

超高密度磁光存储及其介质研究进展*

王现英[†] 张约品 沈德芳 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 短波长(蓝光)磁光存储、磁光超分辨近场结构光存储(Super-RENS)混合记录技术是近年来发展起来的超大容量磁光存储技术,文章介绍了这些技术用于超高密度磁光存储的原理,并对其研究现状及发展前景作了全面综述.

关键词 超高密度磁光存储,短波长,超分辨近场结构光存储,混合记录

NEW PROGRESS IN SUPER HIGH DENSITY MAGNETO-OPTICAL RECORDING

WANG Xian-Ying[†] ZHANG Yue-Pin SHEN De-Fang GAN Fu-Xi

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

Abstract Short wavelength magneto-optical, magneto-optical super resolution near-field structure and hybrid recording are three possible means to obtain super-high storage density. We present a comprehensive review of the principles, recent progress and future prospects of these technologies.

Key words super high density MO storage, short wavelength, Super-RENS, hybrid recording

1 引言

信息社会的发展需要超大容量的信息载体,近年来,无论是光存储还是磁存储都在向着高密度化的方向发展.在光存储方面,短波长激光器、高数值孔径透镜的应用及固体浸没透镜、近场光学、全息存储等技术的发展,使得记录密度大大提高.而磁存储密度近年来以每年60%的速度快速增长,估计在不久的将来会达到由超顺磁性决定的理论极限(100Gbit/in²).磁光存储作为一种与全光存储、磁存储并存的存储方式,具有信噪比高、可擦重写、可更换等一系列的优点,因此日益成为一种重要的记录媒体.

自从20世纪80年代磁光光盘商业化以来,其存储密度在不断提高,目前已经发展到第五代,3.5英寸磁光盘的单面存储容量达到2.56GB.围绕磁光存储的高密度化,前人已经做了大量的工作,磁致超分辨技术(MSR)、磁畴放大读出技术(MAMMOS)、畴壁移动检测技术(DWDD)和激光脉冲磁场调制技术(LP-MFM)等技术的提出大大提高了读出分辨率和写入密度.而近几年来,短波长激光器(410nm左右)在光盘存储中的应用、近场光学、超分辨技术的发展以及混合记录技术的提出,又为提高磁光存储密度

的研究指明了新的方向,使实现100Gbit/in²以上的超高存储密度成为可能.本文将对这些磁光存储研究的最新动态给以全面综述.

2 短波长磁光存储

同光存储一样,在磁光存储中,也受光的衍射效应限制,使记录点直径为^[1]

$$D = 1.22\lambda / n \sin\theta, \quad (1)$$

其中 λ 为记录激光波长, $n \sin\theta$ 为光学头的数值孔径.

由上式可以看出,减小记录激光的波长或增大光学头的数值孔径,都可以减小记录点的尺寸,从而增加存储密度.近年来,随着GaN短波长激光器性能的不断提高,它在光盘存储中的应用前景也越来越好,因此,蓝光存储的研究也越来越多.对蓝光在磁光存储中的应用研究也是国外研究高密度磁光存储的热点之一,研究的内容主要集中在对传统磁光盘结构的改进和新型短波长磁光存储材料的研究两个方面.

* 国家自然科学基金(批准号:59832060)重点资助项目

2002-04-03收到初稿,2002-05-27修回

[†] 通讯联系人, E-mail: wangxianying@yahoo.com

2.1 稀土-过渡族合金(RE-TM)薄膜作短波长磁光存储介质

RE-TM合金薄膜是目前已实用化的磁光存储介质,但是它的克尔(Kerr)角随着波长的减小而降低,被认为不适合短波长磁光存储。但是,研究者并未因此而放弃,这是因为RE-TM作为磁光存储介质本身有很多的优点。以RE-TM作为蓝光磁光存储的介质时,聚焦光斑内单位面积蓝光的能量比红光要高得多,过高的能量积累会引起Kerr角的减小及记录磁畴的不稳定,对光盘热学结构进行重新优化设计可以解决这个问题;另外随着记录密度的提高,由衬底槽的粗糙引起的噪声水平增大,信噪比减小,用紫外光照射衬底可以减小噪声。

Y. Sabi等人^[2]对传统的磁光光盘结构做了热学结构的优化设计,在记录层与上介质层之间镀一层金属作为热传导层(如图1所示),用407nm的Kr激光器作为光源,以激光脉冲磁场调制法记录,在数值孔径为0.60时,得到记录点的长度为210nm,道间距为500nm,这相当于6.1Gbit/in²的记录密度。结果还表明,改进结构后的磁光盘读出载噪比最大达44dB。在此基础上,K. Kawase等人^[3]进一步采用槽/平台记录方法,得到了10Gbit/in²的记录密度。

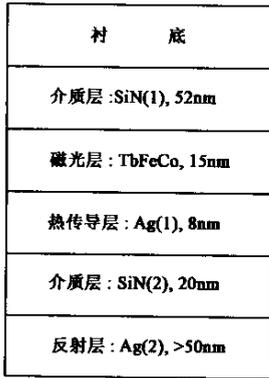


图1 改进结构的RE-TM光盘结构

MSR, MAMMOS, DWDD, LP-MFM技术都是以RE-TM合金为记录介质发展起来的用于提高磁光存储密度的方法。在激光波长为780nm时,上述技术的应用可使记录密度提高4—6倍,如果进一步结合短波长技术,采用410nm左右的激光器件,可使记录密度提高近20倍。Sony公司的Yasuhito Tanaka等人^[4]用蓝光(406nm)与中心孔探测型磁超分辨(CAD-MSR)技术相结合,在数值孔径为0.6时,实现了11Gbit/in²的高密度记录。MAMMOS同蓝光相结合,可实现50Gbit/in²的记录密度,这意味着120mm盘

的实际容量可达75GB。Tetsuhiro Sakamoto等人^[5]用蓝光结合DWDD技术,得到了15Gbit/in²的高记录密度。但是以RE-TM合金作为记录介质,蓝光与上述技术结合时光盘的结构都特别复杂,磁性层就多达五层^[6],如此复杂的结构势必会影响实用化的进程。

2.2 新型短波长磁光存储介质

传统的TbFeCo磁光存储薄膜在短波长时克尔效应下降,因此它作为短波长磁光存储介质具有先天不足性,从长远来看,必须找到在短波长时有较大克尔效应的新材料来作为存储介质。目前所研究的短波长磁光存储材料大体上有以下几种:(1)轻稀土-过渡族合金(LRE-TM),它在短波长时有较大的克尔效应,但是很难形成垂直于膜面的磁畴;(2)Mn-BiAl合金,由于Al的掺入,改善了MnBi合金的晶粒和晶相,但写入功率太高;(3)掺Bi的石榴石氧化物薄膜,有很好的磁光性能和记录性能,但是非晶薄膜需要热处理变成晶态使用,过高的热处理温度限制了塑料衬底的应用,玻璃衬底的成本很高;(4)Pt/Co多层膜和Pt-Co合金膜,有好的垂直各向异性,在短波长时有大的克尔角,晶粒细小,但还存在居里温度偏高,重复擦写次数不足等缺点。

可见,短波长磁光存储材料的实用化都存在着许多问题,还有很多工作需要做。Pt/Co多层膜和Pt-Co合金膜在短波长时的磁光性能最佳,是最有希望能够实用化的下一代磁光存储介质。将短波长存储材料用于磁超分辨、磁畴检测放大、畴壁移动检测等技术中,可以避免RE-TM作介质时光盘结构复杂,实用化的希望将更大。

3 磁光超分辨近场结构存储技术

当光通过带有比光波长还小的微孔的微细探针时,在距离探针几十个纳米的范围内,光斑不发生衍射,其大小将等于微孔尺寸,这时所产生的光称为近场光。如果能将近场光用于信息存储,记录点的尺寸就可以不受光斑衍射极限的限制,而只和产生近场光的小孔的尺寸有关,那么光盘存储的极限密度就可以大大增加,实现Tbit/in²的高密度记录。但是,要用微细探针作为近场光发生器用于光盘驱动器上,在动态的条件下保持探针与光盘之间的距离在几十个纳米的范围内,几乎是不能实现的。为解决上述难题,在1998年J. Tominaga等人^[7]提出了超分辨近场结构(Super-RENS)光存储技术。

3.1 Super-RENS 的原理^{8]}

Super-RENS 技术是基于超分辨光盘(SR)和近场光学显微镜(NSOM)而提出的.它又分为孔径型近场超分辨(TA-Super-RENS)和散射型近场超分辨(LSC-Super-RENS),其基本原理如图2所示.

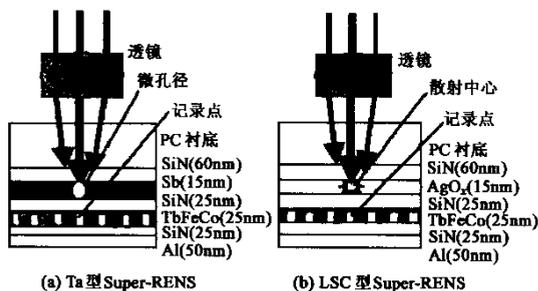


图2 近场超分辨光存储的原理图

类似于超分辨光盘的设计^[9],在记录层之上增加一层具有光学非线性的掩膜层作为开关层.孔径型近场超分辨光盘以Sb作为掩膜,聚焦激光照射时,孔径开关层在激光光斑中心超过阈值功率的高能量处形成微孔径,当光透过微孔时,将产生近场光.而散射型近场超分辨光盘是以AgO_x作为掩膜层,在光照作用下,AgO_x分解为纳米级的Ag颗粒,形成散射中心,产生近场光.

掩膜层和记录层之间介质层的厚度只有十几个纳米(这也是近场超分辨光盘和普通超分辨光盘的最大不同之处),所以,经过微孔径或纳米级的散射中心到达记录层的光就是近场光. Super-RENS 较其他近场光存储的最大优点是用一层具有纳米级厚度的固态薄膜来控制近场光源与记录介质的距离,克服了动态控制探针与盘面之间空气层厚度的困难,避免了复杂的近场间距测控系统,为近场光学光存储的实用化解决了技术上的一个大难题.

3.2 Super-RENS 在磁光存储中的应用

同磁致超分辨^[10]不同,磁光 Super-RENS 用非磁性的Sb或AgO_x作为掩膜层来实现超分辨写入和读出.将 Super-RENS 用于磁光存储中,在记录点尺寸小于200nm时,仍得到较高的信噪比.因此,这种技术是实现磁光超高密度(Tbit/in²量级)存储的很有希望的一种方法,已成为研究的热点.

Jooho Kim等人^[11]报道了用Sb作为磁光近场超分辨的掩膜,但是在记录点尺寸小于370nm($\lambda = 780\text{nm}$, $NA = 0.53$ 时的衍射极限)时,没有得到任何信号,即未观察到超分辨效应.在此基础上,2001年,他提出了改进的Sb磁光近场超分辨结构^[12],做

了一系列的优化设计.采用 Helicon-Wave 溅射设备(衬底与靶材距离仅为200nm)镀膜,减小各层的内应力,对掩膜层Sb的光学性能作了优化设计,对磁性层厚度、保护层的种类作了优化设计.结果表明,在光斑尺寸小于370nm时仍有较大的信号检出,最小可分辨尺寸为200nm(见图3).

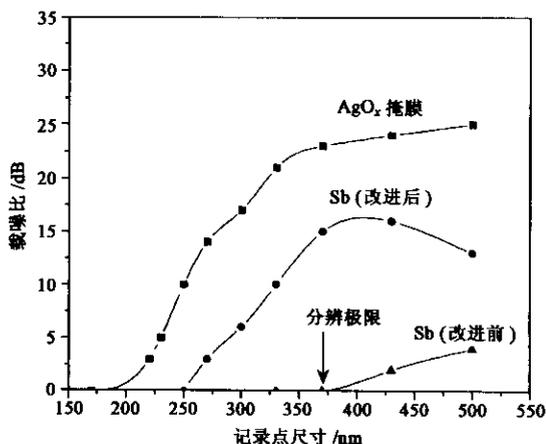


图3 磁光近场超分辨突破衍射极限示意图

散射型近场超分辨在磁光存储中的应用似乎更有吸引力,这是因为,作为散射中心的银的表面等离子体效应,使磁光克尔效应增强,在光斑衍射极限尺寸时,读出信号比普通MO增加将近100倍^[11]. Jooho Kim等人^[12]的实验结果表明(图3),在相同条件下,以AgO_x作为磁光超分辨光盘的掩膜时,载噪比要比以Sb作掩膜时的高得多.在记录点的尺寸小于200nm时,这种增强效应仍很强.

J.H. Kim等人^[13]的研究结果表明,当 $\lambda = 680\text{nm}$, $NA = 0.53$,读出功率为3mW时,散射型 Super-RENS 磁光盘的分辨极限可达170nm,远远超过了光头的衍射极限310nm.而当读出功率为1mW时,几乎没有超分辨的效果.这是因为激光功率较低时,不能使AgO_x分解为Ag颗粒,因而不能产生近场光源.他们还发现,用SiN_x作为保护层比ZnS-SiO₂作为保护层时有更高的载噪比,不同的SiN_x保护层的厚度对载噪比也有影响,对盘的结构和介质进行优化设计,可使MO Super-RENS的分辨率进一步提高到100nm以上.

4 混合记录技术

混合记录技术是近几年提出的一种有可能使记录密度超过100Gbit/in²的记录方法. Sharp, Hitachi, Philips等公司和美国的Carnegie Mellon大学的数据

存储中心(DSSC)都对此进行过研究.DSSC已将混合记录作为今后主攻方向之一.

4.1 混合记录的基本原理^[14]

混合记录主要是基于高密度磁光存储和磁存储时二者缺点的解决而提出的,它以激光辅助热磁写入和磁通检测读出为主要特征.其写入过程和磁光存储差不多,采用居里点写入或是补偿点写入.聚焦激光束加热介质,使其温度升高到居里温度(补偿温度)附近,矫顽力下降,在外磁场的作用下,介质被磁化写入信息;当激光束离开记录点,温度下降,矫顽力又提高,可形成稳定的磁畴.但混合记录信号的读出不是根据磁光克尔效应或法拉第效应来读出的,而是和硬磁盘的读出原理差不多,用巨磁阻磁头检测漏磁信号来读出.

4.2 混合记录克服磁光和磁存储缺陷的机理

在磁光记录中,记录点的形状为典型的V字型.在高密度记录时,道间距的大小就会受到限制.同时,磁光存储是通过检测偏振光的克尔转角或法拉第转角来读出信号的,通常,这个转角都非常小,所以,难以达到很高的分辨率.混合记录用巨磁阻材料做成的磁头来读出信号,可以有很高的灵敏度和分辨率.同时,由写入磁头的磁场分布和激光光斑的热能分布共同决定记录光斑的尺寸和形状,可以形成规则的矩形记录畴,如图4所示.

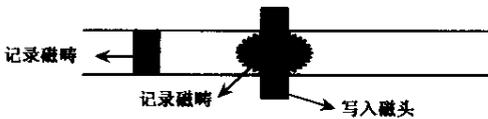


图4 混合记录形成的记录畴形状示意图

而在磁存储中,随着磁记录密度的提高,记录磁畴的尺寸越来越小.当尺寸小到一定程度时磁畴的热运动将不规则,即表现出超顺磁性,从而失去记录信息.磁有序的弛豫时间是衡量磁畴热稳定性的一个重要参数,它的表达式为

$$\tau = \tau_0 \exp(KV/k_B T), \quad (2)$$

其中 τ_0 为常数, K 为磁各向异性常数, V 为晶粒的体积, k_B 为玻尔兹曼常数^[15].

由上式可见, $KV/k_B T$ 与 τ 成指数关系.当记录点的尺寸 V 减小时,热稳定性将急剧降低,为在室温下保持良好的热稳定性,必须使介质的磁各向异性常数 K 增大.根据Stoner-Wohlfarth理论,各向异性常数的增加必然会引起矫顽力 H_c 的增大.但对于传统的磁记录方法,记录介质 H_c 的增大是有一定限度的,它决定于写入磁头在一定温度下的饱和

磁化强度.即使用目前饱和磁化强度较高的材料($\text{Fe}_{88}\text{Ta}_{12}\text{N}$, $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3\text{N}$ 等富Fe合金)作为写入磁头,介质矫顽力也只能低于 360kA/m (4500Oe)^[14].要用矫顽力更高的材料作为存储介质,现有的写入磁头往往难以满足要求.混合记录的写入过程采用激光辅助热磁写入的方法,使室温时有较高矫顽力的介质在写入时矫顽力下降,同时保证了记录磁畴室温时的热稳定性和记录介质的可写性,使磁记录的理论极限密度大大提高.

4.3 混合记录介质

混合记录对介质的总体要求是:室温下有较高的矫顽力、大的剩余磁化强度以及适当的热学性能.目前仍没有找出适合混合记录的最佳介质,对混合记录介质的研究主要是对传统的磁存储介质或磁光存储介质进行优化设计,使其适合热磁记录和磁通检测读出的特点,所得的实验结果可能不能最大限度地反映混合记录的优点,但已经表现出很多的优越性.

日立公司的研究者^[16,17]提出以交换耦合的磁光双层(ECDL)薄膜作为混合记录的介质.传统的磁光记录介质 TbFeCo 在室温时有高的矫顽力,满足热磁写入的要求,但是,由于 TbFeCo 薄膜在室温时的饱和磁化强度很小(低于 50emu/cm^3),不适合磁通检测读出.在 TbFeCo 上加一层 TbDyFeCo 作为读出层,读出层通过交换耦合相互作用,复制记录层的信号. TbDyFeCo 在室温时的饱和磁化强度为 230emu/cm^3 ,可以得到比较高的磁通密度,便于检测漏磁场以得到信号.实验结果表明,混合记录方法所得信号的分辨率,比磁光克尔效应读出时得到的信号分辨率高很多.

Bing-Mau Chen等^[18]也提出了类似的结构.以富TM的 TbFeCo 作为读出层,以 $\text{Tb}_x(\text{FeCo})_{10-x}$ (其中 $21 < x < 34$)作为记录层.结果得室温下读出层的饱和磁化强度为 300emu/cm^3 ,通过富TM的读出层和富RE的记录层之间的交换耦合,ECDL薄膜的矫顽力可以从 1.7kOe 提高到 7.6kOe .高的矫顽力保证了良好的热稳定性,而大的饱和磁化强度则保证高的灵敏度和分辨率.

Sharp公司^[19,20]以经过性能优化的磁光单层膜 TbFeCo 作为混合记录的介质. TbFeCo 用Tb,Fe,Co三靶共溅射来制备.控制各个靶的功率可以控制合金薄膜的成分,增大Fe/Co的比率可以降低居里温度,从而提高写入灵敏度;在溅射过程中保持较低的Ar气压可以增大RE-TM薄膜的垂直各向异性.但

正如前所述, TbFeCo 薄膜由于小的饱和磁化强度而不适合磁通检测读出。但我们知道, 在温度稍高于补偿温度时, 亚铁磁材料的饱和磁化强度随着温度的升高而增大, 因此, 在读出时采用激光辅助读出, 加热介质, 使其磁通密度增加, 可以满足混合记录磁通检测读出的要求。用这种结构作为混合记录介质, 结果有很好的频率响应特性, 在频率大于 40MHz 以上, 信噪比可达 36—38dB, 这意味着线密度可以很高, 加上混合记录方式本来就有的高的道密度, 可以得到很高的实际记录密度。

5 结束语

短波长(蓝光)应用于磁光存储中, 可同时得到较高的记录密度和读出载噪比, 进一步结合磁光 MSR 等技术, 可使磁光记录密度大大提高; 但需要继续研究新型短波长磁光存储材料的性能, 以加快其实用化进程。超分辨近场结构光存储集近场光存储和超分辨技术的优点于一身, 可得远小于光斑衍射极限的记录点, 银的表面等离子体效应可提高 MO Super-RENS 的读出信号强度; 但目前载噪比仍很小, 需要对光盘的结构、掩膜层的性能、记录介质的性能、保护层性能等进一步优化设计(包括寻找有更好开关性能的掩膜材料), 需要对读出装置加以改进, 最大限度地收集反射或透射信号, 来提高信噪比。混合记录技术可以得到矩形的记录斑点, 有高的道密度, 磁通检测读出使 MO 分辨率和灵敏度大大提高, 它的实用化将引起存储技术的一场革命。这些都是有望实现 100Gbit/in² 以上超高密度磁光存储的记录技术, 研究这些技术以推动其实用化进程将是磁光存储界的奋斗目标所在。

- [1] 干福熹等编. 数字光盘存储技术. 上海: 上海科学技术出版社, 1998 [Gan F X *et al.* ed. Digital Optical Disk Recording Technique. Shanghai: Shanghai Science Press, 1998 (in Chinese)]
- [2] Sabi Y, Kimitaka K, Kazunori Y *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 2000 , 39 : 943
- [3] Kawase K, Muto Y, Ando N *et al.* SPIE , 2000 , 4090 : 232
- [4] Tanaka Y, Shinodea M, Yamaguchi K *et al.* SPIE , 2000 , 4090 : 246
- [5] Sakamoto T, Fujita G, Takemoto Y *et al.* SPIE , 2000 , 4090 : 153
- [6] Shinoda M, Tanaka Y, Akiyama Y *et al.* SPIE , 2000 , 4090 : 160
- [7] Tominaga J, Nakano T, Atoda N *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1998 , 73 : 2078
- [8] Tominaga J, Fuji H, Sato A *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 2000 , 37 : 957
- [9] 李进延, 干福熹. 物理 , 2002 , 31 : 22 [Li J Y, Gan F X. Physics , 2002 , 31 : 22 (in Chinese)]
- [10] Mashiko K, Katsuhisa A, Atsushi F *et al.* Proceedings of the IEEE , 1994 , 82 : 544
- [11] Kim J H, Buechel D, Nakano T *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000 , 74 : 1774
- [12] Kim J H, Shima T, Fuji H *et al.* J. Magn. Soc. Japan. , 2001 , 25 : 387
- [13] Kim J H, Fuji H, Yamakawa Y *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 2001 , 40 : 1634
- [14] Ruigrok J M, Coehoorn R, Cumpson S R *et al.* Appl. Phys. , 2000 , 87 : 5398
- [15] 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学. 成都: 电子科技大学出版社, 1994 [Wan D F, Ma X L. Magnetic Physics. Chengdu: University of Electronic Science Publishing Company, 1994 (in Chinese)]
- [16] Saga H, Nemoto H, Sukeda H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 1999 , 38 : 1839
- [17] Nemoto H, Saga H, Sukeda H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 1999 , 38 : 1841
- [18] Bing M C, Chih H L, Han P D. Jpn. J. Appl. Phys. , 2001 , 40 : 4518
- [19] Katayama H, Hamamoto M, Sato J *et al.* IEEE Trans. Magn. , 2000 , 36 : 195
- [20] Kojim K, Hamamoto M, Sato J *et al.* IEEE Trans. Magn. , 2001 , 37 : 1046

· 物理新闻 ·

固态的阴极射线管(A Solid State Cathode Ray Tube)

一般在电视与计算机监视器中使用阴极射线管都有较大的体积, 其中安装着电子枪, 从热阴极发射出的电子通过电子枪将电子送到荧光屏。现在日本东京大学农业与技术研究所的 Nobuyoshi Koshida 博士研制了一种新的固态阴极射线管, 它是让电子通过一个纳米晶体的多孔栅直射到屏幕, 由于电子的运动方向是垂直于装置的表面, 所以它们将在荧光屏上生成一个线性点阵, 并形成真正的平面发光源。因此 Nobuyoshi Koshida 博士认为他的这个发明与其他平面发光显示板相比, 具有下列的一些优点: (1) 消耗能量少; (2) 可在不同的尺度下产生清晰的图像; (3) 响应速度快; (4) 装置简单且价格便宜。

(云中客摘自 Appl. Phys. Lett. , 23 September 2002)