

浙江工业大学

计算机组成原理分组探究报告

2022/2023 (2)



实验题目 存储技术的过去与未来

学生姓名 陈王子、温家伟、周海帆、王之楚

学生学号 202103150503 、 202103151422、

202105120127、 202105080116

学生班级 大数据分析 2101 班

任课教师 范玉雷

提交日期 2023 年 6 月 3 日

目录

一、 存储历史	2
磁芯存储及更早的存储方式	3
硬盘存储	5

软盘存储与光盘存储 6

 3D NAND 闪存 8

二、 现代存储 9

 主存 9

 1. 随机存储器 (ram) 9

 2. 只读存储器 (rom) 10

 辅助存储器 10

 1. 硬盘驱动器 (hdd) 10

 2. 固态硬盘 (ssd) 10

 外存 10

 缓存 (Cache) 11

三、 国内存储 14

 长江存储 14

 长鑫存储 16

四、 未来存储 17

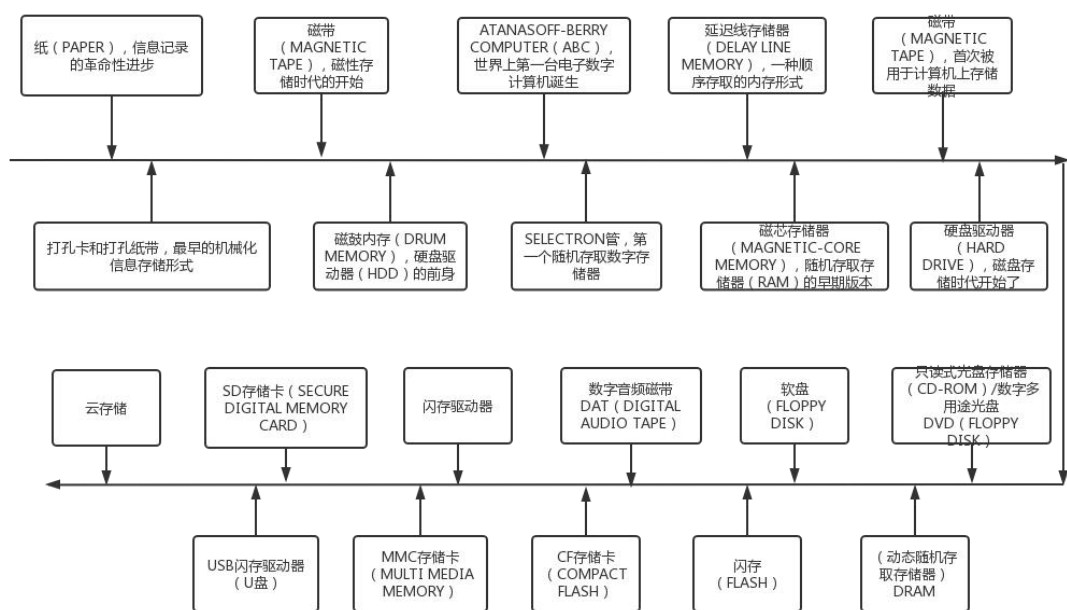
一、存储历史

随着科技的不断进步与发展，网络、计算和存储已经成为我们生活中无法分离的三大要素。而信息存储，作为这三个要素中历史最悠久的一部分，已经经历了漫长而璀璨的万年进化史。

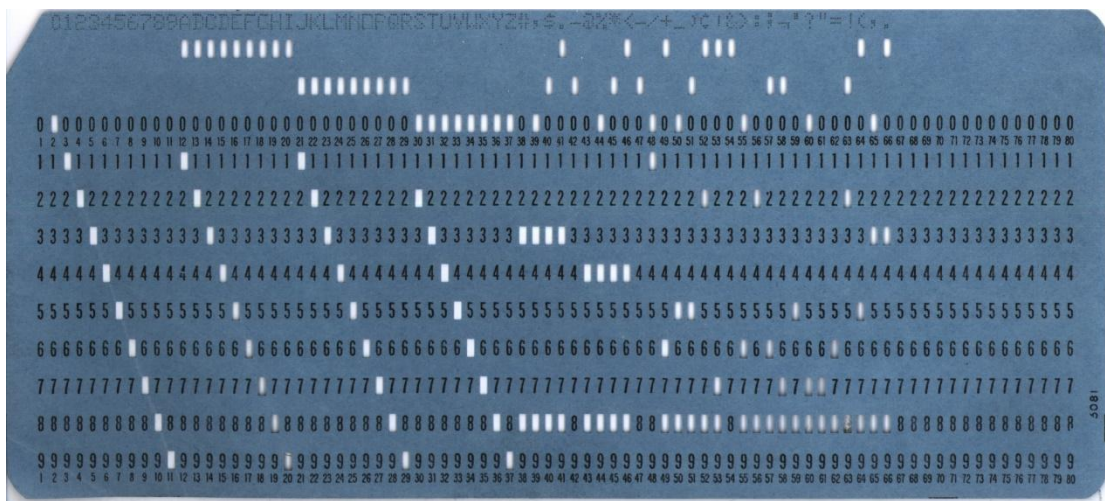
自文明的诞生以来，人类就一直在寻求更加高效的信息存储方式。早在 4 万年前，洞穴壁画就成为了人们记录生活、表达情感的方式之一；而在 6000 年前，泥板上的楔形文字催生了第一个真正意义上的文字体系，并逐渐走向世界。每一个时代都有着属于自己独特的信息存储方式，而这些存储方式也在不断地推动和改变人类的文化进程。

如今，我们所熟知的 SSD/闪存已经成为了信息存储的主流方式，同时，对于更为先进的量子存储、DNA 存储技术的探索也正在进行之中。在这样一个拥有着广阔前景的场景中，信息存储行业的发展步伐从未停歇，犹如一匹永不疲惫的骏马，跃跃欲试地奔向更加宽广的未来。

信息存储，其脉络承载着人类文明的历史，也是科技发展的重要组成部分。在不断追求更加高效、安全、便捷的信息存储方式的同时，我们也在审视着人类文化的演进轨迹，继往开来。



磁芯存储及更早的存储方式



图：打孔卡（Punched Card）

在 20 世纪 40 年代数字计算机出现之前，穿孔卡片用于将数据存储和输入到各种机械系统中，从织布机到自动钢琴，尤其是数据制表机。20 世纪 20 年代和 30 年代，IBM 专门生产制表机和穿孔卡片。这些机器和卡片允许像美国政府这样的机构处理大量的就业和社会保障数据，以及人口普查结果。到 1937 年，IBM 每天生产 1000 万张穿孔卡片——但考虑到它们是直到 1950 年代的每台机器和计算机的独家存储介质，这就不足为奇了。

标准的 80 列穿孔卡片（如上图所示）可存储约 70 个字节的数据，因此每天生产的 1000 万张卡片代表大约 670MB 的数据。

1928 年 Fritz Pfleumer 发明了录音磁带，可以存储模拟信号。



图 1 Reel to Reel Tape Machine

1932 年 Gustav Tauschek 发明了磁鼓存储器 (Magnetic drum memory)，它包含一个大型金属圆柱体，外表面涂有铁磁记录材料。

磁鼓是硬盘的前身，是涂有铁磁记录材料的金属圆柱体，就像磁带一样。像硬盘一样，磁鼓也有磁头，但它们不会寻找数据，而是采用许多静态磁头，只需等待正确的磁扇区旋转到位即可。

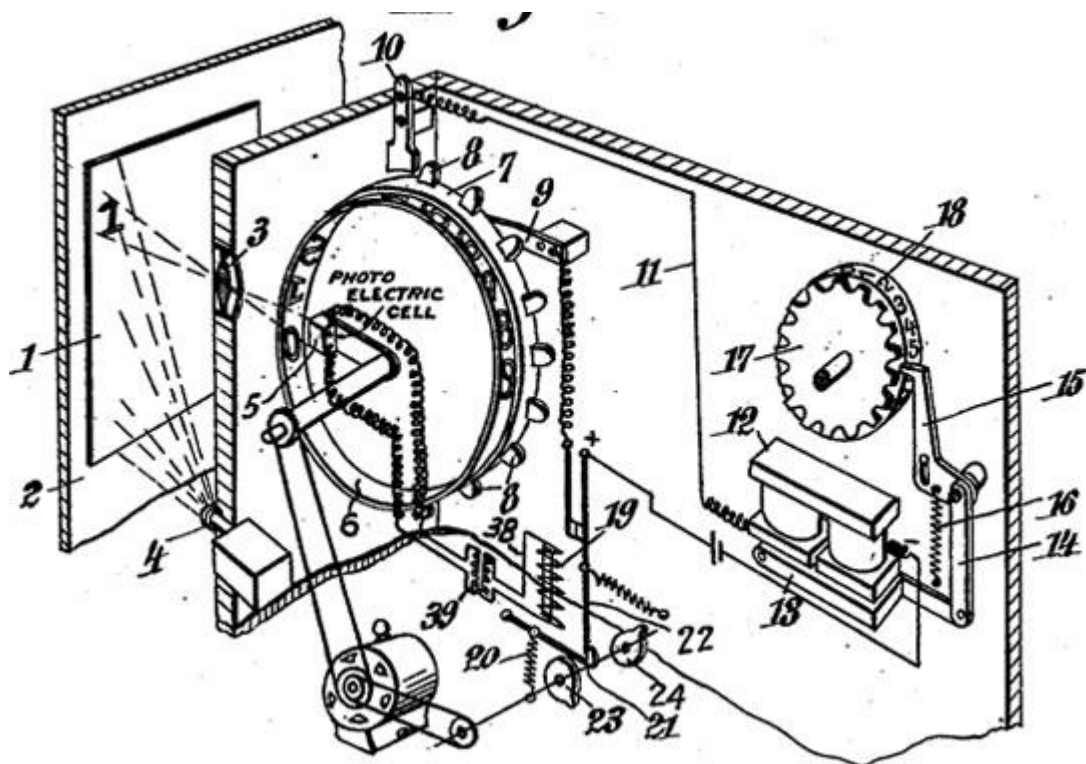


图 2 The patent drawing of Reading Machine of Gustav Tauschek

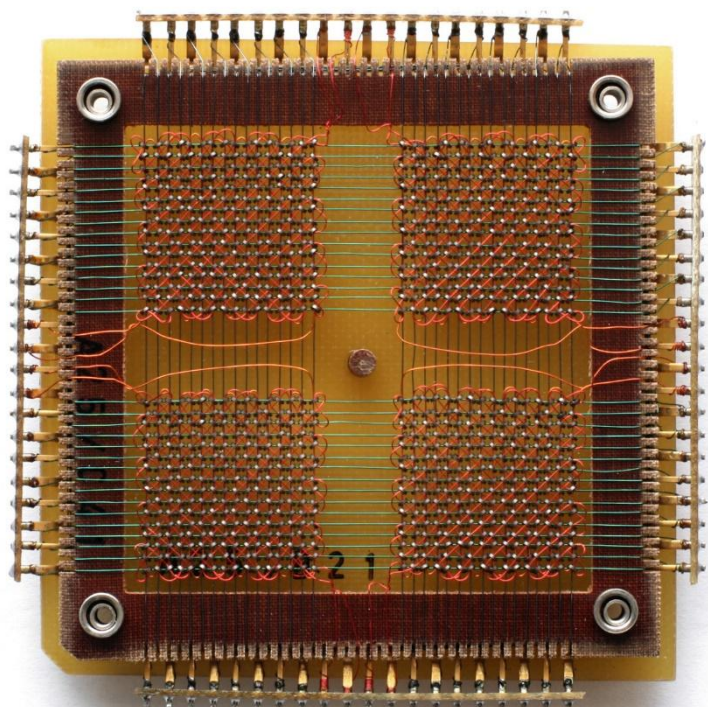


图 早期磁芯存储

非易失性数据的读写，直到 20 世纪 80 年代之前的很长一段时间，都只能通过控制磁性来实现。穿孔卡片和磁带虽然用于数据输入，但与早期计算机内部的非机械部件相比，速度极其缓慢。于是，第一款非易失性随机访问存储器 (RAM)——磁芯存储器出现了。

磁芯存储器通过设置非常小（2 毫米宽）的铁氧体环的磁性来读写数据。令人惊奇的是，磁芯存储器只能在显微镜下手工制作——最初使用的是服装制造商，因为制造过程基本类似。磁芯存储器发明于 20 世纪 50 年代，但直到 60 年代，其成本降低到足以大规模生产，才替代了磁鼓（和挥发性真空管存储器）。

硬盘存储

1956 年，世界上第一个硬盘驱动器出现，应用在 IBM 的 RAMAC 305 计算机中，该驱动器能存储 5M 的数据，传输速度为 10K/S，标志着磁盘存储时代的开始。1962 年，IBM 发布了第一个可移动硬盘驱动器，它有六个 14 英寸的盘片，可存储 2.6MB 数据。



图：世界上第一个硬盘驱动器 RAMAC 305



图：IBM 1311 磁盘系统——世界上第一个移动硬盘系统

软盘存储与光盘存储

1967 年，IBM 公司推出世界上第一张软盘。随后三十年，软盘盛极一时，成为个人计算机中最早使用的可移介质。至上世纪九十年代，软盘尺寸逐渐精简至 3.5 英寸，存储容量也逐步增长到 250M。



图 软盘 (Floppy Disk)

到了 60 年代末，笨重的穿孔卡片和磁带仍然是将数据加载到计算机中的事实标准。IBM 开始发明一种便携式、生产成本低廉且可靠的存储介质，于是乎软盘应运而生。第一张软盘于 1971 年推出，直径为 8 英寸，存储 80 千字节，只读（如上图中的大号盘）。Memorex 于 1972 年发明了第一款读写软盘驱动器，到 1973 年，IBM 开始用读写软盘驱动器替换其大型计算机配备的穿孔卡片读取器。

后来，随着 8 英寸软盘被证明对于出现于 70 年代的微型计算机使用太过庞大，人们开始制作 5¼ 英寸软盘。这些软盘能够存储更少的数据，但驱动器的生产成本要便宜得多。

到了 80 年代初，价格实惠的软盘和驱动器是家庭和办公室计算机（如 IBM PC 和 Commodore 64 等）价格实惠的背后力量。磁鼓和穿孔卡片几乎在一夜之间过时了，一直到世纪之交，软件几乎都是发布在 5¼ 英寸（最终是 3½ 英寸）软盘上。



图：硕大的早期激光光盘

光盘实际上是在 1958 年发明的，然而直到 1978 年激光光盘才最终进入市场。当时，便宜和实用的 VHS 磁带已经在市场上销售了几年，笨重、昂贵的激光光盘从未真正站稳脚跟。

然而，对于激光光盘的小型表亲，情况则稍微好些。第一张音频光盘于 1982 年问世，再次与磁带竞争，但我们知道，它最终赢得了这场战争。可读取计算机数据的 CD-ROM 约于 80 年代中期开始出现，1990 年 Sony 和 Philips 展示了第一款可重新记录的 CD-R。到了 90 年代中期，CD-ROM 驱动器已经广泛普及，使得像 Windows 95 这样的操作系统可以通过光盘分发，到 20 世纪末，光盘已经几乎取代了软盘。

3D NAND 闪存

通过磁性存储方法的阴霾迷雾之旅，终于在硅晶体管技术和非易失存储器的联姻中画上句号。第一个硅晶体管是由得克萨斯仪器（Texas Instrument）在 1954 年发明的，他们也在 1958 年创造了第一个集成电路。到了 60 年代和 70 年代，数千个晶体管被压缩到硅芯片中，制造成本已经显著降低，可以用数千美元而不是数百万美元来建造完整的计算机。

然后，1980 年东芝发明了第一个快闪存储芯片，由于存储的数据只能通过强紫外光（如 EPROM 芯片）擦除，因此“快闪”这个词出现了。然而，我们要等到 1994 年才有第一款 NOR 型 CompactFlash 存储卡，以及 1995 年的 NAND 型 SmartMedia 存储卡。

现代快闪存储芯片不是“快闪”，而是使用一种绝缘的浮栅晶体管，有效地固定电子，从而保持其二进制值。容量从 2MB 开始，但随着芯片制造工艺的改进和晶体管的缩小，容量迅速上升。

MultiMediaCard, Secure Digital 卡, Memory Stick, miniSD, microSD, USB 闪存盘和固态硬盘将在未来几年内推出……无数存储介质也正在步入历史。

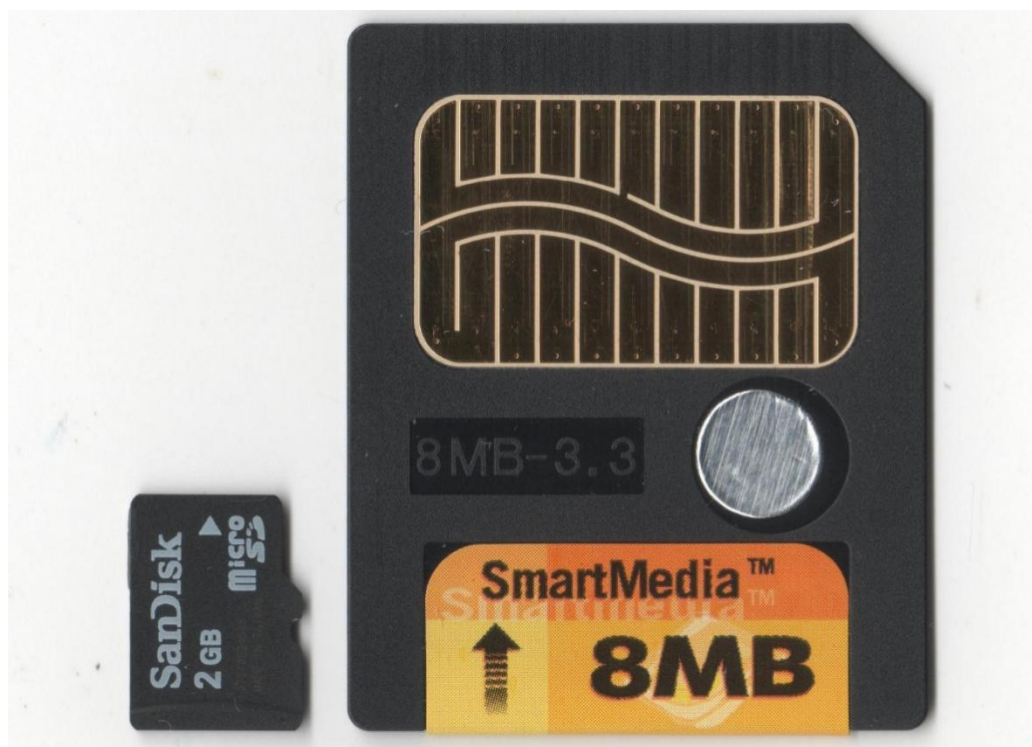


图 6 闪存

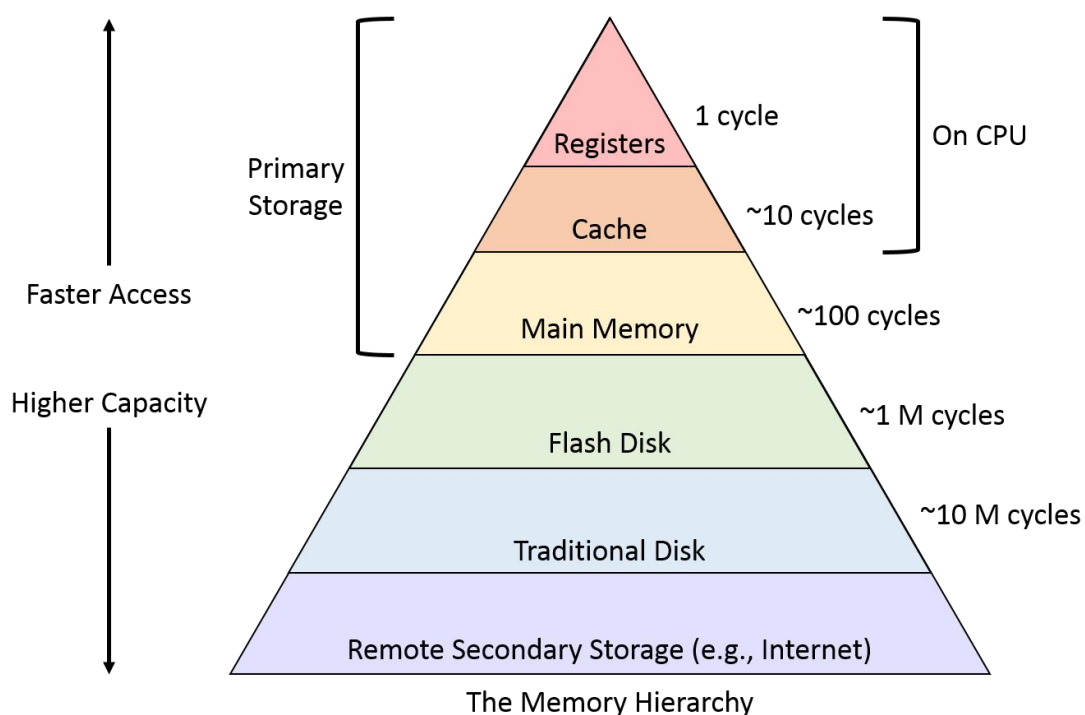
二、现代存储

由于 CPU 执行时间比 CPU 读取指令的时间快得多,而且各个部件之间的读取速度不一样,所以 CPU 的存储器系统采用了一种分层次的结构。这些层次按照访问速度、成本和容量来排序。在存储器层次结构中,最上层是寄存器。我们通常把 CPU 比作计算机的“大脑”,而寄存器则是 CPU 内部的元件,它不仅可以暂时存储指令、数据和地址,还是 CPU 运算时取指令和数据的地方。由于寄存器和 CPU 一样快,因此 CPU 能够很快地访问其中的数据。

紧随寄存器之后,就是高速缓存。CPU Cache 是存放在 CPU 里面用来暂时存放内存中的数据的一块存储空间。相对于主存,高速缓存拥有更快的访问速度,能够提高 CPU 的运行效率。高速缓存使用 SRAM 芯片实现,由于其速度较快,再加上数据的部分拷贝,CPU 可以通过直接从缓存中取出所需数据来提高访问速度。

主存一般是 RAM,它是内存系统的主力军,负责存储 CPU 中运行的程序和数据。与寄存器和高速缓存不同的是,主存的容量通常要比寄存器和高速缓存大得多。但是,主存的访问速度和 CPU 相比还是慢了很多。

在存储器层次结构的最底层,是磁盘。虽然磁盘的容量非常大,而且价格也更加便宜,但是相对于寄存器、高速缓存和主存而言,其访问效率要慢得多。因此,在设计计算机存储系统时,需要根据不同的应用场景和需求来选择合适的存储器结构,从而达到最佳的性能和成本平衡。



图：电脑存储金字塔

主存

1. 随机存储器 (ram)

优点：读取速度非常快，数据可随机进行访问和修改。

缺点: 需要不停地刷新电容以避免数据丢失, 存储密度相对较低, 价格昂贵。

特征: ram 是一种易失性的存储器, 当电源关闭时, 所有数据都会消失。

2. 只读存储器 (rom)

优点: 存储稳定、耐久, 在断电或重启后仍然保留数据。

缺点: 数据无法修改, 只能进行读取操作。

特征: rom 通常用于存储系统程序和固件等不需要修改的数据。

辅助存储器

1. 硬盘驱动器 (HDD)

优点: 存储密度高, 读写速度稳定, 成本较低。

缺点: 机械结构易受损坏, 速度较慢。

特征: HDD 是计算机中最常用的存储设备之一, 可存储大量数据。

2. 固态硬盘 (SSD)

优点: 读取速度极快, 性能稳定, 抗震动, 节能且无噪音。

缺点: 价格相对较高, 存储空间有限。

特征: 半导体存储, 数据存储在闪存颗粒中, 主控芯片来执行数据的存储

外存

1. U 盘

特征: U 盘是一种便携式存储设备, 与传统硬盘不同的是, u 盘使用闪存进行存储, 可以连接到计算机的 USB 接口上。

优点: 方便携带, 大小适中, 容量也大, 且不受电力供应的限制;

缺点: 相对于硬盘、内存条而言, 读写速度较慢。

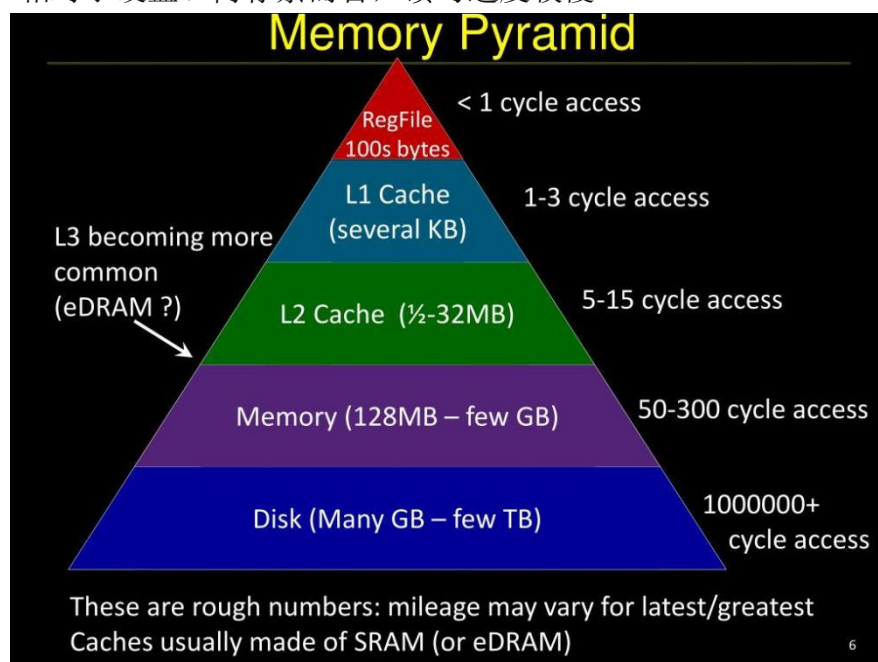


图: 电脑存储金字塔

缓存（Cache）

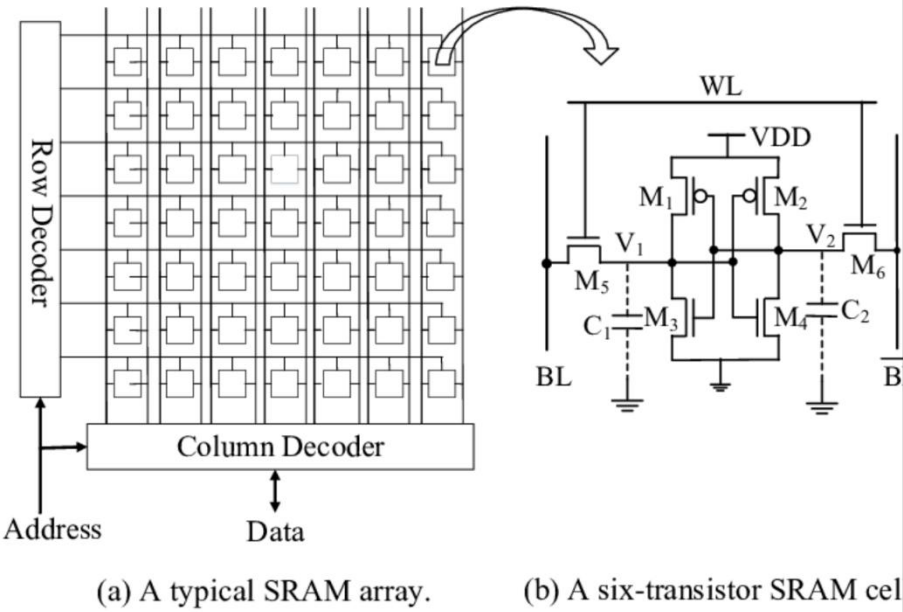
“Cache—主存”与“主存—辅存”层次的区别

比较项目 \ 存储层次	“Cache—主存”层次	“主存—辅存”层次
目的	为了弥补主存速度的不足	为了弥补主存容量的不足
存储管理实现	主要由专业硬件实现	主要由软件实现
访问速度的比值 (第一级和第二级)	几比一	几万比一
典型的块(页)大小	几十个字节	几百到几千个字节
CPU 对第二级的访问方式	可直接访问	均通过第一级
不命中时 CPU 是否切换	不切换	切换到其他进程

Cache 是计算机中的一种临时数据存储器，它位于 CPU 和内存之间，用于解决 CPU 运行速度和内存读写速度不匹配的问题。Cache 的工作原理是在 CPU 需要读取或写入数据时，首先尝试从 Cache 中获取所需数据，如果命中则可以快速获取，否则再从内存中读取或写入。Cache 的优化可以显著提高计算机的性能，这也是为什么现代计算机一般都采用多级缓存，并逐级增加缓存的大小。

三级缓存分别是 L1 Cache、L2 Cache 和 L3 Cache，每个 CPU 核心都有一块属于自己的 L1 Cache，它通常分为两部分：一个用于存数据(L1d Cache)，另一个用于存指令(L1i Cache)。L1 Cache 很小，每部分差不多只有几十 KB。L2 Cache 同样是每个 CPU 核心都有的，但它往往不在 CPU 核心的内部，L2 一般是一个统一的缓存，不把数据和指令分开，L2 缓存更大一些，有几百 KB，速度要慢一些。L3 Cache 通常是多个 CPU 核心共用的，尺寸会更大一些，访问速度自然也更慢一些。

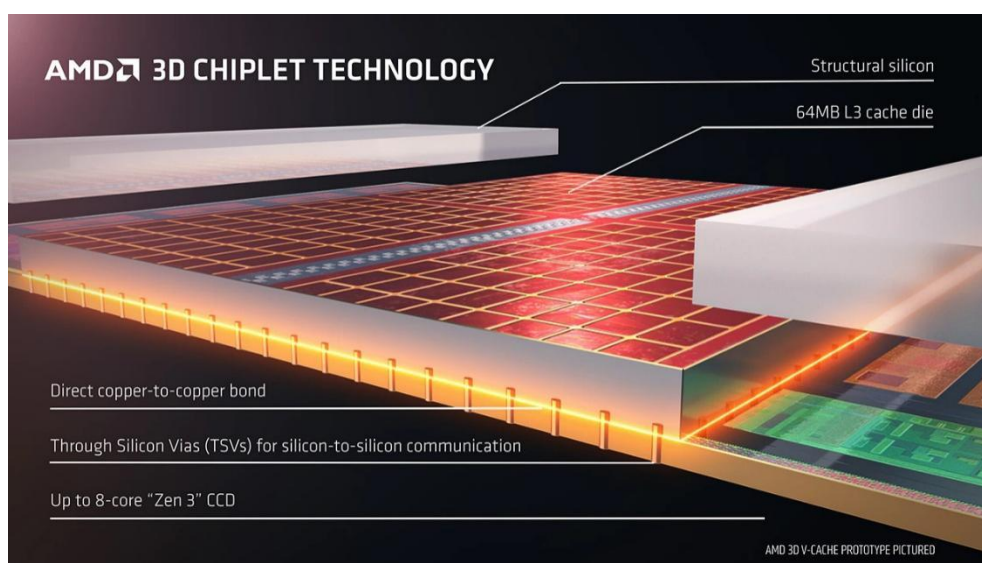
CPU Cache 采用的是一种叫作 SRAM 的芯片，它之所以被称为“静态”存储器，是因为只要处在通电状态，里面的数据就可以保持存在。而一旦断电，里面的数据就会丢失了。在 SRAM 里面，一个比特的数据，需要 6~8 个晶体管，因此 SRAM 的存储密度不高，所以在缓存中使用 SRAM 可以提供更快的读写速度，但是成本较高。



图：SRAM 芯片内部结构

总之，高速缓存是计算机性能提升的关键之一，它通过解决 CPU 运行速度和内存读写速度不匹配的问题来提高计算机系统的工作效率。Cache 的大小和层数的增加可以显著提高命中率，从而避免低效的直接访问内存。虽然高速缓存的成本较高，但在现代计算机系统中，高速缓存已经成为了不可或缺的组成部分。

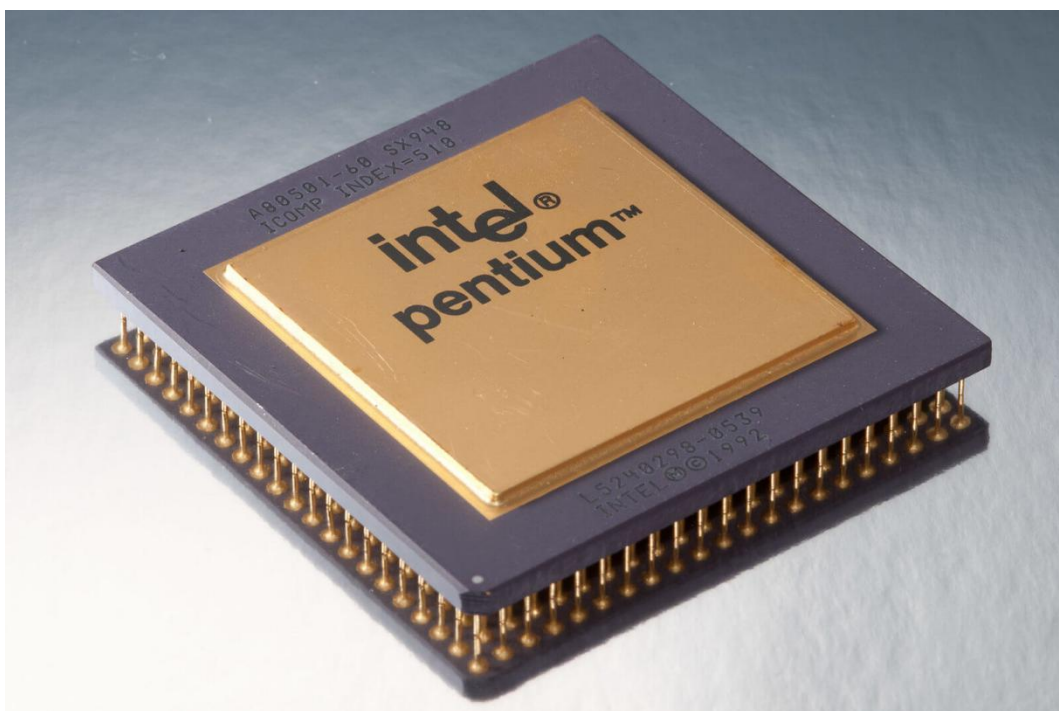
纵观 PC 系统和 CPU 二十年的发展，随着半导体加工工艺水平的不断提高，CPU 和存储器的性能都有了很大的提高。CPU 频率的提高，必然要求系统中存储器的存取速度要提高，还要求其容量要增大。主存储器 DRAM 容量的提高还是比较快的，但是 DRAM 读取时间的提高却很慢。从而在速度上与 CPU 主频的提高产生了极不相配的情况，这样会影响整个系统的性能。二十年来，CPU 设计的问题之一就是解决高速 CPU 和低速 DRAM 之间的平衡或匹配问题，以求系统性能的整体提高。在它们之间加入高速缓冲存储器 Cache，就是这个问题的解决方案之一。



图：AMD 3D 技术将 Cache 和 CPU 整合得更进民

Cache 随 CPU 的发展而不断改变，可以概括为：从无到有，由小到大，先外后内，纵深配备，软硬兼施。初期的 CPU 没有 Cache，在 80386 时期出现外部 Cache；80486 时期开始有内部仅 8kB 的 Cache。Cache 的分级也由 L1 和 L2 级，发展到 L0 和 L3 级的纵深配备；Cache 的大小由当初的 8kB，直到 Merced 的 1~2MB。为了更好地利用 Cache，还专门配有缓存控制指令。

奔腾（Pentium）芯片的发展史很好地体现了缓存的发展史：



图：奔腾芯片

首先，在 80 年代初期，由于处理器速度很慢，无需 Cache，因为内存的存取时间比 CPU 的存取时间快。虽然 DRAM 等待 CPU 的执行，但是 DRAM 能够在等待期间继续保留数据。随着 CPU 主频的提高，80486 采用了内部 Cache；它与 80386CPU 和 80387 数字协处理器一起使用，缓存 8KB 的指令和数据。

接着，为了支持多处理器系统，Pentium 处理器分离了 L1 Cache 和 L2 Cache，将它们分别设置为 8KB 和 512KB；此外，采用了 MESI 高速缓存一致性协议，提供了保证。Pentium Pro 处理器内置 256KB 或 512KB 的 L2 Cache，这种捆绑式 L2 Cache 具有与 CPU 同步运行和快速缓存流动的特点，并且采用了非锁定型 Cache。

Pentium MMX 处理器将 L1 Cache 的容量增加到 32KB，L2 Cache 也增加到 512KB，提高了 CPU 的运行速度和命中率。Pentium II 处理器采用双独立总线结构连接 L2 Cache，提供了比 Pentium 处理器更快的数据流出和更好的带宽性能，其中 L2 Cache 的大小为 512KB。

Pentium III 处理器的 L2 Cache 可以扩展到 1-2MB，提高了处理大型数据块的性能和整体系统性能。此外，采用了预读取技术，提高了高速缓存的命中率。Intel 推出了新的 Cache 技术方案。在 Merced 芯片内部增加了一个最接近执行单元的新 Cache，称为 L0 缓存，它与执行单元间的数据交换速度比 L1 快。

Intel 公司在 Pentium III 处理器中新增加了缓存控制指令集，用于优化内存连续数据流。它包括预取指令和内存流优化处理指令。

Cache 技术作为一种速度匹配技术，不仅用于提高 CPU 对内存的读写速度，而且还被广泛运用于其他设备和系统中。例如，显示系统中大量的显示内存使用着高速缓存技术；磁盘系统中建立了磁盘高速缓存，以提高内存对磁盘（主要是硬盘）的读写速度。此外，在较慢速的其它外围设备和内存的数据交换中，在网络通讯中也需要使用 Cache 技术。

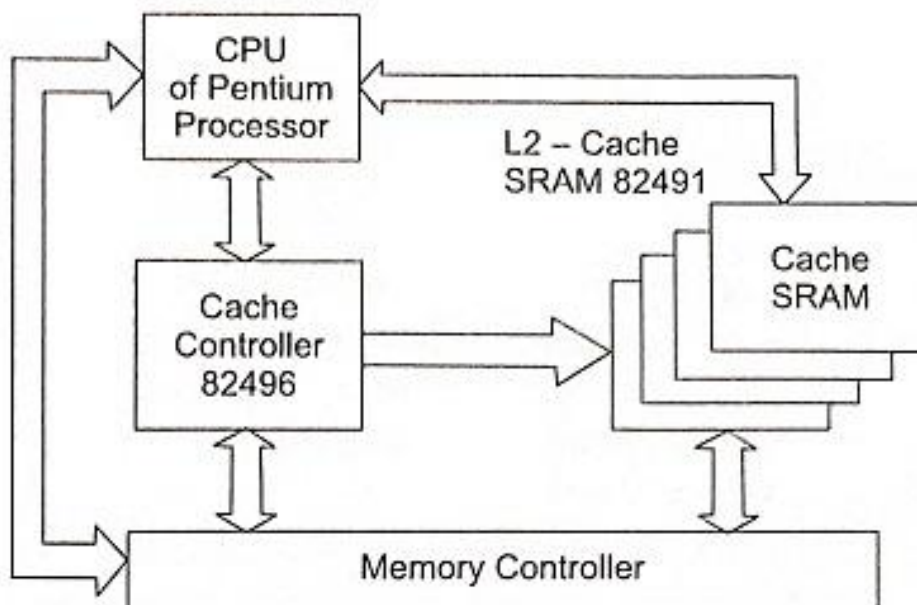


Fig. 12.53 *L2 cache in a Pentium-based system*

图：奔腾系统的 L2 缓存机制

Cache 技术作为一种速度匹配技术，不仅用于提高 CPU 对内存的读写速度，而且还被广泛运用于其他设备和系统中。例如，显示系统中大量的显示内存使用着高速缓存技术；磁盘系统中建立了磁盘高速缓存，以提高内存对磁盘(主要是硬盘)的读写速度。此外，在较慢速的其它外围设备和内存的数据交换中，在网络通讯中也需要使用 Cache 技术。

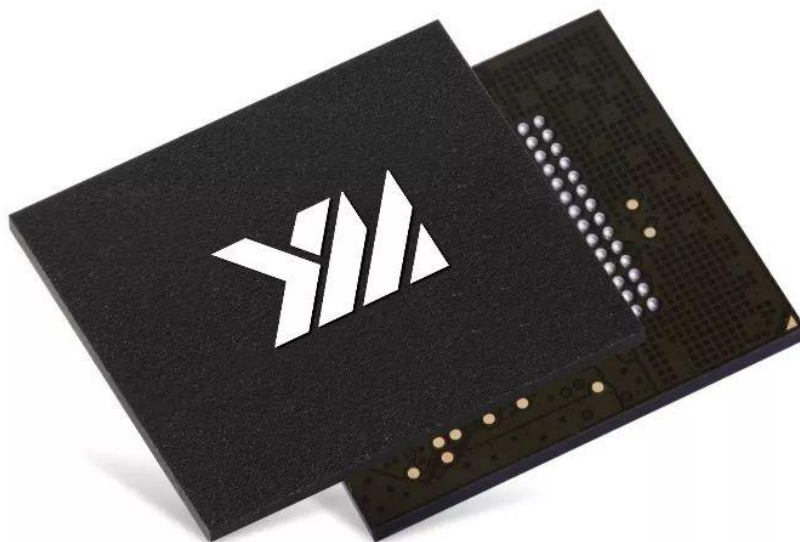
三、国内存储

近年来中国的存储行业发展十分迅速，逐渐打破西方存储巨头的垄断，国内的存储公司以长江存储、长鑫存储为代表。

长江存储

长江存储科技有限责任公司，是一家专注于 3D NAND 闪存设计制造一体化的 IDM 集成电路企业，同时也提供完整的存储器解决方案。长江存储在新型存储领域探索创新，例如在存储类内存（SCM）领域推出了支持 NVMe 协议的 SCM 芯片，为云计算、数据中心等领域提供了更高效、更稳定的存储解决方案。是国产存储技术领域的领军企业。

2016 年，总投资 240 亿美元的长江存储科技在我国成立，致力于研发中国自己的 3D NAND 闪存芯片。两年后，长江存储发布了 Xtacking 技术。这项技术可以在两片独立的晶圆上分别加存储单元和外围电路，使得闪存阵列和 CMOS 逻辑器件两种工艺分割隔离。



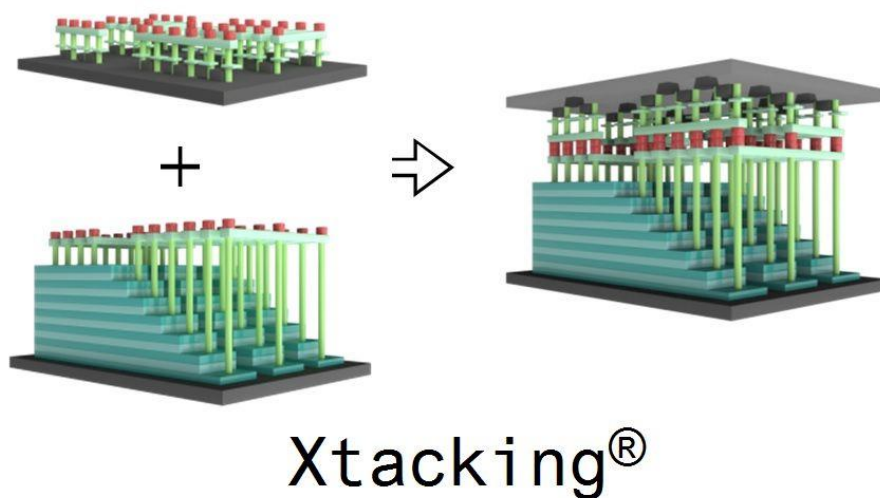
图：长江存储 32 层 3D NAND eMMC 闪存

Xtacking4.0

长江存储的 Xtacking 技术让世界见证了中国原创。3D 闪存中除了存储阵列之外还有一些外围电路会占据相当大的芯片面积，在长江存储之前，美光、三星和 SK Hynix 它们是将外围电路放到存储单元下方。而长江存储的 Xtacking 是把存储阵列和外围电路分开来做，分别在两个晶圆上加工，然后通过垂直互联通道把它们键合、接通电路。

NAND 闪存它有一个特性，就是不能用特别先进的制程去加工。因为制程节点小了之后，每个存储单元能容纳的电子数量就会变少，发展到一定阶段之后，闪存就很容易因为电子流失而丢失其中保存的数据。就目前来看，3D 闪存最适合的制程节点是 20nm。铠侠使用的是 19 纳米，美光和英特尔是 20 纳米，长江存储用的也是 20 纳米。另外，长江存储的 Xtacking 把两部分分开来加工，这样外围电路那部分就可以应用比较先进的制程，可以说是一个非常具有远见的技术。

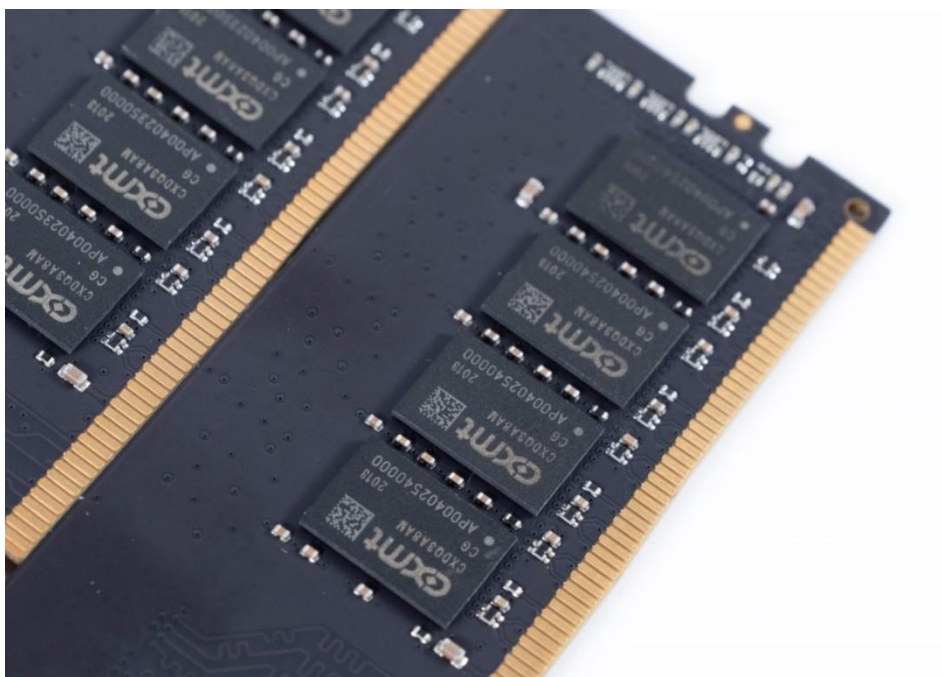
从 1.0 到 3.0，YMTC 长江存储的 Xtacking 这个异构的 3D 集成架构，已经建立了一个成熟的体系，并诞生基于 Xtacking 架构 NAND 的系统解决方案的多样化组合，包括 SATA III、PCIe Gen3 和 Gen4 SSD，以及用于移动和嵌入式应用的 eMMC 和 UFS，并获得了领先 OEM 的认可。



图：Xtacking 技术示意图

长鑫存储

长鑫存储技术有限公司，长鑫存储的技术基础来源于曾经的第二大 DRAM 供应商奇梦达公司，基于曾经先进的技术，长鑫存储快速发展在中国大陆拥有超过 3000 项专利，并从几家国际公司获得了超过 30000 项专利的授权。目前，长鑫存储目前的 DRAM 生产工艺处于 16nm-19nm 阶段，与三星、SK 海力士等国际领先水平相比，大概落后 5 年，但是根据 Digitimes 的报道，根据专业分析机构拆解结果显示，长鑫存储 19nmDRAM 产品性能相当于三巨头 15nmDRAM 产品的性能。



图：使用长鑫内存颗粒的国产内存条

四、未来存储

未来的存储技术将会呈现出多样化，包括量子存储、DNA 存储、光存储、超级快闪存储等多种形式的存储技术，这些技术将会拥有更高的存储容量、更高的传输速度和更低的能耗。

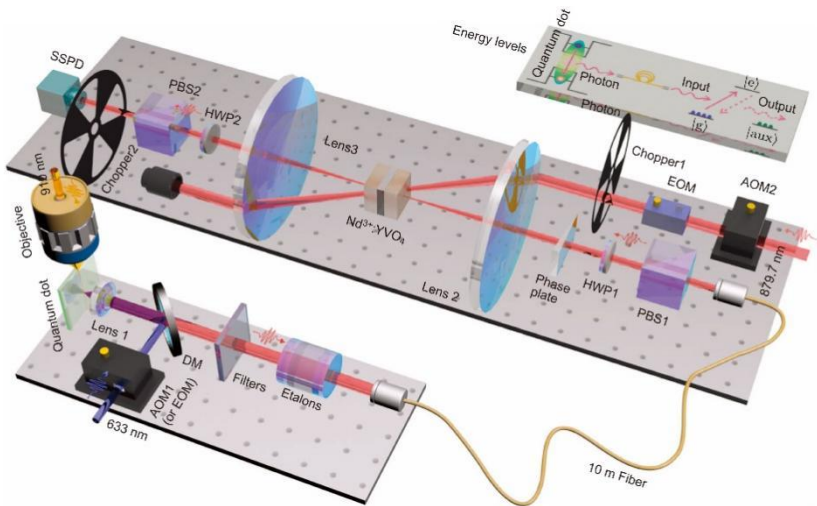
量子存储

量子存储技术是近年来备受瞩目的一项新兴技术，它基于量子力学原理，利用量子的叠加态和纠缠现象来实现信息的存储、传输和处理，具有非常高的安全性和可扩展性。相较于传统存储器，量子存储器不同之处在于其存储的是以量子比特为单位的信息，而不是以经典比特为单位的信息。

量子存储器的存储介质通常是一些具有稳定性和可控性的量子系统，如超导量子比特、离子阱、材料中的缺陷等。这些量子系统在特定条件下可以保持一定时间内的量子状态，从而实现信息存储。由于量子比特可以同时处于多种状态，因此量子存储器可以在同一时间存储许多信息，这大大提高了存储器的存储容量和数据传输速率。

量子存储技术还拥有极高的安全性。由于量子测量过程会对被测量粒子的量子态造成干扰，一旦有人试图窃取或破解信息，就会在测量过程中破坏数据本身，从而使得存储的信息无法被窃取或破解。这种技术特性特别适用于保护敏感信息、保密通讯以及安全金融交易等领域。

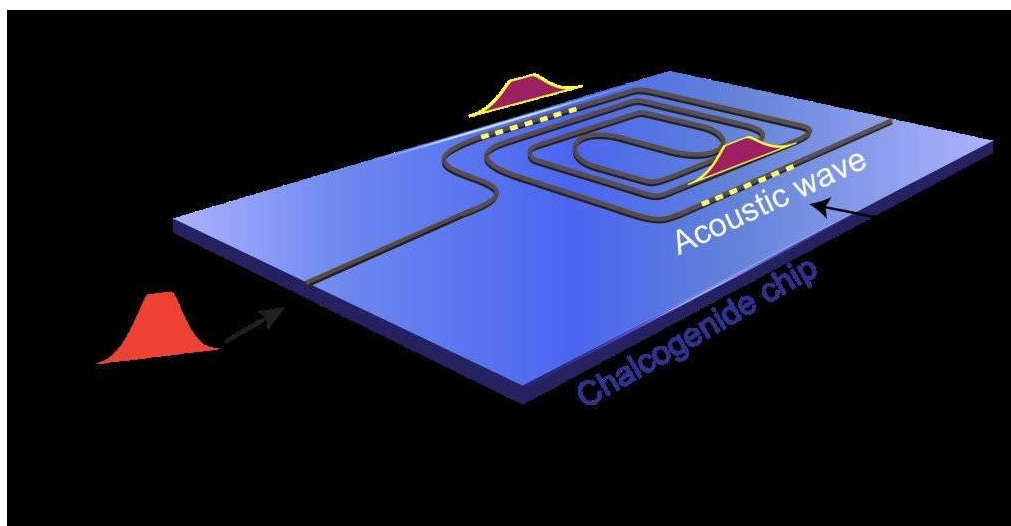
虽然量子存储技术在实践应用中面临着一些技术难点和挑战，如量子比特的控制、纠错等问题，但是它在信息存储的安全性、存储密度等方面具有很大的潜力，在未来的科学研究和工程实践中将会有着广阔的应用前景。



图：量子存储研究

光存储

光存储是指利用激光或者其他光源记录和读取信息的存储方式，由于其具有非常高的存储密度和易于保持长期稳定性等特点，具有潜在的超高速数据传输和存储容量的优势，未来将会在虚拟现实、云计算等领域得到广泛应用。



图：光存储设想

DNA 存储技术

DNA 作为一种天然的存储介质，其存储密度远高于当前的任何存储介质，未来 DNA 存储技术将会成为信息存储领域的新热点。

DNA 存储技术是一种新兴的信息存储技术，它利用 DNA 分子的生物学特性来实现信息的高密度存储和长期保存。DNA 存储技术有以下几个优势：

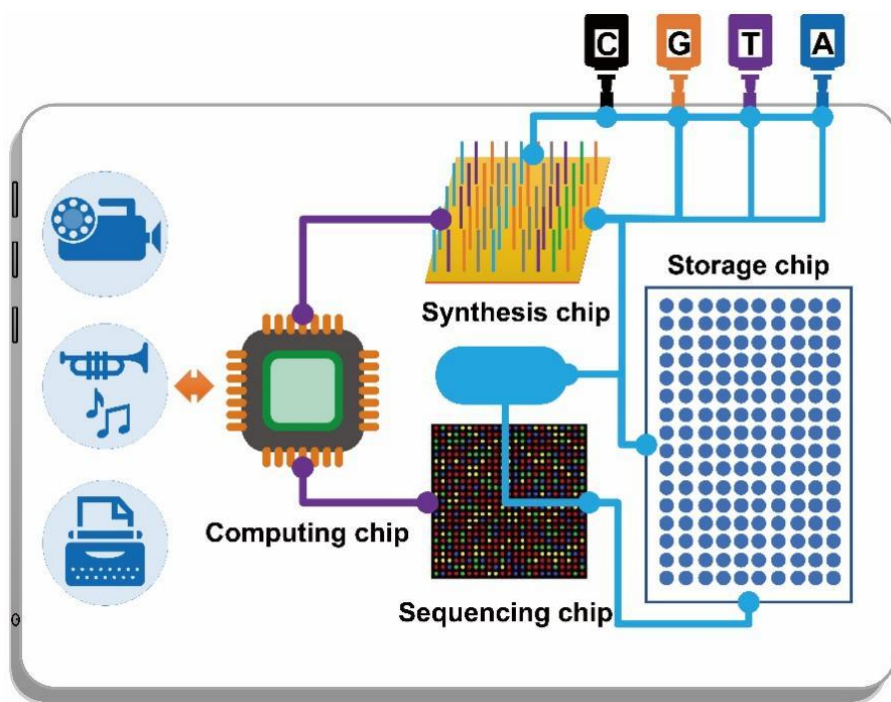
高密度存储：DNA 分子可以用四种字母来表示信息，存储密度远高于当前的任何存储介质。据估计，从理论上讲，1 克 DNA 可以存储约 1 亿 GB 的数据

长期保存：DNA 有着非常长的寿命，可以在环境适宜的情况下保存几百年甚至几千年，因此可以作为一种可靠的长期数据存储介质。

安全性强：DNA 存储技术具有很高的安全性，因为对 DNA 进行篡改或复制需要耗费巨大的时间和成本。

可持久性强：DNA 是地球上流传最久的物质之一，它在各种恶劣条件下都可以保持完好无损，如高温、低温、辐射、水分等各种极端条件。

生物兼容性：DNA 存储技术具有极高的生物兼容性，可以被人体细胞识别和处理，这也为其在生命科学和医疗领域的应用提供了广泛的可能性。



图：DNA 存储设想