

反射式可控红外部分偏振辐射源设计与测试

贺思¹, 赵万利², 王霞^{1,2*}, 梁建安¹, 金伟其¹

(1. 北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 为了对偏振热成像系统进行定标, 设计了反射式红外可控部分偏振辐射源, 从理论计算和实验测量两方面进行对比论证。首先, 推导了铝反射镜的穆勒矩阵, 提出了辐射源出射辐射偏振态的理论计算方法, 结果表明, 能够产生线偏振度小于 0.80、圆偏振度小于 0.60 的长波红外部分偏振辐射。然后, 基于铝反射镜搭建了部分偏振辐射源, 并用线偏振热成像系统对出射辐射的偏振态进行测量, 结果表明该辐射源可以产生线偏振度在 0.25~0.85 之间的长波红外部分偏振辐射, 当铝反射镜入射角低于 80° 时, 线偏振度测量值的相对标准偏差低于 6%。

关键词: 偏振; 辐射源; 反射; 穆勒矩阵

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

Reflection-mode controllable partially polarized infrared light source: design and measurement

HE Si¹, ZHAO Wan-Li², WANG Xia^{1,2*}, LIANG Jian-An¹, JIN Wei-Qi¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: A reflection-mode controllable partially polarized infrared light source was designed to calibrate infrared imaging polarimeters. Theoretical calculation and measurement were carried out to verify the results. First, a theoretical calculation method was developed to calculate the polarization states of the output light based on the Mueller matrix of the aluminum coated flat mirror. Calculation results show that the output light is partially polarized with the degree of linear polarization (DoLP) smaller than 0.80 and the degree of circular polarization (DoCP) smaller than 0.60. Then a long wavelength infrared (LWIR) imaging polarimeter was employed to measure the real polarization states of the output light. Experimental results show that the output light is partially polarized with the DoLP within a range of 0.25 and 0.85 in LWIR. The relative standard deviation of DoLP is less than 6% when the incident angle for the flat mirror is less than 80°.

Key words: polarization, infrared light source, reflection, Mueller matrix

PACS: 42.25.Ja, 42.72.Ai, 42.25.Gy

引言

偏振热成像系统相较于普通热成像系统在复杂自然背景条件下的人造目标探测与识别时具有较为

明显的优势^[1], 已成为当前国内外研究的重要方向之一。然而, 正如可见光偏振辐射源对可见光偏振成像系统性能定标和检测的重要性, 黑体辐射源对热成像信号处理和系统性能评价的重要性一样, 在偏

收稿日期: 2016-08-15, 修回日期: 2016-10-24

Received date: 2016-08-15, revised date: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231014)和面上项目(61575023)、重点实验室基金项目(E12102841-20150120)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61231014 and 61575023) and the Foundation of Key Laboratory (E12102841-20150120)

作者简介 (Biography): 贺思 (1993-), 男, 江西吉安人, 博士研究生。主要研究领域为红外偏振成像。E-mail: hesi2010bit@foxmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: angelniniu@bit.edu.cn

振热成像信息处理过程中,往往由于成像系统本身具有偏振或非线性效应,会产生虚假偏振信息,影响偏振探测信息反演的精度,因此,需要对偏振热成像系统进行偏振辐射定标^[24],而实现偏振热成像系统辐射定标则需要可控的红外偏振辐射源。

目前,偏振成像定标辐射源主要是利用线偏振片、 $\lambda/4$ 波片与非偏振辐射源,产生不同的线偏振态或椭圆偏振态等完全偏振辐射^[4-5]。在可见光或近红外偏振成像辐射定标中,通常采用积分球辐射源 + 线偏振片 + $\lambda/4$ 波片即可获得常规的高偏振度的偏振辐射源^[4-5],但若需要偏振度可调的偏振辐射源,则需要增加新的机构。此外,在红外偏振成像特别是长波红外偏振热成像系统的定标过程中,由于偏振片自身辐射及周边环境辐射的影响,往往难以获得高偏振度或可调偏振度的红外偏振辐射源。因此,近年来国际上对偏振辐射源技术的研究受到普遍关注^[6-9]。F. De Zela^[7] 和 Andrey S. Ostrovsky^[8] 分别基于理论研究和实验测量,证明了准单色的完全偏振光经过 Mach-Zehnder 干涉结构后能够成为偏振态可控的部分偏振光;D. Barberena 等^[9] 基于 He-Ne 激光器、波片、偏振片、分光镜搭建了偏振态可控而且结构简易的部分偏振光源。然而由于基于激光器构建,上述辐射源只能在可见光或近红外波段产生准单色的部分偏振光。在红外部分偏振辐射源方面, Fang Han 等^[10] 利用二维正交浅栅格结构的钨材料,提出了一种能够产生相互正交的双波长中波红外偏振辐射源,但是辐射源的出射辐射限制在两个特定的波长,且偏振态不便于调整控制。

鉴于目前尚未报道有可控长波红外部分偏振辐射源的相关研究,本文提出一种反射式红外可控偏振辐射源的结构,用于在长波红外波段产生偏振态可控的部分偏振辐射。在简述金属表面辐射反射理论的基础之上,进行基于铝反射镜的红外部分偏振辐射源设计,并设计实验验证其获得线偏振度可控的红外部分偏振辐射。

1 一种反射式红外可控部分偏振辐射源及其测量系统

图 1 是设计的反射式红外可控部分偏振辐射源及其测量系统示意图。偏振辐射源的工作过程为:黑体辐射(温度在 273 ~ 373 K 可调)经过平行光管准直后,由红外金属线栅偏振片起偏并入射到铝反射镜上,出射辐射为宽波段范围的部分偏振辐射;反射镜固定在电控旋转平台上,平台旋转时反射镜的入

射角随之变化,从而产生偏振态不同的出射辐射,构成反射式红外部分偏振辐射源;线偏振热成像系统用于测量出射辐射的偏振态,响应波段为 7.5 ~ 13.5 μm ;测量时,随着反射镜的旋转,线偏振热成像系统的位置和探测方向进行相应的旋转和调整;计算机用于反射镜旋转平台的控制、数据的采集与处理。

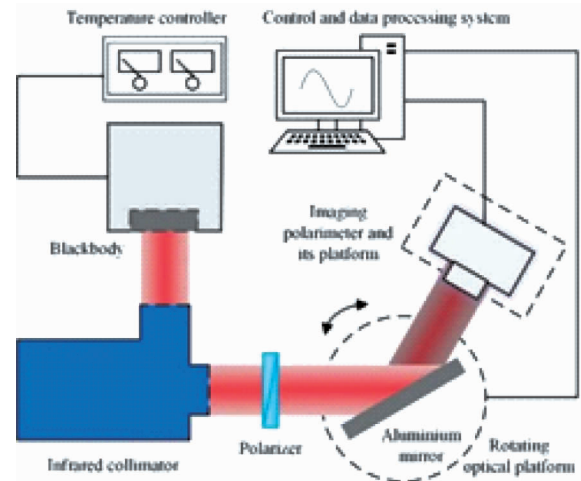


图 1 反射式红外部分偏振辐射源及其测量系统
Fig. 1 Reflection-mode partially polarized infrared source and its measurement system

2 部分偏振辐射源的理论分析

2.1 辐射在金属表面反射的理论

根据光学菲涅尔公式可知,当光倾斜入射至光滑金属表面时,金属对平行(p 分量)以及垂直(s 分量)于入射面的辐射分量存在不同的反射率,且在反射过程中会产生相位差^[11]。

光的强度信息和偏振状态常用斯托克斯(Stokes)矢量 $\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T$ 表示,其中 I 表示总光强; Q 表示水平和垂直偏振方向上光强的差异; U 表示 45° 和 135° 两个对角线方向上光强的差异; V 表示左旋和右旋圆偏振光的强度差异^[11-12]。偏振光学元件对入射光的作用可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ Q_2 \\ U_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ Q_1 \\ U_1 \\ V_1 \end{bmatrix},$$

$$\text{简记为 } \mathbf{S}_2 = \mathbf{M}\mathbf{S}_1 \quad (1)$$

式中, \mathbf{S}_1 和 \mathbf{S}_2 分别是入射和出射光的 Stokes 矢量; \mathbf{M} 为光学元件的穆勒矩阵,表示其取向与特性。

为了证明图 1 的偏振辐射源结构能够产生偏振态可变的偏振辐射,我们根据式(1),首先推导铝反射镜的穆勒矩阵,然后在入射辐射偏振态已知的前提下,对铝镜反射辐射的偏振态进行分析.根据琼斯矩阵与穆勒矩阵的关系^[11-12],可推导出理想金属反射镜表面的反射穆勒矩阵为:

$$M_{\text{metal}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_p r_p^* + r_s r_s^* & r_p r_p^* - r_s r_s^* & 0 & 0 \\ r_p r_p^* - r_s r_s^* & r_p r_p^* + r_s r_s^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_p r_s^* + r_s r_p^* & i(r_p r_s^* - r_s r_p^*) \\ 0 & 0 & i(r_s r_p^* - r_p r_s^*) & r_s r_p^* + r_p r_s^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, r_p 、 r_s 分别为金属对入射光电场的 p 、 s 分量的反射系数^[11], 分别定义为:

$$r_p = \frac{(n^2 + \chi^2)^2 \cos^2 \theta_i - n_i^2 (N^2 + \chi'^2) + 2in_i \cos \theta_i [(n^2 - \chi^2)\chi' - 2Nn\chi]}{[(n^2 + \chi^2) \cos \theta_i + n_i N]^2 + (2n\chi \cos \theta_i + n\chi')^2}, \quad (3)$$

$$r_s = \frac{(n_i^2 \cos^2 \theta_i - N^2) - \chi'^2 + 2i\chi' n_i \cos \theta_i}{(n_i \cos \theta_i + N)^2 + \chi'^2}, \quad (4)$$

其中, N 、 χ' 的表达式分别为^[11]

$$N^2 = \frac{1}{2}(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i + \sqrt{(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \chi^2}), \quad (5)$$

$$\chi'^2 = -\frac{1}{2}(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i - \sqrt{(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \chi^2}), \quad (6)$$

式中, $n - i\chi$ 为金属的复折射率; i 为虚数单位; n_i 为入射介质的折射率; θ_i 为入射角.

2.2 出射辐射偏振态的计算方法

偏振辐射源系统的出射辐射主要由铝镜的反射辐射及其自发辐射两部分组成. 铝镜的表面对于中长波红外足够光滑, 可以认为是理想的. 对某一波段内系统出射辐射的偏振态进行理论计算, 可得出射辐射的 Stokes 矢量 S_{rOUT} 为

$$S_{\text{rOUT}} = \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} [M_{\text{Al}}(\lambda, \theta_i, n_i) S_{\text{rIN}}(\theta_p, \lambda, T_B) + S_{\text{rEmit}}(\lambda, \theta_i, T_{\text{Al}}, T_B)] d\lambda, \quad (7)$$

式中, λ_H 、 λ_L 分别为积分波长的上限和下限; $M_{\text{Al}}(\lambda, \theta_i, n_i) S_{\text{rIN}}(\theta_p, \lambda, T_B)$ 表示反射辐射部分的 Stokes 矢量; $M_{\text{Al}}(\lambda, \theta_i, n_i)$ 为铝反射镜的穆勒矩阵; $S_{\text{rIN}}(\theta_p, \lambda, T_B)$ 为反射镜入射辐射的 Stokes 矢量; $S_{\text{rEmit}}(\lambda, \theta_i, T_{\text{Al}}, T_B)$ 表示铝镜自发辐射部分的 Stokes 矢量.

对于式(7)中表示反射辐射的部分, $M_{\text{Al}}(\lambda, \theta_i,$

$n_i)$ 与铝的复折射率、入射角 θ_i 、入射介质折射率 n_i 有关, 计算时, 首先根据 Rakić A D 等多种常见金属提出的表面光学常数计算模型^[13], 由入射波长 λ 计算出复折射率, 然后将复折射率、 θ_i 、 n_i 代入式(2~6), 最后得到 $M_{\text{Al}}(\lambda, \theta_i, n_i)$. 而 $S_{\text{rIN}}(\theta_p, \lambda, T_B)$ 与辐射源系统中偏振片的透光轴方向 θ_p 、波长 λ 、黑体温度 T_B 有关

$$S_{\text{rIN}}(\theta_p, \lambda, T_B) = \frac{L(\lambda, T_B)}{L(\lambda_m, T_B)} S_{\text{pOUT}}(\theta_p, T_B) = \pi \frac{L(\lambda, T_B)}{BT_B^6} S_{\text{pOUT}}(\theta_p, T_B), \quad (8)$$

式中, $S_{\text{pOUT}}(\theta_p, T_B)$ 为辐射源系统中, 黑体辐射由平行光管准直后, 再经过偏振片后的 Stokes 矢量; $\frac{L(\lambda, T_B)}{L(\lambda_m, T_B)}$ 即相应的比例系数; λ_m 为黑体光谱辐射的峰值波长; B 为常数; 黑体辐亮度 $L(\lambda, T_B)$ 的普朗克公式^[14] 为

$$L(\lambda, T_B) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_B) - 1}, \quad (9)$$

式中, c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐射常数.

为了将理论计算结果与实测结果相比较, 计算前, 先测出不同黑体温度 T_B 下的 $S_{\text{pOUT}}(\theta_p, T_B)$, 再进行仿真计算; 而不同辐射波长处的 $S_{\text{rIN}}(\theta_p, \lambda, T_B)$ 与相应的辐亮度成比例.

式(7)表示铝镜自发辐射部分的 $S_{\text{rEmit}}(\lambda, \theta_i, T_{\text{Al}}, T_B)$ 与波长 λ 、出射辐射方向、铝镜的温度 T_{Al} 、黑体温度 T_B 有关, 出射辐射方向由 θ_i 决定. 根据基尔霍夫定律及斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[14], 不透明物体的辐射发射率和反射率之和等于 1, 因此 $S_{\text{rEmit}}(\lambda, \theta_i, T_{\text{Al}}, T_B)$ 与黑体辐射 Stokes 矢量之间的关系为^[15]

$$S_{\text{rEmit}}(\lambda, \theta_i, T_{\text{Al}}, T_B) = S_B(1) \frac{T_{\text{Al}}^4}{T_B^4} \left[\left(1 - \frac{r_s \cdot r_s^* + r_p \cdot r_p^*}{2} \right) \cdot \frac{r_p \cdot r_p^* - r_s \cdot r_s^*}{2}, 0, 0 \right]^T, \quad (10)$$

式中, r_p 、 r_s 为铝镜的反射系数, 由式(3)和式(4)计算; $(r_s \cdot r_s^* + r_p \cdot r_p^*)/2$ 为铝镜的反射率; S_B 为黑体辐射的 Stokes 矢量, 计算中认为是非偏的, 即 $S_B(1) = 1$, 强度分量.

2.3 计算结果及其分析

计算时参数设置如表 1 所示. 图 2 为黑体温度在 333 K 和 373 K 时出射辐射的线偏振度 (DoLP)、圆偏振度 (DoCP) 与铝镜入射角的关系曲线. 图 3 为黑体温度在 333 K 和 373 K 时出射辐射的偏振角 (AoP) 与铝镜入射角的关系曲线. 部分计算结果见

表 2, 其中 Stokes 矢量进行了归一化。

表 1 理论计算参数设置

Table 1 Parameters setting for the theoretical calculation

Parameter	Value
$[\lambda_L, \lambda_H]$	$[7.5, 13.5] / \mu\text{m}$
θ_i	$[0^\circ, 90^\circ]$, the computational accuracy is 0.1°
n_i	1.0
θ_p	45°
T_B	313 K, 333 K, 353 K, 373 K
S_B	$(1, 0, 0, 0)^T$
c_1	$3.7418 \times 10^{-16} / \text{W} \cdot \text{m}^2$
c_2	$1.4388 \times 10^{-2} / \text{m} \cdot \text{K}$
B	$1.2862 \times 10^{-11} / \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5}$
T_{Al}	290.6 K

分析四个不同黑体温度下的计算结果, 得出如下规律:

(1) 当 θ_i 极小时, 铝镜出射辐射和入射辐射的 Stokes 矢量相比, Q 、 U 分量的绝对值基本保持不变而符号发生反转, 即铝镜将入射辐射的偏振方向旋

转了 90°, 铝镜相当于快轴方向为 0° 的半波片;

(2) 当 θ_i 逐渐增大时, 出射辐射的 DoLP 从最大值逐渐减小, DoCP 从 0 逐渐增大, 而 AoP 的符号为负且值的大小缓慢增加;

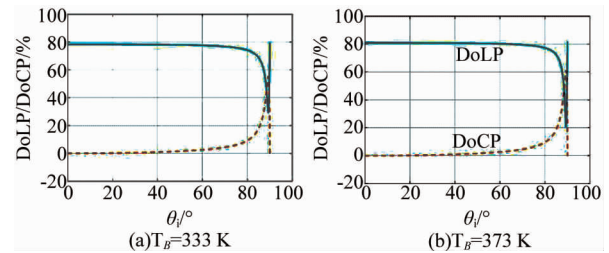


图 2 333 K 和 373 K 黑体温度下, 铝镜入射角 θ_i 变化时出射辐射的 DoLP 和 DoCP

Fig. 2 DoLP and DoCP of the output light at different θ_i when $T_B = 333 \text{ K}$ or 373 K

(3) 当 θ_i 增大到略小于布儒斯特角的某一值时, AoP 由约 -45° 跳变为约 45°, 接着迅速减小, 这是

表 2 理论计算结果与实验测量结果

Table 2 Results of theoretical calculation and measurement

$\theta_i / ^\circ$	$T_B / ^\circ$	Results of theoretical calculation			Results of measurement		
		DoCP	DoLP	Stokes vector of the output light	DoLP	Stokes vector of the output light	RSD of DoLP/%
47.0	313	0.013 8	0.816 4	$[1.000 \ 0; 0.198 \ 7; -0.791 \ 8; 0.013 \ 8]$	0.814 5	$[1; -0.009 \ 3; -0.814 \ 4]$	0.567 5
	333	0.013 4	0.780 5	$[1.000 \ 0; 0.153 \ 0; -0.765 \ 3; 0.013 \ 4]$	0.840 0	$[1; -0.033 \ 7; -0.839 \ 3]$	0.199 1
	353	0.014 1	0.813 8	$[1.000 \ 0; 0.160 \ 1; -0.797 \ 9; 0.014 \ 1]$	0.861 5	$[1; -0.067 \ 4; -0.858 \ 9]$	0.124 9
	373	0.013 9	0.807 1	$[1.000 \ 0; 0.185 \ 4; -0.785 \ 6; 0.013 \ 9]$	0.886 2	$[1; -0.026 \ 0; -0.885 \ 8]$	0.256 7
62.0	313	0.029 1	0.808 9	$[1.000 \ 0; 0.185 \ 0; -0.787 \ 4; 0.029 \ 1]$	0.828 7	$[1; -0.004 \ 7; -0.828 \ 7]$	0.312 7
	333	0.028 3	0.774 9	$[1.000 \ 0; 0.141 \ 2; -0.761 \ 9; 0.028 \ 3]$	0.847 3	$[1; 0.010 \ 0; -0.847 \ 3]$	0.421 7
	353	0.029 7	0.808 7	$[1.000 \ 0; 0.149 \ 5; -0.794 \ 7; 0.029 \ 7]$	0.837 6	$[1; 0.035 \ 8; -0.836 \ 9]$	0.249 7
	373	0.029 4	0.802 2	$[1.000 \ 0; 0.175 \ 7; -0.782 \ 7; 0.029 \ 4]$	0.836 0	$[1; -0.001 \ 6; -0.836 \ 0]$	0.312 1
72.0	313	0.050 8	0.795 9	$[1.000 \ 0; 0.165 \ 0; -0.778 \ 6; 0.050 \ 8]$	0.758 2	$[1; -0.084 \ 2; -0.753 \ 5]$	0.852 0
	333	0.049 5	0.765 0	$[1.000 \ 0; 0.124 \ 2; -0.754 \ 9; 0.049 \ 5]$	0.725 4	$[1; -0.039 \ 4; -0.724 \ 4]$	0.392 9
	353	0.052 0	0.799 7	$[1.000 \ 0; 0.134 \ 3; -0.788 \ 4; 0.052 \ 0]$	0.700 3	$[1; 0.040 \ 0; -0.699 \ 2]$	0.791 5
	373	0.051 6	0.793 7	$[1.000 \ 0; 0.161 \ 7; -0.777 \ 1; 0.051 \ 6]$	0.748 9	$[1; -0.074 \ 7; -0.745 \ 1]$	0.464 7
77.0	313	0.072 3	0.781 6	$[1.000 \ 0; 0.144 \ 9; -0.768 \ 0; 0.072 \ 3]$	0.426 9	$[1; 0.221 \ 8; -0.364 \ 8]$	2.364 4
	333	0.070 7	0.754 0	$[1.000 \ 0; 0.107 \ 0; -0.746 \ 4; 0.070 \ 7]$	0.420 5	$[1; 0.230 \ 7; -0.351 \ 6]$	2.745 6
	353	0.074 4	0.789 6	$[1.000 \ 0; 0.118 \ 8; -0.780 \ 6; 0.074 \ 4]$	0.525 2	$[1; 0.277 \ 3; -0.446 \ 1]$	1.986 7
	373	0.073 8	0.784 2	$[1.000 \ 0; 0.147 \ 5; -0.770 \ 2; 0.073 \ 8]$	0.417 1	$[1; 0.222 \ 0; -0.353 \ 1]$	2.535 6
80.0	313	0.094 3	0.766 1	$[1.000 \ 0; 0.124 \ 1; -0.756 \ 0; 0.094 \ 3]$	0.235 5	$[1; 0.107 \ 1; 0.209 \ 7]$	5.973 8
	333	0.092 5	0.741 9	$[1.000 \ 0; 0.089 \ 2; -0.736 \ 5; 0.092 \ 5]$	0.284 4	$[1; 0.098 \ 4; 0.266 \ 8]$	5.266 5
	353	0.097 4	0.778 3	$[1.000 \ 0; 0.102 \ 8; -0.771 \ 5; 0.097 \ 4]$	0.275 9	$[1; 0.251 \ 6; 0.113 \ 1]$	5.088 0
	373	0.096 7	0.773 4	$[1.000 \ 0; 0.132 \ 7; -0.762 \ 0; 0.096 \ 7]$	0.259 6	$[1; 0.092 \ 9; 0.242 \ 4]$	5.266 2
88.5	313	0.430 5	0.455 5	$[1.000 \ 0; -0.196 \ 0; -0.411 \ 2; 0.430 \ 5]$			
	333	0.439 7	0.460 4	$[1.000 \ 0; -0.197 \ 1; -0.416 \ 1; 0.439 \ 7]$			
	353	0.475 7	0.475 0	$[1.000 \ 0; -0.162 \ 1; -0.446 \ 4; 0.475 \ 7]$			
	373	0.480 9	0.462 8	$[1.000 \ 0; -0.116 \ 5; -0.447 \ 9; 0.480 \ 9]$			
89.2	313	0.528 7	0.311 3	$[1.000 \ 0; -0.291 \ 3; -0.109 \ 9; 0.528 \ 7]$			
	333	0.546 0	0.306 6	$[1.000 \ 0; -0.286 \ 2; -0.109 \ 9; 0.546 \ 0]$			
	353	0.594 8	0.272 9	$[1.000 \ 0; -0.246 \ 9; -0.116 \ 2; 0.594 \ 8]$			
	373	0.603 9	0.228 6	$[1.000 \ 0; -0.197 \ 6; -0.114 \ 9; 0.603 \ 9]$			

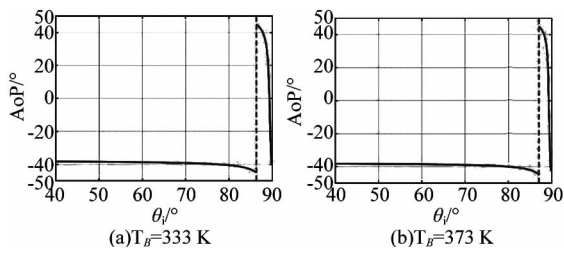


图3 333 K 和 373 K 黑体温度下, 铝镜入射角 θ_i 变化时出射辐射的 AoP

Fig. 3 AoP of the output light at different θ_i when $T_B = 333$ K or 373 K

由于铝反射镜对入射辐射 p 、 s 分量的反射率各不相同, 使得在该入射角处出射辐射 Stokes 矢量的 Q 分量的符号发生反转所造成的, 同时 DoLP 和 DoCP 也在迅速减小中;

(4) 当 θ_i 继续增大到铝镜的布儒斯特角时, 出射辐射的 DoCP 迅速增加到最大值, DoLP 迅速减小到最小值, AoP 迅速减小到 0° , 此时出射辐射的偏振特性主要由自发辐射决定, 而 θ_i 超过布儒斯特角时, DoCP 急剧下降, DoLP 急剧上升, 而 AoP 的符号为负且值的大小急剧增大, 这些特性是由于在布儒斯特角处, 铝反射镜对入射辐射 p 分量的反射率迅速减小到最小值, 而对 s 分量的反射率基本不变所造成的;

(5) 理论上该辐射源结构能够产生偏振态可调的部分偏振辐射, 在 4 个不同黑体温度下, 当 θ_i 相同时, 出射辐射 DoLP 的偏差较小, 且 $\theta_i \leq 80^\circ$ 时, 偏差在 5% 以内, 此外, 出射辐射的 V 分量一直不小于 0, 这也说明出射辐射中的圆偏振成分是左旋状态的。

3 反射式红外可控部分偏振辐射源实验测试与讨论

利用图 1 的反射式红外部分偏振辐射源及其测量系统, 对辐射源出射辐射的偏振态进行测量, 偏振热成像系统已用现有方法定标^[16-17]. 具体测量时, 用于起偏的偏振片透光轴方向 θ_p 设置为 45° , 黑体温度分别调节为 313 K、333 K、353 K 和 373 K, 每个黑体温度的测量过程中, 铝镜入射角依次设置为 47° 、 62° 、 72° 、 77° 、 80° 和 82° , 实验在环境温度为 (290.6 ± 0.6) K、湿度为 $(45 \pm 4)\%$ 的室内条件下进行。

当 θ_i 为 62° 和 80° 时, 不同的偏振热成像系统检

偏角对应的探测值分布如图 4 所示; 图 5 为偏振热成像系统检偏角对应的探测值的极坐标分布图, 其中黑体温度为 373 K, 比较 62° 、 72° 、 77° 和 80° 等不同入射角时的曲线形态; 当铝镜入射角变化时, 在不同黑体温度下, 根据探测数据计算的出射辐射的归一化 Stokes 矢量和 DoLP 以及五次测量时 DoLP 的相对标准偏差 (RSD) 见表 2. 可以看出:

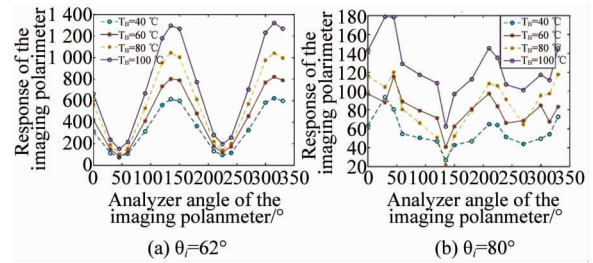


图4 铝镜入射角 θ_i 为 62° 和 80° 时, 不同偏振热成像系统检偏角对应的探测值分布

Fig. 4 Response of the imaging polarimeter at different analyzer angles when $\theta_i = 62^\circ$ or 80°

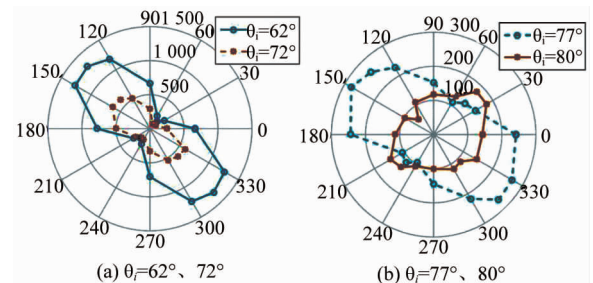


图5 黑体温度 $T_B = 373$ K 时偏振热成像系统检偏角 (角向) 与探测值 (径向) 的极坐标分布图

Fig. 5 Polar diagram: Response (radial) of the imaging polarimeter at different analyzer angles (angular) when $T_B = 373$ K

(1) 出射辐射的 DoLP 随着入射角 θ_i 的增大而减小, 而随着 θ_i 的减小存在着最大值, 这与理论计算结果的规律一致;

(2) 当入射角较小, 为 47° 、 62° 时, 测量出的出射辐射是 135° 线偏振成分很高的部分偏振辐射;

(3) 当入射角为 80° 时, 根据图 4 (b)、图 5 (b) 以及表 2, 偏振热成像系统各检偏方向对应的探测值相差较小, 说明出射辐射的线偏振度明显减小, 由于铝镜表面光滑, 该现象产生的原因应是在反射过程中产生了椭圆偏振辐射, 这需要红外测圆偏振态仪器的进一步测定;

(4) 该部分偏振辐射源能在 $7.5 \sim 13.5 \mu\text{m}$ 波段产生 DoLP 在 $0.25 \sim 0.85$ 之间的部分偏振辐射,

当 θ_i 小于 72° 时,在四个不同黑体温度下 DoLP 的偏差小于 8.5%,而在同一黑体温度同一 θ_i 的情况下,DoLP 五次测量的相对标准偏差低于 6%.

当入射角大于 80° 时,由于角度过大,遮蔽装置难以发挥作用,偏振热成像系统探测已明显受到铝镜入射辐射的干扰,今后要考虑更优的测量方法.对比实验和仿真的结果,尽管个别结果存在偏差,在同一入射角时反射辐射的线偏振度有一定差异,但总体规律是一致的.造成这种偏差的原因是多方面的,比如背景辐射对测量的干扰,因此合适的偏振热成像系统定标方法将是我们接下来的研究重点.

4 结论

可控的部分偏振辐射源在偏振成像系统的定标中具有重要用途,定标工作中通常采用完全偏振辐射源或可控的部分偏振辐射源.此外,可控的部分偏振辐射源也可应用于偏振光学器件的偏振定标、物质折反射偏振特性的测定、物质结构的鉴定等方面.

基于黑体辐射源、平行光管、红外线栅偏振片和铝反射镜,设计了反射式可控红外部分偏振辐射源,推导了金属反射镜的穆勒矩阵,通过波段积分方法对辐射源出射辐射的偏振态进行了理论计算与论证.搭建了偏振辐射源,并用线偏振热成像系统进行了测量实验,结果表明该辐射源可以在 $7.5 \sim 13.5 \mu\text{m}$ 波段产生线偏振度为 $0.25 \sim 0.85$ 的部分偏振辐射,当铝反射镜入射角低于 80° 时,出射辐射线偏振度测量值的相对标准偏差低于 6%.理论计算结果和测量结果在总体规律上表现一致,个别数值存在偏差,原因是热红外偏振测量极易受到外界环境的干扰,因此,偏振热成像系统的定标工作将是我们接下来的研究重点.

References

- [1] WANG Xia, XIA Run-Qiu, JIN Wei-Qi, *et al.* Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*(王霞,夏润秋,金伟其,等.红外偏振成像探测技术进展. *红外与激光工程*), 2014, **43**(10): 3175-3182.
- [2] CHEN Wei-Li, WANG Shu-Hua, JIN Wei-Qi, *et al.* Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(陈伟力,王淑华,金伟其,等.基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(5): 507-514.
- [3] SONG Mao-Xin, SUN Bin, SUN Xiao-Bing, *et al.* Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*(宋茂新,孙斌,孙晓兵,等.航空多角度偏振辐射计的偏振定标. *光学精密工程*), 2012, **20**(6): 1153-1158.
- [4] Chen Z Y, Wang X, Liang R G. Calibration method of microgrid polarimeters with image interpolation[J]. *Appl. Opt.*, 2015, **54**:995-1001.
- [5] Powell S B, Gruev V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters[J]. *Opt. Express*, 2013, **21**: 21039-21055.
- [6] Ostrovsky A S, Olvera M A, RICKENSTORFF C, *et al.* Generation of a secondary electromagnetic source with desired statistical properties[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**: 4490-4493.
- [7] De Zela F. Secondary source of quantum or classical partially polarized states[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2013, **30**: 1544-1547.
- [8] Ostrovsky A S, Rodríguez-zurita G, Meneses-Fabián C, *et al.* Experimental generating the partially coherent and partially polarized electromagnetic source[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**:12864-12871.
- [9] Barberena D, Gatti G, De Zela F. Experimental demonstration of a secondary source of partially polarized states[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2015, **32**:697-700.
- [10] Han F, Sun X L, Wu L J, *et al.* Dual-wavelength orthogonally polarized radiation generated by a tungsten thermal source[J]. *Opt. Express*, 2013, **21**:28570-28582.
- [11] LIAO Yan-Biao. Polarization of Optics[M]. Beijing: Science Press(廖延彪.偏振光学.北京:科学出版社), 2003:19-63.
- [12] WANG Xia, ZOU Xiao-Feng, JIN Wei-Qi. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness object[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*(王霞,邹晓风,金伟其.粗糙表面反射辐射偏振特性研究. *北京理工大学学报*), 2011, **32**(11):1327-1331.
- [13] Rakić A D, Djurić A B, Elazar J M, *et al.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[M]. *Appl. Opt.* 1998, **37**:5271-5283.
- [14] JIN Wei-Qi, HU Wei-Jie. Radiometric photometry and chromaticity with measurement[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press(金伟其,胡威捷.辐射度、光度与色度学及其测量.北京:北京理工大学出版社), 2006, 34-39.
- [15] XIA Run-Qiu. The Research about thermal polarization imaging theory in sea-surface environment[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology(夏润秋.海面环境中红外偏振热成像探测理论研究.北京:北京理工大学), 2015.
- [16] Blumer R, Miranda M, Howe J, *et al.* LWIR polarimeter calibration[C]. *Proc. SPIE, Polarization analysis, Measurement, & Remote Sensing IV*, 2002, **4481**:37-45.
- [17] Persons C M, Jones M W, Farlow C A, *et al.* A proposed standard method for polarimetric calibration and calibration verification[C]. *Proc. SPIE, Polarization Science and Remote Sensing III*, 2007, **6682**:66820K.