

Flash存储器的纠错要求-IBM

原创 2016-08-03 阿呆 ssdfans



作者：阿呆

NAND Flash纠错从理论到实践，看完你就是专家了！

想要和阿呆还有全世界的大牛讨论SSD及存储相关技术？加nanoarch为微信好友，拉你进ssdfans微信群。

导语

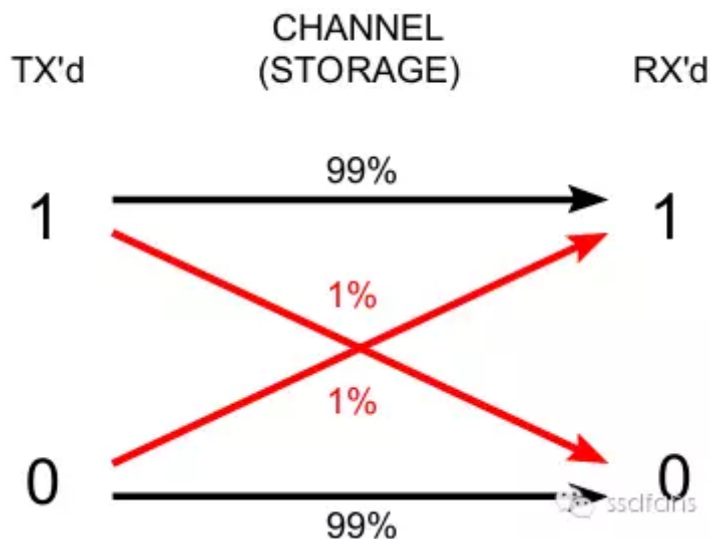
Flash常说的RBER，UBER是什么？极限情况下纠错码有多长？

为什么

Flash是一种有失真的存储介质，必须满足Spec规定的纠错能力才能达到Spec声称的写寿命。

纠错基础

BSC（Binary Storage Channel）模型



如图，数据从发送到接收，有一定的概率出错（在通道里面或者存储介质上）。BSC模型中1和0有着同样的出错概率，作为一种近似模型。P (error) = 0.01, P (success) = 0.99. 单个bit穿过通道的错误率叫做 **RBER**: Raw Bit Error Rate。本例子RBER=0.01。扩展一下，传输n个bit，出错k个bit的概率如下：

$$\Pr(k) = \binom{n}{k} \times P_e^k \times (1 - P_e)^{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} P_e^k \times (1 - P_e)^{n-k}$$

以前面的例子，各种出错概率为：

$$\Pr(\text{exactly 0 errors}) = (3! / (0! \times 3!)) \times .01^0 \times 0.99^3 = 0.970299$$

$$\Pr(\text{exactly 1 error}) = (3! / (1! \times 2!)) \times .01^1 \times 0.99^2 = 0.029403$$

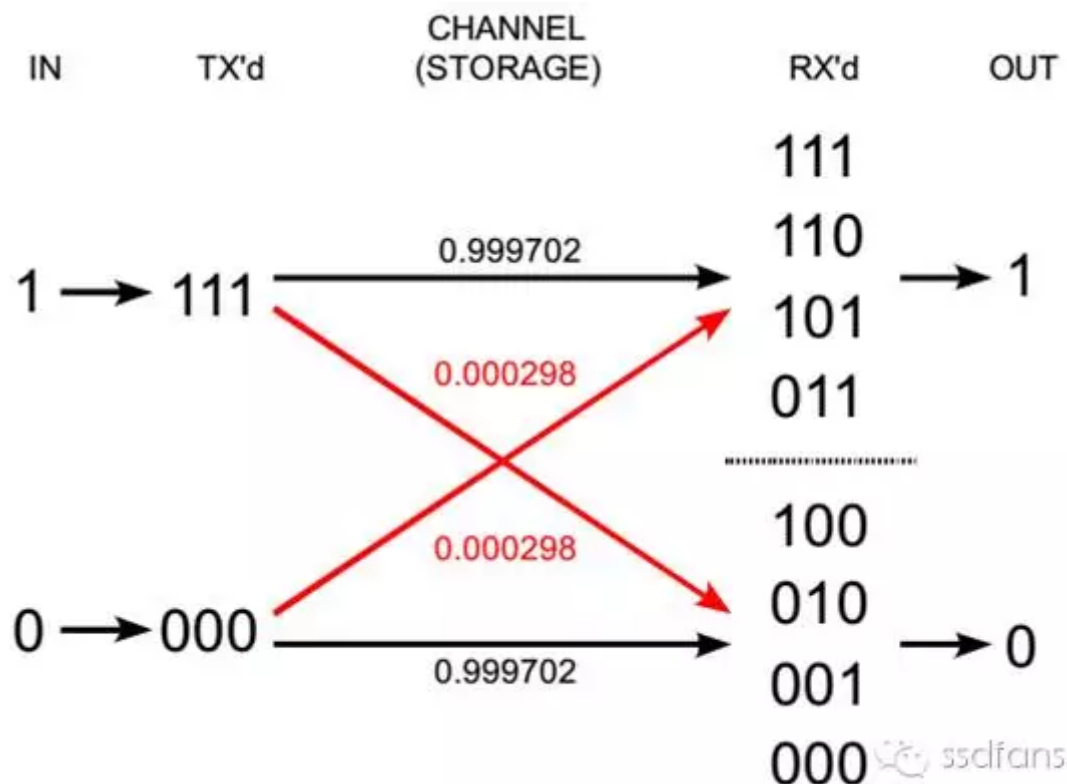
$$\Pr(\text{exactly 2 errors}) = (3! / (2! \times 1!)) \times .01^2 \times 0.99^1 = 0.000297$$

$$\Pr(\text{exactly 3 errors}) = (3! / (3! \times 0!)) \times .01^3 \times 0.99^0 = 0.000001$$

出错率小于等于k个bit概率为其下的概率求和。K为1时：

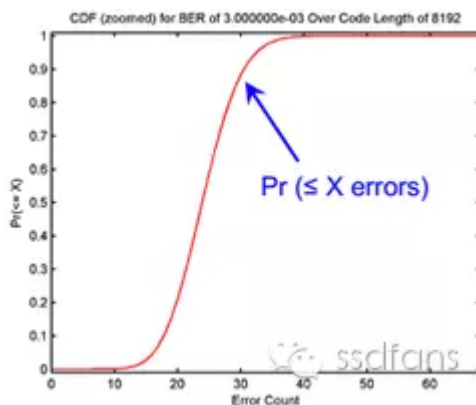
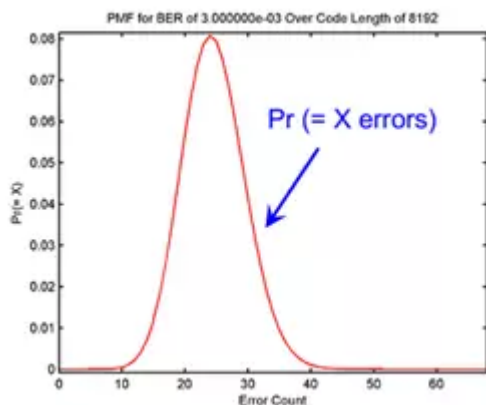
$$\Pr(1 \text{ or less errors}) = 0.029403 + 0.970299 = 0.999702$$

在下面的例子中，用了**3**倍的bit来表示原来**1**个bit的数据，**RBER**依然为**0.01**，在**3**个codeword里面的**3**个bit出错概率假设相等。可以看出最终的出错概率降低了**33**倍：从原来的**0.01**到了**0.000298**。

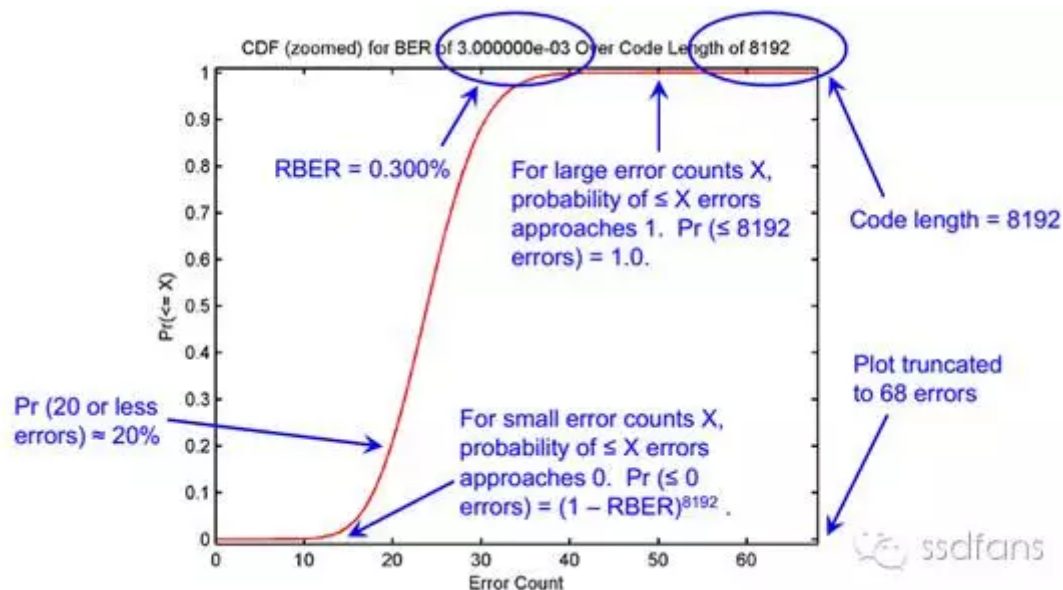
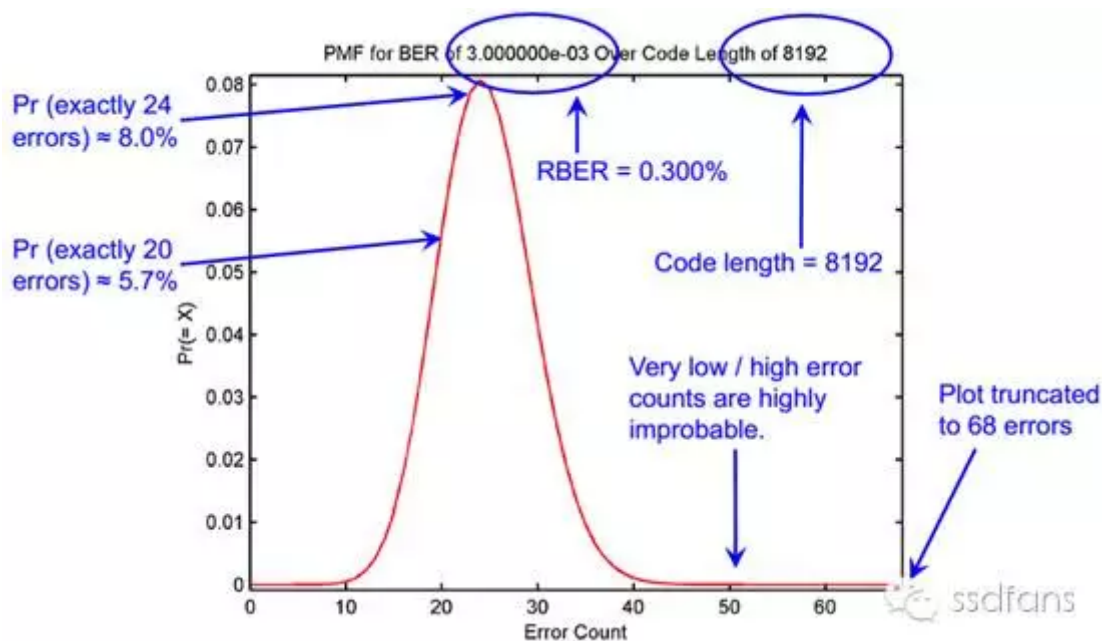


真实世界

1. Codeword没这么短;
2. 现在的纠错一般使用BCH。
3. BCH能够实现固定长度错误bit的纠错。
4. 给定RBER和存储介质，我们可以得到概率分布函数和累积函数（probability mass function (pmf) and cumulative distribution function (cdf).）。

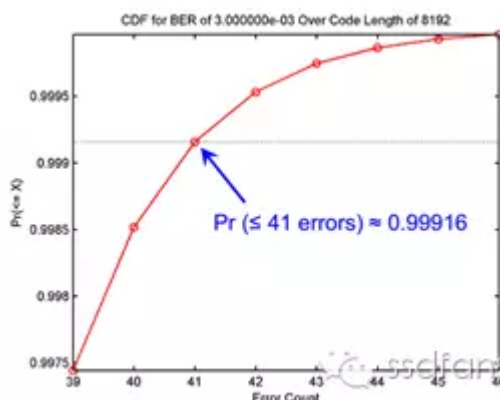
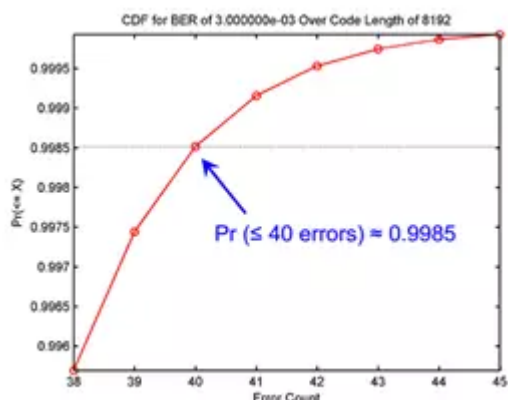


PMF表示在长度为n的Codeword里面发生x个错误的概率，CDF指的是在长度为n的codeword里面发生小于等于x个错误的概率。



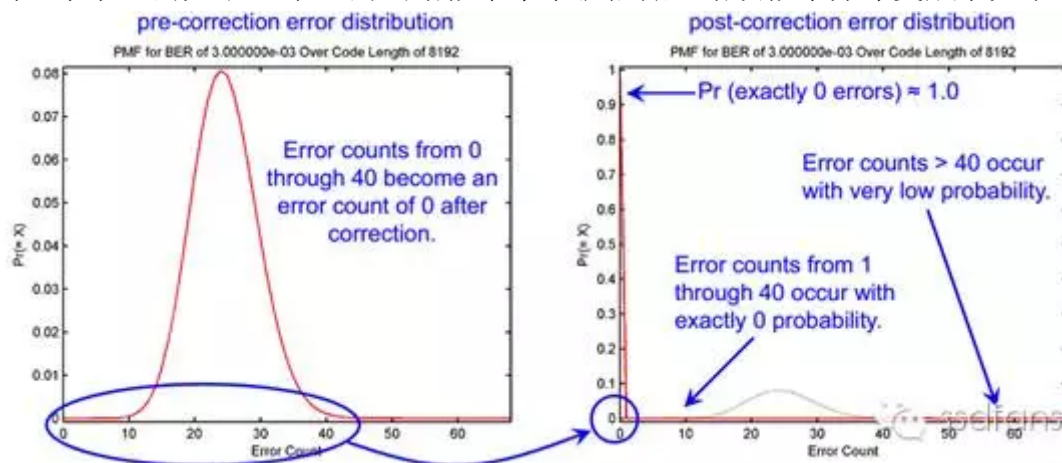
假如我们能纠错40个bit，那么纠错失败的概率为： $\text{Pr}(> 40 \text{ errors}) = 1 - \text{Pr}(\leq 40 \text{ errors})$

≈ 0.0015 。这个叫做FER（Frame Error Rate）。如果能够纠错41个bit，则 $\text{FER} = 0.00084$ ，纠错长度增加**2.5%**导致**FER下降44%**！

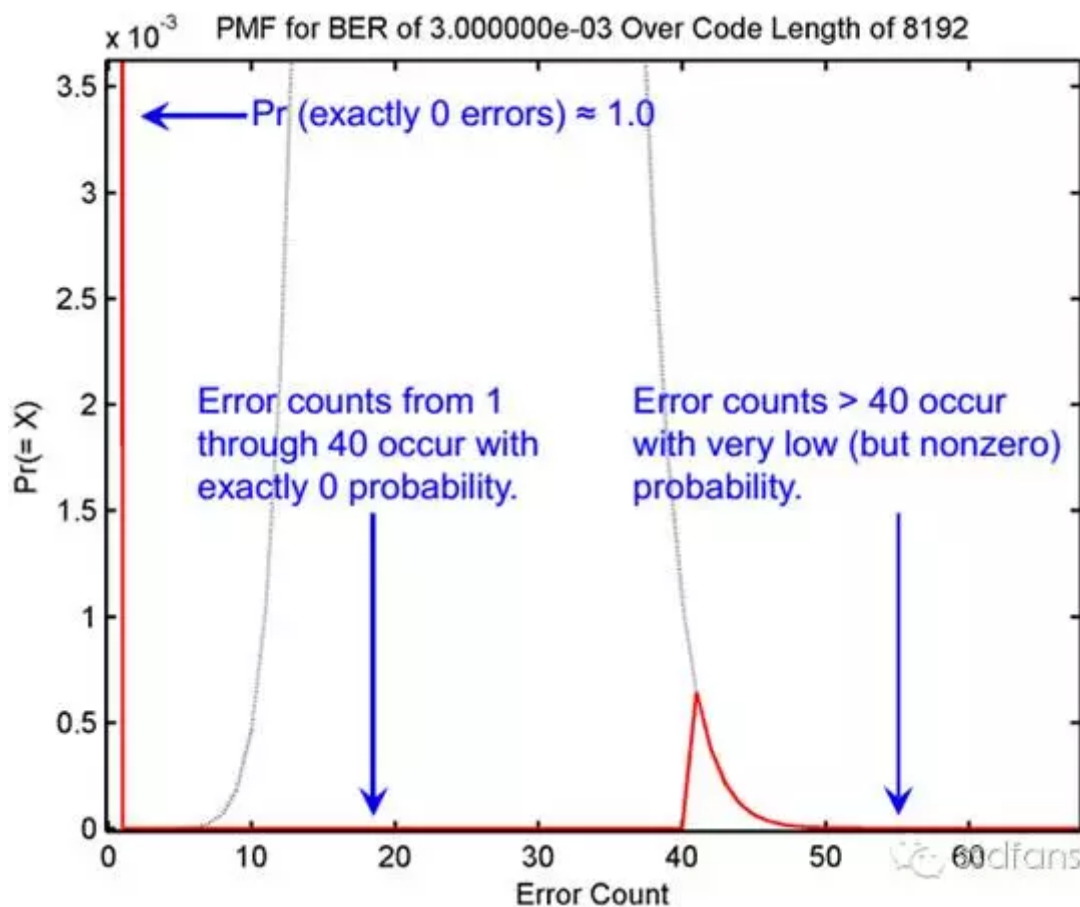


RBER与UBER

加入我们考虑了纠错之后再来计算出错率，发现error count在40bit以下的概率都为0，因为都被纠过来了，而大于41个bit的出错概率本来就很低，错误概率分布变成了如下右图的PMF。



右图放大之后：



所以接下来的任务就是计算纠错之后的Bit Error Rate: UBER, uncorrected bit error rate, 这个是工业界来衡量Flash纠错能力的指标。计算公式很简单，就是把前面每个bit的出错率加起来，但是因为t bit纠错能力导致t个bit以下的错误率都为0，所以从t+1开始累加就可以了。

$$UBER = \frac{\sum_{k=0}^l k \times \Pr(k)}{l} = \frac{\sum_{k=t+1}^l k \times \Pr(k)}{l}$$

UBER的影响因子

纠错能力

RBBER为2.00e-3，纠错能力从35增长到43bit，那么UBER下降了250倍。

Code Length	RBBER	Strength (t)	Code Rate	UBER
8192	2.00e-3	37	0.937	1.612e-08
8192	2.00e-3	38	0.935	6.808e-09
8192	2.00e-3	39	0.933	2.805e-09
8192	2.00e-3	40	0.932	1.128e-09
8192	2.00e-3	41	0.930	4.426e-10
8192	2.00e-3	42	0.928	1.697e-10
8192	2.00e-3	43	0.927	6.362e-11

↓ 250x

RBBER

同样情况下，如果RBBER降到1.25e-3，UBER可以下降4000倍！

Code Length	RBER	Strength (t)	Code Rate	UBER
8192	1.25e-3	37	0.937	1.016e-13
8192	1.25e-3	38	0.935	2.705e-14
8192	1.25e-3	39	0.933	7.012e-15
8192	1.25e-3	40	0.932	1.775e-15
8192	1.25e-3	41	0.930	4.383e-16
8192	1.25e-3	42	0.928	1.057e-16
8192	1.25e-3	43	0.927	2.489e-17

↓ 4000x

只看RBER的变化，UBER改善更显著：

Code Length	RBER	Strength (t)	Code Rate	UBER
8192	2.75e-3	40	0.932	1.503e-06
8192	2.50e-3	40	0.932	2.116e-07
8192	2.25e-3	40	0.932	1.987e-08
8192	2.00e-3	40	0.932	1.128e-09
8192	1.75e-3	40	0.932	3.373e-11
8192	1.50e-3	40	0.932	4.350e-13
8192	1.25e-3	40	0.932	1.775e-15

↓ 840,000,000x

怎样选择纠错码长度

短纠错码占用资源少，但是纠错能力差。长纠错码纠错能力强，但是占用更多资源。关键是选择一个能够实现足够UBER的纠错长度。如果知道4K page的纠错码长度，怎么计算8K和16K的？

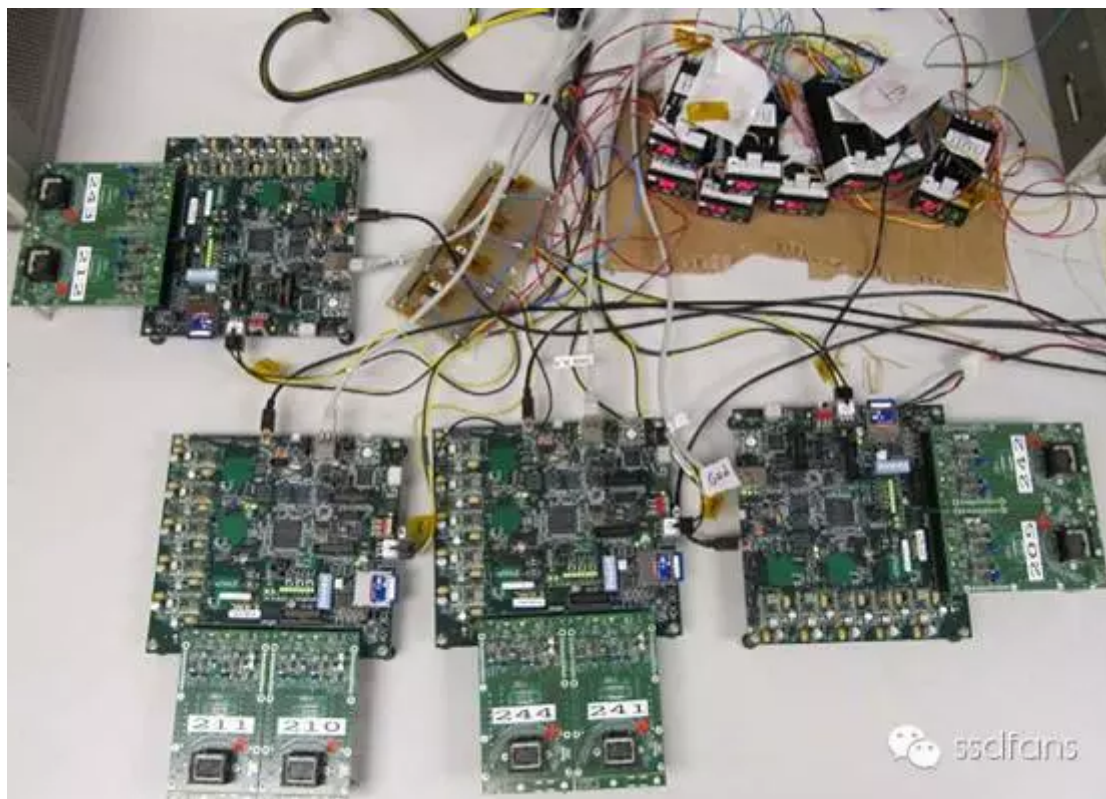
RBER	length = 8192 strength:UBER	length = 4096 strength:UBER	length = 16384 strength:UBER
1.25e-3	40 : 1.775e-15	29 : 3.503e-16	60 : 1.308e-15
1.50e-3	40 : 4.350e-13	28 : 1.499e-13	62 : 2.567e-13
1.75e-3	40 : 3.373e-11	27 : 1.964e-11	64 : 1.571e-11
2.00e-3	40 : 1.128e-09	26 : 1.052e-09	65 : 8.621e-10
2.25e-3	40 : 1.987e-08	26 : 9.624e-09	67 : 1.151e-08
2.50e-3	40 : 2.116e-07	25 : 1.645e-07	68 : 1.676e-07
2.75e-3	40 : 1.503e-06	25 : 7.519e-07	69 : 1.489e-06

问题是，Flash制造商并不提供RBER，因为RBER并非固定值，它跟晶圆质量、温度等很多因素相关。一般来讲，按照制造商提供的纠错码长度就可以了，但是企业级用户的要求更高，他们对性能和使用寿命非常关注。

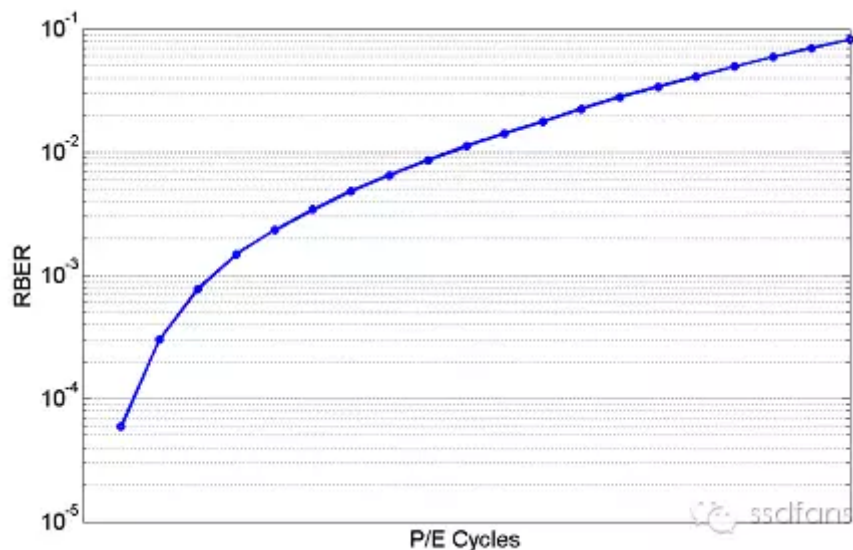
深入知识

性能鉴定

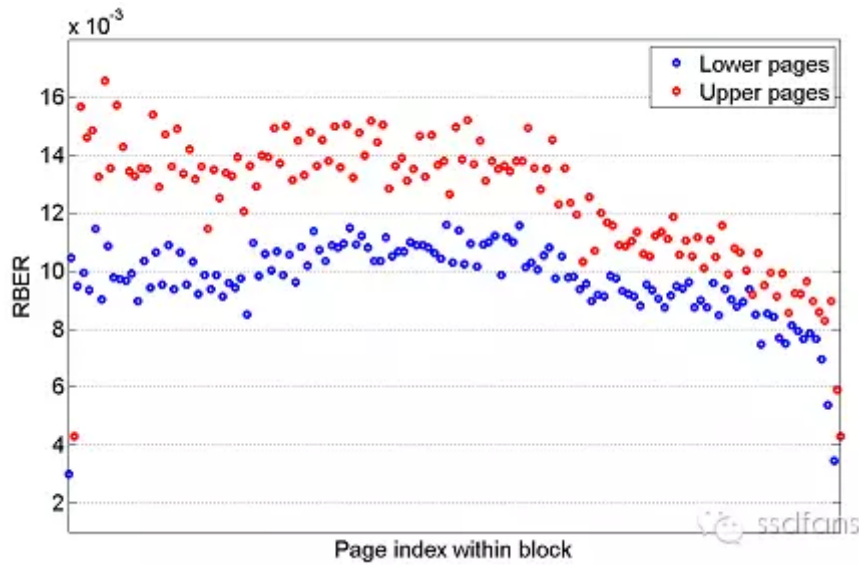
下图为IBM Flash性能鉴定平台。



如下图，Flash的错误率会随着使用寿命增加而增加。为了挑战极限，必须准备好处理每100个bit就有1个坏的情况。



RBER还跟Flash内部结构也有关系。两个相邻Block的RBER有可能完全不同，下图是单个block里面不同page的RBER分布图。看得出来，upper page的RBER比lower page要高两个数量级。



如果RBER高达1%，那么要实现 $UBER < 1e-15$ ，需要多大的纠错码？如下图，BCH纠错码长度很长，码率很低。所以需要更好的纠错算法，譬如LDPC。

Code length	RBER	Strength (t)	Code Rate	UBER
8192	0.01	157	0.732	8.210e-16
16384	0.01	267	0.756	6.627e-16
32768	0.01	469	0.771	9.614e-16
65536	0.01	852	0.779	8.691e-16
131072	0.01	1585	0.782	8.955e-16

引用

Understanding Error Correction Mandates for Flash Memory

Charles Camp, CTO / [IBM](#) Flash Systems Development, IBM

不想错过阿呆的后续精彩文章？长按或扫描下面二维码关注ssdfans就可以了！

