

# 先进大容量存储技术

魏家琦 柳洋 赵巍胜<sup>†</sup>

(北京航空航天大学 集成电路科学与工程学院 北京 100191)

2021-09-22收到

<sup>†</sup> email: weisheng.zhao@buaa.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20211203

## Advanced mass storage technologies

WEI Jia-Qi LIU Yang ZHAO Wei-Sheng<sup>†</sup>

(School of Integrated Circuit Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**摘要** 硬盘驱动器作为当前大容量数据存储的主要载体,是一种基于磁存储技术的电子设备。随着物联网以及云计算的快速发展,传统的硬盘驱动器已经无法满足日益增长的存储需求。因此,近十年来,各大厂商致力于研发新型磁存储技术,并于近期推出了新的产品。文章将从传统硬盘驱动器的结构出发,具体分析传统磁存储面临的主要瓶颈,详细介绍当前最为瞩目的能量辅助磁记录技术,并对大容量存储的未来进行展望。

**关键词** 硬盘驱动器,大容量存储,能量辅助磁记录,微波辅助磁记录,热辅助磁记录

**Abstract** Hard disk drives, which are based on magnetic storage technology, are currently the main carriers of mass information. With the rapid development of the Internet of Things and cloud computing, conventional hard disk drives cannot fulfill the increasing demand for data storage. As a consequence, industries are devoting their efforts to develop new storage technology, and various new products have been launched. Starting from the structure of conventional hard disk drives, this article will give a detailed description of the main bottlenecks faced by conventional magnetic storage, then introduce energy-assisted magnetic recording technology, which has attracted great attention in recent years, and finally provide some insight into the future of mass storage.

**Keywords** hard disk drive, mass storage, energy-assisted magnetic recording, microwave-assisted magnetic recording, heat-assisted magnetic recording

## 1 引言

基于磁存储技术的硬盘驱动器(下文简称硬盘)是当下最主要的数据载体。图1(a)展示了一个完整硬盘的主要结构,包含磁盘介质、磁头、主轴马达和音圈马达。磁盘介质的核心是磁性材料,用于储存数字信息。如图1(b)所示,每一个存储单元包含一定数目的磁性颗粒,它们的磁矩方向代表着数字信息中的“1”和“0”;磁头则是

非常微小的部分,执行数据的读写。此外,硬盘的内部有两个电机,一个是主轴电机,另一个是音圈马达。主轴电机可以驱动盘片稳定旋转,使磁头受到稳定的空气浮力,悬浮于硬盘介质上方。音圈马达则主要负责磁头臂的移动,硬盘在工作时靠伺服电机来控制音圈马达的动作,使磁头臂准确寻迹。

1956年,IBM推出了历史上第一个硬盘产品IBM 350 Disk Storage,是现代硬盘的雏形。它有相当于两个冰箱的体积,重量高达1吨,储存容

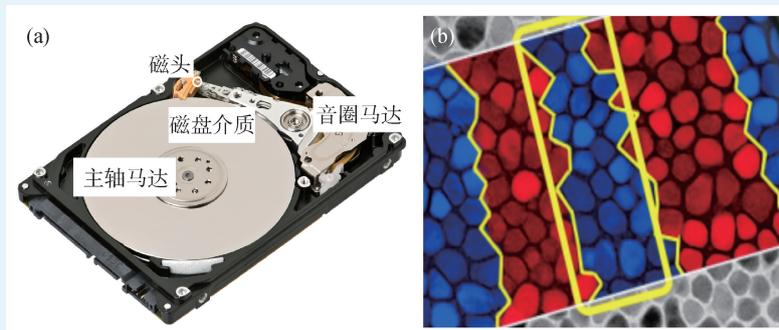


图1 (a)硬盘结构；(b)存储介质的微观图像，红色和蓝色区域代表磁矩指向不同的存储单元<sup>[1]</sup>

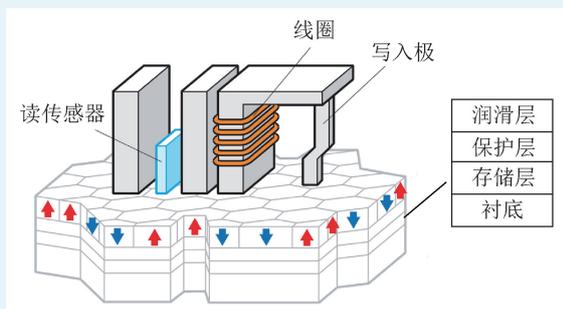


图2 硬盘磁头及存储介质的核心结构<sup>[4]</sup>

量只有 4.4 MB。IBM 350 Disk Storage 配备了 50 枚直径 24 英寸(约 61 cm)的大尺寸铝合金盘片用于存储信息，盘片表面涂有磁性材料，硬盘工作时盘片高速旋转，磁头就能读出磁信号的变化<sup>[2]</sup>。经过近 60 年的发展，硬盘的体积不断缩小，同时存储容量快速提升。2020 年，全球硬盘厂商交付了 2.59 亿个硬盘设备，总出货容量已经达到了 1 ZB<sup>[3]</sup>。

然而，传统硬盘的存储密度近年来已经接近极限(约 1 Tb/in<sup>2</sup>, in 表示英寸)。因此，以西部数据和希捷为代表的各硬盘厂商纷纷投入巨资研发新型存储技术，主要包括叠瓦式磁记录(shingle magnetic recording, SMR)、二维磁记录(two-dimensional magnetic recording, TDMR)、点阵式磁记录(bit-patterned magnetic recording, BPMP)以及能量辅助磁记录(energy-assisted magnetic recording)。其中，叠瓦式磁记录和点阵式磁记录分别通过磁道重叠及存储单元隔离的方法对盘片存储信息的方式进行优化。二维磁记录则在磁头中加入多个磁信号读取元件(磁阻器件)，详细分析磁道

间的信号，从而当磁道宽度进一步变窄后硬盘仍可以稳定地读取存储的数据。相比传统的硬盘存储架构，这三种新型磁记录技术对整个硬盘驱动器制造工艺的改变较小，易于应用，但是对于磁记录密度提升的幅度有限。能量辅助磁记录则是通过向存储介质注入能量辅助磁场完成信息的写入，磁头构造相比传统硬盘有较大差异，有望将硬盘存储面密度提升一个数量级，因此备受瞩目。

接下来我们首先从传统硬盘的结构出发，阐述硬盘发展面临的瓶颈。之后详细介绍当前最为瞩目的两种能量辅助磁记录技术，即微波辅助磁记录(microwave-assisted magnetic recording)以及热辅助磁记录(heat-assisted magnetic recording)，并对这两种存储技术的发展前景进行讨论。

2 传统硬盘的结构以及面临的问题

硬盘的核心技术在于磁头和存储介质。图 2 展示了传统硬盘中磁头和磁盘介质的详细结构。硬盘磁头主要包含磁写头以及磁读头两个部分，磁写头由铁磁材料和缠绕其上的电流线圈组成。执行写操作时，通过改变线圈中通入电流的方向可以改变写入极产生的磁场方向，利用这一磁场控制磁盘介质上存储单元的磁化方向，实现数据写入。磁读头的核心则是基于巨磁阻(giant magnetoresistance)或隧穿磁阻(tunneling magnetoresistance)效应的磁阻传感器(reader sensor)。在盘片转动时，不同指向的磁存储单元会产生不同方向的磁场，改变磁阻器件的电阻，进而读出数据。

磁盘介质由上至下主要包含 4 层，分别是润滑层、保护层、存储层以及衬底<sup>[5]</sup>。润滑层为全氟聚醚(perfluoropolyethers, 缩写为 PFPE)，是较为常见的机械元件润滑剂，用于抵御腐蚀以及减小机械磨损，厚度大约为 1—2 nm。润滑层下面是保护层，是类金刚石材料，最常用的是氮化

碳，具有极高的硬度和优良的耐磨性。数据信息的存储层则由具有极高磁各向异性的材料构成。硬盘诞生之初采用的是水平磁记录模式，即存储介质具有面内磁各向异性。然而，受超顺磁效应的影响，存储单元横向尺寸的减小会严重影响磁矩的稳定性。因此，目前硬盘广泛采用垂直磁记录模式，存储介质具有垂直磁各向异性，比如CoPt以及FePt合金。

随着硬盘磁存储密度达到1 Tb/in<sup>2</sup>，垂直磁记录面临着一些难以解决的困境。图3(a)是磁记录介质的微观图片。在硬盘中，一定数目的磁性颗粒记载了一个比特位的信息。如果需要提升存储密度，那么每一个比特位所占有的面积就会缩小，进而所包含的磁性颗粒数量也会减小。而研究表明，硬盘信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)的大小同每比特位所拥有的介质颗粒数目成正比<sup>[5]</sup>。因此，若要在提升硬盘存储密度的同时保持信噪比不变，介质颗粒的尺寸就必须缩小。另一方面，数据记录的稳定性是存储器重要的性能指标之一。图3(b)展示了磁矩处于不同角度时磁介质颗粒能量的大小。可以看到，磁矩向上和磁矩向下两个状态之间存在着明显的能量壁垒 $E_b$ ，其大小等于磁各向异性常数 $K_u$ 和介质颗粒体积 $V$ 的乘积。因此，介质颗粒体积的减小势必会使能量势垒 $E_b$ 降低，于是当施加一定强度外磁场或热扰动时，磁矩的方向就会更容易地发生改变，严重影响硬盘存储数据的稳定性，除非选用具有较高 $K_u$ 的存储介质。不幸的是，具有较高 $K_u$ 的材料同时具有较大的矫顽场，这意味着我们必须施加更大的磁场才能使磁性颗粒的磁矩翻转。受限于

较小的物理尺寸，当前的磁头都无法产生足够强的磁场，如图3(c)所示。综上所述，随着硬盘存储密度的提升，其各方面参数已经越来越接近理论极限。因此，各大厂商一直在寻求新的提升硬盘存储密度的方法，接下来本文将详细介绍两种新型大容量存储技术：微波辅助磁记录和热辅助磁记录。

### 3 微波辅助磁记录

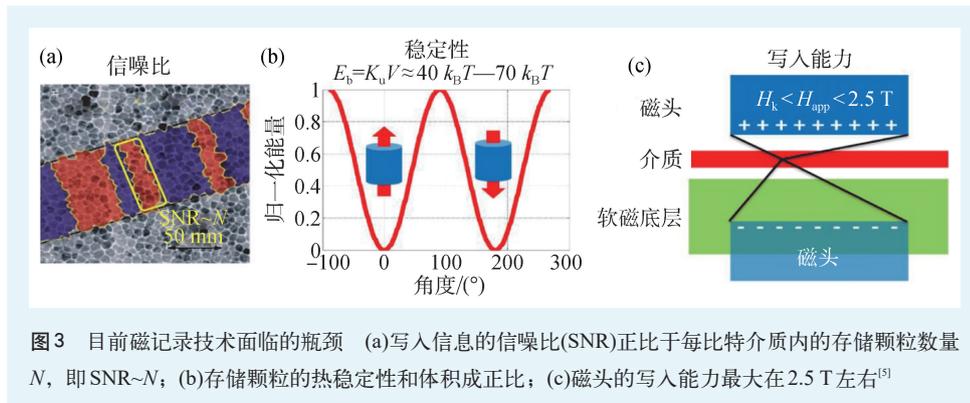
#### 3.1 微波辅助磁翻转效应的理论研究

微波辅助磁记录技术的核心是通过极高频率的交变磁场(1—100 GHz)向存储单元注入能量。若磁场变化频率与存储介质本征共振频率相近，则存储介质可以吸收绝大部分交变磁场能。当存储单元的能量升高后，磁矩处于一个亚稳定态，较小的外加磁场即可完全翻转磁矩。这种现象称为微波辅助磁翻转效应(microwave-assisted switching, MAS)<sup>[6]</sup>。

2003年，Thirion等人在六角密堆(hcp)结构的Co颗粒中发现了微波辅助磁翻转现象<sup>[7]</sup>。如图4所示，Co颗粒的直径约为20 nm，附着于铌薄膜制成的约瑟夫森微桥结上。约瑟夫森微桥结是超导量子干涉仪(SQUID)中的重要器件，用来探测磁性的微弱变化。如果在其两端施加交变电流 $\delta I_{RF}$ ，微桥结附近会产生微波磁场 $\delta H_{RF}$ 。实验结果表明，微波磁场的存在极大地降低了Co颗粒的临界磁翻转场。

随后，类似的现象在其他的软磁材料比如NiFe及FeCo合金薄膜中被发现，证实了微波辅助磁翻转效应的普遍性<sup>[8-10]</sup>。

2009年Nozaki等人利用铁磁共振手段在具有垂直磁各向异性的Co/Pd多层膜中发现水平方向的微波磁场可以促进多畴态的形成，进而辅助磁翻转<sup>[11]</sup>。如前所述，为了



度，硬盘存储介质为具有垂直磁各向异性的材料，因此，Nozaki 等人的研究结果直接推动了微波辅助磁翻转效应在存储领域的应用进程。

2012 年，Okamoto 等人在纳米结构中观测到了微波辅助磁翻转现象，图 5(a)为测试器件的结构示意图<sup>[12]</sup>。Ta/Pt/Co/Pt 薄膜生长于石英玻璃衬底上，经过一系列微纳加工流程，Co/Pt 被刻蚀成纳米尺寸的圆柱，Ta/Pt 层则被刻蚀为霍尔十字条，用于反常霍尔效应(anomalous Hall effect, AHE)测试。反常霍尔效应测试是自旋电子学中一种常见的材料表征手段，由于材料的磁性状态和反常霍尔电压有着紧密的关联，因此可以通过提取器件的霍尔电压观测材料磁性的变化。为了施加微波

磁场，他们又先后沉积了 SiO<sub>2</sub> 绝缘层以及宽度为 2 μm 的 Cu 条带，通过交变信号发生器向 Cu 条带注入一系列电流脉冲，使得 Cu 条带附近产生极化方向和条带垂直的线极化微波磁场。图 5(b)展示了器件在不同频率微波磁场下的反常霍尔信号，可以看到随着微波磁场频率的增加，器件的临界翻转磁场不断地减小，证实微波磁场对于纳米器件的磁翻转同样具有辅助作用。

### 3.2 基于自旋纳米振荡器的微波辅助磁记录技术

利用微波辅助磁翻转效应可以有效降低磁性材料的临界翻转场，这为硬盘的进一步扩容提供了希望，但是在当前高密度存储硬盘中磁头的尺寸非常小，如何在其中加入高频微波源成为一个棘手的问题。

2003 年，Kiselev 等人首次在纳米尺度的磁自旋阀中观测到高频微波发射的现象<sup>[13]</sup>。此类器件

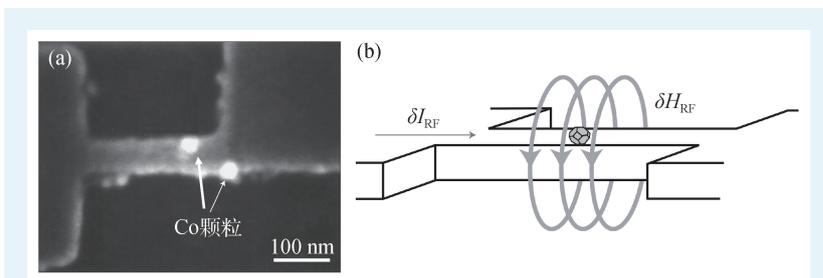


图4 微波辅助磁翻转效应首次在 Co 颗粒上被发现 (a)Co 颗粒附着于约瑟夫森微桥结上，约瑟夫森微桥结两端施加交变电流，进而产生微波磁场；(b)微波磁场的存在有效降低了 Co 颗粒的临界翻转场<sup>[7]</sup>

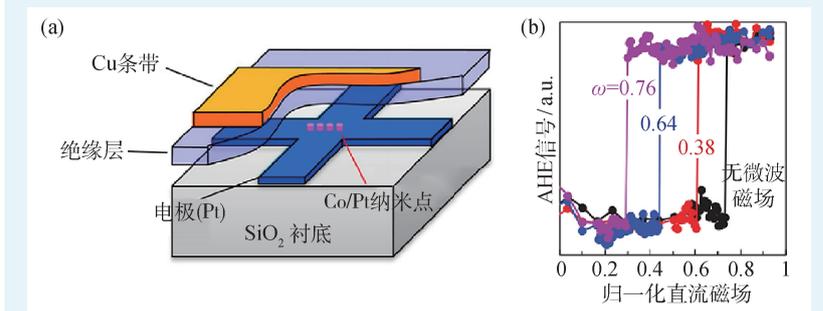


图5 微波辅助磁翻转效应可以在具有垂直磁各向异性的纳米结构中实现 (a)器件结构示意图，其中 Co/Pt 纳米柱具有垂直磁各向异性，Cu 条带用来施加微波磁场，霍尔条(电极)用于进行 AHE 测试；(b)不同电流频率下测得的器件的 AHE 信号<sup>[12]</sup>

被称为自旋纳米振荡器，迅速引起了产业界的广泛关注。自旋纳米振荡器的核心为纳米磁性多层膜，主要包括磁性固定层、非磁间隔层以及磁性自由层。当一定大小的电流注入到器件中时，磁性固定层会先将其极化为自旋流，进而对磁性自由层的磁矩施加自旋转移矩。与此同时，自由层磁矩还受到阻尼矩的作用，当自旋转移矩完全抵消阻尼矩时，磁矩的动力学过程则主要由进动矩决定，会发生稳定进动，并通过巨磁阻或隧穿磁阻等磁阻效应引起器件电阻发生周期性变化，最终产生微波电压信号。

和传统的微波器件相比，自旋纳米振荡器具有体积小、易集成以及宽频可调等显著优势。在无线通讯领域有着显著的潜力。另一方面，在自旋纳米振荡器磁自由层磁矩高频进动的同时，围绕器件周围会产生高频的圆极化微波磁场。受此启发，2007 年朱建刚等人首次提出将自旋纳米振荡器和硬盘磁头相结合的构想<sup>[14]</sup>。实验表明，自旋纳米振荡器产生的微波磁场可以显著降低磁介

质的临界翻转场，使得将具有更高 $K$ 的磁性材料作为硬盘存储介质成为可能，可以大幅度提升硬盘存储密度。此外，通过理论仿真，他们还发现这一架构将可以显著减小传统硬盘磁记录过程中产生的边界弯曲现象，如图6所示。这有助于减小磁道宽度，提升硬盘存储的轨道密度。

第一台应用微波辅助磁翻转效应的磁记录样机于2011年问世<sup>[5]</sup>。在这一样机中，磁头与自旋转移纳米振荡器相融合，自旋转移纳米振荡器用于产生高频微波磁场。利用这一系统，他们实现了高密度磁记录，轨道宽度和自旋纳米振荡器的宽度接近，只有60 nm。成功证实了将自旋纳米

振荡器用于硬盘磁记录的可行性。

目前，微波辅助磁记录系统多采用垂直型自旋转移纳米振荡器作为微波磁场的发生源<sup>[4]</sup>。图7展示了嵌入自旋转移纳米振荡器的磁写头结构，其中，自旋转移纳米振荡器位于写入极与尾部屏蔽体之间，包含电流极化参考层、非磁间隔层、微波场发生层(field generation layer, FGL)以及与FGL相耦合的垂直磁层。微波场发生层即传统自旋纳米振荡器中的磁自由层。为了获得较大的微波磁场，微波场发生层的厚度较厚，一般为10—15 nm。此外，不同于传统的自旋纳米振荡器，这一膜层体系中还包含另一垂直磁层，研究表明，这一垂直磁层的加入可以显著降低微波磁场的噪音，提高微波磁场的产生效率<sup>[5]</sup>。

2017年，存储行业巨头西部数据公司宣布将微波辅助磁翻转效应应用于下一代大容量存储技术。此外，西部数据还首先提出在硬盘中填充氦气以降低内部的气体阻力，磁盘的转轴和磁头臂所受到的干扰也更多，有助于提升读写稳定性。通过不断的技术迭代，2019年西部数据正式推出了容量高达18 TB的商用硬盘产品DC H550，并预计于2025年将这一数值提升到40 TB。

### 3.3 微波辅助磁记录技术的最新进展

基于自旋纳米振荡器的微波辅助磁记录技术被证明了其可行性，引起研究学者的广泛关注。2017年Bai等人通过微磁仿真手段研究了如何将当前非常热门的分层式存储介质应用于微波辅助磁记录<sup>[15]</sup>。如图8(a)所示，在传统的分层式存储介质中，每一个存储单元在垂直方向被分割为几个部分，并且这几个部分的垂直磁各向异性由上至下逐渐增加。因此，上层的磁介质非常容易被翻转，而下层的磁介质则可以通过交换耦合作用被上层的磁介质翻转，这样的结构有效降低了存储单元的临界

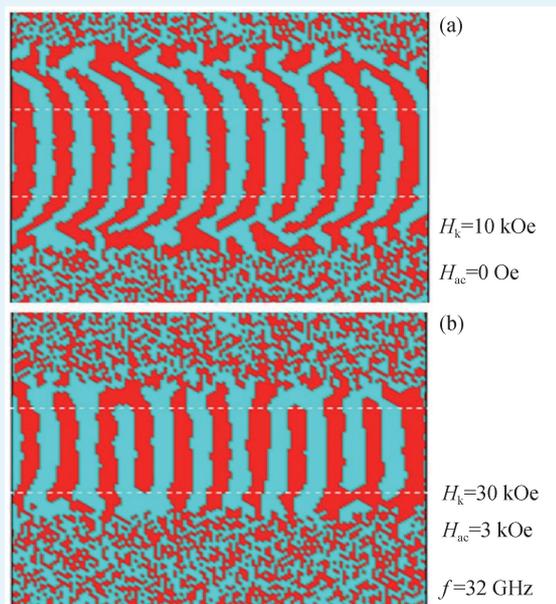


图6 (a)无微波磁场辅助下的磁记录图像；(b)微波磁场辅助下的磁记录图像<sup>[14]</sup>

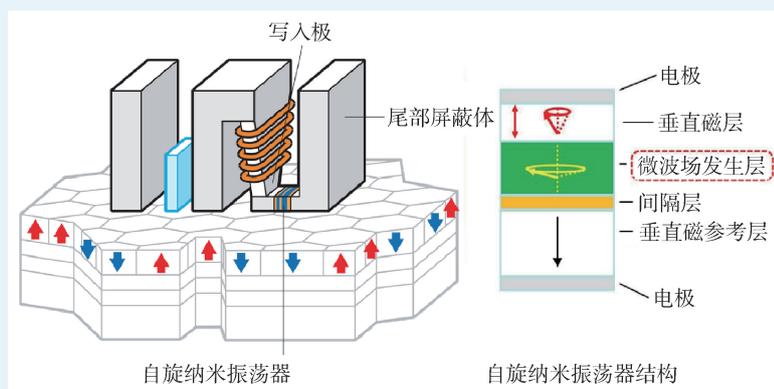


图7 微波辅助磁记录系统的结构<sup>[4]</sup>

翻转场，提升了磁头的写入能力。然而在微波辅助磁记录系统中，自旋纳米振荡器的体积非常小，其产生的微波磁场会在垂直于介质表面的方向迅速衰减。基于此，Bai等人设计了一种“Notch”型分层式存储介质。在这一方案中存储介质分为四层，前三层(由上至下)的垂直磁各向异性依次降低，第四层具有最高的垂直磁各向异性。这样的磁介质结构

有效利用了微波磁场的梯度特性，前三层存储介质均可以在微波磁场的辅助下翻转，第四层则通过交换耦合作用被翻转。此外，仿真结果还表明，将这种结构的分层式存储介质用于微波辅助磁记录系统中可以显著提升磁记录的信噪比及磁道密度。

为了进一步提升微波辅助磁记录系统的存储密度，2019年Chan等人提出了3D-MAMR的构想<sup>[16]</sup>。如图8(b)所示，存储单元上下堆叠且具有不同大小的垂直磁各向异性。由于微波磁场的频率需要和存储介质的本征铁磁共振(ferromagnetic resonance, FMR)频率相匹配才能诱导磁矩发生共振，减小临界翻转磁场。因此，改变微波磁场的频率可以对存储单元实现选择性的翻转。自旋纳米振荡器产生微波磁场的频率可以通过调节注入电流的大小改变。

除了存储介质的结构设计，优化自旋纳米振荡器的微波性质同样非常重要。如前所述，为了保证存储介质的热稳定性，随着存储密度的提高，厂商不得不采用具有更高垂直磁各向异性的材料。在微波辅助磁记录技术中，这意味着自旋纳米振荡器必须输出更高频率的微波信号。根据Kittel公式<sup>[13]</sup>，自旋纳米振荡器微波信号的频率也即自由层磁矩进动的频率取决于磁有效场的大小，因此增加外磁场的强度是提升微波磁场频率最直接的方法<sup>[5]</sup>。然而受到体积的限制，磁头可以施加的磁场被局限在一定的范围内。2018年，北京航空航天大学王梦醒等人提出一种具有复合

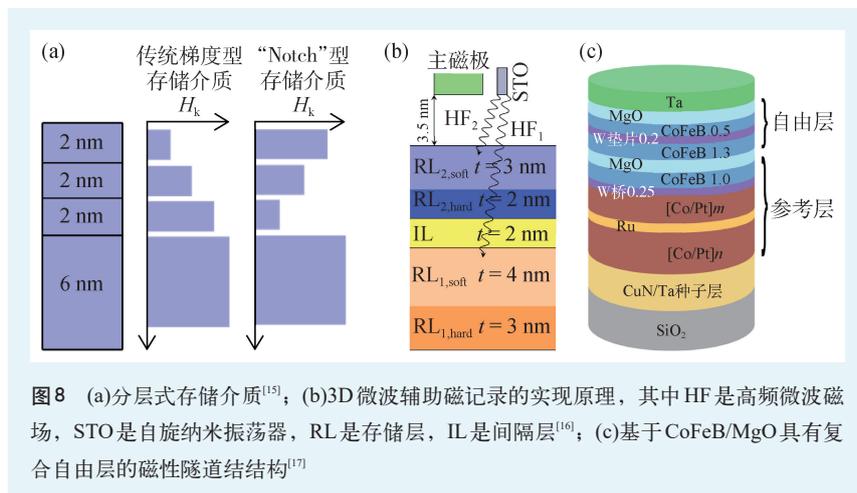


图8 (a)分层式存储介质<sup>[15]</sup>; (b)3D微波辅助磁记录的实现原理，其中HF是高频微波磁场，STO是自旋纳米振荡器，RL是存储层，IL是间隔层<sup>[16]</sup>; (c)基于CoFeB/MgO具有复合自由层的磁性隧道结构<sup>[17]</sup>

自由层的垂直磁隧道结构<sup>[17]</sup>。如图8(c)所示，磁性自由层中插有一原子层厚度的W，双W/CoFeB以及双CoFeB/MgO界面为器件带来了非常强的界面垂直磁各向异性。这一结构有望用于实现高频率自旋纳米振荡器，进一步提升微波辅助磁记录系统的存储密度。

## 4 热辅助磁记录

### 4.1 热辅助磁翻转效应的理论研究

热辅助磁记录是另外一种能量辅助磁记录模式。不同于微波辅助磁记录技术，这里的能量来源于激光。事实上利用激光完成或辅助磁场存储信息并不是一个新鲜的事物。20世纪70年代，荷兰飞利浦(Philips)公司率先开展将激光用于信息存储的研究，1979年成功推出首个相关产品，也就是我们所熟知的光盘(optical discs)<sup>[18]</sup>。然而，最初的光盘是由非磁性介质构成的，经激光照射后会形成“凹坑”，光盘表面事实上是凹凸不平的，代表所存储的数字信息。因此，在光盘中信息的写入完全由激光完成。1983年，Immink和Braat展示了一种新型的记录模式，他们在光盘的基片上镀了一层磁性材料，形成所谓的“磁光盘”(magneto-optical discs)<sup>[19]</sup>。在写入信息时，激光和磁场共同作用，完成信息的写入，这事实上就是热辅助磁记录的雏形。然而，无论是普通光盘或是磁光盘，都只经历了短暂的辉煌。受到衍射的限

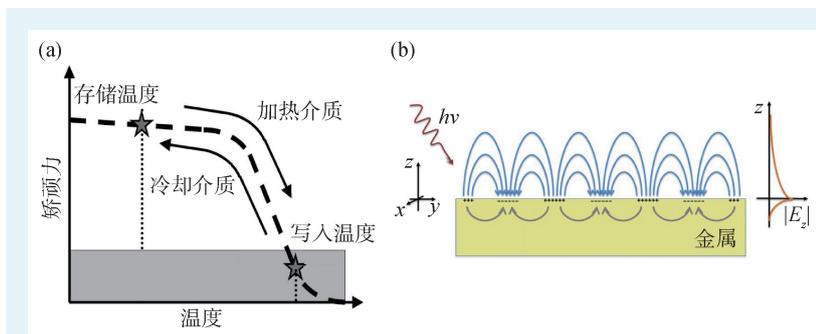


图9 (a)热辅助磁记录的基本原理；(b)表面等离子体共振效应<sup>[21]</sup>

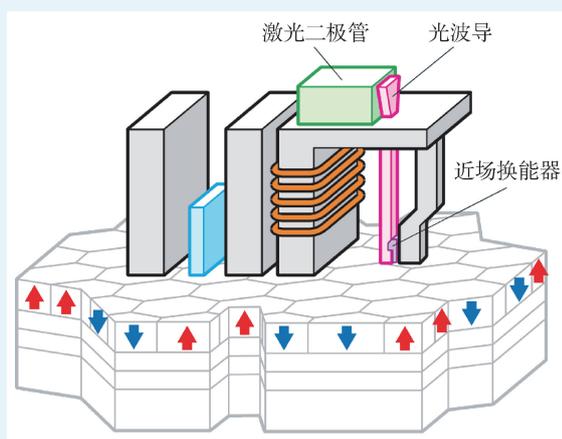


图10 基于等离子体共振效应的热辅助磁记录系统结构<sup>[4]</sup>

制，激光光束最小只能聚集于几百纳米的范围，光盘的容量受到了很大的制约。而与此同时，在巨磁阻效应以及隧道磁阻效应的推动下，硬盘的存储密度在飞速提升，因此光盘逐渐淡出了人们的视野。2012年，希捷公司将沉寂多年的热辅助磁记录推到了聚光灯下<sup>[20]</sup>。特殊的是，希捷提出将热辅助磁记录技术和硬盘相结合，同时利用表面等离子体共振效应(surface plasmon resonance, SPR)将激光能量汇聚于纳米尺度，有望实现超高密度数据存储。

如图9(a)所示，在热辅助磁记录过程中，激光脉冲将具有高垂直磁各向异性的存储单元加热至居里温度附近(通常为400—600℃)，此时磁矩能量较高，磁矫顽场也即临界磁翻转场非常低，磁矩易于翻转。与此同时，激光未照射区域的存储单元矫顽力仍然比较大，写入磁场不会对其造成影响。之后，存储介质的温度迅速降低，磁矩指向趋于稳定，写入的数据信息就被保存下来<sup>[21]</sup>。通过这一手段，较小的外加磁场即可翻转具有较

高垂直磁各向异性的存储单元，有助于实现更高的存储密度。另一方面，表面等离子体共振效应是指在入射光频率与金属表面自由电子的振动频率相匹配时，自由电子产生相干振荡进而产生表面等离子体的一种现象，如图9(b)所示。利用表面等离子体共振效应，激光能量可以转换为热能并且根据金属材料的尺寸加热不同大小的区域。

为热能并且根据金属材料的尺寸加热不同大小的区域。

## 4.2 基于等离子体共振效应的热辅助磁记录系统结构

相比微波辅助磁记录，希捷提出的热辅助磁记录与传统磁记录之间有着更大的差异。应用热辅助磁记录技术的硬盘驱动器引入了激光传导系统(laser delivery system, LDS)，主要包含激光二极管、光波导以及近场换能器，其结构如图10所示。在写入数据的过程中激光二极管首先发射出宽度在百皮秒左右，尺寸在微米级别的激光脉冲，之后通过光波导汇聚于近场换能器上，利用表面等离子体共振效应激发近场换能器表面的电子产生共振。最终这一能量被局限于直径约50 nm的空间范围内，加热待写入信息的比特位。之后，磁头产生磁场脉冲翻转磁矩，同时写入区域的介质温度逐渐下降，磁矩趋于稳定。这一过程虽然复杂，但希捷已经成功将其压缩在1 ns以内<sup>[4]</sup>。

### 4.2.1 激光光源

热辅助磁记录系统对激光光源有着很高的要求：首先，为了实现快速的信息写入，激光光源需要输出尽量窄的激光脉冲；其次，激光脉冲必须和磁场脉冲保持一定的间隔才能实现稳定的信息写入，因此激光脉冲频率需要具有极高的稳定性。激光光源可按工作物质分为固体激光源(晶体和钕玻璃)、气体激光源(包括原子、离子、分

子、准分子)、液体激光源(包括有机染料、无机液体、螯合物)和半导体激光源4种类型。其中,半导体激光源体积小、寿命长且易于集成,因此是热辅助磁记录系统中理想的激光发生器。半导体激光源又有多种类型,包括双异质结激光器、分布反馈激光器以及大光腔激光器等,这里不一一介绍。热辅助磁记录系统中主要使用增益开关式激光二极管(gain switched diode, GSD)。GSD可以产生频率稳定的连续脉冲,配合锁模技术最窄脉冲宽度可以达到30 ps左右<sup>[22]</sup>。

#### 4.2.2 光波导

如上所述,光盘的没落是因为传统的利用透镜汇聚激光的手段只能将光斑缩小至衍射极限附近(分辨率大约为半个波长)。如蓝光存储采用405 nm的激光,意味着其最小光斑尺寸在百纳米以上,而如果要在硬盘中实现Tb/in<sup>2</sup>以上的存储面密度,每比特存储单元的特征尺寸要小于25 nm。因此,激光光斑也必须被局限在这样狭小的空间内。为了将激光脉冲的能量精准传导至待写入的存储单元中,希捷提出了结合光波导和近场换能器,对激光能量进行两次汇聚的方案<sup>[4]</sup>。光波导用于将激光光束进行初步缩小,这里通常使用一种平面波导,即固体浸没透镜(planar solid immersion mirror, PSIM)。固体浸没透镜的结构如图11所示,包含氧化钽核心层,上下覆盖氧化铝包层,整体被刻蚀成抛物线的形状。由于氧化钽的折射率高于氧化铝,所以当激光入射至固体浸没透镜侧壁时,会发生全反射,最终汇聚于固体浸没透镜的尖端处。

#### 4.2.3 近场换能器

受表面等离子体共振效应的启发,希捷在热辅助磁记录系统中加入了近场换能器(near field transducer, NFT)。近场换能器通常为金、银、铜、铝等材料制成的纳米金属薄片,根据其形状主要分为两类:一类具有孔洞的外形特征,另一类则具有天线的外形特征。1991年, Betzig 等人<sup>[24]</sup>首先将具有圆形孔洞的近场换能器应用

于磁记录中,他们将光纤的末端制成圆锥状,出光口直径约为100 nm,周围覆盖有铝薄膜。利用波长515 nm、功率约6 mW的激光,他们成功翻转了直径约60 nm的磁畴,存储密度约45 Gb/in<sup>2</sup>。然而,由于这一结构的近场换能器耦合效率较低,实际数据写入速率仅为10 kHz,且激光传输至尖端的能量小于50 nW。为了提升近场换能器的耦合效率,研究者们随后提出了各种不同形状的近场换能器,比如C型、L型以及三角形等近场换能器<sup>[25-28]</sup>。此外, Grober 等人<sup>[29]</sup>在1997年提出了天线型近场换能器的概念,同样引发了一系列关于天线形状对于激光耦合效率的研究<sup>[30-32]</sup>。各种类型换能器的形状如图12所示。

### 4.3 热辅助磁记录技术的最新进展

如前所述,和传统磁记录相比,热辅助磁记录系统中引入了激光传导系统,磁头结构非常复杂。围绕如何优化其磁头结构,实现更高的激光传导效率,人们开展了一系列的研究。2018年, Chow 等人提出了一种新的磁头设计,这类磁头由对称的两个写入极组成,如图13所示<sup>[33]</sup>。更为特殊的是,两个写入极之间存在纳米尺度的磁缝

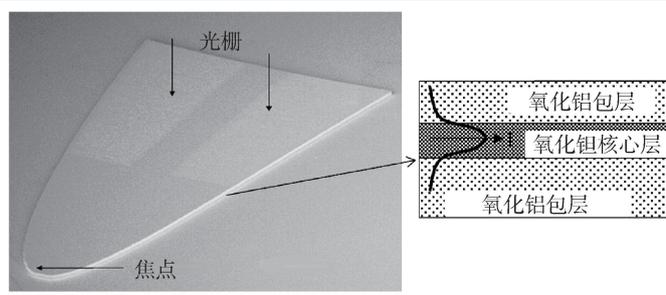


图11 固体浸没透镜的结构<sup>[23]</sup>

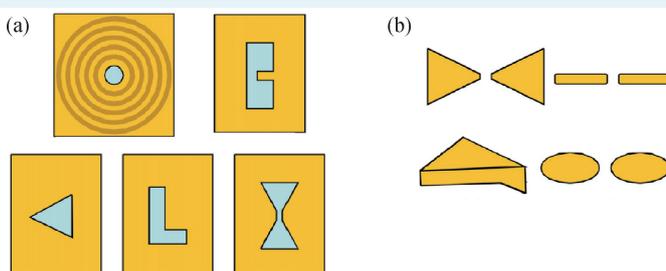


图12 (a)孔洞型近场换能器; (b)天线型近场换能器<sup>[12]</sup>

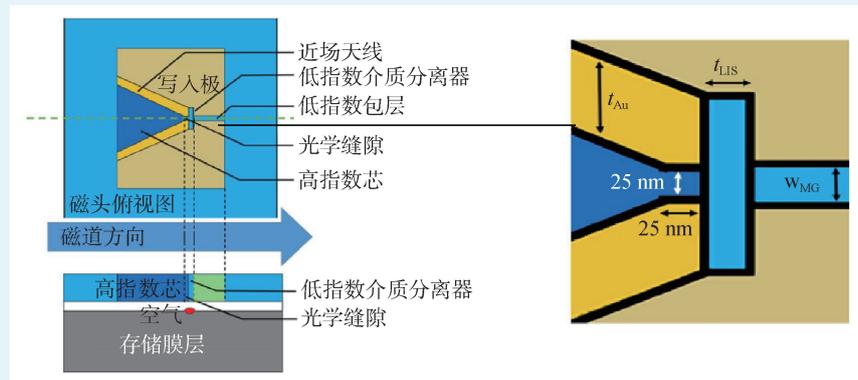


图13 分体式磁头设计<sup>[33]</sup>

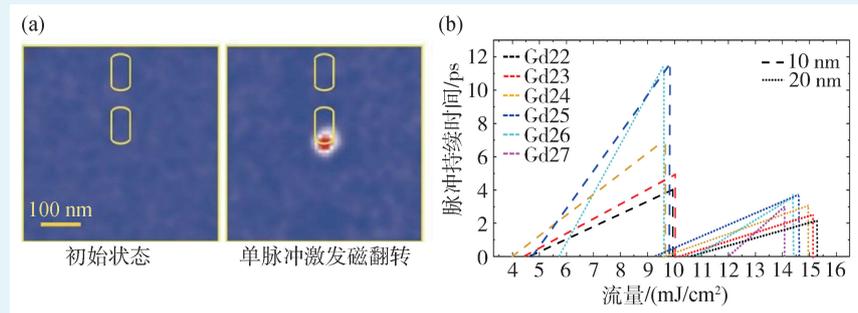


图14 (a)利用表面等离子体共振效应翻转纳米磁畴<sup>[36]</sup>；(b)不同组分的10 nm GdFeCo合金薄膜的全光翻转相图(三角形区域代表翻转区域)<sup>[37]</sup>

隙，磁缝隙内填充了低指数的介电材料，被称为低指数率介质分离器(low-index dielectric separator, LIS)。此外，近场换能器也分为对称的两个部分，中间形成约25 nm的光学缝隙，可以有效地将激光脉冲能量汇聚在纳米尺度区域内。这一分体式的磁头设计有利于保持磁写入场的横向梯度和幅值，有助于实现更高的磁道密度。此外，低指数介质分离器的引入还有效减少了由于近场换能器和写入极靠近带来的光学损耗。

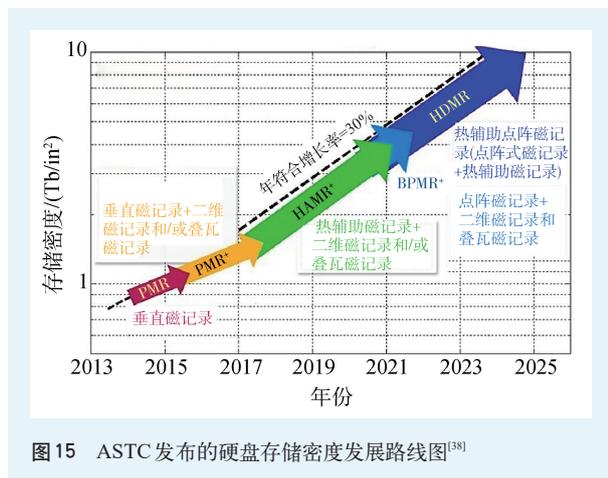
近场换能器作为存储介质的直接热源对于热辅助磁记录至关重要。为此，Datta等人做了大量的工作，详细比较了不同形状近场换能器的优缺点<sup>[34]</sup>。研究表明，E型天线容易获得更高的能量耦合效率以及温度梯度。此外，他们还发现将天线侧壁做成楔形可以将热量汇聚于更小的区域，并且降低在激光加热瞬间近场换能器达到的峰值温度，提升近场换能器的寿命。

在热辅助磁记录中，激光和磁场需要共同

作用才能翻转磁矩，实现信息写入，因此结构复杂。而事实上，1996年Beaurepaire等人的研究表明激光本身就有操控磁矩的潜力<sup>[35]</sup>，那么我们是否可以利用这一效应实现全光磁记录？2016年，Liu等人在亚铁磁合金TbCo薄膜上制备了纳米金属天线作为近场换能器，利用单个飞秒激光脉冲成功翻转了直径约30 nm的磁畴，如图14(a)所示，证实了激光在纳米尺度操纵磁矩的可行性<sup>[36]</sup>。另一方面，上述工作都使用了飞秒超快激光脉冲，因为根据三温度模型，只有当脉冲宽度极窄(通常小于1 ps)时才能引起有效的磁光耦合，实现磁矩操控。然而，在没有锁模等复杂结构辅助的情况下，半导体激光器只能输出10 ps以上的激光脉冲。针对此问题，北京航空航天大学 and 法国国家科学院拉莫尔研究所联合探索了脉冲参数对全光磁翻转的影响<sup>[37]</sup>。如图14(b)所示，通过对亚铁磁合金组分及厚度进行优化后，宽度大于10 ps的激光脉冲仍然可以翻转磁矩，为未来全光磁记录指明了方向。

## 5 总结与展望

随着全球数据量的飞速增长，能量辅助磁记录取代传统磁记录成为必然的趋势，那么微波辅助磁记录和热辅助磁记录谁会成为未来主流大容量存储技术呢？事实上，两者都有着显著的优缺点。由于微波辅助磁记录技术不需要对现有硬盘产线进行大规模改动，因此其成本较低。但是另一方面，如前所述，为了在缩小记录单元尺寸的同时保证其热稳定性，厂商不得不选用具有更高磁各向异性的材料作为存储介质，意味着其本征



进动频率越来越高。因此，自旋纳米振荡器产生的微波磁场也必须有足够高的频率，这又依赖于磁头产生强磁场。所以微波辅助磁记录技术仍然有很大的局限性。而对于热辅助磁记录技术而言，激光脉冲可以大幅度降低写入信息所需要的翻转场，因此这种技术彻底摆脱了磁记录对强翻转磁场的依赖，理论上可以实现更高的磁记录密度。然而，热辅助磁记录与传统磁记录非常不同，结构复杂，生产成本高昂。除此之外，激光脉冲会显著提升数据记录过程中盘片的温度，带来不稳定的因素。

### 参考文献

- [1] Dobisz E A, Bandic Z Z, Wu T W *et al.* Proceedings of the IEEE, 2008, 96(11): 1836
- [2] Zhu J G. Materials Today, 2003, 6(7-8): 22
- [3] [https://overclock3d.net/news/storage/ssds\\_outsold\\_hdds\\_in\\_2020\\_despite\\_reduced\\_enterprise\\_ssd\\_shipments/1](https://overclock3d.net/news/storage/ssds_outsold_hdds_in_2020_despite_reduced_enterprise_ssd_shipments/1)
- [4] Nordrum A. IEEE Spectrum, 2018, 56(1): 44
- [5] Li H. Storage physics and noise mechanism in heat-assisted magnetic recording. Carnegie Mellon University, 2016
- [6] Okamoto S, Igarashi M, Kikuchi N *et al.* Journal of Applied Physics, 2010, 107(12): 123914
- [7] Thirion C, Wernsdorfer W, Maily D. Nature Materials, 2003, 2(8): 524
- [8] Nembach H T, Martín Pimentel P, Hermsdoerfer S J *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90(6): 062503
- [9] Moriyama T, Cao R, Xiao J Q *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90(15): 152503
- [10] Woltersdorf G, Back C H. Phys. Rev. Lett., 2007, 99(22): 227207
- [11] Nozaki Y, Narita N, Tanaka T *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95(8): 082505
- [12] Okamoto S, Kikuchi N, Furuta M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 109(23): 237209
- [13] Kiselev S I, Sankey J C, Krivorotov I N *et al.* Nature, 2003, 425(6956): 380
- [14] Zhu J G, Zhu X, Tang Y. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 44(1): 125
- [15] Bai X, Zhu J G. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1
- [16] Chan K S, Greaves S, Rahardja S. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(9): 1
- [17] Wang M, Cai W, Cao K *et al.* Nature Communications, 2018, 9(1): 1
- [18] Peek J B H, Bergmans J W M, Van Haaren J *et al.* Origins and successors of the compact disc: contributions of Philips to optical storage. Springer Science & Business Media, 2008
- [19] Immink K A, Braat J J. Journal of the Audio Engineering Society, 1984, 32(7/8): 531
- [20] Gao K Z, Wang X, Rausch T *et al.* From perpendicular magnetic recording to heat assisted magnetic recording. 2012 Digest APM-RC. IEEE, 2012, 1

除了能量辅助磁记录，近年来一些厂商还提出了一些新的存储方式比如叠瓦式磁记录、二维磁记录以及点阵式磁记录。这些技术手段在复杂程度和实现难度上低于能量辅助磁记录，可以在一定程度上提升硬盘的存储密度。而能量辅助磁记录技术吸引人的地方在于它和这些技术相兼容，有望实现更高的存储密度。基于这一构想，先进存储技术联盟(Advanced Storage Technology Consortium, ASTC)近期发布了硬盘存储密度路线图，如图15所示，HAMR<sup>+</sup>是将热辅助磁记录(HAMR)和二维存储技术或叠瓦式磁记录技术相结合，理论上存储密度可以达到5 Tb/in<sup>2</sup>。HDMR是将HAMR和点阵式磁记录技术相结合，理论上可以使硬盘存储面密度提升至10 Tb/in<sup>2</sup>，将存储容量提升一个数量级。综上，为了实现高性能且稳定的数据记录，多技术融合将是未来大容量存储器发展的必然趋势。硬盘存储密度的上限究竟在哪里？让我们拭目以待。

致谢 感谢北京航空航天大学冷群文教授和曹凯华助理教授在文章撰写过程中给予的宝贵意见。

- [21] Kryder M H, Gage E C, McDaniel T W *et al.* Proceedings of the IEEE, 2008, 96(11): 1810
- [22] Xu B, Wang H, Cen Z *et al.* IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1
- [23] Rottmayer R E, Batra S, Buechel D *et al.* IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 2417
- [24] Betzig E, Trautman J K, Harris T D *et al.* Science, 1991, 251(5000): 1468
- [25] Wang L, Uppuluri S M, Jin E X *et al.* Nano Letters, 2006, 6(3): 361
- [26] Tanaka K, Oumi M, Niwa T *et al.* Numerical simulation of the near-field optical head with a triangular aperture. International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Topical Meeting, IEEE, 2002, 320
- [27] Hirata M, Park M, Oumi M *et al.* Journal of the Magnetics Society of Japan, 2008, 32(2\_2): 158
- [28] Xu J, Xu T, Wang J *et al.* Optical Engineering, 2005, 44(1): 018001
- [29] Grober R D, Schoelkopf R J, Prober D E. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(11): 1354
- [30] Yu N, Cubukcu E, Diehl L *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 91(17): 173113
- [31] Matsumoto T, Anzai Y, Shintani T *et al.* Optics Letters, 2006, 31(2): 259
- [32] Matsumoto T, Shimano T, Saga H *et al.* Journal of Applied Physics, 2004, 95(8): 3901
- [33] Chow C M, Bain J A. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1
- [34] Datta A, Xu X. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(9S2): 09TA01
- [35] Beauraipaire E, Merle J C, Daunois A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76(22): 4250
- [36] Liu T M, Wang T, Reid A H *et al.* Nano Letters, 2015, 15(10): 6862
- [37] Wei J, Zhang B, Hehn M *et al.* Phys. Rev. Appl., 2021, 15(5): 054065
- [38] <https://hblok.net/blog/posts/2014/11/27/100tb-hdd-by-2025/>



## 一站式真空低温设备 及应用方案



VAT角阀



普发分子泵



安捷伦  
离子泵



VACGEN  
位移台



VACGEN  
微漏阀



VAT插板阀



普发质谱仪



住友  
低温泵



住友  
制冷机



TSL视窗



标准件

腔体

[www.zlvacuum.com](http://www.zlvacuum.com)

更多产品和联系方式可查看



联系人  
刘鑫