

文章编号:1001-5078(2003)03-0167-05

高密度双层光盘研究进展

刘 波, 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要:综述了高密度双层光盘的研究进展,介绍了其记录原理、记录材料和记录性能,重点讨论了高密度双层光盘所面临的问题及其解决方法,最后提出了我国超高密度光盘存储技术发展的研究思路。

关键词:双层光盘;高密度

中图分类号:TQ597.3

文献标识码:A

Overview and Future of the High-density Dual-layer Optical Disk

L IU Bo, GAN Fu xi

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

Abstract: In the paper, the state of art researches progress of high-density dual-layer optical disk was reviewed. The principle of recording, the recording materials and the recording performance of dual-layer optical disk were given. A detailed and comprehensive overview on the problems, which are facing dual-layer optical disk, and their solutions, were discussed. Several points that should be taken into consideration in the future research on super high-density optical disk storage in our country were presented.

Key words: dual-layer optical disk; high-density

1 引 言

光盘存储技术发展到了八十年代,开创了 CD (Compact disk) 的应用新纪元。进入九十年代以来,与只读式光盘读出驱动器相兼容的一次写入型和可擦重写型系列光盘相继出现在多媒体领域,主要包括 CD-R (CD-recordable)、PD (phase-change dual)、CD-RW (CD-rewritable)、DVD-RAM (digital versatile disk-random access memory)、DVD-R (DVD-recordable) 和 DVD-RW (DVD-rewritable)^[1]。在二十一世纪初即将推向市场的光盘主要为存储容量更大的 DVR (digital video recording) 系列光盘,以适应通讯网络和数字广播日益增加的爆炸式数字信息容量。目前光盘的一个主要应用就是记录和播放高分辨率的图像,比如记录 4h 的高分辨率电视图像需要 50 GB 的存储容量,而即将面世的 DVR 光盘的容量也只有 22 GB,因此进一步提高光盘的容量已成为今

后光盘发展的大趋势。

光存储技术中用于提高光盘容量的方法很多,比如短波长和高数值孔径 (NA) 物镜的应用^[2]、台-槽记录^[3]、多级记录^[4]、标记边记录^[5]和多层记录等,双层记录是多层记录最简单的一种形式,可以使光盘的容量加倍,由于双层记录可与短波长和高数值孔径 (NA) 物镜等上述高密度记录方法相结合,因此它是一种很有吸引力和发展前景的光存储技术,已成为光存储领域近几年的研究重点之一^[6]。本文将综述双层光盘的研究进展及其所面临的几个主要问题,并讨论了解决问题的方法和措施。

基金项目:本课题受国家自然科学基金资助(59832060)

作者简介:刘波(1973-),男,博士研究生,曾从事过金刚石薄膜和 C₆₀ 薄膜的研究,目前的主要研究方向为可擦重写相变光盘的镀膜工艺。

收稿日期:2002-09-02

2 双层光盘的发展和记录原理

双层记录是激光透过第一记录层(离入射光近),对第二记录层(离入射光远)进行写入读出。双层光盘的概念最早由 Rubin 等于 1994 年提出,他们采用空气间隙结构成功实现了从光盘的同一侧在两层上的记录。经过近十年的发展,双层光盘不论从容量还是从功能上都得到了很大的提高和完善,表 1 列出了双层光盘的发展历史^[7]。

表 1 双层光盘的发展史

时间	记录方式(第一层/第二层)
1994	一次写入/一次写入型(空气间隙结构)
1995	只读式/只读式型
1995	只读式/重写型
1997	一次写入/一次写入型(密封间隙结构)
1998	重写型/重写型(红色激光)
2000	重写型/重写型(蓝紫色激光)

图 1 给出了双层光盘的纵向剖面图。分别制备在 PC 衬底上的两层用紫外固化胶把它们粘结在一起。对于层 1(靠近激光束的一侧)和层 2,信号的读出都是从同一个方向进行的。双层光盘层 1 的记录和读出性能不受层 2 的影响,而层 2 则受层 1 的影响非常大。对于只读式光盘,只需优化每层的反射率即可。但是,记录型光盘则不同,记录层的变化不仅涉及反射率,还包括透过率和吸收率的变化。因此,为了使两层的性能一致,必须优化两层的光学性能。同时为了避免两层间记录/读出/擦写性能的相互影响,双层光盘的结构也需要进行精密设计。有关内容将在本文第四部分进行详细论述。

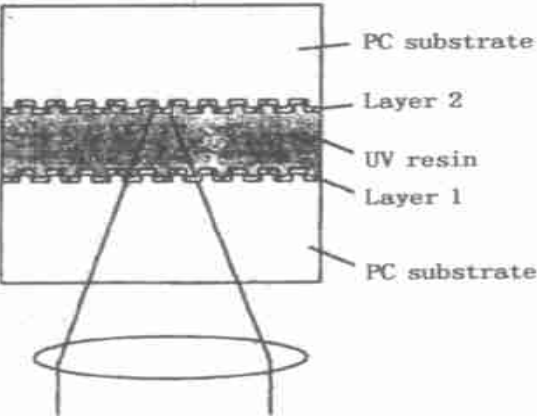


图 1 双层光盘的纵向剖面图

3 高密度双层光盘用记录材料

双层光盘的特殊结构决定了可记录型高密度双

层光盘的记录材料与传统的单层相变光盘记录材料会有所不同。一般来讲,GeSbTe 和 AgInSbTe 相变材料可以作为第二层的记录材料,但由于第一记录层要求透过率很高,情况会有所不同。为了提高第一记录层的透过率,最有效的方法是减薄记录层的厚度。在理论计算上,如果将膜厚度减薄到 6nm,即可确保 50 % 的透过率,但经验表明,在传统上采用红色激光记录时所用的记录材料,若将膜厚减到极薄的程度(6nm),那么就会导致光学变化及晶化速度不够,因而得不到足够的初始性能。因此,为了实现采用蓝紫色激光的双层光盘,必须解决记录材料有关的课题,即(1)在蓝紫色激光范围内有较大的光学变化;(2)具有适用于双层光盘的足够快的结晶速度。

Nishiuchi 等^[8]选择 $\text{Te}_{42}\text{O}_{46}\text{Pd}_{15}$ 低值氧化物相变薄膜作为高密度双层光盘的记录膜,因为这种材料具有足够大的透过率,膜厚为 20nm 时其非晶态和晶态的透过率分别为 69.5 % 和 52.1 %,并且它还具有很好的环境稳定性,特别适合于一次写入型记录。Borg 等^[9,10]发现,掺杂共晶 SbTe 基合金与 GeSbTe 相比在具有高透过率时的光学性能好,热稳定性高,并且其快的结晶速度容易实现高速记录,数据传输速率高达 100Mbit/s。Kojima 等^[11]通过用 SnTe 替换 GeSbTe 中的部分 GeTe 后发现了新的四元相变记录材料 GeSnSbTe ,由于 Sn 的加入使得在很薄的膜中非晶相也含有大量的晶核,同时 Sn 的加入并未改变晶体结构, GeSnSbTe 仍具有单相 NaCl 型结构,这些都有利于提高结晶速度,更为重要的是 Sn 的加入使 GeSbTe 的透过率明显提高,是蓝紫光双层记录光盘首选材料之一。另外,AgInSbTeGe 相变材料由于结晶速度快、稳定性好也被用于高密度双层光盘记录材料^[12]。

4 双层光盘所面临的几个问题

从光学角度设计,双层光盘两层的性能必须满足以下几点要求:^[18]

- (1) 来自层 1 和层 2 的信号强度必须相当;
- (2) 层 1 和层 2 具有相等的记录灵敏度;
- (3) 层 2 的记录和读出性能基本不受层 1 的影响

为了满足上述要求,层 1 要有大的透过率(50 % 以上)和小的吸收率,同时层 2 要具有大的吸收率(70 % 以上)和反射率,以保证层 2 上激光聚焦、跟踪和记录的实现,因为到达层 2 的激光强度往往被层

1 所减弱。通常采用调整两层的厚度来实现层 1 与层 2 反射率的相当。考虑到生产过程的需要,层 1 与层 2 的组成应相同。一般情况下,层 1 的厚度很薄而层 2 则较厚以便具有足够的吸收和反射。

由于第一记录层的状态和性能对第二层的影响很大,因此双层光盘的膜层设计主要围绕第一层进行。总的来说应考虑以下几个问题:首先要保证第一层有足够高的透过率;第二层要有足够高的记录灵敏度和反射率;两层的记录性能相当,且相互间的影响要最小。

4.1 第一记录层的透过率问题

本文第三部分已经提到,为了提高第一记录层的透过率,最有效的方法是减薄记录层的厚度,但是此种方法所起的作用毕竟有限,因此必须寻求其它更有效的措施。

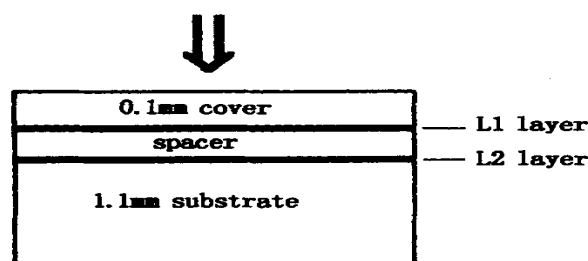


图2 双层相变光盘的结构示意图

Wierenga^[13]采用透明的热传导层代替金属反射层,常用的热传导层有 Ta_2O_5 、 SiC 和 AlN 等,此法虽可以获得高透过率,但由于 AlN 等的热传导比 Al 低两个数量级,根本不能提供足够高的骤冷速率,记录性能受到很大影响。为此他又设计了另一种结构,即在 AlN 与 ZnS-SiO_2 间加入一层 Ag 膜,因为当薄膜厚度很小时(10nm 左右), Ag 膜的透过率约为 60%,而 Al 膜只有 10%,同时由于 Ag 膜的引入增大了膜系的骤冷速率。Akiyama 等^[7]同时运用了减薄记录层(减层 6nm)和极薄 Ag 反射层(10nm)的措施,为了弥补记录层因减薄而损失的结晶速率,他们又在记录层的两侧添加了结晶促进层 GeN ,在 $\lambda = 405\text{nm}$, $NA = 0.65$ 的记录条件下实现了 120nm 光盘单面 27GB 的存储容量。Mijiritskii 等^[10]除采用极薄 Ag 反射层外,在光盘的结构上又作了重大改变,如图 2 所示,光盘衬底厚 1.1mm,第一记录层上的覆盖层为 0.1mm,与以往不同的是,入射激光从较薄的覆盖层一侧进入光盘,这样可以进一步减少入射激光的损失,在 $\lambda = 405\text{nm}$, $NA =$

0.85 的记录条件下他们实现了 120mm 光盘单面 45GB 的存储容量。

为了更准确深入了解第一记录层对第二记录层的影响,Narumi 等^[14]认为第一记录层记录与未记录的透过率之比 ρ 可表示为:

$$\rho = [(1 - a) T_{\text{cry}} + a T_{\text{amo}}] / T_{\text{cry}} \quad (1)$$

其中 a 为第一记录层记录后非晶区域的面积与晶相和非晶区域的面积之比,它的大小由第一记录层的记录状态决定。很明显,第一记录层的透过率变化受其晶相与非晶相的透过率和记录状态等因素影响。式(1)可变换为

$$\rho = 1 - a [T_{\text{cry}} - T_{\text{amo}}] / T_{\text{cry}} = 1 - \Delta T a \quad (2)$$

其中 ΔT 为晶态与非晶态透过率的相对变化。当记录状态固定时(a 为常数),要使第一记录层的透过率变化尽可能小,就需要 ΔT 趋近于零,即第一记录层晶态与非晶态的透过率基本相同。根据这一思想,Narumi 等设计了一种平衡透过率结构(balanced transmittance structure)的光盘,它的特点是,不论第一记录层是否记录信息,其透过率几乎是常数。这种结构是通过调整 GeSbTe 记录膜使之具有恰当的光学常数和优化介电层的厚度来实现的,实验表明这种结构可以有效减轻第一记录层对第二记录层的影响,并实现了 120mm 光盘单面 55GB 的存储容量。

2002 年又出现了两种结构更为简单的双层可重写相变光盘。Wu 等^[15]仅用一种热敏材料取代 Al 反射层,其它未作调整,第一层的膜层结构如下: $\text{PC}(0.6\text{mm}) / \text{ZnS-SiO}_2(80\text{nm}) / \text{GeSbTe}(15\text{nm}) / \text{ZnS-SiO}_2(20\text{nm}) / \text{热敏材料}(20\text{nm})$,其透过率得到大幅度提高。热敏材料的作用是作为热致光学开关,在临界温度附近热敏材料发生明显的热致可逆半导体与金属间的相变,结果造成了其光学性能发生了显著变化。当温度高于转变温度时,表现为金属性,具有高反射率;反之则为介电性,具有高透过率和低吸收。作为双层光盘的光学开关层,热敏材料应具备低转变温度和高热传导的性能,比如 VO_2 、 Ag_2S 、 Ag_2Se 及某些有机材料等。Tan 等^[16]也是仅用 Al-Cr 层取代了 Al 反射层,通过改变 Al-Cr 层的厚度来调整透过率的大小,这种双层光盘结构的优点在于能与 CD-RW 溅射系统相兼容,可以大大简化双层光盘的生产过程,从而降低成本。

4.2 第二记录层的记录灵敏度和反射率问题

以上已经提到,第二记录层的写/擦/读激光都要通过第一记录层,那么分别只有 50% 和 25% 的入

射光强到达第二记录层和返回读取光头,因此,就要求第二记录层具有足够高的记录灵敏度和反射率^[10,17,18]。

高的灵敏度意味着相同的信号调制(非晶记录斑的尺寸)能够在较低的写入功率下获得。提高记录灵敏度的主要措施有:采用低熔化温度的相变材料;增加相变层的光学吸收;降低相变层的冷却速率(可通过调整相变层与散热层间介电层的厚度和改变散热层冷却过程本身来实现)。但考虑到熔化温度的降低伴随着玻璃转变温度的降低,从而非晶记录斑的稳定性下降,因此第一种方法不可取。改变相变层的成分可改变其吸收,在通常的范围内,相变层厚度的变化并不能显著改变其吸收。由于介电层的热阻效应,增加其厚度能降低冷却速率,但又不能太厚,否则会使记录斑的再结晶现象恶化;具有低热容、低热传导率的散热层能增加记录灵敏度。

考虑到光学对比度、晶态反射率和吸收间的相互依赖关系,对第二记录层的要求是:晶态反射率尽量高;反射率对比度大;尽可能大的吸收。增加反射层的厚度可大幅度提高反射率,但同时也会降低记录灵敏度,因此要合理选择反射层的种类和厚度。

4.3 双层光盘的记录性能问题

对于可擦写的双层相变光盘来讲,除传统的衡量可擦重写相变光盘记录性能的主要指标外,如载噪比;写入/擦除功率;擦除率;跳动;层内串扰/串擦;直接重写循环性;眼图;数据传输速率等,还具有其独特的记录性能衡量指标,比如层间串扰/串擦;半透层(第一记录层)的写/擦/读性能等。影响双层光盘记录性能的因素很多,除了上述讨论的膜层结构外,还有球面像差(由散焦和串扰引起)、衬底厚度的偏差、两层间间隔层的厚度等。在此仅限于讨论层间串扰/串擦、半透层的写/擦/读性能和间隔层的厚度等目前研究较多且比较重要的问题。

双层光盘的两层记录层通常是用紫外固化胶间隔开,为减轻其对第二记录层入射和反射光的影响,要求间隔层非常透明,基本无吸收,并且膜厚均匀性非常好。由于球面像差正比于 λ/NA^4 ,随记录波长的缩短和数值孔径的增加,间隔层的厚度也要相应减小,以尽可能消除球面像差对光路的影响。但同时从热学设计角度讲,间隔层要足够厚以避免两记录层间发生热串扰,就能保证两记录层在热学行为上是独立的。因此必须恰当选择间隔层的厚度。Higuchi^[19]和 Lee^[20]等研究了间隔层厚度对双层光盘跳动的影响后发现,双层 DVD 和 DVR 光盘的间

隔层最佳厚度分别为 $55 \pm 15\mu\text{m}$ 和 $30 \sim 40\mu\text{m}$,膜厚均匀性要保持在 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 以内。

由于激光聚焦的失误和双层光盘两层相邻很近的缘故,读取记录信号时往往会产生层间串扰。Yang 等^[21]系统地研究了只读式双层光盘的层间串扰问题,通过模拟计算给出了层间串扰的表达式,发现聚焦物镜的数值孔径越大,层间串扰就越接近直流特性,即随时间变化波动不大;随间隔层厚度增加,层间串扰越小,当间隔层厚度远大于光束的焦深时,层间串扰基本表现为直流性。最后他们提出了抑制层间串扰的方法:合理设计光盘结构;屏蔽携带层间串扰的反射光束;用探测电路过滤层间串扰。层间串扰主要指在双层光盘的其中一层上记录信息时导致另一层上热量的积累,致使非晶记录斑再结晶,从而擦除了原来已有的信息。解决办法之一是增加间隔层厚度,使两层在热学上保持独立;其二是调整记录激光脉冲分布以满足不同记录层的需要^[14];也可通过改变记录层的成分和优化光盘膜层结构等途径解决。

在传统的相变光盘,金属冷却层的存在加速了相变材料的记录过程中温度的变化,但双层光盘的第一记录层中的金属反射层被半反射层或透明层取代,大大降低了其冷却速率,属于慢冷却结构,因此所需要的记录功率就比第二记录层低的多。鉴于以上原因,Meinders 等^[22]从数字模拟角度研究了慢冷却结构中记录斑的形成和擦除特点,同时也对记录速率、擦除功率和晶态生长速率对记录斑的擦除性能的影响进行了理论模拟,发现写入过程中存在严重的再结晶,原因在于热积累现象较严重,解决这一问题的主要措施有:添加半透明的散热层可显著促进记录斑的形成,但同时也提高了写入功率;调整写入方案。

5 结 论

综上所述,随着数字电视、数码相机、数字电影和数字录像等数字领域对存储器的要求不断提高,需要进一步提高现有光盘的存储容量和数据传输速率。2002 年 3 月份,索尼、松下、飞利浦等九家公司宣布目前已经开发研究出第三代光盘,并称之为“蓝光光盘(blue-ray optical disk)”,同时他们还制定了该光盘的标准制式,进一步加快了实用化的进程,预计 2002 年底可进入市场。蓝光光盘之后光盘领域的研究重点将主要集中在近场超分辨存储、多层记录、多波长多级记录和全息存储等几个方向,而双层

记录是最有可能在短期内达到实用化的新一代高密度光盘,因此成为目前的研究重点。但双层光盘在进入市场之前还有一些问题需要解决,比如层间的串扰/串擦问题、两层的记录性能匹配问题、双层光盘与现有光盘的兼容问题及新型记录材料的开发问题等等。

我国的光盘研究和产业化进程与世界水平相比还存在一定的差距,这就对我国的光盘产业提出了严峻的挑战。因此我国今后的光盘产业发展方向必须与国际标准接轨,加强与国际大公司的合作,同时尽可能多地研究开发出具有自主知识产权的成果,否则我国的光盘产业就会面临一条艰难曲折的道路。

参考文献:

- [1] 干福熹. 高密度光数据存储技术的发展[J]. 物理, 1999, 28(6): 323 - 332.
- [2] Benno Tieke, Martijn Dekker, Nicola Pfeffer, et al. High data-rate phase-change media for the digital video recording system[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39(2B): 762 - 765.
- [3] Naoyasu Miyagawa, Eiji Ohno, Kenichi Nishiuchi, et al. Phase change optical disk using land and groove method applicable to proposed super density rewritable disc specifications[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1996, 35(1B): 502 - 503.
- [4] Takeo Ohta, Kenichi Nishiuchi, Kenji Narumi, et al. Overview and the future of phase-change optical disk technology[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39(2B): 770 - 774.
- [5] Tatsunori Ide, Mitsuya Okada. Jitter improvement in mark edge recording for phase change optical disks with optical phase encoding[J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 64(13): 1613 - 1614.
- [6] 刘波, 阮昊, 干福熹. 可擦重写相变光盘的研究进展[J]. 激光与红外, 2002, 32(2): 70 - 73.
- [7] Tetsuya Akiyama, Mayumi Uno, Hideki Kitaura, et al. Rewritable dual-layer phase-change optical disk utilizing a blue-violet laser[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40(3B): 1598 - 1603.
- [8] Kenichi Nishiuchi, Hideki Kitaura, Noboru Yamada, et al. Dual-layer optical disk with Te-O-Pd phase change film[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1998, 37(4B): 2163 - 2167.
- [9] Herman J Borg, Mark van Schijndel, Jan C N Rijpers, et al. Phase-change media for high-numerical aperture and blue-wavelength recording[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40(3B): 1592 - 1597.
- [10] Andrei Mijiritskii, Jochen Hellmig, Herman Borg, et al. Development of recording stacks for a rewritable dual-layer optical disc[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41(3B): 1668 - 1673.
- [11] Rie Kojima, Noboru Yamada. Acceleration of crystallization speed by Sn addition to Ge-Sb-Te phase-change recording material[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40(10): 5930 - 5937.
- [12] Michiaki Shinotsuka, Hiroyuki Iwasa, Ryuichi Furukawa, et al. Semi transparent recording stack with fast-crystallization phase-change material for dual-layer optical disk[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41(3B): 1693 - 1694.
- [13] H A Wierenga. Phase change recording: options for 10 - 20 GB (dual layer, high NA, and blue) [A]. SPIE, 1998, 3401: 64 - 70.
- [14] Kenji Narumi, Tetsuya Akiyama, Naoyasu Miyagawa, et al. Rewritable dual-layer phase change optical disk with a balanced transmittance structure[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41(5A): 2925 - 2930.
- [15] Fung Hsu Wu, Han Ping, D Shieh. Optical switching layer for rewritable volumetric optical disks[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41(3B): 1683 - 1684.
- [16] Pik Kee Tan, Haibiao Yan, Lu Ping Shi, et al. New structure of dual-layer rewritable phase-change optical disc[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41(3B): 1685 - 1686.
- [17] Jean-Michel Bruneau, Bernard Bechevet, Celine Germain. Optical design for a double level rewritable phase change disc[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1998, 37(4B): 2168 - 2175.
- [18] Ken-ichi Nagata, Noboru Yamada, Kenichi Nishiuchi, et al. Rewritable dual-layer phase change optical disk[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1999, 38(3B): 1679 - 1686.
- [19] Takanobu Higuchi, Hajime Koyanagi. 27.4 Gbyte read-only dual-layer disc for blue lasers[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39(2B): 933 - 936.
- [20] Kyung Geun Lee, Chang Min Park, Du Seop Yoon, et al. Experimental results of space layer thickness for blue-wavelength dual-layered disc[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40(3B): 1643 - 1644.
- [21] Bor Wen Yang, Han Ping, D Shieh. Interlayer cross talk in dual-layer read-only optical disks[J]. Appl. Opt., 1999, 38(2): 333 - 338.
- [22] E R Meinders, H J Borg, M H R Lankhorst, et al. Numerical simulation of mark formation in dual-stack phase change recording[J]. J. Appl. Phys., 2002, 91(12): 9794 - 9802.