

超分辨技术在光盘中的应用研究*

李进延 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 超分辨技术是一种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能读出超过衍射极限信号从而有效增加存储密度的一种方法.超分辨可以通过调整光学系统或者调整光盘的结构来实现.在超分辨光盘中,超分辨是基于掩膜的光学性质随入射激光强度的非线性变化而实现的.在磁光盘中第一次引入超分辨技术后,超分辨技术的应用有了很大发展,在目前是提高光盘存储密度的有效方法,在各类光盘中都有良好的应用.近场超分辨技术的出现使相变光盘的超高密度记录和读出成为可能.文章综述了超分辨光盘的发展现状和发展方向.

关键词 超分辨 掩膜 相变光盘 近场存储

APPLICATION OF SUPER-RESOLUTION TECHNOLOGY IN OPTICAL DISKS

LI Jin-Yan GAN Fu-Xi

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

Abstract Super-resolution, which allows the readout of information beyond the optical cutoff frequency given by $2NA/\lambda$, is an alternative way to increase the recording density without the need to reduce the spot size by increasing the numerical aperture of the objective lens and/or reducing the wavelength of the light source. Super-resolution can be achieved either by modifying the optical system or by changing the disk structure, and is based on the nonlinear response of a recording media to readout laser light intensity. Since super-resolution technology was first applied to magneto-optical disks, it has undergone rapid development, and is an effective way to increase the recording density of optical disks.

Key words super-resolution, mask layer, phase-change optical disks, near-field storage

1 引言

随着多媒体和计算机网络的发展,超高密度的光信息存储受到广泛关注,有很多种 GB(千兆字节)级存储容量的存储方法提出.然而,为了进一步增加存储容量,有许多问题必须解决.光盘的数据存储密度主要是由入射激光斑点尺寸决定的,但在一般的光存储中,信号强度在记录点尺寸接近分辨极限时迅速降低,例如用 680nm 波长的激光、0.6 的数值孔径的光头,其分辨极限的记录点尺寸大约为 300nm,因此记录点尺寸小于分辨极限时,光头不能识别信号.

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

$$D = \frac{1.22\lambda}{n \sin\alpha},$$

其中 λ 为记录激光波长, $n \sin\alpha$ 为光学头的数值孔径.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^[1,4].尽管在最近几年蓝绿光激光二极管有了很大的发展,但有些问题如怎样获得低电阻的 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一直还未解决,因此短波长激光二极管的实际应用还需要继续努力,数值孔径 NA 的增大以焦深的减小和由于偏心率而引起的失真的增加为代价,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.超分辨可以用调整光路或通过调整光盘结构来实现.

超分辨首先于 1991 年在磁光盘中用磁致超分辨(MSR)技术实现^[5].磁致超分辨有前孔探测(FAD)

* 国家自然科学基金委员会重点资助项目(批准号:59832060)

2001-03-29 收到初稿 2001-06-04 修回

和后孔探测(RAD)两种探测方法^[5]。这种磁致超分辨光盘利用热虹食读出,而热虹食读出是任何光盘实现超分辨所必需的。热虹食的原理为:光盘有两层工作薄膜,一层为记录层,一层为虹食层。读出光束使虹食层温度升高,由于激光束的强度在空间分布呈高斯形状,在光斑的各部分温度上升也不一致,使之产生光学常数的不均匀分布形成热虹食。其中光斑内的部分光被掩膜遮住从而使光斑减小。图1为超分辨光盘的读出原理示意图。在一般的读出中,当空间频率高于 $2NA/\lambda$ 时的信号点不能被读出,如图1(a)所示;在超分辨光盘中,由于有效孔被限制在一个很小的区域,因此可以读出空间频率超过 $2NA/\lambda$ 的信号点,如图1(b)所示;由于在超分辨光盘读出时,光点后部的温度超过掩膜的熔点而熔化,同时光点前部的温度仍保持在掩膜的熔化温度以下,因此光点被有效地减小,如图1(c)所示。超分辨的原理可以应用于不同类型的光盘信号的写入和读出。在只读式光盘的读出时可实现超分辨,而在CD-R和CD-RW光盘的写入和读出时都可以实现超分辨,或者记录时用短波长激光器和数值孔径的镜头记录而使信号点足够小,读出时则可以用一般的驱动器实现超分辨读出。

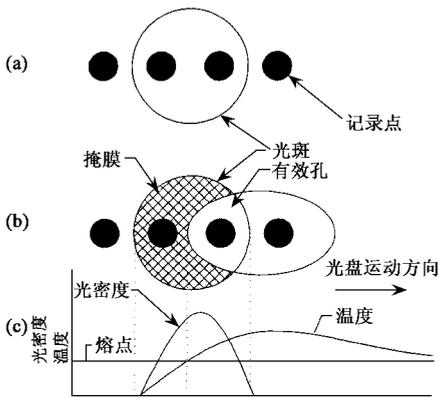


图1 (a)一般光盘的读出 (b)超分辨光盘的读出; (c)掩膜层的光密度分布和温度分布曲线

2 只读式超分辨光盘

只读式光盘的信号直接刻在盘基上,如果信号点太小则无法读出。Yasuda等^[6]于1993年在只读光盘中第一次引入了超分辨技术,这种超分辨光盘与一般的CD盘的不同之处在于增加了一层相变材料膜。在读出信号时,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,相变层从晶态变为液态。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,因此信号就能被读出。这种超分辨只读光盘的结构与相变光盘的结构是极其相似的,但敏感层 GeSbTe 合金层在两种光盘中所起的作用是不同的,在超分辨只读光盘中它作为掩膜而不是记录膜,图2为这种光盘的一般结构图。在这种光盘系统中,必须满足(1)掩膜区要加热到相变材料的熔点温度以上(2)晶相区的反射比熔化区的反射大(3)掩膜在熔化后的冷却中要迅速回到晶态。 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 相变材料也是相变光盘最常用的材料之一,然而相变光盘中为了使相变材料的非晶态(即记录畴)稳定,材料的化学成分一般稍微偏离化学计量比,而在超分辨只读光盘中为了使材料迅速从熔化态回到晶态,化学组成要严格符合化学计量比。对于小记录点的读出,这种超分辨方法所获得的载噪比比一般方法要高得多,当波长 $\lambda = 780\text{nm}$ 数值孔径 $NA = 0.5$ 时,对 $0.4\mu\text{m}$ 的记录点,一般的探测只有20dB,而超分辨可获得55dB的载噪比。一般的方法无法探测 $0.3\mu\text{m}$ 的记录点,而这种超分辨对 $0.3\mu\text{m}$ 的记录点仍可获得50dB的载噪比。Yutaka Kasami等用同样的方法在只读光盘中实现了超分辨^[7],但在其盘结构中,在盘基与第一层保护膜间加了一层Au膜作增反膜,以 BiSb_4 作反射膜。这种超分辨光盘对 $0.3\mu\text{m}$ 的记录点的探测获得了47dB的载噪比,而且在1万次的循环读出后载噪比没有明显的下降。

实现超分辨,掩膜的性质非常关键,考虑到相变掩膜的熔点太高会影响盘的使用寿命,且高功率的读出激光会引起盘的热变形和记录点的损坏,因此选择适当的掩膜是十分关键的。Yihong Wu等^[8]报道了掩膜为 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ 半导体材料的超分辨只读光

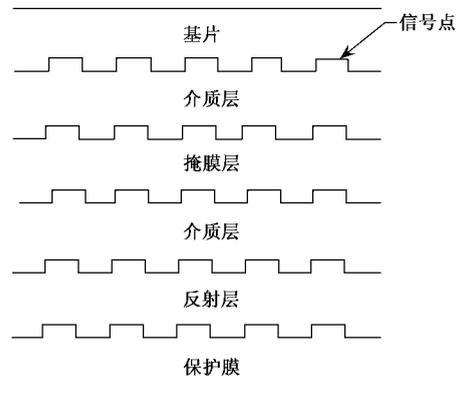


图2 只读超分辨光盘的膜层结构

盘,其结构与图2类似,只是掩膜不同.掩膜有两层具有不同禁带宽度 E_G^1 和 E_G^2 的两层 $Zn_{1-x}Cd_xSe$ 材料构成,具体的成分依读出光波长而选择.当 $\lambda = 0.5\mu m$ 时,掩膜为 $x = 1$ 和 $x = 0.18$ 的两种成分的合金.当激光照射在掩膜上时,有与激光光子能量相比相对小的禁带宽度的上掩膜层吸收一部分光,在开始时,下掩膜层由于其禁带较大,对激光是透明的.然而由于来自上掩膜层的热扩散,下掩膜层的温度逐渐升高,当其温度升到一定值时,由于温度升高引起其禁带收缩,下掩膜层也开始吸收光能.由于吸收能量使温度进一步升高,因此在光点的这一局部区域比其他区域有较大的吸收系数,这一区域将掩去一部分光点所照射的记录点,从而实现超分辨.

Toshimichi Shintani 等^[9]用 Co, Si, Ca, Na, 和 O 等元素组成的材料($CoSR$)作为超分辨只读光盘的掩膜,其盘结构与相变光盘类似,但 $CoSR$ 作为掩膜而不是记录膜.对 $CoSR$ 掩膜在激光照射前后都是透明的,进行光照后, $CoSR$ 材料的反射率变化实现超分辨.在较低的读出功率仍获得了较好的超分辨性能,用 $1mW$ 的光读出,对 $0.2\mu m$ 的记录点获得了 $26dB$ 的载噪比.

在超分辨只读光盘中除了用无机材料作掩膜外还用有机染料作掩膜. Tsuyoshi Tsujioka 等报道了以光色材料为掩膜的只读超分辨光盘^[10],其盘结构与一般的一次记录光盘($CD-R$)的结构类似,光色掩膜层($FC-124$)用蒸镀法沉积.当读出光斑扫过超分辨光盘的预着色(初始化)掩膜时,光斑的后部由于光发生漂白,因此光斑与白化区域的重叠部分形成有效的超分辨读出点.当在初始化光密度 $OD \geq 0.5$ 时可获得掩膜的透射率的非线性变化,这种光性质的非线性变化是实现超分辨的基础.

3 超分辨相变光盘

在可擦重写相变光盘中应用超分辨方法是近几年才得以实现的.超分辨相变光盘不同于只读式超分辨光盘的是,信号的写入也利用超分辨技术,但其原理都是类似的,都是利用掩膜对光斑的有效减小. Jia-Reuy Liu 等成功地将超分辨技术应用于可擦重写相变光盘^[11],这种光盘中写入和探测低于衍射极限记录畴的机制是掩膜材料的折射率随温度的变化.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,从而使掩膜对读出或写入光斑进行有效的减小而实现超分辨.这种超分辨相变光盘($EPSR$)的记录层和掩膜层都是

$GeSbTe$ 相变材料,但成分比不同,因此具有不同的临界冷却速率.图3为其膜层结构,中介质层的作用是防止掩膜与记录膜之间的热扩散,控制掩膜的冷却速率.而上下介质层分别控制超分辨相变光盘的反射系数和记录膜的冷却速度.对一般的四层结构的相变光盘,用 $780nm$ 波长的数值孔径 NA 为 0.55 的测试仪进行测量,当写入频率为 $3MHz$,线速度为 $5m/s$ 时,即对 $0.83\mu m$ 的记录点进行测试,其载噪比为 $55dB$;但当写入频率为 $7MHz$ 即记录点尺寸为 $0.4\mu m$ 时,其载噪比下降到 $23dB$.而对于这种超分辨相变光盘当记录点为 $0.4\mu m$ 时,其载噪比为 $32dB$,比一般的相变光盘高 $8dB$.这种超分辨相变光盘的最小探测记录点大小为 $0.25\mu m$,相当于比用 $650nm$ 的激光和 0.6 的数值孔径时相变光盘的容量增大 1.6 倍,达到 $7.52GB$.因此,超分辨相变光盘的容量能明显增大.

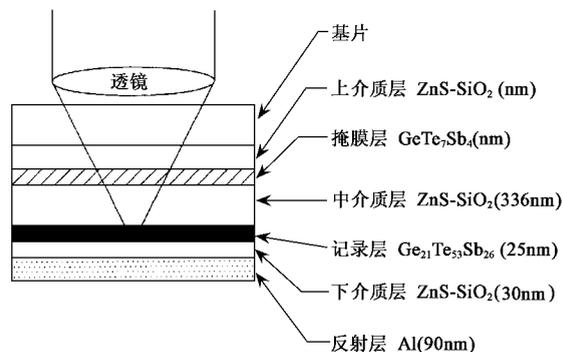


图3 超分辨相变光盘的膜层结构

以相变材料作为掩膜的缺陷之一是光盘的读写次数受到限制,由于需要较高功率的光作为读出光,而且超分辨是基于掩膜的熔化而实现的,因此掩膜层的晶态 \leftrightarrow 熔态的循环受到了限制.

Toshihiko Nagase 等^[12]提出了用掺杂半导体玻璃作为超分辨掩膜.当波长小于光学带隙时半导体发生吸收,吸收的程度与低能级的电子密度和高能级的态密度成正比,当光强度足够高使几乎所有的低能态的电子都被激发或者几乎所有高能态都被激发电子占据时,吸收达到饱和,因此通过半导体的透射光随着光强的增大而增大.这种非线性光效应就是半导体的吸收饱和现象.当激发电子的去激发受到抑制时这种吸收饱和现象更明显,如果半导体材料由超精细粒子组成且量子尺寸效应消除,去激发可以被减小.这种光照后透射的显著增加形成探测孔,从而实现超分辨读出.当光功率密度从 $10kW/cm^2$ 增大到 $1MW/cm^2$,即相对于读出波长 $410nm$, 0.6 数值

孔径的系统读出功率为 0.7mW 时,透射率变化达到 30% ,因此激光斑点被有效减小.这种半导体材料的透射变化的响应时间达到 ns 量级,透射率变化达到 30% 所需的时间少于 10ns ,足以实现高数据传输速率.因此,这种半导体掺杂玻璃材料作为超分辨掩膜材料有很大的潜力.

Masaru Hatakeyama 等^[13]报道了用热色有机染料为掩膜的超分辨可擦写光盘.掩膜采用真空蒸镀法以有机染料和有色显影剂共蒸发来进行制备,超分辨的实现机理是无色染料与有色显影剂之间的无色 \rightleftharpoons 有色的可逆变化.这种掩膜在波长 648nm 处存在最大吸收,当温度超过 50°C 时,对 635nm 的入射光,掩膜的透射开始增大并且在 150°C 时达到饱和.而随着冷却,透射带有一点滞后地减小.正是因为这种掩膜有可逆的热色性质,因此当用 633nm 的 He-Ne 激光辐射在掩膜上时,透射光强表现出非线性变化,并且在 $1\mu\text{s}$ 以内达到饱和.这种亚微秒级的时间滞后可以用来实现后孔探测型超分辨.这种超分辨光盘对 $0.2\mu\text{m}$ 的记录点的载噪比为 35dB ,这相对于 4.7GB 的 DVD-RAM 的记录畴大小的一半,而且小于 $0.2\mu\text{m}$ 的记录点也能探测,因此可用这种方法实现两倍于 DVD-RAM 容量的超分辨光盘.

4 近场超分辨光盘

总体来说,这种采用超分辨方法的相变光盘能提高光盘的存储密度,但对更高要求的存储密度,即对小于 100nm 的记录点这种方法显然无法实现探测,这要用近场超分辨技术来实现.光学近场存储(NFOR)对超高密度存储是非常有用的方法.光学近场存储首先由 Eric Betzig 等^[14]提出,他们在磁光薄膜上用近场光学扫描显微镜(NSOM)记录了小尺寸信号,最小记录点为 60nm .在此之后,Hosaka 在相变薄膜上记录了几乎同样小的记录点^[15].

固态浸没透镜技术与传统的光学系统相比由于其较大的数值孔径($\text{NA} > 1$)和高扫描速度而有进一步增加存储密度和数据传输速率的可能.然而为获得较高的信噪比,透镜与介质的距离非常短,小于 50nm .当在显微镜足够靠近物体的位置放置一个带有微孔的光阑,这就意味着可以观察比一般探测极限小的物体.基于 Hopkins 无向绕射模型的计算表明,在带有比光点尺寸小的小孔的光学系统可实现超分辨.这个带有小孔的超分辨系统能把小孔定位在焦点范围内与物体足够近的位置就可以应用到光盘中.然而在实际应用中,将亚微米尺寸的小孔定位

在以几米每秒速度运动的光盘 $1\mu\text{m}$ 处是不可能的,尤其当光盘(CD 或 DVD)高速旋转时,因此这种超分辨在光盘系统中的应用无法实现.

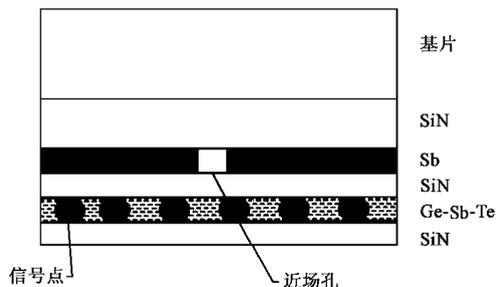


图4 近场超分辨相变光盘结构模型



为了克服这一困难,Junji Tominaga 等^[16-19]提出了一种带有能随入射激光强度变化而有张开和关闭现象的近场孔的光盘,即所谓的近场超分辨结构(super-RENS).图4为典型的近场光学扫描显微镜记录系统.在这种记录方法中,光纤头和记录介质为一整体,即光纤头被介质膜所代替,这种介质膜即超分辨掩膜与记录膜之间的保护膜.这种结构最重要的优点是孔尖与介质的空间由空气变成了由溅射或用其他方法制备的固态膜,所以距离容易控制,误差减小.在这种超分辨近场结构(super-RENS)中,掩膜与记录膜之间的距离小于 50nm .由于 Sb 在晶态与非晶态间的响应时间很短,因此用 Sb 膜作为掩膜.Sb 掩膜与 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 记录膜间用 SiN 保护膜分开.在一定能量的会聚激光脉冲作用下,孔径开关层材料在激光斑点中心超过阈值功率的高能量处形成微孔径,到记录介质的间距由固体间隙层的厚度保证,所以近场孔径和记录层之间的距离被很好地控制在近场范围之内.这种方法在 686nm 的读出波长、 0.6 的数值孔径时对 90nm 的记录点有 10dB 的载噪比(C/N).

Hiroshi Fuji 等最近报道了用 AgO_x 作读出层的超分辨近场结构(super-RENS)光盘^[20].在一般的超分辨相变光盘中,都利用了掩膜的透明小孔实现超分辨,而他们则提出了另一种实现超分辨近场结构光盘的方法,其盘结构如图5所示. AgO_x 膜作为金属探测器,当激光射线聚焦而使温度超过一临界值时, AgO_x 快速分解成 Ag 和 O,当射线离开,Ag 和 O 又重新结合,分解的 Ag 聚集形成一金属区,在富 Ag 区产生近场光.由于读出层与记录层间距离小于近场光长度,因此小记录点可以通过富 Ag 区附近的近场光记录和读出.在 6m/s 的线速度时,小于 100nm

的记录点可以被记录和读出。

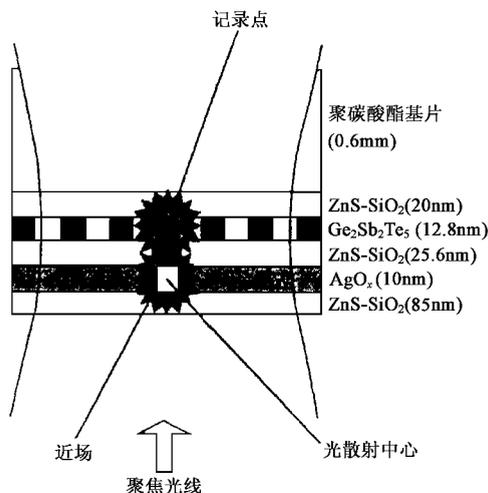


图5 散射型近场超分辨相变光盘结构模型

5 小结

综上所述,超分辨技术对于提高光盘的存储密度是十分有用的。尤其在目前短波长激光二极管的实际应用还不成熟,而超分辨是一种简单可行且有效的增加光盘存储密度的方法。在读出和写入激光波长不变的情况下,利用超分辨方法可使目前的只读光盘和相变光盘的存储密度增大近一倍。超分辨近场存储可以探测 60nm 的记录点,因此可以实现光盘的超高密度存储。

参 考 文 献

[1] Kozlovshy W J, Dewey A G, Juliana A *et al.* SPIE, 1992, 1663 :410
 [2] Mansfield S M, Studenmund W R, Kino G S *et al.* Optics Letters,

1993, 18 :305

[3] Takano H, Higuchi, Hajime Koyanagi. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 29 :933
 [4] Michiaki Shinotsuka, Nobuaki Onagi *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39 :976
 [5] Masahiko Kaneko, Katsuhisa Aratani, Atsushi Fukumoto *et al.* Proceedings of the IEEE, 1994, 82 :544
 [6] Kouichi Yasuda, Masumi Ono, Katsuhisa Aratani *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1993, 32 :5210
 [7] Yutaka Kasami, Kouichi yasuda, Masumi Ono *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1996, 35 :423
 [8] Yihong Wu, Hock Khoo, Takuyo Kogure. Appl. Phys. Lett., 64 :24 :3225
 [9] Toshimichi Shintani, Motoyasu Terao *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1999, 38 :1656
 [10] Tsuyoshi Tsujioka, Minoru Kume *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1997, 36 :526
 [11] Tsuyoshi Tsujioka, Toshio Harada *et al.* Optical Review, 1995, 2 :181
 [12] Toshihiko Shintani, Motoyasu Terao *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1999, 38 :1665
 [13] Masaru Hatakeyama, Toshio Ando *et al.* 2000, 39 :752
 [14] Eric Betzig, Jay K Trautman. Science, 1992, 257 :189
 [15] Sumio Hosaka, Toshimichi Shintani *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1996, 35 :443
 [16] Tominaga J, Nakano T *et al.* Applied Physics Letters, 1998, 73 :2078
 [17] Junji Tominaga, Hiroshi Fuji *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1998, 37 :L1323
 [18] Junji Tominaga, Hiroshi Fuji *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1999, 38 :4089
 [19] Junji Tominaga, Hiroshi Fuji *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39 :957
 [20] Fuji H, Tominaga J *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39 :980

2002 年第 2 期《物理》主要内容

特约专稿

中国纳米科技研究的现状及思考(白春礼).

研究快讯

有机超微粒的制备及其尺寸效应研究(姚建年等).

评 述

准位相匹配材料研究新进展及应用(张超等).

知识和进展

声化学新发展——纳米材料的超声制备(张颖等);
 场电子发射研究现状及理论概述(王如志等);
 光能够走多慢——极慢光速研究若干进展(沈京玲

等).

物理学和高新技术

高硼掺杂金刚石膜电极的电化学应用研究(胡陈果).

实验技术

共焦扫描光声层析成像技术研究(余晓光等);
 新型二维水平传感器(余和五).

讲 座

同步辐射讲座第二讲 同步辐射 X 射线荧光及植物中微量元素的分析(姚 等).