

基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法

柏财勋 李建欣 孟鑫 沈燕 朱日宏

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 高光谱成像技术在众多领域中具有广泛的应用潜力,仪器的轻小型化能够助力该技术的推广。为探索新的干涉高光谱成像技术方案,研究了一种新型的基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法。通过在成像系统中加入对称楔形干涉器,实现干涉光程差与视场角的关联调制。通过分析系统的工作原理,设计了系统的干涉成像光路模型,并对干涉腔楔角、反射率、成像物镜等主要参数和成像推扫方式进行了讨论分析,采用Zemax光学设计软件对干涉成像光路进行了仿真研究。研制了原理样机,对激光光源和实际场景目标进行了光谱成像实验,得到了较好的实验结果。研究表明,该高光谱成像方法不仅具有高光通量、高光谱分辨率的优点,而且能够有效实现仪器的轻小型化。

关键词 成像系统; 高光谱成像; 对称楔形腔; 干涉腔

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0811002

Hyperspectral Imaging Based on Symmetric Wedgy Interferometric Cavity

Bai Caixun Li Jianxin Meng Xin Shen Yan Zhu Rihong

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

Abstract Interferometric hyperspectral imaging is a popular technology with wide application in many fields. Miniaturization of instrument is conducive to promotion of the imaging technology. In order to explore a new technical scheme, a new method of interferometric hyperspectral imaging based on symmetric wedgy cavity is researched. A symmetric wedgy cavity is inserted into the imaging system to obtain the modulating relationship between optical path difference and field angle. By analyzing the working principle of the system, a model of the imaging system is designed while the major parameters such as wedge angle of interferometric cavity, reflectance, object lens, and the push-broom mode are discussed. Moreover, the proposed method is verified by the simulation with Zemax. A prototype is developed and good experimental results of lasers and actual scene objects are obtained. The research shows that besides high throughput and high spectral resolution, the advantage of miniaturization is also simultaneously achieved in this method.

Key words imaging system; hyperspectral imaging; symmetric wedgy cavity; interferometric cavity

OCIS codes 110.4234; 110.3175; 300.6190

1 引言

干涉高光谱成像技术通过在成像系统中加入干涉器获取成像目标的干涉光强信息,利用傅里叶变换复原出成像目标的光谱数据立方体,可以实现高光通量探测,从而具有高空间分辨率和高光谱分辨率的优点,

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61475072, 61205016, U1231112)、教育部博士点基金(20123219120021, 20133219110008)、中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题

作者简介: 柏财勋(1991—),男,博士研究生,主要从事成像光谱偏振技术方面的研究。E-mail: baicaixun@163.com

导师简介: 李建欣(1977—),男,博士,副教授,主要从事精密光学测试与干涉成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: ljx@vip.163.com(通信联系人)

在遥感成像、资源勘探、环境监测等领域具有很大的应用潜力。近年来,国内外对该类高光谱成像技术进行了研究。其中,以色列Cabib等^[1]研究了基于Sagnac干涉器的高通量干涉成像光谱技术,通过横向剪切思想在探测器上形成干涉信号,其光通量可与直接成像的相机媲美。在该类技术方案用于近距离目标光谱探测时,Sagnac干涉器需要放置于准直光路中,因此系统中需要两个成像物镜和一个准直物镜,仪器的体积受这些物镜的限制,较难实现小型化。英国Harvey等^[2]提出了基于Wollaston棱镜干涉器的技术方案,该方案同样基于横向剪切干涉思想,由于双折射器件的光束剪切特性,系统可以实现直线光路结构,体积比Sagnac干涉器方案更为紧凑。美国Horton等^[3]提出了基于Mach-Zehnder干涉器的技术方案,通过角度剪切思想形成两个交错的像平面,由探测器接收形成的干涉信号。该类干涉器被称为像平面干涉仪,不需要准直光路结构,只需放置于会聚的成像光路中即可,相比于Sagnac干涉器方案体积较为紧凑。德国Posselt等^[4]提出了基于Michelson干涉器的技术方案,同样利用角度剪切干涉思想,不需要准直光路结构,但相比于Mach-Zehnder干涉器方案,另外需要一个成像物镜将两个交错的像平面重新成像于探测器上,仪器体积也较为紧凑。国内研究人员对相关的干涉成像方法也进行了深入研究,分别提出了各具特色的技术方案^[5-16]。上述经典的干涉成像光谱技术,一般需要体积较大的干涉器,同时还可能需要多个物镜进行干涉信息成像,因此光机系统较难实现轻小型化。针对干涉高光谱成像仪器的该类问题,本文研究了一种基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法,通过在成像系统中加入对称楔形干涉器,实现更为紧凑的光路结构,为高光谱成像轻小型化应用提供一种有效技术途径。

2 光谱成像原理和方法

2.1 基本原理

干涉成像光谱技术是基于光谱信息与干涉信息之间的傅里叶变换关系,因此干涉器是其核心部件。常用的干涉器有双光束Michelson干涉器、Sagnac干涉器、Mach-Zehnder干涉器以及多光束法布里-珀罗(F-P)干涉器等^[17-23]。其中,F-P干涉器具有直线光路、体积紧凑的优点,为实现仪器小型化提供了有利条件。根据多光束干涉的原理,采用对称楔形干涉器作为高光谱成像系统的光程调制组件,系统原理框图如图1所示。入射光束通过成像物镜成像进入对称楔形干涉器,在干涉器后腔面上进行多光束干涉调制和成像,中继镜将该像重新转接到探测器靶面上。系统中只需要两个物镜,具备直线光路、体积紧凑的特点。由于楔形腔的间隔是线性渐变的,因此不同视场角的光束被不同的光程差所调制,在探测器靶面上得到经过相干调制的目标图像。该方法属于时空联合调制型干涉方法,需要通过仪器的整体推扫,提取每个物点的干涉信息,从而复原出成像目标的光谱信息。

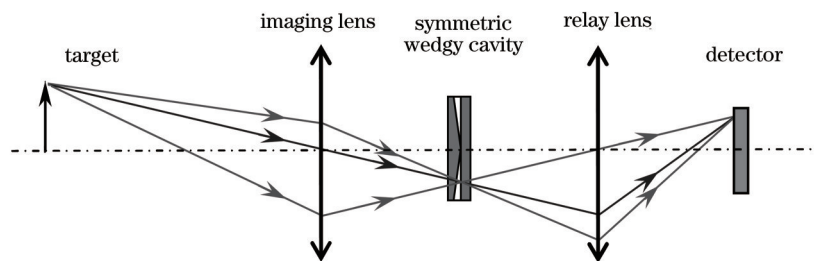


图1 基于对称楔形干涉腔的高光谱成像系统

Fig.1 Hyperspectral imaging system based on symmetric wedgy interferometric cavity

对称楔形干涉器由对称楔板和平行平板组成,对称楔板的前表面和平行平板的后表面分别镀制增透膜,对称楔板的后表面和平行平板的前表面分别镀制反射膜,入射光束在干涉器的空气隙中多次反射,如图2所示。由于对称楔形腔的渐变间隔特征,光束进入楔形腔会在后腔面上形成多光束干涉条纹。该干涉器和Sagnac干涉器类似,同样可以获取目标图像的双边干涉条纹图。干涉器的楔形结构使得系统的光程差调制函数随视场角变化,目标上不同视场角物点发出的光束会聚于干涉器后腔面的不同位置上并形成干涉条纹,从而实现了干涉光程差与视场角的关联调制,这是该方法的核心思想。

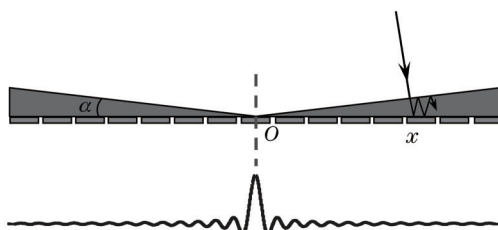


图2 对称楔形干涉腔

Fig.2 Symmetric wedgy interferometric cavity

2.2 系统的设计与分析

2.2.1 干涉腔楔角和反射率

由上述干涉器的基本原理和多光束干涉理论可知,干涉场强度随光程差和腔面反射率变化^[24]。假设光束入射到楔形腔的位置到楔形腔对称中线的距离为 x ,则单色光的干涉光强公式为

$$I = I_0 \frac{(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos(2\pi\sigma\Delta)}, \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光束光强, R 为腔面反射率, σ 为波数, Δ 为光程差。

令 α 为干涉腔的楔角, x 位置处的光程差为

$$\Delta = 2x \tan \alpha. \quad (2)$$

当反射率一定时,干涉光强随光程差变化发生周期性变化,即产生明暗相间的干涉条纹,如图3所示。

系统的波数分辨率 $\delta\sigma$ 由采样得到的最大光程差 Δ_{\max} 所决定,联系(2)式可得

$$\delta\sigma = \frac{1}{2\Delta_{\max}} = \frac{1}{2NP \tan \alpha}, \quad (3)$$

式中 N 为探测器像素列数, P 为探测器像素尺寸。因此,干涉腔的楔角 α 必须满足

$$\alpha \geq \arctan\left(\frac{1}{2NP\delta\sigma}\right). \quad (4)$$

此外,最大波数 σ_{\max} 的采样必须满足奈奎斯特采样定律,此时可得干涉腔的楔角 α 取值为

$$\alpha \leq \arctan\left(\frac{1}{4P\sigma_{\max}}\right). \quad (5)$$

综合(4)式和(5)式,干涉腔的楔角 α 范围为

$$\arctan\left(\frac{1}{2NP\delta\sigma}\right) \leq \alpha \leq \arctan\left(\frac{1}{4P\sigma_{\max}}\right). \quad (6)$$

如果系统的成像波段范围为 450~700 nm,700 nm 处光谱分辨率优于 10 nm,探测器像素数量为 648 pixel × 488 pixel,像素尺寸为 7.4 μm,由(6)式可得楔角 α 的合理选择范围为 19'~52'。

由(1)式可知,干涉器腔面的反射率决定了条纹的调制度和正弦性。当腔面的反射率较高时,产生的干涉条纹具有高的调制度,但条纹的正弦性较差;而当腔面的反射率下降时,干涉条纹的调制度会随之下降,但其有更好的正弦性,条纹正弦性与反射率的关系曲线如图4所示。与经典F-P干涉器相比,对称楔形腔面

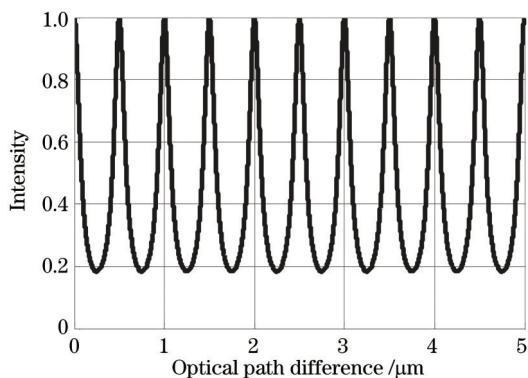


图3 干涉光强示意图

Fig.3 Schematic diagram of interferometric intensity

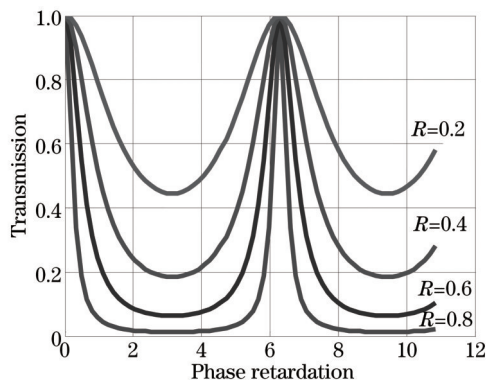


图4 不同反射率下干涉光强分布曲线

Fig.4 Intensity at different reflectance

的反射率要低很多,高级次透射光束能量很小,这些高级次光束对干涉强度的贡献很小,对光谱复原的影响可以忽略不计^[25-26]。因此产生条纹的是准正弦条纹,此时将(1)式进行近似简化后得到单色光的干涉光强为

$$I = I_0(1 - R)^2 [1 + R^2 + 2R \cos(2\pi\sigma\Delta)] \quad (7)$$

如果入射光束为宽光谱光束,各谱线的光强均为 I_0 ,对(7)式进行波数积分得到复色光的干涉光强分布为

$$I = I_0(1 - R)^2 \bar{\sigma} \left[1 + R^2 + \frac{2R \sin(\pi\Delta\bar{\sigma})}{\pi\Delta\bar{\sigma}} \cos(2\pi\sigma_{\text{mid}}\Delta) \right] \quad (8)$$

式中 σ_{mid} 为波段中间谱线所对应的波数, $\bar{\sigma}$ 为光束的波数宽度。由(8)式可得干涉条纹的调制度为

$$K = \left| \frac{2R \sin(2\pi x \bar{\sigma} \tan \alpha)}{1 + R^2} \right| \quad (9)$$

当光束的波数宽度一定时,干涉条纹调制度主要受干涉腔楔角和腔面反射率的影响。图5(a)、(b)给出了波数宽度 $\bar{\sigma} = 800 \text{ mm}^{-1}$ 时的干涉条纹调制度分布情况。从图5(a)、(b)中可以看出,腔面反射率的降低和干涉腔楔角的增大均会造成调制度的下降。因此,在满足设计光谱分辨率的情况下,楔角的合理取值越小,所获得的干涉条纹调制度越高。由于非整数值的楔角加工难度较大,所以楔角取值为 $20'$ 。为了同时得到正弦性和调制度较好的干涉条纹,应合理选择干涉腔的腔面反射率,图5(c)所示为楔角为 $20'$ 时条纹调制度随反射率的变化曲线。设计反射率为0.4时,条纹调制度为0.6,且正弦性良好。

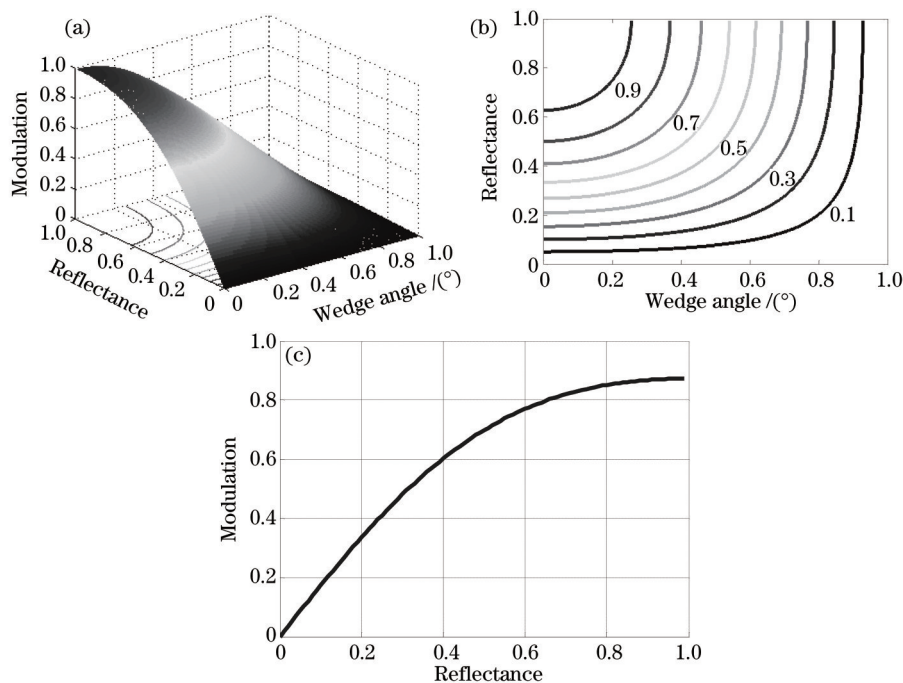


图5 (a) 调制度随反射率和楔角的变化; (b) 调制度等高线分布图; (c) 楔角 $\alpha = 20'$ 时调制度随反射率的变化

Fig.5 (a) Modulation change with reflectance and wedge angle; (b) contour map of modulation;

(c) modulation change with reflectance when $\alpha = 20'$

2.2.2 成像物镜 F 数

由于干涉器的腔面上镀制反射率较低的膜系,在不考虑高级次光束对干涉强度影响的情况下,可以只考虑前两级透射光束的干涉问题。因此,物点光束通过干涉器和成像物镜后在像面上形成两个艾里斑。这对艾里斑的中心距离随着视场角的变化而改变,当艾里斑的距离过大时会引起成像点的错位叠加,导致成像模糊。设计干涉器时需要考虑艾里斑的问题,而艾里斑距离与干涉腔的几何参数和探测器靶面参数相关,因此需要讨论这些参数的设计,以提高系统的成像质量。

根据干涉器的结构特点可知,两个艾里斑的距离为

$$d = x[1 + \tan(2\alpha)\tan\beta - \cos(2\alpha)] \quad (10)$$

式中 β 为主光线在后腔面上的反射角。令主光线进入干涉腔的入射角为 θ ，该入射角与物距 l 和成像物镜的焦距 f 的关系为

$$\theta = \arctan[x(l-f)/lf]. \quad (11)$$

则反射角 β 和入射角 θ 的关系为

$$\beta = \arcsin\{n \sin[\arcsin(\sin \theta/n) - \alpha]\} + \alpha, \quad (12)$$

式中 n 为对称楔板的折射率。由(10)~(12)式可知，艾里斑距离 d 是变量 x 和 l 的函数，可表示为 $d(x,l)$ 。当 $x = NP/2$ 时，即图 6 中所示的艾里斑 S_2 到 O 点的距离为探测器靶面宽度的一半时， S_1 与 S_2 之间的距离为最大视场角的主光线所形成的两个艾里斑距离，即所有艾里斑对的最大距离为

$$d_{\max} = d(NP, l). \quad (13)$$

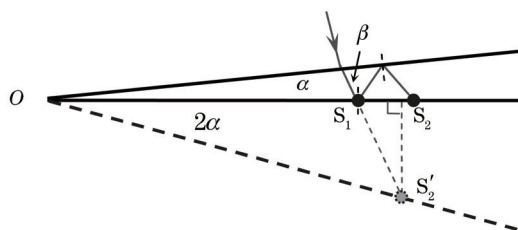


图 6 艾里斑分布图

Fig.6 Distribution diagram of two Airy disks

当通光孔径为圆形时，物点光束通过成像物镜形成的艾里斑半径为

$$r = 1.22F/\sigma_{\max}, \quad (14)$$

式中 F 为成像物镜的 F 数， σ_{\max} 为最大波数。根据瑞利判据，当两个艾里斑中心距离小于艾里斑的半径时，即 $d_{\max} \leq r$ ，成像系统无法分辨出这两个艾里斑，即此时成像清晰。在满足瑞利判据的情况下，成像物镜的最小 F 数为

$$F_{\min} = d(NP, l)\sigma_{\max}/1.22. \quad (15)$$

经分析可知，随着物距 l 的变大，成像物镜的可选最小 F 数 F_{\min} 随之变大，其曲线形状如图 7 所示。如果 $F < F_{\min}$ ，场景边缘的像将会出现错位叠加现象，导致成像模糊。在物距不变的情况下，通过适当减小成像物镜的通光孔径可以提高成像质量。

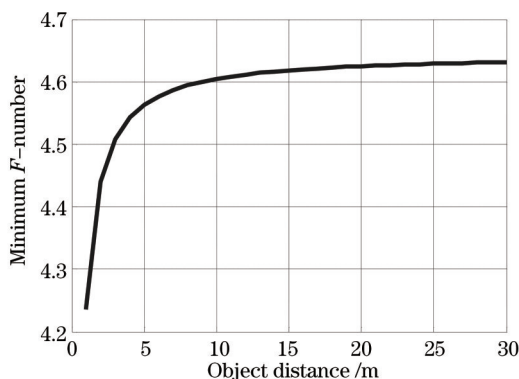


图 7 成像物镜最小 F 数随物距的变化曲线

Fig.7 Curve of minimum F -number of imaging lens changing with object distance

2.3 系统仿真分析

为了对系统干涉成像原理进行验证，采用 Zemax 光学设计软件进行分析仿真。由于中继镜的作用是将目标像进行等比成像，在 Zemax 仿真时可以将其省去。在简化后的系统光路中，探测器靶面直接放置于干涉器后面。采用拓展单色光源对该系统进行光强仿真，结果如图 8 所示，可以看出干涉条纹受视场调制。其中，图 8(b)为不同反射率时的光强图像，图 8(c)为不同楔角时的光强图像。根据之前的分析结果，综合考虑条纹的调制度和正弦性以及系统的光谱分辨率，将干涉腔的楔角设计为 $20'$ ，腔面反射率为 40%。

由于干涉器处于光学系统的会聚光路中,故应考虑其产生的像差影响。由于干涉腔楔角很小,可以被看成放置于会聚光路中的一块平板,可以认为其引入的像差主要为球差。将干涉器看作由两个曲率半径无限大的折射面组成,对两个折射面的初级像差进行求和,可得干涉器的初级球差系数表达式为

$$S_1 = -\frac{n^2 - 1}{n^3} u^4 b, \quad (16)$$

式中 b 为干涉器的厚度, u 为其孔径角, n 为干涉器材料的折射率。

根据初级球差与其系数间的对应关系^[27],可求得干涉器的初级球差表达式为

$$\delta L = \frac{b}{8n^3 F^2} (n^2 - 1)(1 - f/l)^2. \quad (17)$$

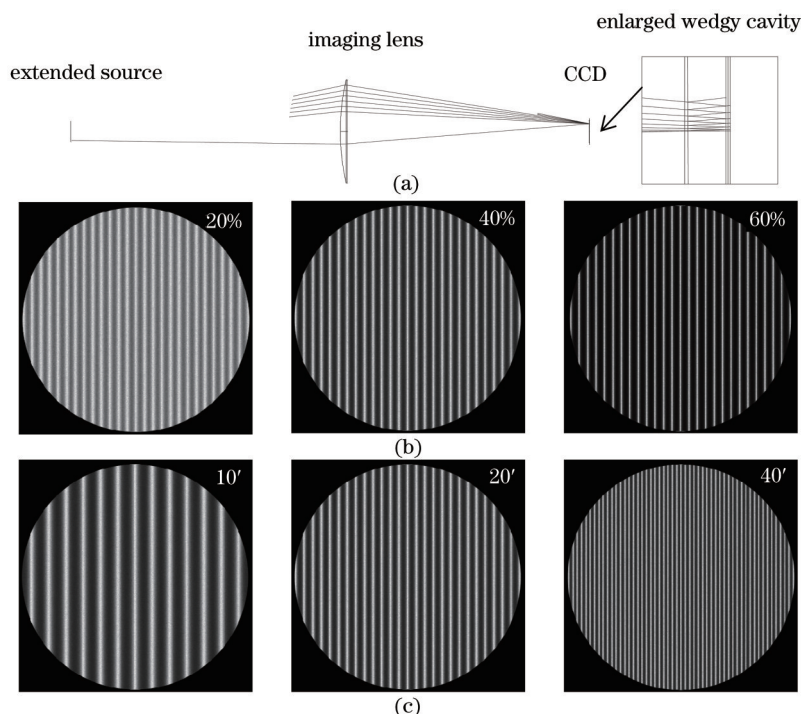


图 8 (a) 光学系统仿真; (b) 不同反射率时的仿真结果; (c) 不同楔角时的仿真结果

Fig.8 (a) Simulation of the optical system; (b) simulation result at different reflectance; (c) simulation result at different wedge angles

由(17)式可以看出,对干涉器产生的球差主要受物距 l 、干涉器厚度 b 和成像物镜 F 数的影响。例如,干涉器厚度 $b = 10 \text{ mm}$, 成像物镜焦距 $f = 100 \text{ mm}$, F 数 $F = 5$, 对 $l = 10 \text{ m}$ 处目标成像时,初级球差为 0.0184 mm 。在加工技术水平允许和保证光通量的情况下,减小干涉器的厚度或者增大成像物镜的 F 数均有利于减小干涉器产生的球差。另外,对理想系统加入干涉器后的调制传递函数(MTF)进行分析,结果如图9所示。可以看出,系统的 MTF 曲线并未发生明显变化, T 光和 S 光的数值差异最大不超过 0.03, 因此干涉器的加入对系统成像质量的影响较小。

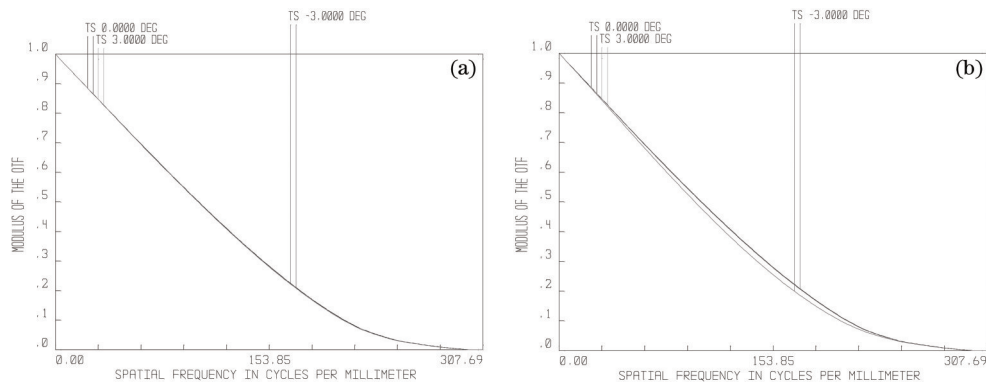


图 9 (a) 成像系统的 MTF 曲线; (b) 加入干涉器后系统的 MTF 曲线

Fig.9 (a) MTF curves of imaging system; (b) MTF curves of imaging system including interferometer

3 光谱复原方法

3.1 干涉数据的提取

在光谱复原过程中,需要提取成像目标在不同光程差调制下的干涉信息,而提取干涉信息的方法取决于成像系统的推扫方式。一般情况下,系统可以采用两种系统推扫的方式来获取干涉图像序列。第一种是系统内部推扫方式,即垂直光轴方向移动对称楔形干涉器。在这种扫描方式下,入射光束的视场角并未发生改变,因此视场中的目标像不会发生偏移,而干涉条纹随着干涉器移动。第二种为系统整体推扫方式,采集到的干涉图像具有干涉条纹位置不变,而目标像跟随系统推扫而产生偏移的特征。

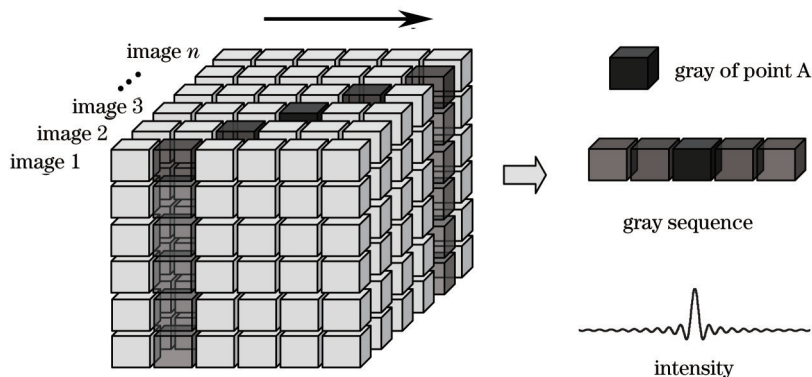


图 10 干涉图像序列的采样示意图

Fig.10 Schematic diagram of sampling interferogram sequence

采用内部推扫方式会增加系统的结构体积,影响系统的小型化设计,因此采用整体推扫的方式获取目标的干涉图像序列。在提取某一物点对应的干涉数据时,需要对干涉图像进行处理,以确保从每幅干涉图上提取的干涉数据属于同一个物点。图 10 所示为整体推扫方式下干涉数据的采集过程,图中箭头标出了场景目标像在干涉图序列中的移动方向。例如提取物点 A 的干涉信息(图中蓝色方格代表的是物点 A 所形成的像点)时,首先确定 A 点的像对应于每幅干涉图像中像素点的坐标,将这些像素点中的干涉数据提取出来并按成像顺序组合,就可以得到物点 A 的干涉信息。

3.2 光谱复原算法

提取干涉信息之后,根据干涉信息与光谱信息之间的物理关系,进行成像目标的光谱信息复原。对(7)式进行波数积分得到宽波段目标的干涉信息:

$$I(\Delta) = \frac{1-R^2}{1+R^2} \int_0^{\infty} B(\sigma) \left[1 + \frac{2R}{1+R^2} \cos(2\pi\sigma\Delta) \right] d\sigma, \quad (18)$$

式中 $B(\sigma)$ 为成像目标在波数 σ 处的强度,即光谱信息。由于干涉信息中的直流分量不包含光谱信息,在复原光谱时可以将它去除,同时将波数对偶延拓至负数域,(18)式可改写为

$$I(\Delta) = C \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma\Delta) d\sigma = C \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \exp(i2\pi\sigma\Delta) d\sigma, \quad (19)$$

式中系数 $C = R(1-R^2)/(1+R^2)^2$, 为一常量。在忽略常数因子的情况下,干涉信息和光谱信息满足傅里叶变换关系:

$$B(\sigma) = \mathcal{F}[I(\Delta)]. \quad (20)$$

因此,对提取后的干涉信息进行傅里叶变换处理,即可得到成像目标的光谱信息。利用上述分析结论,对波长为 539 nm 和 547 nm 的组合光源进行光谱复原仿真,根据多光束干涉原理公式生成干涉信息,经过滤波和切趾处理后如图 11(a)所示。由于干涉器腔面反射率为 40%,区别于传统的 F-P 干涉器,光谱复原时将该多光束干涉系统近似处理为前两级透射光干涉的双光束干涉系统,利用双光束干涉光谱近似复原原理,对干涉信息进行傅里叶变换处理,图 11(b)所示为光谱复原的仿真结果,由于干涉信息在采样最大光程差处进行了截断处理,造成谱线一定程度上的展宽。分析仿真结果可知,光谱复原误差小于 0.5 nm,验证了该光谱近似复原算法的可行性。

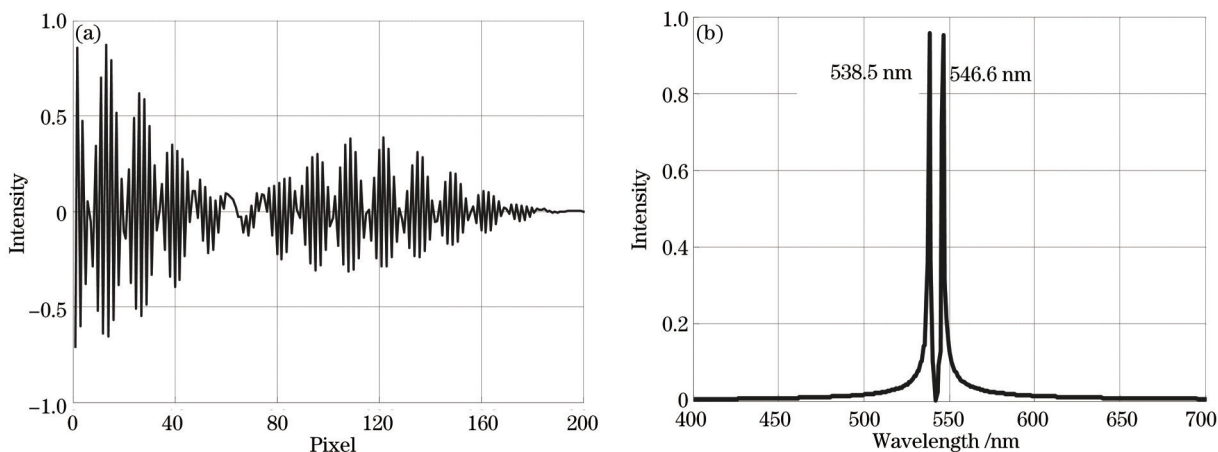


图 11 (a) 仿真光强; (b) 光谱复原仿真结果

Fig.11 (a) Emulational intensity; (b) simulation result of spectrum recovery

4 实验样机与结果

4.1 实验样机

按照上述原理分析和设计仿真,搭建了实验样机进行实验测试,样机结构如图 12 所示。样机中的器件光谱镀膜范围为 450~700 nm,干涉腔楔角为 20',最大光程差达到 27.9 μm ,700 nm 处光谱分辨率优于 8.8 nm。干涉器内表面镀制 40% 的反射膜,干涉器外表面镀制 99.5% 的增透膜,对称楔板和平行平板厚度均为 5 mm,干涉器的光能传输效率优于 40%。成像物镜焦距为 100 mm,中继镜系统为 1:1 成像,有效焦距为 30 mm,物(像)距为 19.2 mm,探测器为 IMPERX IGV-B0620M,像素数量为 648 pixel \times 488 pixel,像素尺寸为 7.4 μm 。整个装置安装在电控转台 RAK100 上,角度步进精度为 0.00125°,可以完成高精度成像推扫。经过初步结构优化,实验样机尺寸[包括成像物镜和电荷耦合元件(CCD)]为 200 mm \times 90 mm \times 90 mm,整套系统较为轻小便携。

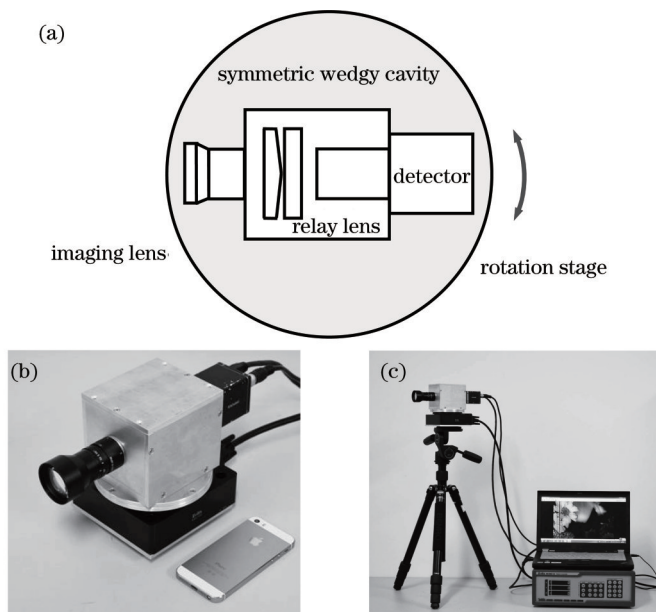


图 12 (a)实验装置示意图; (b) 实验样机主体; (c) 实验样机整体

Fig.12 (a) Schematic of the experimental setup; (b) principal part of the experimental prototype; (c) complete experimental prototype

4.2 实验结果与分析

采用样机对波长 $\lambda_a = 650.1 \text{ nm}$ 和 $\lambda_b = 530.2 \text{ nm}$ 的组合激光光源进行成像实验,采集到的干涉图像及复原结果如图 13 所示。利用 650.1 nm 的激光对系统进行初步定标,复原得到 λ_b 激光的波长为 529.5 nm,光谱复原误差为 0.58%。

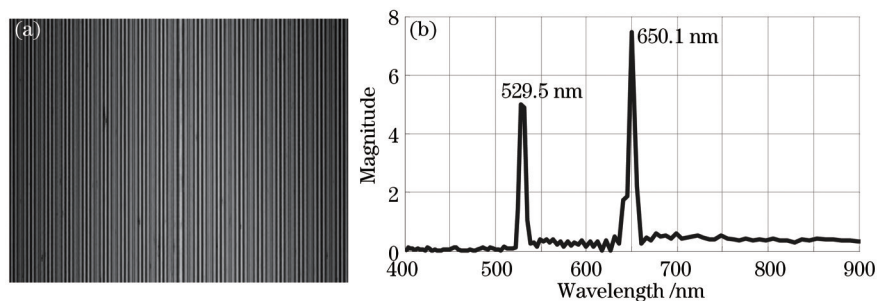


图 13 (a)激光干涉图; (b) 复原的激光谱线

Fig.13 (a) Laser interferogram; (b) recovered laser spectrum

此外,对实际场景目标进行了光谱成像实验,成像目标如图 14(a)所示。系统通过整体推扫共获得 600 多幅干涉序列图像,图 14(b)~(d)为其中三幅不同推扫角度时采集的干涉图像。可以看出,干涉条纹在视场中的位置不变,而成像目标的位置向右偏移。实验得到的干涉图像纹理清晰,表明基于对称楔形干涉腔的成像系统能够获取清晰、对比度较好的干涉图像。

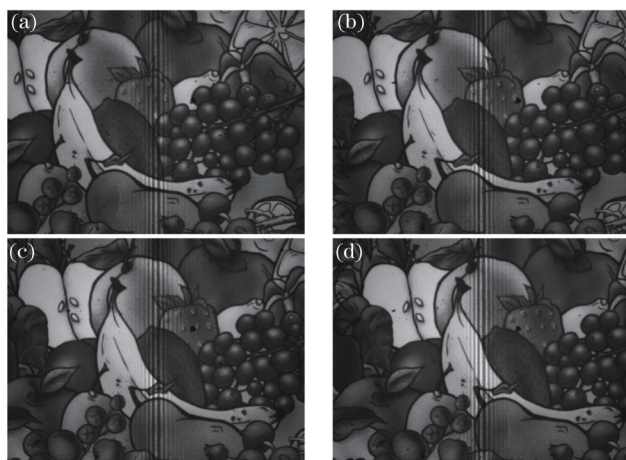


图 14 干涉图像

Fig.14 Interferograms

从采集的干涉图像序列中提取各目标点的干涉信息,对重排后的干涉数据进行趋势项消除和相位校正处理,再利用傅里叶变换可得到各点的光谱信息,成像目标的复原光谱图像如图 15 所示,场景中红色草莓圆

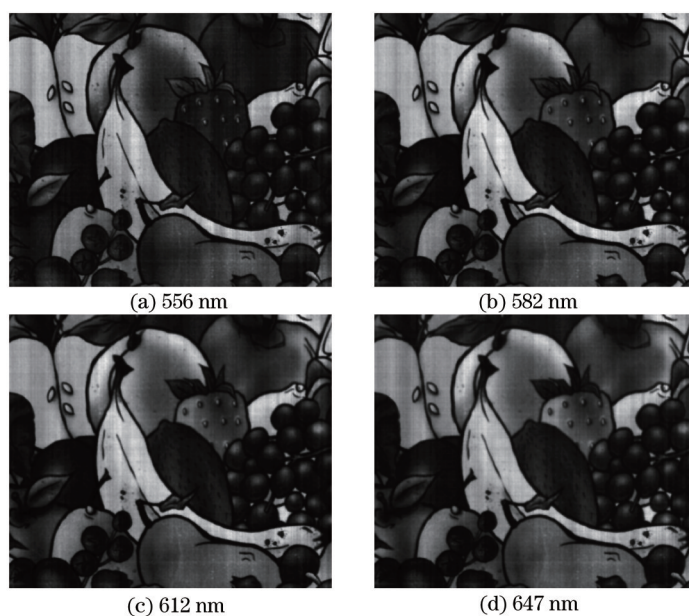


图 15 成像目标的复原光谱图像

Fig.15 Recovered spectral images of the imaging target

形区域的光谱曲线如图 15(d)所示。零级条纹处于对称楔板和平行平板的接触位置,由于受加工工艺以及装调过程中应力的影响,对称楔板两个楔面相交的棱可能存在表面疵病,造成中心零级条纹中存在非干涉暗斑,导致光谱图像中存在横向条带效应,从而影响复原效果。通过对干涉数据进行补偿处理,消除了光谱图像中的横向条带,得到了清晰可靠的实验结果。

5 结 论

为探索新的干涉高光谱成像技术方案,对基于对称楔形干涉腔的高光谱成像新方法进行了研究,利用对称楔形干涉器的光程差与视场角关联调制的思想,实现了一种直线光路、新型便携的光谱成像系统。详细论述了干涉腔楔角、反射率以及成像物镜参数的设计方法,并利用 Zemax 软件对光学系统进行了原理仿真和像差分析。此外,研究了光谱复原原理,并通过算法仿真验证了光谱复原算法的可行性。按照设计后的干涉系统模型研制了原理样机,对激光光源和实际场景目标进行了光谱成像实验,得到了较好的实验结果。由于分析过程中近似处理的影响,目前所研究的干涉成像系统仍存在需要改善的问题,下一步的工作将会改进技术方案和深化研究,针对条纹非正弦性问题建立适当的物理模型进行光谱反演。另外,去除中继镜并将干涉器直接放置于探测器靶面前,进一步实现系统的小型化也是下一步的工作方向。

参 考 文 献

- 1 Cabib D, Buckwald R A, Garini Y, *et al.*. Spatially resolved Fourier transform spectroscopy (spectral imaging): A powerful tool for quantitative analytical microscopy[C]. SPIE, 1996, 2678: 278-291.
- 2 Harvey A R, Holmes D W F. Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer [J]. Optics Express, 2004, 22(12): 5368-5374.
- 3 Horton R F. Optical design for a high etendue imaging Fourier transform spectrometer[C]. SPIE, 1996, 2819: 300-315.
- 4 Posselt W, Holota K, Tittel H O, *et al.*. Compact fourier transform imaging spectrometer for remote sensing[C]. Fourier Transform Spectroscopy (FTS), 2001, FMD10.
- 5 Dong Ying, Xiang Libin, Zhao Baochang. Lateral shearing interferometer in large aperture static imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(11): 991-995.
董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪中的横向剪切干涉仪[J]. 光子学报, 1999, 28(11): 991-995.
- 6 Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on re-imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1230001.
李建欣, 孟 鑫, 周 伟, 等. 基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1230001.
- 7 Meng Xin, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Compressive sampling recovery method of narrow-band hyperspectral interferometric imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 33(1): 0130001.
孟 鑫, 李建欣, 朱日宏, 等. 窄带高光谱干涉成像的压缩采样复原方法[J]. 光学学报, 2012, 33(1): 0130001.
- 8 Li Jianxin, Zhou Wei, Meng Xin, *et al.*. Hyperspectral microscopic imaging based on image plane interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1211005.
李建欣, 周 伟, 孟 鑫, 等. 基于像面干涉的高光谱显微成像方法[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1211005.
- 9 Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Sun Yao, *et al.*. Novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement savart polariscope[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 643-646.
简小华, 张淳民, 孙 尧, 等. 一种可调横向剪切量的新型偏振干涉成像光谱仪[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 643-646.
- 10 Xiang Libin, Yuan Yan, Lü Qunbo. Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5399-5405.
相里斌, 袁 艳, 吕群波. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5399-5405.
- 11 Li Suning, Zhu Rihong, Gao Zhishan, *et al.*. Fourier conjugate correction spectral reconstruction for Fourier-transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412010.
李苏宁, 朱日宏, 高志山, 等. 共轭傅里叶变换校正成像光谱重构[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412010.
- 12 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiang Libin, *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 192-197.
张淳民, 赵葆常, 相里斌, 等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算[J]. 光学学报, 2001, 21(2): 192-197.
- 13 Zhang Chunmin, Liu Ning, Wu Fuquan. Analysis and calculation of Glan-Taylor prism's transmittance at full angle of view in a

- polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 949–957.
- 张淳民, 刘 宁, 吴福全. 偏振干涉成像光谱仪中格兰-泰勒棱镜全视场角透过率的分析与计算[J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 949–957.
- 14 Li Jie, Zhu Jingping, Zhang Yunyao, *et al.*. Spectral zooming birefringent imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024205.
- 李 杰, 朱京平, 张云尧, 等. 光谱分辨率可调的新型干涉成像光谱技术研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024205.
- 15 Du Shusong, Wang Yongmei, Tao Ran. Multiple beam interferential spectral imaging technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0830003.
- 杜述松, 王咏梅, 陶 然. 多光束干涉光谱成像技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0830003.
- 16 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.*. Study of the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0330001.
- 刘 洋, 廖宁放, 白延柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0330001.
- 17 Posselt W, Tittel H, Rost M, *et al.*. The imaging FT spectrometer FTIS[C]. *Fourier Transform Spectroscopy (FTS)*, 2003: FMB2.
- 18 Lucey P G, Akagi J. A Fabry-Perot interferometer with a spatially variable resonance gap employed as a Fourier transform spectrometer [C]. *SPIE*, 2011, 8048: 80480K.
- 19 Pisani M, Zucco M. Compact imaging spectrometer combining Fourier transform spectroscopy with a Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8319–8331.
- 20 Antila J, Mannila R, Kantojarvi U, *et al.*. Spectral imaging device based on a tuneable MEMS Fabry-Perot interferometer [C]. *SPIE*, 2012, 8374: 83740F.
- 21 Meng Xin, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Near-field mechanism research on hyperspectral image plane interferometric imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0230001.
- 孟 鑫, 李建欣, 朱日宏, 等. 高光谱像面干涉的近场成像机理研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0230001.
- 22 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiang Libin. Influence of polarized direction on modulation depth of a polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(8): 1077–1083.
- 张淳民, 赵葆常, 相里斌. 偏振干涉成像光谱仪中偏振化方向对调制制度的影响[J]. *光学学报*, 2000, 20(8): 1077–1083.
- 23 Fu Qiang, Xiang Libin, Jing Juanjuan, *et al.*. Design of a dual-channel Mach-Zehnder lateral shearing interferometer for the large aperture static imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(2): 553–557.
- 付 强, 相里斌, 景娟娟, 等. 大口径静态干涉成像光谱仪中双通道 Mach-Zehnder 横向剪切干涉仪的设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2): 553–557.
- 24 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 324–333.
- 玻恩, 沃尔夫. *光学原理*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 324–333.
- 25 Kajava T T, Lauranto H M, Friberg A T. Interference pattern of the Fizeau interferometer[J]. *JOSA A*, 1994, 11(7): 2045–2054.
- 26 Gillard F, Ferrec Y, Gueriné N, *et al.*. Angular acceptance analysis of an infrared focal plane array with a built-in stationary Fourier transform spectrometer[J]. *JOSA A*, 2012, 29(6): 936–944.
- 27 Xu Jinyong, Sun Peijia. *Optics Designing*[M]. Beijing: National Defence Industry Press: 1989: 59–61.
- 徐金镛, 孙培家. *光学设计*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 59–61.

栏目编辑: 吴秀娟