

基于扫描探针显微镜(SPM)的高密度信息存储^{*}

姜桂元^{1,2} 元文芳¹ 温永强¹ 高鸿钧³ 宋延林^{1**}

(1. 中国科学院化学研究所有机固体重点实验室 北京 100080; 2. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室 北京 102249; 3. 中国科学院物理研究所纳米物理与器件实验室 北京 100080)

摘 要 随着信息技术的飞速发展,高密度信息存储的研究成为国际上备受关注的研究领域。扫描探针显微技术(SPM)通过改变材料的光、电、磁等局域特性可以实现纳米尺度的信息存储,成为提高信息存储密度的最有效手段之一。本文从信息存储材料和技术角度综述了基于 SPM 的高密度信息存储最近的研究进展,并讨论了其将来的研究与发展方向。

关键词 高密度信息存储 扫描探针显微镜 存储材料

中图分类号: TH742; TB34 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-281X(2007)06-1034-07

SPM- Based High Density Data Storage

Jiang Guiyuan^{1,2} Yuan Wenfang¹ Wen Yongqiang¹ Gao Hongjun³ Song Yanlin^{1**}

(1. Key Laboratory of Organic Solids, Institute of Chemistry & Center for Molecular Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, University of Petroleum Beijing 102249, China; 3. Nanoscale Physics & Devices Laboratory, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract With the rapid developments of information technology, high density data storage has become one of the most active research fields. By changing the local properties (optical, electrical and magnetic properties etc.) of the recording media using scanning probe microscope (SPM), including scanning tunnelling microscope (STM), atomic force microscope (AFM), scanning near-field optical microscopy (SNOM), etc., nanometer-scale data storage can be successfully achieved, and this technology has been considered as one of the best way to promote the storage density. In this paper, the latest progress on SPM-based high density data storage is reviewed from the viewpoints of recording materials and technologies. The future research and development of SPM-based high density data are also discussed.

Key words high density data storage; scanning probe microscope(SPM); recording materials

21 世纪是高度信息化的时代,随着对信息需求量的日益增长和光电子器件尺寸的日益缩小,高密度信息存储受到了越来越多的关注。为了提高信息存储的密度,研究者们提出了各种各样的存储技术^[1-6]。其中扫描探针显微镜技术(SPM),包括扫描隧道显微镜(STM)^[7-11]、原子力显微镜(AFM)^[12]以及扫描近场光学显微镜(SNOM)^[5]等,不仅可以进行原子级表面形貌观察,而且可以进行原子操纵和纳

米加工,对样品进行表面修饰,这一能力使其成为高密度信息存储研究中的有力工具^[13-15]。另一方面,存储介质是发展信息存储技术的核心和关键,每一种新型存储介质的出现,都会对信息技术的发展起到极大的推动作用。在探索新型存储技术的同时,存储材料的研究和发展也是日新月异^[16-18],基于这些材料薄膜的纳米尺度的信息存储也取得了重要进展^[19,20]。SPM 包含的技术很多,应用的领域也很广,

收稿: 2006 年 10 月,收修改稿: 2006 年 11 月

*国家自然科学基金项目(No. 50625312, 60601027, 20421101)和国家基础研究发展计划(973)项目(No. 2006CB806200)资助

**通讯联系人 e-mail: ylsong@iccas.ac.cn

在此我们仅对其在存储领域应用最多的 STM、AFM 以及 SNOM 的最新研究进展做一综述。

1 基于 STM 的高密度信息存储

早在 1989 年, IBM 公司^[11]就用 STM 在 Ni 表面上操纵排列了 35 个氩原子, 组成“IBM”三个字母, 其相应的存储密度已达到 10^{15} bits/in²。1993 年, Eilger 等^[21]进一步将吸附在 Cu (111) 表面上的 48 个铁原子围成一个 14.3 nm 的圆圈, 相邻两个铁原子间距为 1 nm。1996 年 Cuberes 等^[22]在铜表面移动 C₆₀ 分子, 构成了世界上最小的算盘^[22]。以上利用 STM 进行信息存储都是要求在极低的温度下进行, 难以满足实用要求, 随后的研究通常是在室温下进行的。北京大学的刘忠范研究小组^[10,11]提出了一种基于 STM 的热化学烧孔信息存储技术 (如图 1 所示), 利用高度局域化的隧道电流 (或场发射电流) 所产生的焦耳热使电荷转移复合物分解, 低沸点分解产物逸出, 在样品表面留下纳米级孔洞, 用来记录信息。热化学烧孔存储材料是含有低沸点组分的电荷转移复合物, 这种电荷转移复合物具有较低的分解温度。利用该技术, 他们在一系列电荷转移复合物实现了高密度的信息存储。

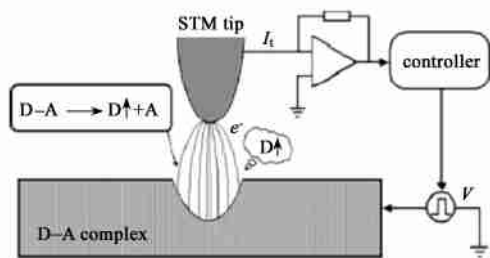


图 1 基于 STM 的热化学烧孔信息存储技术^[11]

Fig. 1 Schematic diagram of the STM-based thermochemical hole burning process^[11]

1994 年以来, 由中科院化学研究所、中科院物理研究所、北京大学等单位组成的研究团队一直致力于研究基于 STM 的全有机材料的超高密度信息存储。研究人员设计合成了一系列用于高密度信息存储的有机材料, 采用 STM 在其薄膜上进行纳米尺度乃至单分子水平的信息存储研究, 并对信息存储机制进行了研究^[8,9,18-20,23-36]。在此我们对其中基于电荷转移材料和超分子体系的高密度信息存储的最新研究进展进行回顾。

在利用 STM 实现高密度信息存储方面, 基于电荷转移的有机材料是目前应用最多的一类。最初,

用于信息存储的基于电荷转移的有机薄膜一般是由两种组分构成, 其中具有代表性的是金属/TCNQ 复合物^[38,39]和全有机复合物^[8,19]。在这些复合物中金属作为电子给体, 而有机分子作为电子受体, 或者电子给体和受体均由有机物组成。对于这种多组分的复合体系, 不同组分在薄膜中很难均匀分布。在多数情况下, 薄膜呈多晶或无定型态, 其质量难以控制, 并且存在较多的缺陷。缺陷的存在会对材料的性能造成很大的影响。相比较而言, 单一组分的有机晶态薄膜由于其组分和结构的均一性和分子排列的有序性, 可以呈现出比多晶或无定型态的薄膜更好的电学性质^[40,41]。为此, 设计了 NBPDA^[28], 其分子中存在电子给体和电子受体, 可以形成有序的薄膜, 并且在其薄膜上实现了超高密度信息存储。但在 NBPDA 体系中, $-\text{NH}_2$ 不够稳定。从材料的成膜性和稳定性出发, 我们进一步设计合成了有机分子 *N,N*-dimethyl-*N*-(3-nitrobenzylidene)-*p*-phenylenediamine (DMNBPDA)^[32,33], $-\text{NH}_2$ 被 $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ 取代, 由于 $-\text{CH}_3$ 的保护作用, DMNBPDA 要比 NBPDA 更稳定, 熔点也从 NBPDA 的 146 °C 提高到 172 °C。而且, DMNBPDA 中 $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ 是比 $-\text{NH}_2$ 更强的电子给体, 更容易发生电荷转移。控制成膜条件可得到单层生长的有序薄膜, 通过在 STM 针尖和 HOPG 衬底之间施加电压脉冲的方法在 DMNBPDA 薄膜上实现纳米尺寸信息点的写入, 信息点直径达 1.1 nm, 对应信息存储密度 $> 10^{13}$ bits/cm²。

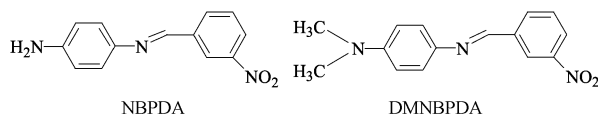


图 2 NBPDA 及 DMNBPDA 的分子结构式^[28,33]

Fig. 2 Molecular structures of NBPDA and NMNBPDA^[28,33]

电荷转移分为分子内及分子间电荷转移, 由分子间电荷转移形成的电学双稳态较分子内更稳定, 从而更有利于电信息存储。研究表明, 分子间电荷转移的效率在很大程度上依赖于分子结构及其在薄膜中的排列方式, 因而设计具有优异成膜性、稳定性及良好的电荷转移特性的有机分子是电信息存储的一个研究热点。我们的研究主要集中在如何得到更加有序的电荷转移有机物薄膜, 以期更加有效地通过外电场诱导电荷转移来实现电学双稳态。我们和瑞士苏黎世理工学院的 F. Diederich 教授合作设计了刚性分子 1,1,2-三氟基-2-[(4-二甲基-苯胺)乙炔]乙烯 (TDMEE) (图 3a) 分子, 该分子在气相沉

积过程中能保持取向,并通过分子中强的吸电子基团和供电子基团的极性作用而得到有序的晶态薄膜。在薄膜中,分子通过 π 堆积形成给体、受体反平行排列的结构(图 3b)。在薄膜上可以用 STM 针尖写入约 2.1 nm 的信息点。进一步实验和理论研究发现,信息点的产生来源于外压诱导的分子间电荷转移导致的导电性的改变,而薄膜中分子的有序反平行排列则有利于这种电荷转移^[35]。

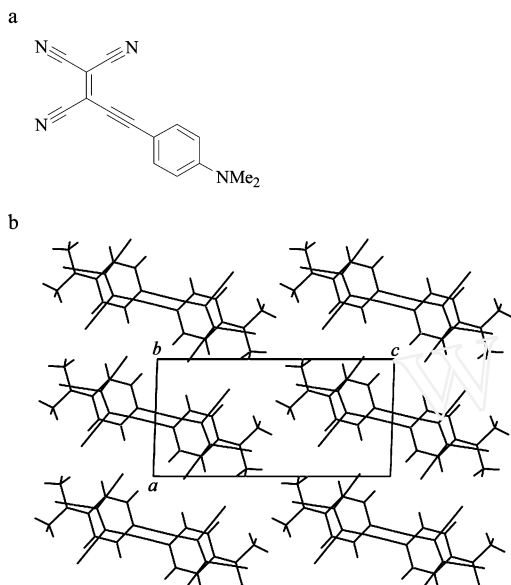


图 3 (a) TDME 分子结构; (b) TDME 分子在晶态薄膜中的排列方式,分子在晶体中呈现出规则的给体、受体交替排列,图中 a 、 b 、 c 表示的是晶轴^[35]

Fig. 3 (a) Chemical structure of TDME; (b) The packing arrangement of TDME molecules in the crystalline thin film, showing the regular alternate donor-acceptor stacks. a , b , and c are the crystal lattice parameters^[35]

从提高材料的成膜性和电学特性考虑,可以在电荷转移材料上进一步引入具有自组装特性的功能基团,为此设计了具有推拉电子基团的有机分子 4'-氰基-2,6-二甲基-4-羟基偶氮苯(CDHAB)。在 CDHAB 分子中,羟基和氰基共存,它们不仅作为电子给体和电子受体单元,同时这两个基团还可以形成分子间氢键。通过分子间氢键和 π - π 相互作用,我们成功地高定向裂解石墨(HOPG)表面自组装制备出分子规整排列的晶态薄膜;通过在 STM 针尖和 HOPG 衬底之间施加电压脉冲,在 CDHAB 薄膜上实现纳米尺寸信息点的写入,信息点的平均直径达 1.8 nm;该工作的突出之处还在于实现了纳米尺度信息点的写入-擦除和再写入(图 4b),为可擦写超高密度信息存储材料的设计提供了新的思路和途径^[37]。

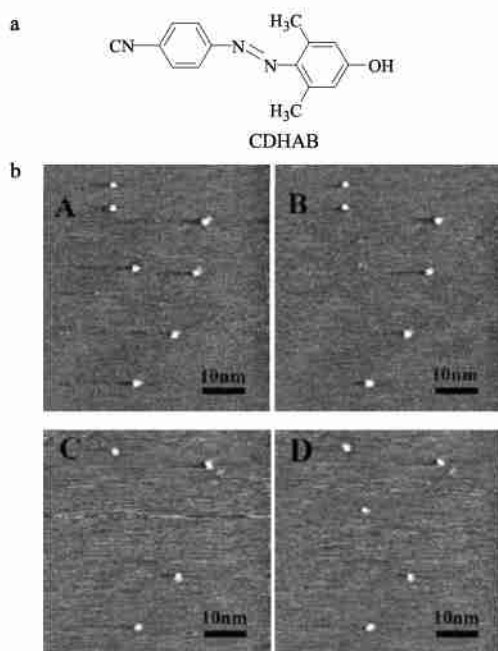


图 4 (A) 通过 STM 针尖在 CDHAB 薄膜表面施加电压脉冲形成由 6 个信息点组成的“y”字母信息点图案; (B) 和 (C) 施加反向脉冲电压擦除一个及两个信息点图案; (D) 重新写入一个信息点图案^[37]

Fig. 4 (A) “y” recorded pattern, voltage pulses (+ 2.6 V, 3.0 ms); (B) and (C) patterns after erasing one and two marks, respectively, voltage pluses(- 2.2 V, 3.0 ms); (D) pattern after rewriting one mark, voltage pulse (+ 2.6 V, 3.0 ms)^[37]

此外,超分子体系由于其良好的自组装特性、比有机小分子易于合成和加工等特点而在应用于信息存储介质方面受到了愈来愈多的关注^[42-46]。我们设计了可以通过分子间氢键和 π - π 相互作用自组装形成单晶薄膜的超分子体系 Taddol · Coumarin (TC, 图 5a), 并成功地在高定向裂解石墨(HOPG)的表面制备出分子规整排列的晶态薄膜;通过在 STM 针尖和 HOPG 衬底之间施加电压脉冲的方法,在 TC 薄膜上实现纳米尺寸信息点的写入,信息点的平均直径达 2.2 nm, 信息点间距可达 1.0 nm, 对应信息存储密度 $> 10^{13}$ bits/cm²;同时还用 FT-IR、DSC 以及 EDP (electron diffraction pattern) 等分析手段对信息点产生的机理进行了分析^[20]。最近,中科院物理所与化学所合作在超分子 rotaxane (图 5b) 薄膜中实现了超高密度信息存储^[36]。在 rotaxane 分子中,环的移动可造成可逆的分子开关,同时伴随着导电性的可逆变化。他们利用 STM 针尖在 rotaxane 分子薄膜上施加电压脉冲,在分子尺度上诱导了开关比为 100 的非常稳定的导电特性转变,并实现了纳米尺度信息点

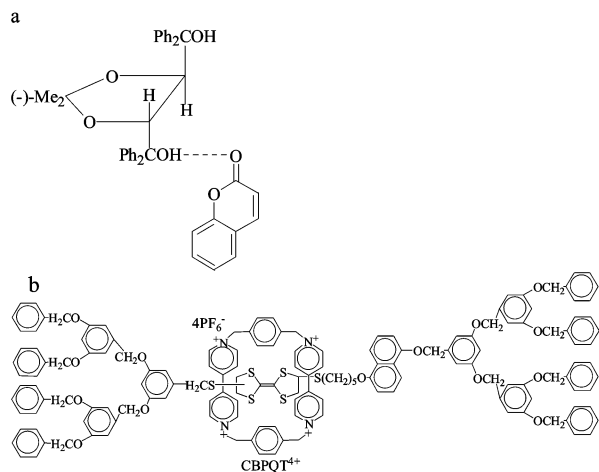


图 5 (a) TC 的化学结构式^[20]; (b) Rotaxane 的化学结构式^[36]

Fig. 5 (a) Chemical structure of TC^[20]; (b) Chemical structure of rotaxane^[36]

的重复记录。

2 基于原子力显微镜的高密度信息存储

2.1 基于导电原子力显微镜的高密度电信息存储

如前所述,利用 STM 能够在薄膜上施加电脉冲诱导局域导电性的变化来实现信息的写入与读出,但是目前依靠这种方法还不能稳定地进行大面积信息点的记录。主要的问题是 STM 获取图像的方式是依靠针尖与样品表面之间的隧道电流:一方面它要求介质必须导电并且针尖与样品之间的距离要由反馈系统精确控制;另一方面,由于针尖的表面电子态很敏感,容易被外加的电脉冲损坏,从而难以持续稳定地得到清晰的图像。从这些角度考虑,用 Conductive Contact Mode 的 AFM 模式来施加电脉冲和获得图像将更加容易。在 Conductive Contact Mode 的 AFM 模式中,针尖与样品表面接触扫描,利用针尖与样品之间的作用力来获得形貌像,利用接触电流获得电流像。这样一方面使图像的获得对针尖要求不苛刻,另一方面可以同时独立得到样品形貌和导电性的信息,更便于对信息点的形成机制进行研究。佳能公司^[17,47]的研究人员利用 Conductive Contact Mode 的 AFM 在聚酰亚胺 (PI) 薄膜上进行高密信息存储取得了一系列进展。他们在 PI 的 LB 膜上实现了大面积信息点的写入,并证明这些信息点来源于电压脉冲导致的局域导电性的改变,而薄膜的形貌未发生任何改变。

2.2 基于原子力显微镜探针热力效应的高密度信息存储

利用原子力显微镜探针的热力效应,也可以在薄膜上进行信息点写入。例如:Mamin 等^[48]通过 AFM 探针在聚合材料表面进行信息存储,用 300 ns 的激光脉冲在 PMMA 基片上写下了尺寸约 100 nm 的记录点。Bining^[2]研究发现记录点的尺寸与薄膜的导热性有关,导热性好的材料易转移热量,可以得到尺寸较小的记录点。他在原来的基础上进行了改进,仍利用 PMMA 作为存储介质,在存储介质与基底间插入热的良导体,以促进热量的散发,其存储密度达到 500 Gbit/in²。

2.3 基于多探针原子力显微镜的高密度信息存储

为了提高信息存储的密度,尤其是为了提高数据的存取速率,IBM 公司提出了一种基于多探针原子力显微镜的信息存储技术。该技术利用原子力针尖的热机械效应实现数据的写入与读取。如图 6 (a) 所示,它基于整个悬臂阵列在存储介质上的 x/y 方向上的平行扫描。此外 z 方向的垂直和水平运动的反馈控制使得整个悬臂阵列与存储介质接触。针尖与介质接触的同时,x/y 扫描用于读写。需要指出的是多探针模式不是基于单个悬臂的 z 反馈控制,而是对整个悬臂阵列实行一个反馈控制,这一点可大大简化操作体系。但这要求对针尖的高度和悬臂的抗度实行严格均一的控制。Lutwyche 等^[49]用 5 × 5 阵列片的并行成像演示了整块阵列片与存储介质的接触。图 6(b) 显示了一次写入存储区域数据读取后的图像^[50]:信息点的直径约 10 nm,点与点之间的距离约为 25 nm,对应存储密度为 1 Tb/in²。后来,该公司的研究人员又在 3 mm × 3 mm 内集成了世界最大的针尖阵列 (32 × 32 = 1 024),称为 Millipede 技术^[51]。这一系列技术的发展大大提高了信息的存取速率。

2.4 基于原子力显微镜的 dip-pen (DPN) 技术

Mirkin 小组^[52-54]发明了一种基于原子力显微镜的“dip-pen”纳米加工技术:AFM 针尖被当作笔,固态基底被当成纸,能与基底有化学作用力的分子作墨水,分子通过凝结在针尖与基底间的水滴的毛细作用直接书写到基底表面。这种直接的写入技术是一种高分辨图案化技术。很多分子和生物分子可以用作墨水,充当纸的基底可以是金属、半导体、以及功能化的单层膜等。为了获得稳定的纳米结构,用作墨水的分子最好能借助化学吸附和静电相互作用固定在基底上。该技术的特点是方法简单,只有一步,并且不需要任何抗蚀剂,使用一种常规的原子力显微镜,就能获得线宽是 10—15 nm、空间分辨率为 5

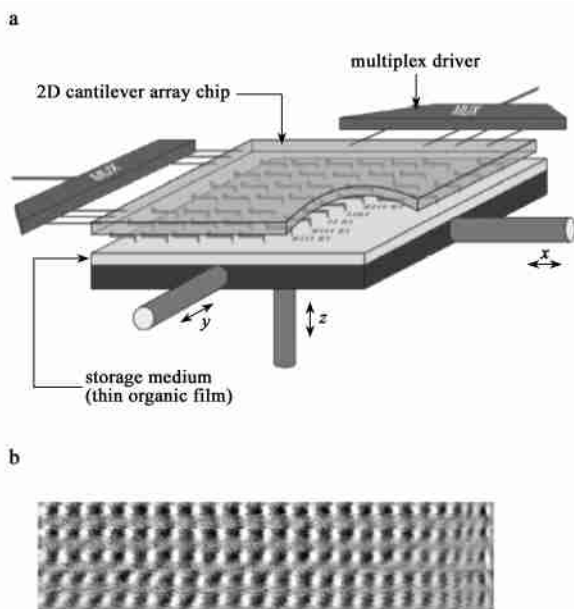


图 6 (a)多探针 AFM 二维微悬臂阵列示意图; (b) 利用 5×5 的阵列片写入的超高密度信息点, 存储密度达到 1 Tb/in^2 [51]

Fig. 6 (a) Illustration of the Millipede concept; (b) Ultra-high density bit writing with areal densities approaching 1 Tb/in^2 [51]

nm 的图案。此外该技术的一个最大优点是在同一个图案中可以使用多种墨水。

3 扫描近场光学显微镜

3.1 SNOM 存储技术

上世纪 80 年代,随着扫描探针显微技术的发展,出现了一种新型的光学成像仪器——扫描近场光学显微镜 (SNOM)。它以纳米尺度的光学探针代替了传统光学显微镜的镜头,在探测过程中将探针控制在样品表面一个波长以内的近场区域,突破了传统光学显微镜由于光的衍射效应产生的分辨率限制。同时,利用 SNOM 进行纳米尺度的光学信息存储被认为是未来一个有发展前景的超高密度信息存储的方法。在传统光存储中,由于记录密度会受到记录光的衍射极限和数值孔径的限制,其记录光斑大小一般都大于记录光的波长。然而在近场光存储中,当光源无限接近记录介质的表面时,光斑的大小就完全取决于光源的直径和光源与介质表面间的距离,突破衍射极限,所以其记录密度就不会受到光的衍射极限和数值孔径的限制,从而可以实现超高密度大容量信息存储 [55]。

早在上个世纪 90 年代,一些科研实验室便投入

相关的基础研究。1992 年, Betzig 等 [56] 使用波长为 515nm 的 Ar 激光,在 Co/Pt 多层膜上记录了约 60nm 的光斑区域,演示了用 SNOM 可以获得小于衍射极限光斑的高潜力。但是由于存储介质表面的粗糙,所以光学探针极易损坏,而且数据传输速率低,间隙控制复杂。1999 年, Vohnsen 等 [57] 阐述了近场光探针的特性,研究和比较了 4 种不同近场光探针 (3 种非涂层探针和一种 Al 涂层小孔探针) 的激发和收集的性质。

对于利用 SNOM 进行近场探针存储来说,一个需要克服的主要困难是如何通过探针传递足够的能量到存储介质上,从而引起介质发生可以检测的变化。为此,人们进行了大量的研究来实现近场探针存储中光输出量的增加和分辨率的提高。1999 年 Myung 等 [58] 提出了一种硅平面孔探针阵列,他们用光刻蚀和硅晶片的湿浸蚀方法,制造了孔径为 100nm 的探针阵列。通过在每一个孔上安装玻璃半球显微透镜,使探针阵列的光传输效率提高了 16 倍。近年来,利用输入光和表面等离子相耦合的局域场增强效应 [59, 60] 来提高光传输效率也引起了一定的关注。

另一个需要注意的问题是数据传输速度。就目前来讲,利用 SNOM 进行近场存储的数据记录速度仍然在 $\mu\text{m/s}$, 远远低于市场化的 DVD 光盘的记录速度 3.5 m/s [61]。构建探针阵列是一个有效的解决方法。Kurihara [62]、Minh [63] 和 Kim [64] 等分别提出了一种混合结构,该结构包括垂直凹表面激光发射器 (VCSEL) 和由孔阵列组成的光学近场存储头 (VCSEL/SNOM)。图 7 所显示的就是这种结构。

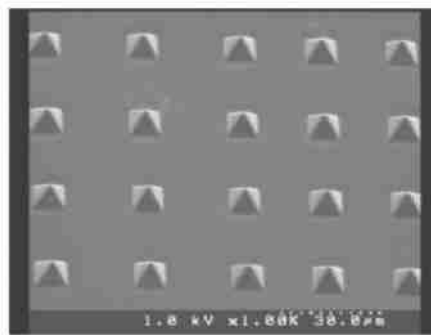


图 7 探针阵列的扫描电镜图 [63]

Fig. 7 SEM image of aperture array [63]

3.2 SNOM 存储材料

3.2.1 热致模式

利用磁光效应或相变材料作为光记录介质已被

广泛研究。这些介质是基于热模式的光学记录方法。在磁光记录中,在外界施加反向磁场的情况下,通过汇聚激光束的加热作用,就会在非晶型稀土过渡金属膜上的垂直磁化区域写入信息。相变光学记录是基于利用汇聚激光束在晶体薄膜上形成微小的非晶型光斑,利用非晶相和晶相在光学性质上的差别读出数据。

Betzig 等^[56]在玻璃基片上重复蒸镀 10 次 0.4nm 的 Co 和 1nm 的 Pt 的多层 Co/Pt 薄膜,采用光纤探针技术在这种磁光材料多层膜上实现了点阵为 ~60nm 的近场光存储,数据存储密度达到了约 45 Gbits/in²。Hosaka 等^[65]演示了利用相变材料进行的纳米尺度的光学信息存储。他们以 785nm 的半导体激光器为光源,检测反射光为读出方法, ZnS · SiO₂ (20 nm) / GeSbTe (30 nm) / ZnS · SiO₂ (150 nm) / 聚碳酸酯为存储介质,实现了最小存储点阵为 60nm 的高密度信息存储。

利用热致模式的材料进行存储必然要求高的激光强度,进而会导致慢的数据传输速度。同时存储点阵之间的热传输也必将导致实际可得存储密度的减小。同时,在热致模式记录过程中,光的特征性质,如频率、相和偏振不能被有效地利用。

3.2.2 光致模式

理论上,利用光致变色材料的基于全光模式的光学存储可以克服上述缺点,并且在分辨率、写入速度和复合记录能力方面也都要优于热致模式记录。到目前为止,二芳基乙烯和偶氮聚合物等^[66,67]光致变色材料已经在近场探针存储领域得到应用。

2003 年 Kim 等^[66]演示了在一种二芳基乙烯光致变色膜上的可重写近场光存储。他们用 514nm 的光作为写入和读出光。在 5mW 的输入光下,写入速率可以达到 30ms。Castellano 和 Redmond 等^[68,69]设计了一种高荧光对比的超分子体系,将该体系分散到 PMMA 形成薄膜,采用近场技术在化合物薄膜上实现了高信噪比 (25 : 1) 的一次写入、多次读出的光信息存储。

另外, Tsujioka 等^[70-72]对近场光致变色存储的数据传输速率、记录密度极限和用荧光读出的信噪比 (SNR) 做了理论上的研究。他们认为在低写入功率或宽带宽条件下,通过亮斑记录 (BSR) 获得的 SNR 高于黑斑记录 (DSR) 获得的 SNR。由此可见,对于荧光读出的高密度近场光致变色存储来说,BSR 是较好的方法。

4 结束语

综上所述,基于 SPM 的高密度信息存储在存储技术和材料研究方面都取得了很大的进展。SPM 技术通过改变材料光、电、磁等局域特性,可以获得更高的存储密度和真正的纳米尺度存储,是高密度信息存储的重要发展方向。但此技术的存储速度还不够快,这个问题还有待于进一步解决。在存储材料方面,研究开发新型信息存储材料并探索相应的存储机理是目前高密度信息存储的研究热点。有机材料因价格低廉、结构简单和设计灵活,在调控结构和光电性能方面有其独特性等特点,被认为是适用于纳米尺度和单分子水平高密度信息存储的优异材料,并且已经获得了很多重要的进展。在此基础上,研究扫描探针显微镜的耦合技术 (如 STM/SNOM 耦合和 AFM/SNOM 耦合等) 并开发与之相对应的多模式响应性存储介质体系是今后信息存储研究的新领域。相信随着多模式及多功能信息存储的发展,SPM 在信息存储领域将会发挥越来越大的作用。

参考文献

- [1] Eigler D M, Schweizer E K. Nature, 1990, 344(6266) : 524 — 526
- [2] Binnig G, Despont M, Drechsler U, et al. Appl. Phys. Lett., 1999, 74(9) : 1329 — 1331
- [3] Lutwyche M I, Despont M, Drechsler U, et al. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(20) : 3299 — 3301
- [4] Cumpston B H, Ananthavel S P, Barlow S, et al. Nature, 1999, 398(6722) : 51 — 54
- [5] Hosaka S, Shintani T, Miyamoto M, et al. J. Appl. Phys., 1996, 79(10) : 8082 — 8086
- [6] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Science, 1996, 272(5258) : 85 — 87
- [7] Sato A, Tsukamoto Y. Nature, 1993, 363(6428) : 431 — 432
- [8] Ma L P, Song Y L, Gao H J, et al. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(24) : 3752 — 3753
- [9] Shi D X, Song Y L, Zhu D B, et al. Adv. Mater., 2001, 13(14) : 1103 — 1105
- [10] Yu X C, Zhang R, Peng H L, et al. J. Phys. Chem. B, 2004, 108(39) : 14800 — 14803
- [11] Peng H L, Ran C B, Yu X C, et al. Adv. Mater., 2005, 17(4) : 459 — 464
- [12] Cavallini M, Biscarini F, Leó S, et al. Science, 2003, 299(5606) : 531 — 531
- [13] Binnig G, Rohrer H. Helv. Phys. Acta., 1982, 55(6) : 726 — 735
- [14] Binnig G, Quate C F. Phys. Rev. Lett., 1986, 56(9) : 930 — 933
- [15] Heinzelmann H, Pohl D W. Appl. Phys. A, 1994, 59(2) : 89 — 101

- [16] Kado H, Tohda T. Appl. Phys. Lett., 1995, 66(22) : 2961 — 2962
- [17] Yano K, Kyogaku M, Kuroda R, et al. Appl. Phys. Lett., 1996, 68(2) : 188 —190
- [18] Li J C, Xue Z Q, Wang K Z, et al. J. Phys. Chem. B, 2004, 108(50) : 19348 —19353
- [19] Gao H J, Sohlberg K, Xue Z Q, et al. Phys. Rev. Lett., 2000, 84(8) : 1780 —1783
- [20] Wen Y Q, Song Y L, Jiang G Y, et al. Adv. Mater., 2004, 16(22) : 2018 —2021
- [21] Commie M F, Hutz C P, Eigler D M. Surf. Rev. Lett., 1995, 2(1) : 127 —137
- [22] Cubers M T, Gmzewshi J K, Schlittler R R. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(11) : 3016 —3018
- [23] Li J C, Xue Z Q, Li X L, et al. Appl. Phys. Lett., 2000, 76(18) : 2532 —2534
- [24] Gao H J, Canright G S, Pang S J, et al. Fractals, 1998, 6(4) : 337 —350
- [25] Shi D X, Ba D C, Pang S J, et al. Appl. Sur. Sci., 2001, 182(1/2) : 64 —68
- [26] Ma L P, Yang W J, Xie S S, et al. Appl. Phys. Lett., 1998, 73(22) : 3303 —3305
- [27] Gao H J, Ma L P, Zhang H X, et al. J. Vac. Sci. Technol. B, 1997, 15(4) : 1581 —1583
- [28] Ma L P, Yang W J, Xue Z Q, et al. Appl. Phys. Lett., 1998, 73(6) : 850 —852
- [29] Gao H J, Wang D W, Wang Z Q. J. Vac. Sci. Technol. B, 1996, 14(2) : 1349 —1352
- [30] Shi D X, Song Y L, Zhang H X, et al. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(20) : 3203 —3205
- [31] Shi D X, Ma L P, Xie S S, et al. J. Vac. Sci. Technol. B, 2000, 18(3) : 1187 —1189
- [32] Wu H M, Song Y L, Zhao T, et al. Nanotechnology, 2002, 13(6) : 733 —735
- [33] Wu H M, Song Y L, Du S X, et al. Adv. Mater., 2003, 15(22) : 1925 —1929
- [34] Jiang G, Song Y, Wen Y, et al. Chem. Phys. Chem., 2005, 6(8) : 1478 —1482
- [35] Jiang G Y, Michinobu T, Yuan W F, et al. Adv. Mater., 2005, 17(18) : 2170 —2173
- [36] Feng M, Guo X F, Lin X, et al. J. Am. Chem. Soc., 2005, 127(44) : 15338 —15339
- [37] Wen Y Q, Wang J X, Hu J P, et al. Adv. Mater., 2006, 18(15) : 1983 —1987
- [38] Potember R S, Hoffman R C, Poehler T O. APL Tech. Dig., 1986, 7(2) : 129 —141
- [39] Gong J, Osada Y. Appl. Phys. Lett., 1992, 61(23) : 2787 —2789
- [40] Schoonveld W A, Vrijmoeth J, Klapwijk T M. Appl. Phys. Lett., 1998, 73(26) : 3884 —3886
- [41] Moon H, Zeis R, Borkent E J, et al. J. Am. Chem. Soc., 2004, 126(47) : 15322 —15323
- [42] Dediraju G R. Nature, 2001, 412(6845) : 397 —400
- [43] Percec V, Glodde M, Bera T K, et al. Nature, 2002, 419(6905) : 384 —387
- [44] Ikkala O, Brinketen G. Science, 2002, 295(5564) : 2407 —2409
- [45] Yashima E, Maeda K, Okamoto Y. Nature, 1999, 399(6735) : 449 —451
- [46] Zhang Y, Tan C H, Liu Q S, et al. Appl. Surf. Sci., 2003, 220(1/4) : 224 —230
- [47] Yano K, Ikeda T. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(6) : 1067 —1069
- [48] Mamin H J, Rugar D. Appl. Phys. Lett., 1992, 61(8) : 1003 —1005
- [49] Lutwyche M, Andreoli C, Binnig G, et al. Sens. Actuators A, 1999, 73(1/2) : 89 —94
- [50] Eleftheriou E, Antonakopoulos T, Binnig G K, et al. IEEE Trans. Magn., 2003, 39(2) : 938 —945
- [51] Vettiger P, Cross G, Despont M, et al. IEEE Trans. Nanotechnol., 2002, 1(1) : 39 —55
- [52] Piner R D, Zhu J, Xu F, et al. Science, 1999, 283(29) : 661 —663
- [53] Piner R D, Mirkin C A. Langmuir, 1997, 13(26) : 6864 —6868
- [54] Hong S, Zhu J, Mirkin C A. Langmuir, 1999, 15(23) : 7897 —7900
- [55] 张智(Zhang Z), 刘学东(Liu X D), 赵福群(Zhao F Q)等. 化学通报(Chemistry), 2006, 69(3) : 1 —9
- [56] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R, et al. Appl. Phys. Lett., 1992, 61(2) : 142 —144
- [57] Vohnsen B, Bozhevolnyi S I. Appl. Opt., 1999, 38(9) : 1792 —1797
- [58] Lee M B, Kourogi M, Yatsui T, et al. Appl. Opt., 1999, 38(16) : 3566 —3571
- [59] Zayats A V. Opt. Commun., 1999, 161(1/3) : 156 —162
- [60] Dechant A, Dew S K, Irvine S E, et al. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(1) : art. no. 0131021
- [61] Chu T C, Liu W C, Tsai D P. Opt. Commun., 2005, 246(4/6) : 561 —567
- [62] Kurihara K, Kim Y J, Goto K. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 41(4A) : 2034 —2039
- [63] Minh P N, Ono T, Tanaka S, et al. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 95(2/3) : 168 —174
- [64] Kim Y J, Suzuki K, Goto K. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40(3B) : 1783 —1789
- [65] Hosaka S, Shintani T, Miyamoto M, et al. Jpn. J. Appl. Phys., 1996, 35(1B) : 443 —447
- [66] Lee H W, Kim Y M, Jeon D J, et al. Opt. Mater., 2003, 21(1/3) : 289 —293
- [67] Patan  S, Arena A, Allegrini M, et al. Opt. Commun., 2002, 210(1/2) : 37 —41
- [68] Tyson D S, Bignozzi C A, Castellano F N. J. Am. Chem. Soc., 2002, 124(17) : 4562 —4563
- [69] Ferri V, Scoconi M, Bignozzi C A, et al. Nano Lett., 2004, 4(5) : 835 —839
- [70] Tsujioda T, Irie M. Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, 1999, 38(7A) : 4100 —4104
- [71] Tsujioda T, Irie M. J. Opt. Soc. Am. B, 1998, 15(3) : 1140 —1146
- [72] Tsujioda T, Irie M. Appl. Opt., 1999, 38(23) : 5066 —5072