

文章编号: 1001-9014(2005)06-0445-05

# 采用不同中间夹层的双记录层磁光光盘热光特性比较

郑玉祥, 徐琮辉, 张荣君, 李晶, 王松有, 陈良尧

(复旦大学光科学与工程系先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海 200433)

**摘要:**磁光存储技术是一种颇受关注的下一代光存储技术. 为提高单个磁光光盘的存储容量, 途径之一是采用多值存储、多波长读出技术, 实现所谓三维磁光存储. 通常使用不同波长的蓝光来实现信号的读写操作. 如果不同波长的激光在磁光存储多层膜中产生热场分布的差异较大, 将有利于提高读出信号的信噪比. 本文结合光学矩阵法及有限元方法分析了中间夹层分别为 SiN、GaP 时, 磁光存储多层膜的热光特性. 结果表明在蓝光波段, 用 GaP 层替代传统的 SiN 中间夹层, 将使磁光光盘具有更好的热光特性.

**关键词:**磁光存储; 薄膜光学; 磁光克尔效应.

**中图分类号:** TP333.3, TP333.4, TN247 **文献标识码:** A

## COMPARISON OF THE OPTICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF A DOUBLE-RECORDING-LAYERED MAGNETO-OPTICAL DISK WITH DIFFERENT INTERLAYERS

ZHENG Yu-Xiang, XU Cong-Hui, ZHANG Rong-Jun, LI Jin,  
WANG Song-You, CHEN Liang-Yao

(Department of Optical Science and Engineering and State Key Laboratory of Advanced Photonic Materials and Devices  
Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Magneto-optical (MO) storage is an attractive technology for next generation storage. In order to increase the capacity of storage in a single disk, one of the approaches is applying the multi-valued recording and multi-wavelength readout technique, i. e., so called 3-dimensional (3-D) MO storage. Lasers of different wavelengths are used to read or write data on different recording layers. The difference in the temperature profiles of this kind of MO disk caused by different lasers is expected to be large enough for improving the signal to noise ratio (SNR). In this study, optical matrix method and finite element method were applied to analyze the thermal and magneto-optical responses for a 3-D MO disk. The results show that the MO disk with GaP as interlayers has a potential in improving the thermal and optical performance at two blue wavelengths compared with the MO disk with SiN interlayers.

**Key words:** magneto-optical storage; thin film optics; magneto-optical Kerr effect

### 引言

上世纪八十年代, 日本 KDD 公司今村修武首先演示了磁光存储驱动器的实验装置<sup>[1]</sup>, 将磁光存储迅速带入实用化时代, 围绕磁光存储的各项技术得到迅速发展. 磁光存储技术采用磁记录、光读出的方法, 可重复擦写, 既具有磁存储的高稳定、长寿命等优点, 又具有光存储的非接触读写, 盘片可自由更换的特点, 是一项优秀的存储技术<sup>[2,3]</sup>. 近年来, 由于磁学超分辨技术、多值存储、

多波长读出等技术的使用大大提高磁光光盘的存储容量, 目前存储密度已达到  $100\text{Gb/in}^2$ <sup>[4]</sup>. 对于多值存储、多波长读出技术, 通常用于读出的激光都是蓝光. 如果不同波长的激光在磁光存储多层膜中产生的热场分布差异较大, 将有利于提高读出信号的信噪比<sup>[5]</sup>. 本文采用光学矩阵法及有限元方法数值模拟了磁光盘中间夹层分别为 SiN、GaP 时, 磁光存储多层膜的热光特性, 并对模拟结果进行了对比分析.

收稿日期: 2004-09-02, 修回日期: 2005-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60478019)资助项目

作者简介: 郑玉祥(1968-), 男, 安徽泾县人, 副教授. 主要研究方向为固体光谱测试技术、磁光存储及光辅助磁存储相关理论研究.

Received date: 2004-09-02, revised date: 2005-06-20

## 1 数值分析方法

根据 J. Zak 在 1990 年提出的计算磁光多层膜的磁光响应方法<sup>[6]</sup>, 获得多层膜系统的各种磁光系数及多层膜中的光场分布. 在该方法中, 分别定义  $P$  矢量和  $F$  矢量为  $P = [E_s^{(i)}, E_p^{(i)}, E_s^{(r)}, E_p^{(r)}]^T$  及  $F = [E_x, E_y, H_x, H_y]^T$ , 其中  $i, r, s, p$  分别指入射光、反射光、垂直分量和平行分量.  $E_x, E_y$  和  $H_x, H_y$  分别为电场切向分量和磁场切向分量(假设多层膜的各界面法线沿  $z$  方向). 在媒质中传播时, 不同位置处的  $P$  矢量由媒质传播矩阵相联系. 在边界处, 矢量  $F$  和  $P$  由媒质边界矩阵相联系, 并且由于  $F$  矢量是电场和磁场的切向分量构成, 在边界两边相等. 根据上述关系, 逐层递推, 可以确定多层膜的各种磁光系数, 以及多层膜中的光强分布及焦耳热损失分布, 焦耳热损失通常由下式决定

$$Q_j = \frac{\omega}{2} [\varepsilon'' \varepsilon_0 |E|^2 + \mu'' \mu_0 |H|^2] \quad (1)$$

其中  $\omega, \varepsilon_0, \mu_0$  为光频率、真空介电常数及真空磁导率;  $\varepsilon'', \mu''$  分别为介质中相对介电常数及相对磁导率的虚部. 若光在多层膜中的光场分布知道后, 根据式(1)可得各层膜中焦耳热损失分布, 通过进一步求解热传导方程, 就可得到多层膜系统在激光照射下的温度场分布. 热传导方程由下式决定

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k \nabla^2 T(x, y, z, t) + A(x, y, z, t) \quad (2)$$

其中  $\rho, c$  及  $k$  分别为密度、比热及热传导系数. 热源项  $Q(x, y, z, t)$  由焦耳热损失决定. 若入射光为高斯光束,  $Q(x, y, z, t)$  具有如下形式

$$Q(x, y, z, t) = P(t) f_{xy}(x, y, t) f_z(z, t) \\ = P(t) \frac{\exp\{-(x^2 + y^2)/R_0^2\}}{\pi R_0^2} f_z(z, t) \quad (3)$$

其中  $P(t), f_{xy}(x, y, t), f_z(z, t)$  分别是激光功率、光场在  $xy$  平面的分布函数及  $z$  方向的分布函数. 通过有限元数值方法求解上述热传导问题, 即得空间各点的温度分布.

## 2 结果与讨论

磁光存储采用磁存储、光读出模式, 被存储的信息状态以不同取向的磁畴表示, 利用磁光极克尔效应读出, 这样要求磁光存储的薄膜具有垂直各向异性, 并且在常温下, 磁性膜具有较大的矫顽力, 以免

信号被错误擦写. 为提高存储密度, 主要途径有: 其一, 尽可能减小单元磁畴的尺寸. 稳定单元磁畴的尺寸正比于  $d_0 \sim \sigma_w / M_s H_c$ , 这里  $\sigma_w, M_s, H_c$  分别为畴壁能、饱和磁化强度和矫顽力.  $M_s H_c$  越大, 越有利于获得较小的稳定磁畴, 从而有利于提高存储密度, 但为获得垂直各向异性磁性膜必须满足:  $K_u \geq 2\pi M_s^2$ , 增加  $M_s$  意味着膜层的垂直各向异性必须很大, 这将增加薄膜制备的难度, 因此通常用  $M_s$  小及  $H_c$  大的材料做磁光存储材料, 这样既可获得较小的稳定磁畴的尺寸又不难制备具有垂直各向异性磁性薄膜. 但由于材料的矫顽力  $H_c$  很大, 在写入时需要很大的磁场, 这将给写入带来困难, 为了实现小磁场写入条件, 通常将膜层加热到补偿点温度或居里温度附近, 此时材料的矫顽力与常温时相比将大幅度下降, 因此磁光盘的温度特性是非常重要的因素. 其二, 需使读、写激光的光斑尺寸尽可能减小, 这个目的通常采用蓝光激光器和高数值孔径透镜来实现. 其三, 采用多记录层存储, 即实现三维存储. 但多记录层存储技术上十分复杂, 实际上目前研究的多记录层存储仅为双记录层机构. 对于双记录层的多值磁光存储来说, 要使用两种不同波长的激光来完成读出或写入过程, 并且希望这两种不同波长的激光对同样的磁光存储膜系有足够大的温度场分布差异. 图 1 为这种磁光盘的读出过程示意图. 用波长一读出时, 使第二个记录层温度迅速上升到补偿点, 则该处的平均磁化趋于 0, 而此时第一个记录层的温度低于其补偿点, 磁化强度不为零, 其磁化状态被复制到读出层, 于是该层信号被读出. 相应地, 用另一个波长读出时, 使第一个记录层温度迅速上升到补偿点, 该处的平均磁化趋于 0, 而第二个记录层仍维持较高的磁化强度, 其磁化状态被复制到读出层, 该层信号被读出. 在读出时, 运用了磁光克尔效应的原理, 为得到高的信噪比, 需要有大的克尔转角  $\theta_k$  和高的反射率  $R$ .

磁光盘是一种多层膜系统, 当用激光照射时, 便会在多层膜间产生干涉. 不同膜系和结构的磁光盘, 对相同波长的激光产生的光学及磁光响应将不同. 这种不同主要是由于光在通过不同结构膜系所走的光程不同所导致.

典型的磁光盘由衬底、磁光记录层和非磁性中间夹层组成, 通常非磁性中间夹层采用 SiN 介质. 但由于 SiN 介质在蓝光波段折射率几乎不变, 两束不同波长的蓝光激光穿越其中所经历的光程几乎相等, 因此这两种波长的激光在多层膜中产生的温度

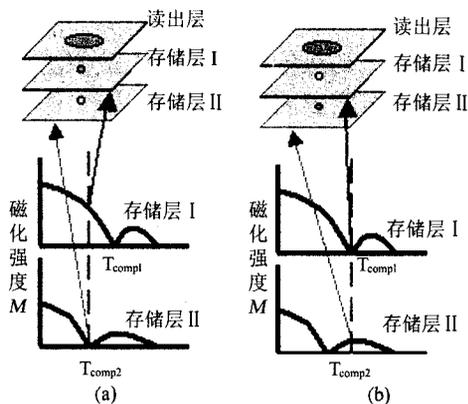
图 1 双记录层磁光盘读出过程示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Read-out process for a double-recording-layered MO disk

场分布差异不大,由此而引起的热磁响应也不大,不利于双波长的磁光信号读出.解决这个困难的途径之一是寻找一种在蓝光波段具有较大折射率变化的材料,来作为非磁性中间夹层.由固体能带理论的知识可知,材料在吸收边附近的波段,光学常数变化很大.经过考虑,我们选择 GaP 作为非磁性中间夹层,来研究此情况下的磁光盘的光学及热学响应.这种考虑基于 GaP 是一种禁带宽度为 2.26eV 的半导体材料,在蓝光波段具有显著的光学常数变化.可以期待,以 GaP 作为非磁性中间夹层的磁光多层膜系统对两种不同波长的蓝光将产生较大的温度场分布的差异,从而使磁光盘具有较好的读出特性.

影响磁光存储性能的主要参数有存储密度、信噪比、重复读写次数等,其中存储密度取决于存储材料的磁学特性和磁光头的数值孔径及使用波长等因素,重复擦写次数与磁性存储层的疲劳特性有关,因此这两种特性与介质层的关系不大,介质层用 SiN 或 GaP 应无本质影响.但不同介质层用 SiN 或 GaP 会导致读出信号信噪比的差异.本文主要就采用不同介质层用 SiN 或 GaP 所导致的热光特性和磁光信号特性进行比较.

为得到优质的磁光光盘,在满足有合适的热特性外,还需要有合适的磁光响应,即整个光盘膜系应具有较大的磁光信号.而磁光信号与磁光存储多层膜系统的反射率  $R^{1/2}$  及克尔转角  $\theta_K$  的乘积成正比,如下式所示

$$SNR \propto R^{1/2} \theta_K \quad (4)$$

为获得较大的磁光信号,需对多层膜的厚度、材料进行仔细选择.通常带有读出放大层(MAMMOS)的双记录层磁光盘的结构如图 2 所示,光从衬底侧

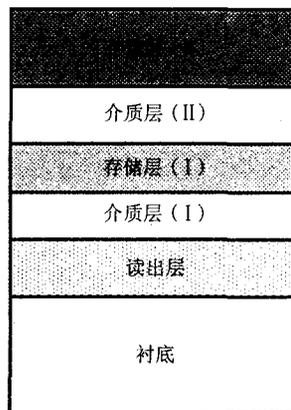


图 2 双记录层磁光盘结构示意图

Fig. 2 The structure diagram of a double-recording layered MO disk

入射.各层的材料依次:衬底为聚碳酸酯(PC)、读出层为 GdFeCo、存储层为 TeFeCo、介质层为 SiN.在本文中,我们试图选择在蓝光波段具有较大折射率变化的 GaP 来代替 SiN 介质层,并比较两者的磁光响应和热响应.

影响磁光存储膜系光学和热特性的另一重要因素就是各层厚度的选择.严格选择各层厚度是一项复杂而艰巨的工作,这涉及到各层材料的制备以及各材料参数的获取,尤其是磁光层三元合金材料的磁学、光学和热学参数的精确测定.一方面,作为金属层的磁光读出层和存储层(I)的厚度不能太大,否则读写激光光束不能到达存储层(II),而影响该层信号的读写;另一方面,磁光层的厚度也不能太小,否则记录单元的微小磁畴不能提供足够大的泄漏场,将信号复制到读出层.参照文献[4],本文中存储层(I)、存储层(II)的厚度分别为 10.0nm、80.0nm,读出层的厚度选 10.0nm.通常单记录层磁光盘的读出层厚度为 20.0nm,对双记录层磁光盘的读出层厚度文献中没有报道.考虑到双记录层磁光盘有两个记录层,应尽可能减少前面金属层厚度,故本文中读出层厚度选为 10.0nm,实际情形可能与此厚度略有出入,但这不影响本文的分析结果.

对于介质层(I)和介质层(II)的材料,或者都选为 GaP、或者都选 SiN.两介质层厚度各自从 2.5nm 变到 50.0nm,通过用光学矩阵法进行大量计算,发现对应于最佳磁光信号的各项参数,如表 1 所列.

由表 1 可以看出,对于 442nm、488nm 两个波长,选 GaP 作为非磁性中间夹层的磁光响应均好于用 SiN 作为非磁性中间夹层的磁光响应.单纯从磁光响应角度考虑,找到以上参数就达到目的了,但从

表 1 中间层分别为 GaP 和 SiN, 以及波长为 442nm 和 488nm 时对应的优化厚度与磁光信号

Table 1 The optimized thickness and MO signal for the GaP or SiN interlayers at wavelength 442 nm and 488 nm, respectively

材料	波长 (nm)	介质层 (I) 厚度 (nm)	介质层 (II) 厚度 (nm)	$R^{1/2}\theta_k$ (mrad)
GaP	442	25.0	42.5	3.33
GaP	488	35.0	50.0	1.61
SiN	442	50.0	2.5	2.69
SiN	488	20.0	2.5	1.37

磁光信号的读出过程来看,在信号读出时,存储层的记录单元所对应的磁畴,通过其泄漏场,将信号复制到读出层,经读出层磁畴放大读出.如果非磁性中间夹层太厚,记录单元磁畴泄漏场达到读出层时很弱,可能出现无法复制的情形,因此从这方面考虑,希望两非磁性中间夹层的厚度应尽可能小一些,作为代价,允许磁光信号略有下降.综合考虑后,我们选定如下参数来做进一步的热特性分析,见表 2.

采用三维有限元方法,求解激光照射下多层膜系统的热扩散方程来进行热特性分析.并假定激光的功率为 30mW,脉冲持续时间为 3ns,间隔时间 7ns.激光从衬底侧射入多层膜,激光光斑半径为  $0.45\mu\text{m}$ .热特性分析所考虑的磁光盘的结构为 Glass/GdFeCo (10.0nm)/SiN or GaP (2.5nm)/TbFeCo (10.0nm)/SiN or GaP (2.5nm)/TbFeCo (80.0nm).为求解热传导方程,还需知道该方程所对应的边界条件和初始条件.有限元方法计算的区域  $x_{\text{max}} \times y_{\text{max}} \times z_{\text{max}} = 5.0\mu\text{m} \times 5.0\mu\text{m} \times 5.0\mu\text{m}$  (假定  $z$  方向为激光束的传播方向).考虑到激光持续时间在纳秒量级,热量的传播仍局限于很小范围,经多次计算,发现取上述尺寸的区域进行计算是合适的.计算时假定环境温度为零.在计算涉及  $5.0\mu\text{m} \times 5.0$

表 2 热分析计算中所涉及的中间层分别为 GaP 或 SiN 对应的厚度与波长为 442nm 和 488nm 时的磁光信号

Table 2 The thicknesses for the GaP or SiN interlayers and corresponding MO signals at wavelength 442 nm and 488 nm for the structures considered for further thermal analysis

材料	波长 (nm)	介质层 (I) 厚度 (nm)	介质层 (II) 厚度 (nm)	$R^{1/2}\theta_k$ (mrad)
GaP	442	2.5	2.5	1.78
GaP	488	2.5	2.5	1.08
SiN	442	2.5	2.5	2.34
SiN	488	2.5	2.5	1.21

$\mu\text{m} \times 5.0\mu\text{m}$  的正方体区域,计算区域与空气相邻的表面处,因空气的热传导可以忽略,故假定在该面满足绝热条件,其余各面则满足恒温近似.作为初始条件,假设光盘各点初始温度均为零.在求解热扩散方程所采用的各层比热容和热导率如表 3 所示.图 3 显示在一个激光脉冲持续周期 10ns 内(其中脉冲持续 3ns、脉冲间隔 7ns),多层膜中激光束中截面上的温度分布随时间的演变情况和表面处的温度分布随时间的演变情况.图 3 显示的结果对应的膜层结构为:Glass/GdFeCo (10.0nm)/SiN (2.5nm)/TbFeCo (10.0nm)/SiN (2.5nm)/TbFeCo (80.0nm),对应的波长为 442nm.其他几种情况下,在多层膜中有类似的温度分布,但温度的数值有差异,这种差异可在图 4 中看到.

图 4 为计算所得的记录点中心温度随激光照射时间的变化关系.对以 GaP 为中间夹层的结构,442nm、488nm 波长的光使第一个记录层达到的最高温度分别为  $366^\circ\text{C}$ 、 $315^\circ\text{C}$ ,两者相差  $51^\circ\text{C}$ ;使第二个记录层达到的最高温度分别为  $357^\circ\text{C}$ 、 $305^\circ\text{C}$ ,二者相差  $52^\circ\text{C}$ .而对以 SiN 为中间夹层的结构,442nm、488nm 波长的光使第一个记录层达到的最高温度分别为  $353^\circ\text{C}$ 、 $315^\circ\text{C}$ ,两者相差  $38^\circ\text{C}$ ;使第二个记录层达到的最高温度分别为  $334^\circ\text{C}$ 、 $296^\circ\text{C}$ ,两者相差  $38^\circ\text{C}$ .此结果表明用 GaP 作为中间夹层的结构比以 SiN 为中间夹层的结构更有利于在蓝光波段产生大的温度分布差异,从而有利于读出性能的改善.另外,从此结果还可以看出,相同的激光功率输入条件下,以 GaP 为中间夹层的结构能达到更高的温度,这就是说要达到某特定温度,比如记录层的补偿点或居里点温度,该结构所需的激光功率更低.

一般说来,由于磁光探测器的灵敏度很高,再加上磁学超分辨技术(如 MAMMOS 技术)的应用,对磁光信号的探测已不是关键问题,而如何选择膜层参数,使磁光盘具有合适的热磁特性却是个重要因素,

表 3 本文所采用的各层的热参数

Table 3 Thermal constants used in this work

材料	比热容 ( $\text{J}/\text{cm}^3 \cdot \text{deg}$ )	热导率 ( $\text{J}/\text{cm} \cdot \text{deg} \cdot \text{s}$ )
衬底	1.51	0.0020
GdFeCo	3.12	0.12
SiN	1.92	0.030
TbFeCo	3.12	0.12
GaP	1.73	0.77

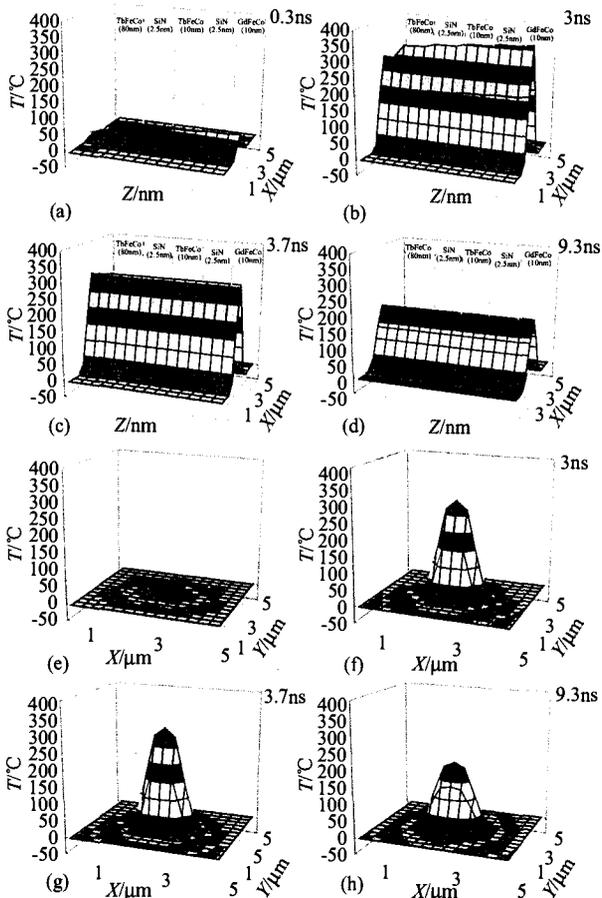


图3 (a)~(d)为多层膜中激光束中截面上的温度分布随时间的演变情况:(a) 0.3 ns (b) 3 ns (c) 3.7 ns (d) 9.3 ns (e)~(h)为多层膜表面上的温度分布随时间的演变情况,其中:(e) 0.3 ns (f) 3 ns (g) 3.7 ns (h) 9.3 ns. 膜层结构为: Glass/GdFeCo(10.0nm)/SiN(2.5nm)/TbFeCo(10.0nm)/SiN(2.5nm)/TbFeCo(80.0nm). 波长为442nm

Fig.3 (a)~(d) show the temperature profiles at the cross-sectional plane of the multi-layer thin film stack involving the laser beam axis in the plane (a) 0.3 ns (b) 3 ns (c) 3.7 ns (d) 9.3 ns (e)~(h) show the temperature profiles at the surface of the multi-layer thin film stack. (e) 0.3 ns (f) 3 ns (g) 3.7 ns (h) 9.3 ns. The structure of the multi-layer thin film stack is : Glass/GdFeCo(10.0nm)/SiN(2.5nm)/TbFeCo(10.0nm)/SiN(2.5nm)/TbFeCo(80.0nm). Wavelength is 442nm

通过计算分析,选择 GaP 作为中间层媒质可以明显提高在不同波长时两存储层之间的温度差,这有利于降低对磁光记录膜热磁特性要求,提高磁光盘的读出特性,对磁光盘综合质量的提高有较大的应用潜力.

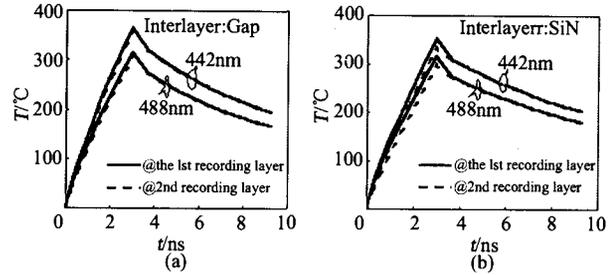


图4 两记录层温度随激光脉冲持续时间变化曲线 (a) 以 GaP 为中间夹层的结构 (b) 以 SiN 为中间夹层的结构

Fig.4 Temperature dependence vs. time at two recording layers (a) for the structure with GaP interlayer (b) for the structure with SiN interlayer

### 3 结语

我们结合光学矩阵方法和三维有限元方法,分析了一种双记录层磁光盘分别以传统的 SiN 为中间夹层和以 GaP 为中间夹层的两种结构在磁光响应和热学特性方面差异. 分析结果显示采用以 GaP 为中间夹层的结构有利于改善磁光盘的热学特性,且在单纯考虑磁光响应时,采用以 GaP 为中间夹层结构的磁光盘有更大的磁光信号. 因此采用 GaP 材料为中间夹层的结构具有提高磁光盘整体性能潜力.

### REFERENCES

- [1] Imamura N, Ota C. Experimental study on magneto-optical disk exerciser with the laser diode and amorphous magnetic thin film [J]. *Japan J. Appl. Phys.*, 1980, **19**:L731.
- [2] H W van Kesteren, Martynov Yu V, Penning F C, et al. Towards 100 Gb/in<sup>2</sup> MO storage using a blue laser, high-NA far-field optics and domain-expansion media [J]. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 2001, **25**(3-2):334—338.
- [3] Bechevet B. New trends and technical challenges in optical storage [J]. *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, 2002, **2**:126—130.
- [4] Nakagawa K, Itoh A. Multi-valued MO recording and multi-wavelength readout [J]. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1996, **20**(S1):73—78.
- [5] Itoh A, Nakagawa K, Shimazaki K, et al. High SNR readout method for double layered MO disk with single wavelength LASER beam [J]. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1999, **23**(S1):221.
- [6] Zak J, Moog E R, Liu C, et al. Universal approach to magneto-optics [J]. *J. Magn. Magn. Mat.*, 1990, **89**:107—123.