## 闪存类存储的转换 层 <sup>2</sup>

上篇 「柱面-磁头-扇区寻址的一些旧事」 整理了一下我对磁盘类存储设备(包括软盘、硬盘,不包括光盘、磁带)的一些理解, 算是为以后讨论文件系统作铺垫;这篇整理一下我对闪存类存储设备的理解。

这里想要讨论的闪存类存储是指 SSD 、SD卡、U盘等基于 NAND 又有转换层的存储设备(下文简称闪存盘), 但不包括裸 NAND 设备、3D Xpoint (Intel Optane)等相近物理结构但是没有类似转换层的存储设备。 闪存类存储设备这几年发展迅猛,SD卡和U盘早就

替代软盘成为数据交换的主流,SSD 大有替代硬盘的趋势。因为发展迅速,所以其底层技术变革很快,不同于磁盘类存储技术有很多公开资料可以获取, 闪存类存储的技术细节通常是厂商们的秘密,互联网上能找到很多外围资料, 但是关于其如何运作的细节却很少提到。所以我想先整理一篇笔记,记下我搜集到的资料,加上我自己的理解。 本文大部分信息来源是 Optimizing Linux with cheap flash drives 和 A Summary on SSD & FTL,加上我的理解,文中一些配图也来自这两篇文章。

## 封装结构

从外部来看,一个闪存盘可能有这样的结构:

## 从上往下,我们买到的一个闪存盘可能一层层分 级:

- 1. 整个闪存盘有个控制器,其中含有一部分 RAM 。 然后是一组 NAND Flash 封装芯片(chip)。
- 2. 每个封装芯片可能还分多个 Device ,每个 Device 分多个 Die ,这中间有很多术语我无法跟上,大概和本文想讨论的事情关系不大。
- 3. 每个 Die 分多个平面(Plane),平面之间可以并 行控制,每个平面相互独立。从而比如在一个平面 内 做某个块的擦除操作的时候,别的平面可以继 续读写而不受影响。
- 4. 每个平面分成多个段(Segment),段是擦除操作的基本单位,一次擦除一整个段。
- 5. 每个段分成多个页面(Page),页面是读写操作 的基本单位,一次可以读写一整页。

6. 页面内存有多个单元格(Cell),单元格是存储二进制位的基本单元,对应 SLC/MLC/TLC/QLC 这些,每个单元格可以存储多个二进制位。

以上这些名字可能不同厂商不同文档的称法都各有不同,随着容量不断增大,厂商们又新造出很多抽象层次,不过这些可能和本文关系不大,如果看别的文档注意区别术语,本文中我想统一成以上术语。 重要的是有并行访问单元的平面(Plane)、擦除单元的段(Segment)、读写单元的页(Page)这些概念。 抽象地列举概念可能没有实感,顺便说一下这些概念的数量级:

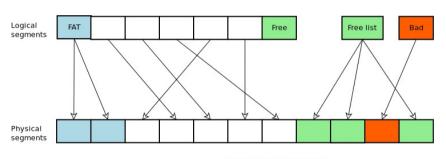
- 1. 每个 SSD 可以有数个封装芯片。
- 2. 每个芯片有多个 Die 。
- 3. 每个 Die 有多个平面。
- 4. 每个平面有几千个段。比如 2048 个。
- 5. 每个段有数百个页,比如 128 个,外加一些元数 据。
- 6. 每个页面是 4KiB、8KiB 这样的容量,外加几百字节的元数据。

和硬盘相比,一个闪存页面大概对应一个到数个物理扇区大小,现代硬盘也逐渐普及 4KiB 物理扇区。 每次读写都可以通过地址映射直接对应到某个闪存页面,这方面没有硬盘那样的寻址开销。 不过闪存有写入的限制,每次写入只能写在「空」的页面上,不能覆盖写入已有数据的页面。 要重复利用已经写过的页面,需要对页面所在段整个做擦除操作,每个段是大概 128KiB 到

8MiB 这样的数量级。每个擦除段需要单独跟踪和统计自己经历的擦除次数,以进行擦写均衡(wear leveling)。

## 擦写均衡(wear leveling)和段映射

Animation: wear leveling on SSD drives



Writing to a free segment

擦除段的容量大小是个折衷,更小的擦除段比如 128KiB 更适合随机读写,因为每随机修改一部分数据时 需要垃圾回收的粒度更小;而使用更大的擦除段可以减 少元数据和地址映射的开销。 从擦除段的大小这里,已 经开始有高端闪存和低端闪存的差异,比如商用 SSD 可 能比 U 盘和 SD 卡使用更小的擦除段大小。 闪存盘中维护一个逻辑段地址到物理段地址的隐射