

文章编号: 0258-702X(2002)04-0366-05

只读式超分辨光盘的膜层设计和分析

李进延, 阮 昊, 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提要 超分辨技术是一种无需减小记录波长或增大数值孔径而提高存储密度的方法。Ge-Sb-Te 是一种良好的相变光存储材料, 在超分辨光盘中可作为掩膜。利用多层膜反射率的矩阵法计算了掩膜为 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜的超分辨只读式光盘的光学参数与各膜层厚度之间的关系, 最后得到了较为理想的膜层厚度匹配。采用磁控溅射法制备了只读式超分辨光盘, 测量了光盘的光学性质。

关键词 超分辨 掩膜 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜

中图分类号 O 484.4+1 文献标识码 A

Calculation and Analysis of Multilayers for the Read-only Super-resolution Optical Disks

LI Jin-yan, RUAN Hao, GAN Fu-xi

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

Abstract Super resolution, which allows the readout of information beyond the optical cutoff frequency given by $2NA/\lambda$, is an alternate way to increase the recording density without the need to directly reduce the spot size by increasing NA and reducing λ . Ge-Sb-Te is a kind of phase-change optical recording material with good performance. It may used to be mask layer in the super-resolution optical disks. In this paper, the relation of the optical parameters (reflectivity and R_m/R_c) and the film thickness of the structure of the multi-layers of read-only super-resolution optical disks were studied with method of eigenmatrix of multi-layer films. The ideal result of thickness for each layer is given. The read-only super-resolution optical disks were fabricated by RF magnetron sputtering technology. The optical properties were measured.

Key words read-only super-resolution optical disk, mask layer, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ film

1 引 言

在光存储中, 由于衍射效应限制, 故记录点直径 $D = 1.22\lambda/ns\sin\alpha$, 其中 λ 为记录激光波长, $ns\sin\alpha$ 为光学头的数值孔径。因此为了提高存储密度, 可以使用短波长激光二极管和大数值孔径的镜头^[1,2]。但尽管在最近几年蓝绿光激光二极管有了很大的发展, 但还存在一些问题, 如怎样获得低电阻的 p 型半导体材料和怎样与 p 型半导体材料进行欧姆接触等一直未能解决, 因此短波长激光二极管的实际应用还需要继续努力。而数值孔径 NA 的增大是以焦深的减小和由于偏心率而引起失真的增加为补偿, 因

此增大数值孔径而提高存储密度是十分有限的。

超分辨是无需用减小波长或增大数值孔径的方法减小记录点尺寸而增加存储密度的一种方法。超分辨首先于 90 年代初在磁光盘中用磁致超分辨 (MSR) 技术实现^[3], 有前孔探测和后孔探测两种方法。Yasuda 等于 1993 年在只读光盘中第一次引入了超分辨技术^[4], 在随后的超分辨只读式光盘的研究中有多种掩膜被采用, 如 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ 半导体材料^[5], Co, Si, Ca, Na 和 O 等元素组成的材料^[6]和有有机染料^[7]等。

以相变薄膜为掩膜的这种只读式超分辨光盘探测低于衍射极限记录畴的最基本机制是相变薄膜的

收稿日期 2001-01-15; 收到修改稿日期 2001-03-21

基金项目 国家自然科学基金(编号 59832060)重点资助项目。

作者简介 李进延(1972—), 男, 博士, 主要从事光电子材料的研究。E-mail: ljy-2000@263.net

折射率随温度的非线性变化。这种盘与一般的 CD 盘的不同之处在于增加了一层相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 膜。当读出信号时,由于盘的旋转,读出光点后部的温度升得比前部高,当相变层的温度超过熔化临界值(600℃)时,相变层从晶相变为液相。由于液相的反射率远低于固相晶态的反射率,因此光斑前部能有效地被相变层掩盖,相当于光点的减小。当材料的温度高于其熔点温度 T_m 时,其折射率(包括实部 n 和虚部 k)迅速降低,从而实现超分辨。在超分辨技术中掩膜的选择是非常关键的,掩膜的特性决定了超分辨的效果。

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 三元合金薄膜是 CD-RW 和 DVD-RW 的良好记录材料之一^[8,9],而且还可以作为超分辨掩膜。到目前还没有关于 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 相变薄膜的掩膜特性的研究,本文将对 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜的光学性质和超分辨特性作详细的研究。

2 理论模型

图 1 为超分辨只读光盘的读出原理示意图。在一般的读出中,当空间频率高于 $2NA/\lambda$ 时信号点不能被读出,如图 1(a);在超分辨光盘中由于有效孔被限制在一个比光点小的区域,因此可以读出空间频率超过 $2NA/\lambda$ 的信号点,如图 1(b);由于在超分辨光盘读出时,光点后部的温度超过掩膜的熔点而熔化,同时光点前部的温度仍保持在掩膜的熔化温度以下,因此光点被有效地减小,如图 1(c)。读出时掩膜熔化区的反射率 R_m 比晶态区的反射率 R_c 大,这种反射率之间的差别正是实现超分辨读出

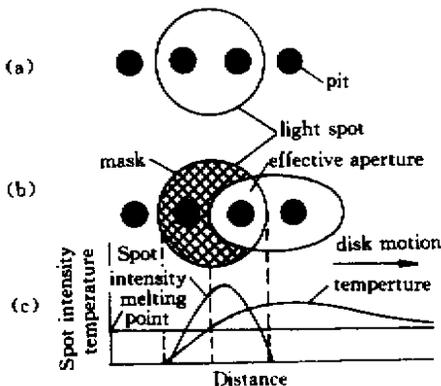


图 1 (a) 一般光盘的读出 (b) 超分辨光盘的读出;
(c) $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 层的光密度分布和温度分布曲线

Fig.1 (a) Conventional readout; (b) Readout in the PSR disk; (c) Spot intensity profile and the temperature distribution in the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ layer

的关键,显然对只读式超分辨光盘来说 R_m/R_c 越大越好。

Substrate (Polycarbonate)
Low dielectric layer (ZnS-SiO ₂)
Mask layer (Ge ₂ Sb ₂ Te ₅)
Upper dielectric layer (ZnS-SiO ₂)
Reflective layer (Al)
UV resin

图 2 只读式超分辨光盘的结构简图

Fig.2 Structure of read-only super resolution disks

图 2 为根据超分辨只读式光盘实际读出情况提出的简化近似模型。并作如下假设:将垂直盘面入射的读出光束近似为平面平行光,实际入射光为高斯光,在高斯光束的近场近似条件下,此假设是可行的。

与图 2 相应的膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{1}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 B 和 C 为特征矩阵的两个矩阵元, η_j 为第 j 层膜的光学导纳, k 为层数即等于 4。

各膜层的位相厚度为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j \quad (2)$$

其中, λ 为入射光波长,第 j 层膜的复折射率为 $N_j = n_j - ik_j$, d_j 为第 j 层膜的物理膜厚。由于写/读光束垂直盘面入射,则有 $\theta_j = 0$ 故

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j = \frac{2\pi}{\lambda} (n_j - ik_j) d_j \cos \theta_j \quad (3)$$

根据膜系的特征矩阵得到膜系的能量反射率

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (4)$$

读出时光点后部即掩膜熔化区的反射率为 R_m ,其他区域的反射率为 R_c 。当 R_m/R_c 越大时信号的读出具有更大的载噪比。

3 膜层匹配设计与讨论

在设计中光盘的写/读激光波长为 780 nm。表 1 为各膜层和基片在 780 nm 处的光学常数。其中介质膜为 $(\text{ZnS})_{20}(\text{SiO}_2)_{80}$,以表 1 所示的各项参数进行膜层设计,当进行第一层介质膜的计算时根据经验先分别假定其他 3 层薄膜的厚度。然后逐层确定出各层的厚度,依次类推最后得到较好的膜层匹配。

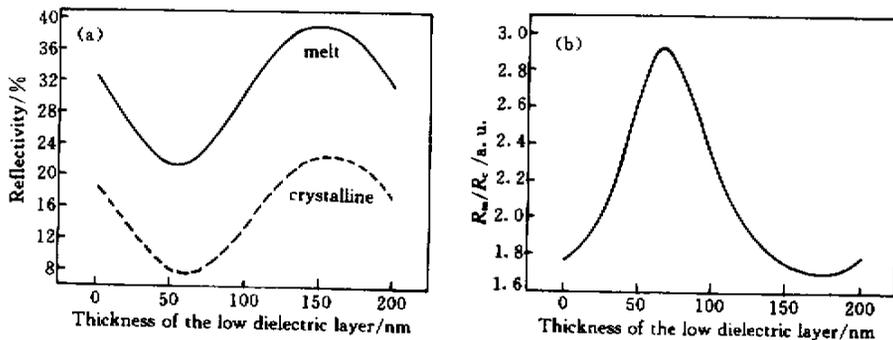
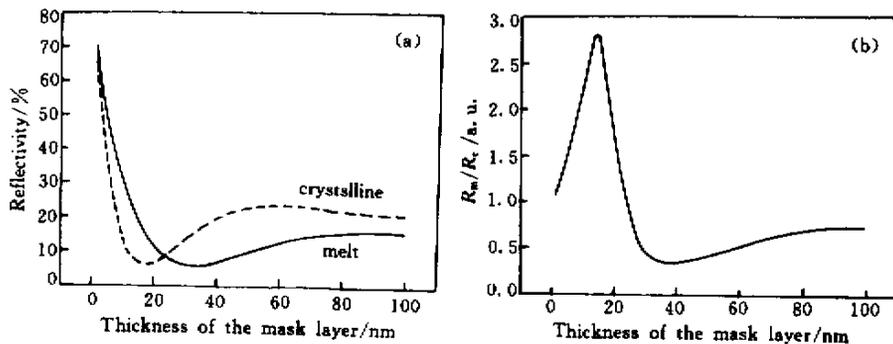
表 1 各膜层和基体的光学常数

Table 1 Optical constants of films and substrate

Material	Refractive index n	Extinction coefficient k
ZnS-SiO ₂	2.0	0
Ge ₂ Sb ₂ Te ₃ (melt)	3.3	2.2
Ge ₂ Sb ₂ Te ₃ (crystalline)	4.43	2.892
Al	2.7	8.58
Substrate (polycarbonate)	1.58	0

下介质层的匹配计算结果如图 3 所示。在计算时我们选择掩膜层、上介质层和反射层的厚度分别为 10 nm、25 nm 和 100 nm。可以看到,在下介质层的 1~200 nm 的厚度范围内,不论掩膜处于融化态

或晶态,膜系都具有较大的反射率,当掩膜为融化态时膜系的反射率的最小值也达到 15% 以上。当掩膜处于融化态时的反射率比掩膜处于晶态时的反射率大得多,而且 R_m/R_c 在下介质层厚度为 75 nm 附近时有最大值。下介质层的主要作用是考虑到第一层 ZnS-SiO₂ 保护膜的主要作用是防止热扩散避免基片的热变形和防止掩膜的氧化,因此一定厚度的下介质层是非常必要的。而对于超分辨光盘来说 R_m/R_c 越大对超分辨读出越有利,而 R_m 和 R_c 也应当具有相对较大的值。考虑到以上因素我们选择下介质层的厚度为 100 nm,此时在掩膜融化区和晶态区膜系的反射率为 30% 和 13%。

图 3 反射率 (a) 及 R_m/R_c (b) 与下介质层 (第一层 ZnS-SiO₂) 的膜层匹配计算曲线Fig.3 Dependence of the calculated reflectivity (a) and R_m/R_c (b) on thickness of the lower dielectric layer图 4 反射率 (a) 及 R_m/R_c (b) 与掩膜层的膜层匹配计算曲线Fig.4 Dependence of the calculated reflectivity (a) and R_m/R_c (b) on thickness of the mask layer

掩膜层的匹配计算如图 4。表明膜系的反射率随着掩膜厚度的增大迅速减小,当掩膜为晶态和融化态时在 18 nm 和 30 nm 处膜系有最小的反射率,在膜系的反射率达到最小后又随着掩膜厚度的增大而增大,且逐渐趋于定值。 R_m/R_c 的值在掩膜厚度的较大范围内有较大的值。显然,掩膜随着掩膜层厚度的增大,在光盘的写入和读出时就需要更高功

率的激光使掩膜融化,所以在一定范围内选择较薄的掩膜可以降低超分辨光盘的读出功率。因此基于上述考虑我们选择掩膜厚度为 9 nm。此时膜系在掩膜处于融化态和晶态时的反射率分别为 25% 和 9%。

上介质层的匹配计算结果如图 5。在整个厚度范围内掩膜融化区的反射率比晶态区的反射率大,

而且在上介质层厚度为 70 nm 附近 R_m/R_c 达到最大值。由于上介质层膜的主要作用是防止掩膜的氧化、变形, 而且在读出时熔化态的掩膜需要快速回到晶态, 热量需通过热辐射或热传导释放出去, 因此从这一点上考虑介质膜应该尽量薄。而且为了信号的读出质量应该保证膜系在记录膜处于晶态和非晶态时的反射率都相对较大, 所以我们选择上介质膜的厚度为 30 nm。

图 6 为上介质层的匹配计算结果。当反射层厚度很小时膜系的反射率随厚度的变化很大, 在反射

层厚度达到 25 nm 后膜系的反射率达到恒定值, 且掩膜熔化区的反射率比晶态区的反射率大很多。在 25 nm 后膜系的 R_m/R_c 值为 2.5。我们知道一般反射膜的作用是提高膜系的反射率从而提高入射激光光能的利用率, 此外也起散热的作用。另外, 反射率薄膜的厚度是决定光盘成本的一个重要因素, 因此在选择反射膜厚度时既应该考虑反射膜有一定的厚度以保证膜系有大的反射率和尽快散热, 又不应该使反射率薄膜的厚度过大。最终选择反射膜厚度为 100 nm。

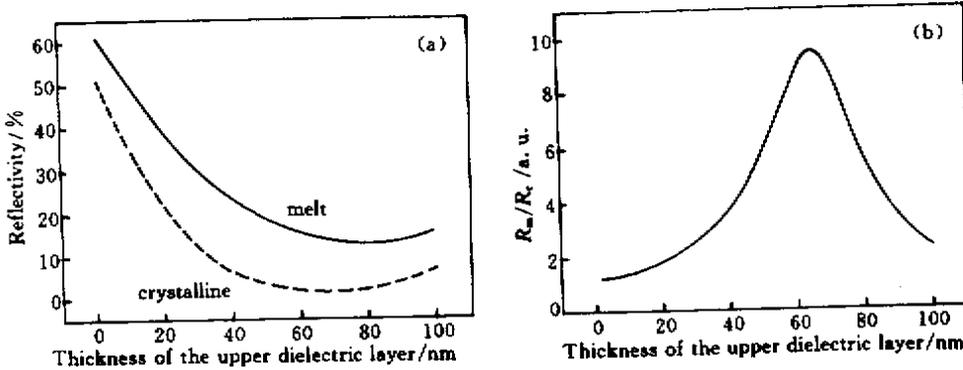


图 5 反射率 (a) 及 R_m/R_c (b) 与上介质层 (第二层 $ZnS-SiO_2$) 的膜层匹配计算曲线

Fig.5 Dependence of the calculated reflectivity (a) and R_m/R_c (b) on thickness of the upper dielectric layer

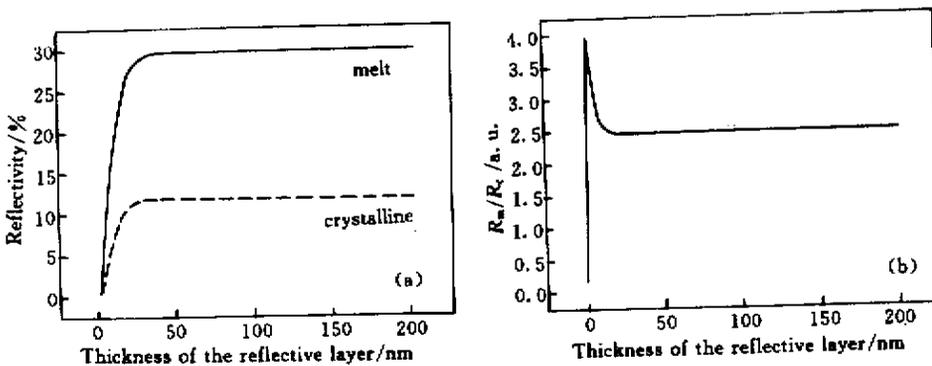


图 6 反射率 (a) 及 R_m/R_c (b) 与反射层膜层匹配计算曲线

Fig.6 Dependence of the calculated reflectivity (a) and R_m/R_c (b) on thickness of the reflective layer

经过逐层优化最终得到了具有较好光学性能的膜层匹配, 下介质层、掩膜层、上介质层和反射层厚度分别为: 100 nm, 9 nm, 30 nm 和 100 nm。在计算中假定各层薄膜的光学常数是不随膜厚而改变的, 但我们以前的研究表明^[10] 相变薄膜的光学常数在厚度较小时(30 nm 内) 随厚度的改变有比较明显的变化。此外, 掩膜熔化后的光学常数随温度的增大也有比较明显的变化, 因此最终的计算结果并不是唯一的结果。但在设计中很难测量光学常数的这种变化, 而且由于在选择各膜层厚度时有较大的选择余

地, 在一定膜厚范围内对膜系的光学性能并无多大影响, 所以模拟计算还是很有意义的, 在光盘的实际制备中可以指导试验。

4 实验和结果

我们用已刻入信号的盘基为基片用射频磁控溅射法分别溅射下介质层、掩膜层、上介质层和反射层, 随后涂以紫外固化胶。在溅射时以溅射时间来控制膜厚, 对制备好的光盘样品先进行初始化。

对初始化后的超分辨光盘用 Perkin-Elmer Lambda 9UV/VIS/NIR 光谱仪测量了薄膜的反射光谱。图 7 为光盘在初始化后 400 ~ 850 nm 的反射率。在我们的设计中需要在初始化后(即掩膜为晶态时)光盘有一定的反射率但不能太大,参看结果,我们的设计是非常合理的。尽管实际测量的反射率与计算结果稍有偏差,但由于在光盘制备过程中各层膜的厚度控制并不十分精确,因此这种差别是可以理解的。由于我们是针对 780 nm 波长的读出光设计的,所以超分辨光盘在此波长处表现出了较好的光学性能(即掩膜为晶态和融化态时具有较大的反射率差值)。而对于更短波长的超分辨读出同样可以采用这种方法,使光盘在读出的短波长处也有较好的光学性能。

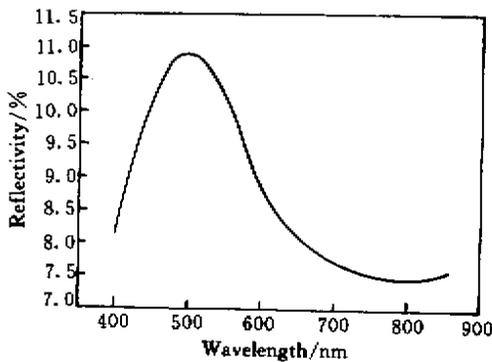


图 7 只读式超分辨光盘的反射率实验曲线

Fig.7 Dependence of the experimented reflectivity of the read-only super-resolution disk on wavelength

致谢 感谢刘波博士在光盘制备中提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 W. J. Kozlovshy, A. G. Dewey, A. Juliana *et al.*. Optical recording in the blue using a frequency-doubled diode laser [C]. *SPIE*, 1992, **1663** :410 ~ 415
- 2 S. M. Mansfield, W. R. Stuenkel, G. S. Kino *et al.*. High-numerical-aperture lens system for optical storage [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(4) :305 ~ 307
- 3 Masahiko Kaneko, Katsuhisa Aratani, Atsushi Fukumoto *et al.*. Iriter-magneto-optical disk for magnetically induced superresolution [J]. *Proc. IEEE*, 1994, **82**(4) :544 ~ 553
- 4 Kouichi Yasuda, Masumi Ono, Katsuhisa Aratani *et al.*. Premastered optical disk by superresolution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(11B) :5210 ~ 5213
- 5 Yihong Wu, Hock Khoo, Takuyo Kogure. Read-only optical disk with superresolution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(24) :3225 ~ 3227
- 6 Toshimichi Shintani, Motoyasu Terao, Hiroki Yamamoto *et al.*. A new super-resolution film applicable to read-only and rewritable optical disks [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(3B) :1656 ~ 1660
- 7 Tsuyoshi Tsujioka, Minoru Kume, Yukio Horikawa *et al.*. Super-resolution disk with a photochromic mask layer [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(1B) :526 ~ 529
- 8 N. Nobukuni, M. Takashima, T. Ohno *et al.*. Microstructural changes in GeSbTe film during repetitious overwriting in phase-change optical recording [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(12) :6980 ~ 6985
- 9 Ken-ichi Uchino, Ken-ichi Takada, Takashi Ohno *et al.*. High-density pulse width modulation recording and rewritable capability in GeSbTe phase-change system using visible laser beam at low linear velocity [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(11B) :5354 ~ 5360
- 10 Li Jinyan, Ruan Hao, Gan Fuxi. Effect of film thickness of optical properties of AgInSbTe phase-change films [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(8) :952 ~ 956 (in Chinese)