

文章编号: 1672-8785(2020)05-19-05

红外带通滤光片 77 K 光谱漂移 特性实验研究

田 亚 张 磊 林国画 方志浩 付志凯

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 红外带通滤光片是决定红外探测器组件光谱响应范围的重要元件。滤光片光谱的截止波长在低温下会产生漂移, 从而影响组件的光谱响应范围。为探究滤光片在低温下的光谱漂移情况, 选取了几种典型的红外带通滤光片, 并分别在常温和 77 K 温度下使用自制的低温光谱测试杜瓦对其进行了光谱测试。结果表明, 低温下滤光片的前截止波长均向短波方向漂移。该漂移量的大小主要与工作波段有关。工作波长越长, 漂移量越大。中波红外带通滤光片的截止波长在低温下的漂移量小于 100 nm。基片材料对截止波长漂移的影响较小。该结论对于红外探测器滤光片的光谱设计具有重要的参考价值。

关键词: 红外; 带通滤光片; 低温; 光谱漂移

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.05.003

Experiment Research on Spectrum Drift Characteristic at 77 K of Infrared Band-Pass Filters

TIAN Ya, ZHANG Lei, LIN Guo-hua, FANG Zhi-hao, FU Zhi-kai

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Infrared band-pass filters are important components of infrared detectors to determine spectral response range. But cutoff wavelengths of the spectrum of infrared band-pass filters drift at low temperature, which influences spectral response range of infrared detectors. In order to explore the spectrum drift of the filters at low temperature, several typical infrared band-pass filters are selected and the self-made low temperature spectral test dewar is used to carry out spectral test at room temperature and 77 K respectively. The results show that the front cutoff wavelengths of tested filters all drift toward short wavelength direction at low temperature, and the drifts are mainly related to the waveband of filters. The drifts increase as the waveband increases. The drift of the cutoff wavelength of the medium band-pass filter is less than 100 nm at low temperature. The substrate material has little influence on the cutoff wavelength drift. The conclusion has important reference value for the spectral design of infrared detector filters.

Key words: infrared; band-pass filter; low temperature; spectrum drift

收稿日期: 2020-04-24

作者简介: 田亚(1994-), 女, 硕士, 河北保定人, 主要从事红外探测器封装和光学测试方面的工作。
E-mail: tyathic@163.com

0 引言

红外探测器广泛应用于监视、预警、制导、气象、遥感等领域^[1-4]。近年来,随着应用的不断拓展,系统对红外探测器光谱响应范围的指标要求越来越苛刻,比如航天用红外探测器对截止波长的误差要求一般为 ± 50 nm。红外探测器的光谱响应范围由探测器芯片、滤光片和窗片共同决定。在光谱设计过程中,结合探测器芯片的光谱响应范围并对滤光片和窗片的光谱进行组合设计,使组件整体的光谱响应范围满足要求。因此,透过率和截止波长是滤光片与窗片的主要参数。

滤光片一般工作在 77 K 甚至更低的温度下,所以它也称为低温滤光片。许多研究表明,低温下滤光片光谱的截止波长往往会发生漂移,从而影响带通滤光片的光谱特性。中国科学院上海技术物理研究所研究了低温下热应力对红外滤光片光谱漂移的影响。结果表明,热应力对红外滤光片光谱漂移的影响极小,85 K 下锗片的光谱漂移量只有 5.4 nm^[5]。中国空空导弹研究院对滤光片进行了液氮冲击,并测试了其物理性能和光谱性能。实验结果表明,滤光片膜层的低温可靠性很好,但是经过液氮冲击后其中心波长发生了偏移且透过率有所下降^[6]。中国空间技术研究院从滤光片膜系设计的角度研究了长波红外带通滤光片在 290 K 和 105 K 下的光谱漂移特性,并利用导纳法建立了光谱漂移模型。他们指出,低温下的光谱变化特性主要是膜层材料折射率的变化以及膜层高与低折射率的相对变化共同作用的结果^[7]。蔡渊等人以锗为基片镀制了中波滤光

片,并测试了 92 K 下的光谱曲线。结果表明,低温下光谱向短波方向漂移了 45 nm 左右^[8]。许荣国等人介绍了一种滤光片变温光谱测试方法,并可以从室温测量到 700 °C^[9],但是并未说明该方法在低温下能否适用。目前,人们已经对滤光片在低温下的光谱漂移进行了很多理论研究^[10-12],但是由于无法获得模型计算所需的膜层参数,使用者很难预知滤光片在低温下的光谱漂移。中国空空导弹研究院虽然用液氮进行了冲击^[6],但是在光谱测试中滤光片达到的温度情况并不明确,且液氮冲击后进行光谱测试时滤光片表面是否因为低温而有水汽凝结并不清楚。这些都会对滤光片的光谱产生影响^[10]。目前,很多滤光片的生产厂家和使用者都缺少对其进行低温光谱测试的条件。这给滤光片的光谱设计和使用带来了极大的困难和风险。

本文选取以锗、蓝宝石和硒化锌为基片的红外带通滤光片,研究了不同波段和不同基片的滤光片在常温和 77 K 低温下的光谱漂移特性,并分析了基片和波段对光谱漂移的影响。该研究对红外滤光片的光谱设计具有重要意义。

1 实验方案

本实验选取以锗、蓝宝石和硒化锌三种材料为基片的滤光片,它们涵盖了中波红外、长波红外和甚长波红外三个波段。表 1 列出了这些滤光片的具体参数。

在原有中测杜瓦的基础上,对低温光谱测试杜瓦进行了设计改造(见图 1)。杜瓦的窗座由原来的顶部单侧透光结构改为侧面贯通结

表 1 待测滤光片的具体参数

编号	尺寸/mm	基片材料	波段
Ge-MW	$\phi 12.4 \times 0.3$	锗	中波红外
Ge-LW	$\phi 12.4 \times 0.3$	锗	长波红外
Ge-VLW	$\phi 12 \times 2$	锗	甚长波红外
ZnSe-MW	$\phi 20 \times 2$	硒化锌	中波红外
Sapphire-MW	$\phi 12.4 \times 0.3$	蓝宝石	中波红外

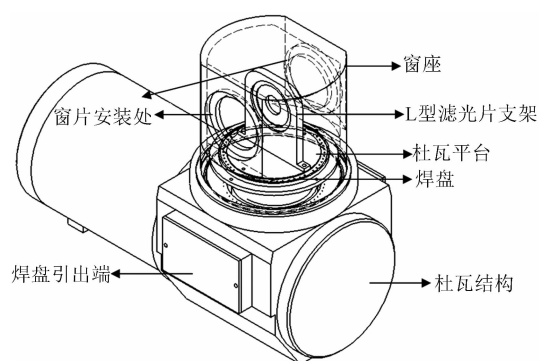


图 1 低温测试杜瓦的结构图

构, 侧面开口上安装宽带通硒化锌窗片, 以实现对中波红外到甚长波红外滤光片的光谱测量。杜瓦平台和 L 型滤光片支架通过螺钉进行固定。L 型滤光片支架采用热传导性能良好的铝材料。滤光片上用低温导热胶粘接两个测温二极管。二极管引线通过焊接固定在杜瓦内部的焊盘上。该焊盘的管脚和外部焊盘引出端的管脚一一对应, 因此可通过用万用表对相应的引线管脚进行测量来实现对温度的实时监测。

光谱测量采用 Bruker Vertex80 傅里叶变换红外光谱仪。测试时, 用低温导热胶将待测滤光片粘接在滤光片支架上。待导热胶固化后, 通过杜瓦平台上的定位螺丝将滤光片的中心对准安装窗口的中心。安装好窗座后, 对杜瓦结构进行抽真空处理。首先测量室温下滤光片的光谱, 随后在杜瓦内倒入液氮来制冷。当测温二极管反馈的电压值达到 1.056 V (温度

约为 77 K) 时, 稳定 5 min 后再测量滤光片在低温下的光谱。图 2 所示为 Ge-MW 滤光片在室温和低温下的光谱。其中, 前后截止波长的定义为透过率在光谱峰值透过率 50% 处所对应的波长。

2 实验结果及分析

表 2 列出了以锗为基片的中波红外、长波红外和甚长波红外滤光片以及以硒化锌、蓝宝石为基片的中波红外滤光片在低温下的光谱漂移量。其中, “-” 表示光谱向短波方向漂移, “+” 表示光谱向长波方向漂移。

根据实验数据, 红外带通滤光片在低温下的光谱漂移呈现出以下几种特性:

(1) 漂移方向: 中波红外、长波红外和甚长波红外带通滤光片的前截止波长在低温下均向短波方向漂移, 而甚长波红外滤光片的后截止波长在低温下则朝长波方向漂移。

(2) 漂移量: 同一基材的滤光片在不同波段的漂移量有显著差异。长波红外滤光片的光谱漂移量低于甚长波红外滤光片, 而又高于中波红外滤光片。中波红外滤光片在低温下的前后截止波长漂移量为 40 nm 左右, 而长波红外和甚长波红外滤光片在低温下的前截止波长漂移量分别为 136 nm 和 213 nm。

(3) 带宽变化: 滤光片在低温下的光谱漂移还会给光谱带宽带来影响。中波红外和长波

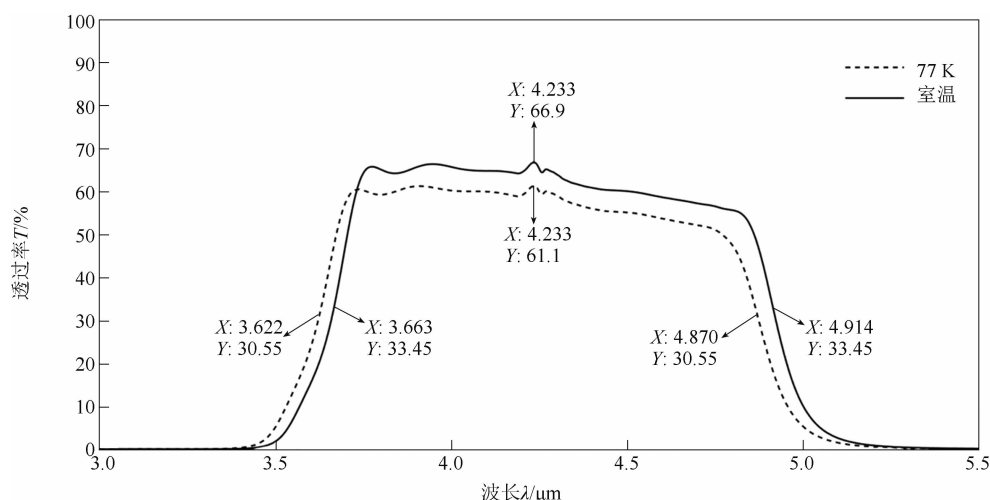


图 2 Ge-MW 滤光片在室温和 77 K 下的光谱

表 2 滤光片在常温和 77 K 下的光谱漂移参数

滤光片	常温		低温		前截止波长 漂移量/nm	后截止波长 漂移量/nm
	前截止 波长/nm	后截止 波长/nm	前截止 波长/nm	后截止 波长/nm		
Ge-MW	3663	4914	3622	4870	-41	-44
Ge-LW	7570	9826	7434	9678	-136	-148
Ge-VLW	10892	14979	10679	15139	-213	160
ZnSe-MW	3370	3681	3319	3636	-51	-45
Sapphire-MW	3040	5111	2980	5068	-60	-43

红外滤光片的前后截止波长的同向漂移使得光谱的带宽变化小于 20 nm。而由于前后截止波长的漂移方向相反,甚长波红外滤光片的光谱带宽变化则大于 350 nm。

(4) 基片材料: 从表 2 中锗、蓝宝石和硒化锌三种材料的中波红外滤光片在低温下的光谱漂移情况可以看出,材料对滤光片的影响并不大。同一波段下,三种材料的滤光片的前后截止波长均向短波方向漂移,而且蓝宝石滤光片的截止波长漂移量大于锗和硒化锌,但是它们之间的差异小于 20 nm。

光谱漂移主要是由于膜层的光学常数和厚度在低温下发生变化而导致的^[10-12]。测试结果表明,由于低温下膜层的光学厚度减小,光谱普遍向短波方向漂移;但对于部分红外薄膜材料来说,温度降低时光学厚度反而增加,光谱则朝长波方向漂移^[13-15]。由工作波段引起的漂移量差异可能与膜层厚度的变化有关。镀膜时膜层厚度随着工作波段的增大而增加,导致低温下膜层厚度的变化量增大,从而使得截止波长的漂移量也增加。

3 结论

本文选取了几种典型的红外带通滤光片并对其进行了 77 K 低温光谱测试。结果表明,低温下中波红外、长波红外和甚长波红外滤光片的前截止波长均向短波方向漂移。中波红外波段下,基板材料对低温下光谱漂移的影响较小。不同工作波段的光谱漂移情况差异显著,前截止波长的漂移量随着波长的增大而增加。

一般来说,中波红外滤光片的光谱漂移量小于 100 nm,而长波红外和甚长波红外滤光片的光谱漂移量在 100 nm 以上。滤光片的光谱漂移量与其膜层材料有重要关系。通过进一步探究膜层材料对滤光片光谱漂移量的影响,也许可以更加准确地预估滤光片在低温下的漂移量。

参考文献

- [1] 曹红红. 红外探测器用滤光片的技术现状及应用 [J]. 红外, 2017, 38(1): 43-48.
- [2] 唐晋发, 顾培夫. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [3] 段微波, 刘定权, 张凤山. FY-2 气象卫星扫描辐射计可见-近红外窗口滤光片的研制 [J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 113-117.
- [4] 陈朝平, 师建涛, 郭芮, 等. 中红外带通滤光片的设计与制备 [J]. 应用光学, 2012, 33(3): 595-598.
- [5] 汪洋, 王小坤, 陈安森, 等. 红外滤光片低温光谱特性研究 [J]. 光学与光电技术, 2013, 11(6): 29-32.
- [6] 陈凤金, 马胜昔, 苏现军, 等. 低温对中波红外带通滤光片光谱特性的影响 [J]. 应用光学, 2015, 36(4): 635-638.
- [7] 熊玉卿, 李少梅, 罗崇泰, 等. 碲化铅/硫化锌红外多层滤光片的光谱漂移研究 [J]. 光学技术, 1999, 7(4): 65-67.
- [8] 蔡渊, 刘定权, 罗海瀚. 3.5 μm ~4.0 μm 低温光谱带通滤光片设计与研制 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 158-162.
- [9] 许荣国, 王雷, 阴万宏, 等. 红外光学材料透过率温度特性测量方法 [J]. 应用光学, 2013, 34

- (6): 1000–1004.
- [10] 蔡渊. 红外双色滤光片的研制及其低温光谱研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- [11] Icenogle H W, Platt B C, Wolfe W L. Refractive indexes and temperature coefficients of germanium and silicon [J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(10): 2348–2351.
- [12] Varshni Y P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors [J]. *Physica*, 1967, **34**(1): 149–154.
- [13] Li B, Zhang S Y, Jiang J, et al. Improving low-temperature performance of infrared thin-film interference filters utilizing the intrinsic properties of IV–VI narrow-gap semiconductors [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(3): 401–404.
- [14] Belyaeva A I. Multilayer coatings—the basis for cryogenic infrared filters: technology, peculiarities, and possibilities for application [C]. *SPIE*, 1999, **3793**: 351401.
- [15] Feng W T, Yan Y X. Spectral performance of multilayer filters at cryogenic temperature [C]. *SPIE*, 1993, **1765**: 131–135.