

纳米尺度的数据存储

王业亮 郭海明 刘虹雯 时东霞 张昊旭 高鸿钧*

(中国科学院物理研究所纳米物理与器件实验室, 北京 100080. *联系人: hjgao@aphy.iphy.ac.cn)

摘要 对当前的磁、光存储技术及基于扫描探针显微镜(SPM)的超高密度存储技术进行了介绍, 并对它们各自的存储机理及发展前景进行了分析比较. 磁、光存储技术将追求更小的信息位尺度, 面临接近其原理上的超顺磁效应限制和光的衍射极限的限制. SPM 具有原子级分辨及纳米加工能力, 被广泛应用于信息的存储机理研究及存储器件的设计, 成为超高密度信息存储的研究热点.

关键词 超高密度信息存储 磁存储 光存储 SPM

目前实用化的磁存储技术和光存储技术是以微电子技术为依托, 存储密度在 10^8 bit/cm² 左右, 存储单元是微米级的, 然而, 它们基本上达到或接近其原理上的超顺磁效应限制和光的衍射极限限制, 在原有基础上的技术发展已很难满足信息科学的迅猛发展的需求. 具有原子分辨能力和纳米加工能力的 SPM 的发明为实现超高密度信息存储提供了途径, 对超高密度信息存储技术与材料的研究应运而生^[1], 为纳米电子学的发展, 为单电子或单分子存储的实现, 提供了重要的研究手段^[2,3].

1 磁存储技术

目前成熟的信息存储技术, 根据记录方式不同, 大致可以分为磁存储和光存储两大阵营. 磁存储密度的提高主要依赖于磁介质材料的改进, 要求磁记录介质具有更高的矫顽力和更低的剩余磁化强度·厚度乘积. 20 世纪 70 年代主要用在塑料薄膜和金属薄片上涂敷磁性氧化物(如 Fe₃O₄, CrO₂, Co 包覆 Fe₂O₃ 等)的方法来制作磁带和磁盘, 存储密度只约为 1 Mbit/cm² 量级, 以后采用超细磁性粉末(Fe-Co-Ni 合金磁粉), 以及薄膜磁头使存储密度有所提高. 20 世纪 90 年代后使用磁控溅射方法制备连续金属磁性薄膜, 这样可减小颗粒间界面, 提高磁存储密度^[4,5], 矫顽力已超过 320 kA/m. 最近研究的 CoCrPt/CoCrTa/Cr 三层磁记录膜, 矫顽力已经增加到 480 kA/m 以上, 记录密度可达 10^9 bit/cm²^[6,7].

磁光材料和磁泡材料都是随磁存储技术的发展而采用的磁信息存储材料. 磁光材料能使光在磁场作用下改变它的传输和反射方向. 应用较多的磁光存储材料主要有 Mn-Bi 系磁膜和 Tb-Fe-Co 系、Cd-Co 系非晶磁膜. 磁光存储是利用磁光效应对信息进行

存取: 将偏振光束投射到磁光材料(已加有写入磁场)上, 光照射部分矫顽力降低, 材料的磁化方向将与写入磁场的方向相同, 这样便将代表不同写入磁场方向的“0”或“1”信息存入磁光存储器, 当光移开后, 矫顽力增大, 使存储的信息不易丢失; 要读出信息时, 只要将偏振光束照射到信息点上, 因信息点处的磁化方向不同, 反射光的旋转角方向也不同, 由此就可知该点存储的代码. 磁泡材料是指在一定外加磁场作用下具有磁泡畴结构的磁性薄膜材料. 可用作磁泡的材料主要有石榴石型稀土铁氧体系、Tb-Fe 系、Gd-Co 系非晶磁膜、钙钛石型铁氧体系等^[8~10]. 利用磁泡的有和无代表“1”和“0”, 实现信息的存储. 控制磁泡的产生、清除和检出可以实现信息的写入和读出.

纳米磁盘由一组纳米级磁棒组成, 磁棒长度仅为 25 nm 左右. 长度小于 100 nm 的磁条有一个特性, 即被磁化时, 磁棒两头会各自形成一个独立的磁畴, 磁场内所有的原子完全成线状排列. 其原理是: 磁条可根据其南北极指向, 分别表示“1”和“0”, 而极性的变化由电场来控制.

磁存储的发展追求更小的信息位尺寸和寻找新的存储材料. 磁信息位不可能无限缩小, 这意味着磁硬盘容量不可能无限提高. 因为随磁存储区域的减小, 将面临无法克服的超顺磁效应问题. 当磁存储区域小到单畴的临界尺寸时, 在硬盘的工作温度(甚至是室温), 温度变化引起的热起伏可使磁存储区域磁矩产生一种类似于布朗运动的混乱转动, 从而破坏数据存储位磁矩间的整齐有序排列. 目前的看法是, 超顺磁效应将在存储密度达到约 30 Gbit/cm² 时出现^[11].

2 光存储技术

光存储技术是20世纪70年代发展起来的,是一种通过光学方法写入和读出数据的存储技术.利用激光聚焦成高能量的写入光束照射到存储介质上时,使介质的微小区域发生物理或化学变化,产生标记(凹坑或黑色线条),写入二进制数据.当读出光束照射到存储介质上时,其反射率随着有无存储数据标记的不同而发生强度变化,从而读出存储在介质上的数据.在光盘中,凹凸边缘表示数据“1”,平坦部分表示数据“0”.

光盘存储技术的发展趋势为多功能化,即从只读式(CD-ROM)到记录式(CD-R)和可擦重写式(CD-RW,常见的有相变擦写光盘PD和磁光盘MO二种,其记录原理不同).

CD-ROM盘上一系列代表信息的凹坑是用金属压模压出的,而不是用激光束烧熔有机染料形成的,反射层用铝.CD-R盘片是将光吸收材料(染料)及光反射材料(金、银等)镀在有螺旋形预刻槽的空白盘基上,经由驱动器中的光学头发出较高功率激光束照射预刻槽中的染料,使其溶解并形成凹坑,从而将信息直接写在光盘上,利用光头探测反射光信号即可读出信息.但是,由于染料层在写入信息后不能复原,所以CD-R盘只能写一次.CD-R驱动器中使用的光学读/写头与CD-ROM的光学读出头类似,只是其激光功率受写入信号的调制.CD-R驱动器刻录时,在要形成凹坑的地方,半导体激光器的输出功率变大;不形成凹坑的地方,输出功率变小.在读出时,与CD-ROM一样,要输出恒定的小功率.

磁光(MO)光盘是传统磁、光存储技术结合的产物.其原理是利用激光和强磁场同时作用于记录介质来实现信息的存取,数据记录是热磁过程,利用光的热效应写入信息,再利用磁光效应读出信息.MO的磁性物质是夹在透明聚碳酸酯和玻璃之间的一层磁合金,这些磁性物质在高温下可以磁化.利用聚焦后的激光束照射在MO盘的记录层形成极小的光斑,当光斑温度上升到居里点(约200℃)时,磁畴随外加磁场的作用改变磁化方向,当温度恢复到环境温度时,磁畴呈高矫顽力,从而实现数据的写入.擦除只需翻转外加磁场的方向即可.数据的读出利用了磁畴与激光作用所产生的克尔效应,即利用光头探测

光盘表面反射回的低功率激光信号,通过判断反射光偏振面的旋转方向是顺时针还是逆时针(用于表示“0”或“1”)来决定读取的信息.由于MO盘片磁性物质的磁化次数不限,所以MO盘片就可以进行不限次数的读写.

相变(PD)光盘是利用激光照射镀有硒和碲的相变介质材料使之发生非晶体→晶体→非晶体的转变来实现信息直接记录和擦除.在写操作时,聚焦激光束加热记录介质的目的是改变相变记录介质晶体状态,用结晶状态和非结晶状态来区分0和1;读操作时,利用结晶状态和非结晶状态具有不同反射率这个特性来检测0和1信号^[12,13].

目前的各种光盘驱动器均以包含物镜的光学头进行读和写,为远场记录.虽然在未来的几年中,采用短波长激光器和超分辨(SRC)等技术,光盘记录密度还会有数十倍的提高,然而,进一步的发展必须突破光的衍射极限,从光的远场记录发展到近场记录是超高密度光存储技术的主要途径.近场探针记录是在扫描近场显微镜(SNOM)的基础上发展起来的一种新型的超分辨存储方式.这种方法运用光纤作为光传播途径,将光纤的顶端拉伸成具有微小孔径的探针,这样光束只能从光纤微小孔径内射出.当探针头与记录层表面的距离小于半个波长时,光束不分散而获得微小的记录光斑^[14,15].如何控制探针头与记录层表面的间距是近场探针记录的难点和关键所在,另外光束通过光纤传播的衰减很大,严重限制了其写入速度和实用化.

近年来近场光存储技术有了许多新的发展.1994年, Terris 等^[9]在光学头的聚焦透镜和记录介质之间插入了一个折射率为 n 的固体浸没透镜(SIL),使光学系统的数值孔径增大了 n^2 倍,从而大大减小了光斑的直径,当采用780 nm波长光源时,得到了317 nm的存储点.后来,他们又改进采用了SIL飞行光学头技术,得到了 3.8×10^8 bit/cm²的存储密度和 3.3×10^6 bit/s的存储速度^[10].1998年, Tominaga 等^[16]首次提出了近场超分辨结构(superRENS)光盘技术,在常规相变光盘的记录层之上加入一光学非线性层,在激光的作用下该层的透光性发生变化,等效于动态地产生和消失一个超衍射极限的透光小孔,通过改变入射激光的功率可以改变透光小孔的大小,从而改变存储点的大小.

三维光存储从长远角度来看代表着高密度存储的发展方向,它将存储空间由二维延伸到三维,可以大大提高信息存储的容量和速度,其理论信息容量可达 10^{13} bit/cm³. 实现三维光存储的途径主要包括全息记录技术^[17]、光子烧孔技术^[18]和双光子三维体相存储技术^[19,20]等. 其中双光子三维体相存储技术是 1989 年 Rentzepis 等^[19]基于双光子过程提出的. 它有两种方式,一是双光束以 90° 在体相内垂直移动,当两束光聚集于一点时,该点处产生双光子吸收而发生化学物理变化,实现信息的写入;另一种方式是让一束光为一个光面穿过三维介质,另一束光为垂直于光面的光束,该光束相当于一支光笔,可在体相内任一层面上的任一点写入信息.

高密度光存储技术的发展在很大程度上取决于存储材料的发展. 随着光子学技术的进步,目前的光热存储方式将向光子存储方式发展^[21~23]. 光子存储是在光激发下使存储材料中的激活中心的电子产生跃迁而实现光存储,它不同于目前一般应用的材料吸收光子后产生热效应的光热存储方式. 利用材料的光致变色、光电、光折变和电子俘获等效应都可以进行光子存储,其中光致变色化合物是最有希望的一类材料. 有机光致变色化合物^[24,25]由于具有高容量、响应速度快、信噪比大和分子结构可设计等优点,一直被认为是用于光子存储的最为重要的光致变色材料,但其热稳定性和耐疲劳性差的缺点限制了它们的实用化. 1992 年姚建年等^[26]通过光化学和电化学结合的方法,首次发现了 MoO₃ 半导体薄膜的可见光效应,使无机光致变色材料的研究和应用展现了诱人的前景. 目前光致变色光子存储的研究重点在于寻找具有良好耐疲劳性能和稳定的写入-读出态的材料. 随着超分子化学的发展,利用超分子化学组装手段,将有机分子引入无机分子网络(如 MoO₃, 杂多酸等),借助光化学反应中的有机分子与无机分子之间的协同作用,是设计出具有高响应速度、高容量、高稳定性和耐疲劳性的光致变色材料的很有希望的途径之一.

3 超高密度信息存储

对于数据存储,任何比现有磁存储和光存储的存储密度高的新存储技术,应该具有纳米尺寸甚至原子尺寸数据位大小的潜力^[27,28]. 超高密度信息存储是随纳米科技的发展而发展的,预期存储密度高

达 10^{14} bit/cm², 其存储原理主要是基于纳米技术在纳米尺度实现存储单元的构建.

利用扫描探针显微镜(SPM)加工技术研究存储材料的物理化学特性,运用 SPM 施加局域的电、磁、光、热作用,改变材料的局域形貌、电、磁、光等特性,追求更高的存储密度和更小的存储点,是当前超高密度信息存储的热点任务之一^[29].

3.1 存储材料的选择

当存储点的大小达到纳米尺度时,传统的材料与技术将面临严峻的挑战,因此对新型纳米薄膜及相应的存储技术的研究是目前信息科学重要的研究热点之一,是未来超高密度信息存储器件的基础. 许多具有开关特性的材料被用于纳米尺度数据存储,如金属膜、半导体膜、合金膜、无机氧化物膜和有机膜等^[30~33]. 有机材料由于价格便宜、合成方便、结构和相应的性能可控和成膜性好等特点而被越来越多地应用于信息存储的研究,相应的存储机理也得到广泛的研究^[34~41].

作者所在实验室自 1994 年以来在超高密度信息存储方面进行了一些有影响的工作. 我们设计、选择并合成了几种具有实用前景的用于超高密度信息存储的有机材料,采用 STM 在这几种有机材料上进行单分子水平上的信息存储研究,并对信息记录和擦除机制进行了探索.

我们用 STM 针尖在 NBMN/pDA 薄膜上通过在 STM 针尖和衬底之间施加电压脉冲写入一个信息记录点图案“A”,如图 1(a)所示,通过在 STM 针尖和衬底之间施加一反向电压脉冲可以进行信息点的擦除,如图 1(b)和(c)所示. 通过透射电子显微镜观测和理论计算证实:信息记录点的写入和擦除的机理是薄膜在纳米尺度的晶体结构变化. 在写入前后薄膜结构由晶态转变为非晶态(无序),其中晶态导电性差,非晶态导电性好^[42]. 在用 STM 对 PNBN 薄膜进行信息存储中,我们得到了背景是 PNBN 分子像的信息记录点,分子像区域的分子排列规则、有序;而信息记录点区域没有规则的 PNBN 分子排列,这种具有清晰、规则排列的分子像背景的信息记录点的结果清晰地显示出该薄膜上信息点的记录是基于薄膜在纳米尺度的晶体结构的变化^[43].

图 2(a)是用 STM 针尖在 NBMN/pDA 薄膜上写入存储点构成的 3×3 点阵;图 2(b)显示的存储点的

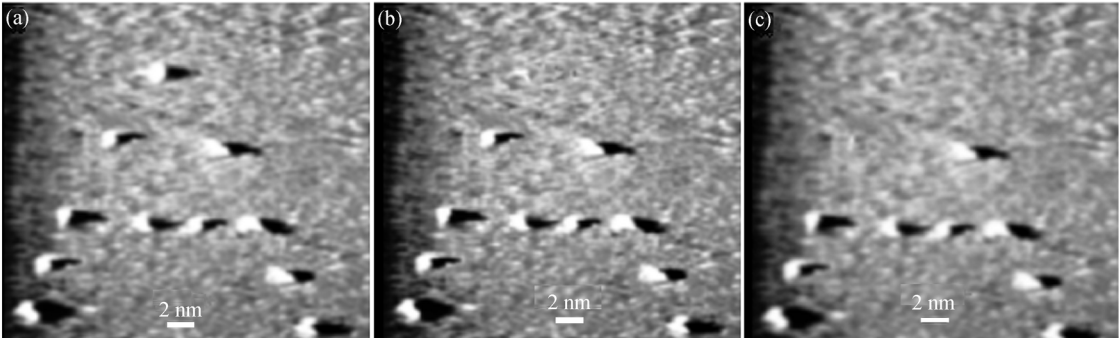


图 1
(a) 在 NBMN/pDA 薄膜上写入一个信息记录点图案 “A” ;(b)和 (c) 通过施加反向电压脉冲进行信息点的擦除

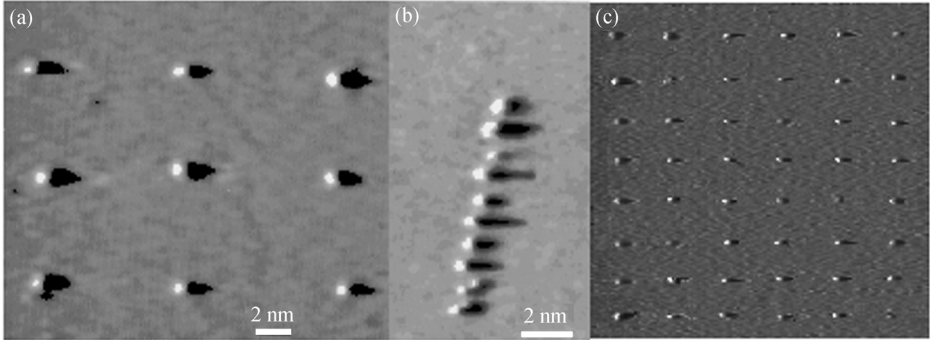


图 2
(a) 在 NBMN-pDA 薄膜上的信息存储 3×3 信息存储点阵; (b) 存储点的大小 1.3 nm, 点间距为 1.5 nm, 存储密度为 10^{13} bit/cm²;
(c) 在 PUN 薄膜上写入的规则排列的 6×8 信息存储点阵

大小为 1.3 nm, 存储点之间的最小间距为 1.5 nm, 相应的存储密度为 10^{13} bit/cm²^[44]. 图 2(c)所示是在 STM 针尖和 PUN 有机单体薄膜表面施加一系列的电压脉冲, 得到了 6×8 的信息点阵, 信息存储点排列规则、状态稳定, 信息点大小为单个小分子的尺度^[45].

3.2 超高密度信息存储方法的改进

信息社会和知识经济迅速发展需要超高密度大容量数据存储, 传统的存储技术已难以满足需要. 只有利用新原理、采用新技术、启用新材料才有可能研究开发出新一代高密度、高速信息存储技术和系统. 扫描探针显微镜(SPM), 包括扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM), 具有原子尺度成像和结构分析的能力, 可用于纳米尺度数据存储的电子设备的表面改进. 通过 SPM 针尖电脉冲作用, 材料可能形

成纳米尺寸的记录点.
在 20 世纪 90 年代早期, IBM 公司的 Mamin 和 Rugar^[46]证实了使用 AFM 针尖来进行数据存储的可能性, 通过一个 AFM 针尖与聚碳酸酯基体接触演示了写/读过程. 通过加热针尖进行数据的写操作. 用这种方法, 存储密度达 5 Gbit/cm², 在当时是相当大的进步.

对于数据存储, 高的存储密度和高的存储速度是两个关键因素. 图 3 表明了传统的存储方法中存储密度和存储速度的关系^[29]. 使用 AFM 或 STM 针尖进行数据存储, 必须突破高速度数据存储的根本性限制. 当前, 由于 AFM 微悬臂的机械共振频率的限制, 单个微悬臂的数据处理速率在 1 Mbit/s 量级^[29,47]. 尽管 STM 具有高的存储速度, 但受到反馈速度和隧穿电流的限制, STM 存储的数据处理速率只有 1 kbit/s

量级. 当前, 单个 AFM 最好的存储速度在微秒水平, 但常规的磁性存储的最好存储速度已达到纳秒水平, 很明显 AFM 数据处理速率必须提高至少 3 个数量级才可能和目前以及将来的磁性存储方法竞争.

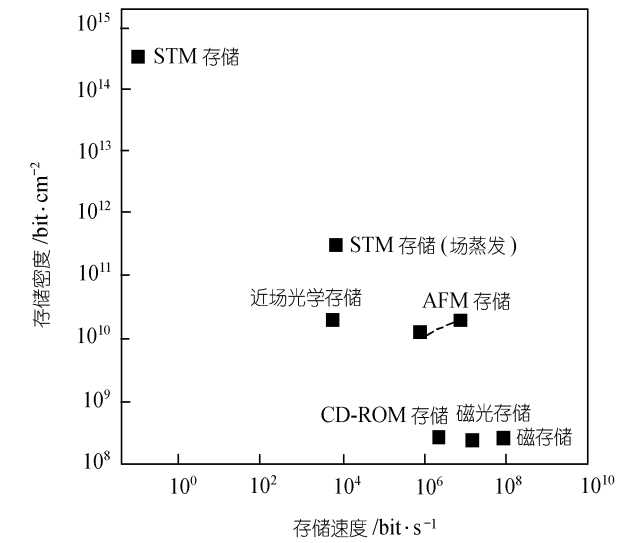


图 3 几种存储技术的存储密度和存储速度

3.3 热机械(thermomechanical)AFM 数据存储

最近几年, 在聚合物存储介质上的 AFM 热机械存储得到了广泛的改进, 通过传感器和加热器的集成能够实现简单化以及增加数据处理速度和存储密度^[48~51]. 微悬臂上集成了加热器 AFM 热机械存储, 具有 5 Gbit/cm² 存储密度, 10 Mbit/s 量级的数据读取速度和 100 kbit/s 写速度^[51,52].

信息的热机械写过程应用了微悬臂/针尖对聚合物膜的局部力作用以及局部加热作用, 如图 4(a)所示. 针尖与聚合物膜接触区域随所受热量增加不断增大, 针尖必须加热到较高温度(大约 400℃), 聚合物开始熔融. 一旦熔融, 针尖压入聚合物, 如图 4(b)所示.

为了增加基体的热导率并限制针尖插入深度, 在 Si 基体上沉积了非常薄的 PMMA 聚合物层. 硬的 Si 基体阻止针尖插入薄膜厚度所许可的深度; 同时 Si 的导电率比聚合物好, 可使热量在加热区更快速的传输. 为防止在写过程中 Si 针尖和 Si 基体接触造成针尖磨损增大, 在 Si 基体和 PMMA 膜间再增加了一层 SU8 树脂来缓冲针尖的穿透, 避免针尖与基体摩擦, 保持针尖热机械稳定. 使用这种层状存储介质,

写入了直径为 40 nm 的数据位, 如图 4(d)所示, 其潜在数据位密度为 80 Gbit/cm²^[52].

信息的热机械读取采用热机械感应概念来实现^[53], 如图 4(c)所示. 前面提及的集成了加热器的微悬臂仅在写数据时使用, 它与温敏电阻结合可实现热机械读取. 对于电阻温度感应, 电阻器在 350℃左右操作, 这个温度不足以使聚合物软化来进行信息的写操作过程, 但可以进行信息的读取. 热感应原理是建立在加热器和存储基体间热导率随它们之间距离变化的基础之上的. 随针尖进入膜中产生刻痕, 加热头和聚合物膜间距离减小, 加热器温度和电阻率将随距离的减小而下降. 因此, 当微悬臂扫过数据位时, 加热头和聚合物膜间距离变化通过电阻器的温度变化来监控, 提供一种读取数据位的方法.

除了热机械写/读操作, 聚合物存储介质的擦除和重写获得了成功^[49]. 通过加热介质到 150℃持续几秒钟, 存储区域的热量将回流. 回流后介质平整性良好, 允许在同一存储区域进行多次重写. 擦除过程不只是在一个数据位尺寸进行擦除, 而是在较大的存储区域进行擦除. 擦除和多次重写过程以及位的稳定性研究是当前基于 AFM 数据存储研究的主题.

3.4 AFM 存储器件的设计

用单个 AFM 针尖进行数据存储限制了存储速度和存储密度的提高, 不能满足实际应用的需要. Bin-nig 等人^[54,55]提出了“千足之虫(millipede)”多探针技术, 得到了基于 AFM 的二维 32×32 探针阵列. 它具有潜在的超高密度, 以及高的数据处理速度.

“千足之虫”概念是一种高速度超高密度数据存储的新方法. 它是以整块微悬臂阵列在存储介质上沿 x/y 方向作并行扫描为基础的, 其二维 AFM 微悬臂阵列存储如图 5 所示. 阵列片大小为几个毫米, 位大小为 30~40 nm. 阵列片和介质基体使用相同材料(Si). 对于一个 32×32 的阵列片, 能在小于 3 mm×3 mm 区域内产生 32×32 个数据存储区域, 预计密度为 80 Gbit/cm². 通过针尖在存储介质表面沿 x/y 方向扫描进行写/读操作. 采用位于阵列片四角处的微悬臂传感器来控制阵列片与存储介质的接触及水平. 从传感器传来的反馈信号调节传感器和存储介质相接触. 当沿 x/y 方向扫描进行写/读操作时, 传感器维持阵列片的水平以及与存储介质表面接触. PC 控制

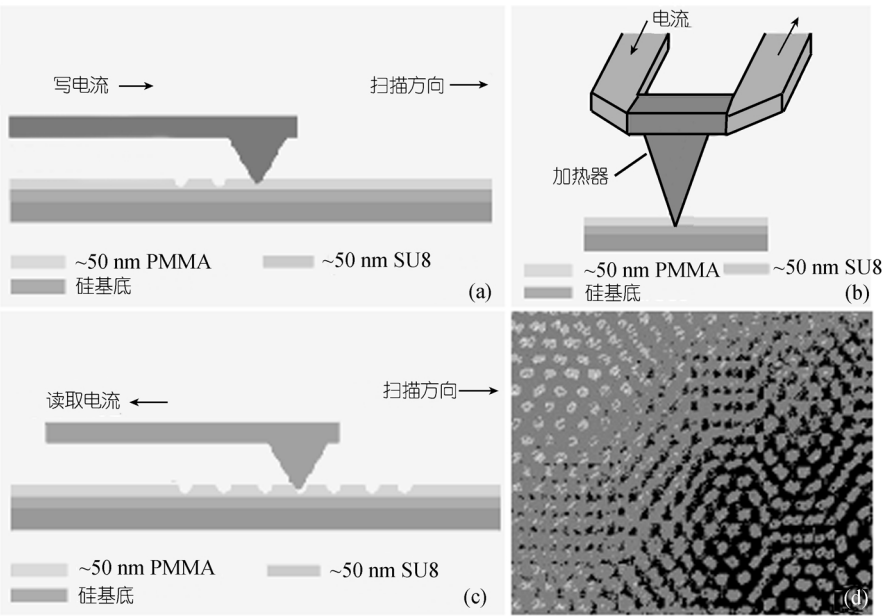


图 4
(a) 信息的热机械写操作, (b) 存储介质和针尖结构示意图, (c) 热机械感应信息读取, (d) 写入直径为 40nm 的数据位

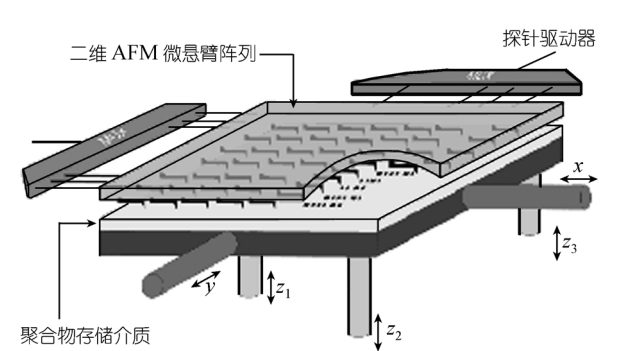


图 5 二维 AFM 微悬臂阵列, 整块微悬臂阵列可在存储介质上沿 x/y 方向作并行扫描

的分时寻址方案在阵列片上逐行寻址, 在一行内完全并行地进行写/读操作. 同时对 32 列点阵进行数据输入(0 或 1). 数据输入用高的正电压表示数字 1; 接地表示数字 0. 这种逐行逐列编址方案给所有微悬臂的加热器通电流, 但只有那些加上高的正电压的微悬臂产生刻痕(“1”). 那些接地的微悬臂没有足够热量产生痕迹, 写为“0”. 当扫描状态移到下一个位位置, 过程重复, 过程继续进行到线扫描完成. 在读取过程被选中的行加上一个中等的负电压, 检测通过

电阻的电压, 如果一个微悬臂进入“1”态刻痕, 它变冷, 从而改变电阻和通过电阻的电压, 已写入数据的位通过这种方式来被感应读取. Lutwyche 等人^[56]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和水平保持. Terris 等人^[57]指出针尖高度不均一会引起针尖与介质间力的变化, 造成针尖与存储介质间的摩擦, 因此需要所有的针尖高度严格一致, 这样可使针尖与介质之间的作用力均匀, 使针尖与介质间摩擦最小或消除. 图 6(a)显示了存储区域写

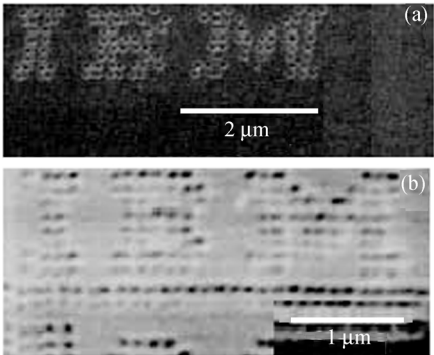


图 6 AFM 阵列并行写/读结果
(a) 写入的数据; (b) 读取的数据

入数据 IBM 后的放大图像,由刻痕(“1”)和清晰的隔离区(“0”)组成.图 6(b)显示了存储区域数据读取后的图像.点的直径约 50 nm,对应数据密度为 30 Gbit/cm².“千足之虫”技术建立在整块阵列片的反馈控制之上,大大简化了整个体系.

这些结果让我们相信用二维 AFM 微悬臂阵列作为超高密度数据存储是可行的.

3.5 单电子存储器件和分子存储器件

利用 SPM 加工技术改变材料的局域特性是实现超高密度信息存储的重要途径之一,它依照“自上而下”的技术路线,不断缩小存储点的尺寸,增加存储密度.而另一方面,单电子存储^[2,3,58]是以原子、分子、量子结构为基本单元,基于库仑阻塞效应和单电子隧穿效应而提出的一种新型量子存储方式,它可能达到理论上最高密度的信息存储,即最终实现在原子级别上进行信息存储,同时具有快速、低耗等优点,将在未来的纳米电子学领域占有重要的地位.

典型的单电子存储器的结构如图 7 所示^[3].它包含一个中心岛量子点、隧道结、控制栅极、源极和漏极,其中中心岛量子点的尺寸可从数十纳米到 5 ~ 7 nm.增大控制栅偏压使量子点的电势大于发生隧穿的阈值偏压时,一个电子将隧穿进入量子点,不断增大栅极偏压,可以控制单个电子一个一个地进入量子点,在其伏安特性曲线中可以观察到库仑台阶现象;再不断降低栅极偏压,可使单个电子逐个地流出量子点.即通过改变控制栅偏压,改变量子点中的电荷态,从而实现数据的存储.目前单电子存储器还有许多问题等待解决,首先在纳米量级上进行器件加工很难保证良好的精确度和重复性,另外要想使其

可靠地在室温下工作,需要量子点的充电能 $e^2/2C \gg k_B T$,这就要求量子点的电容 C 小至几个阿法,其尺寸仅几个纳米甚至更小,制作上难度很大.

分子存储器件是通过向单分子施加写入和擦除电压脉冲信号,使分子内功能基团发生电学双稳态变化,从而在分子级别上实现信息存储^[33].分子存储器件的制造是以分子自组装技术为基础的,故相对于单电子存储器件,可能更容易制作出成本较低的多个几乎完全等同的纳米量级的结构^[59~61],同时利用 SPM 进行单分子操纵也是分子存储器件研究的重要手段.

4 展望

信息科学的迅猛发展要求数据存储具有更高的存储密度和存储速度.对新型存储材料及相应的存储机理的研究是目前信息科学重要的研究热点之一,是未来超高密度信息存储器件的基础.

寻找新的存储材料是实现超高密度信息存储的关键课题,将给我们带来新的机遇和挑战.而有机材料由于价格便宜,合成方便,分子结构可设计,良好的自组装性能,以及其功能基团对电、光、热的良好响应特性,被认为是适用于纳米尺度和单分子水平超高密度信息存储的优异材料,并且已经获得了很多重大的成果.下一步的努力应集中在研究和开发具有更好功能、工艺性能和环境稳定性的有机材料和薄膜,这有赖于对有机分子结构设计、化学合成工艺、自组装技术的更深理解和控制,离不开物理学家、化学家、材料学家和工程师的多元合作和协同努力.

从存储机理上来看,传统的磁存储和光存储技术将很快达到其存储密度的极限,而近场光存储和多维光存储等超高密度光存储技术除了仍存在分辨率的极限之外,也均存在着理论、材料和技术等诸多方面的问题,获得重大的、实用化的成果仍需要更多的综合研究和努力.利用 SPM 加工技术通过改变材料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,是超高密度信息存储的重要发展方向,但其存储速度太慢,远远不能满足实际应用的需要.

“千足之虫”多探针技术仅仅是尝试解决此问题的开始,它基本上能够满足存储速度的需要,使人们看到了利用 SPM 技术进行超高密度信息存储的曙光和美

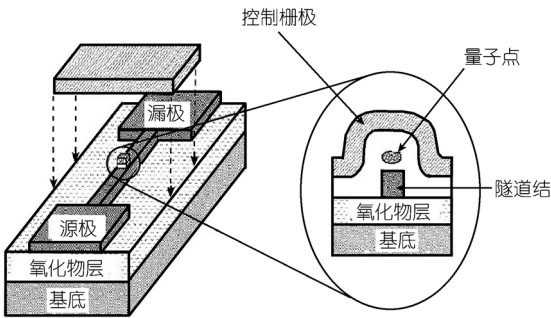


图 7 单电子存储器结构示意图

好前景,但真正实用化还需要一系列技术上的突破.

单电子存储和分子存储能够最终实现在原子和分子级别上进行存储,是目前理论上最高密度的信息存储,也是纳米电子学存储器件发展的终级目标.用 SPM 研究材料局域和单分子的电子特性,将为单电子存储和分子存储的研究提供重要的实验和理论依据,是实现单电子存储器件和分子存储器件不可或缺的研究手段.

参 考 文 献

1

Lapshin R V. Digital data readback for a probe storage device. Rev Sci Instruments, 2000, 71: 4607~4610

2

Sandip T, Farhan R, Hussein H, et al. A silicon nanocrystals based memory. Appl Phys Lett, 1996, 68(10): 1377~1379

3

Lingjie G, Efendi L, Chou S Y. A silicon single electron transistor memory. Science, 1997, 275(5300): 649~650

4

Hosaka S, Koyanagi H, Kikukawa A, et al. Fabrication of nanometer-scale structures on insulators and in magnetic materials using a scanning probe microscope. J Vac Sci Technol B, 1995, 13(3): 1307~1311

5

干福熹, 王阳元. 信息材料. 天津: 天津大学出版社, 2000

6

Paik C R, Suauki I, Tani N, et al. Magnetic properties and noise characteristics of high coercivity CoCrPt B/Cr media. IEEE Tran Magn, 1991, 27(5): 4379~4381

7

Yogi T, Tsang C, Nguyen T A, et al. Longitudinal media for 1Gb/in² areal density. IEEE Tran Magn, 1990, 26(4): 2271 ~ 2276

8

Betzig E, Trautman J K, Wolfe R, et al. Near-field magneto-optics and high density data storage. Appl Phys Lett, 1992, 61(2): 142 ~ 144

9

Terris B D, Mamin H J, Rugar D, et al. Near field optical data storage using a solid immersion lens. Appl Phys Lett, 1994, 65(4): 388 ~ 390

10

Terris B D, Mamin H J, Rugar D, et al. Near field optical data storage. Appl Phys Lett, 1996, 68(2): 141~143

11

Thompson D A, Best J S. The future of magnetic data storage technology. IBM J Res Develop, 2000, 44(3): 311~322

12

Partovi A, Peale D, Wutting M, et al. High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage. Appl Phys Lett, 1999, 75(11): 1515~1517

13

Guo F, Schlesinger T, Stancil D, et al. Optical field study of near field optical recording with a solid immersion lens. Appl Opt, 2000, 39(2): 324~332

14

Betzig E, Isaacson M, Lewis A. Collection mode near field scanning optical microscopy. Appl Phys Lett, 1987, 51: 2088 ~ 2090

15

Betzig E, Trautman J K, Harris T D, et al. Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale. Science, 1991, 251: 1468~1470

16

Tominaga J, Nakano T, Atoda N, et al. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film. Appl Phys Lett, 1998, 73(15): 2078

17

Auria L D, Huiguard J P, Slezak C, et al, Experimental holographic read-write memory using 3-D storage. Appl Opt, 1974, 13: 808

18

Moerner W E. Persistent Hole Burning: Science and Application. Berlin: Springer, 1987

19

Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Three-dimensional optical storage memory. Science, 1989, 245: 843

20

Pudavar H E, Joshi M P, Prasad P N, et al. High-density three-dimensional optical data storage in a stacked compact disk format with two-photon writing and single photon readout. Appl Phys Lett, 1999, 74(9): 1338~1340

21

Wang M M, Esener S C, McCormich F B, et al. Experimental characterization of a two photon memory. Opt Lett, 1997, 22(8): 558 ~ 560

22

Fukaya T, Tominaga J, Nakano T, et al. Optical switching property of a light induced pinhole in antimony thin film. Appl Phys Lett, 1999, 75: 3114 ~ 3116

23

Shen Y, Swiatkiewicz J, Jakubczyk K, et al. High-density optical data storage with one-photon and two-photon near-field fluorescence microscopy. Appl Opt, 2001, 40: 938 ~ 940

24

Malkin J, Dvornikov A S, Straub K D, et al, Photochemistry of molecular system for optical memory. Res Chem Intermed, 1993, 19: 159

25

Dvornikov A S, Malkin J, Rentzepis P M, et al. Spectroscopy and kinetics of photochromic materials for 3D optical memory devices. J Phys Chem, 1994, 98: 6746

26

Yao J N, Hashimoto K, Fujishima A, et al. Photochromism induced in an electrolytically pretreated MoO₃ thin film by visible light. Nature, 1992, 355(6361): 624

27

Grochowski E, Hoyt R F. Future trends in hard disk drives. IEEE Tran Magn, 1996, 32(3): 1850~1854

28

Eigler D M, Schweizer E K. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. Nature, 1990, 344: 524 ~ 526

29

Mamin H J, Terris B D, Fan L S, et al. High-density data storage using proximal probe techniques. IBM J Res Develop, 1995, 39(6): 681 ~ 700

30

Kado H, Tohda T. Nanometer-scale recording on chalcogenide films with an atomic force microscope. Appl Phys Lett, 1995, 66(22): 2961 ~ 2962

- 31 Weidenhof V, Pirch N, Friedrich I, et al. Minimum time for laser-induced amorphization of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_2$ films. *J Appl Phys*, 2000, 88(2): 657 ~ 663
- 32 Bech A, Bednorz J G, Gerber C, et al. Reproducible switching effect in thin oxide films for memory applications. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(1): 139 ~ 141
- 33 Reed M A, Chen J, Rawlett A M, et al. Molecular random access memory cell. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(23): 3735 ~ 3737
- 34 Yano K, Kuroda R, Shimada Y, et al. Information storage using conductance change of langmuir-blodgett film and atomic force microscope/scanning tunneling microscope. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14(2): 1353~1355
- 35 Gao H J, Canright G S, Pang S J, et al. Unique dendritic patterns in organic thin films: experiments and modeling. *Fractals*, 1998, 6: 337
- 36 Shi D X, Song Y L, Zhu D B, et al. Recording at a nanometer scale on p-nitrobenzonitrile thin films by scanning tunneling microscopy. *Advanced Materials*, 2001, 13(14): 1103 ~ 1105
- 37 Shi D X, Ba D C, Pang S J, et al. Nanometer-scale recording with transition time at nanosecond. *Appl Sur Sci*, 2001, 182: 64~68
- 38 Ma L P, Yang W J, Xie S S, et al. Ultrahigh density data storage from local polymerization by a scanning tunneling microscope. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(22): 3303 ~ 3305
- 39 Gao H J, Ma L P, Song Y L, et al. Using a new kind of organic complex system of electrical bistability for ultrahigh density data storage. *J Vac Sci Technol B*, 1997, 15(4): 1581 ~ 1583
- 40 Ma L P, Yang W J, Xue Z Q, et al. Data storage with 0.7 nm recording marks on a crystalline organic thin film by a scanning tunneling microscope. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(6): 850 ~ 852
- 41 Gao H J, Wang D W, Wang Z Q, et al. Ultrahigh density data storage on Ag-TDCN thin films by scanning tunneling microscopy. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14(2): 1349 ~ 1352
- 42 Gao H J, Sohlberg K, Xue Z Q, et al. Reversible, nanometer-scale conductance transition in an organic complex. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(8): 1780 ~ 1783
- 43 Shi D X, Song Y L, Zhang H X, et al. Direct demonstration of structural transition for molecular recording with scanning tunneling microscopy. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(20): 3203~3205
- 44 Ma L P, Song Y L, Gao H J, et al. Nanometer-scale recording on an organic-complex thin film with a scanning tunneling microscope. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(24): 3752~3753
- 45 Shi D X, Ma L P, Xie S S, et al. Nanometer-scale data storage on 3-phenyl-1-ureidonitrile thin film using scanning tunneling microscopy. *J Vac Sci Technol B*, 2000, 18: 1187~1189
- 46 Mamin H J, Rugar D. Thermomechanical writing with an atomic force microscope tips. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(8): 1003~1005
- 47 Mamin H J, Ried R P, Terris B D, et al. High-density data storage based on the atomic force microscope. *Proc IEEE*, 1999, 87: 1014 ~ 1027
- 48 Chui B W, Stowe T D, Kenny T W, et al. Low-stiffness silicon cantilevers for thermal writing and piezoresistive readback with the atomic force microscope. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(24): 2767~2769
- 49 Tortonese M, Barrett T C, Quate C F. Collection mode near-field scanning optical microscopy. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(8): 834 ~ 836
- 50 Mamin H J. Thermal writing using a heated atomic force microscope tip. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(3): 433 ~ 435
- 51 Ried R P, Mamin H J, Terris B D, et al. 6 MHz 2-N/m piezoresistive atomic force microscope cantilevers with incisive tips. *J Microelectromech Syst*, 1997, 6: 294~302
- 52 Binnig G K, Despont M, Drechsler U, et al. Ultra high-density AFM data storage with erase capability. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(9): 1329~1331
- 53 Binnig G K, Bruggere J, Haberle W, et al. Investigation and/or manipulation device. US Patent. 147867, 1999-3-17
- 54 Binnig G K, Rohrer H, Vettiger P, et al. Mass-storage applications of local probe arrays. US Patent. 5835477, 1998-11-10
- 55 Vettiger P, Brugger J, Despont M, et al. Ultrahigh density, high-data-rate NEMs-based AFM data storage system. *J Microelectron Eng*, 1999, 46: 11~17
- 56 Lutwyche M, Andreoli C, Binnig G K, et al. 5×5 2D AFM cantilever arrays: a first step towards a terabit storage device. *Sensors & Actuators*, 1999, A73: 89~94
- 57 Terris B D, Rishton S A, Mamin H J, et al. Atomic force microscope-based data storage: track servo and wear study. *Appl Phys A*, 1998, 66: S809 ~ S813
- 58 Matusmoto K, Gotoh Y, Maeda T, et al. Room-temperature single-electronic memory made by pulse-mode atomic force microscopy nano oxidation process on atomically flat α -alumina substrate. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(2): 239 ~ 242
- 59 He S T, Xie S S, Yao J N, et al. Self-assembled two-dimensional superlattice of Au/Ag alloy nanocrystals. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(1): 150~152
- 60 Zhang Y P, Yan L, Xie S S, et al. Formation of ordered Ge quantum dots on the $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ surface. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(20): 3317 ~ 3319
- 61 Li J L, Jia J F, Liang X J, et al. Spontaneous assembly of perfectly ordered identical-size nanocluster arrays. *Phys Rev Lett*, 2002, 88(6): 066101

(2002-04-09 收稿, 2002-07-02 收修改稿)