

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0030-06

超分辨相变光盘的膜层计算与分析*

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)

摘要 : 利用多层膜反射率的矩阵法计算了 GeSbTe 超分辨相变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。

关键词 : 超分辨相变光盘 ; 掩膜 ; 反射率对比度

中图分类号 : TN946.5 文献标识码 : A

1 引 言

在光存储中 , 存储密度一般受读出光路的限制而与记录过程无关。由于衍射效应限制 , 记录点直径为 $D = 1.22\lambda / (n \sin\alpha)$, 其中 λ 为记录激光波长 , $n \sin\alpha$ 为光学头的数值孔径 , n 表示折射率。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]。近年来蓝绿光激光二极管有了很大的发展 , 但怎样获得低电阻的 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问题还未解决。因此短波长激光二极管的实际应用还需继续努力。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的失真的增加为补偿 , 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探测方法。Yasuda 等^[4]于 1993 年在只读光盘中引入了超分辨技术 , 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 , 光点后部的温度升得比前部的高 , 当相变层的温度超过熔化临界值 (600 °C) 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。

Liu 等^[5]成功地将超分辨技术应用于可擦重写相变光盘 , 这种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折射率随温度的非线性变化。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。这种超分辨相变光盘的记录层和掩膜层都是 GeSbTe 相变材料 , 但成份比不同 , 因此具有不同的临界冷速率。在光盘进行读/写时由于需要熔化掩膜迅速结晶 , 因此一般要求作为掩膜的 GeSbTe 材料的成份比要严格符合化学计量比 ; 而记录膜上的非晶态记录畴要求有一定的稳定性 , 因此要求记录膜的成份稍微偏离化学计量比。根据文献报导^[6] , $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 材料的熔化温度为 614 °C , 重新晶化需要的时间为 50 ns ; 而 GeSb_4Te_7 材料的熔化温度为 607 °C , 重晶化需要的时间为 30 ns。在超分辨光盘的写和读的过程中需要熔化后的掩膜快速晶化 , 因此我们选择 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 为记录膜 , 选择 GeSb_4Te_7 为掩膜。精确的膜层设计是实现光盘良好读写性能的基础 , 目前已经有可录光盘和相变光盘的膜层设计^[7]。由于超分辨薄膜的特殊光学作用 , 超分辨光盘的膜层设计尤为重要。本文从光学性能角度出发 , 利用导纳矩阵研究以不同成份的 GeSbTe 材料为掩膜和记录膜的超分辨相变光盘具有较好读取性能时的膜系匹配。

2 理论模型

图 1 为超分辨相变光盘的读出原理示意图。当探测激光扫过高速旋转的光盘时 , 掩膜上光点后部的温度高于前部的温度 , 如图 1(a) 所示。精确控制探测激光功率可使掩膜上光点后部的温度升至熔化温度 T_m 以上 , 而光点前部的温度仍低于熔化温度 T_m 。由于处于熔化态的掩膜的光学常数与处于固

* 国家自然科学基金 (59832060) 资助课题。

收稿日期 : 2000-12-06 ; 收到修改稿日期 : 2001-02-09

态的掩膜的光学常数不同,因此多层膜在光点前部与后部的反射率也不同,如图 1(b)所示。为了避免在探测过程非晶态记录畴的重结晶,记录点的温度要保持在晶化温度 T_x 以下,如图 1(c)所示。

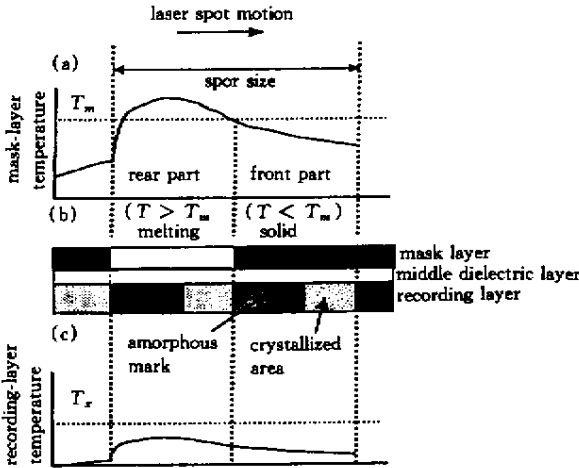


Fig.1 Principle of phase-change super-resolution disks by RAD. (a) The mask-layer temperature profile. (b) Different refractive indices of the mask layer in the melting and solid states. (c) The recording-layer temperature profile

图 2 为根据超分辨相变光盘实际写/读情况提出的简化近似模型。并作如下假设:第一,将垂直盘面入射的写/读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;第二,为了简化计算暂不考虑预刻槽的影响,相对于 1.2 mm 的 pc 基片来说预刻槽的深度是可以忽略的,主要的影响是预刻槽边缘对入射光的衍射和散射会造成入射光能量的损失,但为了简化计算,本工作暂不考虑这种影响。

substrate (polycarbonate)
low dielectric layer (ZnS-SiO ₂)
mask layer (GeSb ₄ Te ₇)
middle dielectric layer (ZnS-SiO ₂)
recording layer (Ge ₂ Sb ₂ Te ₅)
upper dielectric layer (ZnS-SiO ₂)
reflective layer (Al)

Fig.2 The structure of erasable phase change super resolution disks

根据麦克斯韦方程,与图 2 相应的膜系的特征矩阵为^[8]:

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

式中 B 和 C 为特征矩阵的两个矩阵元, n_j 为第 j 层

膜的光学导纳, k 为层数,即等于 6。

各膜层的相位厚度为:

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

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 $\theta_j = 0$,故有:

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

根据膜系的特征矩阵得到膜系的能量反射率为:

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

我们记非晶态的反射率为 R_a ,晶态的反射率为 R_c ,则记录膜在写入前后的反射率对比度 C 定义为:

$$C = (R_c - R_a) / (R_c + R_a). \quad (5)$$

3 膜层匹配设计与讨论

设计中光盘的写/读激光波长为 780 nm,PC 聚碳酸酯)基片厚度为 1.2 mm。表 1 为各膜层和基片在 780 nm 处的光学常数。以表 1 的参数进行膜层设计,进行第一层介质膜的计算时根据经验先分别假定其它 5 层薄膜的厚度。然后逐层确定各层的厚度,依次类推最后得到较好的膜层匹配。计算中掩膜、中介质膜、记录膜、上介质膜和反射膜的厚度分别先取 10 nm、300 nm、25 nm、25 nm、和 100 nm。

Table 1. Optical constants of films and substrate

material	refractive index n	extinction coefficient k
ZnS-SiO ₂	2.001	0.000
Ge ₁ Sb ₄ Te ₇ (melt)	3.302	2.201
Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ (crystalline)	4.430	2.892
Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ (amorphous)	4.071	1.462
Al	2.701	8.588
substrate(polycarbonate)	1.580	0.000

图 3 为第一层 ZnS-SiO₂ 保护膜与各膜层的匹配计算。图 4 为根据设计参数计算得到的记录膜的非晶态与晶态间的反射率对比度。从图 3 可以看出,对于第一层 ZnS-SiO₂ 保护膜来说,如果厚度在 100 nm 和 250 nm 附近,记录膜处于晶态和非晶态时其反射率都处于一个极小值,而在 10 nm 和 175 nm 附近的话,记录膜处于晶态和非晶态时的反射率都有一个极大值。从图 4 可以看出,在第一层 ZnS-SiO₂ 保护膜厚度为 100 nm 和 250 nm 附近时,膜系的反射率对比度都存在一个极大值,而且在较

大的厚度范围内膜系的反射率对比度都比较大,即使在反射率对比度的极小值也在 30% 以上。尽管对相变光盘,大的反射率对比度有利于提高信噪比,但反射率对比度越大信号的擦除越困难,所以一般不选择反射率对比度最大的膜层。考虑到一层 ZnS-SiO₂ 保护膜的主要作用是防止热扩散、避免 PC 片的热变形和防止掩膜的氧化,而且为了使光学头对盘片有良好的聚集和跟踪,需要非晶态记录畴有一定的反射率,所以我们选择第一层 ZnS-SiO₂ 保护膜的厚度为 220 nm,此时膜系的反射率对比度在 60% 以上,而且记录膜处于晶态和非晶态时膜系的反射率都相对较大。

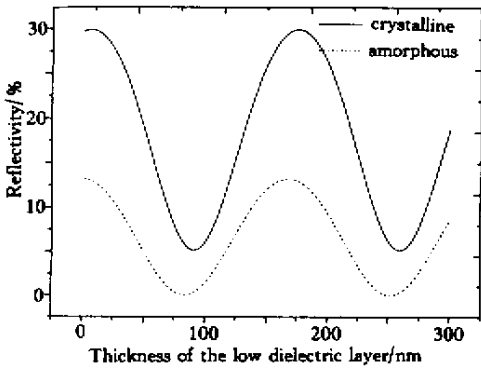


Fig.3 Dependence of the reflectivity on the thickness of low dielectric layer

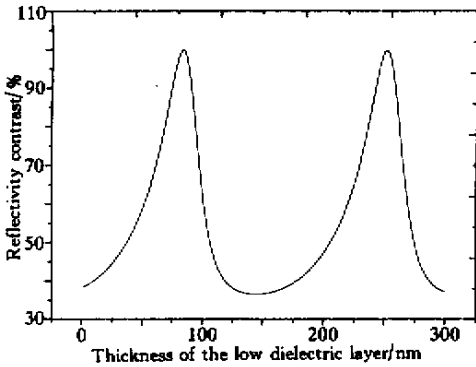


Fig.4 Dependence of the reflectivity contrast on the thickness of low dielectric layer

在确定了第一层 ZnS-SiO₂ 保护膜的膜厚以后,用同样的方法确定掩膜的厚度。图 5 为掩膜膜厚与膜系反射率的关系图。图 6 为膜系的反射率对比度与掩膜膜厚之间的关系。由图 5 可见,膜系的反射率先随掩膜的膜厚的增加而迅速减小,当掩膜厚度为 10 nm 时膜系的反射率存在一个极小值,但此时反射率相对还是比较大的。随着掩膜厚度的增大,膜系的反射率增大并在 30 nm 附近达到极大值,此后随着掩膜厚度的增大,膜系的反射率逐渐减小并

逐渐趋于定值。而由图 6 可见,膜系的反射率对比度随着掩膜厚度的增大而减小,在 80 nm 处达到极小值(此时膜系的反射率对比度为负值),此后反射率对比度又随掩膜厚度的增大而增大,并在 120 nm 后趋于稳定。我们知道,随着掩膜厚度的增大,在光盘的写入和读出时就需要更高功率的激光使掩膜熔化,所以在一定范围内选择较薄的掩膜可以降低超分辨相变光盘的写入和读出功率,而写入和读出功率过高正是超分辨相变光盘的缺点之一。基于上述考虑,我们选择掩膜厚度为 10 nm。

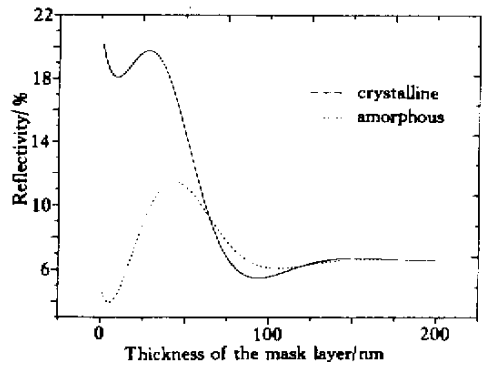


Fig.5 Dependence of the reflectivity on the thickness of mask layer

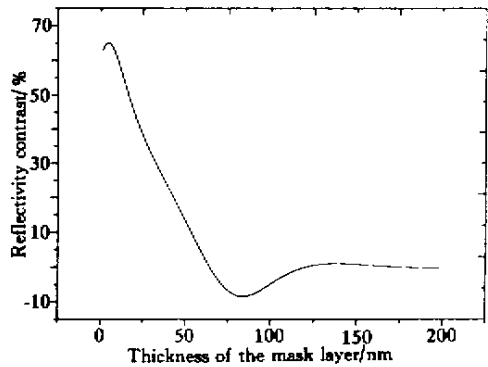


Fig.6 Dependence of the reflectivity contrast on the thickness of mask layer

第二层 ZnS-SiO₂ 保护膜与各膜层的匹配计算结果见图 7 和图 8。在图 7 中膜系在记录膜处于晶态时的反射率在 150 nm 和 300 nm 附近各存在一个极大值,而在 40 nm 和 200 nm 附近存在极小值,而记录膜为非晶态时的反射率在中介质膜的厚度内呈周期性的变化,但变化幅度很小。从图 8 可以看出,膜系的反射率对比度在 100 nm 和 300 nm 附近达到极大值。第二层 ZnS-SiO₂ 保护膜的主要作用是防止掩膜和记录膜之间的热扩散,避免读出时记录在光盘上的非晶态信号被擦除。因此我们选择第二层 ZnS-SiO₂ 保护膜的厚度为 290 nm。

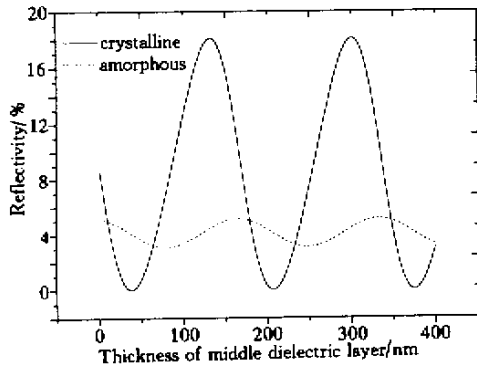


Fig. 7 Dependence of the reflectivity on the thickness of second protective layer

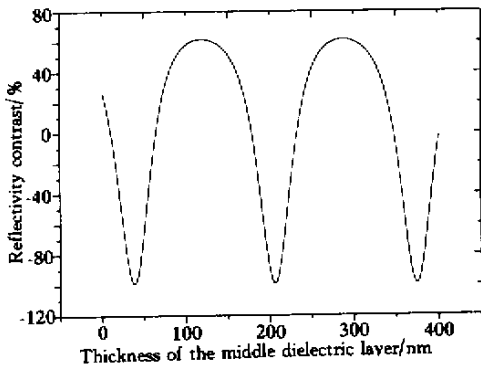


Fig. 8 Dependence of the reflectivity contrast on the thickness of the second protective layer

记录膜与各膜层的匹配计算结果见图 9 和图 10。膜系的反射率先随着记录膜厚度的增大而迅速减小,记录膜处于晶态和非晶态时分别在 15 nm 和 20 nm 附近处达到极小值,此后随着记录膜厚度的增大,膜系的反射率逐渐增大,且记录膜为晶态时膜系的反射率逐渐趋于一定值,而膜系在记录膜为非晶态时的反射率在 60 nm 后又随着膜厚的增大而减小。膜系的反射率对比度在记录膜厚度为 22 nm 时存在最大值,我们选择记录膜的厚度为 22 nm。

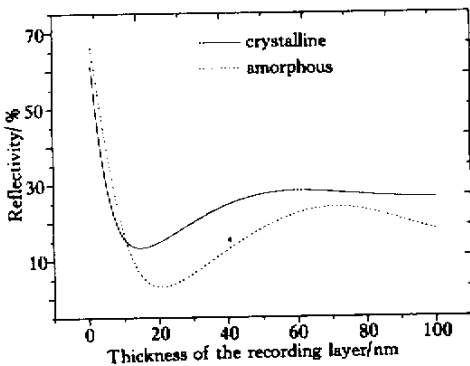


Fig. 9 Dependence of the reflectivity on the thickness of recording layer

此时,膜系的反射率对比度在 60% 以上。

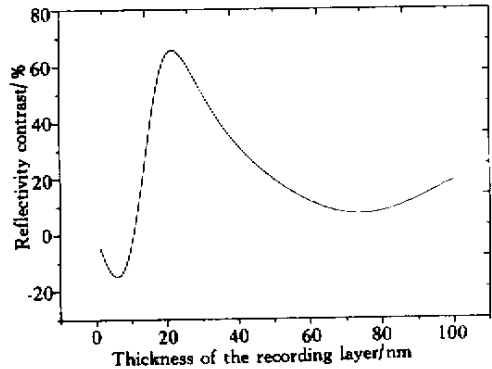


Fig. 10 Dependence of the reflectivity contrast on the thickness of recording layer

上介质膜与各膜层的匹配计算结果见图 11 和图 12。膜系的反射率先随着上介质膜的厚度的增大而减小,在达到一极小值后(在 30 nm 附近)又随厚度的增加而增大。记录膜处于晶态时的反射率随上介质层膜厚的变化比记录膜处于非晶态时膜系的反射率的变化较平缓。图 10 中膜系的反射率对比度在上介质膜处于 30 nm 时有最大值,在 60% 以上。由于上介质膜的主要作用是防止记录膜的氧化、变形,而且在记录时记录膜需要快速冷却,热量需通过热辐射或传导释放出去,从这一点考虑,上介质膜应该尽量薄。为了保证信号的读出质量,应该保证膜系在记录膜处于晶态和非晶态时的反射率都应该相对较大,所以选择上介质膜的厚度为 18 nm。

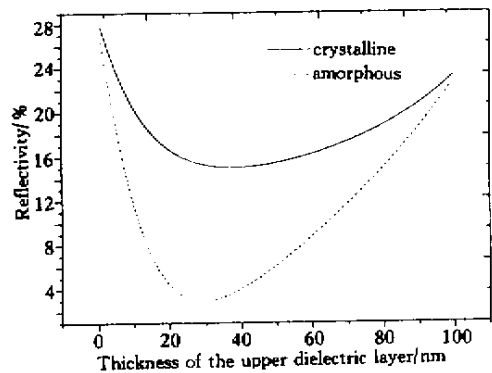


Fig. 11 Dependence of the reflectivity on the thickness of upper dielectric layer

图 13 和图 14 为反射膜与其它各膜层的匹配计算结果。随着反射膜厚度的增大,膜系的反射率迅速减小,在反射膜厚度达到 20 nm 左右时,膜系在记录膜处于晶态和非晶态时的反射率均达到一定值,此后不再随膜厚的变化而变化。而膜系的反射率对比度先是随着反射膜的厚度的增大而迅速增大,在 50 nm 后反射率对比度达到定值,为 53%,此

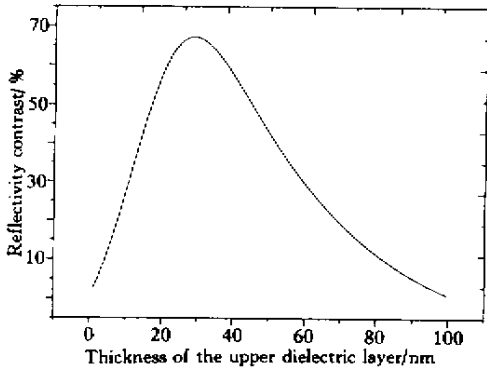


Fig. 12 Dependence of the reflectivity contrast on the thickness of the upper dielectric layer

后膜系的反射率对比度也不随反射膜的厚度的变化而变化。大家知道,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。最终我们选择反射膜厚度为 100 nm。

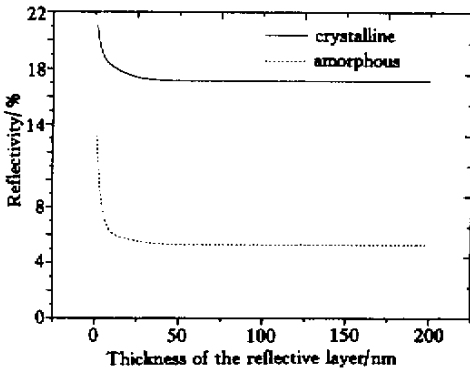


Fig. 13 Dependence of the reflectivity on the thickness of reflective layer

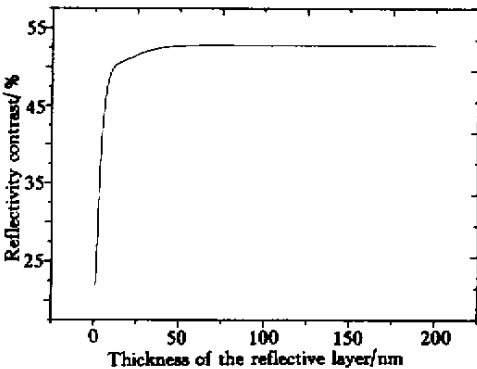


Fig. 14 Dependence of the reflectivity contrast on the thickness of reflective layer

经过逐层优化,最终得到了具有较好光学性能

的膜层匹配。在计算中假定各层薄膜的光学常数是不随膜厚而改变的,但以前的研究表明^[9]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,我们的最终计算结果并不是唯一的结果。但在设计中很难计及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。

结论 通过模拟计算得到了较佳光学性能的膜系匹配,下介质层、掩膜层、中介质层、记录膜、上介质层和反射层的厚度分别为 220 nm、10 nm、290 nm、22 nm、18 nm、100 nm。对超分辨相变光盘的膜层结构,精确控制各膜层的厚度是极重要的,尽管在模拟计算时假定了各膜层的厚度,但在模拟计算中采用逐一优化的方法,计算有一定的可靠性。最终的计算结果表明我们设计的膜系有良好的光学性能。

参 考 文 献

- [1] Kozlovshy W J, Dewey A G, Juliana A *et al.*. Optical recording in the blue using a frequency-doubled diode laser. *Proc. SPIE*, 1992, **1663**: 410 ~ 415
- [2] Mansfield S M, Studenmund W R, Kino G S *et al.*. High-numerical-aperture lens system for optical storage. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(4): 305 ~ 307
- [3] Kaneko M, Aratani K, Fukumoto A *et al.*. Irister-magneto-optical disk for magnetically induced super resolution. *Proc. IEEE*, 1994, **82**(4): 544 ~ 553
- [4] Yasuda K, Ono M, Aratani K *et al.*. Premastered optical disk by superresolution. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(11B): 5210 ~ 5213
- [5] Liu J R, Lu Y S, Tien C H *et al.*. Effects of aperture wall on the readout signal of erasable thermal phase change super resolution (EPSR) disks. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(1B): 1661 ~ 1664
- [6] Yamada N, Ohno E, Nishiuchi K *et al.*. Rapid-phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(5): 2849 ~ 2856
- [7] Wang Yang, Gu Donghong, Gan Fuxi. The thickness error analysis of multilayers for recordable and phase-change optical disks. *Proc. SPIE*, 2000, **4085**: 128 ~
- [8] Tang Jinfu, Zheng Quan. *Applied Thin Film Optics* (实用薄膜光学). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984 (in Chinese)
- [9] Li Jinyan, Hou Lisong, Gan Fuxi. Effect of film thickness on optical properties of AgInSbTe phase-change films. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(8): 952 ~ 956 (in Chinese)

Calculation and Analysis of Multilayers for Phase-Change Super-Resolution Optical Disks

Li Jinyan Ruan Hao Gan Fuxi

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

(Received 6 December 2000; revised 9 February 2001)

Abstract: Ge-Sb-Te is a kind of phase-change optical recording material with good performance. It can be used as mask layer in the super-resolution optical disks. The relation of the multilayer's optical parameters (reflectivity and reflectivity contrast) and the film thickness of the structure of the six layers of phase-change super-resolution optical disks are studied. The ideal result of thickness for each layer is given.

Key words: phase-change super-resolution optical disk; mask layer; reflectivity contrast

第九届全国光学测试学术讨论会在厦门举行

受中国光学学会委托,由中国光学学会光学测试专业委员会主办、玉晶光电(厦门)有限公司承办的第九届全国光学测试学术讨论会于2001年10月23日~28日在福建厦门市召开。江苏、上海、北京、四川、黑龙江、吉林、云南等19个省市125位代表参加了会议。他们分属中国科学院、中国计量科学院、中国工程物理研究院、高教部、信息产业部、航空航天部等部门中的40多个科研单位及24所高校、工厂与公司。

大会开幕式于24日上午举行,由本届学术会议的专业委员会副主任张鸿澄教授主持,厦门市副市长、市府副秘书长、市科委副主任等厦门市领导出席开幕式并讲话祝贺。专业委员会主任陈进榜教授代表中国光学学会第三届光学测试专业委员会致辞,热烈欢迎来自祖国四面八方的学术会议代表,并衷心感谢承办单位玉晶光电(厦门)有限公司为本届学术年会付出的辛勤工作和周到服务。公司董事长陈天庆先生代表承办单位和大会组委会致辞,并预祝大会圆满成功。出席大会开幕式的还有范滇元院士、薛鸣球院士、潘君骅院士以及国家天文台副台长崔向群研究员。台湾光学工业同业公会理事长周丰雄先生率领的大陆经贸访问团一行十数人以及玉晶光电有限公司董事长陈天恕先生等。

在下午举行的全体代表大会特邀报告中,范滇元院士的“强激光及其计量与诊断”、薛鸣球院士的“空间光学工程”、潘君骅院士的“凸非球面的检验——光学检验中的难题”、崔向群研究员的“LAMOST光学系统的加工与检测”等,内容丰富,生动翔实,给代表们留下深刻的印象。接着会议分四个分会场进行分组交流,会上对共同感兴趣的课题进行了热烈讨论,学术气氛十分浓厚。

本届学术会议深受国内同行瞩目,共收到稿件170余篇,录用160篇。内容涉及光学、光电及激光等诸多学科有关检测的各个方面所取得的最新成果与进展。

会议期间,专业委员会部分委员还与台湾光学工业同业公会大陆经贸访问团成员进行接洽与交谈,光学同行相见格外亲切,并欢迎台胞企业家来大陆投资兴办光学工厂。

会议期间,与会代表参观了玉晶光电(厦门)有限公司,受到公司董事长及员工们的热情接待。该公司的现代化管理和先进光学生产能力给代表们留下很深的印象。会议还组织参观鼓浪屿和集美鳌园。

会议期间举行了专委会第三届委员会会议,委员们听取并讨论了本届会议筹备及财务收支报告。还讨论了老委员退休和增补新委员事宜。会议初拟下届会议于2004年春在烟台或洛阳之一处举行。与会委员还投票选举了第四届光学测试专业委员会领导班子。陈进榜教授继续任主任委员,副主任委员是韩昌元研究员、徐德衍研究员、李景镇教授、沙定国教授、杨照金研究员。潘君骅院士、苏大图教授为顾问。