片输入电压的要求,因此,通过

0.1 μ F的隔直电容直接将CCD的信号输出管脚与AD9824的信号输入管脚相连,这样不仅可以减小CCD输出信号的传输距离,而且可以避免其他电子器件的接入所带来的噪声。

为了减小真空电气穿通所占用的空间,这里采用了32针环形插座。由于引线的限制,不能采用14路数字信号并行输出的方式,故将并行信号转变为串行信号输出。采用74F676作为并串转换芯片,该芯片可以进行16位数字信号的并串转换,最大转换速率为110 MHz,能够满足下行数据对分辨率与传输速度的要求。

2.3 外部控制电路

外部控制电路主要由直流电源系统、串并转换器、数据缓存器、USB控制器、复杂可编程逻辑器件等五部分组成,主要进行串并转换、时序产生、数据

缓存、数据上传等过程。图 4 所示为外部控制电路的原理图,其中 FIFO memory 为先进先出存储器。

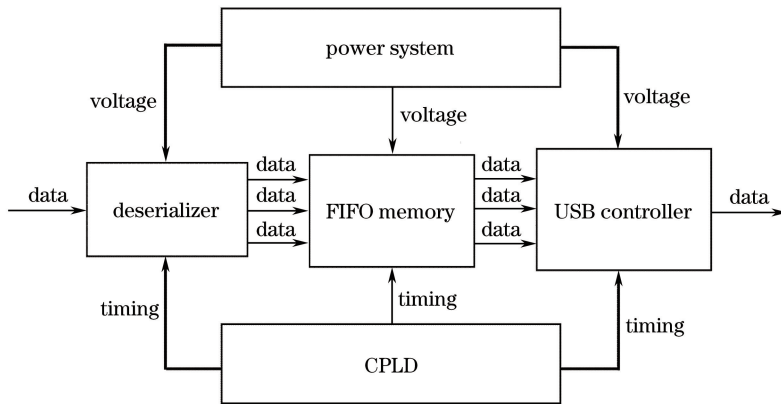


图 4 外部控制电路原理图

Fig. 4 Schematic of external driving circuit

本电路由通用串行总线(USB)接口的 5 V 电源供电。为满足 CCD 芯片对五种偏置电压的需求,使用 LT1935 升压型开关电源芯片将 5 V 电源分别升压至 32,20,14,13,8 V。电路中其他芯片所需要的 3 V 或 3.3 V 电压则由 AMS1117 型线性稳压器提供。

为了将数字信号的串行传输方式重新转换为并行,使用 74F673 作为串并转换芯片,该芯片的转换位数为 16 位,最大转换速率为 130 MHz,能够满足下行数据对分辨率和速率的要求。由于 CCD 单个像素信号的输出速率为 0.25 MHz,而 USB 控制芯片的数据读入速率一般为 48 MHz,速率不匹配,因此需要一个容量较大的数据缓存器。这里采用 CY7C4285V 型先进先出存储器作为缓存器,其存储和读出的最大速率为 66.7 MHz,能够匹配数据的产生和读入速率。

本设计采用 CY7C68013A 作为数据通信控制芯片,并用 CAT24C64 存储控制芯片的固件程序。控制芯片需要响应上位机发送过来的光谱采集、Binning 采集、图像采集、空采集、数据上传和 FIFO 芯片清空等指令,分别采用通用可编程接口(GPIF)和块传输的方式进行数据的上行和下行传输。

选用美国 Altera 公司的 CPLD 芯片 EPM570T100C5N 产生驱动时序。驱动时序用于驱动 CCD、转换器、数据存储器正常工作,主要包括 7 路 CCD 时序、5 路模数转换时序、8 路并串以及串并转换时序、2 路数据存储时序,它们的作用分别是驱动 CCD 进行电荷转移、驱动 AD9824 进行模数转换、驱动 74F676 和 74F673 进行并串、串并转换、驱动 CY7C4285V 进行数据存储等。

2.4 应用软件

为了便于操作该热电制冷 CCD 探测器,基于 VC++ 语言中的 MFC 框架编写可视化上位机操作软件。

通过该上位机软件,可实现对光谱模式、Binning 模式、图像模式的选择。软件具有实时分析数据的最大值、最小值、平均值和标准差等功能,还可将采集到的数据以 ASCII 码的形式保存于.txt 文件中,便于数据分析。

3 实验结果与讨论

为评价热电制冷 CCD 探测器的性能,对直接决定探测器探测极限和信噪比的暗电流噪声和读出噪声分别进行了测量,配套自制的拉曼光谱仪^[18-19]测试了空气的自发拉曼散射信号,并与其他热电制冷 CCD 探测器的测试结果进行了对比。

3.1 暗电流噪声的测量

由于暗电流噪声与曝光时间成正比^[20],且受到温度的影响,因此在同一温度下测试不同曝光时间的暗场读数,然后对暗场读数与曝光时间的关系进行线性拟合,得到的拟合直线的斜率便为该温度下暗电流噪声的大小^[21-22]。曝光时间分别选取 1,3,5,10,15,20,25,30 s,以 5 °C 为温度间隔,测试该探测器在 -20~20 °C 下的暗电流。为减小读出噪声的影响,取 20 幅暗场读数的平均值作为相同温度和曝光时间下的暗场读数。暗电流噪声测试的结果如图 5 所示。

用最小二乘法对不同温度下的暗场读数进行线性拟合,得到暗电流噪声随曝光时间的变化关系如图 5 中实线所示。其中在 -20 °C 下,暗电流与曝光

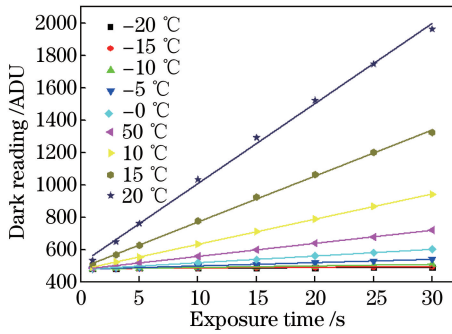


图5 不同温度下暗场读数与曝光时间之间的关系

Fig. 5 Relationships between dark reading and exposure time at different temperatures

时间的关系式为 $y = 483.01324 + 0.26224x$, 其中 x 表示曝光时间, y 表示暗场读数。此暗电流噪声为 $0.26224 \text{ ADU} \cdot \text{s}^{-1}$ (ADU 为模数转换单位)。由于采集的是 CCD 面阵所有行的并合数据, 且暗场读数的单位为 ADU, 因此若要用单位 $\text{e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 表示暗电流的大小, 还需进行转换:

$$D_{e^-} = D_{\text{ADU}} \cdot V_{\text{LSB}} \cdot n^{-1} \cdot V_e^{-1} \cdot a, \quad (1)$$

式中 D_{e^-} 为用单位 $\text{e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 表示的暗电流; D_{ADU} 为用单位 $\text{ADU} \cdot \text{s}^{-1}$ 表示的暗电流; V_{LSB} 为模数转换芯片最低有效位对应的电压值, 单位为 μV ; n 为 CCD 一列像元上的像素个数; V_e 为 CCD 的节点灵敏度, 单位为 $\mu\text{V} \cdot (\text{e}^-)^{-1}$; a 为节点灵敏度的修正值。由上述方法得到 CCD 在 -20°C 下的暗电流噪声为 $0.788 \text{e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 。

假定暗电流与温度满足有两个常数的 Meyer-Nedel 法则^[22], 则暗电流噪声可表示为

$$D_{e^-} = D_{e_{00}^-} \cdot \exp\{\Delta E \cdot [1/E_{\text{MN}} - 1/(kT)]\}, \quad (2)$$

式中 D_{e^-} 为以单位 $\text{e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 表示的暗电流; $D_{e_{00}^-} = 1685 \text{e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 为常数因子; ΔE 和 E_{MN} 为两个拟合参数, 单位为 eV, 它们分别对应产生热电子 (与暗电流对应) 的活化能和特征能量; $k = 1/11588.7 \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数; T 为以单位 K 表示的绝对温度。用 (2) 式拟合不同温度下的暗电流噪声, 结果如图 6 所示。

上述拟合曲线与实验数据的相关系数为 0.99976, 通过拟合得到参数 ΔE 和 E_{MN} 的值分别为 0.84 eV 和 29.51 meV, 与参考值 0.9 eV 和 25.3 meV 非常接近。因此, 当 CCD 工作于 -30°C 时, 其暗电流噪声可达 $0.232 \text{e}^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 。

3.2 读出噪声的测量

在不考虑暗电流噪声和固定模式噪声的情况

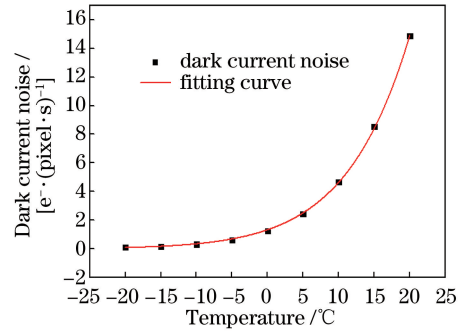


图6 暗电流噪声与温度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of dark current noise and temperature

下, 探测器的总噪声^[23]为

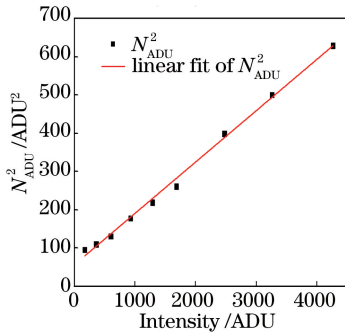
$$N_{\text{ADU}}^2 = G^2 \times R_{\text{ADU}}^2 + \frac{G^2}{g} (S_{\text{ADU}} - S_{\text{bias}}), \quad (3)$$

式中 N_{ADU}^2 为总噪声的平方; G 为模数转换器的放大系数; R_{ADU}^2 为读出噪声的平方; g 为光电子转变为模数转换器读数值系数, 单位为 $\text{e}^- \cdot \text{ADU}^{-1}$; S_{ADU} 为输出信号读数值; S_{bias} 为偏置信号读数值; $(S_{\text{ADU}} - S_{\text{bias}})$ 为与入射光强度成正比的量。

由 (3) 式可以看出, N_{ADU}^2 的值与 $(S_{\text{ADU}} - S_{\text{bias}})$ 成正比, R_{ADU} 为定值, 因此采用下列步骤测试探测器的读出噪声: 1) 使光均匀照射到 CCD 表面, 并保持 CCD 的温度不变; 2) 改变入射光强度, 获得不同光照强度下总噪声的平方 N_{ADU}^2 ; 3) 对 N_{ADU}^2 与 $(S_{\text{ADU}} - S_{\text{bias}})$ 的关系进行线性拟合, 拟合直线与纵轴的截距即为 R_{ADU}^2 , 进一步可得到读出噪声 R_{ADU} 。在温度为 -30°C 的条件下, 用上述方法测试该热电制冷 CCD 探测器的读出噪声, 得到 $(S_{\text{ADU}} - S_{\text{bias}})$ 与 N_{ADU}^2 的关系及其线性拟合直线, 如图 7 所示。可以看出, 拟合直线与原始数据的相关系数为 0.99574, 斜率为 0.1343, 在纵轴上的截距为 56.56251。由于测量时模数转换器未对信号进行放大, 因此 $G = 1$ 。由此可以得, 热电制冷 CCD 探测器在读出速率为 250 kHz 的条件下, 其增益 g 为 $7.45 \text{e}^- \cdot \text{ADU}^{-1}$, 读出噪声 R_{ADU} 为 7.52 ADU, 即 R_{e^-} 为 56e^- 。

3.3 空气自发拉曼散射信号的测试

将抛物面镜拉曼信号探测系统^[24]中的 Pixis: 400BR_eXcelon 替换为自制探测器, 用波长为 532 nm 的激光作为抽运光, 在温度为 -30°C 、曝光时间为 10 s 的条件下, 测得的空气自发拉曼散射信号如图 8 所示, 可以清晰地分辨出氧 (O_2) 和氮 (N_2) 自发拉曼散射信号, 其相对光谱强度分别为 3303 ADU 与 7768 ADU; 空气中水蒸气的含量较少, 其

图7 光照强度与 N_{ADU}^2 间的关系Fig. 7 Relationship between light intensity and N_{ADU}^2

光谱强度较弱, 仅为 843 ADU; N_2 峰的信背比 (SBR) 为 14.8。而用 Pixis:400BR_eXcelon 测得的 N_2 自发拉曼散射峰为 20247 ADU, 其 SBR 的值为 79.4。自制探测器的测试结果与 Pixis:400BR_eXcelon 相比还存在较大差距, 其原因主要有以下几点: 1) 对于 532 nm 的激发光, N_2 的自发拉曼散射光的波长约为 598 nm, 在该波长下, 自制探测器使用的图像传感器 S10420-1106-01 的量子效率低于 80%^[16], 而 Pixis 相机使用的 CCD 的量子效率为 90% 以上^[25]; 2) S10420-1106-01 的节点灵敏度更低, 相同的光电荷转变获得的模拟电压值更小; 3) 自制探测器使用的 CCD 的玻璃窗口不仅会给光学系统带来相差, 还会造成一定的人射光损耗, 从而降低拉曼信号的收集效率。

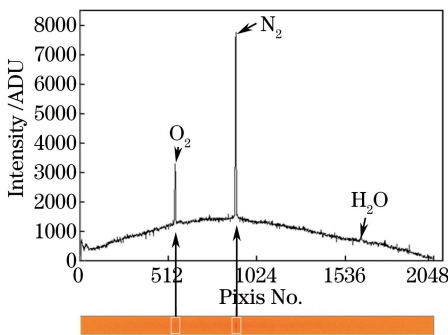


图8 光谱模式(上)和图像模式(下)的空气自发拉曼散射谱

Fig. 8 Spontaneous Raman scattering spectra of ambient atmosphere displayed in spectrum mode (top) and image mode (bottom)

拉曼散射信号的信噪比 (SNR)^[26] 为

$$S_{\text{SNR}} = \frac{\bar{S}}{\delta_B}, \quad (4)$$

式中 \bar{S} 为信号的平均峰值, δ_B 为非信号处读数的标准差与 $\sqrt{2}$ 的比值。通过 (4) 式得到图 8 中 N_2 峰的 SNR 为 24.9。

4 结 论

为了避免 CCD 原始像素信号的长距离传输, 结合真空制冷结构的特点, 对 CCD 驱动电路进行了分离设计, 实现了热电制冷 CCD 探测器的制作。使用自主编写的应用软件测试了探测器的暗电流与读出噪声, 结果表明: 在读出频率为 250 kHz 的条件下, 探测器的读出噪声为 $56 e^-$, 达到了同类探测器的水平; 探测器的最低制冷温度为 -30°C , 此温度下的暗电流噪声为 $0.232 e^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$, 优于国内已报导^[8-11] 的热电制冷 CCD 探测器。根据理论公式推测, 若 CCD 工作于 -40°C , 其暗电流噪声可降低至 $0.054 e^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$ 。实验测得的暗电流噪声与理论拟合曲线的相关系数为 0.99976, 读出噪声与线性拟合直线的相关系数为 0.99574, 证明了暗电流噪声与读出噪声测试的准确性。在温度为 -30°C 、曝光时间为 10 s 的条件下测试空气的自发拉曼散射信号, 能够从拉曼光谱图中清晰地分辨出空气中 O_2 、 N_2 和 H_2O 的自发拉曼散射峰。该热电制冷 CCD 探测器具有制冷温度低、暗电流噪声和读出噪声小的特点, 能够作为微弱自发拉曼光谱的探测器器件投入应用。

参 考 文 献

- [1] Xu C G, Jia Y T, Yan X G, *et al.* Semiconductor refrigeration technology and its application[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012, 3: 209-211.
徐昌贵, 贾艳婷, 闫献国, 等. 半导体制冷技术及其应用[J]. 机械工程与自动化, 2012, 3: 209-211.
- [2] Agnelli G, Nanni D, Cola S, *et al.* Thermoelectric-cooled $2k \times 2k$ CCD imaging camera for wide-field telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3355: 316764.
- [3] Meidinger N, Andritschke R, Assmann W, *et al.* CCD detector development for the eROSITA space telescope[C]. IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference, 2010: 12060470.
- [4] Ingleya R, Hutchinsona I B, Edwardsa H G M, *et al.* ExoMars Raman laser spectrometer breadboard: Detector design and performance[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8152: 815215.
- [5] Keel W C, Oswald T, Mack P, *et al.* The remote observatories of the southeastern association for research in astronomy (SARA) [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 129(971):

- 015002.
- [6] He Y Q, Du Y F, Gao W, *et al.* The cooling control system for focal plane assembly of astronomical satellite camera based on TEC [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10256: 102562H.
- [7] Williamson A P, Kiefer J. Towards low-cost Raman spectroscopy by using a conventional CCD camera [C]. *3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications*, 2016, JT3A: JT3A.10.
- [8] Zhang D H, Yao D Z, Liu W, *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.
- [9] Jin W Q, Zhang J S, Liu G R, *et al.* Investigation on a high-performance cooling CCD imaging module based on CCD device of industrial level [J]. *Journal of Applied Optics*, 1900, 29(1): 1-4.
金伟其, 张加深, 刘广荣, 等. 一种基于工业级 CCD 器件的高性能制冷 CCD 成像组件 [J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 1-4.
- [10] Zhang Q, Huang S H, Zhao X, *et al.* The design and implementation of CCD refrigeration system of imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3): 165-171.
张泉, 黄书华, 赵欣, 等. 机载成像光谱仪 CCD 制冷系统设计与实现 [J]. *光子学报*, 2017, 46(3): 165-171.
- [11] Zhang N, Wen Z L, G J, *et al.* Design of a scientific grade CCD camera with high sensitivity and refrigeration [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(4): 580-583.
张娜, 温中流, 龚婧, 等. 一种高灵敏度制冷型科学级 CCD 相机的设计 [J]. *半导体光电*, 2016, 37(4): 580-583.
- [12] Xu W H, Wu H D. Design of ultra-high resolution CCD imaging systems [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1603-1610.
许文海, 吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1603-1610.
- [13] Zheng L L, Jin G, Qu H S, *et al.* Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2016, 24(8): 2027-2036.
郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 高信噪比星载 CCD 成像电路系统 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 2027-2036.
- [14] Chang Z, Wang Y, Si F Q, *et al.* Design and implementation of ultraviolet imaging system based on scientific grade CCD [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0804002.
常振, 王煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计与实现 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0804002.
- [15] Zhao J, Zuo D L, Wang X B. Study on thermoelectrically cooled CCD in Raman spectrum detection system for gas analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070401.
赵俊, 左都罗, 王新兵. 气体拉曼光谱检测系统中热电制冷 CCD 研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070401.
- [16] Hamamatus Photonics K K. Data sheet of CCD image sensors: S11071/S10420-1 series [EB/OL]. (2017-11-13) [2018-01-05]. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S10420-1106-01/index.html>.
- [17] Hamamatsu Photonics K K. Driver circuit for CCD image sensor (S10420/S11071/S11510 series) [EB/OL]. (2017-02-14) [2018-01-05]. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/C11287/index.html>.
- [18] Li Z, Yu A L, Zuo D L, *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, 36(6): 0630004.
- [19] Zuo D L, Yu A L, Li Z, *et al.* Application of imaging spectrometer in gas analysis by Raman scattering [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 96110: 96110N.
- [20] Li J, Zhao J K, Chang M, *et al.* Radiometric calibration of photographic camera with a composite plane array CCD in laboratory [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(1): 73-83.
李晶, 赵建科, 昌明, 等. 复合面阵 CCD 摄影相机的实验室辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 73-83.
- [21] Cheng S B, Zhang H G, Liu H, *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.

- [22] Widenhorn R, Mundermann L, Rest A, *et al.* Meyer-Neldel rule for dark current in charge-coupled devices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(12): 8179-8182.
- [23] Xia G, Huang C, Wu S, *et al.* Method of measuring gain and readout noise of miniature spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112001.
夏果, 黄禅, 吴骅, 等. 微型光谱仪增益及读出噪声的测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112001.
- [24] Yu A, Zuo D, Li B, *et al.* Parabolic cell for low-background Raman analysis of gas samples [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3650.
- [25] Princeton Instruments. Data sheet of Pixis: 400 [EB/OL]. (2017-06-23) [2018-01-05]. <https://www.princetoninstruments.com/products/PIXIS-CCD>.
- [26] Albraheem L, Al-Khalifa H S. Raman spectroscopy for chemical analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.