

文章编号: 0258-7025(2004)11-1351-05

蓝绿激光作用下沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的晶化性能

张广军, 顾冬红, 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储实验室, 上海 201800)

摘要 用反射率对比度来衡量晶化程度, 分别探讨了脉宽为 500 ns, 100 ns, 60 ns 的蓝绿激光(514 nm)作用下沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的晶化性能, 表明 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜在蓝绿激光下可具有较高的晶化速度。对比分析了热致晶化后的 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜在 514 nm 处的反射率对比度, 结果表明激光晶化和热致晶化后薄膜的反射率对比度有明显差别, 分别为 8% 和 19.2%。

关键词 薄膜; 相变薄膜; 蓝绿激光; $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$; 晶化; 反射率对比度

中图分类号 O 484.4⁺1 **文献标识码** A

Properties of Crystallization for As-Deposited $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ Phase Change Thin Films Irradiation upon Blue-Green Laser

ZHANG Guang-jun, GU Dong-hong, GAN Fu-xi

(Laboratory for High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The properties of blue-green laser induced crystallization for as-deposited $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ phase change thin films irradiation are studied by measuring the reflectivity contrast at 500, 100 and 60 ns pulse duration. The results show that $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ phase change thin films irradiated by blue-green laser have high crystallization speed. The reflectivity contrast of thermal treatment $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ phase change thin films is also investigated, and the results show that there is a different in the reflectivity contrast, which is 8% and 19.2%, for laser-induced and thermal treatment films, respectively.

Key words thin films; phase change films; blue-green laser; $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$; crystallization; reflectivity contrast

1 引言

自 20 世纪 60 年代 Ovshinsky 等^[1]率先提出 Ge-Sb-Te 体系半导体合金薄膜可以应用于相变光存储介质以来, 各种具有可逆相变性质的材料得到了迅速的发展和应用。为进一步提高相变光盘的记录密度和数据传输率, Ag-In-Sb-Te 四元合金已引起人们注意并成为最具希望的候选材料。Ag-In-Sb-Te 体系是典型的凹槽记录格式, 具有线记录密度高、抖动值低等优点, 可广泛用于 CD-RW, DVD-

RW^[2,3]。高记录密度可通过缩短激光波长^[4]、提高透镜数值孔径^[5]以及利用近场超分辨^[6]等技术来获得; 而解决相变光盘的数据传输率的问题, 要从其写入、读出和擦除性能着手。相变光盘的写入是一个非晶化过程, 本身转变速度就非常快^[7]。读出因为非晶态和晶态存在不同光学性能可以达到快速识别, 而擦除由于是晶化过程则被认为是限制速率的步骤^[8]。因此加快相变光盘信息的擦除速度即提高晶化能力是获得高数据传输率的有效途径之一。所以研究相变光盘的晶化, 即材料的擦除过程是一个

收稿日期: 2003-07-21; 收到修改稿日期: 2003-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(60207005)和上海市科技启明星计划(03QG14057)资助项目。

作者简介: 张广军(1977—), 黑龙江人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 目前从事相变薄膜材料的研究。

E-mail: gjzhang@mail.siom.ac.cn

非常有意义的方向。已有学者进行了有关 Ag-In-Sb-Te 的晶相结构^[9,10]、光学性质^[11,12] 和初始化结晶行为^[13] 的探索。本文主要是利用蓝绿激光作为光源,直接照射沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜使其晶化,用反射率对比度来衡量晶化程度,以测试薄膜的晶化性能。

2 实 验

2.1 薄膜的制备

沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜是采用直流磁控溅射方法制备的。多晶 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 合金靶直径 180 mm,底部循环水冷却。工作气体是纯度为 99.999% 的氩气,背景气压低于 1.8×10^{-3} Pa,溅射气压 1 Pa,溅射功率 180 W。薄膜沉积在两面抛光的 K9 玻璃基片上。薄膜厚度约为 50 nm。

2.2 退火实验

为了研究热致晶化薄膜的光谱性质,对初始沉积态薄膜进行退火。真空室预抽真空至 2×10^{-3} Pa 后通入 Ar 气,以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 30 min,自然冷却后取出。

2.3 光谱性能测量

热致晶化与沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的反射率是在室温、正入射条件下,采用 Perkin-Elmer Lambda 9UV/VIS/NIR 光谱仪测量得到的。

2.4 激光作用下晶化性能的测量

采用蓝绿波长激光对 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜的晶化性能进行了研究。图 1 为蓝绿波长激光测试装置示意图。该装置采用波长为 514.5 nm,输出功率为 50 mW 的氩离子激光器,光束经聚焦后照射在薄膜表面,所采用透镜的数值孔径 $\text{NA}=0.85$,光照区的直径约为 $1 \text{ } \mu\text{m}$ 。在该区域上,激光光强近似为高斯分布。入射到样品表面的激光功率和脉宽的可变

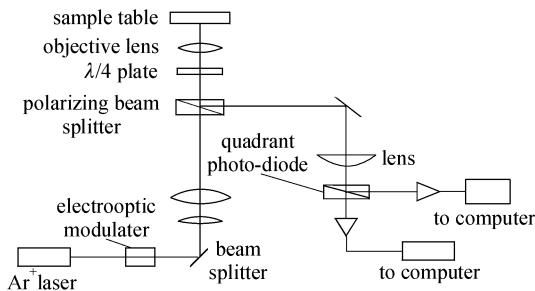


图 1 蓝绿激光测试装置图

Fig. 1 Schematic diagram of blue-green laser tester

化范围分别为:0.1~22.5 mW 和 50~6000 ns。采用一束 1 mW,300 ns 的激光束来检测薄膜在光辐照前后的反射率差异。反射率对比度 C 定义为

$$C = 2 \times \left| \frac{R_f - R_i}{R_f + R_i} \right| \times 100\% \quad (1)$$

其中, R_i 为晶化前薄膜的反射率, R_f 为晶化后薄膜的反射率。测试装置的具体原理可参阅文献 [14,15]。

2.5 扫描电镜观察

蓝绿激光照射沉积态薄膜后形成的晶化点是利用型号为 JSM-6370LA 扫描电镜(SEM)观察的。

3 结果与讨论

3.1 蓝绿激光作用下 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 的晶化性能

相变光盘的记录点是非晶态,非记录点是晶态,其擦除过程即是激光作用下非晶态薄膜的晶化。 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的沉积态通常是非晶态,可以模拟记录状态,直接用蓝绿激光引发薄膜晶化,就相当于擦除实验。尽管理论上,沉积态薄膜的晶化速度慢于熔融快冷后形成的非晶态薄膜的晶化速度^[8],但用激光直接照射沉积态薄膜使其晶化,所获得的结果仍可满足对晶化性能即擦除过程的分析。图 2(a)~(c)是非晶态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜在蓝绿激光作用下晶化性能的测试结果。系统研究了脉宽为 500,100,60 ns 的激光功率与反射率对比度的关系。可以看出三种脉宽下,反射率对比度都是随着激光功率的增大先增加后减小。对于 500 ns 脉宽的蓝绿激光,如图 2(a),当激光功率低于 6.67 mW 时,反射率对比度低于 2%,这主要是因为激光能量低,薄膜不能吸收足够的能量,材料内部没有发生任何结构上的变化。激光功率大于 6.67 mW 时,反射率对比度从 2% 开始增加,当激光功率达到 12.38 mW 时,反射率对比度是 8%,说明 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜在脉宽为 500 ns 激光作用下可以实现由沉积态到晶态的转变。随着激光功率的进一步加大,反射率对比度下降,这是因为激光功率过高,薄膜发生了重新非晶化。进一步减小激光脉宽,如图 2(b),(c),可以发现,脉宽为 100,60 ns 的蓝绿激光,均可使沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜晶化,并且一定脉宽下的反射率对比度随激光功率变化的趋势相似。脉宽为 100 ns 时,激光功率从 7.88 mW 增加到 14.63 mW,反射率对比度从 2% 增加到 8%,激光功率大于 14.63 mW 时,反射率对比度开

始下降。60 ns 脉宽下,在激光功率为 9~18 mW 时,反射率对比度从 2% 增加到 8%,沉积态转变成晶态。其后反射率对比度的下降,同样是因为激光功率过高而引起薄膜表面的重新非晶化。脉宽为 60 ns 的蓝绿激光作用下,沉积态薄膜能够晶化,说明在 60 ns 的短时间内, $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜可以实现非晶态到晶态的转变,表明了该种薄膜具有较高的晶化速率,可产生优良的擦除性能,能够实现高速率数据传输。三种脉宽下的反射率对比度越大表明照射区内的沉积态向晶态转化得越完全。在反射率对比度为 8% 时,500,100,60 ns 脉宽对应的激光功率为 12.38,14.63 和 18 mW。

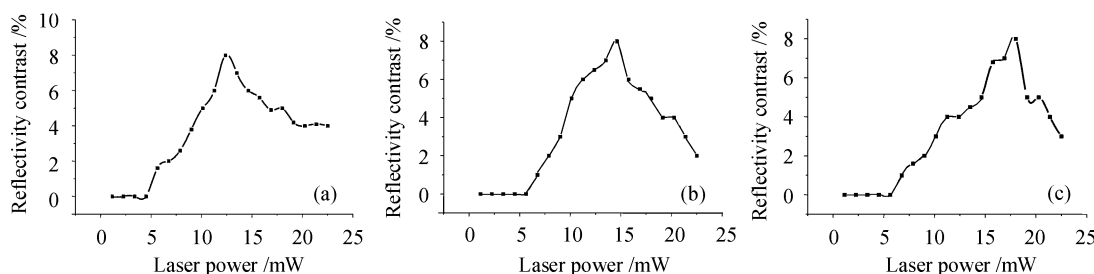


图 2 不同脉宽下非晶态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜的反射率对比度和激光功率的关系

Fig. 2 Relation between reflectivity contrast and laser power of $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ films at different pulse duration

(a) 500 ns; (b) 100 ns; (c) 60 ns

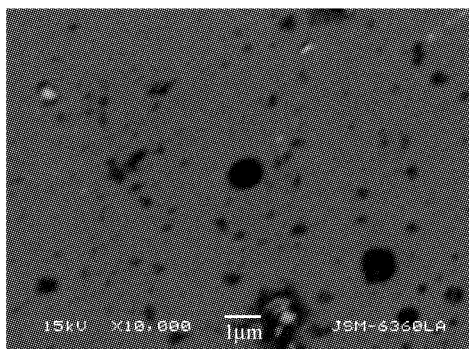


图 3 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜晶化点扫描电镜图

Fig. 3 SEM of crystallization spot for $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ phase change thin films irradiation upon blue-green laser

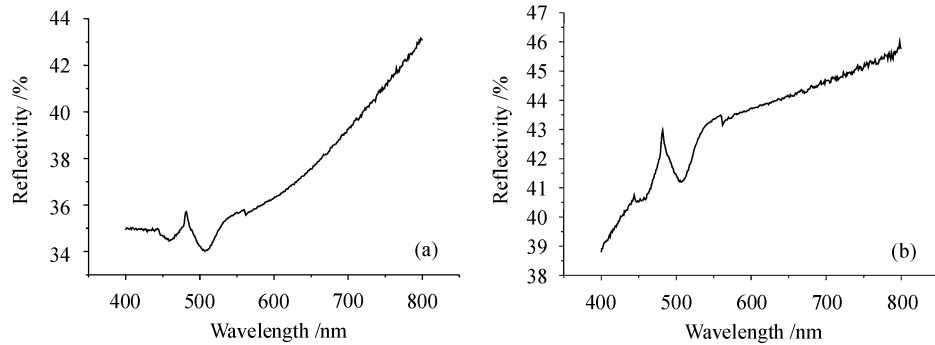
图 3 是沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜在蓝绿激光作用下的晶化点(两个大的黑点)。从扫描电镜照片中可以看出,晶化点边缘形状规则、轮廓清晰,直径基本等于 $1\ \mu\text{m}$ 。还可以发现,晶化点和周围的沉积态区明显不同,晶化点较暗,而沉积态区较明亮,从而产生了反射率对比度的差异。晶态薄膜的密度一般比沉积态的大,因此激光照射后的点实际应该是凹陷的。由于扫描电镜较难体现出表面极

从上述实验数据和以往的研究结果^[8,13]可以分析,当激光功率较小时, $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜虽因吸收激光能量而引起温度的升高,但还不足以达到其晶化温度,薄膜发生了成核、晶粒长大和局部晶化过程,因而晶化度比较低,反射率也低。随着激光功率的增加,薄膜的温度迅速上升,并且超过其晶化温度,晶粒快速长大,晶化程度迅速提高,反射率增大。激光功率过高时,可能达到熔点,造成薄膜的局部区域熔化并发生流动,当激光被移走时,熔化的 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜快速冷却而来不及晶化,形成了非晶态,反射率降低。

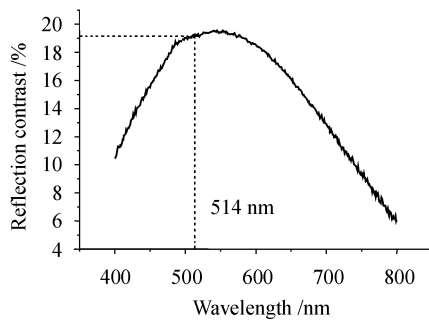
微小的起伏,因此从图中无法看出激光照射后的点是凹陷状态(有关晶化点形貌的问题在参考文献[7]中已有论述)。

3.2 沉积态和热致晶化 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的光谱性能

在光谱实验中,为保证能够对薄膜样品同一位置进行重复测试,在样品上加了一个带小孔的模具。小孔的加入,增加了光源到样品的距离,使反射率光谱在 $450\sim 550\ \text{nm}$ 间产生了波动,并使沉积态和热致晶化薄膜的反射率在整体上有轻微下降,但对总的光谱性能的分析没有影响。图 4(a),(b)分别是沉积态和热致晶化(即晶态) $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的反射率光谱。从图中可以看出,沉积态和热致晶化薄膜的反射率变化趋势基本上随着波长的增加而增加,但热致晶化薄膜的反射率均比沉积态的高,这与两种状态内部原子的排列由无序转变到有序相关。对于沉积态薄膜,在波长为 $400\sim 800\ \text{nm}$ 范围内,其反射率从 34.94% 变化到 43.07%;而热致晶化薄膜的反射率从 38.79% 增加到 45.77%。由式(1)可计算出沉积态和热致晶化相变薄膜的反射率对比度为 19.20%,如图 5 所示。与蓝绿激光

图 4 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜的反射率

(a) 非晶态薄膜; (b) 热致晶化薄膜

Fig. 4 Reflectivity of amorphous $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ films (a) and thermal-treatment crystalline $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ films (b)图 5 非晶态和热致晶化 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 薄膜的
反射率对比度Fig. 5 Reflectivity contrast of amorphous and thermal-treatment crystalline $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ films

引发晶化后的反射率对比度相比,热致晶化产生的反射率对比度较高。

通常热致晶化和激光引发晶化是非晶态相变薄膜两种不同的晶化途径。一般认为这两种方法的共同点都是热效应引起的相变,即相变材料通过热吸收使温度升高,当温度超过结晶温度而低于熔化温度时,相变薄膜发生晶化。关于两种晶化途径的不同点,有人认为,激光引发相变薄膜的晶化存在光子效应^[16],即薄膜材料在激光作用下,能够激发产生电子-空穴对,由于光子激发电子-空穴对的复合,使得相变薄膜材料中相邻原子的化学键合力变弱,从而加快非晶态薄膜的晶化速度。但有关光子效应引发晶化的机理目前还不成熟,利用蓝光、紫光以及超短脉冲激光能够进一步加深对光子效应的理解。从热效应的角度看,激光引发晶化与热致晶化过程的不同在于相变薄膜被加热过程中升温速度的差别,通常激光引发相变的升温速度与热处理过程的升温速度相比大约高出十个数量级,而正是加热速率的

巨大差别可能导致光学性能,如本文中的反射率对比度有很大的不同。

4 结 论

利用波长为 514 nm 的蓝绿激光,在 500, 100, 60 ns 脉宽下,均可使沉积态 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜晶化,最大反射率对比度处的激光功率分别为 12.38, 14.63 和 18 mW。激光功率再增大时,反射率对比度下降,薄膜表面发生了重新非晶化。在不同波长下,沉积态和热致晶化 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Sb}_{51}\text{Te}_{26}$ 相变薄膜的反射率不同,热致晶化与沉积态薄膜的反射率对比度,在 514 nm 处为 19.2%,高于蓝绿激光引发晶化的薄膜的反射率对比度。

参 考 文 献

- 1 J. Feinleib, J. deNeufville, S. C. Moss *et al.*. Rapid reversible light-induced crystallization of amorphous semiconductors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971-18(6):254~257
- 2 H. Iwasaki, M. Harigaya, O. Nonoyama *et al.*. Completely erasable phase change optical disc II: application of Ag-In-Sb-Te mixed-phase system for rewritable compact disc compatible with CD-velocity and double CD-velocity [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, 32(Part 1, 11B):5241~5247
- 3 Guo-Fu Zhou. Materials aspects in phases change optical recording [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 304-306:73~80
- 4 K.-G. Lee, C.-M. Park, D.-S. Yoon *et al.*. Experimental results of space layer thickness for blue-wavelength dual-layered disc [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40(Part 1, 3B):1643~1644
- 5 T. Yanagosawa, T. Nomot, S. Ohsawa *et al.*. Signal simulation of 25 Gbytes read-only optical disk system using a high numerical aperture objective lens [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, 40(Part 1, 3B):1536~1541
- 6 I. Ichimura, K. Kishima, K. Osato *et al.*. Near-field phase-change optical recording of 1.36 numerical aperture [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, 39(Part 1, 2B):962~967
- 7 V. Weidenhof, I. Friedrich, S. Ziegler *et al.*. Atomic force

- microscopy study of laser induced phase transitions in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(10):5879~5887
- 8 V. Weidenhof, I. Friedrich, S. Ziegler *et al.*. Laser induced crystallization of amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(6):3168~3176
 - 9 G. Mongia, P. K. Bhatnagar. Study of the crystallization behavior of Ag-In-Sb-Te phase change optical recording film [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(1):148~150
 - 10 H. Tashiro, M. Harigaya, Y. Kageyama *et al.*. Structural analysis of Ag-In-Sb-Te phase-change material [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, (Part 1, 6A):3758~3759
 - 11 Liu Huiyong, Jiang Fusong, Men Liqiu *et al.*. Optical spectral properties and short-wavelength optical storage properties of high reflection $\text{Ag}_5\text{In}_5\text{Te}_{47}\text{Sb}_{33}$ phase change films prepared by RF-magnetron sputtering technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(5):587~590
刘惠勇,姜复松,门丽秋等. 磁控溅射法制备的高反 $\text{Ag}_5\text{In}_5\text{Te}_{47}\text{Sb}_{33}$ 相变薄膜的光谱性质及短波长静态记录性能 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(5):587~590
 - 12 Li Jinyan, Hou Lisong, Gan Fuxi. Effect of film thickness on optical properties of AgInSbTe phase-change films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):954~956
李进延,侯立松,干福熹. 薄膜厚度对 AgInSbTe 相变薄膜的光学性质的影响 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):954~956
 - 13 Liu Bo, Ruan Hao, Gan Fuxi. The crystallization behavior of amorphous $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Te}_{26}\text{Sb}_{51}$ thin film [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2002, **16**(4):413~417
刘波,阮昊,干福熹. 非晶 $\text{Ag}_{11}\text{In}_{12}\text{Te}_{26}\text{Sb}_{51}$ 薄膜的结晶行为 [J]. *材料研究学报*, 2002, **16**(4):413~417
 - 14 Chen Zhongyu, He Guozhen. Set-up for static test of phase transition materials for optical disks [J]. *Chinese J. Lasers*, 1987, **14**(10):627~629
陈仲裕,何国珍. 相变光盘材料的静态测试装置 [J]. *中国激光*, 1987, **14**(10):627~629
 - 15 Chen Zhongyu, Gan Bohui, Liu Haiqing *et al.*. A instrument for evaluating the static parameters of magneto-optical disk [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(12):1110~1114
陈仲裕,甘柏辉,刘海清等. 磁光盘静态测试仪 [J]. *光学学报*, 1991, **11**(12):1110~1114
 - 16 C. Peng, M. Mansuripur. Studies of the crystallization process in thin films of GeSbTe [C]. *SPIE*, 1999, **3864**:203~205

鱼雷激光尾流自导方法的研究

提出了基于尾流的光学效应的鱼雷激光尾流自导方法。舰船在航行过程中不可避免地会产生舰船尾流^[1]。舰船尾流的光学特性主要由尾流气泡的光散射效应所决定。普通海水中存在着许多作布朗运动的微粒(包括海水中的杂质分子、悬浮粒子、有机及无机溶解质、微生物和气泡等),它们会对光波产生散射效应,但当光在存有大量气泡的尾流中传输时,光的散射效应就会大大增强。根据气泡的光散射实验结果,半径在 $10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ m 范围的干净气泡对光在海水中后向散射系数的贡献近似可达到 10%,而这些气泡一旦被覆了有机膜(海洋中的气泡在形成后会迅速吸附上有机膜)成为泡沫后又会显著地增强其后向散射效应^[2],如果气泡数量较多形成气泡幕时,大量气泡对光的后向散射作用的叠加甚至会产生与光的反射效应相类似的结果(实验室条件下测量的清洁水的密集泡沫在可见光区的光谱反射率约为 50%^[3]),使散射光(包括前向散射光和后向散射光)的光强发生改变。由于尾流的光散射效应是大量气泡多次散射的叠加结果,因此,尾流的光学效应除引起散射光光强(即幅值)的变化之外,散射光的相位、频谱、脉宽、偏振等许多光学特性参数也会因气泡幕的存在而发生变化,通过相应的光学探测手段就能非常准确地感知激光传输路径上是否存在气泡幕。

光尾流自导鱼雷的基本工作原理是从鱼雷上主动发射激光束,通过探测该激光束的前向或后向散

射光来判别其激光传输路径上是否存在气泡以及气泡量的多少,进而判别出鱼雷是否进入或穿出气泡尾流区,当鱼雷进入气泡尾流区或处于气泡尾流区的下方时,则保持鱼雷的运动方向;当察觉鱼雷已穿出气泡尾流区或其下方时,则通过控制装置发出返回信号,改变鱼雷的运动方向直至鱼雷再次进入气泡尾流区或处于气泡尾流区的下方,这样,就可以指导鱼雷在周期性地进入、穿出目标舰船尾流的运动状态下向目标舰船靠近。

利用舰船尾流的激光散射效应来自导鱼雷,是一种新兴的非声鱼雷自导技术,具有抗干扰能力强、作用距离远、命中率高等优点。目前,这种新型的鱼雷制导方法正在研究中。

参 考 文 献

- 1 Zhou Deshan. Research on several characteristic parameters of ship wakes [J]. *Torpedo Technology*, 2001, (41):142~149
周德善. 舰船气泡尾流几个特征参数的研究 [J]. *鱼雷技术*, 2001, (41):142~149
- 2 X. D. Zhang, M. Lewis, B. Johnson. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. *Appl. Opt.*, 1998, (37):6525~6536
- 3 Liu Jifang, Liu Haiyang, Ji Bangjie. Research on distribution of light spectrum scattered from bubbles [J]. *Torpedo Technology*, 2003, (42):225~228
刘继芳,刘海洋,冀邦杰. 气泡光散射谱强度分布研究 [J]. *鱼雷技术*, 2003, (42):225~228

海军工程大学兵器工程系,湖北 武汉 430033
张晓晖,葛卫龙,朱东华
收稿日期:2004-06-03