

InGaAs 探测器片上集成滤光膜的微结构与性能

王云姬^{1,2} 唐恒敬^{1,2} 李 雪^{1,2} 段微波^{1,2} 刘定权^{1,2} 龚海梅^{1,2}

(¹中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083
²中国科学院上海技术物理研究所红外成像材料和器件重点实验室, 上海 200083)

摘要 为了适应未来红外焦平面探测器系统小型化、集成化和高精度的发展要求,采用了热蒸发方法分别在 InP 衬底和 InGaAs 探测器上实现了中心波长为 1.38 μm 滤光膜的片上集成。利用偏光显微镜、原子力显微镜 (AFM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 以及红外傅里叶光谱 (FTIR) 等实验手段研究了滤光膜的表面界面形貌和光学性能,结果显示,滤光膜为法布里-珀罗三谐振腔结构,与膜系设计一致;滤光膜中心波长为 1.38 μm ,透射率在 60% 左右。对集成滤光膜 InGaAs 器件的电学和光学性能测试分析表明,滤光膜制备工艺对器件的电流电压特性和噪声基本没有影响;而集成滤光膜器件的响应要优于滤光膜分离器件的性能。

关键词 探测器;法布里-珀罗滤光膜;热蒸发法;三谐振腔

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0507002

Microstructure and Performance of the Integrated Filter Film on InGaAs Detector

Wang Yunji^{1,2} Tang Hengjing^{1,2} Li Xue^{1,2} Duan Weibo^{1,2}

Liu Dingquan^{1,2} Gong Haimei^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China
² Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract For compact, low-cost and high-precision consideration, the filter films centered on 1.38 μm are fabricated on InP substrates and InGaAs detector by thermal evaporation. The optical properties, surface and interface morphology of the films are investigated by polarized light microscope, atomic force microscope (AFM), scanning electron microscope (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). It shows that the filter film contains a three-cavity Fabry-Perot structure, the same with the design, the centralwavelength of the passband is 1.38 μm and the peak of transmission is around 60%. Tested electrical performance results reveal that the fabrication process has no effect on current-voltage characteristics and noise of the device. The optical response testing shows that the integrated device has a better performance than the device separated with the filter film.

Key words detectors; Fabry-Perot filter film; thermal evaporation; three resonant cavity

OCIS codes 130.3120; 040.30660; 130.3060; 230.0040

1 引 言

为了适应未来红外探测系统集成化、低功耗、高探测精度的发展要求,将滤光阵列集成于探测器成

为一种发展趋势^[1,2]。集成通常有两种方法:一种是将微型阵列滤光片作为独立器件与探测器胶结在一起^[3,4];另外一种是实现滤光片在探测器芯片上

收稿日期: 2011-11-30; 收到修改稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61007067)资助课题。

作者简介: 王云姬(1987—),女,博士研究生,主要从事短波红外探测器方面的研究。E-mail: wangyun_ji@126.com

导师简介: 龚海梅(1965—),男,博士,研究员,主要从事航天遥感红外光电传感器研制等方面的研究。

E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn

的单片集成^[5~7]。两者皆有优缺点,前者工艺简单,成本较低,但是精度和光学效率较低;后者具有较高的精度和光学效率,但是工艺复杂,成本较高^[8]。

工作波段在 0.9~1.7 μm 的 InGaAs 探测器具有非制冷室温工作、探测率高、均匀性好等优点,在航空航天、气体探测和化学成分检测等领域具有广阔的应用前景^[9]。在航天遥感应用中,中心波长 1.38 μm 的工作波段在近红外探测中具有重要应用价值,如 1.325~1.395 μm 波段可用于区分云、雾和卷云的探测和土壤湿度、植被的探测。因此,实现 1.38 μm 滤光膜在 InGaAs 近红外探测器上的单片集成,显然具有非常重要的应用价值。

本文采用热蒸发法在 InP 衬底和 InGaAs 探测器芯片上集成了 1.38 μm 的滤光膜,表征了滤光膜的表面和界面形貌,并测试了滤光膜的光学性能和集成滤光膜器件的性能,为实现多谱段滤光阵列在 InGaAs 探测器上的片上集成提供了一定的参考价值。

2 实 验

采用美国 SCI 公司 Filmwizard 软件设计多层滤光膜,选择 Si 和 SiO_2 分别作为高低折射率材料,采用三谐振腔的结构对滤光膜的矩形度进行调制,膜系设计为 $\text{Sub}|1\text{L } 1\text{H } 1\text{L}(1\text{L } 1\text{H } 1\text{L } 1\text{H } 1\text{L } 1\text{H } 1\text{L})^2 1\text{L } 1\text{H } 1\text{L } 1\text{H } 1\text{L}| \text{Air}$,其中 Sub 表示基底材料,H 表示高折率材料 Si,L 表示低射率材料 SiO_2 ,2L 层是谐振腔间隔层。

分别在双面抛光的 10 mm \times 10 mm 的 Si-InP 衬底和光敏元大小为 51 $\mu\text{m}\times$ 51 μm 的器件上制备了 1.38 μm 滤光膜。采用 4 组 InP 衬底,编号分别为 S1,S2,S3 和 S4。制备条件为:生长温度 170 $^\circ\text{C}$,真空度 3×10^{-3} Pa,Si 和 SiO_2 的蒸发速率分别为 0.4 nm/s 和 0.8 nm/s。采用宝石片作为监控片,使得滤光膜的中心波长在 1.38 μm 。

采用光学显微镜观察了滤光膜的表面形貌,采用 FEI 公司的 SIRION200 型扫描电子显微镜(SEM)表征滤光膜的界面状况。滤光膜的表面形貌和粗糙度通过 NanoScope IV 型原子力显微镜(AFM)进行测试。采用红外傅里叶光谱(FFITR)仪测试了滤光膜的透射特性,并对集成滤光膜器件进行了电学(I-V)和噪声测试。

3 滤光膜性能分析

对 InP 衬底上滤光膜的表面界面形貌表征和光学性能测试显示,滤光膜表面较平整,且为三谐振腔

结构,中心波长为 1.38 μm 左右,透射率为 60%左右,基本与设计一致。

3.1 滤光膜的结构与形貌

在偏光显微镜下观察滤光膜,发现滤光膜表面较平整,局部存在一些凹陷与凸起,可能与 InP 衬底的表面缺陷有关。采用原子力显微镜表征滤光膜的表面形貌,提取滤光膜表面形貌的均方根(RMS)粗糙度如表 1 所示。可见滤光膜表面局部粗糙度较小。

表 1 滤光膜表面形貌的均方根粗糙度

Table 1 RMS roughness of the filter film

Sample	S1	S2	S3	S4
RMS /nm	4.239	1.336	1.773	1.436

图 1 为 Su-InP 衬底上滤光膜表面形貌的扫描电镜照片,表 2 为提取的滤光膜总厚度和间隔层厚度。4 组样品的滤光膜厚度在 4.5 μm 左右,但略有差异,滤光膜总厚度大,间隔层厚度也大。

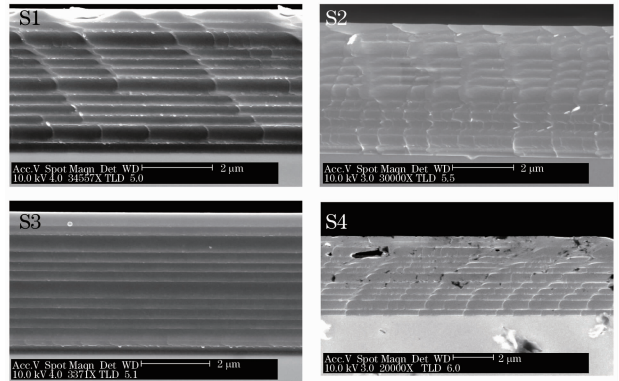


图 1 滤光膜界面 SEM 照片

Fig. 1 SEM photos of the filter film

表 2 滤光膜层厚度和间隔层厚度

Table 2 Thicknesses of the total filter film and the cavity

Sample	S1	S2	S3	S4
Total thickness / μm	4.44	4.69	4.54	4.49
Thickness of the cavity / μm	0.537	0.575	0.562	0.553

3.2 滤光膜的光谱特性

采用傅里叶光谱仪测试了 4 组样品的透射光谱如图 2 所示,表 3 为提取的各组样品的中心波长、峰值透射率和半峰全宽(FWHM)。由表 3 可以看出,样品的中心波长在 1.38 μm 附近,峰值透射率在

表 3 各组样品的光学参数

Table 3 Optical parameters of the four samples

Sample	Centre wavelength / μm	Transmission peak /%	FWHM /nm
S1	1.378	59.6	23.4
S2	1.420	61.9	42.6
S3	1.39	68.0	30.6
S4	1.386	55.5	22.4

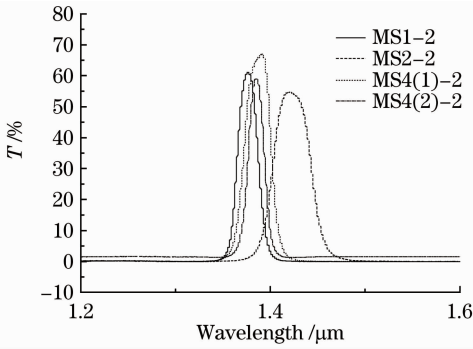


图 2 4 组样品的透射图谱

Fig. 2 Transmission spectra of the four samples

60%左右。

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \left(\phi_1 + \phi_2 - 2 \frac{2\pi nd}{\lambda} \right) = -k\pi, \quad (1)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + [(\phi_1 + \phi_2)/(2\pi)]} = \frac{2nd}{m}, \quad (2)$$

式中 $m = k + (\phi_1 + \phi_2)/(2\pi)$, 其中 ϕ_1 和 ϕ_2 为反射膜系的反射相位。滤光片的半峰全宽是在 $T_{\max}/2$ 处的波长位置之差^[10],

$$2\Delta\lambda = \frac{2\lambda_0}{m\pi} \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{F}}\right) = \frac{4nd}{m^2\pi} \arcsin\left(\frac{1-R}{2R^{1/2}}\right), \quad (3)$$

由(3)式可知,中心波长的位置由间隔层厚度所决定,将中心波长和半峰全宽对间隔层厚度做图如图3所示。可以看出中心波长和半峰全宽都随间隔层厚度增加而增加,实验与理论基本吻合。

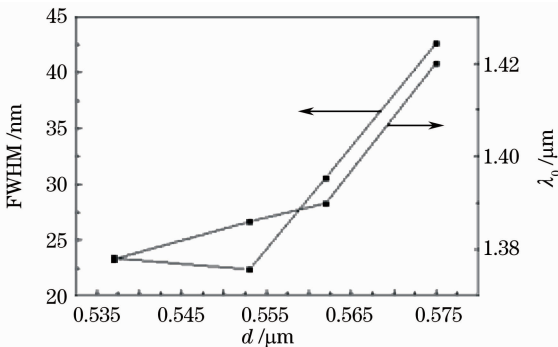


图 3 中心波长及半峰全宽与间隔层厚度的关系

Fig. 3 Centre wavelength and FWHM as a function of the cavity thickness

4 滤光膜制备工艺对集成器件性能的影响

分别制备了集成 $1.38 \mu\text{m}$ 滤光膜器件 M1 和独立器件 M2,并测试其光电性能,研究滤光膜制备工艺对器件性能的影响。

4.1 滤光膜制备工艺对器件电学性能的影响

抽测 M1 和 M2 各四元,器件的室温基本重合,器件零偏电阻略有差异,分别为 $3.03 \times 10^8 \Omega$ 和 $2.74 \times 10^8 \Omega$ 。如表 4 所示,器件噪声相差不大。由滤光膜均匀性测试结果显示,滤光膜的均匀性较好,故滤光膜位置即使不一样,也基本不会引起噪声的不同。

表 4 器件中光敏元的噪声

Table 4 Noise of the device

Sample	M39P-1noise / μV	M39-1.38-1noise / μV
1	88	94
2	88	94
3	88	88
4	94	88

4.2 滤光膜制备工艺对集成器件光学响应的影响

测试集成滤光膜器件的归一化响应光谱如图 4 所示,响应的中心波长在 $1.40 \mu\text{m}$,半峰全宽约 30 nm 。在 M2 器件上放置一片 InP 衬底镀滤光膜样片,测试该器件的信号为 11.8 mV ;在相同的测试条件下,测得集成滤光膜 M1 器件的响应信号为 13.8 mV ,说明集成滤光膜器件的响应优于与滤光膜分离器件的性能。

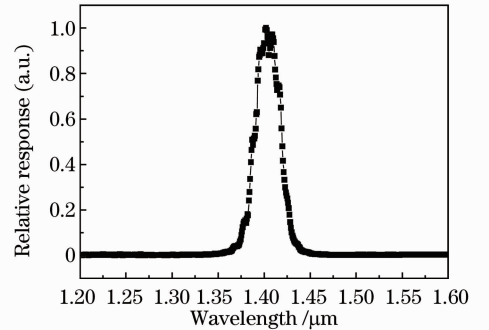


图 4 集成滤光膜器件的归一化响应光谱

Fig. 4 Response spectra of the integrated filter films device

5 结 论

采用热蒸发法在 InP 衬底 InGaAs 探测器上集成了 $1.38 \mu\text{m}$ 的滤光膜。对滤光膜的光学测试显示,滤光膜中心波长为 $1.38 \mu\text{m}$,透射率在 60%左右。对集成滤光膜器件的测试显示,滤光膜工艺对器件性能影响较小,而集成滤光膜器件的响应要优于滤光膜分离器件的性能。

参 考 文 献

1 C. J. Ke, X. J. Yi, J. J. Lai *et al.*. Design, fabrication, and

- integration technology of large-scale microlens array for infrared charge coupled device application [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 2004, **25**(3): 439~449
- 2 V. Gruev, A. Ortu, N. Lazarus *et al.*. Fabrication of a dual-tier thin film micropolarization array[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4994~5007
- 3 J. J. Lai, H. F. Liang, Z. P. Zhou *et al.*. Patterning of visible/infrared dual-band microstrip filter arrays for multispectral imaging application [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2009, **19**(8): 085004
- 4 N. S. Gluck, R. B. Bailey, R. D. Rosa *et al.*. Two-color imaging by the use of patterned optical filters bonded to focal-plane-array detectors [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35** (28): 5520~5523
- 5 H. C. Liu, C. Y. Song, A. Shen *et al.*. GaAs/AlGaAs quantum-well photodetector for visible and middle infrared dual-band detection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77** (16): 2437~2439
- 6 J. Antoszewski, K. J. Winchester, A. J. Keating *et al.*. A monolithically integrated HgCdTe SWIR photodetector and tunable MEMS-based optical filter [C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 719~727
- 7 M. Bartek, I. Novotny, J. H. Correia *et al.*. Quality factor of thin-film Fabry-Perot resonators: dependence on interface roughness [J]. *Physical Sensors and Systems*, 1999, **13P33**: 523~526
- 8 Haiyan Chen. Optimal design of thin film filters for IR integrated photonic amplifiers[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **26**(8): 1141~1150
- 9 Howard W. Yoon, Matt C. Dopkiss, George P. Eppeldauer. Performance comparisons of InGaAs, extended InGaAs, and short-wave HgCdTe detectors between 1 μm and 2.5 μm [C]. *SPIE*, 2006, **6297**: 1~10
- 10 Tang Jingfa, Gu Peifu. Film Optics and Technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1999. 100~119
唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1999. 100~119

栏目编辑: 韩 峰