

CdTe 薄膜的红外光学特性研究*

范滨 张素英¹ 朱玲心 张凤山
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

TN304.22

TN213.01

摘要 用干涉法研究了热蒸发(PVD)方法制备的 CdTe 薄膜材料的红外光学特性. 通过对不同基板温度和不同薄膜厚度 CdTe 薄膜样品的研究, 确定了在薄膜沉积过程中基板温度和膜厚对 CdTe 薄膜红外光学特性的影响. 发现 CdTe 薄膜具有一定的非均匀性, 其折射率随着薄膜厚度的增加而减小. 在 120~200°C 范围内, 基板温度对 CdTe 薄膜红外光学特性的影响不大.

关键词 折射率, 几何厚度, 基板温度, 非均匀性.

红外光学特性

引言

碲化镉 薄膜

CdTe 是一种常用的半导体红外薄膜材料, 有很好的红外光学特性. 其透光区域为 0.97~31 μm ^[1], 被广泛应用于红外光学元件, 半导体探测器和红外薄膜器件的制备. Harvey, Debell 和 Wolfe 等人测量了用热压多晶方法和化学气相沉积(CVD)方法制备的 CdTe 的折射率, 及其随环境温度变化的情况, 得到 CdTe 常温下的折射率约为 2.68^[2,3].

本文主要研究用热蒸发(PVD)方法制备的 CdTe 薄膜的红外光学特性. 在 2.5~25 μm 范围内, 研究了 CdTe 薄膜的折射率 n 和薄膜厚度 d 及基板温度 T_w 之间的关系. 发现与 CdTe 体材料相比, CdTe 薄膜的折射率要低一些, 大约在 2.5~2.7 之间, 且具有一定的非均匀性, 其折射率随着薄膜厚度的增加而减小. 基板温度在 120~200°C 范围内对 CdTe 薄膜红外光学特性的影响不大, 而对其力学特性有影响.

1 样品的制备

基板温度、沉积速率和真空度是影响薄膜光学性能的 3 个主要工艺参数. 要研究不同工艺参数对 CdTe 薄膜红外光学特性的影响, 必须保证在样品的制备过程中, 当其中一个工艺参数变化时, 其他的工艺参数不变. 这样制备出来的样品才具有可比性. 为了制备不同薄膜厚度的样品, 我们采用在镀膜室中加遮挡板的方法. 遮挡板的形状如图 1 所示. 由于遮挡板的面积随样品盘半径增大而增大, 因此在样品的沉积过程中, 除了蒸发时间不同外, 其他的工艺参数都是一样的. 为了减小因遮挡板带来的非均匀性遮挡板放在蒸发源的正上方. 不同基板温度薄膜样品的制备, 则采用在样品基板上加盖不同厚度隔热片的方法. 样品和隔热片的放置如图 2 所示. 由于隔热片的厚度不同, 使得在同一罩内不同样品上的温度分布也不同, 从而得到不同基板温度的样品. 所有的样品都是在 DMD-450 型高真空镀膜机上沉积获

* 国防科技预研基金(编号 97J20.3.2ZK0703)资助项目
稿件收到日期 1997-06-17, 修改稿收到日期 1997-10-10

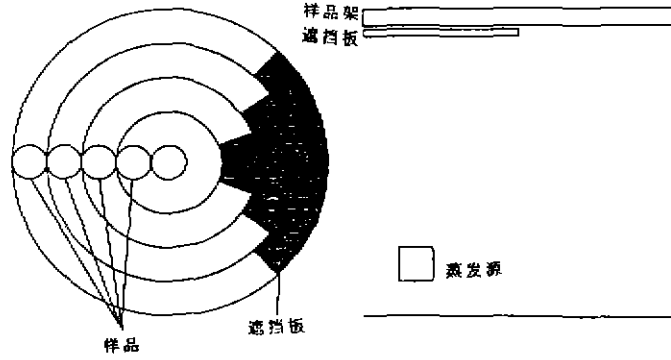


图1 遮挡板的形状及其安置示意图
Fig. 1 The shape and arrangement of the shade

得的,基板为 $\phi 10$ 的 Ge 片. 沉积时,沉积速率为 5nm/s,真空度为 2.7×10^{-3} Pa.

2 测试原理

样品光学常数的确定,采用张凤山等人提出的基于薄膜干涉的计算机拟合方法^[4]. 光在透明薄膜中会产生干涉,通过薄膜的透过率为

$$T = \frac{4n_s n_0}{|n_0 B + C|^2} \quad (1)$$

其中 $\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \frac{i \sin \delta}{N} \\ i N \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_s \end{pmatrix}$, $\delta = \frac{2\pi N d}{\lambda}$, $N = n - ik$, n_0 和 n_s 分别为空气和基片的折射率, λ 为入射波长. 如果考虑到基片另一个表面反射的影响,那么,最终透过率为

$$T_s = \frac{T(1 - R_s^+) A_s}{1 - R^- R_s^+ A_s^2} \quad (2)$$

其中 R^- 为基片与薄膜界面间的反射率, R_s^+ 为基片与空气界面间的反射率, A_s 为基片的吸收. 由式(1)和(2)可知,我们只要通过改变 n, k, d 来拟合所测得的单层膜透过率光谱曲线,就可以确定唯一的 n, k, d 值. 由于测量的是弱吸收薄膜材料,当波长 $\lambda = \frac{4nd}{m}$ (m 为正整数) 时, T 出现极值. m 为偶数时,消光系数 k 对透过率 T 的影响最敏感, m 为奇数时,折射率 n 对透过率 T 的影响最敏感. 因此可以用优选法,在偶极次干涉峰处,固定折射率 n , 改变消光系数 k , 来拟合偶极次处的透过率极值; 在相邻奇极次干涉峰处,固定消光系数 k , 改变折射率 n , 来拟合相邻奇极次处的透过度极值. 如此反复可以得快地确定一组最佳 n, k, d 值.

按上述方法,我们选用 BIO-RAD 的 FTS-40 型傅里叶变换光谱仪测出每个样品的光谱

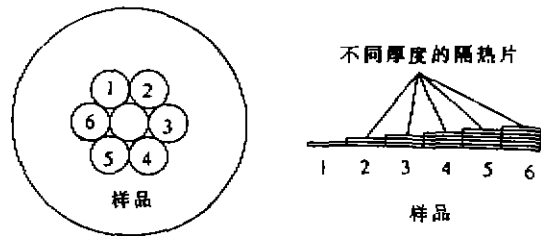


图2 不同厚度隔热片的放置示意图
Fig. 2 Diagram of the arrangement insulator

透过率曲线,然后采用逐点拟合的办法,求出每个干涉极次的折射率 n ,消光系数 k 和厚度 d . 这样求出的 n, k, d 都是波长 λ 的函数. 但是对于同一样品来说,其厚度 d 应是相同的,所以我们对所求出的 d 求平均,以更接近光学薄膜的真正厚度. 考虑到傅里叶光谱仪的波长精度优于其透过率精度,再用平均 d 代入公式 $n \times d = m \times \lambda / 4$, 求出 n 值,这样求出的 n 值更接近真实值. 然后用所求得的 $n(\lambda)$ 代入 Cauchy 方程

$$n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4, \quad (3)$$

就可求出 CdTe 样品的 Cauchy 色散系数 A, B, C ^[1]. 根据文献[4]的分析,基板的折射率对测量的灵敏度有明显的影响. 当 $n = \sqrt{n_s}$ 时,测量灵敏度最低. 基片的折射率和薄膜的折射率相近时,有较高的相对灵敏度. 对于镀在锗基片上的 CdTe 薄膜,有 $\Delta n/n < 1\%$.

3 实验结果和分析

图 3 给出了不同基板温度下制备的薄膜样品的红外光谱透过曲线,从图 3 可以看到,不同基板温度的样品,其红外光谱特性几乎没有发生什么变化. 因此,可以认为,在 120~200℃ 范围内,基板温度对 CdTe 薄膜样品的红外光谱曲线的影响不大. 在薄膜的力学特性方面,经胶带剥离实验发现,基板温度低的薄膜样品较容易脱膜,牢固度比基板温度的样品要差.

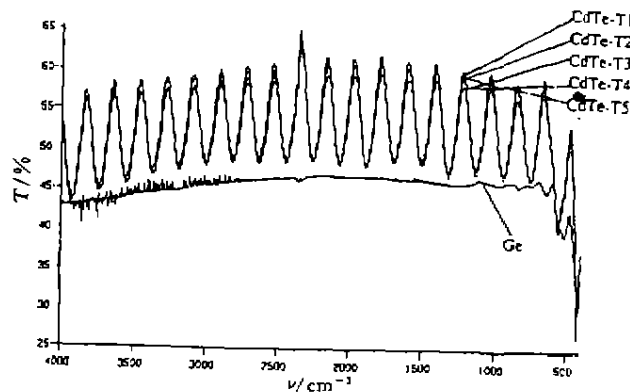


图 3 不同基板温度下沉积的 CdTe 薄膜的红外透过光谱曲线

Fig. 3 Infrared transmittance spectra of CdTe coatings deposited at different substrate temperature

表 1 不同厚度的 CdTe 薄膜样品的 Cauchy 色散系数

Table 1 Cauchy dispersion parameters of CdTe coatings of different thickness

| 厚度 $d(\mu\text{m})$ | A | B | C |
|---------------------|-------|-------|--------|
| 4.183 | 2.700 | 0.501 | -1.195 |
| 5.029 | 2.649 | 0.211 | -0.203 |
| 5.874 | 2.637 | 0.170 | -0.025 |

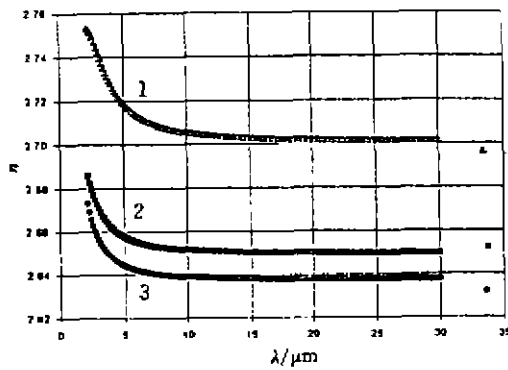


图4 不同厚度的 CdTe 薄膜的
Cauchy 色散曲线
Fig. 4 Cauchy dispersion of CdTe
coatings with different thickness

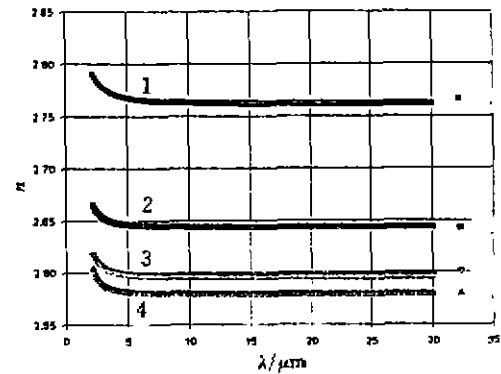


图5 不同基板温度下沉积的不同厚度的 CdTe
薄膜样品的 Cauchy 色散曲线
Fig. 5 Cauchy dispersion of different
thickness CdTe coatings deposited at
different substrate temperature

根据不同膜厚样品的红外光谱曲线,我们拟合出不同膜厚样品折射率 Cauchy 色散系数 A, B, C 和膜厚 d , 如表 1 和图 4 所示. 图 4 中曲线 1、2、3 的厚度分别为 4.183、5.029、5.874 μm , 从图 4 可以清楚地看到随着薄膜厚度的增加, CdTe 薄膜的折射率减小, 薄膜厚度和折射率之间表现出明显的相关性. 在沉积速率、基板温度、真空度相同的情况下, CdTe 薄膜折射率的这种变化可能由下面 2 个原因引起: (1) 薄膜厚度不均匀, 导致计算出的等效折射率 n 发生变化; (2) 薄膜的微观结构发生变化, 使得薄膜的折射率随膜厚变化, 产生非均匀性. 经 α -STEP 对各个样品进行 5 点采样测量发现, 膜层的粗糙度小于 20nm, 膜层具有较好的均匀性. 而对样品进行剖面电子显微镜观察发现, CdTe 薄膜为柱状多晶结构, 每个支晶为圆台状, 随着膜厚的增大, CdTe 膜层的结构越来越酥松, 从而造成 CdTe 薄膜的折射率随膜厚的增加而减小, 产生非均匀性.

图 5 和表 2 给出不同基板温度下制备的不同膜厚样品的折射率色散曲线. 图 5 中曲线 1、2、3、4 的温度分别为 120、160、200、180 $^{\circ}\text{C}$, 厚度分别为 5.638、6.108、6.322、6.497 μm , 由图 5 可见基板温度和膜厚对 CdTe 薄膜光学特性的影响是不一样的. CdTe 薄膜的折射率随着样品的膜厚发生明显变化, 具有一定的相关性, 而基板温度在 120~200 $^{\circ}\text{C}$ 范围内变化, CdTe 薄膜折射率的变化是没有规律的, 基板温度对 CdTe 薄膜折射率的影响不大. 因此, 我

表 2 不同基板温度下沉积的不同厚度的 CdTe 薄膜样品的 Cauchy 色散系数
Table 2 Cauchy dispersion parameters of different thickness CdTe coatings
deposited at different substrate temperature

| 厚度 $d(\mu\text{m})$ | 基板温度 ($^{\circ}\text{C}$) | A | B | C |
|---------------------|-----------------------------|-------|-------|--------|
| 5.638 | 120 | 2.761 | 0.154 | -0.096 |
| 6.108 | 160 | 2.643 | 0.067 | 0.150 |
| 6.322 | 200 | 2.596 | 0.060 | 0.163 |
| 6.497 | 180 | 2.578 | 0.048 | 0.309 |

们在基板温度为 120~200℃ 范围内沉积 CdTe 薄膜器件时,应该注意各个器件膜厚的一致性,保证沉积出来的薄膜器件有相同的光学特性.

4 结语

本文通过对不同基板温度和不同薄膜厚度的 CdTe 薄膜的红外光学特性的研究,得到了 2.5~25 μm 范围内 CdTe 薄膜的色散系数,发现 CdTe 薄膜的折射率在 2.5~2.7 之间,略低于其体材料的折射率,而且具有一定的非均匀性.由于膜层随厚度的增加变得越来越酥松,造成其折射率随着膜厚的增加而减小.基板温度在 120~200℃ 范围内变化时对 CdTe 薄膜红外光学特性的影响不大,仅对其力学特性有所影响.

REFERENCES

- 1 Gu P F. *Thin Film Technique*. Hangzhou: Publishing House of Zhejiang University (顾培夫. 薄膜技术. 杭州:浙江大学出版社), 1990. 106
- 2 Harvey J E, et al. *J. O. S. A.*, 1975, **65**: 1267
- 3 DeBell A G, et al. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(18): 3114
- 4 Zhang F S, et al. *Chinese Journal of Infrared Research* (张凤山, 等. 红外研究), 1986, **5**(3): 189

INFRARED OPTICAL PROPERTIES OF CdTe COATINGS*

FAN Bin ZHANG Su-Ying ZHU Ling-Xin ZHANG Feng-Shan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Infrared optical properties of CdTe coatings deposited by PVD method were investigated by interference method. With the study of CdTe coatings deposited at different substrate temperature and of different thickness, it was found that CdTe coatings are inhomogeneous, and the refractive index of CdTe coatings varies with the thickness of layer. It was also found that the substrate temperature between 120 C and 200 C almost has no effect on optical properties of CdTe coatings.

Key words refractive index, thickness, substrate temperature, inhomogeneity.

* The project supported by the Foundation of Preliminary Research in National Defense of China
Received 1997-06-17, revised 1997-10-10