

光数据存储的新进展*

戎霭伦 陈强

(北京航空航天大学理学院 北京 100083)

摘要 文章从不同角度全面系统地论述了光数据存储的新进展.一是以存储功能为生长线,着重论述只读存储→可录存储→可直接重写存储等光存储的存储机理和应用现状;二是以存储密度为里程碑,着重阐明 CD 存储→DVD 存储→纳米存储→三维存储等存储密度不断获得数量级提高的物理内含.文章最后指出 21 世纪光存储技术的发展趋势.

关键词 光子学,纳米存储,三阶光学非线性

NEW DEVELOPMENT OF OPTICAL DATA STORAGE

RONG Ai-Lun CHEN Qiang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The review of optical data memory is presented from different angles. First, from the viewpoint of the storing function, the principles and applications of read-only, recordable and rewritable memories are discussed. Second, from the viewpoint of recording density, the physical contents of the development from CD, DVD, nanometer recording to 3-dimensional recording are reviewed. The final part of this paper deals with the future perspective of novel storage in the 21 century.

Key words photonics, nanometer storing, 3rd order optical nonlinearities

1 引言

信息技术是 21 世纪的关键技术,信息产业是 21 世纪的支柱产业.信息技术的发展在 20 世纪是基于电子学向光电子学发展的阶段;21 世纪是由光电子学向光子学发展的新阶段.两个阶段的根本区别是信息载体和能量载体将由带负电的电子,即费米子,转变为不带电的光子,即玻色子.光存储就是信息载体为光子的存储,它可进入到电子载体所不能进入的超高密度、超快速率以及并行输入/输出、高度互连的领域.信息革命的内容正是以信息载体的转变为基点而展开,详见表 1.

国内外光存储技术的发展框图如图 1 所示.图中各小方框表示光存储技术发展的阶段.各小方框下方列出各阶段的代表性光盘.虚线方框 I 表示我国即将推向市场的光盘;虚线方框 II 表示我国尚处

在研究阶段的各类光存储.本文将以该框图为纲目,结合我国光盘的发展现状,系统论述各类光盘的膜层结构、存储原理及应用评价.

任何一种光盘都是由信息记录层、介质保护层、金属反射层等薄膜组成的二层、三层或多层光匹配的薄膜体系.光存储就是将要保存的信息,通过编码、调制激光,聚焦到光盘中的记录介质上,利用脉冲激光与介质相互作用时体现的相干性、非线性和量子性,使介质的光照微斑发生快速响应的物理/化学变化.这样实现信息的记录,称为信息的“写入”.读取信息时,用低功率密度的激光扫描信息轨道,通过反射光反射率或偏振态的变化区别二进制的“0”和“1”,再用光电探测器拾取,并进行解码、解调、纠错,以取出所要的信息,这就是信息的“读出”.

* 1999-10-19 收到初稿,2000-06-15 修回

表 1 20—21 世纪信息革命的主要内容

信息革命内容	20 世纪——电子学世纪	21 世纪——光子学世纪	信息产业
信息载体 信息存储	电子(带负电,费米子) 磁存储	光子(不带电,玻色子) 光存储	光盘、磁盘产业
信息传输	金属导线,无线电波 (高度空间局域性)	光纤,自由空间 (没有空间局域性)	网络通信产业
信息运算 信息处理	电子计算机,电计算 微电子技术 · 电子开关(10^{-10} s) · 电子集成电路(EIC)	光子计算机,光计算 光子技术 · 光子开关($10^{12}-10^{15}$ s) · 光子集成电路(PIC)	计算机产业
(过渡时期) ¹⁾		光电技术,光电集成电路(OEIC)	

1) 在过渡时期,利用光子的优越性和电子的可控性,形成信息技术的光电子学基础

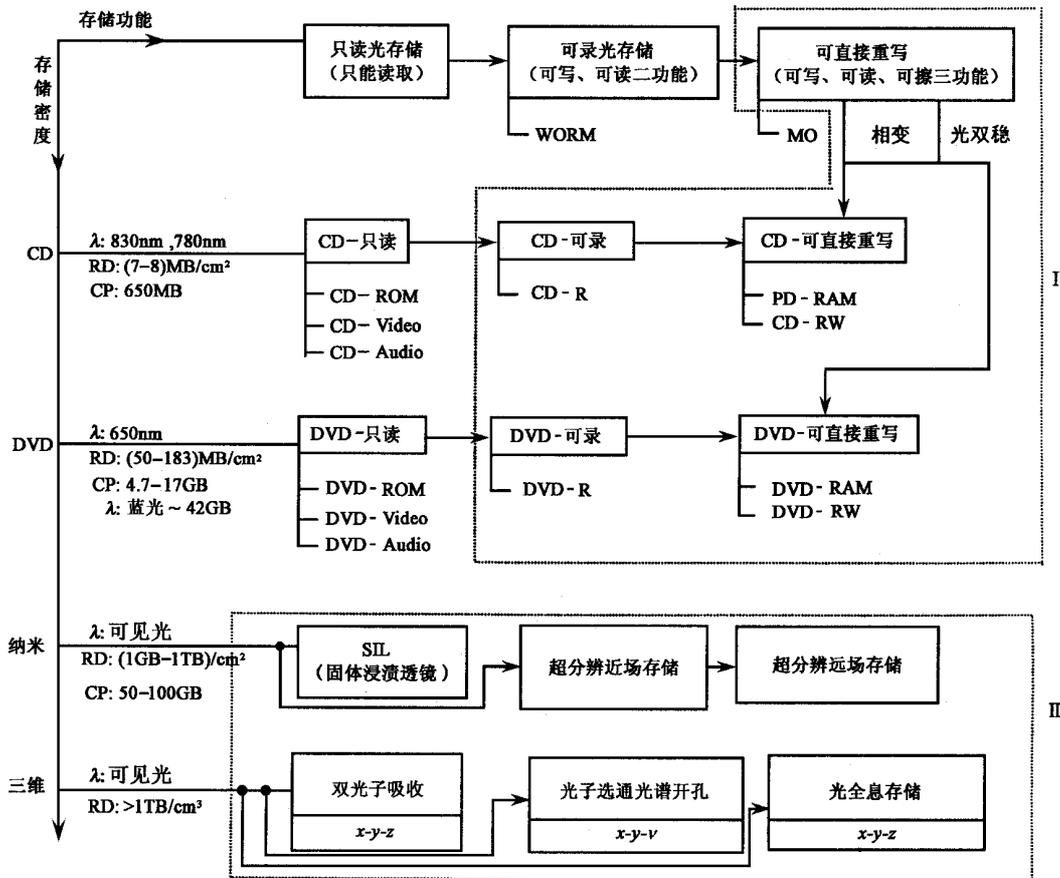


图 1 国内外光存储技术发展框图

2 DVD 光数据存储

高密存储与高速存取是光存储的关键。本节重点有二:一是从 CD-只读发展到 DVD-只读,实现高密、高速的关键技术;二是可重写 DVD 光存储的物理机理,包括磁光、热相变、光双稳等几类光存储。

表 2 列出了从 CD 发展到 DVD,实现高密和高速的关键技术,现说明如下。

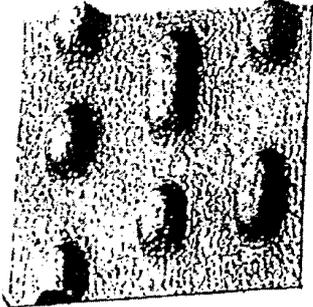
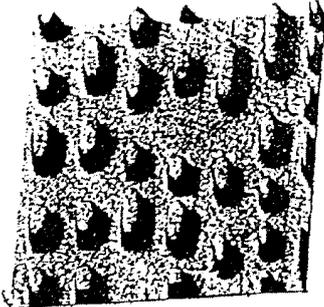
2.1 实现高密和高速

激光在母盘光刻胶上或在可写光盘记录层上录入的信息位密度

$$\rho \propto \frac{(NA)^2}{\lambda^2}, \quad (1)$$

式中 λ 是激光波长, NA 是光学读写头物镜的数值孔径。显然提高记录密度的措施之一是采用短波长和高 NA 。例如 CD 母盘的光刻机用氩离子激光器,波长 $\lambda_{Ar} = 488 \text{ nm}$; DVD 母盘光刻机用氮离子激光

表 2 从 CD→DVD 发展的主要技术关键

<p>技术关键:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 实现高密 • 实现高效 • 实现高速 	 <p>标准 CD 格式: 650 MB ROM 播放 74 min</p>	 <p>标准 DVD 格式: 4.7 GB ROM 播放 133 min</p>	<p>性能提高</p>
<p>实现高密:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 短波长 • 高 NA • 道间距 • 薄盘基 <p>实现高效:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 记录方式 • 调制方式 <p>• 检纠错码</p> <p>• 数字压缩</p> <p>• 分辨率</p> <p>• 音频道</p> <p>实现高速:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 母盘线速 <p>RAM/RW</p> <p>单片容量</p>	<p>ROM:(Ar⁺) 488 nm 0.45—0.5 $p = 1.6 \mu\text{m}$ $d = 1.2 \text{ mm}$</p> <p>槽内记录 PPM(脉位调制) EFM(8—14 调制) RLL(1,7) CRC 循环冗余校验码 MPEG1 N 制 250 × 240 二声道 (44.1 kHz, 16 bit) 单光束刻录 1.1—1.4 m/s 热相变记录, 10—50 ns/bit 各类 CD: 650 MB(0.65 GB)</p>	<p>ROM:(Kr⁺) 413 nm 0.65 以上 $p = 0.74 \mu\text{m}$ $d = 0.6 \text{ mm}$</p> <p>槽内、台上记录 PWM(脉宽调制) EFM⁺(8—16 调制) RLL(2,10) RS-PC 里德-索罗门乘积码 MPEG2 720 × 480 Dolby AC3 环绕声 5.1 声道(~96 kHz, 24 bit) 双光速记录 3.5—7.5 m/s 光双稳记录, 10—200 ps/bit 单面单层 4.7 GB DVD-5 单面双层 8.5 GB DVD-9 双面单层 9.4 GB DVD-10 双面双层 17 GB DVD-18</p>	<p>线密度 ↑ 道密度 ↑</p> <p>双折射 ↓ 抖晃 ↓</p> <p>进一步提高面密度</p> <p>高清晰度画面 高保真度音质</p>

器, 波长 $\lambda_{kr} = 413 \text{ nm}$; 数值孔径分别是 0.50 和 0.65. 这样可使 DVD 盘比特长度减小, 即线密度(单位长度的比特数)提高, 同时还要减小道间距(相邻两信道中心线间的距离), 使道密度增加. 最终使盘片面密度增加. 此外, DVD 光盘的盘基厚度是 CD 的一半, 这样可降低盘基的双折射和盘片的抖晃, 并使光盘在同样翘曲情况下的聚焦光斑减小, 有兴趣的读者可参阅文献[1].

实现高密存储的措施之二是提高存储效率, 它包括编码纠错、调制解调、数字压缩等信号处理环节. 信号处理已有各种专著出版, 这里只以数码的调制为例, 说明调制方式与记录密度息息相关.

表 2 中的脉位调制(PPM - pulse position modulation)指记录信息时, 每逢脉冲的上升或下降沿记录一个比特. 脉宽调制(PWM - pulse width modulation)

指按脉冲宽度记录比特. 设有一个二进制数列 0111001010, 若用 PPM 调制, 得出一串记录比特, 如图 2(a) 所示; 若用 PWM 调制, 由于 111 的脉宽相当于一个比特脉宽的 3 倍, 这样得出一串记录比特如图 2(b) 所示, 可见记录效率明显提高. 两种信道码和调制记录方式在光盘应用中的对比, 可参阅文献[2].

实现高速: CD 及 DVD 的光盘母盘都用恒线速

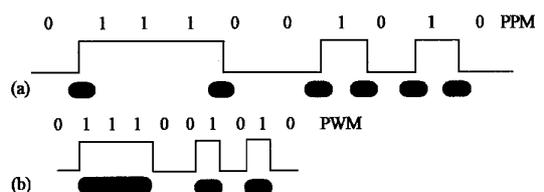


图 2 脉位调制和脉宽调制的比较

(CLV - constant linear velocity)刻录,但 CD用单光束刻录,DVD用双光束刻录,刻录速率各不相同,如表 2 所示.此外,为便于信息检索,可重写 DVD(即 DVD - RAM)盘基采用分区等线速(Zoned - CLV)预格式刻录,即将盘面划分为很多线速率各不相同的 CLV 环区,每区中布满螺旋形信道,每道又分为很多扇区(sector),每个扇区有 2048 字节(Byte),见文献[1].

可重写 DVD 光盘因记录介质的不同,存储机理也不同,其中磁光及相变存储是基于激光热效应的存储;光双稳是基于三阶非线性光学效应的存储,现分析如下.

2.2 磁光存储

磁光盘记录介质用稀土 - 过渡金属作为记录介质,典型材料是铽铁钴(TbFeCo)合金;盘片结构依次为:预格式聚碳酸酯盘基/第一保护层 SiN/记录介质层 TbFeCo/第二保护层 SiN/铝合金反射层/紫外光固化层 UV lacquer.信息存储利用激光热退磁和偏置磁场作用下磁畴的正、反取向实现信息的“写”和“擦”.信息位写入条件是磁畴微区的温升高于介质的居里点或补偿点.信息位的读出,利用反射光偏振面相对入射光偏振面在正、反磁畴处的克尔旋转角来区别二进制的“1”和“0”.详见文献[3].

磁光盘研究在我国已有十余年历史,1991年,上海联合光盘实验室研制出直径为 $\phi 30\text{ mm}$ (5.25")的可擦重写磁光盘,通过国家鉴定与验收.1995年,电子科技大学在深圳天极公司支持下,建成磁光盘小批量生产线,能生产 $\phi 90\text{ mm}$ (3.5")单片容量为 640 MB 的可擦重写磁光盘,技术指标达到国际 ISO/IEC100089 的标准^[4].1999年该生产线通过国家验收^[5].目前电子科技大学正在向可直接重写磁光盘方向努力.可擦重写与直接重写的区别是:可擦重写指写入信息需要两步动作,即先将信息道上的信息擦掉,然后再写入新的信息,也就是先擦后写两步动作.直接重写指写入信息只需一步动作,即写入新信息的同时旧信息自动被擦除.目前美、日两国都在研究用多层 Pt/Co 膜作为记录介质,并用磁场调制或激光调制的方法实现磁光盘的直接重写,但都未进入规模生产阶段.

2.3 热相变存储

相变盘记录介质用多元半导体化合物,典型材料是锗碲砷(GeSbTe)化合物.盘片结构依次为:预格式聚碳酸酯盘基/第一保护层 ZnS - SiO₂,增透膜/记录介质层 GeSbTe/第二保护层 ZnS - SiO₂,增反

膜/铝合金反射层/UV lacquer.信息存储利用激光热效应诱导的晶态和玻璃态之间的可逆相变实现信息的“写”和“擦”.写入条件是光照微区的温升超过介质的熔点,并以每秒 10⁹ °C 的速度冷却,相当于通过液相快淬过程进入玻璃态.擦除过程通过晶核形成,晶粒长大回复到晶态.玻璃态长程无序,反射光强低;晶态长程有序,反射光强高;因此相变光盘可利用反射光的光强反差来鉴别二进制的“1”和“0”,实现信息位的读取.详见文献[6].

相变盘研究在我国亦有十余年的历史.1991年,北京航空航天大学研制出 $\phi 200\text{ mm}$ (8")可擦重写相变盘,单盘双面容量 1.28 GB,通过国家鉴定与验收.1994年,在佛航公司支持下,引进了一台多工位射频磁控溅射仪,与其他设备连接,对各类可写 DVD 光盘(包括 DVD - RAM、DVD - RW 及 DVD - R)可进行小批量生产.DVD - RAM 和 DVD - RW 都是直接重写相变盘,区别是盘基的预格式不同.DVD - RAM 采用 Z - CLV 格式^[7],信道上分扇区,扇区标头有地址码,便于信息检索,故可取代软盘用作计算机外存.DVD - RW 采用连续 CAV 格式,信道上不分扇区,故可用于音像节目的连续录放.

2.4 光双稳存储

激光热相变虽在高密 DVD - RAM 及 DVD - RW 光盘存储中获得成功,但它的进一步发展却暴露出不足.因它写入过程用液相快淬实现,擦除过程通过固相晶化完成,这样在经历几十万次的直接重写循环后,会出现信噪比下降的热疲劳.对热相变盘激光的工作波段在红光或近红外波段(如 650 nm, 780 nm 等),激光对记录介质的作用以热效应为主.热相变是能量积累过程,写入一个 bit 需时较长,约几十纳秒.而且未计入光子与介质的相互作用,从理论上讲是不完善的.

进一步的研究改用短波激光,例如蓝绿光或紫外光.随着激光波长的短移,激光的热效应逐渐减弱;激光束光子的能量 $h\nu$ 逐渐增大,因而激光光子在介质中的激发作用变得突出.为此光双稳存储的材料设计基于激光光子的激发效应,也就是三阶非线性光学效应.写入条件是光子能量大于介质的光能隙, $h\nu > E_{op}$,这样录入一个比特的时间只需几十皮秒,使记录速度获得数量级的提高,详见以下各节的论述.

光双稳盘的多层膜系结构类似于热相变盘.但如选择适当的保护层(折射率 n_1)和记录层(折射率 n_2 ,吸收系数 α),则光盘的三层(或四层)膜系可等

效成一个 Fabry - Perot 干涉元件,简称 F - P 元件. 现将激光与 F - P 元件相作用的解析解和数值解分析如下.

2.4.1 激光与 F - P 元件相作用的解析解

如图 3(a) 所示,入射激光分别在 n_1/n_2 和 n_2/n_1 两个界面反射和透射,并在折射率为 n_2 的介质中被吸收一部分.垂直入射时,可用幂级数求和,得出反射方向和透射方向的光强,分别用(2)和(3)式表示.

$$I_R = I_i \frac{F \sin^2 \left| \frac{\varphi}{2} \right|}{1 + F \sin^2 \left| \frac{\varphi}{2} \right|}, \quad (2)$$

$$I_T = I_i \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \left| \frac{\varphi}{2} \right|}, \quad (3)$$

式中 F, T_0 是常量, φ 是分别在上,下界面反射的相邻两光线之间的位相差.此外,对吸收介质, φ 又是入射光强 I_i 的函数:

$$\varphi = \varphi_0 + C I_i T, \quad (4)$$

式中 φ_0 及 C 是 F - P 干涉元件的参量.

将(3)式与(4)式联立求解.由(3)式作出 T ($T = I_T/I_i$) 与 φ 的函数关系,在 $T - \varphi$ 关系图中,它

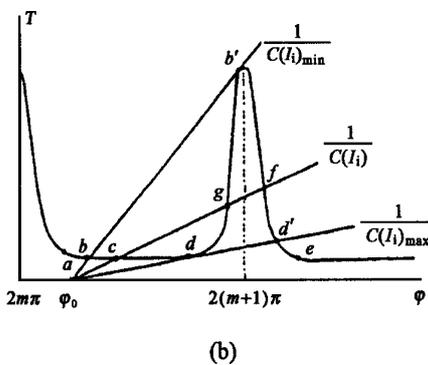
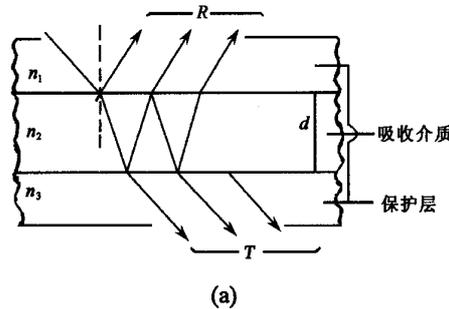
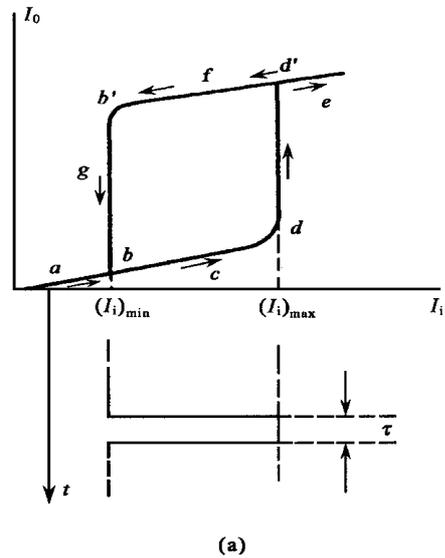


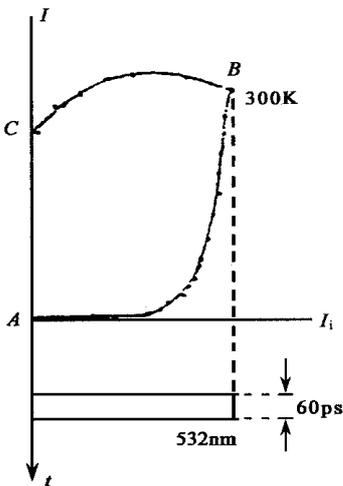
图3 激光与 F - P 元件相作用的图示

- (a) 激光在 F - P 元件上、下界面反射、透射的光路图
(b) 光双稳盘工作点示意图

是一组周期性的函数,见图 3(b).由(4)式则得出 $T - \varphi$ 函数关系是一簇与入射光强有关的直线.因此 F - P 元件对激光作用的解析解在图 3(b)中应是周期函数与直线交点所组成的解,其结果是:F - P 元件输出光 I_T 相对输入光 I_i 滞后的光滞双稳态回线,如图 4(a)所示.该图明确指出光双稳态的物理含义:当入射光脉冲的上沿来到时,记录介质从原始的 a 态,经过 $a - b - c - d$ 的变化过程到达 e 态;当对应入射光脉冲的下降沿时,记录介质从 e 态,经过 $d' - f - b' - g - b$ 的过程回到 a 态.这说明介质在入射光强 $(I_i)_{\min}$ 及 $(I_i)_{\max}$ 之间,有两个稳定态.激光的这种光效应属三阶非线性光学领域,它可用于光开关、光逻辑.图中 $(I_i)_{\max}$ 相当于光开启, $(I_i)_{\min}$ 相当于光关断.光滞双稳态变化用于光存储虽属必要,



(a)



(b)

图4 三阶非线性光滞双稳态

- (a) 开关型光滞双稳态闭合回线;(b) 存储型光滞双稳态非封闭曲线

但不充分,因为在一个光脉冲作用后,介质微区经过光滞双稳态变化后恢复到起始状态,没有录入信息.

2.4.2 三阶非线性光学效应的数值解

什么是三阶非线性光效应?当激光照射到吸收介质上,介质中的光感应电偶极矩可展开为光电场强度 E 的幂级数,如下式所示:

$$\frac{1}{\epsilon_0} P = x^{(1)} E + x^{(2)} E^2 + x^{(3)} E^3 + \dots \quad (5)$$

上式右端第一项描述线性光学行为,如折射、反射等.第二项描述二阶非线性光学行为,如和频、差频效应等.第三项则给出三阶非线性光学效应,如四波混频、光双稳态存储等.式中 $x^{(3)}$ 表示三阶非线性电极化张量.当光子能量大于介质的光能隙时,介质中的价带电子发生带间跃迁,因而在介质中形成大量的光生“电子-空穴”对,一般称为“电子-空穴”等离子体.这种电子-空穴对的产生与复合过程往往伴生介质微结构的变化.在此情况下,当脉冲激光的上升沿来到时,介质微区从起始态 A 转变到中间态 B ;当对应脉冲激光的下降沿时,介质微区通过电子-空穴的复合弛豫过程到达终态 C ,如图 4(b) 所示.该结果是用时间分辨超快速激光光谱实验得出的,所用激光器是二倍频 Nd:YAG 激光器,波长 532nm,脉宽 60ps,室温 300K.这种非封闭式三阶非线性光滞双稳态变化曲线反映在光生电子-空穴对的产生与复合过程中伴随介质微结构的变化.

三阶非线性光滞双稳态变化的数值解可从光激电子-空穴对的产生率方程、复合率方程以及 F-P 元件(参阅文献[8,9])反馈方程联立求解获得,其结果与图 4(b) 的实验结果相吻合.

由此可知,在化合物半导体中,信息位可直接重写的必要条件是在 $h\nu \geq E_{op}$ 的情况下,介质中的三阶非线性光滞双稳态变化以及伴生的微结构变化.这种变化可以是可逆的(用于 DVD-RAM 或 DVD-RW),也可以是不可逆的(用于 DVD-R).

三阶非线性光滞双稳态变化不仅发生在化合物半导体中,近期研究发现它也可发生在大量的有机染料中(详见文献[10]),只是存储机理不同而已.

3 纳米存储

从 DVD 光存储向纳米存储发展的关键是回避瑞利(Rayleigh)衍射分辨极限,实现以下关键技术:

- (1) 将光纤锥尖取代传统 DVD 光学头;
- (2) 采用固体浸没透镜读/写光学头;

30 卷(2001 年)1 期

(3) 采用超分辨近场光存储技术.

3.1 瑞利衍射分辨极限与光纤锥尖探针

由波动光学可知,任何物点发出的光通过光学系统的传输在焦平面上形成的像实质上都是物点的衍射图样.瑞利研究了两个独立的、等光强的衍射叠加,见图 5 中的三种情况:可分辨、分辨极限、不可分辨,提出了衍射分辨极限的判据:在由两衍射图样 (A_1, A_2) 合成的总光强分布曲线中,当两峰值之间的最小值不超过峰值的 80% 时,可分辨两个物点.这时两峰值之间的距离也就是光学系统能分辨的两物点的最小距离.

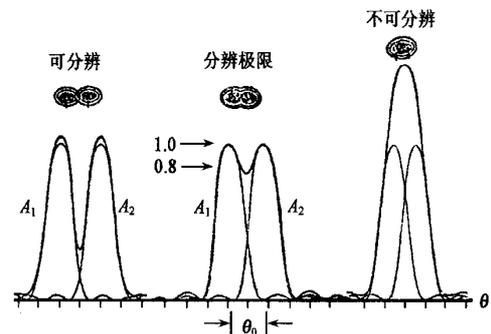


图 5 瑞利衍射分辨极限示意图

由瑞利判据可推出一般光学头的分辨极限在 200 - 300nm 之间,例如当波长 $\lambda = 635/650\text{nm}$ 时,最小比特长度约为 $0.4\mu\text{m}$ (400nm);若用 $\lambda = 413\text{nm}$,最小比特长度约 $0.25\mu\text{m}$ (250nm),已接近瑞利分辨的极限.因此要获得纳米量级的超高密存储必须突破瑞利衍射极限的制约,放弃传统光学系统.

目前用来取代光学头的装置是光纤锥尖探针.将单模光纤端部制成锥形,并镀有金属(金或铂金),锥尖顶部开一个直径为几十纳米的超微孔(见图 6),即成为一个单模光纤锥尖探针.

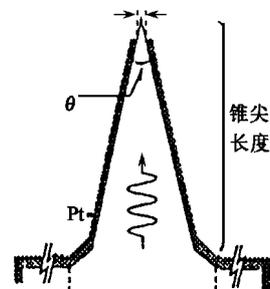


图 6 单模光纤锥尖探针^[11]

光纤锥尖探针虽能将其顶部的孔径减至几十纳米以下,超越瑞利衍射分辨极限,但没有实用价值.原因有二:一是激光光场能量有 90% 以上在光纤中

损耗;二是锥尖探针并不能突破瑞利极限,因为衍射作用与微孔半径 r 的平方成反比,所以 r 愈小,衍射作用愈强.而且激光衍射光斑随探针相对于记录层的飞行高度的增加而增大.为实现纳米存储,飞行高度应箝制在纳米或十几纳米的量级,实际上做不到.为此,近一、两年又出现了固体浸没透镜和超分辨近场存储的开发研究热潮.

3.2 固体浸没透镜

固体浸没透镜最初由 G. S. Kino 等人在 1990 年制成^[12],旨在使光学读/写头的数值孔径大于理论极限值“1”.新设计的读/写头包括一个物镜 L_1 和一个 SIL,它是一个平切的半球形透镜,如图 7(a)所示.激光首先由 L_1 会聚,继而由 SIL 聚焦在光盘记录介质上.SIL 可以通过较大的光通量,与盘面的距离属近场范围.聚焦光斑直径随 SIL 的介质折射率及飞行高度的不同而不同.例如 1999 年, K. Hirota 等人用 GaP 制成的 SIL, $n = 3.3$, $NA = 1.98$, 飞行高度 50nm , 入射面光斑直径估算值为 280nm , 聚焦面光斑直径估算值为 180nm ^[13].

还可以将 SIL 制成两面平切的圆柱状透镜,由透镜中心部分可获得长焦距,由周边部分可获得短焦距,如图 7(b)所示,而且周边柱面的曲率半径改变时,短焦距的值亦随之而变.

SIL 采用传统光学系统实现光束聚焦,没有从

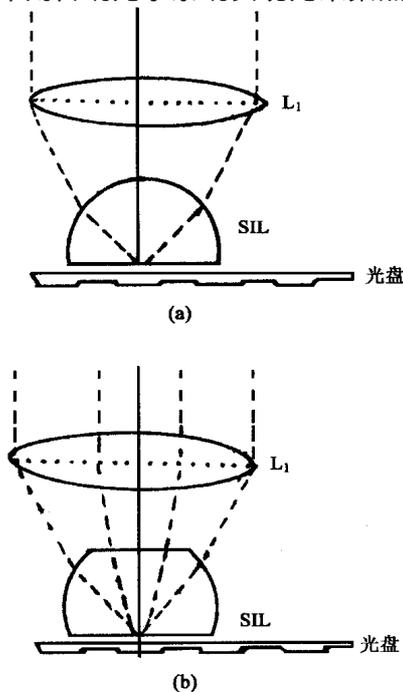


图 7 固体浸没透镜

(a) 含 SIL 的光学头; (b) 双焦距 SIL 光学头

根本上超越瑞利衍射极限,对记录密度的提高有限,因此近一、两年又在光纤锥尖探针的基础上开发了一种体内探针(见 3.3 节).

3.3 超分辨近场结构

超分辨近场结构主要由可写 DVD 及孔径层组成.孔径层通过透明介质层 (SiO_2 , 或 SiN 或 $\text{ZnS} - \text{SiO}_2$) 与可写 DVD 连成一体,如图 8 所示.孔径层并不真是有孔,它是具有三阶非线性双稳态开关特性的薄膜,当激光脉冲上升沿来到时,微区薄膜处于高透射的开态,类似于照相机的快门开启,光脉冲通过该透明孔径对 DVD 进行记录.光脉冲拆离,孔径处于低透射的关态.这种结构录入的信息可从透射方向读取.

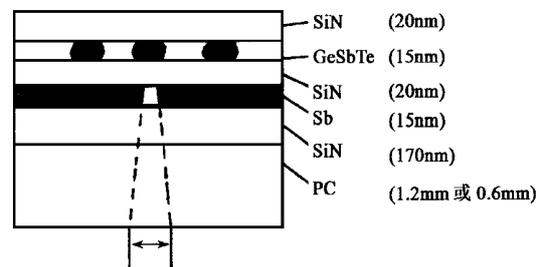


图 8 一种超分辨近场结构^[14]

这种孔径探针与可写 DVD 组成一体,可确保探针飞行高度一定,这高度实际就是孔径层的厚度.适当选择激光波长、功率和脉宽,可获得超微孔径以达到超分辨记录的目的. Super-RENS 的关键是孔径层材料,它可以是无机材料,例如铋^[14],也可以是有机染料^[15],也可能是无机-有机复合材料.关键在于:(1) 有较强的三阶非线性双稳态开关特性;(2) 快速光响应;(3) 热稳定性好;(4) 噪声小.由于孔径层带来噪声干扰和光场能量损耗,目前 Super-RENS 的信噪比 C/N 最高只接近 30dB .

3.4 超分辨远场结构

超分辨近场结构面临远场结构的挑战.远场结构基于三阶非线性双稳态的自聚焦效应.图 9(a) - 9(c) 给出了自聚焦效应的原理描绘.一单模激光束,具有光强的横向高斯分布,进入非线性介质后,折射率发生变化,即: $n = n_0 + \Delta n$.用波动方程可求得折射率变化 Δn 的算式为

$$\Delta n = \frac{3}{8} x^{(3)} \frac{1}{n_0} |E|^2, \quad (6)$$

式中 $x^{(3)}$ 是三阶非线性电极化率张量.

(6) 式说明折射率的变化与光强有关.也就是说,对一个具有横向高斯分布的激光束而言,中心部分的折射率变化大于边缘部分,因而中心部分的波物理

速小于边缘部分,最终导致光束的波前畸变如图 9(a)所示.又由于光波在传播时,任何一点的传播方向必须与该处的波阵面垂直.这样光束在介质中传播形成会聚的趋势,如图 9(b)所示.在此情况下,介质中光束的制约来自两种作用:

(1) 光束扩张,来自于衍射作用,它正比于 $1/r^2$, r 为光束直径;

(2) 光束会聚,来自于自聚焦作用,它正比于 $\Delta n = n_2 |E|^2, E \propto 1/r^2$.

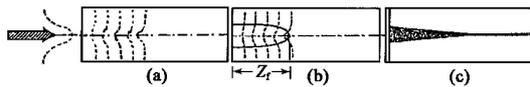


图 9 自聚焦原理示意

(a) 高斯波形在非线性介质中的波前畸变;(b) 波前畸变导致自聚焦;(c) Ar^+ 激光束在铅玻璃中的自聚焦^[16]

显然,当自聚焦作用足以与衍射作用相抗衡时,光束会聚焦成一明亮的细丝,这细丝是由运动焦点形成的轨迹.不同时刻的焦点起源于输入脉冲不同部分的自聚焦.自聚焦的最小焦距 Z_f 可用波动方程解得.图 9(c) 是 Ar^+ 激光束在铅玻璃中的自聚焦.

综上所述,超分辨近场结构是通过孔径对高斯光束的制约获得超分辨效果,这是实现二维纳米存储的一种巧妙设计.

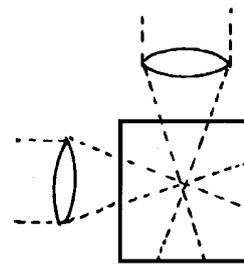
超分辨远场结构是通过介质三阶非线性对高斯光束的自聚焦制约获得超越瑞利衍射极限,实现三维纳米存储的可行性设计.原则上讲,自聚焦要求三阶非线性系数很高而响应速度很快的光学材料,这种优质材料的制备一旦突破,必将使高密体存储更上一台阶.

4 三维存储

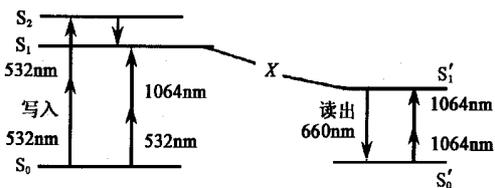
4.1 双光子吸收存储

自 1996 年以来,国外已陆续推出基于双光子吸收的三维数字存储器,包括存储器件与驱动器.存储密度已进入 Tb/cm^3 的量级,传输速率达到 $100 Gb/s$,存储媒体用具有双光子吸收性能的光致色变活性分子分散在聚合物中,制成块材.例如 F. B. McCormick 等人用的光活性分子是螺吡喃衍生物(SP),聚合物是聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),两者构成 SP/PMMA 存储体系,能级图如 10(b)所示.块材体积 $10 mm^3$.两激光束分别从相互垂直的方向射入块中,在相交处的 SP 分子吸收了二个光子能量后,从 S_0 态跃迁到 S_1 态,在此实现光离化,并通

过系间窜越到达三重激发态的最低能级 S'_1 ,完成信息的写入.分子处在写入态时,对 $550 nm$ 有强吸收,因此可用两个 $1064 nm$ 光子去激励,使写入分子重新回到 S'_0 态并放出 $660 nm$ 的荧光,这便是信息的读出.双光子采用两束相互垂直的激光进行写入,因此可以对块材中的任一点进行访问,录入比特[见图 10(a)],实现高密体存储.缺点是活性分子在写入态的室温寿命太短,有的短到几小时,长的也只一年,因此寻找长室温寿命写入态的材料就成为这类存储器的关键.



(a)



(b)

图 10 双光子吸收存储

(a) 两束相互垂直的激光同时射入存储媒体;

(b) SP/PMMA 的能级与写、读过程

4.2 光子选通光谱开孔存储

在光盘的信道上,一个光斑写入一个信息位(bit);可是每个光斑微区,有 $10^6 - 10^7$ 个分子,也就是 100 万或 1000 万个分子抬一位“比特”.假定每个分子能抬一位,岂不是存储密度可以提高 6-7 个数量级!这种在分子级水平上实现信息存储的器件称为分子器件,这个目标,21 世纪将会实现.目前有个过渡,就是将光斑微区的 $10^6 - 10^7$ 个分子,按吸收频谱的分段划分为几百或几千个组团,每个组团抬一位,使存储密度提高 $10^3 - 10^4$ 倍,达到 $1 Tb/cm^3$ 的量级.这种存储就是光谱开孔存储,简称 PHB (photon spectral hole burning).

PHB 材料由客体 and 主体构成.与双光子材料类似,客体是光活性分子,可以是有机活性分子或无机色心分子;主体可以是高分子聚合物或低温玻璃态物质.客体可以通过均匀混合、侧链键合或骨架结合到主体中组成客体/主体的存储媒体.客体/主体中

不同分子组团有不同频率的吸收光带,每一光带的半宽度叫做均匀线宽,用 $\Delta\omega_h$ 表示,如图 11(a) 所示;各组团的吸收光带叠加而成的展宽光带称为材料的非均匀吸收光带,其半宽度称为非均匀线宽,在图 11(a) 中,用 $\Delta\omega_f$ 表示. 设将连续调谐激光调至非均匀吸收带频率范围($\nu_1 \dots \nu_n$) 内的任一频率 ν_i [图 11(b)], 则第 i 组团分子吸收光子能量后从基态跃迁至激发态并伴随有光物理化学反应及其生成物. 分子组态的这种变化对应信息的写入. 读出信息时,用频率在 $\nu_1 - \nu_n$ 内的低功率激光扫描光斑,则得到的非均匀吸收光带在 ν_i 处出现一个缺口,这是因为原来在 ν_i 的均匀吸收光带由于该组团分子已发生光物化反应而不存在. 非均匀吸收光带上的这个缺口就称为光谱开孔. 假定在频率 $\nu_1 - \nu_n$ 范围内开出了 N 个孔[图 11(c)], 令开孔处为二进制的“1”,无孔处为“0”,则经计算机处理后得出一系列光谱开孔的二进制编码,如图 11(c) 下部所示. 这说明对应于 x, y 二维空间的一个光斑,不是只存储一位比特,而是可以写入按频率分布的一系列信息位,相当于增加了一个频率维的存储空间,大大提高媒体的存储密度,故常将 PHB 存储说成是 (x, y, ν) 三维存储或频率域“多重”存储,多重度定义为: $N = \Delta\omega_f / 2\Delta\omega_h$, 可用来表征三维存储密度相对于二维存储密度所扩增的倍数. N 的数量级可达 $10^3 - 10^4$.

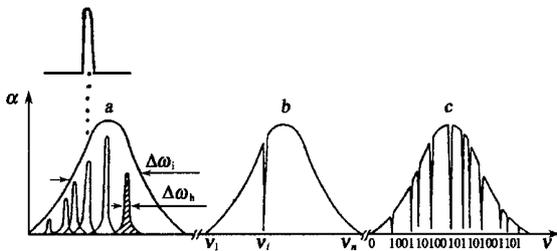


图 11 光谱开孔
(a) PHB 材料的均匀、非均匀吸收光带;
(b) 光谱开孔;(c) 光谱开孔的二进制编码

为防止读出信息时,读出激光使某频率 ν_x 处原来未写入的分子发生光物化反应,干扰已写入的信息,1985 年,美国 IBM 的 W. E. Moerner 提出光子选通光谱开孔(photon-gated spectral hole burning, PGHB)^[18]. 他用的客体是四苯并卟啉锌络合物(TZT),主体是 PMMA-CHCl₃,即 TZT/PMMA/CHCl₃. 光子选通的原理见图 12(a):用 λ_1 (627nm) 的激光使 TZT 发生 $S_0 \rightarrow S_1$ 跃迁,通过系间窜越到达三重激发态的 T_1 ;分子在此吸收选通光子 λ_2 (514nm) 的能量从 T_1 跃迁到更高的能级 T_n ,并

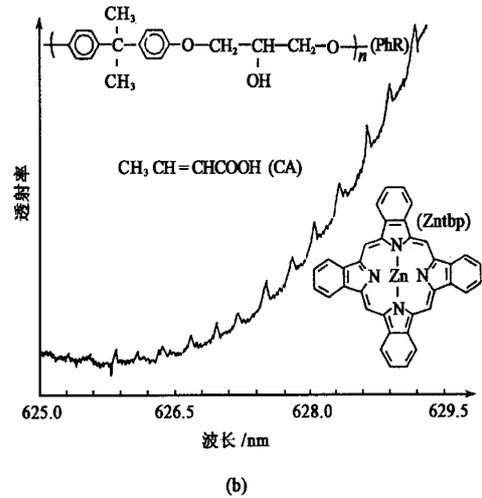
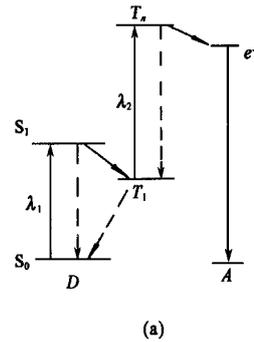


图 12 光子选通光谱开孔

(a) PGHB 能级示意图;(b) Zntbp AC/PhR 20K 选通孔的部分透射谱

与客体分子发生光物化作用,最终在材料非均匀吸收光带的 λ_1 处,开出一个窄而深的漂亮孔.由此可见,在这种情况下,双光子中的 λ_1 光子起选频跃迁作用, λ_2 光子起选通写入作用,缺一不可不能写入信息.至于信息的读出,只有 λ_1 激光即可,因为在有选通的情况下,用 λ_1 读出不会干扰原来写入的信息.

1988 年,北京航空航天大学张忠麟用新研制的四苯并卟吩锌-巴豆酸/苯氧基树脂(Zntbp CA/PhR)记录介质进行了光子选通光谱开孔实验,在 20K 的温度下,用选频光 λ_1 (629nm) 和选通光 λ_2 (488nm) 成功地在材料中开出了多重度为 320 的光谱孔,如图 12(b) 所示.图中插入 PhR, CA 及 Zntbp 的结构式.应注意该图示出的是光子选通的部分透射谱,若为吸收谱,则谱图应反过来.该科研组对孔的温升和孔的寿命进行了实验研究,得出结论如下^[19]:

(1) 在 20K 温度下的选通孔,可在 20K 温度下永久地保存.

(2) 随着温度的升高,孔深逐渐减小,孔宽逐渐增加,到室温时,开孔填平并消失.

由此可见,要使光子选通光谱开孔付诸应用,必须解决室温写入和长久保存的问题。

4.3 激光全息存储

激光全息存储记录的是携带信息源的物光和参考光相干叠加所形成的干涉图。由于干涉图中干涉条纹的光强分布包含着物光波振幅和位相的全部信息,因而称为全息图。信息的写入就是全息图的记录,信息的读出就是全息图的再现。

原始数据经过空间光调制器(SLM)^[20]成为携带信息的物光(O),另一束是通过角度(或位相、或波长)选择的可寻址参考光(R),以一特定方向射入记录介质,见图13(a),两束光在介质的相遇空间相干形成明暗交替的干涉条纹,条纹轨迹取决于两束光场在各点的位相差,不同的数据图像与不同的参考波前——对应。现结合典型的光全息记录介质——掺铁铌酸锂 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 晶体的存取过程阐明全息图写入和读出的原理。在 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 晶体中, Fe^{2+} 是捕获电子的陷阱,或称施主,吸收光子能量后,电子被激发至导带,即 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$,其中 Fe^{3+} 是空陷阱,或称受主,不吸收光子能量。在未曝

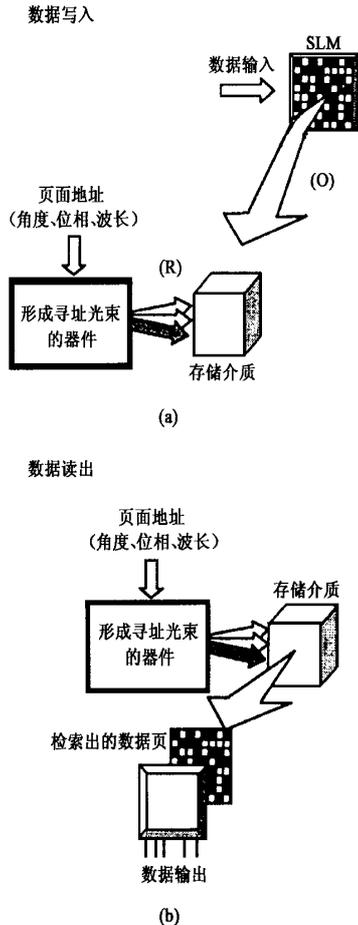


图13 光全息存储的写入(a)和读出(b)

光时,施主在晶体内均匀分布;在干涉图样下曝光时,陷阱中电子跃入导带并在内电场作用下发生迁移,在迁移过程中被受主捕获,捕获后还可以再激发,再捕获,直到不能再激发的暗区。这样电子迁离的区域成为净正电荷区,电子迁入的区域则为净负电荷区;这种空间电荷分离形成的电场在介质中感应出空间折射率分布,通常叫做电光效应,或 Pockels 效应,也就是调制出一个与干涉图相对应的空间位相光栅,即全息图,完成信息的写入。读出信息时,用与原参考光波相似的光波(称为再现光)照射全息图,见图13(b),则可获得位相光栅的衍射图样。衍射光束经过空间调制,可再现写入过程中与此参考光相干涉的数据光速的波面。零级衍射对应直射光波;+1级衍射光波携带原始物光波的信息,通常为虚像;-1级衍射光波带有原始物光波共轭的信息,通常为物的实像,具有很强的立体感。这正是“振幅加位相”的全息信息带来的硕果。

当记录介质的厚度比全息光栅线间距大得多时,O光与R光在记录介质内形成三维光栅状全息图,称为体全息图。它在再现时,只有满足布拉格条件,衍射振幅最大。因此,体全息图的写读特性由布拉格定律确定,它对照明光束具有角度和波长的选择性响应,从而使角度和波长成为提高全息体存储密度的两个关键因素,也就是角度和波长的多重记录,或称为角度复用和波长复用。

最简单的角度复用是在波长一定的情况下,固定物光束方向,依次改变参考光束方向,这样记录的光栅矢量,它的方向和长度都不相同,可用于角度寻址。采用波长复用,是在角度一定的情况下;每个全息图用各自不同的波长写入和读出。一张全息图面积约 1 mm^2 ,信息量约为 1 Mb 。为在有限的介质体积中存储更多的全息图,近年来又发展了波长-角度复用技术、空间-角度复用技术等。空间-角度复用 (spatial angular multiplexing, SAM) 指相邻全息图之间既不完全分开,也不完全重叠,只是部分重叠,如图14(a)左是空间复用(SM),右是空间-角度复用(SAM)。目前我国北京工业大学物理系的教授、学者已将此技术试制出三维全息存储盘片,全息图记录在同心、互不重叠的环形带中,如图14(b)所示。图中 a 是全息图半径, Δy 是相邻两全息图之间的空间间隔, $\Delta \phi$ 是对应的角度间隔。有关光全息存储的基本理论和技术进展,有兴趣的读者可参阅文献 [21] 及 [22]。

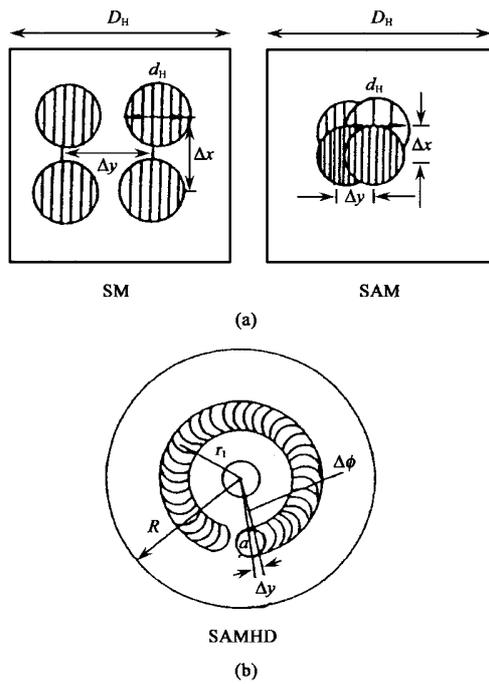


图 14 三维全息存储

(a) 空间 - 角度复用 ; (b) 空间 - 角度复用全息存储盘片

4 21 世纪光数字存储展望

21 世纪光数字存储势必向着超高密和超快速存储的方向发展,这可沿着下列各条途径努力:

(1) 继续深入研究激光与介质相互作用的光物理化学过程,用光子效应取代当前的光热效应,实现皮秒或亚皮秒量级的光响应过程,以提高光数据记录的速率。

(2) 实现光数据存储的并行写入和读出,提高数字传输速率。

(3) 推进三维光存储的实用化。

最有希望的三维存储是全体存储,原因如下:

(1) 全息本身是包括振幅和位相的全信息存储,具有高保真度。

(2) 以全息图形式存储的信息是分布式的,每个信息单元都存储在整個全息图上(包括面全息和体全息),因此记录介质的局部缺陷或损伤不会导致信息失真或丢失,具有高可靠性和高冗余度。

(3) 全息图以页面方式记录和再现,本身是信息的并行输入/输出,不像现有磁盘和光盘那样以串行方式进行信息的逐位(bit)存取,因而具有高存取速率和数据传输速率。

(4) 全息存储可以不用现行磁盘和光盘的机械传动读/写光学头,采用无惯性的光束偏转或参考光的空位相调制等方法实现非机械寻址,使检索一

个数据页面的时间小于 0.1 ms,而机械寻址磁盘是 10 ms,光盘是 20 ms。

(5) 全体存储的密度上限为 $1/\lambda^3$,因此采用 500nm 波长的激光在折射率 >1 的介质中,可获得大于 1 Tb/cm^3 的高密存储。

但全体存储实用化的困难亦不少,例如存入全息图的寿命问题,全息存储器结构复杂、价格昂贵的问题等都有待进一步解决。

因此 21 世纪的光数据存储的发展将是以前超高密、超高速为核心的一场高科技竞争,取决于各类存储的理论更新和技术突破。

值得一提的是,21 世纪光数据存储的另一个生长点是分子器件。分子器件不仅由于分子尺度的信息位导致超高密度存储,而且有的生物体分子器件具有很强的光灵敏度,例如有一种生物体——细菌视紫红质(bacteriorhodopsin)简称 BR 材料,具有很宽的光谱范围(400—700nm),写擦循环数大于 10^6 ,其二进制转换比目前的半导体器件快许多倍。有人预计,在今后六年内,利用半导体和 BR 膜作为逻辑元件的混合计算机将会问世。

作为高等学校,其培养目标应当面向新世纪,面向高科技,增设具有多学科交叉、新科技密集的交叉工的新专业势在必行。光信息物理与工程专业是否应提到日程,供物理界研究。

致谢 衷心感谢韦彦成教授在薄膜制备和溅射仪技术改造、性能升级方面给予的极大帮助。

参 考 文 献

- [1] 戎霭伦.真空科学与技术学报,1998,6:317[RONG Ai Lun. J. of Vacuum Science and Technology,1998,6:317(in Chinese)]
- [2] 王睿.北京航空航天大学学报,1997,23:436[WANG Rui. J. of Beijing Univ. of Aero. and Astro.,1997,23:436(in Chinese)]
- [3] 陈小洪,高正平.磁光存储技术原理.成都:电子科技大学出版社,1991[CHEN Xiao Hong, GUO Zheng Ping. Principles of Magneto optical Memory. Chengdu: Univ. of Electronic Science and Technology Press, 1991(in Chinese)]
- [4] ISO 10149(等同我国国际标准 GB/T 16969 标准文本), 1996
- [5] 张鹰,王琳.激光与红外,1998(6):348,351[ZHANG Yin, WANG Ling. Laser and Infrared, 1998(6):348,351(in Chinese)]
- [6] 戎霭伦等.光信息存储的原理、工艺及系统设计.北京:国防工业出版社,1993.第 1 章[RONG Ai Lun et al. Principles, Processes and System Design of Optical Information Storage. Beijing: National Defence Industry Press, 1993. Ch.1. (in Chinese)]

- [7] ISO16824 ,1999
- [8] RONG A L *et al.* SPIE,1996 ,2890 :74
- [9] RONG A L *et al.* SPIE,1996 ,2931 :108
- [10] RONG A L *et al.* Ultrahigh Density Recording Based on Third-order Optical Nonlinearity . In:Proc .of 5th Inter .Symp on Optical Storage . , Shanghai .2000 ,in Press .
- [11] Toshiharu Saiki . Technical Digest of ISOM/ ODS . Hawaii : Optical Society of America , 1996 ,12 :214
- [12] Kino G S *et al.* Appl .Phys .Lett . ,1990 ,57 :2615
- [13] Hirota K *et al.* In:Proc .of 11th PCOS .Japan .1999 .12
- [14] Nakano T *et al.* Appl .Phys .Lett . ,1999 ,75(2) :151
- [15] Itatakeyama M *et al.* In:Proc .of 11 th PCOS . Japan .1999 . 26
- [16] 沈元壤 .非线性光学 .北京 :科学出版社 ,1984 .第7章 [SHEN Yuan-Rang . The Principles of Nonlinear Optics . Beijing :Science Press ,1984 .Ch .7(in Chinese)]
- [17] McCormick F B *et al.* Technical Digest of ISOM/ ODS Hawaii : Optical Society of America ,1996 ,12 :224
- [18] Moerner W E *et al.* Chem .Phys .Lett . ,1985 ,118 :611 .
- [19] 戎霭伦等 .光信息存储的原理 工艺及系统设计 .北京 :国防工业出版社 ,1993 .第7章[RONG Ai-Lun *et al.* Principles , Processes and System Design of Optical Information Storage . Beijing :Defence Industrial Press ,1993 .Ch .7(in Chinese)]
- [20] McAulay A D . Optical Computer Architectures . New York : John Wiley and Sons , Inc . ,1991 .67 - 96
- [21] 戎霭伦等 .光信息存储的原理 工艺及系统设计 .北京 :国防工业出版社 ,1993 .第8章[RONG Ai-Lun *et al.* Principles , Processes and System Design of Optical Information Storage . Beijing :Defence Industrial Press ,1993 .Ch .8(in Chinese)]
- [22] 陶世荃等 .光全息存储 .北京 :北京工业大学出版社 ,1998 . 38 - 75[TAO Shi-Quan *et al.* Optical Holographic Storage . Beijing :Beijing Univ . of Industrial Press .1998 ,38 - 75(in Chinese)]



作者简介

戎霭伦,女,1933年出生,现为北京航空航天大学教授,国际标准化组织信息技术委员会光盘分技术委员会专家组的A成员,国际光存储学术会议技术委员会委员,全国信标会光盘分委会常委副主任委员,中国光盘标准化专家工作组组长.率课题组完成国家9项重大科研项目,取得的成果分别获航空航天部科技进步一等奖、国家教委科技进步一等奖等.主

要研究方向为光数据存储与凝聚态物理.

E-mail:rongal@public.east.cn.net



陈强,男,1956年出生,德国明斯特大学获博士(后)学位.现为北京航空航天大学理学院副院长,应用物理系主任、教授,教育部高等学校工科物理课程教学指导委员会委员,《工科物理》编委会委员.主要研究方向为凝聚态与光信息物理.

评述文章扫描

- 1 Szilard as inventor; accelerators and more (Valentine L. Telegdi . Phys . Today , 2000 , No . 10)
- 2 Blue diode lasers(Noble M. Johnson ,Arto V. Nurmikko, Steven P. DenBaars . Phys . Today , 2000 , No .10)
- 3 Physics in Latin America comes of age(José Luis Morán López . Phys . Today ,2000 , No .10)
- 4 The tau neutrino has finally been seen(Bertram Schwarzschild . Phys . Today ,2000 , No .10)
- 5 Dendritic signals start out stronger when they have farther to go(Charles Day . Phys . Today , 2000 , No .10)
- 6 Grain boundary doping may improve high temperature superconducting wire(Richard Fitzgerald . Phys . Today ,2000 , No .10)
- 7 Antiproton research resumes at CERN(Barbara Goss Levi . Phys . Today ,2000 , No .10)
- 8 Liquid hydrogen turns superfluid(Peter McClintock . Phys . World ,2000 , No .10)
- 9 Standing out from the giants and colossi(Chia-Ling Chien . Phys . World ,2000 , No .10)
- 10 Frosty reception to new superconductor thaws (Jeffery Tallon . Phys . World ,2000 , No .10)
- 11 Sonic crystals worth shouting about(Eleftherios Economou . Phys . World ,2000 , No .10)
- 12 Light beats quantum mechanics(John Jeffers . Phys . World ,2000 , No .10)
- 13 Quintessence(Robert R Caldwell . Phys . World , 2000 , No .10)
- 14 The search for extra dimensions(Steven Abel , John March-Russell . Phys . World ,2000 , No .10)