

光盘膜层内的激光诱导温度场分布及其 对有机记录层稳定性的影响

赵英民 赵 强 朱从善 黄玮石
(中国科学院上海光机所 上海 201800) (复旦大学材料系 上海 200433)

提要 选择丙烯酸酯基固化膜作为光盘预格式记录层,测量了其在 633 nm 和 780 nm 处的吸收系数,并进行了 DSC 分析。根据热吸收理论和典型的 ROM 结构,对光盘膜层内的温度场分布进行了计算。结果表明,反射层附近的温升对记录层的稳定性有重要影响。

关键词 激光诱导温度场,光盘,热稳定性

1 引 言

只读型(ROM)光盘一般采用有机材料作为信息记录层,通过注塑成型或光聚合法(也称 2P 法, photo-polymerization)用有机材料复制母盘信息^[1]。作为 CD-ROM 发展的下一舞台, CD-R(可录光盘)引起了各国科技人员的极大关注。CD-R 与 CD-ROM 具有相同的物理制式,但由于其是数字存取,盘基必须含有预刻槽和格式才能进行跟踪伺服和数据读写。现行的 ROM 型光盘一般用 PMMA 作衬底,但其在抗热变形、吸水性和应力双折射方面存在较为严重的缺陷;高性能 CD-R 的盘基选用无机玻璃,以满足光盘的光、热稳定性和精密度的要求,因此只能通过 2P 法对预格式母盘的信息进行复制。丙烯酸酯基化合物具有光固化速率高、固化后的网络结构好以及价廉、质轻和无毒等优点,被认为是理想的复制材料。但在光盘使用过程中,由于其熔点较低,热稳定性差,因而存在畸变、挥发、老化等问题,影响光盘的读出和写入,这主要是由激光辐照时光盘膜层由于吸收而产生热积累引起的。因而,在选择材料时,要充分考虑到其物化参数,如低吸收系数,较高的热传导率、热容以及玻璃化温度都有利于热稳定性的提高。另外,还要考虑到相邻介质的热吸收情况,以及整个膜层的温度场分布,这是影响记录层热稳定性的主要外因。

本文选择双组分的丙烯酸酯基固化膜作为 CD-R 的预格式记录层,分析了其热稳定性,并计算了 633 nm 和 780 nm 下的膜层温度场的分布。

2 实验部分

2.1 丙烯酸酯基固化膜的制备

将丙烯酸酯基光敏胶均匀涂布在 $\phi 30$ K9 玻璃(两面光学抛光)上,在 200 W 高压汞灯下

辐照 50 s, 固化完全。

2.2 吸收系数的测量

将固化的薄片双面抛光, 在 Perkin-Elmer 580B 分光光度计上选择 633 nm 和 780 nm 两个波长, 测量其透过率, 计算出吸收系数为 633 nm 时 $\alpha = 0.07 \text{ cm}^{-1}$; 780 nm 时 $\alpha = 0.05 \text{ cm}^{-1}$ 。

2.3 固化膜的 DSC 分析

将固化膜在 Dupont 2000 热分析仪上作 DSC, N_2 保护, 由室温开始, 升温速度为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$, 直到其分解为止。

3 膜层内温度场分布的模拟计算

3.1 ROM 光盘的简化计算模型

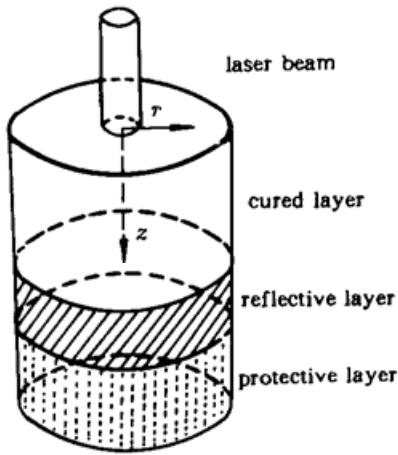


图 1 CD 多层结构的简化模型
Fig. 1 Simplified model for CDs' multilayer structure

产品 ROM 光盘的结构非常复杂^[2], 可表示为: 衬底/记录层/A1 反射层/全反射层/保护漆, 激光由衬底侧进入。为了计算上的方便, 我们假定在 A1 反射层只发生吸收和反射, 这也是接近实际情况的。衬底采用 K9 玻璃, 其对可见光的吸收极小, 可以忽略。因此只考虑记录层/A1 反射层/保护漆的温度场分布, 如图 1 所示。

3.2 膜层温度场分布的计算方法

根据图 1, z 为膜层内某点到记录层表面的垂直距离, r 为膜层内某点到激光束中心的垂直距离。由于膜层内存在吸收, 膜层内各处的电磁能流不相等。若忽略膜层内的散射, 根据能量守恒原理, 膜层内的能量淀积为 $\Delta\epsilon = dY(z)/dz$, $Y(z)$ 是单位时间内垂直通过膜层内某处的单位面积的能量, 即坡印廷矢量, 可表示为

$$Y(z) = \text{Re}[1/2E_j(z) \cdot H_j^*(z)]$$

其中 $E_j(z)$, $H_j(z)$ 分别为第 j 膜层在 z 处的电场强度和磁场强度。

若入射激光的瞬时功率密度为 $P_0(t)$, 光束为高斯型的, 则其强度分布为

$$I(r, t) = P_0(t)/(\pi r_0^2) \exp[-(r/r_0)^2]$$

其中 r_0 是在 $I(r_0, t) = [P_0(t)/\pi r_0^2] \exp(-1)$ 时的光束半径。

在膜层内淀积的热量, 必然导致温度上升, 以 $\theta(r, z, t)$ 表征 t 时刻膜层相对于环境温度的升高, 设 $t = 0$ 时刻温升为 0, 并假定在径向(r) 和纵向(z) 的“无穷远”处温升永远为 0。对于从膜层表面通过热对流散失的能量, 利用牛顿冷却定律进行描述, 而通过表面热辐射所散失的能量相对较小, 此处忽略不计。因此, 可以写出如下的热交换方程^[3,4]

$$C_j \frac{\partial}{\partial t} [\theta(r, z, t) - K_j \nabla^2 \theta(r, z, t)] = g(r, z, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \theta(r, z = 0, t) = \gamma \theta(r, z = 0, t)$$

$$\theta(r, z = \infty, t) = \theta(r = \infty, z, t) = 0$$

$$\theta(r, z, t = 0) = 0$$

C_j, K_j 分别是第 j 层的比热和热传导系数, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为圆柱坐标系下的拉普拉斯算子, Y 为表面热交换系数, $g(r, z, t)$ 为激光在单位时间单位体积内所淀积的能量。在实际的数值计算中, 假定入射光强为单位光强, 此时计算出的 $Y(z)$ 值表示单位时间单位面积上光能量的通过率, 是一个无量纲变量。因此当表面的入射光强为 $I(r, t)$ 时, 膜层内任意 z 处单位时间单位面积上通过的能量为 $I(r, t)Y(z)$, 经简单推导 $g(r, z, t)$ 可表示为

$$g(r, z, t) = \frac{\partial [I(r, t)Y(z)]}{\partial z}$$

以上式中的 E, H 可由麦克斯韦方程组求得。

4 结果与讨论

利用计算机对温度场分布进行数值计算, 激光波长分别为 633 nm 和 780 nm, 功率为 5 mW, 高斯半径 $r = 400$ nm, 脉冲宽度为 100 ns。表 1 给出了不同膜层的光热参数。

表 1 不同膜层的光热参数

Table 1 Optical and heat parameters of medium layers

Medium layers	Thickness (nm)	Refractive index	Heat cond [J/cm · K · s]	Capacity [J/cm ³ · K]
K9 glass	∞	1.52	0.015	2.0
Acrylate	800	1.55	0.00198	1.76
Reflector	50	1.2~ 6.9i	2.4	2.7
Protective	350	1.5~ 1.6	0.00158	1.7

计算结果见图 2, 图 3 和图 4。图 2 示出了 $r = 0$ (光束中心) 处在不同脉冲作用时间后 Al 反射膜的表面温升, 脉冲宽度为 100 ns。可以看出, 当脉冲作用时间为 80 ns 时, 温度达到最

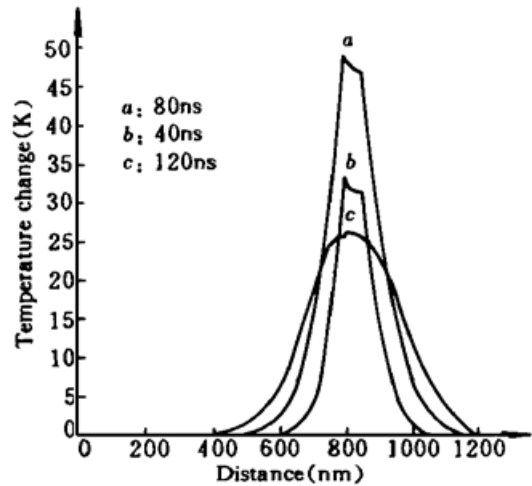
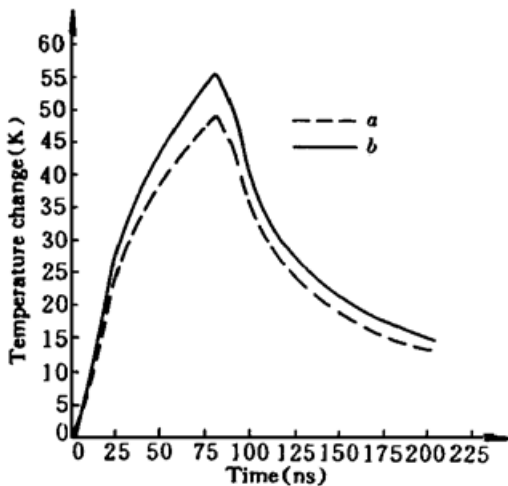


图 2 激光脉冲后 $r = 0$ 处反射层上温度变化与时间的关系(径向位置位于光束中心, 脉冲宽度为 100 ns)

图 3 不同时刻的膜层纵深方向的温度场分布
Fig. 3 Temperature field distribution versus the vertical distance from the cured layer for different time delays after a laser pulse shot ($r = 0, \lambda = 633$ nm)

Fig. 2 The temperature change on the reflector surface versus time after a laser pulse shot at $r = 0$ (pulse width= 100 ns)
a: $\lambda = 633$ nm, b: $\lambda = 780$ nm

高; 脉冲结束后, 温度剧烈下降, 两个不同波长下温度曲线形式相似, 因此, 膜层内的温升是一个瞬时过程。图 3 和图 4 分别是波长为 633 nm 和 780 nm 时, $r = 0$ 处的膜层的纵向温度分布, 0 nm 处是 K9 玻璃和记录层的界面。由图可以看出, 由于 Al 反射层具有大的消光系数, 因此在 Al 反射层附近出现尖峰温升(800~ 850 nm), 而记录层的吸收系数较小, 消光系数几乎为零(10^{-5}), 所以 0~ 400 nm 的记录层基本没有温升, 400~ 800 nm 的剧烈温升是由反射层向导热性较差的记录层进行热传递形成的。保护层与记录层性质接近, 因而具有相同的温度分布。

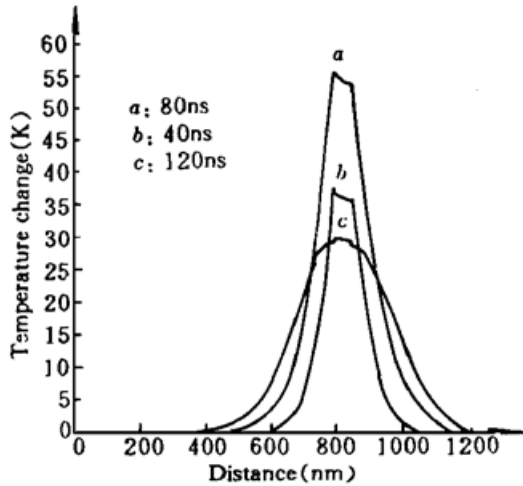


图 4 不同时刻的膜层纵深方向的温度场分布
Fig. 4 Temperature field distribution versus the vertical distance from the cured layer for different time delays after a laser pulse shot ($r = 0$, $\lambda = 780$ nm)

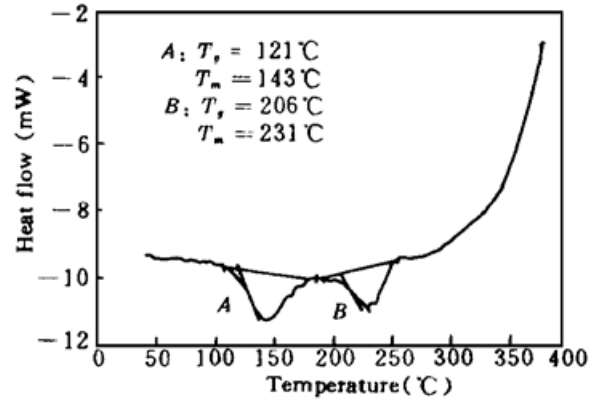


图 5 记录层的 DSC 分析曲线(N_2 环境中, 温升率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$; T_g : 玻璃转变温度; T_m : 熔点)
Fig. 5 Curve of record-layer's DSC analysis under N_2 with a temperature rise rate $5^\circ\text{C}/\text{min}$ (T_g : glass transition temperature, T_m : melting point)

图 3 和图 4 还表明, 两种不同波长下的温度场分布的形状是一致的, 只是数值稍有差异, 这是因为不同波长在膜层内具有不同的电磁场分布, 而且膜层的光热系数随波长而变化的缘故。因此, 温度场分布只与膜层结构有关。

显而易见, 记录层只可能在反射层附近失稳, 界面处其绝对温度最高达到 80°C , 但稳定与否取决于记录层本身的性质。记录层的 DSC 测试结果如图 5 所示。曲线上出现两组份的不同位置的吸热峰, 说明其具有不同的玻璃化温度 T_g , 分别为 121°C 和 206°C 。当温度小于 121°C 时, 记录层是稳定的, 不会发生任何变化; 当温度为 $121\sim 188^\circ\text{C}$ 时, A 组份吸收大量热, 由玻璃态转化为熔融态; B 组份在 $206\sim 270^\circ\text{C}$ 发生类似的变化; 温度超过 270°C 时, 记录层开始慢慢挥发, 放出大量热。考虑到安全裕度, 我们取 121°C 作为记录层热稳定性的表征, 即玻璃化温度。因此, 在计算条件下, 记录层的最高温度低于其玻璃化温度, 是稳定的。

5 结 论

5.1 本文对 ROM 结构的膜层在激光作用下的温度场分布进行了模拟计算, 结果表明, 温度场中的温升尖峰由 Al 反射膜引起, 记录膜层内的温升主要由反射膜的热传导形成, 两者交界处的较大温升将影响记录膜的稳定性。

5.2 本文所用双组份丙烯酸酯基固化膜具有较低的吸收系数(10^{-2} 级)和较高的玻璃化温度

(> 120°C), 在计算条件下稳定性好, 可作为光盘复制材料。

5.3 为使有机记录层保持稳定, 一方面要对材料进行设计, 使其具有较高的玻璃转化温度、较大的比热和热传导系数, 提高其抗热冲击性能; 另一方面要对膜层进行优化, 降低反射层的消光系数, 选择合适的反射层厚度, 从而降低温升。

参 考 文 献

- 1 H. C. Haverkon van Rijsewijk, P. E. J. Legierse, G. E. Thomas. Manufacture of laser vision video discs by a photopolymerization process. *Philips Tech. Rev.*, 1982, **40**(10) : 287~ 297
- 2 宋德平. CD-ROM 基础和标准. 光盘存储技术, 1993, **1**(4) : 1~ 5
- 3 范正修, 汤雪飞. 光学薄膜的温度场设计. 光学学报, 1995, **15**(4) : 463
- 4 Masud Mansuripur, G. A. Neville Connell, Joseph W. Goodman. Laser-induced local heating of multi-layers. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(6) : 1106

Laser-induced Temperature Field Distribution in Multi-layers of CDs and Its Effect on the Stability of the Organic Record-layer

Zhao Yingmin Zhao Qiang Zhu Congshan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Huang Weishi

(Materials Department, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract In this paper, we report that a cured acrylate-based film is selected as the record-layer of CDs. Its absorption coefficient at 633 nm and 780 nm and the glass transition temperature are measured, which is a characterization of stability. With the theory of heat absorption, the temperature field distribution is computed based on the typical CD-ROM structure. The results show that the temperature rise around an alumina reflector has a significant influence upon the stability of the record-layer.

Key words temperature field distribution, optical disk, stability