

由光谱响应选择红外探测器滤光片

司俊杰

(河南省洛阳市光电研究中心, 河南, 洛阳, 471009)

摘要: 通过对 SPR 制冷型 InSb 红外光伏探测器相对光谱响应的测试及滤光片透过率谱的测试, 发现了场镜、滤光片、红外探测器组合件的光谱响应同滤光片技术条件的关系和差别.

关键词: 红外探测器, 滤光片, 光谱响应.

引言

探测器工作波段一般受带通滤光片限制^[1]. 以前均以垂直入射光为基准对滤光片技术指标提出设计要求, 并根据探测器的光谱响应来确定. 本文以我们研制的 SPR 制冷型 InSb 光伏探测器为例, 说明对带有场镜的红外探测器组合件, 要根据整体光学结构和光路、对入射光能量的划分、相应的滤光片透射率谱的变化及制冷光伏 InSb 芯片的光谱响应等对滤光片的技术指标进行检测并提出要求.

1 实验与计算

1.1 光路计算

对于 SPR 型探测器, 其敏感元及其光学部件如图 1 所示. 其中 $d_1 = 0.24$ mm, $d_2 = 0.69$ mm, $d_3 = 1.19$ mm, $d_4 = 1.14$ mm. 各光学部件参数如表 1 所示.

表 1 SPR 型探测器组件结构参数表
Table 1 Structural parameters of the SPR infrared detector module

名称	r_1 (mm)	r_2 (mm)	d (mm)	R (mm)	材料
场镜 I	∞	-35.63	2	7.1	Ge 单晶
场镜 II	13.42	50.35	1.2	7.1	Ge 单晶
窗口	∞	∞	0.8	16	白宝石
滤光片	∞	∞	0.5	7.0	Ge 单晶
光敏材料	∞	∞	0.6	2.2	InSb 单晶

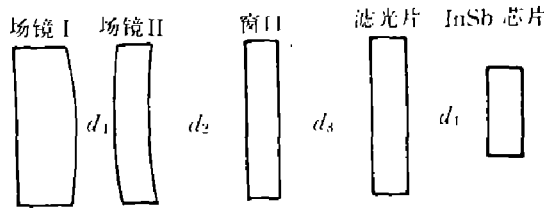


图1 SPR型探测器组件光学结构示意图
Fig. 1 Illustration of the optical structure of the SPR infrared detector module

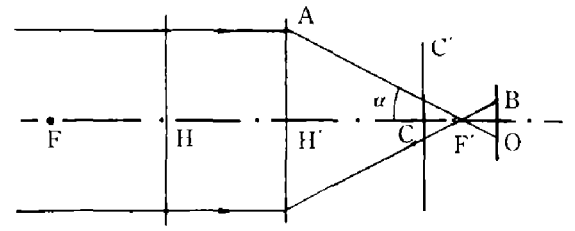


图2 计算所得SPR探测器平行光入射时光路图
Fig. 2 Calculated parallel incident light line of the SPR infrared detector

表1中 r_1 、 r_2 分别为各元件前、后表面的曲率半径； d 为厚度， R 为通光口径。由于窗口及滤光片均为平板型，故光路中对光线入射角起作用的是两个场镜。由^[2]。

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n - 1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} = -\frac{1}{f} \tag{1}$$

得，对于场镜 I，物方焦距 $f_1 = -11.877 \text{ mm}$ ，象方焦距 $f'_1 = 11.877 \text{ mm}$ ；对于场镜 II，物方焦距 $f_2 = -5.954 \text{ mm}$ ，象方焦距 $f'_2 = 5.954 \text{ mm}$ 。式(1)中， n 为 Ge 透镜的折射率，在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内取为 4.0， d 为透镜的厚度。由

$$\begin{cases} l_H = \frac{-r_1 d}{n(r_2 - r_1) + (n - 1) \cdot d}, \\ l_{H'} = \frac{-r_2 d}{n(r_2 - r_1) + (n - 1) \cdot d} \end{cases} \tag{2}$$

对于场镜 I，物方主平面位置 $l_{H_1} = 0.5 \text{ mm}$ ，象方主平面位置 $l_{H'_1} = 0$ ；对于场镜 II，物方主平面位置 $l_{H_2} = -0.106 \text{ mm}$ ，象方主平面位置 $l_{H'_2} = -0.399 \text{ mm}$ 。

依光路结构参数可知，两透镜焦点 F'_1 与 F_2 间距为

$$\Delta = -(f_2 + f'_1 - d_2 + l_{H'_2}) = -17.697(\text{mm}). \tag{3}$$

依 Newton 公式，对于场镜 I 与场镜 II 的组合为

$$\begin{cases} f = f_1 f_2 / \Delta, \\ f' = -f'_1 f'_2 / \Delta; \end{cases} \tag{4}$$

经计算可得组合系统物方焦距 $f = -3.996 \text{ mm}$ ，象方焦距 $f' = 3.996 \text{ mm}$ 。由

$$\begin{cases} x_F = f_1 f'_1 / \Delta, \\ x_{F'} = -f_2 f'_2 / \Delta; \end{cases} \tag{5}$$

经计算可得组合系统物方焦点位置 $x_F = 7.971 \text{ mm}$ ，象方焦点位置 $x_{F'} = -2.003 \text{ mm}$ 。

图2是平行光入射时系统的光路图。图2中 F 、 F' 为物、象方焦点； H 、 H' 分别为物、象方主平面位置； CC' 为滤光片位置， OB 为光敏面位置。显然入射光的光阑孔径即由场镜的通光口径所决定。在图2中， $H'A = 3.550 \text{ mm}$ ， $H'F' = 3.996 \text{ mm}$ ， $F'O = 0.723 \text{ mm}$ 。

1.2 滤光片透射率谱测量

滤光片是以单晶 Ge 作基片, 用 SiO 和 Ge 作镀膜材料, 其主膜系为 $\left[\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right]^n$, $\left[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right]^n$, 加上匹配及消次峰层等, 复合膜系近四十层, 以正入射情形为基准而设计. 实验发现, 垂直入射时, 符合探测器光谱响应要求的滤光片, 组装后器件的测试结果并不令人满意. 经检测分析其原因是由于增加场镜后, 光线入射角增大, 导致滤光片透射率谱的变化所致. 我们用 PE-983G 红外分光光度计测量了不同入射角时, 滤光片的透射率谱变化如图 3 所示.

1.3 光能量依入射角的划分

测量红外探测器光谱响应时, 通常以平行光入射. 由图 2 可知, 其光线的最大入射角为

$$\alpha = \arctg \frac{AH'}{H'F'} = 41.62^\circ. \quad (6)$$

此时, 光敏面上入射光斑半径为

$$R = \frac{F'O \cdot AH'}{H'F'} = 0.642(\text{mm}), \quad (7)$$

即光斑位于 InSb 光敏面内, 有效光栏孔径即为场镜通光口径.

由于最大光入射角为 41.62° , 可近似地将光线按 $0 \sim 10^\circ$, $10 \sim 20^\circ$, $20 \sim 41.62^\circ$ 的不同入射角分为三部分, 认为它们分别满足 0° , 15° , 30° 入射角的透过率谱分布, 并以此决定滤光片的总体透射特性. 各部分所占入射光能量的百分比为: 当入射角为 $0 \sim 10^\circ$ 时

$$\rho_1 = \frac{\pi(H'F'\tan 10^\circ)^2}{\pi H'A^2} = 3.939\%; \quad (8)$$

当入射角为 $10 \sim 20^\circ$ 时

$$\rho_2 = \frac{\pi(H'F'\tan 20^\circ - H'F'\tan 10^\circ)^2}{\pi H'A^2} = 4.461\%; \quad (9)$$

当入射角为 $20 \sim 41.62^\circ$ 时

$$\rho_3 = 1 - \rho_1 - \rho_2 = 91.600\%. \quad (10)$$

1.4 探测器相对光谱响应的测试

用 SPEX-1702 型光栅式光谱仪对 SPR 探测器组合件和典型的 InSb 芯片进行了相对光谱响应的测试, 结果如图 4 和图 5 所示.

图 4 中, 曲线 1 为带场镜时的情形, 曲线 2 为不带场镜时的情形. 图 5 为 77K 下光伏型 InSb 芯片的光谱响应曲线.

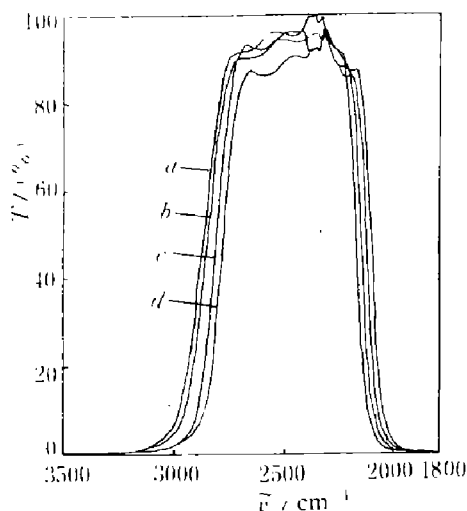


图 3 不同入射角时滤光片透射率谱的变化
 $a = 45^\circ$, $b = 30^\circ$, $c = 15^\circ$, $d = 0^\circ$
 Fig. 3 Variation of transmissivity spectrum of the filter with different incident angles

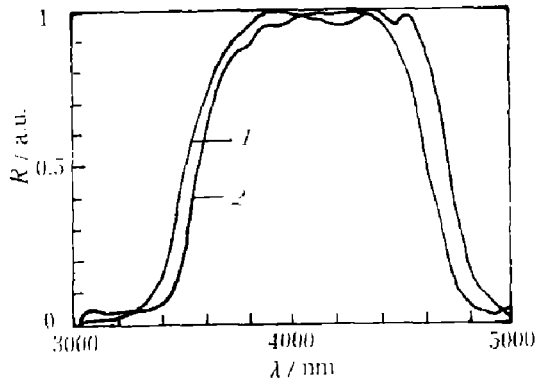


图4 SPR探测器组合件光谱响应曲线比较
Fig. 4 Comparison of relative spectral response curves of the SPR infrared detector module

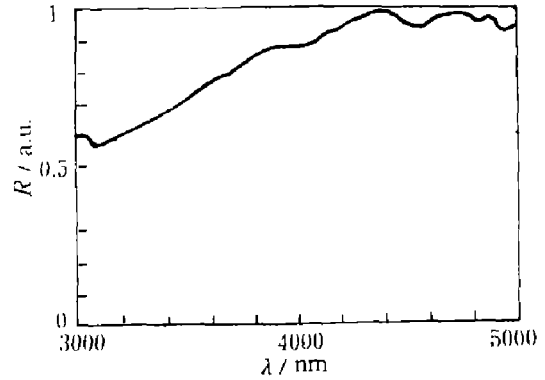


图5 典型致冷光伏InSb芯片的光谱响应曲线
Fig. 5 Typical spectral response curve of the cooled photovoltaic InSb chip

2 分析与讨论

对SPR型探测器,其工作波段要求为 $3.7\sim 4.8\pm 0.1\mu\text{m}$,即在此范围内光谱响应最小值不小于峰值的50%。其前端取决于太阳辐射及天空、云朵对太阳辐射的反射;后端取决于地面,建筑物的自辐射以及其它非目标信号辐射背景的干扰。另一重要指标为其工作波段在小于 $3.5\pm 0.1\mu\text{m}$ 和大于 $5.0\pm 0.1\mu\text{m}$ 时,要求光谱响应小于峰值的10%。

由图4可知,有,无场镜时,探测器组合件的相对光谱响应曲线发生了变化,其变化量如表2所示。

表2 有场镜及无场镜时SPR探测器组合件相对光谱响应参数比较表

Table 2 Comparison of relative spectral parameters of the SPR infrared detector module with and without field lenses

波长(μm)	峰值处	50%峰值处	10%峰值处
无场镜	4.285	3.600, 4.700	3.430, 4.870
有场镜	4.260	3.500, 4.600	3.180, 4.670

由式(8)~(10),我们得滤光片实际透射率谱为

$$T = \rho_1 \cdot T_{0^\circ} + \rho_2 \cdot T_{15^\circ} + \rho_3 \cdot T_{30^\circ}, \quad (11)$$

即 $T = 3.939\%T_{0^\circ} + 4.461\%T_{15^\circ} + 91.600\%T_{30^\circ}$, 其结果如图6所示。

探测器的相对光谱响应曲线,是指等能量相对光谱响应^[3];滤光片的透射率谱线也是相对于光能量而言。显然器件的光谱响应并非滤光片本身透过率特性所能决定,需要同时结合光敏材料的响应特性来决定。将图6中各点与图5中响应点相乘后,经归一化得到探测器组合件相对响应的半理论值,如图7中曲线1所示。图7中曲线2是实测的相对响应。

由图7可见SPR相对光谱响应半理论值与实测值吻合得较好,说明以不同角度的通光面积作为光能量比为原则,由此计算器件光谱响应中滤光片所起的作用是有效的,这是

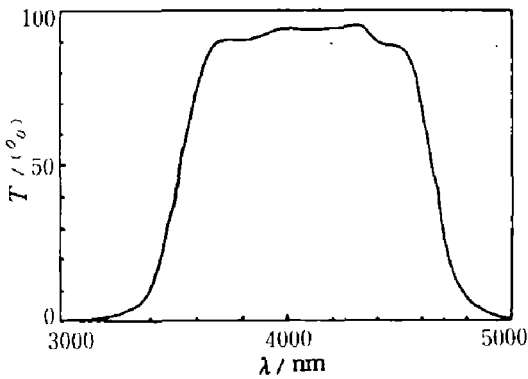


图 6 滤光片的总体透射率谱曲线
Fig. 6 Curve of overall transmissivity spectrum of the filter

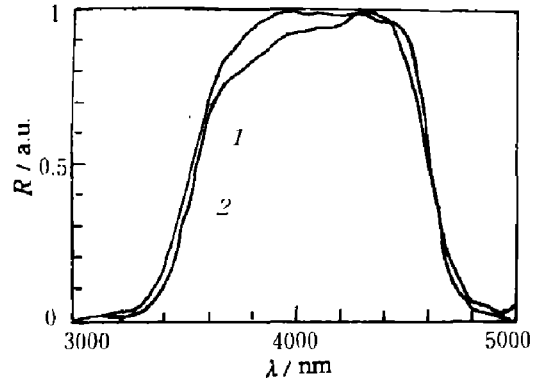


图 7 SPR 探测器组合件相对光谱响应半理论值与实测值的比较
Fig. 7 The semi-theoretical value of relative spectral response of the SPR infrared detector module compared with the measured value

确定滤光片技术指标的一种简便方法. 需要说明的是, 用光线密集程度替代通光面积来衡量光能分配权重将更精确, 因为场镜的光线行进踪迹必须用空间光线追迹的计算方法才能得到, 其结果与理想光组计算结果不同. 图 7 中实测值与半理论值在 $3.9\ \mu\text{m}$ 处的差异, 预计用光线空间追迹法得点列图, 定出精确光能比, 以及考虑场镜本身的透过率谱特性后会得到改善. 作为工程应用中对探测器滤光片技术指标的评价, 本文提供的方法已基本满足需要.

图 8 和图 9 中给出了经修正后, 验证合格的滤光片透过率谱线和探测器组合件的相对光谱响应曲线, 其结果完全符合技术要求.

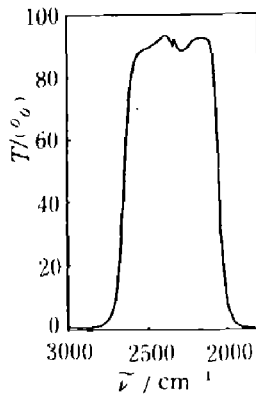


图 8 经修正后的滤光片透过率谱曲线
Fig. 8 The corrected curve of the filter transmissivity spectrum

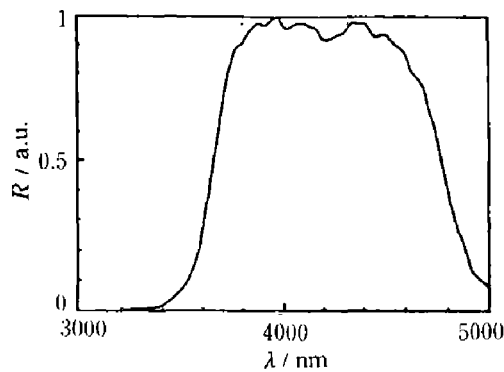


图 9 经修正后 SPR 探测器组合件相对光谱响应曲线
Fig. 9 The corrected curve of the relative spectral response of the SPR infrared detector module

3 结论

(1) 红外探测器组合件中滤光片的技术指标紧密依赖于探测器的光路结构, 所以仅从最终探测器光谱响应特性来考虑是不够的, 要结合不同入射角情况下滤光片透过率谱的变化, 以及光敏材料的响应特性进行综合考虑.

(2) 利用入射光线不同的入射角, 来划分入射光能量. 由探测器的光学结构计算各部分能量所占权重. 依此权重结合不同入射角下不同的透射率谱, 可计算滤光片实际应用中的总体透过率谱线, 并由此计算器件的相对光谱响应值.

致谢: 谢君材同志对本文提出了修改意见, 吴玲, 惠拥涛同志参加了测试工作, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 Richard. D Hudson Jr. *Infrared System Engineering*, New York: John Wiley & Sons, 1969, 222-224
- 2 荆工, 史尔. *应用光学*, 北京: 国防工业出版社, 1973, 40-107
- 3 Keys R J. *Optical and Infrared Detectors*, 2nd ed. Springer-Verlag, 1980, 52

SELECTION OF INFRARED DETECTOR FILTER FROM RELATIVE SPECTRAL RESPONSE

Si Junjie

(Luoyang Opto-Electric Research Center of Henan Province, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: From the relative spectral response measurement of the SPR cooled infrared photovoltaic InSb detector and the measurement of filter transmissivity spectrum, it is found that the relative spectral response of the field lens, filter and infrared detector module has close relationship with the filter technical requirements.

Key words: infrared detectors, filters, spectral response.