

# 红外高效率、宽带减反射膜

李忠奇

(昆明物理研究所)

## 提 要

本文将 $(aba)$ 三层对称膜推广为 $(abc)$ 非对称膜,推得等效折射率 $N^*$ 的计算公式。并用来设计高效率、宽带红外减反射膜。

文中给出了计算和试验结果。对于锗基板,在 $\text{InSb}(3\sim 5\mu\text{m})$ 和 $\text{HgCdTe}(8\sim 12\mu\text{m})$ 探测器的响应波段,这种膜的平均透射率为98%;在 $2\sim 13\mu\text{m}$ 、 $3\sim 14\mu\text{m}$ 和 $3.5\sim 15\mu\text{m}$ 波段,平均透射率 $\geq 94\%$ ,特别是在 $3.8\sim 14.8\mu\text{m}$ 共 $11\mu\text{m}$ 宽的波段范围内,最低透射率 $\geq 90\%$ 。

## 一、前 言

高折射率的红外光学零件(如锗、硅)的减反射膜通常用“递减法”设计。各层膜满足零反射条件的折射率用下列方法解决:(1)在现有膜料中选择折射率与满足零反射条件的膜层折射率相接近的膜料<sup>[1]</sup>;(2)用 $(aba)$ 三层对称膜系组合的等效折射率来实现<sup>[2]</sup>。前者的困难是很难找到折射率合适而工艺上又容易镀制的透红外膜料。后者虽然可以用计算机优选 $ab$ 层为任意厚度时的三层对称膜的等效折射率,来满足零反射条件的折射率,但工艺上难于实现。因此二者都较难得到有用的满意结果。本文以Ge为例,介绍了一种利用三层非对称膜组合的方法,它以前者为基础,后者又取 $(\frac{a}{2} b \frac{a}{2})$ 的简单情况,并推广池田英生<sup>[3]</sup>三层非对称膜的等效折射率 $N^*$ 的公式进行修正,使各层膜的折射率满足零反射条件。这种方法的优点是:工艺简单,实验结果较为满意。

## 二、设计红外宽带膜的途径

在红外三个大气窗联合使用的锗基板的宽带减反射膜按“递减法”设计<sup>[4]</sup>须要镀制四层膜。具体排列是:

$$\text{Ge}_{\text{基板}}L_4L_3L_2L_1, \quad (1)$$

这里 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 和 $L_4$ 各层膜满足零反射的折射率分别为 $n_1=1.3195$ ,  $n_2=1.7411$ ,  $n_3=2.2974$ ,  $n_4=3.0314$ ,这四种折射率的材料只能找到 $\text{BaF}_2(n=1.396)$ 和 $\text{ZnS}(n=2.2)$ 分别与 $n_1$ 和 $n_3$ 相接近。当选定 $n_1=1.396$ ,  $n_3=2.2$ ,  $n_5=4$ 时,利用 $n_0n_5=n_2n_3=n_1n_4$ 的关系式进一步求出 $n_2$ 和 $n_4$ 的修正值为 $n_2=1.8182$ ,  $n_4=2.8653$ 。目前仍然找不到折射率接近 $n_2$ 和 $n_4$ ,而又容易蒸镀的红外膜料。因此采用对称三层组合膜的等效折射率来代替。

关于三层对称组合膜系,早在五十年代埃普斯坦从数学上已证明它等效于一层膜。对于

本文描述的简单三层对称膜  $\left(\frac{a}{2} b \frac{a}{2}\right)$  [或  $\left(\frac{b}{2} a \frac{b}{2}\right)$ ]， $a$   $b$  层的位相厚度为： $\delta_b = 2\delta_a = \frac{\pi}{2} g$ ， $g = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ 。在这种情况下，由  $(a b a)$  三层对称膜推得的等效折射率  $N$  和相位厚度  $r$  的计算公式<sup>[4]</sup>可简化为：

$$N = \left\{ \frac{n_a^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{n_a}{n_b} + \frac{n_b}{n_a} \right) \right] \cos \delta_b - \frac{1}{2} \left( \frac{n_b}{n_a} - \frac{n_a}{n_b} \right)}{\left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{n_a}{n_b} + \frac{n_b}{n_a} \right) \right] \cos \delta_b + \frac{1}{2} \left( \frac{n_b}{n_a} - \frac{n_a}{n_b} \right)} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

$$r = \cos^{-1} \left[ \cos^2 \delta_b - \frac{1}{2} \left( \frac{n_b}{n_a} - \frac{n_a}{n_b} \right) \sin^2 \delta_b \right], \quad (3)$$

当  $H$  为 ZnSe,  $L$  为 BaF<sub>2</sub>, 折射率分别为： $n_a = 2.5$ ,  $n_b = 1.396$  时，代入 (2), (3) 式计算出

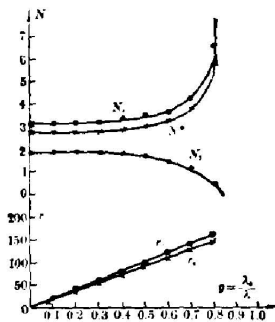


图 1 等效折射率  $N$  和相位厚度  $r$  的计算曲线

Fig. 1 Computed curve of  $N$  and  $r$

三层对称膜  $\left(\frac{H}{2} L \frac{H}{2}\right)$  的  $N_2$  和  $r_2$  随  $g$  变化的曲线，如图 1 所示。同理对应于  $\left(\frac{L}{2} H \frac{L}{2}\right)$  求出的  $N_4$  和  $r_4$  的曲线也示于图 1，

但是这里  $H$  为 Ge,  $L$  为 ZnSe, 折射率分别为： $n_a = 2.5$ ,  $n_b = 4$ 。

由图 1 得出：当  $g = 0 \sim 0.4$  时， $N_2 = 1.8675 \sim 1.7342$ ，比较接近理论计算的修正值  $n_2 (= 1.8182)$ 。但是  $N_4 = 3.1623 \sim 3.3528$  与理论计算的修正值  $n_4 (= 2.8653)$  相差较大，显然不是很理想的匹配。本文推广池田英生<sup>[3]</sup>三层非对称膜理论对  $N_4$  进行修正，使  $N_4$  接近于  $n_4 (= 2.8653)$ 。

设非对称三层膜为  $(a b c)$ ，其中  $a$  为接近基板的膜层（折射率为  $n_a$ ）， $b$  为中间层（折射率  $n_b$ ）， $c$  为靠近介质膜层（折射率  $n_c$ ），并用矩阵表示：

$$[IM] = \begin{bmatrix} \cos q_a & \frac{i}{n_a} \sin q_a \\ in_a \sin q_a & \cos q_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_b & \frac{i}{n_b} \sin q_b \\ in_b \sin q_b & \cos q_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_c & \frac{i}{n_c} \sin q_c \\ in_c \sin q_c & \cos q_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

这里  $q_k = 2\pi \frac{n_k d_k}{\lambda}$ ， $n_k$  为折射率， $d_k$  为几何厚度， $k$  分别为  $(a b c)$ ， $i$  为虚数单位  $\sqrt{-1}$ 。如果 (1)  $n_a > n_c$ ，则  $n_a = n_c \left(1 + \frac{\Delta n}{n_c}\right)$ ；(2) 若  $n_a < n_c$ ，则  $n_a = n_c \left(1 - \frac{\Delta n}{n_c}\right)$ 。在  $\frac{\Delta n}{n_c}$  很小时，上述两种情况的矩阵可近似地写为：

$$[IM] = \begin{bmatrix} \frac{n_c}{n_c \pm \Delta n} & 0 \\ 0 & \frac{n_c \pm \Delta n}{n_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_c & \frac{i}{n_c} \sin q_c \\ in_c \sin q_c & \cos q_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_b & \frac{i}{n_b} \sin q_b \\ in_b \sin q_b & \cos q_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_a & \frac{i}{n_a} \sin q_a \\ in_a \sin q_a & \cos q_a \end{bmatrix}. \quad (5)$$

把矩阵相乘整理可得：

$$[IM] = \begin{bmatrix} \cos \Theta^* & \frac{i}{N^*} \sin \Theta^* \\ i N^* \sin \Theta^* & \cos \Theta^* \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\Theta^* = 2\pi N^* D^* / \lambda, \quad (7)$$

$$N^* = N \left( 1 \pm \frac{\Delta n}{n_0} \right). \quad (8)$$

上述公式中  $N$  为三层对称膜的等效折射率;  $\Delta n = |n_a - n_0|$ ;  $N^*$ 、 $\Theta^*$  和  $D^*$  分别为三层非对称膜的等效折射率、相位厚度和几何厚度。

根据上述理论把对称膜系  $\left( \frac{L}{2} H \frac{L}{2} \right)$  中接近 Ge 基板的  $a$  层由 ZnSe ( $n=2.5$ ) 改为 ZnS ( $n=2.2$ ), 则膜系变为  $\left( \frac{L_3}{2} H \frac{L}{2} \right)$  三层非对称膜,  $\Delta n = |2.5 - 2.2| = 0.3$ ,  $\frac{\Delta n}{n_0} = 0.12$ ,  $N^* = 0.88N_4$ , 把  $N_4$  值分别乘 0.88 求出  $N^*$  的曲线也表示在图 1。由  $N^*$  曲线看出: 当  $g=0 \sim 0.4$  时,  $N^* = 2.7828 \sim 2.9501$ , 中间值比较接近于计算的修正值  $n_s (=2.8563)$ 。

由此可知, 膜系 (1) 中的  $L_2$  和  $L_4$  层能用三层对称膜  $\left( \frac{H}{2} L_1 \frac{H}{2} \right)$  和非对称膜  $\left( \frac{L_3}{2} H \frac{L}{2} \right)$  置换, 根据三层对称膜系的性质<sup>[4]</sup>, 还可用  $\left( \frac{H}{2} L \frac{H}{2} \right)^s$  和  $\left( \frac{L_3}{2} H \frac{L}{2} \right)^s$  代替, 因为它们的等效折射率  $N$  和  $N^*$  的值不变。同时  $L_1$  和  $L_3$  层分别乘以系数  $K$  时, 膜料的折射率  $n_1$  和  $n_3$  也不变 (仍然满足零反射条件的膜层折射率), 只是膜层的相位厚度发生变化。但对设计宽带减反射膜是有用的结果。因此膜系 (1) 可写成如下的形式:

$$\text{Ge}_{\text{基板}} \left( \frac{L_3}{2} H \frac{h}{2} \right)^s K L_3 \left( \frac{h}{2} L_1 \frac{h}{2} \right)^s K L_1, \quad (9)$$

膜系中  $H$ 、 $h$ 、 $L_3$  和  $L_1$  分别表示 Ge、ZnSe、ZnS 和 BaF<sub>2</sub> 的膜层,  $S$  为周期数,  $K$  为层厚的调整系数。膜系 (9) 的特征矩阵为 ( $K=1$ ,  $S=1$  且垂直入射):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{n_{L_1}} \sin \delta_1 \\ i n_{L_1} \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos r_2 & \frac{i}{N_2} \sin r_2 \\ i N_2 \sin r_2 & \cos r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_3 & \frac{i}{n_{L_3}} \sin \delta_3 \\ i n_{L_3} \sin \delta_3 & \cos \delta_3 \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos \Theta^* & \frac{i}{N^*} \sin \Theta^* \\ i N^* \sin \Theta^* & \cos \Theta^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{n_{L_1}} \sin \delta_1 \\ i n_{L_1} \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_a & \frac{i}{n_h} \sin \delta_a \\ i n_h \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos \delta_b & \frac{i}{n_{L_1}} \sin \delta_b \\ i n_{L_1} \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_c & \frac{i}{n_h} \sin \delta_c \\ i n_h \sin \delta_c & \cos \delta_c \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos \delta_3 & \frac{i}{n_{L_3}} \sin \delta_3 \\ i n_{L_3} \sin \delta_3 & \cos \delta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_c & \frac{i}{n_h} \sin q_c \\ i n_h \sin q_c & \cos q_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_b & \frac{i}{n_H} \sin q_b \\ i n_H \sin q_b & \cos q_b \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \cos q_a & \frac{i}{n_{L_1}} \sin q_a \\ i n_{L_1} \sin q_a & \cos q_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

导纳

$$Y = \frac{C}{B} = Y_1 + iY_2. \quad (11)$$

基板 Ge 正面镀膜系(9)的反射率( $R_A$ )为

$$R_A = \frac{(n_0 - Y_1)^2 + Y_2^2}{(n_0 + Y_1)^2 + Y_2^2} \quad (12)$$

当基板 Ge 吸收系数  $\alpha=0$  时,其透射率( $T_A$ )为

$$T_A = \frac{4n_0Y_1}{(n_0 + Y_1)^2 + Y_2^2} \quad (13)$$

Ge 基板两面镀相同膜系时,就有  $R_A=R_B$ ,  $T_A=T_B$  ( $R_B$  和  $T_B$  为反面的反射率和透射率);其总透射率( $T$ )为:

$$T = \frac{1}{(1/T_A) + (1/T_B) - 1} = \frac{1}{(2/T_A) - 1} (T_A=T_B) \quad (14)$$

在(10)式中  $\delta_1=\delta_3=\delta_b=q_b=\frac{\pi}{2}\frac{\lambda_0}{\lambda}$ ,  $\delta_a=q_a=q_c=\frac{\delta_1}{2}=\frac{\pi}{4}\frac{\lambda_0}{\lambda}$ ; 将  $n_{L_1}=1.396$ ,  $n_h=2.5$ ,  $n_{L_2}=2.2$ ,  $n_H=n_s=4$  的值代入(10)、(11)、(12)和(13)式进行计算,结果如下:

### 1. 高效率减反射膜

取  $S=1$ ,  $K=1$ , 利用上述公式和数据在计算程序上改变  $\lambda_0$  就可算出不同  $\lambda$  范围的高效率膜。例如(1)  $\lambda_0=1.2\mu\text{m}$ , 计算出第二个大气窗 ( $\lambda=3\sim 5\mu\text{m}$ ) 的高效率膜的透射率 ( $T_A=1-R_A$ ), 如图2中的曲线1。(2)  $\lambda_0=3.5\mu\text{m}$  时, 算出第三个大气窗 ( $\lambda=8\sim 14\mu\text{m}$ ) 的透射率( $T_A$ ), 如图2中的曲线2。(3) 用同样的方法计算出对称膜系:  $\text{Ge}\left(\frac{h}{2}H\frac{h}{2}\right)^s KL_3 \times \left(\frac{h}{2}L_1\frac{h}{2}\right)^s KL_1$  在  $S=1$ ,  $K=1$ ,  $\lambda_0=3.5\mu\text{m}$  时,  $\lambda=8\sim 14\mu\text{m}$  的透射率, 如图2中的曲线3所示。由图2可看出: 曲线2比3好, 说明上述三层非对称膜的理论分析是正确的。

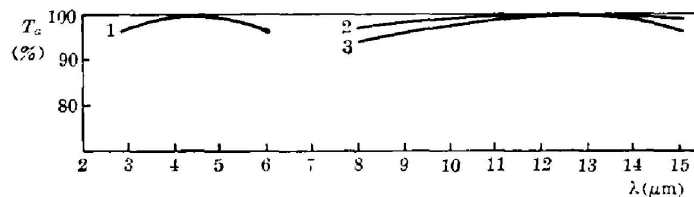


图2 高效率减反射膜的透射率曲线(理论值)

Fig. 2 Computed transmittance curves of high efficiency anti-reflection coatings

### 2. 宽带减反射膜

在设计宽带减反射膜时, 只要改变  $S$ 、 $K$  和  $\lambda_0$  三个量就可得出  $2\sim 15\mu\text{m}$  的各种宽带减反射膜。例如  $S=1$ ,  $K=3.5$ ,  $\lambda_0=1.2\mu\text{m}$  时, 计算的反射率曲线列于图3。当  $S>1$  时, 透射率曲线上升的斜率会得到改善, 但增加了工艺的复杂性。

## 三、实验结果和讨论

设备为 DMD-450 型镀膜机。ZnS 和 ZnSe 用电子枪加热蒸发, Ge 和 BaF<sub>2</sub> 用石墨坩埚电阻加热蒸发。膜层厚度用光电极值法控制。Ge 基板的直径为 20 mm, 厚  $1\sim 1.5\text{mm}$ 。透射率用日本生产的 IR-450 型红外分光光度计测量。其结果如下:

### 1. 高效率减反射膜

取  $S=1$ ,  $K=1$ , 改变  $\lambda_0$  得出: (1)  $\lambda_0=1.2\mu\text{m}$ , 在  $3\sim 6\mu\text{m}$  波段内, 高效率膜的实测

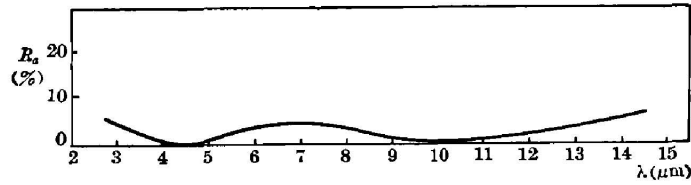


图3 宽带膜的反射率曲线(理论值)

Fig. 3 Computed reflectance curve of wide-range anti-reflection coatings

透射率如图4中的曲线 *a*。(2)  $\lambda_0 = 3.4 \mu\text{m}$ , 在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段内, 实测透射率如图4中的曲线 *b*, 并与对称膜系的实测透射率曲线 *c* 相比, *b* 比 *c* 好, 说明实测曲线和理论计算曲线基本一致。但是  $12 \mu\text{m}$  以后实测曲线偏低, 其主要原因是受 Ge 基板透射率(如图4中的曲线 *E*)和膜料 ZnS 以及 BaF<sub>2</sub> 在  $12 \mu\text{m}$  以后, 透射率曲线开始下降所产生的影响。

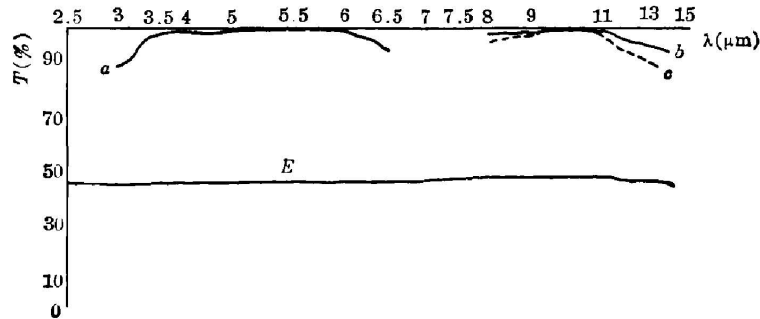


图4 高效率减反射膜的实测透射率曲线

Fig. 4 Measured transmittance curves of high efficiency anti-reflection coatings

## 2. 宽带减反射膜

取  $S=1$ , 改变  $K$  和  $\lambda_0$  两个参量, 得出如下结果: (1)  $\lambda_0 = 1.1 \mu\text{m}$ ,  $K = 3.5$ , 得出  $\lambda = 2 \sim 13 \mu\text{m}$ 。(2)  $\lambda_0 = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $K = 4$ , 得出  $\lambda = 3 \sim 14 \mu\text{m}$ 。(3)  $\lambda_0 = 1.8 \mu\text{m}$ ,  $K = 3$ ,  $\lambda = 3.5 \sim 15 \mu\text{m}$  等三种不同波段范围的宽带膜。它们的实测透射率曲线表示在图5的曲线 *a*、*b*、*c*。

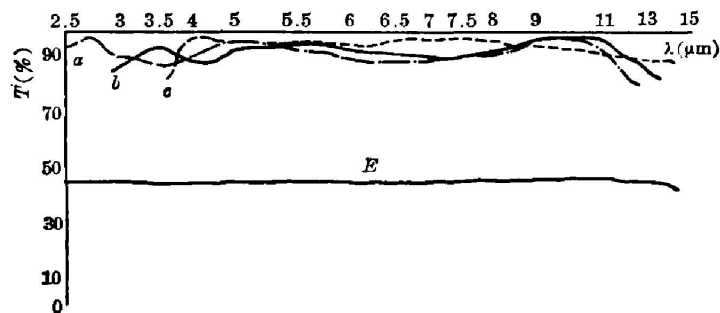


图5 宽带膜的实测透射率曲线

Fig. 5 Measured transmittance curves of wide-range anti-reflection coatings

## 四、结 论

理论计算和实验结果比较一致的结论如下:

1. 在设计多层减反射膜时,采用三层对称和非对称膜的等效折射率与几种膜料的折射率相匹配的设计方法,是行之有效的好方法。膜系(9)是镀制红外减反膜的通用形式,利用该膜系能在 Ge 基板上设计和制备红外  $2\sim 15\mu\text{m}$  波段范围的各种减反射膜。

2. 膜系适宜于用极值法控制膜厚,因此工艺简单,重复性好和便于工业生产。

3. 实验结果比较先进:对于 Ge 基板高效率膜在  $3\sim 6\mu\text{m}$  和  $8\sim 14\mu\text{m}$  波段内,最低透射率  $\geq 90\%$ ,其中大部分波段,特别是 InSb( $3\sim 5\mu\text{m}$ ) 和 HgCdTe( $8\sim 12\mu\text{m}$ ) 的响应波段,平均透射率  $\geq 98\%$ 。宽带膜在  $2\sim 13\mu\text{m}$ ,  $3\sim 14\mu\text{m}$  和  $3.5\sim 15\mu\text{m}$ , 平均透射率分别达到  $\geq 94\%$ ,特别是在  $3.8\sim 14.8\mu\text{m}$  共  $11\mu\text{m}$  的波段范围,最低透射率  $\geq 90\%$ 。

本文的计算由李裕发同志协助完成。测量由左名光、金惠宗同志完成。李正芬同志做了大量的试验工作,谨在此一并表示谢意。

### 参 考 文 献

- [1] E. L. Church, S. R. Nagel *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 6 (Jun), 1274.
- [2] J. T. Cox, G. Hass; *Physics of Thin Films*, (New York Academic Press, 1964), 275.
- [3] 池田英生;《特许公报》, 1978, 昭 53-10861.
- [4] 周九林,尹树百译;《光学薄膜技术》, (国防工业出版社, 1974), 54.

## High efficiency and wide-range anti-reflection coatings in the infrared region

LI ZHONGQI

(Kunming Institute of Physics)

(Received 21 May 1982)

### Abstract

The calculated formula of equivalent refractive index  $N^*$  of non-symmetrical three-layer period ( $a b c$ ) has been derived in this paper. The formula has been used for the design of anti-reflection coatings in infrared.

The calculated and experimental results are given in the paper. The average transmission of the coatings is 98 in the response wave region of InSb ( $3\sim 5\mu\text{m}$ ) detector and HgCdTe ( $8\sim 12\mu\text{m}$ ) detector. The average transmission of the coatings is greater than or equal to 94% in  $2\sim 13\mu\text{m}$ ,  $3\sim 14\mu\text{m}$  and  $3.5\sim 15\mu\text{m}$ . Especially in  $11\mu\text{m}$  wavelength region ( $3.8\sim 14.8\mu\text{m}$ ), the minimum transmission of the coatings is greater than or equal to 90%.