

超高密度信息存储材料及技术研究进展*

吴惠萌¹ 宋延林^{1**} 赵彤¹ 江雷¹ 高鸿钧²

1. 中国科学院化学研究所有机固体重点实验室, 北京 100080; 2. 中国科学院物理研究所真空物理开放实验室, 北京 100080

摘要 信息技术的飞速发展, 要求不断开发出具有更高信息存储密度及更快响应速度的材料和器件, 因而在纳米尺寸上实现信息存储功能的新型超高密度信息存储材料已成为当前信息领域一个发展速度快、学科交叉多、竞争十分激烈的研究热点. 简要介绍了近年来该领域主要的研究方法, 并着重对利用扫描隧道显微镜/原子力显微镜(STM/AFM)写入信息的存储材料的最新研究进展进行了综述.

关键词 超高密度信息存储 纳米电子学 扫描探针显微镜

随着信息技术的全球化、多媒体化, 人类要处理的信息量与日俱增, 要求不断开发出具有更高信息存储密度及更快响应速度的材料和器件. 如何提高读写速度, 实现纳米尺度信息存储是要解决的关键问题之一. 为适应信息科技的发展, 美国国防高级研究计划署(DARPA)提出超电子学(ultra electronics)研究计划^[1], 它要求比现有电子系统速度快10~100倍, 存储密度高5~100倍, 而功耗小于现有系统的1/50; 最后则达到“双十二”的要求, 即贮量为 10^{12} 位, 运算速度为每秒 10^{12} 次, 且功耗小而廉价. 所谓超高密度信息存储, 即指信息存储密度 $>10^{12}$ bit/cm²(对应信息点的直径在10 nm以下), 与目前市售一般存储密度 10^6 bit/cm²的器件相比, 其信息存储能力是惊人的. 美国前总统 Clinton 在关于纳米科技的报告中, 以“美国国会图书馆的所有信息都可存储在一块方糖大小的芯片中”, 对超高密度信息存储作了形象描述. 超高密度信息存储材料和器件作为纳米电子学的重要内容之一, 将为未来信息技术的发展奠定理论和技术基础. 实现超高密度信息存储必须超越目前光、磁存储发展的极限^[1,2], 因此在存储方法、材料设计等方面必须开创新的思路. 本文着重从存储技术研究方法和材料两个方面对这一领域的最新进展进行综述.

1 提高信息存储密度的方法

实现信息存储的关键是要具有“0, 1”两种可以区分的稳定状态, 即在外场(光、电、磁等)的作用下, 能够从一种状态变化成另一种状态, 并且这两种状态能够对应不同的光、电、磁特性或者其他方面的响应. 目前, 除利用光、磁存储外, 利用扫描探针显微镜技术实现信息存储也成为重要的研究领域, 下面对这3个方面近年来提高信息存储密度的努力和进展作一简要介绍.

1.1 光存储

光学存储主要是基于光子与材料表面直接作用(进行数据存储), 发生光热、光折变、光致变色、光诱导化学反应等各种光致物理化学效应, 使得材料在记录前后的物理特性发生改变, 从而达到信息存储的目的. 存储密度依赖于信息点的尺寸, 而信息点的尺寸可以通过利用更短波长的光源或更大的数值孔径(numerical aperture, NA)来实现. 当前商品化光盘所用的激光器波长为780和650 nm, 而半导体GaN激光器的波长短至350~450 nm, 利用这种激光器, 光盘的容量将达到10 Gbit^[3]. 但是光波长并不能一味减小, 因此必须寻找新的方法, 目前在光存储方面主要从以下几方面来提高信息存储密度.

2002-05-13 收稿, 2002-06-24 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 59883001, 50173028)

** 联系人: E-mail: ylsong@kj.icas.ac.cn

(1) 双光束吸收存储: 这是光信息存储领域的研究热点, 其原理为^[4]: 双光束以 90° 相交移动照射记录材料, 通过双光子吸收激光而改变记录材料的物理化学性质, 使得受激发态和非受激发态的光学性质不同, 分别代表“0”和“1”两种状态, 从而实现信息的存储, 这是一种新的三维光信息存储理论. 研究发现^[5,6], 具有D- π -D, D- π -A- π -D, A- π -D- π -A(D是电子给体, A是受体)结构的有机分子具有较大双光子吸收截面 σ , 可以作为光记录介质, 并且 σ 随着共轭长度和给体、受体强度的增加而增大. 目前, 它的存储密度已达到TB/cm³的数量级, 传输速度达到100 Gbit/s, 可以做成多层薄膜. 但是应用还有一定的困难, 其缺点主要为工作温度低、存储寿命短、反复读写的抗疲劳性差.

(2) 全息存储技术^[7]: 它是指携带信息源的光和参考光相干叠加所形成的干涉图, 使整组数据一次记录到某处. 这种方法具有高保真度, 可以并行输入/输出, 并且数据传输速率大于125 Mbit/s, 可获得1 Tbit/cm³的高密度存储. 但是要使它变成有效的技术, 介质必须具有很高的数据保存率而且没有缺陷, 同时全息存储的结构复杂, 价格昂贵, 这些都在一定程度上限制了它的应用.

(3) 近场光学: 虽然以上技术和方法各有特点, 但是光的衍射效应从根本上限制了存储密度的提高, 难以达到100 nm以下的信息点径. 近场光学扫描显微镜(SNOM)的发明突破了这一极限, 从而成为信息存储的一个重要的研究领域. 近场光学方法是指: 当光通过一个尺度远小于其波长的小孔, 同时控制它与样品间距在近场($\ll \lambda$)时, 成像的分辨率可以突破衍射极限的限制. 由于它可以提供一个纳米尺度的光源, 因而, 已被应用于各种纳米光学加工和高密度信息存储. 早在1992年, Betzig等^[8]就在多层Co/Pt薄膜上实现了可重复读写的、尺寸60 nm左右的信息点, 存储密度达到45 Gbit/in².¹⁾ Sumio等^[9]在785 nm波长的激光二极管作用下, 利用SNOM, 通过反射光在GeSbTe薄膜上得到相变尺寸只有60 nm的记录点, 并且其读取记录速度比通常的磁学-光学记录快2~3个数量级. 目前, 利用近场光学可以得到的最高存储密度的是Martin^[10,11]所提出的扫描干涉无光阑显微镜(scanning interferometric apertureless microscope, SIAM). 实验证实利用这种方法, 当信息点尺寸达到50 nm时,

仍能得到较高的信噪比(SNR), 其相应的存储密度可以达到256 Gbit/in².

1.2 磁存储

由于巨磁阻(giant magneto-resistive, GMR)读出磁头、硬盘最大相似性(partial-response maximum likelihood, PRML)信道的应用, 以及磁粒尺寸和磁介质薄膜厚度的减小, 从1991年起, 磁盘存储密度每年以60%~100%的速度递增. 2000年4月, Read-Rite公司开发出一种新型的磁性材料, 其存储密度达到50 Gbit/in², 与此同时Fujitsu公司宣称实现了56 Gbit/in²的磁存储; 不久以后, 2000年10月, Read-Rite公司又将存储密度提高到63 Gbit/in². 由此可见, 100 Gbit/in²将在不久的将来实现. 但是当磁粒尺寸减小到一定程度时, 磁化的热稳定性下降, 发生超顺磁化(super-paramagnetic effect), 使磁化转变变得容易, 这将导致存储数据的丢失. 为了解决这一难题, 科学家从多方面对材料和技术进行了研究, 这里主要从存储介质的角度对磁存储进行评述.

(1) 颗粒介质(advanced granular media): 要获得超高密度信息存储, 满足一定的信噪比和热稳定性的要求, 需获得具有高各相异性和矫顽磁力的微粒, 因此选择含有尺寸小、矫顽磁力大、各向异性的磁性颗粒将有助于提高介质的存储密度. 例如: hcp-CoCrPt: SiO₂^[12], hcp-CoCrPt: C^[13]等颗粒薄膜介质.

(2) 垂直记录介质(perpendicular recording media, PRM): 20年前日本的Iwasaki^[14]首先提出了垂直磁记录技术, 它的特点是磁化垂直于表面, 而不是像传统的纵向介质那样平行于表面(如图1), 它彻底消除了磁记录方式随记录波长的缩短和膜厚的减薄而产生的退磁场增大效应, 使得信息具有更高的线性密度和热稳定性.

(3) 图案化介质(patterned media, PM)^[15, 16]: 它由多个独立的图案化磁元件排列而成, 每个元件可以存储1 bit, 磁化的方向代表二进制的“0, 1”状态. 一般是将磁性的颗粒(如: Ni)排列在非磁性的材料(如: SiO₂)表面上, 形成周期性排列的量子棒阵列, 这种方法又称为量子磁存储介质(quantised magnetic media). 理想状态下, 存储密度等于表面磁元件的密度. 在图案化介质中, 每个磁元件彼此

1) 1 in = 25.4 mm

隔离,但是磁元件内部的多晶颗粒间相互强烈耦合,形成一个大的磁粒,因而PM中单个比特体积和转变能量都要比单个磁颗粒大得多.由于超顺磁性限制是对于单个比特,而不是对每个颗粒,所以在PM中每个比特的尺寸可以小到几个纳米,存储

密度可以达到 10^3 Gbit/in². 这种方法的关键是设法降低生产成本,为此很多科学家进行了研究,如:IBM^[17]通过化学方法自组装成单分散性的FePt纳米磁粒,Zhang^[18]将非复合物Sm₂Co₁₇-Cu通过低能量共研磨的方法制备SmCo微粒.

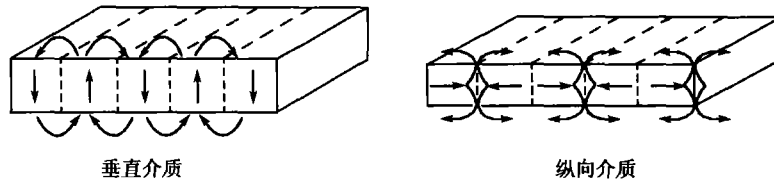


图1 垂直记录与传统的纵向记录比较

(4) 反铁磁性耦合介质 (antiferro-magnetically coupled media, AFC 或 laminated antiferro-magnetically coupled media, LAC 或 synthetic ferromagnetic media, SFM)^[19, 20]: 传统的磁盘存储只有一层复杂的磁性合金(如:CoPtCrB), AFC 介质至少有两层,其间插入一层 0.6 ~ 0.8 nm 的反磁性 Ru 层, 这层 Ru 薄膜的作用是在两铁磁性的层间提供了一个反铁磁性耦合层,以提高存储介质的信噪比值和热稳定性,从而可以进一步减小磁粒的尺寸,提高信息存储密度.

态)变为低阻抗(“1”态),一般不引起样品表面形貌的变化.根据薄膜组分的不同,这种变化可以由不同的机理造成,大致上可分为:晶体结构或分子结构的改变和电荷转移.目前,利用STM写入的信息点最小尺寸已达到 0.6 nm,具体的例子将在下面存储材料的发展中列举.

1.3 扫描探针显微镜在信息存储中的应用

扫描探针显微镜 (scanning probe microscope, SPM) 自发明以来,就受到人们的广泛关注,它主要包括:隧道扫描显微镜 (scanning tunnel microscope, STM)、原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM)、磁力显微镜 (MFM)、近场扫描显微镜 (SNOM) 等.由于它是实现纳米尺寸加工检测的一种有效手段,近年来备受人们的关注.在本文前面的光磁存储两节中已涉及 SNOM, MEM 的应用,这里着重评述 STM 和 AFM 在信息存储中的应用.

AFM: 利用探针的热力效应,在薄膜上进行信息点写入.例如:Mamin等^[22]通过AFM探针在聚合物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^[23]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.

STM: 早在1989年,IBM公司^[21]就用STM在Ni表面上操纵排列35个氩原子,组成“IBM”三个字母,其相应的存储密度已达到 10^6 Gbit/in²,相当于现在已商品化的最大磁盘存储密度的5000000倍.但是它要求在接近0 K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,利用STM检测针尖与样品间的隧道电流来实现存储.当在STM探针和高定向裂解石墨(HOPG)或云母基底间施加一系列脉冲电压时,作为存储材料的薄膜局域电学特性发生变化,表现为从高阻抗(“0”

表1 已报道各种存储方法的最大存储密度

存储方法		最大区域存储密度/(Gbit·cm ⁻²)
光存储	缩短光波长	~6
	三维光存储	>1000 Gbit/cm ³
	全息存储	>1000 Gbit/cm ³ , >25
	近场光学	15.5 ~ 40
磁存储	PM	>15.5
	AFC	>15.5
探针存储	STM	155000
	AFM	77.5

表1总结了以上所提到的各种技术方法,及它们所能达到的最大信息存储密度.可以看出,利用STM/AFM进行信息写入的密度远远高于其他方法,有望在纳米尺度上存储信息,实现超高密度信

息存储, 具有巨大发展潜力. 20世纪90年代以来, 各国科学家以 STM/AFM 为研究手段, 对不同材料实现超高密度信息存储进行了大量研究和探索.

2 利用 SPM 进行信息存储材料的开发

2.1 无机材料

早期利用 SPM 进行信息存储的代表性材料为无机材料. 1993年 Sato 等^[24]用 STM 在钒酸盐材料上研究了可擦写超高密度信息存储. 首先通过快速淬火制备玻璃态的钒酸盐, 并在 573 K 的温度下处理 1 h, 可部分得到 β - $\text{Na}_{0.33}\text{V}_2\text{O}_5$ 晶体. 选取 β - $\text{Na}_{0.33}\text{V}_2\text{O}_5$ 晶体 bc 晶面上约 10 nm 的无定形钒酸盐薄层作为存储介质层. 分别施加 +4 V, 10, 5, 2 和 1 ms 的脉冲电压, 得到记录点, 最小的记录点尺寸约 10 nm. 再用 -5 V, 10 ms 的脉冲电压擦除了 +4 V, 5 ms 脉冲电压所写入的记录点. 其开关机理是脉冲电压使针尖处介质薄层发生了从无定形态到晶态的相变, 从而使该处的导电特性发生变化; 而当施加反相电压时, Na^+ 迁移恢复原来的电性质.

1995年 Kado 等^[25]用 AFM 在无定形 GeSb_2Te_4 薄膜上进行信息记录. 先在 Si 基底上溅射沉积 300 nm 的 Pt 膜作底电极, 再溅射 200 nm 的 GeSb_2Te_4 薄膜作为存储介质, AFM 工作方式是大气下恒斥力模式. 在 Si_3N_4 针尖上先沉积 15 nm 的 Cr, 再沉积 100 nm 的 Au, 使之导电. 利用 +3 V, 5 ms 的脉冲电压, 得到 10 nm 的信息记录点.

采用无机材料作为存储介质会受到无机材料的结晶性的影响, 由于晶体中各个离子间的相互作用, 使其不具有方向性和饱和性, 因此各相变区域(即信息点)的大小难以控制, 很难实现 10 nm 以下尺寸的超高密度信息存储.

2.2 有机材料

与无机材料相比, 有机材料来源广泛, 具有可根据需要进行分子合成设计, 从分子水平上“组装”出具有特定功能的分子电子器件, 便于成型加工等优点, 因此, 人们越来越重视有机材料在信息技术领域中的应用.

最早用于信息存储的有机材料是有机金属复合材料. 1973年, Coleman^[26]和 Ferraris^[27]同时报道了具有金属导电性的有机电荷转移复合物——四硫代富瓦烯-四氰基对二次甲基苯醌(TTF-TCNQ)的合成, 从此基于电荷转移的有机导体引起了人们的关注. 后来人们将金属M(M=Ag, Cu等)-TCNQ^[28,29]复合盐

作为信息存储材料, 进行信息存储; 并对这类材料薄膜器件的双稳态作用机理进行了深入的研究. 这种复合物中有机分子作为电子受体, 金属作为电子给体, 通过电荷转移来实现电学双稳态的转变. 在电场诱导下, 膜由高阻“0”态向低阻“1”态突跃, 同时伴随着变色效应; 除去外场后, “1”态仍稳定存在, 逆反应过程可以通过加热实现, 从而实现可擦写的反复信息存储.

Yang 等^[30]将薄层金属插入导电有机分子中, 形成有机物-金属-有机物的三明治结构, 进行信息存储. 在一对电极间插入这种结构的材料, 两电极间施加 3 V 电压后, 材料从高阻变为低阻, 然后用 1 V 的电压读取信息, 再用 -0.5 V 擦去信息. 开始他们使用铝膜, 但是铝的活性较高, 影响使用寿命, 后来改用活性较小的金属如: 银、铜、金代替铝, 发现其工作机理类似于铝片, 金的效果尤佳. 这里金属的作用是在外场下进一步诱导有机化合物极化, 或是电荷转移, 使得材料从高阻向低阻的跃迁更为迅速.

但是这种金属掺杂的电荷转移有机复合材料也具有自身的局限性. 由于金属很难以单个原子的形式均匀分散在有机介质中, 且由于金属键作用, 使得金属原子容易相互团聚而使局部间的导电性差异较大, 因此复合薄膜质量难以控制, 表现为记录点的尺寸不均一, 且进一步减小记录点尺寸也将十分困难.

与传统的金属-有机复合物薄膜相比, 全有机分子薄膜体系的物理化学性能很可能取决于有机分子本身结构特点而不是取决于后续工艺(如金属掺杂量、金属和有机材料分相与分散状况等). 对这类材料的研究可揭示材料结构与性能的内在联系, 且更易于与各种化学分析手段相结合, 进行功能和机理的研究.

1996年, 由中国科学院化学研究所、物理研究所、北京大学的科研人员组成的研究小组从分子设计出发, 制备出全有机的 NBMN/DAB 复合薄膜, 首次成功地写入尺寸为 1.3 nm 的记录点, 比同期国外最好的结果(10 nm)要小近一个数量级^[31], 该结果被评选为 1997 年中国十大科技进展之一. 2000年, 美国橡树岭国家重点实验室对同一体系材料进行了进一步的研究, 获得了引人注目的结果^[32], Science News 对此也作了专题报道. 该材料的设计思想为: m-NBMN 分子中含有强吸电子基 $-\text{C}\equiv\text{N}$ 和 $-\text{NO}_2$, 通过共轭双键和苯环相连, 是具有 p - π

共轭体系的电子受体；p-DAB分子中有强给电子基团—NH₂，是电子给体。—NH₂与—C≡N间可以

发生电子转移，在外电场的作用下，这种电荷转移增强，呈现电学双稳态。

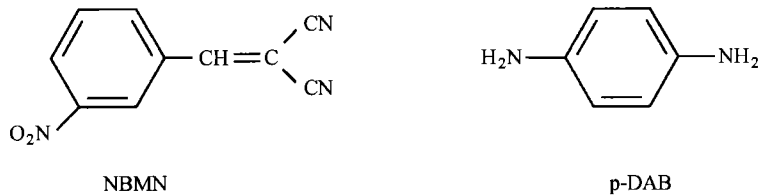


图2 NBMN和p-DAB的分子结构式

作为信息存储的介质一般要求具有足够大的规整表面，而复合体系的有机薄膜不易满足这一要求。这是因为不同组分在有机复合膜中很难均匀分布，所以制备的有机复合薄膜中往往会存在缺陷，从而不易得到大面积的晶态薄膜。缺陷的存在也对材料的性能造成很大的影响。因此如能设计一个结构对称，兼具电子给体和受体官能团的平面有机分子，即可解决这一困难。据此我们设计了1,1-二氰基-2,2-(4-甲基-苯胺)乙烯(DDME)分子^[33]。DDME是本身兼具电子给体(二甲胺)和电子受体(氰基)官能团的平面有机小分子，可以实现分子间的电子转移，且可以得到大面积晶态薄膜。通过STM针尖，在3.5 V, 3 ms的脉冲电压下写入信息，其记录点平均尺寸约为3 nm。

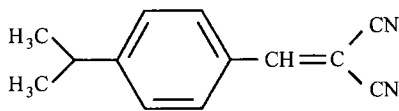


图3 DDME的分子结构式

考虑到DDME中电子给体和受体存在于同一有机化合物上，分子间存在较强的相互作用，难以实

现单分子的控制。为此设计出对硝基苯腈(PNBN)分子^[34, 35]，PNBN薄膜不仅具有清晰规整的分子排列(信息点写入前PNBN薄膜图像见图4(b))，而且由于PNBN中NO₂，CN均为强的电子受体，没有电子给体，分子间相互影响较弱。在STM针尖与薄膜间施加4.3 V, 10 ms的脉冲电压写入记录点，观察到的记录点尺寸为0.6 nm，这是目前国际上在纳米尺寸信息存储方面所得到最小点径的信息点阵。由于没有电子给体，所以不可能是电荷转移，因而推断为在STM脉冲电压的诱导下，针尖处介质薄层发生晶体结构的转变，使得该处的导电特性发生了变化。

此外，我们还利用STM研究了N-氰基-N'-苯基脒(PUN)薄膜，施加4.0 V, 10 ms脉冲电压写入记录点，得到记录点尺寸为0.8 nm^[36, 37](图5)。PUN在单体时为高阻态，脉冲电压诱导C≡N键发生聚合，使得PUN单体转变成长链共轭聚合分子，从而实现信息点的写入。由于共轭体系的增大，电荷离域区域增大而使导电性增强，即记录区域的电阻要远远低于未记录区，而且记录点大小依赖于聚合区域的尺寸。由于聚合过程的不可逆性，这种π键断裂支聚机制写入的信息是不可擦除的。

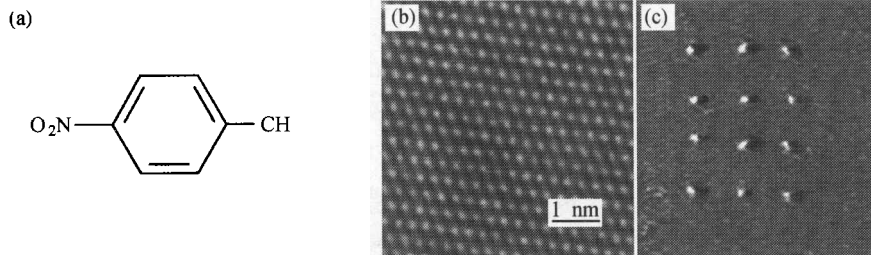


图4 在PNBN薄膜上的信息存储

(a) PNBN的分子结构式；(b) PNBN薄膜的有序分子结构(扫描条件： $V_{\text{bias}}=0.1\text{ V}$ ， $I_{\text{ref}}=0.3\text{ nA}$)；
(c) PNBN薄膜的STM信息存储图像(扫描条件： $V_{\text{bias}}=0.4\text{ V}$ ， $I_{\text{ref}}=0.24\text{ nA}$ 扫描面积： $24\text{ nm}\times 24\text{ nm}$ ，扫描模式：恒高)

在各种扫描探针显微镜中, STM 的分辨率最好. 虽然利用 STM 在有机材料上已获得如此小的信息记录点, 但其实际应用仍然存在着很多困难, 需要更为深入的研究, 如: 如何获得纳米尺寸上平整的大面积

高质量的薄膜? 如何进一步提高读写速度, 其数据的读写响应时间确保控制在纳秒级? 以及如何提高薄膜在室温下的稳定性等? 以上问题都要从材料设计和薄膜制备以及器件化等诸多方面作进一步的努力.

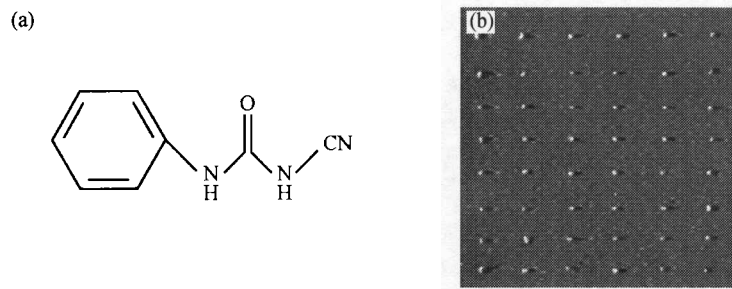


图 5 在 PUN 薄膜上的信息存储

(a) PUN 分子结构式; (b) 施加电压脉冲在 CPU 薄膜上得到 6×8 信息存储点阵(扫描条件: $V_{\text{bias}} = 0.8 \text{ V}$, $I_{\text{ref}} = 0.3 \text{ nA}$, 扫描面积: $64 \text{ nm} \times 64 \text{ nm}$, 扫描模式: 恒高)

3 展望

综上所述, 以接近纳米尺寸加工极限的 STM/AFM 在不同材料薄膜上进行纳米尺寸信息的写入是当前信息和材料科学的一个研究热点. 表 2 列出了本文第二部分涉及的具有代表性的信息存储材料. 由表 2 可见, 利用 STM 在不同材料上进行超高密度信息存储研究已成为近年来研究的热点之一, 我国科学家在利用有机材料进行超高密度信息存储方面取得了另人瞩目的成果, 并逐步形成自己的特色和优势. 如何保持这一优势, 并继而在新型材料及其器件化方面取得新的突破性进展是我们进一步努力的目标.

表 2 利用 STM/AFM 进行超高密度信息存储的材料发展状况

时间(年)	国家	存储介质	记录方法	最小记录点/nm	擦除
1991	美国	Cu-TCNQ	STM	120	不可
1993	日本	$\beta\text{-Na}_{0.33}\text{V}_2\text{O}_5$	STM	10	可擦
1995	日本	GeSb_2Te_4	AFM	10	不可
1995	中国	Ag-TCNQ	STM	50	不可
1996	中国	NBMN/DAB	STM	1.3	可擦
2000	中国	DDME	STM	3	可擦
2000	中国	PUN	STM	0.8	不可
2001	中国	PNBM	STM	0.6	可擦

在对不同材料进行研究的同时, 如何进一步提高读写速度也是一个非常重要的研究内容, 例如: IBM 公司^[38]利用改进后的 AFM 进行数据存储研究, 他们将 AFM 的探针排成 32×32 的点阵进行信

息写入, 大大提高了写入速度. Shi 等^[39]也通过对材料的选择和薄膜的生长控制使导电状态转变时间缩短至 6 ns.

此外, 生物材料是最具吸引力材料, 它具有特殊专一性反映, 其灵敏度是其他材料所无法比拟的. 利用生物特有的碱基配对原理和生物记忆机理, 寻找具有双稳态的生物活性物质, 也是很有研究价值的新的着眼点. 相信基于有机或生物材料的分子计算机将有望走进人们的生活, 化学家也将在未来的信息科学和计算机科学中发挥越来越重要的作用.

致谢 感谢中国科学院真空物理开放实验室时东霞、张昊旭副研究员, 北京大学电子系薛增泉教授、李建昌、侯士敏博士紧密合作与热情帮助.

参 考 文 献

- 1 华中一. 关于发展纳米技术的几点看法. 材料导报, 2001, 15(4): 3
- 2 白春礼. 纳米科技及其发展前景. 科学通报, 2001, 46(2): 89
- 3 吴荣汉. 21 世纪的光学和光电子学讲座(第三讲)信息网络与半导体光电子学. 物理学报, 2000, 29: 45
- 4 Parthenopoulos D A, et al. Three-dimensional optical storage memory. Science, 1989, 245: 843
- 5 Marius A, et al. Design of organic molecules with large two-photon absorption cross section. Science, 1998, 281: 1653
- 6 Cumpston B H, et al. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and micro fabrication. Nature, 1999, 398: 51
- 7 千福熹. 信息材料. 天津: 天津大学出版社, 2001. 451

- 8 Betzig E, et al. Near-field magneto-optics and high density data storage. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(2): 142
- 9 Sumio H, et al. Phase change recording using a scanning near-field optical microscope. *J Appl Phys*, 1996, 79(10): 8082
- 10 Milster T D. Near-field optics: A new tool for data storage. *Proceedings of IEEE*, 88 (9): 1480
- 11 Martin Y, et al. Optical data storage read out at 256 Gbit/in². *Appl Phys Lett*, 1997, 71(1): 1
- 12 Xu Y F, et al. Magnetic and structural properties of hcp-CoCrPt-C granular media for high areal density recording. *J Appl Phys*, 2000, 88: 7234
- 13 Xu Y F, et al. High coercivity CoCrPt-SiO₂ granular thin films for magnetic recording. *J Phys D: Appl Phys*, 2000, 33: 1460
- 14 Iwasaki S, et al. CoNiCr/Cr sputtered thin film disks. *IEEE Trans Magn*, 1977, MAG-13: 1272
- 15 Ross C A, et al. Fabrication of patterned media for high density magnetic storage. *J Vac Sci Technol B*, 1999, 17 (6): 3168
- 16 Chou S Y. Pattered magnetic nanostructures and quantized magnetic disk. *Proc IEEE*, 1997, 85: 652
- 17 Sun S, et al. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. *Science*, 2000, 287: 1989
- 18 Zhang J X, et al. Microstructure and magnetic properties of uncoupled SmCo nanocomposites. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1960
- 19 Eric E F, et al. Antiferromagnetically coupled magnetic media layers for thermally stable high-density recording. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 3806
- 20 Lohau J, et al. Dynamic coercivity measurements of antiferromagnetically coupled magnetic media layers. *Appl Phys Lett*, 2000, 78: 2748
- 21 Eigler D M et al. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*, 1990, 344: 524
- 22 Mamin H J, et al. Thermo mechanical writing with an antic force microscope tip. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(8): 1003
- 23 Bining G, et al. Ultrahigh-density atomic force microscopy data storage with erase capability. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(9): 1329
- 24 Sato A, et al. Nanometer-scale recording and erasing with the scanning tunneling microscope. *Nature*, 1993, 363: 431
- 25 Kado H, et al. Nanometer-scale recording on chalcogenide films with an atomic force microscope. *Appl Phys Lett*, 1995, 66(2): 2961
- 26 Coleman L B, et al. Superconducting fluctuations and the Peierls instability in an organic solid. *Solid State Commun*, 1973, 12(11): 1125
- 27 Ferraris J, et al. Electron transfer in a new highly conducting donor-acceptor complex. *J Am Chem Soc*, 1973, 95(3): 948
- 28 Matsumoto M, et al. Switching and memory phenomena of Cu-TCNQ thin films triggered by a stimulus with an STM tip. *Chem Lett Jpn*, 1991, 6: 1021
- 29 Gao H J, et al. Ultrahigh density data storage on Ag-TDCN thin film by scanning tunneling microscopy. *J Vac Sci Technol*, 1996, B14: 1349
- 30 Service F R. Organic device bids to make memory cheaper. *Science*, 2001, 293: 1746
- 31 Ma L P, et al. Nanometer-scale recording on an organic-complex thin film with a scanning tunneling microscope. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(24): 3752
- 32 Gao H J, et al. Nanometer-scale conductance transitions in an organic complex. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 1780
- 33 Li J C, et al. Parallel molecular stacks of organic thin films with electrical bistability. *Appl Phys Lett*, 2000, 76: 2532
- 34 Shi D X, et al. Direct observation of a local structural transition for molecular recording with scanning tunneling microscopy. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(20): 3203
- 35 Shi D X, et al. Ultrahigh-density data storage on p-nitrobenzonitrile thin film by scanning tunneling microscope. *Advanced Materials*, 2001, 13(14): 1103
- 36 Song Y L, et al. Novel organic thin films for ultrahigh density information storage. *Materials Science and Engineering*, 2000, B76: 79
- 37 时东霞, 等. 有机单体 3-phenyl-1-ureidonitrile 薄膜超高密度信息存储. *物理学报*, 2001, 50 (2): 361
- 38 Vettiger P, et al. The "Millipede" —More than one thousand tips for future AFM storage. *IBM J Res Dev*, 2000, 44: 323
- 39 Shi D X, et al. Nanometer-scale recording with transition time at nanosecond. *Applied Surface Science*, 2001, 184: 64