

# 利用消杂散光的偏振光技术提高光学 读出红外成像检测灵敏度

张志刚, 毛亮, 程腾\*, 张青川\*

(中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘要:**在基于刀口滤波技术的光学读出的非制冷红外成像技术中,光学元件的反射会在 CCD 靶面引入杂光光斑,使得检测到的光强信号中 FPA 的像所占比例降低,因此降低了光学检测灵敏度.采用偏振光学读出系统,即在光路中添加偏振片、四分之一波片,利用对透射光和反射光的偏振方向有选择的偏振分光棱镜代替原有分光棱镜,用偏振光原理消除光路中光学元件的反射杂散光,使 FPA 像在 CCD 靶面接收到的光强中所占比例大幅度增加,进而提高光学检测灵敏度.偏振光路检测实验结果显示,检测灵敏度比非偏光实验提高了约 47%,与理论分析值一致.

**关键词:**光学读出;非制冷红外成像;偏振光;四分之一波片

中图分类号:TN216 文献标识码:A

## A technology for eliminating stray light in optical readout of FPA

ZHANG Zhi-Gang, MAO Liang, CHENG Teng\*, ZHANG Qing-Chuan\*

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In the uncooled optical readout infrared imaging technology based on knife edge filter, the reflection of the optical elements bring in stray light spots in the CCD target surface. It makes the proportion of FPA image in the detected light intensity signal reduced, thus the sensitivity of optical detection is reduced. A polarized optical readout system was proposed. Polarizers and a quarter wave plate are added to the system. The polarizing beam splitter is used to replace the original beam splitter. The reflected stray light of the optical components in the optical path is thus eliminated. The proportion of the FPA image received in the CCD target surface substantially increased, so the optical detection sensitivity is enhanced. The polarized optical readout infrared imaging experiment result showed that the detection sensitivity increased by about 47% than the non-polarized system, which is close to the theoretical value.

**Key words:** optical readout; uncooled infrared imaging; polarized light; quarter wave plate

**PACS:** 07.05. Pj, 07.10. Cm, 07.57. -c, 07.60. Fs

## 引言

红外成像技术是利用热物体自身辐射的红外光进行热成像.已有的电学读出非制冷红外成像技术已经得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>.但受到高信噪比微读出集成

电路技术门槛的限制,目前只有美国和法国能够生产其芯片,除价格昂贵外,其应用也受到订货合同仅限于民用领域的限制.

2003 年以来,本课题组提出了一种不需要制作微读出集成电路的基于无基底双材料微悬臂梁平面

收稿日期:2012-04-24,修回日期:2012-10-19

Received date: 2012-04-24, revised date: 2012-10-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB302105);国家自然科学基金(11072233,11127201,11102201);中央高校基本科研业务费专项资金(WK2090050017)

**Foundation items:** Supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (2011CB302105), National Natural Science Foundation of China (11072233,11127201,11102201), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (WK2090050017)

作者简介(Biography):张志刚(1987-),男,山东日照人,博士研究生,主要从事红外焦平面阵列和非制冷红外成像仿生技术的研究.

E-mail: zgzang@mail.ustc.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author):E-mail: chteng@ustc.edu.cn, zhangqc@ustc.edu.cn

阵列结构的非制冷红外成像技术,并提出在 FPA 谱平面进行刀口滤波的光学读出方法,光路图见图 1,获得了室温物体的红外热像<sup>[4-7]</sup>. FPA 采用氮化硅与金两种材料制成,每个微梁单元都由两边的变形梁和中间的反光板构成.目标物体辐射的红外光经红外透镜到达 FPA,由于两种材料热膨胀系数不同,双材料变形梁发生弯曲,引起反光板的偏转. LED 光源发出的光透过半透半反镜,经过傅里叶透镜后转换为平行光,被 FPA 的反光板反射后,再经傅里叶透镜会聚、半透半反镜反射和刀口滤波后被 CCD 所接收,其结果是光学读出部分将微梁单元的热致转角转化为 CCD 上对应像素单元的灰度变化.

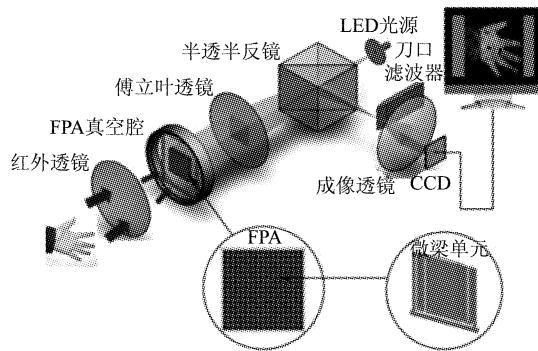


图 1 红外成像系统原理图  
Fig. 1 Schematic of the infrared imaging system

由于采用了光学读出方法,傅里叶透镜、真空腔的玻璃观察窗、半透半反镜等光学元件会在 CCD 靶面引入杂光光斑. 实验过程中,FPA 像光强越大,系统的热响应灵敏度越高,但由于 CCD 成像芯片的动态范围有限,所接收到的光强不能超过其满量程,因此实验时都是以接近 CCD 满量程作为调节光源光强的标准. 杂光的存在使得 FPA 像所占的光强比例降低,不能最大限度地提高热响应灵敏度,因此,降低杂光所占比例,提高 FPA 像的光强,对提高系统的热响应灵敏度具有重要意义. 本文分析了各个杂光光斑的产生原因及 FPA 像所占比例,并提出了偏振光学读出系统,使得系统的热响应灵敏度得以大幅度提高.

## 1 原始光学读出系统

### 1.1 杂光光斑产生原因

实验光路图如图 2 所示,由 LED 光源发出的光依次通过小孔、半透半反镜、傅里叶透镜、真空腔玻

璃观察窗照射到 FPA 上,经 FPA 上的金面反光板反射的光,通过真空腔玻璃观察窗、傅里叶透镜、半透半反镜,最终经过刀口滤波后被 CCD 接收. 但实际 CCD 所接收的光中,除了所需要的 FPA 像外,还存在由半透半反镜、傅里叶透镜、真空腔玻璃观察窗所引起的杂光光斑.

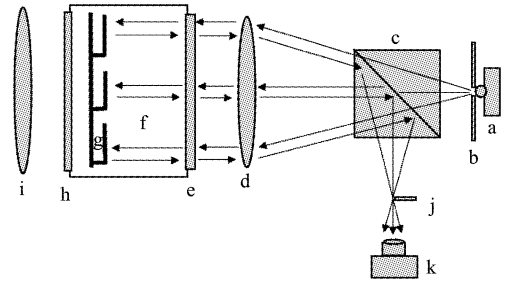


图 2 原始光路图(a. LED光源, b. 小孔, c. 半透半反镜, d. 傅立叶透镜, e. 玻璃观察窗, f. 真空腔, g. FPA, h. 锗玻璃, i. 红外透镜, j. 滤波刀口, k. CCD)  
Fig. 2 Experimental setup (a. LED light source, b. pin-hole, c. beam splitter, d. Fourier transform lens, e. glass window, f. vacuum chamber, g. FPA, h. germanium glass, i. infrared lens, j. Filter blade, k. CCD)

为了验证杂光产生的原因以及所占比例,进行如下实验,实验在大气压条件下进行,并未进行刀口滤波,所用 CCD 为 12 bit 灰度 CCD,因此记录的灰度值范围为 0 到 4095. 按照图 2 光路,调节 LED 光源光强,使得 CCD 所采集到的图像接近饱和,此时用 CCD 记录采集到的图像,见图 3(a);然后用黑色挡板依次对 FPA 和玻璃观察窗之间、玻璃观察窗与傅里叶透镜之间、傅里叶透镜与半透半反镜之间进行遮光、关闭光源,分别用 CCD 记录采集到的图像,得到的图像分别为图 3(b)~3(e);在 CCD 镜头前遮光,得到 CCD 本底直流分量图像,见图 3(f).

图 3(b)与图 3(a)相比,FPA 反射谱的像不能到达 CCD 靶面,用图 3(a)的灰度值减去图 3(b)的灰度值,即可得到 FPA 在 CCD 靶面的像,为图 4(a);图 3(c)与图 3(b)相比,观察窗所引起的杂光光斑不能到达 CCD 靶面,用图 3(b)的灰度值减去图 3(c)的灰度值,即可得到观察窗所引起的杂光光斑图像,为图 4(b);图 3(d)与图 3(c)相比,傅里叶透镜所引起的杂光光斑不能到达 CCD 靶面,用图 3(c)的灰度值减去图 3(d)的灰度值,即可得到傅里叶透镜所引起的杂光光斑图像,为图 4(c);图 3(e)与图 3(d)相比,半透半反镜所引起

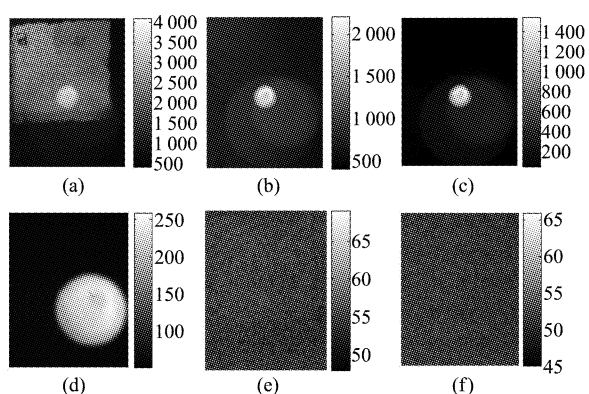


图3 (a) 未遮光时图像, (b) FPA 和观察窗之间遮光的图像, (c) 观察窗和透镜之间遮光的图像, (d) 透镜和半透半反镜之间遮光的图像, (e) 光源关闭时的图像, (f) 在 CCD 镜头前遮光时的图像

Fig. 3 (a) image with no shading, (b) image with shading between FPA and glass window, (c) image with shading between glass window and Fourier transform lens, (d) image with shading between Fourier transform lens and beam splitter, (e) image with LED light source off, and (f) image with shading in front of the CCD

的杂光光斑不能到达 CCD 靶面,用图 3(d) 的灰度值减去图 3(e) 的灰度值,即可得到半透半反镜所引起的杂光光斑图像,为图 4(d);图 3(f) 与图 3(e) 相比,外界杂光不能到达 CCD 靶面,用图 3(e) 的灰度值减去图 3(f) 的灰度值,即可得到外界杂光所引起的杂光光斑图像,为图 4(e),由于图 3(e) 与图 3(f) 的灰度值都具有随机性,因此两者灰度差所得到的外界杂光图像(4(e)) 的灰度值有负值,但其整体平均值为正值;图 4(f) 即图 3(f),为 CCD 本底直流分量图像。

因此,未遮光时 CCD 所接收到的图像由 FPA 的像、傅里叶透镜、玻璃观察窗、半透半反镜产生的杂光、外界杂光、CCD 本底直流分量组成,其相对应的区域见图 5。

### 1.2 FPA 像的灰度值及所占比例

红外成像技术主要使用噪声等效温度差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 作为评估其性能好坏的指标. NETD 可定义为:当采用红外成像系统探测红外目标时,目标温度变化为  $\Delta T_s$  时,如果系统的输出信号  $\Delta I$  刚好等于系统噪声值  $I_{\text{noise}}$ ,则系统的噪声等效温度差为  $\Delta T_s$ ,即

$$\text{NETD} = \frac{I_{\text{noise}}}{\Delta I / \Delta T_s}, \quad (1)$$

式中,  $I_{\text{noise}}$  为系统工作状态下的实测值,包括 CCD 本身噪声和光源噪声的共同作用,其中 CCD 本身的噪

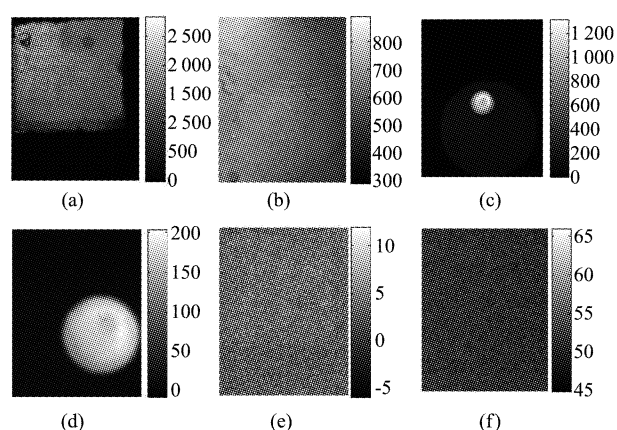


图4 (a) FPA 的像, (b) 观察窗产生的杂光图像, (c) 傅立叶透镜产生的杂光图像, (d) 半透半反镜产生的杂光图像, (e) 外界杂光图像, (f) CCD 本底直流分量

Fig. 4 (a) image of FPA, (b) image of stray light caused by glass window, (c) image of stray light caused by Fourier transform lens, (d) image of stray light caused beam splitter, (e) image of outside stray light, (f) dc component of CCD background

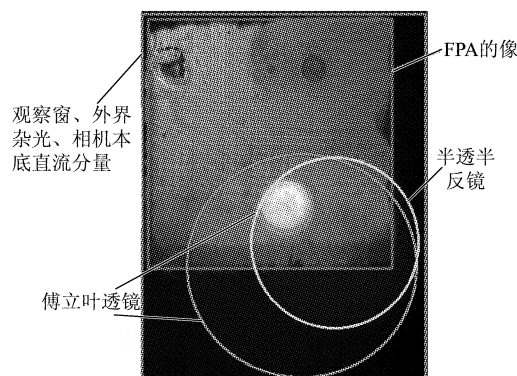


图5 CCD 接收到的图像组成  
Fig. 5 components of CCD image

声为主要部分,  $\Delta I / \Delta T_s$  为系统的热响应灵敏度,定义为系统的输出信号  $\Delta I$  与红外目标的温度差  $\Delta T_s$  的比值,进一步表示为:

$$\frac{\Delta I}{\Delta T_s} = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_s} \times \frac{\Delta \theta}{\Delta T_c} \times \frac{\Delta I}{\Delta \theta} = H S_T \Theta, \quad (2)$$

式(2)中,  $H$  为无基底 FPA 的热转换效率,定义为探测单元的温度变化  $\Delta T_c$  与红外目标的温度变化  $\Delta T_s$  的比值;  $S_T$  为无基底 FPA 的热变形效率,定义为反光板的热致偏转角  $\Delta \theta$  与探测单元的温度变化  $\Delta T_c$  的比值;  $\Theta$  为光学测量灵敏度,定义为系统的输出信号  $\Delta I$  与反光板的偏转角  $\Delta \theta$  的比值。

假定无基底 FPA 中,反光板的长度为  $L$ ,曲率半径为  $R$ ,初始转角相同,受单色平面光波垂直照射(光波振幅  $A$ ,波长  $\lambda$ ),则由傅里叶光学相关知识,

反光板在谱平面的光强分布为:

$$I(x_f) = |U(x_f)| = \left(\frac{A^2 R}{8f^2 \lambda}\right) \times \left| \operatorname{erf}\left[\left(\frac{1}{2} - \frac{i}{2}\right) \frac{fL - Rx_i}{f} \sqrt{\frac{\pi}{R\lambda}}\right] + \operatorname{erf}\left[\left(\frac{1}{2} - \frac{i}{2}\right) \frac{fL - Rx_j}{f} \sqrt{\frac{\pi}{R\lambda}}\right] \right|^2 = (A^2 R / 8f^2 \lambda) F_{\text{erf}}(x_f), \quad (3)$$

其中,  $x_f$  是谱平面上的坐标系,  $\operatorname{erf}(\ )$  是误差函数,  $f$  是傅里叶透镜的焦距,  $F_{\text{erf}}$  是对式(3)的简化表达. 根据物理定义, 系统的光学测量灵敏度  $\Theta$  可以表示为:

$$\Theta = \frac{d}{d\theta} \left( \int_{-\infty}^{x_{\text{knife}}} I(x_f) dx_f \right) = (A^2 R / 4f\lambda) F_{\text{erf}}(x_{\text{knife}}), \quad (4)$$

其中,  $dx_f = 2fd\theta$ ,  $x_{\text{knife}}$  是刀口滤波器在谱平面上的工作位置, 它定义了一个谱平面上  $[-\infty, x_{\text{knife}}]$  的通气区间. 由此可见, 光学测量灵敏度  $\Theta$  与反光板反射的光波振幅的平方成正比, 也即与反光板反射光强成正比<sup>[8]</sup>.

在实验过程中, 要使反光板反射的光强尽量大, 同时不能使得 CCD 所接收到的图像灰度过饱和. 实验中, 调节光强, 使得 CCD 接收到的光强接近饱和, 未遮光时得到的图像为图 6(a), 其平均灰度为 2282.5 gray, FPA 和玻璃观察窗之间遮光时得到的图像灰度为图 6(b), 其平均灰度为 880.7 gray, 两图灰度做差得到的图像为 6(c), 即 FPA 的像, 其平均灰度为 1401.8 gray, 占未遮光时灰度的 61.4%.

由于傅里叶透镜所引起的小光斑所占面积很小, 但亮度很高, 因此在不需整个 FPA 区域都能成像的情况下, 可通过使得小光斑过饱和来提高 FPA 像的平均灰度值. 由于过饱和区域不能成像, 因此在处理数据时将过饱和区域灰度值置为 0, 此时未遮光时得到的图像为图 6(d), 其平均灰度为 2675.3 gray, FPA 和玻璃观察窗之间遮光时得到的图像为图 6.e, 其平均灰度为 1015.4 gray, 两图灰度做差得到的图像为 6.f, 即 FPA 的像, 其平均灰度为 1659.9 gray, 占未遮光时灰度的 61.9%. 由于所采用的将小亮斑区域过饱和的方法中, 杂光灰度与 FPA 像灰度一致增加, 因此 FPA 像占整体灰度比例基本不变.

## 2 偏振光学读出系统

为了消除杂光光强, 使得 CCD 接近饱和时 FPA 像的灰度平均值尽量大, 同时 FPA 占总体灰度平均

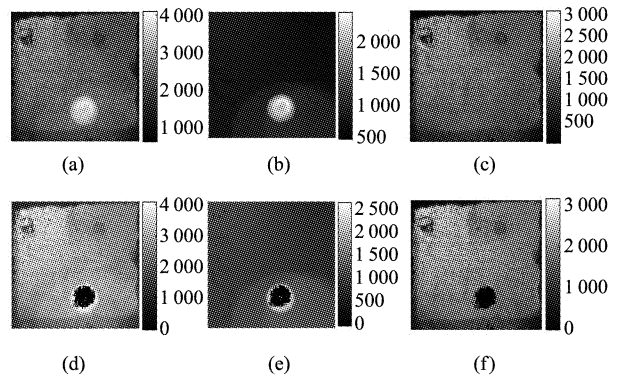


图 6 (a)~(c) 为未过饱和时的图像, 其中 (a) 为未遮光图像, (b) 为 FPA 和玻璃观察窗之间遮光的图像, (c) 为 (a) 与 (b) 的灰度差图像; (d)~(f) 为过饱和时的图像, 其中 (d) 为未遮光图像, (e) 为 FPA 和玻璃观察窗之间遮光的图像, (f) 为 (d) 与 (e) 的灰度差图像

Fig. 6 Image (a)~(c) were recorded when the CCD was not supersaturated, (a) image with no shading, (b) image with shading between FPA and glass window, (c) image of subtraction of (a) and (b); image (d)~(f) were recorded when the CCD was supersaturated, (d) image with no shading, (e) image with shading between FPA and glass window, (f) image of subtraction of (d) and (e)

值的比例尽量大, 本文提出了偏振光学读出系统, 在 FPA 与玻璃观察窗之间添加四分之一波片, 采用偏振分光棱镜代替半透半反镜, 在光源处添加起偏器对光源发出的光进行起偏, 在 CCD 镜头前添加检偏镜对 CCD 接收的光线进行筛选, 如图 7 所示. 光源发出的光经过起偏器后变为振动方向平行于纸面的线偏振光, 该方向的偏振光可透过偏振分光棱镜.

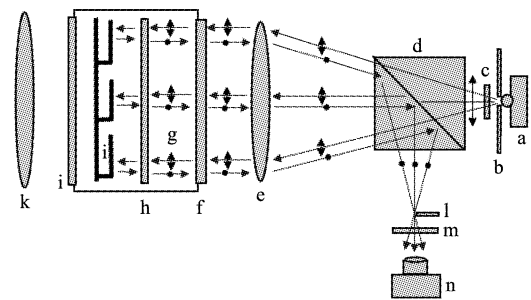


图 7 偏振光路 (a. 光源, b. 小孔, c. m. 偏振片, d. 偏振分光棱镜, e. 傅里叶透镜, f. 玻璃观察窗, g. 真空腔, h. 四分之一波片, i. FPA, j. 锗玻璃, k. 红外透镜, l. 滤波刀口, n. CCD)  
Fig. 7 polarized light path (a. light source, b. pinhole, c. polaroid, d. polarizing beam splitter, e. Fourier lens, f. glass window, g. vacuum chamber, h. quarter wave plate, i. FPA, j. germanium glass, k. infrared lens, l. filter blade, n. CCD)

旋转四分之一波片使得入射光线振动方向与四分之一波片快慢轴夹角为  $45^\circ$ , 如图 8(a) 所示,  $x$  轴为快轴,  $y$  轴为慢轴. 令初始时光振动表示如下:

$$E = E_o \cos(\omega t + \delta_0) \quad , \quad (5)$$

其中  $E_o$  为振幅,  $\omega$  为角频率,  $t$  为时间,  $\delta_0$  为初相位, 令其为零, 其在快慢轴的分量分别为:

$$E_x = E_{ox} \cos(\omega t) \quad , \quad (6)$$

$$E_y = E_{oy} \cos(\omega t) \quad . \quad (7)$$

$E_{ox} = E_{oy} = \sqrt{2}/2 E_o$ , 分别为振动在快慢轴方向的振幅分量. 当光线正入射四分之一波片时, 由于晶体双折射效应, 快慢轴振动产生相位差, 出射光快慢轴振动分量分别为

$$E'_x = E_{ox} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d) \quad , \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E'_y &= E_{oy} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_o d) \\ &= E_{oy} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d - \delta_{o-e}) \quad , \quad (9) \end{aligned}$$

其中  $n_e$ 、 $n_o$  分别表示四分之一波片对快光和慢光的折射率,  $\lambda$  为波长,  $d$  为四分之一波片厚度,

$$\delta_{o-e} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d \quad , \quad (10)$$

为慢光相对于快光相位延迟量, 对于四分之一波片, 厚度  $d$  满足  $(n_o - n_e) d = \lambda/4$ , 因此  $\delta_{o-e} = \pi/2$ ,

$$E'_y = E_{oy} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d) \quad . \quad (11)$$

由式(8)和式(11)可得, 此时合成的振动为圆偏振光, 见图 8(b). 圆偏振光被 FPA 反光板反射以后, 再次正入射四分之一波片, 出射光快慢轴的振动分量分别为

$$E''_x = E_{ox} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d \times 2) \quad , \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E''_y &= E_{oy} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_o d \times 2) \\ &= E_{oy} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d \times 2 - 2\delta_{o-e}) \\ &= E_{oy} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d \times 2 - \pi) \\ &= -E_{oy} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_e d \times 2) = -E''_x \quad . \quad (13) \end{aligned}$$

此时, 合成振动为线偏振光, 如图 8(c) 所示, 振动方向与图 8(a) 相垂直. 此时光线振动方向垂直于纸面, 满足偏振分光棱镜的反射条件. 由于玻璃观察窗、傅里叶透镜、偏振分光棱镜所引起的杂光未能两次经过四分之一波片, 其光线振动方向仍然平行于纸面, 大部分杂光不能到达 CCD, 因此杂光被大大削弱. CCD 镜头前的偏振片可以进一步对光线进行筛选并消除外界杂光.

实验时, 调节光源强度, 使得 CCD 所接收到的

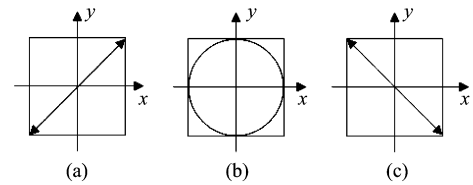


图 8 光线经过四分之一波片时偏振态

Fig. 8 Polarization when the light past the quarter wave plate

光强接近饱和, 未遮光时 CCD 所接收到的图像为图 9(a), 其平均灰度为 2166.8 gray, 将 FPA 与四分之一波片之间遮光时 CCD 接收到的图像为图 9(b), 其平均灰度为 118.8 gray, 两图灰度做差所得的图像为 9(c), 其平均灰度为 2048.0 gray, 占未遮光时的 94.5%.

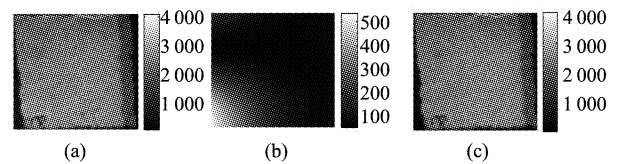


图 9 (a)未遮光图像,(b)FPA 和四分之一波片之间遮光的图像,(c)为(a)与(b)的灰度差值图像

Fig. 9 Images (a) ~ (c) were recorded when the CCD was not supersaturated, (a) image with no shading, (b) image with shading between FPA and the quarter wave plate, (c) image of subtraction of (a) and (b)

由表 1, 三种方式对比可得, 采用偏振光路, 大部分杂光都被消除了, FPA 像所占比例达到 94.5%, 同时 FPA 像的平均灰度增加, 为原始光路(未过饱和时)的 1.46 倍. 由于系统热响应灵敏度与 FPA 像光强成正比, 因此可以预测系统红外成像灵敏度将提高约 46% 左右.

表 1 三种方式比较

Table 1 Comparison of three modes

	未遮光/gray	FPA 像/gray	FPA 像所占比例/%
原始光路(未过饱和)	2282.5	1401.8	61.4
原始光路(小亮斑处过饱和)	2675.3	1659.9	61.9
偏振光路	2166.8	2048.0	94.5

### 3 红外成像检测灵敏度比较

两种光路红外成像实验都在真空腔抽真空条件下进行, 逐渐增大光源强度, 使得 CCD 接收到的光强接近饱和, 采集 12 bit 人手部灰度图像, 如图 10、图 11 所示, 图中未能正常成像区域的黑斑由 FPA

芯片本身缺陷所导致. 图 10 左侧为未加偏振时原始光学读出系统采集到的手部图像, 右侧为所选方框区域的灰度统计直方图, 平均值为 444.5 gray. 实验时室温为 20 °C, 手表面温度为 32 °C, 由此可得原始光学读出系统热响应灵敏度为:

$$\frac{\Delta I}{\Delta T_s} = \frac{444.5}{32 - 20} = 37.04 \text{ gray/K}$$

图 11 为偏振光学读出系统采集到的手部图像, 右侧为所选方框区域的灰度统计直方图, 平均值为 708.3 gray, 实验时室温为 19 °C, 手表面温度为 32 °C. 偏振光学读出系统热响应灵敏度为:

$$\frac{\Delta I}{\Delta T_s} = \frac{708.3}{32 - 19} = 54.48 \text{ gray/K}$$

由此可得偏振系统与原始系统热响应灵敏度比值为  $54.48/37.04 = 1.47$ , 因此, 偏振系统比原始系统热响应灵敏度提高了约 47%.

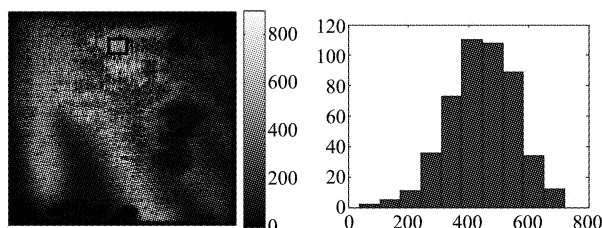


图 10 原始光路手部图像与灰度直方图  
Fig. 10 Hand image of original light path and grayscale histogram

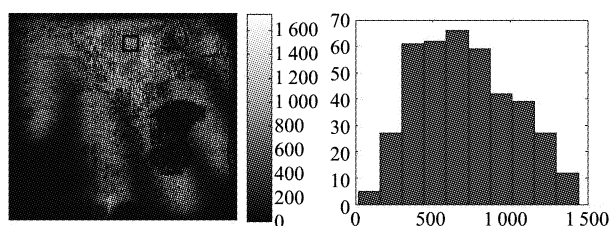


图 11 偏振光路手部图像与灰度直方图  
Fig. 11 Hand image of polarized light path and grayscale histogram

## 4 结论

提出了利用偏振光学读出系统削弱杂散光, 提高光学读出红外成像系统检测灵敏度的方法. 理论分析表明, CCD 接收到的 FPA 像灰度越大, 光学检测灵敏度越高. 通过使得傅里叶透镜所产生的小亮光斑区域过饱和的方法, 可以提高 FPA 像灰度值, 但由于杂光同时增强, FPA 像灰度占总体灰度比例基本不变, 且在过饱和区域不能成像. 采用偏振光学读出系统, 杂光被大大削弱了, FPA 像灰度及所占比例得到很大提高, 在不产生额外无效成像区域的条件下, 系统的红外成像检测灵敏度得到显著提高.

## REFERENCES

- [1] Rogalski A. Infrared detectors; Status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**:59 - 210.
- [2] Evans S B, Hayden T. High MTF hybrid ferroelectric IR FPA[J]. *SPIE*, 1998, **3379**: 36 - 46.
- [3] HU Xu, TAI Yun-Jian, YUAN Jun, *et al.* Latest development of hybrid uncooled pyroelectric IRFPA[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡旭, 太云见, 袁俊, 等. 非制冷铁电混合式红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*), 2006, **25** (1):22 - 25.
- [4] Duan Z H, Zhang Q C, Wu X P, *et al.* Uncooled optically readable bimaterial micro-cantilever infrared imaging device [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20**(12):2130 - 2132.
- [5] Miao Z Y, Zhang Q C, Guo Z Y, *et al.* Optical readout method for microcantilever array sensing and its sensitivity analysis [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(6):594 - 596.
- [6] Cheng T, Zhang Q C, Wu X P, *et al.* Uncooled infrared imaging using a substrate-free focal-plane array[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, **29**(11): 1218 - 1221.
- [7] DONG Feng-Liang, ZHANG Qing-Chuan, WU Xiao-Ping, *et al.* Bimaterial micro-cantilever uncooled infrared imaging system-design and fabrication of micro-cantilever array[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (董凤良, 张青川, 伍小平, 等. 双材料微梁阵列非制冷红外成像系统-微梁阵列的设计与制作. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):409 - 413.
- [8] CHENG Teng, ZHANG Qing-Chuan, WU Xiao-Ping, *et al.* Uncooled infrared imaging system based on MEMS and optical readout [J]. *Journal of Experimental Mechanics* (程腾, 张青川, 伍小平, 等. 基于 MEMS 和光学读出的非制冷红外成像技术. *实验力学*), 2011, **26**(5): 582 - 591.