

蓝光存储在电子档案长期存储中的 应用研究

研究报告

项目承担单位：

航天档案馆

华录光存储研究院（大连）有限公司

编制日期：2017年3月

目录

目录.....	1
第一章 项目概述.....	1
1.1 项目简介	1
1.2 项目背景	2
1.3 研究目标与内容	3
1.3.1 研究目标	3
1.3.2 研究内容	3
1.4 研究意义	4
第二章 蓝光存储技术综述.....	6
2.1 蓝光存储介质	6
2.1.1 蓝光光盘定义	6
2.1.2 归档级蓝光光盘	7
2.1.3 蓝光光盘结构	8
2.1.4 蓝光光盘存储原理	10
2.1.5 蓝光存储介质的特点	11
2.1.6 蓝光存储与传统光盘存储的比较	12
2.2 蓝光存储设备	14
2.2.1 蓝光光盘库定义	14
2.2.2 蓝光光盘库结构与原理	15
2.2.3 蓝光存储设备特点	15
2.2.4 市场主流蓝光存储设备	17
2.3 光存储未来发展趋势	19
2.3.1 蓝光存储技术路线	19
2.3.2 下一代光存储技术发展	19
2.3.3 光存储技术的发展趋势及展望	23
第三章 蓝光光盘寿命研究.....	25
3.1 蓝光光盘的材质分析	25
3.1.1 无机相变记录材质	25
3.1.2 有机色素记录材质	27
3.1.3 有机色素与无机相变记录方式比较	28
3.2 影响蓝光光盘寿命因素分析	29
3.2.1 紫外线照射	30

3.2.2 粉尘	30
3.2.3 磁场	31
3.2.4 划痕	31
3.2.5 温度与湿度	31
3.3 蓝光光盘寿命估算方法	32
3.3.1 蓝光光盘寿命定义	32
3.3.2 蓝光光盘寿命估算方法	33
3.4 温湿度加速老化实验	34
3.4.1 加速老化实验方法	34
3.4.2 实验环境	35
3.4.3 实验数据获取	36
3.5 加速老化试验数据分析	37
3.5.1 蓝光寿命计算公式推导	37
3.5.2 蓝光寿命计算公式参数计算	41
3.6 蓝光光盘寿命推算结果	42
3.6.1 蓝光寿命计算结果	42
3.6.2 附加可靠性测试结果	43
第四章 电子档案长期存储需求分析	44
4.1 电子档案概述	44
4.1.1 电子档案的定义	44
4.1.2 电子档案的特点	44
4.1.3 电子档案的类型	45
4.1.4 电子档案的存储	46
4.2 电子档案长期存储现状	48
4.2.1 国内电子档案长期存储现状	48
4.2.2 国外电子档案长期存储现状	50
4.3 电子档案长期存储需求分析	52
4.3.1 电子档案长期存储需求概述	52
4.3.2 电子档案长期存储需要解决的问题	53
4.3.3 电子档案长期存储的合规型要求	57
4.3.4 电子档案长期存储的主要措施	58
4.3.5 电子档案长期存储的具体需求	59
第五章 电子档案长期存储中存储介质的比较分析	62
5.1 总体概述	62

5.1.1 硬盘存储特点	62
5.1.2 磁带存储特点	63
5.1.3 蓝光存储的特点	63
5.2 各类存储比较分析	64
5.2.1 介质寿命	65
5.2.2 介质容量	66
5.2.3 传输速度	66
5.2.4 读写方式	67
5.2.5 记录方式	67
5.2.6 数据纠错能力	68
5.2.7 数据防删改	70
5.2.8 RAID 技术	70
5.2.9 兼容性	71
5.2.10 数据迁移频率	72
5.2.11 环境保护	73
5.2.12 TCO	73
5.2.13 技术发展对比	74
5.2.14 相关软件技术对比	76
5.2.15 存储方式比较一览表	77
5.2.16 存储方式比较雷达表	78
5.3 各类存储的适用场景	78
5.4 各行业适于蓝光存储的需求	79
5.4.1 档案行业	79
5.4.2 金融行业	80
5.4.3 广电行业	80
5.4.4 军工行业	81
5.4.5 医疗行业	81
5.4.6 司法行业	81
5.4.7 教育行业	82
5.4.8 交通运输行业	82
5.4.9 互联网行业	83
第六章 电子档案存储解决方案	84
6.1 方案设计综述	84
6.1.1 方案设计原则	84

6.1.2 方案设计依据	85
6.1.3 方案设计标准	90
6.1.4 关键性技术	93
6.2 设计方案	96
6.2.1 系统架构设计	96
6.2.2 数据长期安全存储 3-2-1 策略	98
6.2.3 VTL+光盘库	99
6.2.4 光磁融合存储方式	100
第七章 蓝光存储系统设计	103
7.1 系统设计综述	103
7.2 具体功能	105
7.2.1 蓝光光盘 RAID 阵列	105
7.2.2 虚拟文件系统	108
7.2.3 Nas 方式网络共享	109
7.2.4 数据库管理存储文件信息	110
7.2.5 分层存储及缓存应用	113
7.2.6 光盘离线管理	116
7.2.7 WEB 页面管理	116
7.3 光盘检测	125
7.3.1 检测功能	125
7.3.2 检测软件	126
第八章 研究成果及应用	128
8.1 研究成果	128
8.2 系统部署	128
第九章 项目创新点	130
附录一 寿命估算试验报告书	131
附录二 核心期刊论文发表	152

第一章 项目概述

2014年5月中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于加强和改进新形势下档案工作的意见》，《意见》中提出要“建立健全确保档案安全保密的档案安全体系”的目标，对重要档案实行异地异质备份保管，保障档案信息安全，建立标准，采取措施，确保电子文件、电子档案长期保存和利用。2015年12月18日，国家档案局局长李明华同志在全国档案工作暨表彰先进会议上的讲话中提出2016年全国档案工作主要任务，其中指出要“强化档案安全管理，全力确保档案绝对安全”，要完善电子档案管理相关标准规范，加强对相关技术的应用与研究。为此，在2016年国家档案局科技项目中，航天档案馆和华录光存储研究院（大连）有限公司联合申报了“蓝光存储在电子档案长期存储中的应用研究”项目（以下简称“项目”）研究，具体研究开发任务由航天档案馆和华录光存储研究院（大连）有限公司共同承担。

1.1 项目简介

本项目为2016年国家档案局科技项目。2016年4月由航天档案馆和华录光存储研究院（大连）有限公司联合向国家档案局申报，2016年6月国家档案局正式批准立项。

以下为本项目基本信息。

1.项目名称

蓝光存储在电子档案长期存储中的应用研究；

2.项目起止日期

2016年4月1日至2017年4月1日；

3.课题内容

- (1) 蓝光光盘使用寿命研究；
- (2) 基于蓝光存储的电子档案长期存储解决方案研究；

4.成果形式

- (1) 完成一篇《蓝光存储在电子档案长期存储中的应用研究》报告；
- (2) 完成一篇《蓝光存储在电子档案长期存储中的应用研究》核心期刊论

文：

(3) 完成一个试点单位的基于蓝光存储的电子档案存储系统部署；

为更好地开展项目研究工作，本项目由中国档案学会信息化技术委员会主任、航天档案馆馆长庞海涛为项目组长，并确定由航天档案馆、华录光存储研究院(大连)有限公司、国家档案局科学技术研究所、中国人民大学等单位组成项目组共同完成相关研究工作。

1.2 项目背景

随着社会活动快速加强、网络信息化日益普遍，移动互联、社交网络、电子商务大大拓展了网络的疆界和应用领域，大数据时代已经来临。与此同时，档案行业信息化快速发展，海量数据的电子档案快速产生，档案行业面临着新的机遇和挑战，可以说档案大数据时代业已来临。

电子档案是指具有参考和利用价值并作为档案保存的电子文件，以及实体档案经数字化处理后形成的文字、图表、图像、音频、视频等不同形式的历史记录。它是电子计算机在档案管理工作中应用的产物，也是档案现代化的显著标志。

目前档案数据存放介质的差异性和多样性，为档案资源的保管工作带来很大难度，为了防止纸质、磁带、唱片等传统介质老化、受潮、消磁或人为破坏等导致无法挽回的损失，目前国家各个档案部门正在加紧推进档案数字化、信息化建设进程。同时，信息技术和网络技术的迅猛发展，产生了种类繁多的电子文件，电子文件归档后形成了电子档案。电子档案不同于纸质档案，其可读性、可用性、可理解性、完整性、真实性等特性及其受制的因素，决定了其长期保存与维护的复杂性。

电子档案长期存储是指电子档案在被社会所需要的时间里进行长期有效的存储、获取和利用。电子档案能否实现其价值，先决条件就是在其完整的生命周期中，始终处于不丢失、不损坏、不失真、不失效的可利用状态。

目前，电子档案长期存储的主要问题有以下几个方面：自然灾害、人为原因、系统安全、保存载体的安全、电子档案迁移风险及电子档案的真实性安全等。为实现电子档案的长期保存，使电子档案具有真实性、完整性、可用性和安全性，确保电子档案的可读取、可识别、可理解和可检索，选择何种存储介质、何种存

储方案是目前档案行业最为关注的重要课题之一。

诸如硬盘、磁带等磁性存储方式，由于其介质本身的存储特性，在长期使用时，无法避免数据丢失、介质损坏、环境要求苛刻、能耗过高等一系列问题，并不适用于电子档案的长期保存。

因此，国内外档案行业及存储软硬件厂商，纷纷将光存储视做电子档案长期存储的最佳方案。虽然在发展初期，CD、DVD 光盘存在容量及材料技术等问题，但是随着近年来蓝光技术的发展与成熟，光存储技术在存储密度及物理防护等方面前进了一大步，完全达到了海量数据长期存储的使用要求。能够真正的发挥自己的优势，实现安全、长期、绿色低能耗的自动化光存储方案。松下、索尼、DISC 等国际公司已经开发研制了各自的蓝光光存储系统。Facebook 等互联网巨头也开始使用蓝光存储系统，来解决日益增长的大数据带来的存储问题。可以说，使用蓝光存储系统已经成为了国际上解决海量电子档案长期存储的趋势。

由此，航天档案馆与华录光存储研究院(大连)有限公司共同开展研究工作，重点研究蓝光光盘使用寿命、蓝光存储在电子档案长期存储中的优势以及如何应用蓝光存储进行电子档案的长期存储问题，提出基于蓝光存储的电子档案长期存储解决方案。

1.3 研究目标与内容

1.3.1 研究目标

本项目的研究目标是通过研究蓝光存储技术与蓝光光盘寿命、分析电子档案长期存储的需求和蓝光存储在电子档案长期存储中的优势，提出基于蓝光存储的电子档案长期存储解决方案。

1.3.2 研究内容

本项目的研究内容包括蓝光存储技术研究、蓝光光盘寿命研究、电子档案长期存储的需求研究、电子档案长期存储中蓝光存储的优势研究以及基于蓝光存储的电子档案长期存储解决方案研究。

1. 蓝光存储技术研究

- (1) 蓝光存储介质——蓝光光盘的结构与原理、介质特点；
- (2) 蓝光存储设备——蓝光光盘库的结构与原理、蓝光光盘库特点；

(3) 蓝光存储未来的发展趋势研究。

2. 蓝光光盘寿命研究

- (1) 蓝光光盘的材质分析；
- (2) 影响蓝光光盘寿命的因素分析；
- (3) 蓝光光盘寿命估算方法；
- (4) 蓝光光盘寿命推算——温湿度加速老化实验实施；
- (5) 温湿度加速老化实验数据分析与寿命推算。

3. 电子档案长期存储需求分析

- (1) 电子档案长期存储现状研究；
- (2) 电子档案长期存储需求分析。

4. 电子档案长期存储中蓝光存储的优势研究

- (1) 蓝光存储与硬盘、磁带存储特点对比；
- (2) 电子档案长期存储中采用蓝光存储的优势研究。

5. 基于蓝光存储的电子档案长期存储解决方案研究

- (1) 存储方案的设计原则、依据及关键性技术；
- (2) 基于蓝光的电子档案长期存储解决方案；
- (3) 蓝光存储功能设计

1.4 研究意义

通过对蓝光光盘寿命的研究，研究结果对于提升国内蓝光存储技术的发展有着重要意义，为蓝光存储技术的安全性和稳定性提供理论基础，为档案行业关于蓝光光盘的相关标准的制定提供重要的依据。

通过对电子档案长期存储中蓝光存储的应用研究，利用蓝光存储的长期性、安全性。可解决当前档案行业电子档案长期存储方式的缺点与不足，从整体上提高电子档案管理的安全性和便利性。

本项目符合国家《关于加强和改进新形势下档案工作的意见》的精神、响应档案事业十三五规划，围绕档案资源建设与共享方面以及档案安全保护方面，提出以蓝光存储为核心的电子档案长期存储方式。在档案行业，本项目的成功实施

将能够为我国电子档案长期存储领域起到示范带动作用；在标准制定、核心技术积累、成果推广、产业集群带动等方面都将具有重要的示范意义。

第二章 蓝光存储技术综述

根据蓝光存储在电子档案长期存储中的应用研究项目的研究目标与内容,开展蓝光存储技术的研究工作,主要内容包括蓝光存储原理、蓝光存储介质、蓝光存储设备、蓝光存储特性以及蓝光存储的未来发展趋势等。

2.1 蓝光存储介质

2.1.1 蓝光光盘定义

蓝光光盘 (Blu-ray Disc, 简称 BD) 是 DVD 之后的下一代光盘格式之一,用以存储高品质的影音以及高容量的数据存储。蓝光光盘的命名是由于其采用波长 405 纳米的蓝色激光光束来进行读写操作,传统 DVD 采用 650 纳米波长的红光读写器,CD 则是采用 780 纳米波长,从而可以使蓝光光盘可以记录的信息量比传统的 DVD 更大。一张单面单层的蓝光光盘可以存储 25GB 容量的文件,也就是一张传统 DVD 光盘容量的 5 倍,而目前主流的单面三层蓝光光盘可以达到 100GB 的存储容量,是传统 DVD 光盘的 20 倍,光盘产品对比如图 2-1 所示。蓝光极大地提高了光盘的存储容量,对于光存储产品来说,蓝光提供了一个跳跃式发展的机会。

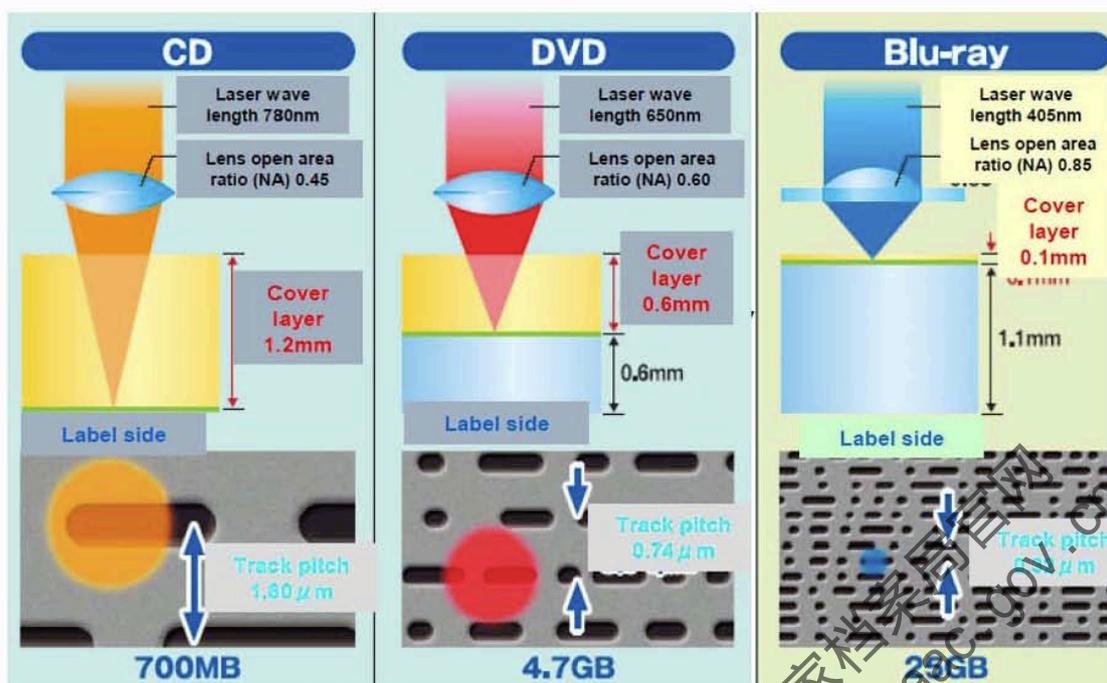


图 2-1 CD/DVD/BD 光盘对比

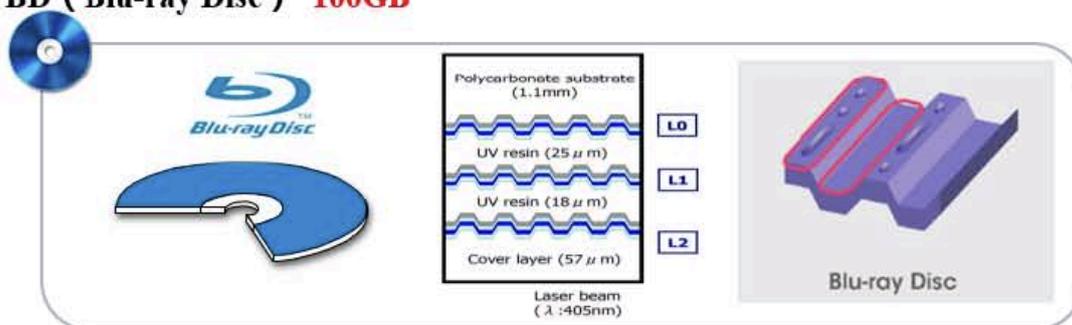
2.1.2 归档级蓝光光盘

归档级蓝光光盘实质上就是一种可记录蓝光光盘，其耐久性远远超出普通光盘，同时其它各项技术指标均优于工业标准。归档级蓝光光盘归档寿命至少达到 50 年。所以一般会选择归档级蓝光光盘作为电子档案长期存储介质。

归档级蓝光光盘以光盘信息长期保存为目标，在追求信号不丢失和可刻录性基础上强调光盘的保存质量和保存寿命，保证光盘信息的长期可读。由于普通信息记录光盘和归档级蓝光光盘产品设计目的不同，因此归档级光盘在材质、制作工艺、质量检测等方面都执行严格的质量标准，远高于普通光盘，从而保证了存储介质的高品质特性。

归档级蓝光光盘介质，一般分为 100GB 的 BD (Blu-ray Disc) 和 300GB 的 AD (Archival Disc)，结构如图 2-2 所示。

BD (Blu-ray Disc) 100GB



AD (Archival Disc) 300GB

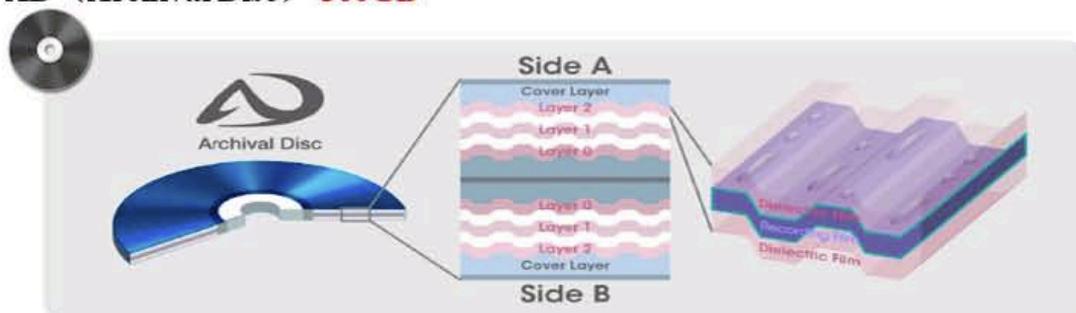


图 2-2 蓝光光盘结构

归档级蓝光光盘具有以下特性，如图 2-3 所示：

- (1) 介质采用无机材料记录膜，材料稳定，受环境影响较低。
- (2) 一次性追加写入，不可删除，防病毒攻击和人为篡改。

- (3) 非接触记录方式，读写光头与介质非接触，无物理磨损。
- (4) 非磁性记录方式，对电磁波，磁场具有高耐久性。
- (5) 长寿命存储介质，50—100 年保存寿命，室温保存即可。
- (6) 大容量光盘规划路线，100GB—300GB—500GB—1TB—2TB 路线，读写头向下兼容。

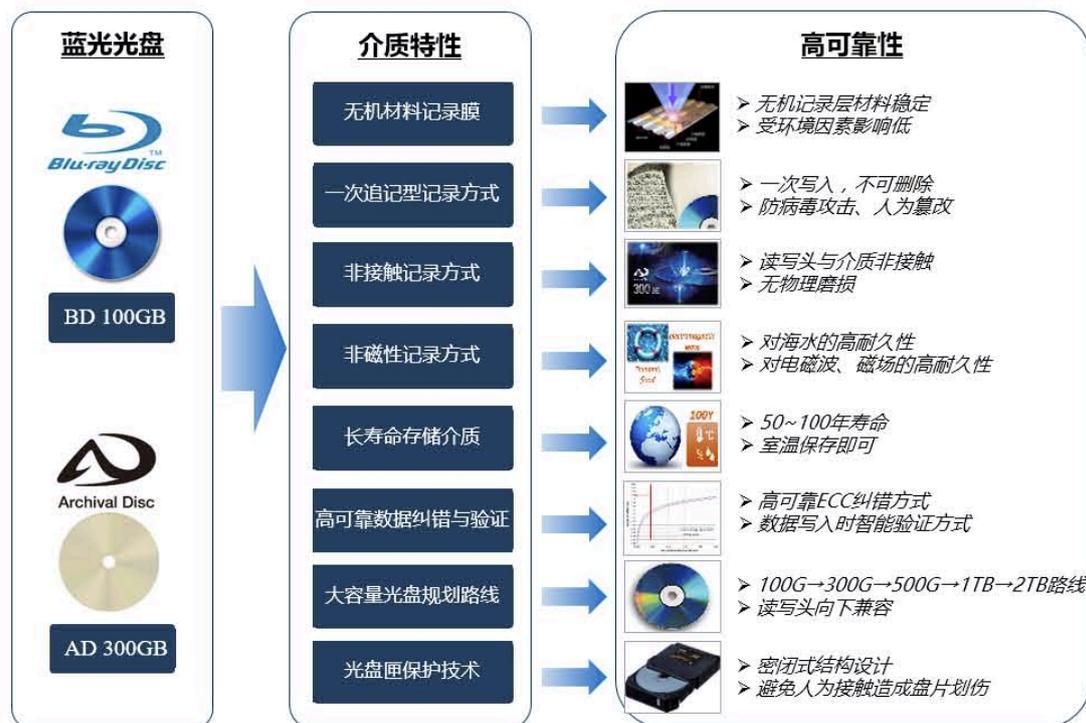


图 2-3 归档级蓝光光盘特性

2.1.3 蓝光光盘结构

蓝光光盘的整体尺寸与传统的 CD、DVD 光盘一致，均为直径 12mm、厚度 1.2mm。以 25GB 容量单面单层蓝光光盘为例，如图 2-4 所示。蓝光光盘的结构主要有基板、记录层、反射层以及由覆盖层、硬质涂层组成的保护层。

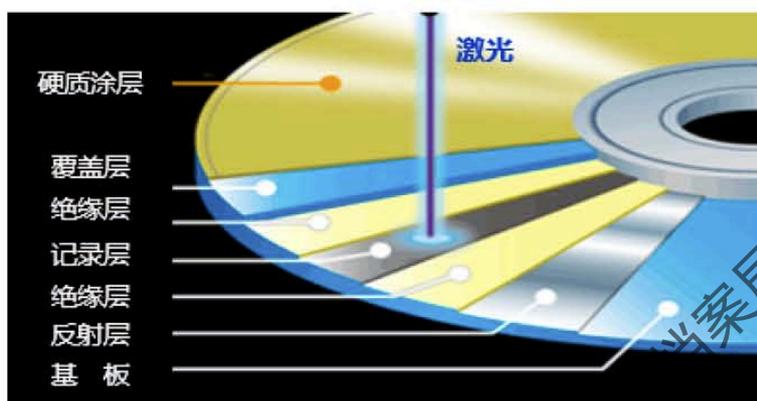


图 2-4 单面单层蓝光光盘结构

蓝光光盘各层的主要功能如下。

1.基板

基板是光盘其它功能性结构（记录层、反射层、保护层）的载体，其使用的材料是聚碳酸酯（PC），冲击韧性极好、使用温度范围大、尺寸稳定性好、耐候性、无毒性。一般来说，基板是无色透明的聚碳酸酯板，在整个光盘中，它不仅是其它功能性结构的载体，更是整个光盘的物理外壳。蓝光光盘的基板厚度为1.1mm、直径为120mm，中间有孔，呈圆形，它是光盘的外形体现。光盘之所以能够随意取放，主要取决于基板的硬度。

2.记录层

记录层是光盘烧录时记录信号的地方，其主要的工作原理是在基板上涂抹上专用的记录层材料，以供激光记录信息。由于烧录前后的反射率不同，经由激光读取不同长度的信号时,通过反射率的变化形成0与1信号，借以读取信息。记录层的材质一般采用有机色素材质和无机相变金属材质。

3.反射层

反射层是反射光驱激光光束的地方，借反射的激光光束读取光盘片中的数据信息。其材料一般为金属材料。这个比较容易理解，它就如同我们经常用到的镜子一样，此层就代表镜子的银反射层，光线到达此层，就会反射回去。一般来说，我们的光盘可以当作镜子用，就是因为有这一层的缘故。

4.保护层

用于保护记录层和反射层，一般采用热交换硬质涂层。保护层厚度为0.1mm。

图 2-5 所示为单面三层 100GB 蓝光光盘结构。

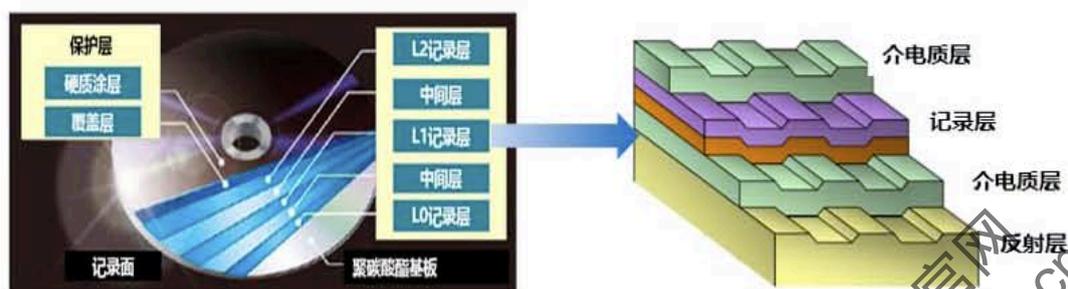


图 2-5 单面三层蓝光光盘结构

2.1.4 蓝光光盘存储原理

蓝光光盘存储是用蓝色激光照射介质，通过激光与介质的相互作用使介质发生物理、化学变化，将信息存储下来的技术。其基本物理原理是：存储介质受到激光照射后，介质的某种性质（比如反射率、反射光极化方向等）发生改变，介质性质的不同状态映射为不同的存储数据，存储数据的读出则通过识别存储单元性质的变化来实现,如图 2-6 所示。

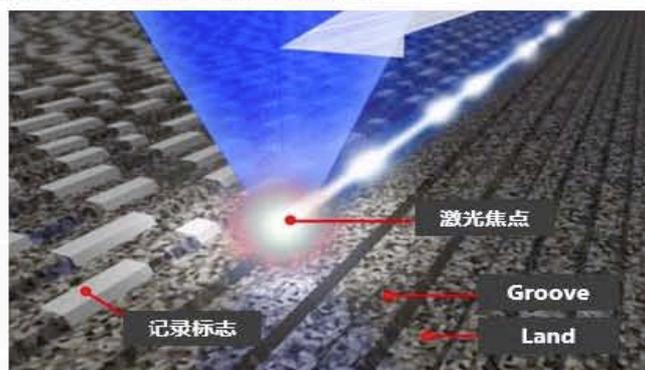


图 2-6 蓝光光盘记录方式

在光盘记录方式方面，主要有槽内(ingroove)记录和岸沟(land-groove)记录两种方式。100GB 蓝光光盘是使用槽内记录方式。300GB 蓝光光盘采用岸沟记录方式。

1. 刻录数据

高强度的激光的照射点落在记录层上，即金属氧化物层，激光会加热照射点上的材料，以至材料由结晶状态转换为非结晶状态，注意不会产生“坑”；而激光没有照射的地方，还是结晶状态，一系列的结晶和非结晶状态组合就是数据信息 0 和 1，如图 2-7 所示。

2. 读取数据

低强度的激光的照射点落在记录层上，如果照在非结晶点，因为非晶体的分子排列是无规则的，所以激光的反射率低；如果照射到结晶点上，因为晶体的分子排列是有规则的，所以激光的反射率高，通过反射率的高低来判断数据信息 0 和 1，如图 2-7 所示。

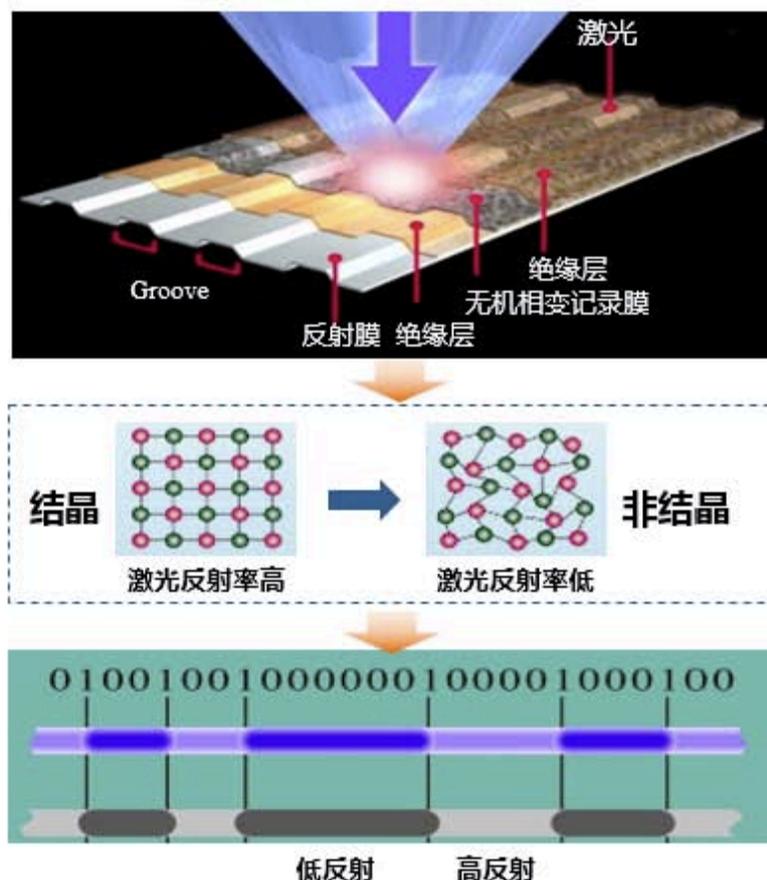


图 2-7 蓝光光盘记录与读取原理

2.1.5 蓝光存储介质的特点

1. 介质寿命长

蓝光盘在技术上进行了两项革命：超硬保护涂层和无机记录材质，新技术使蓝光盘存储年限远超越了硬盘，磁带等其他存储介质，寿命可达 50-100 年。

2. 高可靠性

超硬保护涂层和无机记录材质使得蓝光盘具有及其强的抗划伤和抗指纹污染的能力；加上蓝光驱的光头与蓝光盘之间为非接触式读写，读取次数可达 10 万次。

3. 兼容性高

蓝光盘可以兼容过去 CD/DVD 等光学介质，并且能兼容未来下一代大容量光盘（如 TB 级光盘），蓝光的健壮性更强，现在保存的蓝光盘在 50 年后也能轻易找到光驱来读取，通用性毋庸置疑。

4.成本低

蓝光盘片的成本已经降至很低的水平，随着市场的不断扩大，光盘容量的不断提升，蓝光技术的不断普及，蓝光盘价格会持续下降。

5.能耗低

数据流磁带存储方式，磁带上数据的读写靠机械臂运动和磁带盘绕进行，而且磁带库的体积巨大需恒温恒湿的保存环境，能耗大；硬盘存储方式其在线属性决定了高能耗性质，需对硬盘阵列 24 小时不间断的供电；蓝光盘存储方式，不需要实时加载大功率电源，保存环境无特殊要求，能耗远远低于前面两者。

2.1.6 蓝光存储与传统光盘存储的比较

蓝光光盘采用波长为 405nm 的蓝紫激光器作为读写光源，物镜的数值孔径是 0.85 蓝光光盘的直径是 120mm 和现有的 CD、DVD 相同。光盘的厚度也是 1.2mm 但是它是由基片和 0.1nm 的透明保护层构成。为了防止盘片表面因指纹机回城等附着物引起误码率增大，盘片放在盘何种，一张管盘的单面容积可记录大量数据。蓝光光盘采用 MPEG-2 编码数据流亚索技术，与数字光盘视频记录兼容。数据传输速率快，是 DVD 及 CD 的数倍。此外还采用特有的 ID 写入，以实现高质量版权保护。

通过使用波长更短的蓝紫色激光和 0.85 光圈数值的激光聚焦物镜，蓝光光盘成功的缩小了用于读取和刻录数据的激光光纤的聚焦点直径大小，从而见笑了蓝光光盘的数据记录蹭上用于记录数据的记录点大小；而更小的数据记录点，让蓝光光盘在相同的数据记录归档上可以记录更多的数据记录点。

在蓝光光盘上，数据记录轨道见得距离被减少到 0.32，几乎只要 DVD 的一半。数据记录轨道间更近的距离，让蓝光光盘在相同的盘片面积上可以有更多的数据记录轨道。

通过应用厚度仅有 0.1nm 的表面透明保护层结构，蓝光光盘减少了在使用过程中由于光盘摇动而产生的失常现象，折让光盘有更高的读取质量，因此也就可以增加光盘上记录数据的密度。而厚度更薄的 0.1nm 保护层，则保证盘片上更高密度的记录数据可以被准确的读取。

归档级蓝光盘以光盘信息长期保存为目标，在追求信号不丢失和可刻录性基

础上强调光盘的保存质量和保存寿命，保证光盘信息的长期可读。由于信息记录光盘和归档级蓝光光盘产品设计目的不同，因此所采用原材料不同，制作工艺不同，检测标准不同，检测指标不同，价格不同，产品特征特点和应用领域也不相同。

蓝光存储作为新一代的存储技术与 CD/DVD 技术相比有了突破性的技术进步，是完全迭代的新产品，它在存储介质和数据应用方面均实现了技术飞跃。在存储介质方面，它采用“无机材料相变”方式进行数据记录，比 CD/DVD 的“有机色素”技术更加稳定，存储时间更加长久。在数据应用方面，它实现了数据库技术在光盘领域的应用，从而彻底改变了 CD/DVD 在数据应用方面无法跟磁盘阵列系统平滑对接的问题。

蓝光光盘之所以发展如此迅速，与其优越的性能有着密不可分的联系。为了直观的叙述蓝光光盘与红光光盘的异同，如表 2-1 所示，在表格中详细的记录了蓝光光盘与红光光盘的一些技术参数，从表中我们很容易比较出蓝光光盘的优异之处。

1.采用波长更短的蓝紫光作为读写光源

通过广角镜头上的数字光圈，成功的使聚焦的光点尺寸进一步缩小，这样的改进使得蓝激光实际上可以比红激光更加精确一点。由于波长较短，蓝光能够读取一个 200nm 的点，而相比之下，红色激光只能读写 350nm 的点，所以在同样的一张光盘，点多了，记录的信息自然也就多了，蓝光光盘可存储的信息数量自然也就更加多了，这就造就了蓝光光盘高存储密度的特点。

2.大容量

蓝光光盘之所以有其广阔的应用前景，不得不提到它的大容量。之前的红光光盘单面的存储量可以达到 4.7 GB，但是与蓝光光盘的大容量相比，这样的存储容量似乎微不足道。目前单面四层蓝光光盘容量可达 128GB，双面六层蓝光光盘容量可达 300GB。

3.数据传输率高

在数据的传输速度上，蓝光光盘的数据迁移速率可以到达 60MB/s，这样的传输速度可以使得蓝光光盘用于录制数字高清晰度影像和非压缩的保持原有图像质量的高清晰度图像。

4.可靠性高

在蓝光光盘的表面有一层 0.1 mm 的保护膜，这层保护膜可以大大的减少光盘在 使用过程中 因为摇动而产生的失常现象，这样的设计极大的增加了蓝光光盘的读取质量。另外，这样的特点还有助于增加光盘上记录数据的密度。也是因为这样，使得一片蓝光光盘单面就可以达到 150 GB 的存储容量。

5.存储密度高

与红光光盘相比我们可以看到蓝光光盘的轨道间距减小到 0.32 μm ，大约只有原来轨道间距的一半。轨道间距的减小，可以让蓝光光盘在相同的盘片面积上有更多的数据记录轨道。

6 环境要求低

高性能的光盘结构不受外界温度变化的影响，在常温下可以保存 50 年以上。这对于电子档案的长期存储来说无疑是一个十分有利的条件。

表 2-1 蓝光光盘与传统 DVD 光盘对比

主要技术参数	蓝光光盘	DVD 光盘
激光波长	405nm（蓝紫激光）	650nm（红色激光）
记录容量	25GB~300GB	4.7GB
数据传输速率	60MB/s	11.08MB/s
碟片直径	120mm	120mm
碟片厚度	1.2mm（表面透明保护层厚度 0.1mm）	1.2mm
开口率（NA）	0.85NA	0.65NA
资料追踪格式	凹槽记录（槽内）	凹槽记录（槽内）
轨道间距	0.32 μm	0.74 μm

2.2 蓝光存储设备

2.2.1 蓝光光盘库定义

蓝光光盘库是一种以蓝光光盘或光盘匣为存储载体的具有高可靠性的海量近线存储设备，其通过机械手自动精确定位、抓取光盘，从而实现数据的上传下载。

2.2.2 蓝光光盘库结构与原理

蓝光光盘库是一种带有自动换盘机构（机械手）的光盘网络共享设备。蓝光光盘库一般有放置光盘的光盘匣、自动换盘的机械手和光驱三部分组成。光盘库一般配置多台蓝光光驱，光盘库通过高速 SCSI\SAS\FC 接口与网络服务器项链，光盘驱动器通过自身结构与主机交换数据。用户访问光盘库时，自动换盘机构首先将驱动器中的光盘取出并放置到盘匣中之后将光盘匣放置到指定位置，然后在从盘匣中取出所需光盘送入驱动器中，自动换盘机构的换盘时间通常在 1 分钟之内。

如图 2-8 所示为典型蓝光光盘库结构。存储设备通过光盘匣传送装置，将光盘匣取出，并将光盘运送至光盘加载装置中，由光盘加载装置进行分盘，把光盘加载至光驱组中进行读写。

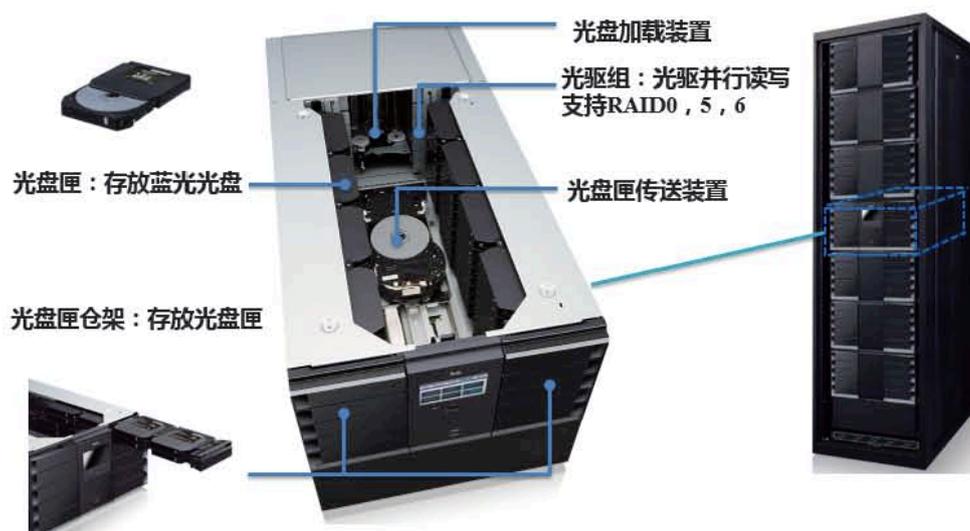


图 2-8 蓝光光盘库结构

2.2.3 蓝光存储设备特点

1. 高密度/大容量

单柜体光盘库的存储容量已经达到 100TB-2PB，一台光盘库相当于 10 万—200 万个标准纸质档案管理柜的保存容量。整个蓝光存储设备可以集中管理几千张光盘。

2. 光盘集中管理

采用光盘匣的方式将光盘集中管理，光盘再光盘匣的密封保护下，排除了

灰尘、划伤、指纹等影响。并且，在光盘离线管理上更加的便于携带。

3.读写速度快

光盘库设备采用多组光驱并行的方式，大大提高了光盘的读写速度，比如12个光驱同时并行时，写入速度可以达到216MB/s，几乎赶上硬盘的读写速度。

4.自动化处理

光盘库内部带有机械手，负责自动抓取光盘，并放置到光驱内进行读写，并可通过相应的管理系统，来实现和客户端的交互。代替了人工的管理。

5.环境要求低

对存放环境要求低，不怕电磁干扰，可以在温度10—55度，湿度20—80%的环境下工作。

6.低能耗

数据保管无需空调，工作功耗120W，待机功耗更是只有7W，远远低于磁存储设备。经计算100TB数据保存所消耗电量仅为3200kWh，而相同数据量的磁盘阵列需要108000kWh。

7.蓝光存储的安全可靠性

RAID技术在磁盘阵列得到普遍应用，实现数据备份功能，保证在硬盘出现故障的情况下，利用备份信息可以使损坏的数据得以恢复，从而保障了用户数据的安全性。蓝光存储成功借鉴磁盘阵列的RAID技术，对于安全级别较高的重要数据可以采用RAID6+镜像的方式存储，如图2-9所示，既保证了在2张数据光盘损坏的情况下能完整地恢复原始数据，又能保证存储数据的可靠性最高达到19N

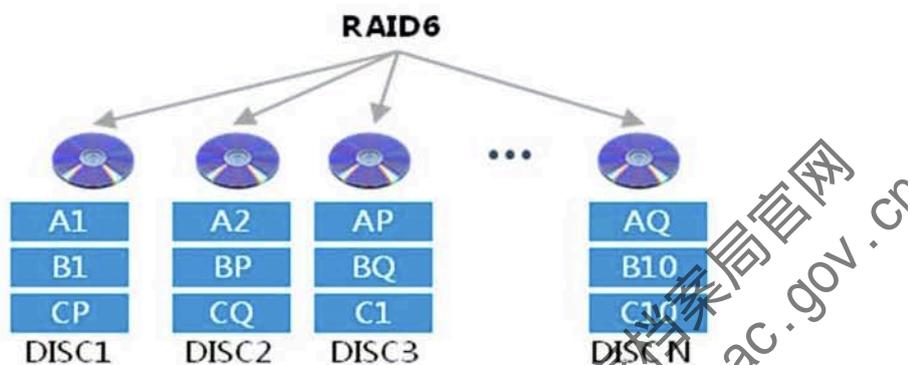


图 2-9 RAID 方式

2.2.4 市场主流蓝光存储设备

IDC 报告显示,预计到 2020 年全球数据总量将超过 40ZB(相当于 4 万亿 GB),这一数据量是 2011 年的 22 倍。在过去几年,全球的数据量以每年 58% 的速度增长,在未来这个速度会更快。所以蓝光存储市场前景广阔,竞争日趋激烈。目前主流的蓝光存储设备厂商有,索尼、德国 disc、中国华录等。

索尼光盘库如图 2-10 所示,配置简单、结构紧凑、扩展性强,单柜体最大存储容量可达 802TB。技术基于成熟、稳定、可靠、安全、耐用的专业光盘技术。光盘采用与数据流磁带相同的工作流程,其非接触式和非线性媒介的属性使文件检索的速度更快,新配置的驱动器的读取速度已接近 LTO6 的读取速度。此外,光盘还具有良好的离线海量数据存储和管理能力以及简便的数据读出和回迁能力,可以轻松实现异地海量数据备份。



图 2-10 Sony 光盘库

DISC 公司的 DVD 光盘库系列产品,如图 2-11 所示,它的机械手及机械传动传输等部件,其精密性与可靠性在同业中均享有口碑。配合 12 万小时的电子器件平均无故障工作时间,80 万次驱动器平均无故障换盘次数,确保了用户能安心、无忧的使用 DISC 产品。全自动光盘库,近线存档容量可达 7 0TB,每盘匣 15 片容量,非直接接触盘片技术



图 2-11 DISC 光盘库

华录蓝光光盘库，如图 2-12 所示，具有高安全、超大容量、长寿命等特点，目前产品单柜体最大存储容量可达 1.91PB，使用归档级蓝光光盘，普通环境下可存放至少 50 年。通过多组光驱并行读写，大大提高了光盘读写速度，在盘片之间可做 RAID，极大的提升了数据的安全性。并且可以根据用户需求进行灵活扩展。提供完整的存储解决方案。



图 2-12 华录光盘库

2.3 光存储未来发展趋势

2.3.1 蓝光存储技术路线

如图 2-13 所示蓝光存储技术发展路线，目前通过双面光盘技术和记录轨道间距减小技术已实现单盘 300GB 的存储容量，后续会利用多阶和多层技术实现单盘 TB 以及 10TB 级的存储容量。不仅蓝光介质的容量会逐年提升，而且随着蓝光光盘应用的普及，一次性购入性价比也将优于硬盘和磁带，对于绿色节能减排和数据长期安全存储都将产生革命性的影响。

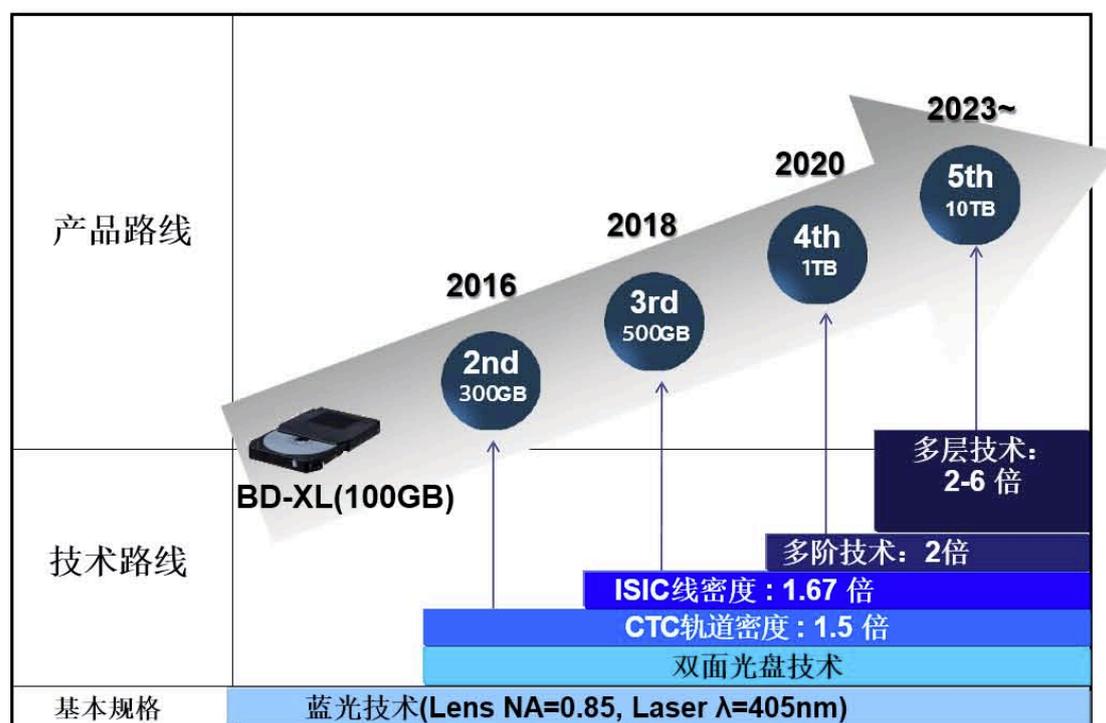


图 2-13 蓝光存储技术路线

2.3.2 下一代光存储技术发展

1. 全息光存储技术

研究厂商：美国 InPhase、日本日立、NHK

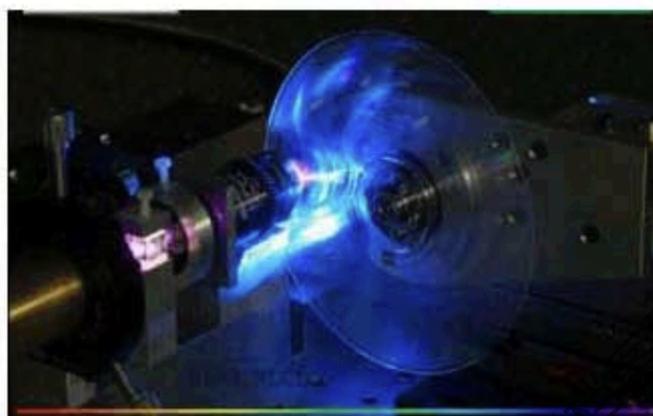
全息光存储技术，数据信息是以全息图的形式被记录在存储材料中，实际上还是一种光盘存储技术，采用复用技术，可大幅度地提高存储容量和系统性能。在各种未来高密度光存储技术中，全息存储具有以下特点：存储密度高，容量大；在可见光谱中存储密度可达 1012bits/cm³；数据冗余度高，全息记录是分布式的，存储介质的缺陷和损伤只会使所有信号的强度降低，而不致于引起数据丢失；

数据传输速率高,信息以页单位,并行读写,从而达到极高的数据传输率。目前采用多通道并行探测阵列的全息存储系统,数据传输率有望达到1Gbyte/s;寻址速度快:参考光可采用声光、电光等非机械式寻址方式,数据访问时间可降至亚毫秒范围或者更低;存储寿命长:存储介质记录的信息可以保持至少50年。

与当前的硬盘、光盘存储以及下一代的高密度光存储技术相比,全息光存储的巨大竞争力体现在它所具有的超大存储容量、超高存储密度和越快的存取速度等方面。全息光存储的研制目标就是希望能够实现TB量级的存储容量和1Gbps的数据传输率。随着人们在关键器件研发和新型存储材料研制方面取得的巨大进步,这一目标的实现并非遥不可及。事实上,Inphase公司和Optware公司已经在这一领域中迈出了坚实的步伐,取得了令人瞩目的成就,同时更在全息光存储商品化的进程中取得了极大的进展。

当然,全息光存储的发展也还存在着诸多的难题,首当其冲的就是必须寻找一种同时兼具性能、容量和价格方面综合优势的存储材料,这也是全息光存储发展过程中必须解决的关键问题之一。其次,从加工生产方面来看,如何以较低的生产成本实现加工,特别是有关激光和光调制器和探测器阵列的对准,对于工程人员来说依然是一个巨大的挑战。最后,要实现合适的性能价格比,全息光存储如果不够便宜,就难以找到市场,普通的PC机用户不会为了性能上一一定的改善而付出高额的费用。因此,全息光存储只有在其价格降到一个合理的水准,才能够在竞争激烈的市场上站住脚。

目前,日本先锋公司已决定采用东京理工大学方案,投入全息光驱的产业化开发,如图2-14所示日本三菱开发全息光盘。



2-14 全息光盘

我们相信随着技术的发展，在不久的将来，人们终究会找到解决这些问题的方法，全息光存储也会走进千家万户，满足人们对于信息存储容量永无止境的需求。

2.超分辨技术

研究厂商：澳大利亚、中国武汉光电国家实验室

2014 年度诺贝尔化学奖授予两名美国科学家以及一名德国科学家，以表彰他们在“超高分辨率荧光显微技术方面的贡献”。SEDM 显微原理的应用，突破了光学衍射数百纳米的限制。在这之后，不同于荧光饱和猝灭的高度非线性，SPEM 技术运用荧光饱和激发的高度线性，将光学显微成像的分辨率提高到了 50 纳米。和 SEDM 一样，从原理上根本性的突破了光学衍射极限的限制。

突破衍射极限的双光束超分辨技术是将突破衍射极限的技术用于光存储，超分辨光存储技术利用两束光突破衍射极限，如图2-15所示，获得更高的分辨率，可使经典光学显微镜的分辨率提高两个数量级，面密度提高4个数量级最小尺度可达9nm，光斑实验尺寸已实现50nm，蓝光目前是400nm，起步容量1000GB/盘，具有15TB/盘的能力，超越日本蓝光技术和全息光存储技术，是最新的超高密度光存储技术,是未来光存储的新方向。

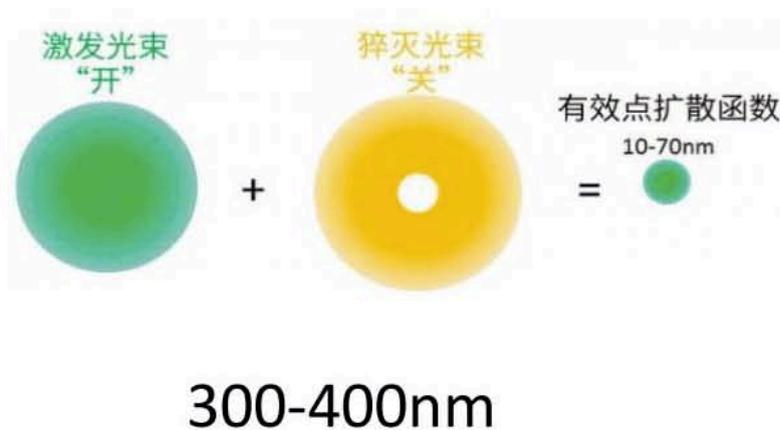


图2-15双光束突破衍射极限

目前在实验室已实现最小记录光斑52nm，而最新实验结果：9nm特征尺寸理论上可实现单盘1PB容量，如图2-16所示。

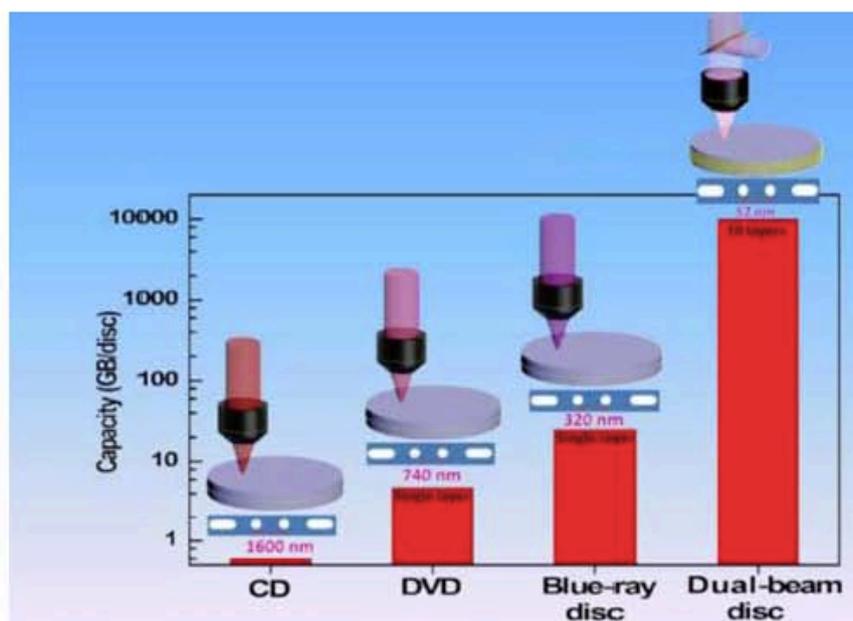


图2-16超分辨技术光盘容量提升

3. 多维技术

多维光存储光盘的盘片上加工有不同深度和角度的记录符，入射光通过分光镜和聚焦镜头聚焦到记录坑表面；再通过聚焦镜头和分光镜后进入光强探测器；当激光聚焦到记录符的中心时，旋转光源 180° ，读出光强探测器中的光强随光源角度变化的信息；通过光强信号的极大值对应的旋转光源角度来区别记录符的角度，通过光强信号的平均幅值来区别记录符的深度。本发明提供的多维光存储光盘的信号检测方法，能够有效避免相邻记录符之间的信号干扰，显著提高多维光存储的信号检测率，从而提高多维光存储的密度。

英国南开普敦大学开发成功采用纳米晶玻璃的5维光盘，存储寿命可超过亿年，实现永久存储，可在 1000°C 高温下不丢失信息。该技术的主要发明人张静宇博士已经回国创业，成为武汉市城市合伙人，与武汉光电国家实验室合作，开发该技术。

目前研究的5维技术，如图2-17所示，可实现单盘 369TB 的存储容量。目标实现 $10\text{TB}/\text{单盘}$ ， $120\text{PB}/\text{库}$ 。市场预期，多维光存储器件MDCDs在未来的5到10年时间即将面世，多维光存储光驱兼容现有的DVD技术和蓝光技术，并支持光学物理态编码和偏振和波长编码技术的记录和读取，将成为未来工作的重点，在该光驱中记录和读取信号的信噪比和误码率将被大量的测试。同时记录和读取的码率将被优化和改善使得大规模数据模块的读取和记录得以改善。该技术

的成功，将影响到现代人生活的每个角落。

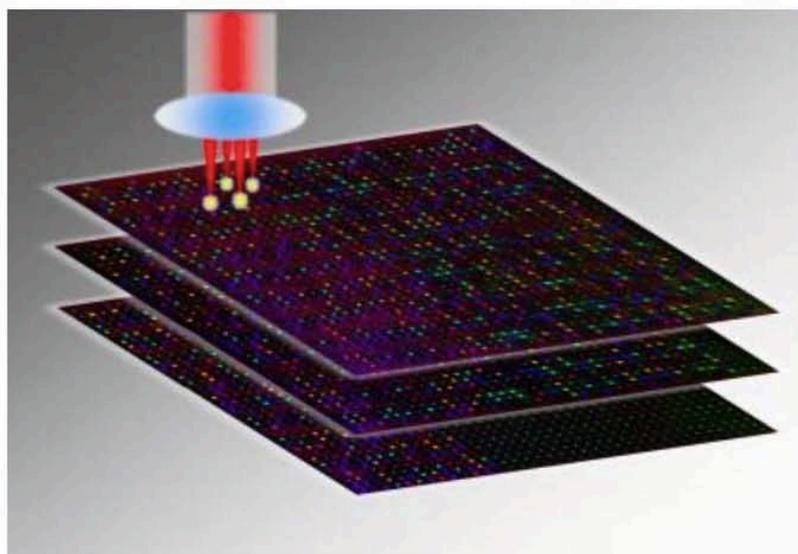


图2-17 5维技术

综上，光存储下一代技术的发展，主要是利用记录介质的特性，以及以光学、集成光学、光子效应、体全息技术、光感生或磁感生超分辨率等原理，使光盘介质记录密度增加，容量增大，速度加快。突破现有的“瓶颈”。从而满足信息发展的需要。

2.3.3 光存储技术的发展趋势及展望

记录密度高是光存储技术最突出的特点，也是用作计算机外设最具有吸引力的方面。但是随着科学技术的发展和制造工艺的改善，磁记录技术也在不断取得新的进展。目前，与磁盘相比，光盘单机的存储容量已无绝对优势，而存取速度差距并无明显缩小。因此，提高记录密度，从而提高光存储的容量，以及提高读写速度是光存储技术研究工作的主要方向。

超高密度光存储技术代表者信息存储的发展方向，国内外竞争的非常激烈，相对于国外的发展态势，国内仍然存在一定的差距。光存储方向的研究，是为了满足日益发展的信息技术的需要，所以，各种存储技术都是以提高存储容量、密度、可靠性和数据传输率作为主要发展目标。目前，全息体存储、蓝光存储以及基于超分辨率近场结构存储是主要的研究方向。其中蓝光技术作为第三代光存储技术，即将成为数字视频传播等领域的主流技术。从长远来看，只有将蓝光技术进行扩展，即与多阶、超分辨近场结构、多波长等技术相结合才能进一步扩大存储容量，适应未来发展的需要。光存储的发展趋势是从二维光存储到多维光存

储，从光热存储到光子存储，从远场光学存储到近场光学存储。具体发展方向主要着重于以下几个方面：

(1) 进一步缩小记录单元是发展高密度光存储的有效途径，最具代表性的就是超分辨率近场结构存储。随着精密技术及弱信号处理等相关技术的进步，信息的记录单元将逐渐减小到单原子或分子量级。

(2) 采用数字式记录作为最基本和最有效的记录方式。

(3) 采用并行读写逐步代替串行读写，从而提高数据的读取传输率。体全息存储的一个固有特性就是具有并行读写功能，这是体全息存储被普遍重视的原因之一。

(4) 改善寻址方法，发展无机械寻址功能，提高随机寻址速度。

(5) 加强超高密度光存储记录材料的基础研究仍是解决超高密度存储和超快速响应等问题的关键，主要方向是开发适于光致模式的超高密度近场光存储的有机介质。

(6) 另外，光存储技术的原理是光与记录介质之间的相互作用。记录介质的性能对记录密度和读写速度具有举足轻重的影响。因此，寻求具有新的读写原理、灵敏度和分辨率更高的记录材料，也是未来提高存储容量和存储速度的必然要求。

总之，光存储技术在迅速发展，容量不断增大，速度不断提高。据有人估计，光盘的容量每8年提高10倍。但是光盘性能的提高远远赶不上信息科学的发展和实际需要。为此在现有技术基础上，如前所述，采用并行读写技术、阵列式结构以及光盘库等建造具有超大容量、超高速的存储和记录应用系统是切实可行的途径。

第三章 蓝光光盘寿命研究

根据蓝光存储在电子档案长期存储中的应用研究项目的研究目标与内容,开展蓝光光盘寿命的研究工作,主要包括蓝光光盘的材质分析、影响蓝光光盘的寿命因素分析、蓝光光盘寿命估算方法、温湿度加速老化实验、加速老化实验数据分析以及蓝光光盘寿命推算结果等。

3.1 蓝光光盘的材质分析

蓝光光盘结构中最重要的一部分就是记录层,记录层很薄,厚度是纳米级别的,记录层是用于记录数据信息的,也就是用于记录 0 和 1 这样的信息。所以记录层的材质对于光盘的质量至关重要。蓝光光盘的记录层材质一般分为无机相变材料和有机色素材料两种。

3.1.1 无机相变记录材质

无机相变材料采用金属合金的材质,无机物一般是不含碳元素的物质,合金材料就是一种无机物,而相变就是指这种材料可以实现结晶和非结晶的相互转换,比如 BD-R 的记录层就是锗元素(Ge)、锑元素(Sb)、碲元素(Te)这样的金属氧化物相变材料。所以 BD-R 的记录层就是在一个基板上镀上一层金属氧化物。

刻录数据时:高强度的激光的照射点落在记录层上,即金属氧化物层,激光会加热照射点上的材料,以至材料由结晶状态转换为非结晶状态,注意不会产生“坑”;而激光没有照射的地方,还是结晶状态,一系列的结晶和非结晶状态组合就是数据信息 0 和 1。

读取数据时:低强度的激光的照射点落在记录层上,如果照在非结晶点,因为非晶体的分子排列是无规则的,所以激光的反射率低;如果照射到结晶点上,因为晶体的分子排列是有规则的,所以激光的反射率高,通过反射率的高低来判断数据信息 0 和 1。

无机相变记录原理如图 3-1 所示。

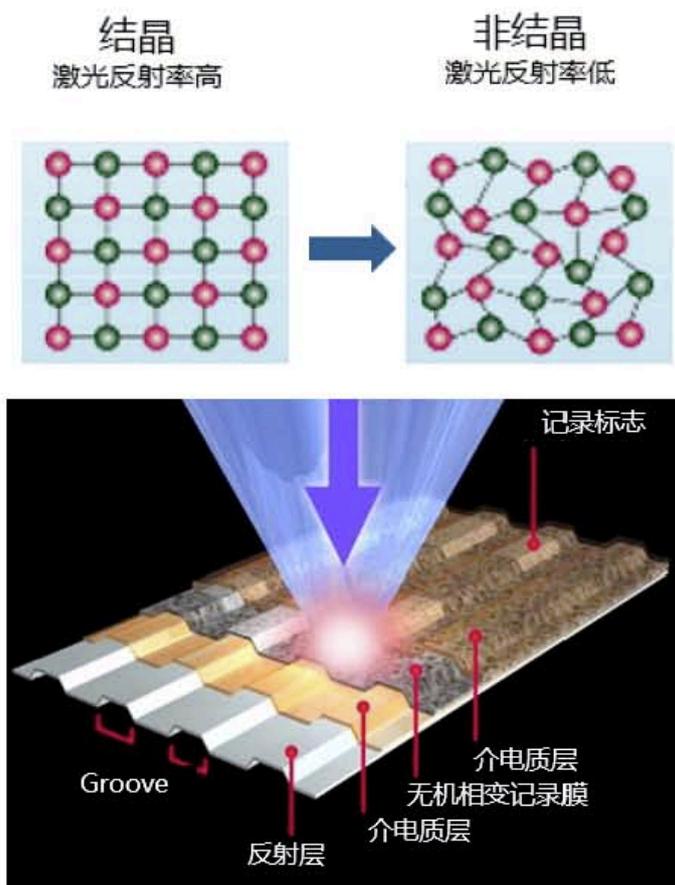


图 3-1 相变记录原理

以 300GB AD(Archival Disc)蓝光光盘为例，展示了 300GB AD(Archival Disc)光盘的结构。300GB AD 光盘为双面构造光盘，每面是由 1 个带有 3 层记录层 (Recording layer) 的半阻厚度塑料基板 (Substrate) 构成。每面容量为 150GB，双面总容量合计为 300GB。AD 光盘单面在塑料基板 (Substrate) 上形成 3 层记录层 (Recording layer) 和 1 层位于记录层顶部的覆盖层 (Cover layer)，参见表 3-1。此外，每两个记录层中间会用隔离层 (Space layer) 分离。记录层是由被介电薄膜 (Dielectric film) 夹在中间的一个氧化记录膜 (Recording film) 组成，可以理解为整个记录层都是由氧化物材质组成，记录层的厚度小于亚微米。

图 3-2 所示为 300GB AD 蓝光光盘结构。

国家档案局官网
WWW.SAAC.GOV.CN

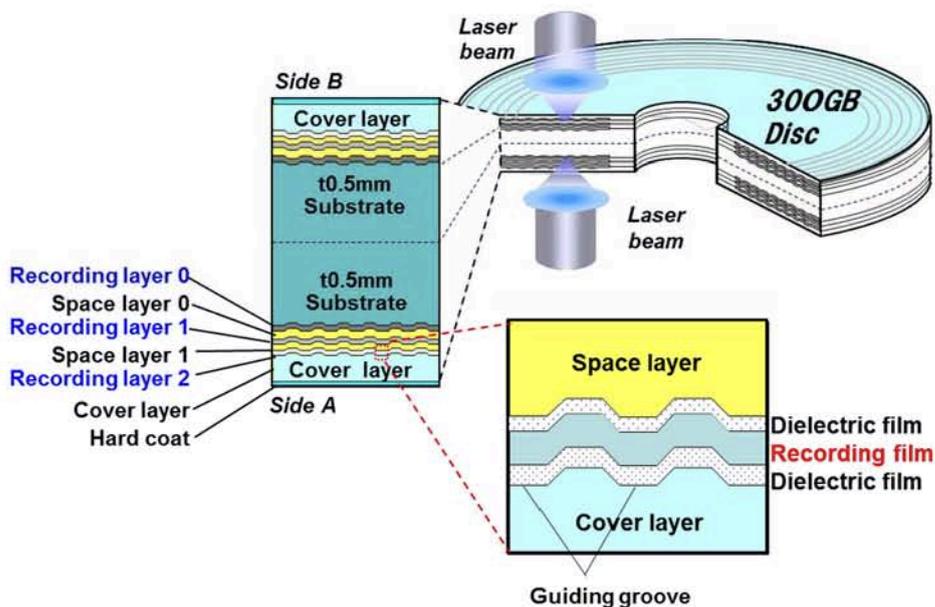


图 3-2 300GB AD 蓝光光盘结构

表 3-1 300GB AD 蓝光光盘材质

构成	材质	厚度	备注
覆盖层 Cover Layer	丙烯酸树脂 Acrylic resin	55μm	
硬质涂层 Hard Coat	丙烯酸树脂 Acrylic resin	2μm	
间隔层 Space Layer	丙烯酸树脂 Acrylic resin	43μm	
基板 Substrate	聚碳酸酯塑料 Polycarbonate plastic	1.0mm	
介电薄膜 Dielectric film	氧化物 Oxide	<50nm	不含稀有金属与贵金属
记录膜 Recording film	氧化物 Oxide	<50nm	不含稀有金属与贵金属

3.1.2 有机色素记录材质

有机色素也就是染料，有机物实际上是指含碳元素（C）和氢元素（H）的化合物，比如 CD-R 和 DVD-R 以及部分蓝光光盘的记录层就是一种叫做酞菁或者花菁这样的有机染料，简单点理解记录层就是在一个基板上涂上一层染料。

刻录数据时：高强度的激光的照射点落在记录层上，即染料层，激光会加热照射点上的染料，以至染料高温分解、消失，就是形成一个“坑”。激光没有照射的地方，染料还在，可以作为“槽”，若干一系列的“坑”与“槽”的组合就是数据信

息 0 和 1。

读取数据时：低强度的激光的照射点落在记录层上，如果照在“坑上”，激光的反射率会高；如果照射到“槽”上，即照在有染料的点上，因为染料是有颜色的，颜色会吸收一定的光，这样激光的反射率就低，通过反射率的高低来判断数据信息 0 和 1。

有机色素记录原理如图 3-3 所示。

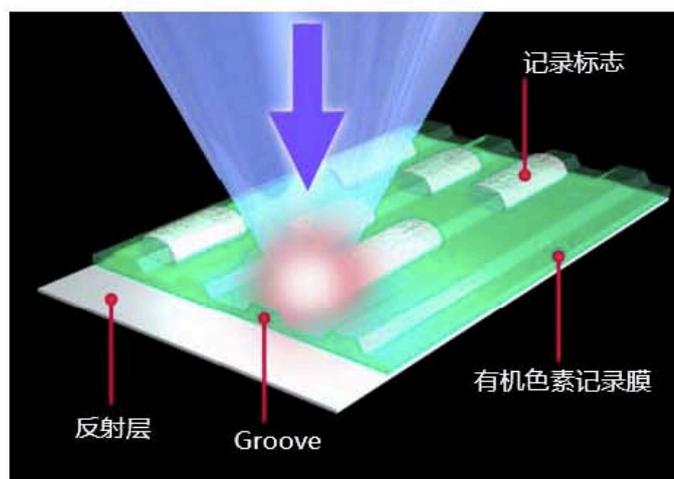


图 3-3 有机色素记录原理

3.1.3 有机色素与无机相变记录方式比较

光盘结构中最重要的一部分就是记录层，记录层很薄，厚度是以亚微米来进行计算的，记录层是用于记录数据信息的，也就是用于记录 0 和 1 这样的信息，所以记录的材质对于光盘的质量至关重要。就记录材质来说，可分为有机色素记录方式与无机相变记录方式，可以通过定义来了解一下这两种方式间的区别，见表 3-2 所示。

表 3-2 无机相变记录与有机色素记录方式比较

蓝光光盘记录方式	无机相变记录方式	有机色素记录方式
记录层分类	无机型（金属）	有机型（色素）
记录层材质	金属即合金：Ge-Sb-Te	色素即染料：酞菁 C32H18N8
碟片类型	BD-R	CD-R/DVD-R/部分 BD-R
保存时间	100 年以上	10 年以上
制造成本	高	低

这两种方式相比较来说，无机金属相变材料比有机染料有更高的稳定性，无

机相变材料需要 600℃以上的高温加热才会状态改变，而有机染料一般为 400℃就会分解，紫外线和空气潮湿会引起有机染料记录层的变形或数据丢失；另外一条重要信息为无机相变材料可保存时间大约为 100 年以上，物质不发生变化，有机色素材料的保存时间约为 10 年以上。从上面的内容可以明白蓝光存储所使用的 BD-R 蓝光光盘是采用无机相变记录方式来记录数据的，其机制是通过激光照射膜的金属记录层，从而实现金相改变来记录数据，也就是说记录标记是通过物理形态的变化而形成的，采用这种方式记录的数据非常稳定且可靠。图 3-4 为记录层在数据记录前后的横截面变化图片，图上半部分是记录前，下半部分为记录后，可明显地看出记录层在记录后所产生的变化。

记录层材质的另一重要特征为全部由氧化物组成，整张 300GB AD 光盘的颜色为透明的，这是因为光盘内不含金属，所以也无需担心会被腐蚀。可以最大限度的不受环境的变化影响（如温度、湿度）而长久的保存，通过前面的例子说明，DVD-R 光盘含有色素记录层与金属反射层，使之易受到温度、湿度、与日照的影响而损坏。300GB AD 光盘材质基于上述的两个特性，大幅提高了数据存储上的可靠性，是非常适合于长期归档使用的数据存储介质。

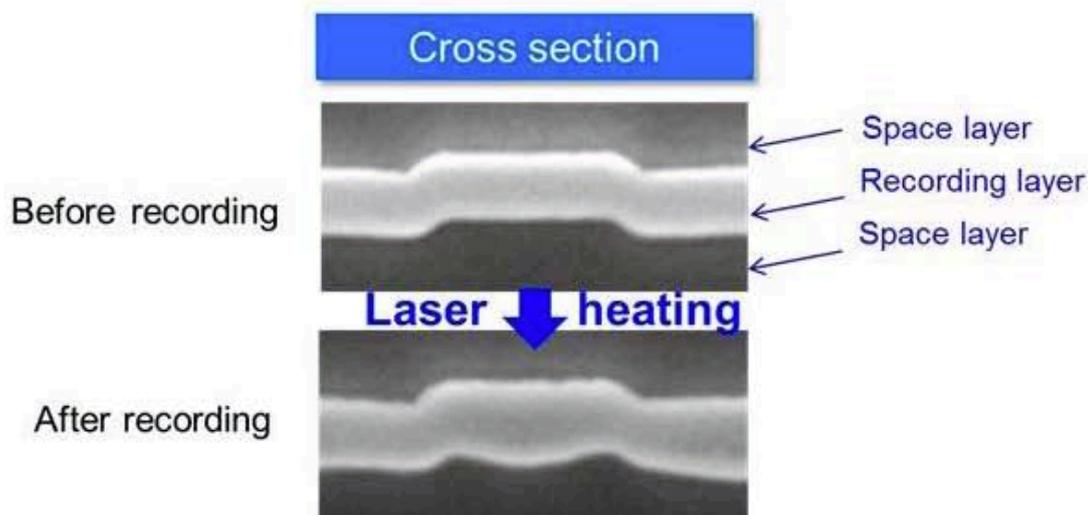


图 3-4 记录层横截面

3.2 影响蓝光光盘寿命因素分析

影响蓝光光盘寿命的因素应在自然环境下除去人为因素以及自然灾害等条件，仅考虑环境因素。环境因素主要包括：光照、灰尘、磁场、温度、湿度。

3.2.1 紫外线照射

CD/DVD 等都是有机材料（色素），长期暴露在光照下的可录光盘会引起染料层褪色，对光盘信息读取面破坏较大。而蓝光光盘表面具有 UV 保护层，有防紫外线的功能，并且蓝光光盘采用无机金属材料，大大减少了光照对蓝光光盘的影响。

3.2.2 粉尘

自然环境中的灰尘及颗粒污染物对光盘的耐久性会造成较大的影响，蓝光光盘表面具有硬质涂层，此外所采用的光盘匣可以让蓝光光盘处于一个封闭的空间中，基本杜绝了灰尘的进入；所以从材质及保存方式上，蓝光光盘可排除灰尘的影响，另外长期保存中，可采取人为避免灰尘环境，因此对于蓝光光盘寿命的分析，可以不考虑灰尘因素对光盘寿命造成的影响。

使用专业的粉尘测试设备如图 3-5 所示，进行粉尘耐久性加速测试，通过设备把粉尘浓度调整到与数据中心环境相似的 Class 8 条件（Class 8 条件是典型的数据中心环境）下，将包含光驱、风扇的完整扩展单元放入测试设备中进行加速测试，测试时间相当于 10.4 年。

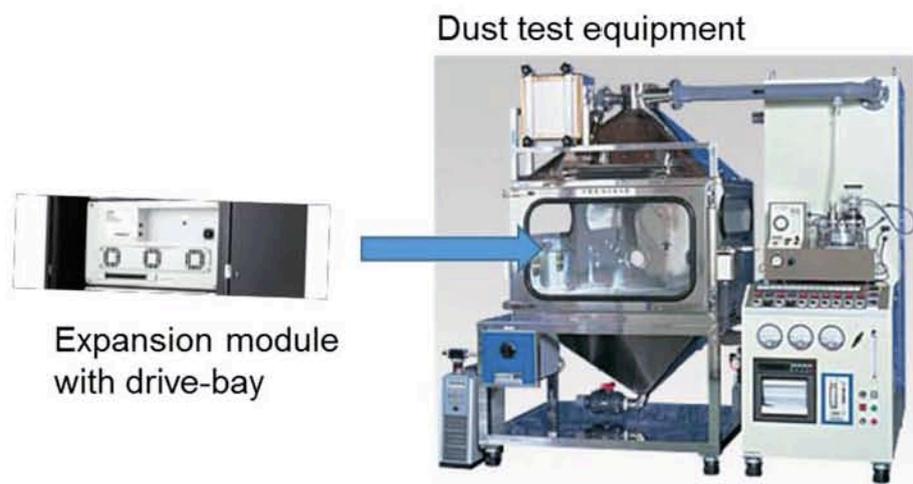


图 3-5 粉尘测试设备

粉尘测试完成后，将测试期间在光驱或在盘匣里的光盘取出，对盘面所有数据区域进行误码率检测，结果如表 3-3

表 3-3 粉尘测试结果

光盘类型	读取结果
光驱中的光盘	通过（全部数据）
盘匣中的光盘	通过（全部数据）

3.2.3 磁场

由于蓝光光盘的记录层是无机金属材质，不会被磁化，所以并不会受到磁场的干扰。磁场因素的影响也无需考虑。

3.2.4 划痕

划痕测试基于 ISO 9353 标准来进行检测，该盘面划痕检测标准非常的严苛，DVD 光盘在相同条件下检测后光盘是无法进行读取的。300GB AD 光盘在通过检测后，盘中的所有数据区域全部可读取。图 3-6 展示了通过测试的 300GB AD 光盘，盘面上的多处划痕清晰可见。检测结果如表 3-4 所示。



图 3-6 通过划痕检测后的 300GB AD 光盘

表 3-4 划痕检测结果

测试条件	测试结果
写入测试（半径=31-44mm）	通过
读取测试（半径=31-44mm）	通过

3.2.5 温度与湿度

CD/DVD 光盘在长期存储中，外部环境条件（温度、湿度）的改变会引起光盘结构的机械应力，导致各层材料会有不同的膨胀与收缩造成基质材料聚碳酸酯双折射率的变化。这种因素不可避免，光盘会随着记录层的氧化而造成数据丢失。蓝光光盘采用无机金属相变的记录方式，无机金属相变材料比有机染料有更高的

稳定性，无机相变材料需要 600℃ 以上的高温加热才会状态改变，而有机染料一般为 400℃ 就会分解，紫外线和空气潮湿会引起有机染料记录层的变形或数据丢失。无机相变材料可保存时间为 100 年以上，物质不发生变化，有机色素材料的保存时间为 10 年以上。

蓝光光盘长期存储中，外部环境条件（温度、湿度）的改变会引起光盘结构的机械应力，导致各层材料会有不同的膨胀与收缩造成基质材料聚碳酸酯双折射率的变化。这种因素不可避免，光盘会随着记录层的氧化而造成数据丢失。

根据以上因素的分析，能影响蓝光光盘寿命的两大因素为温度和湿度。

3.3 蓝光光盘寿命估算方法

3.3.1 蓝光光盘寿命定义

1. 蓝光光盘寿命（个体）

依据 ISO/IEC 30191 信息技术.信息交换和存储用数字式记录媒介标准，蓝光光盘数据读取时，随机信号错误率 RSER 高于 $1E-3$ 时，认定蓝光光盘故障，其从出厂到认定故障截止时间为蓝光光盘寿命，如图 3-7 所示。



图 3-7 蓝光光盘寿命定义（个体）

2. 蓝光光盘寿命（群体）

依据 ISO/IEC 16963 信息技术.信息交换和存储用数字记录介质.长期数据存储用光学介质寿命评估试验方法标准，在一定温、湿度条件下，蓝光光盘从出厂到 95% 的存活率时，其预测的时间为蓝光光盘标准期待寿命。如图 3-8 所示。

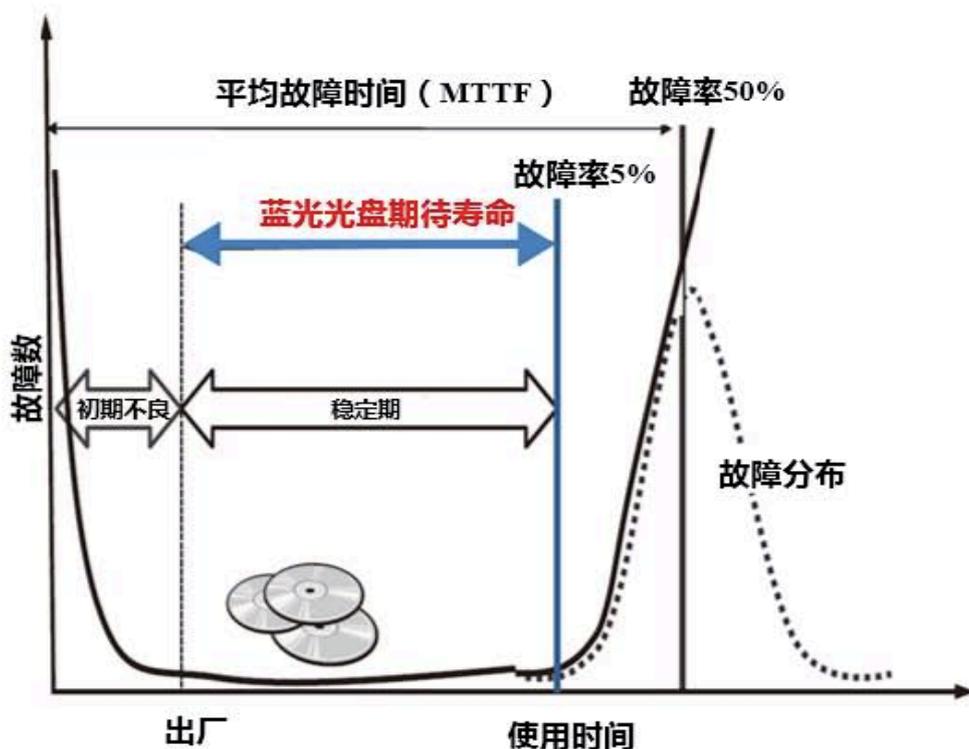


图 3-8 蓝光光盘寿命定义（群体）

3.3.2 蓝光光盘寿命估算方法

由于光盘问世的时间太短，尚无真实的光盘存档寿命数据。制造商采用加速老化试验来外推通常环境下的光盘存储寿命。加速老化寿命试验是将光盘置于比行业标准规定的正常使用条件还苛刻的环境条件下（高温、高湿、强光、酸雾等），强制老化，获得其加速的失效时间数据，采用适当的失效模型来推算光盘在正常使用条件下的寿命特征。

依据 ISO/IEC 16963 标准，采用艾林模型方法，选取 5 组蓝光光盘分别在不同的高温高湿条件下进行加速老化实验，取得蓝光光盘个体的故障时间，根据 5 组故障时间的数据分布，依据统计学方法计算出最佳回归直线，计算出常温常湿条件下蓝光光盘的故障时间，即蓝光光盘期待寿命。

艾林模型如图 3-9 所示。

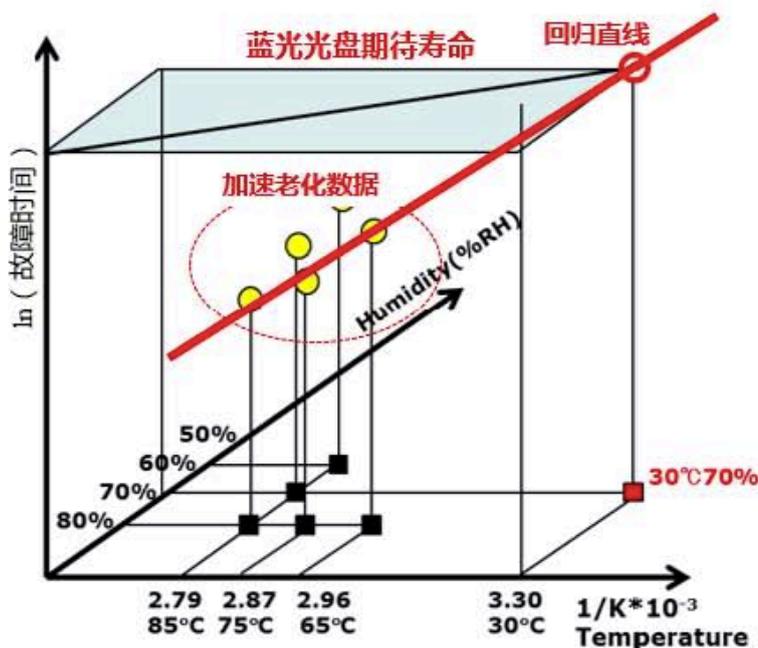


图 3-9 艾林模型

蓝光光盘寿命推算公式：

$$\ln(t) = \ln(A) + \frac{\Delta H}{kT} + B \times RH = \ln(A) + \frac{\Delta H}{k} \cdot \frac{1}{T} + B \times RH$$

t 故障时间（期待寿命）

T 温度（开尔文）

RH 相对湿度

结论：求解艾林公式系数： $\ln(A)$ 、 $\Delta H/k$ 、 B

3.4 温湿度加速老化实验

3.4.1 加速老化实验方法

一般认为光盘退化发生在薄膜功能特性改变时（如构成记录层的记录膜或反射膜）所引起的化学反应，类似水合反应。退化遵循反应速率理论，我们使用 Arrhenius 模型或是艾林模型来看待已知应力与反应速率之间的关系，因此光盘的寿命可以用温度应力或湿度应力加速实验来估算。

实验方法依据 ISO16963-2015 选取 110 个蓝光光盘分成 5 组分别在不同的高温高湿条件下（温度 65-85°C、相对湿度 60%-80%）进行加速老化实验。结果如图 3-10 所示

ISO/IEC 16963标准测试条件
Rigorous stress-condition for use with Eyring method

Test specimen group	Test stress condition (incubation)		Number of specimens	Maximum incubation sub-interval time hours	Minimum total incubation-time hours
	Temp (°C)	% RH			
A	85	80	20	300	1 500
B	85	70	20	400	2 000
C	85	60	20	600	3 000
D	75	80	20	600	3 000
E	65	80	30	800	4 000

图 3-10 加速老化实验结果

3.4.2 实验环境

图 3-11 为蓝光光盘随机信号错误率 RSER 检测工具:



图 3-11 蓝光 RSER 检测工具

图 3-12 为蓝光光盘恒温恒湿老化环境:



图 3-12 蓝光光盘恒温恒湿老化环境

3.4.3 实验数据获取

1. 试验数据获取方法，如图 3-13 试验回归分析

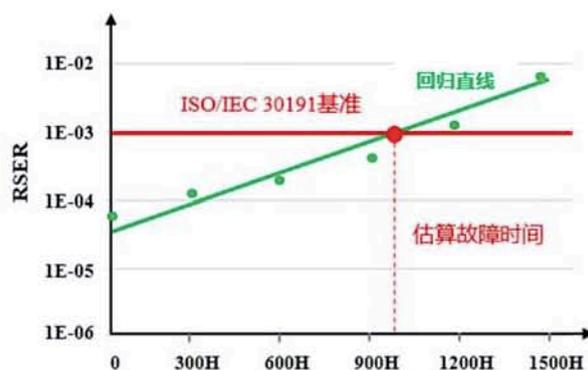


图 3-13 试验回归分析

2. 光盘故障时间获取，结果如表 3-5

表 3-5 光盘失效时间数据

Order number	Group A	Group B	Group C	Group D	Group E
	85°C/80%RH	85°C/70%RH	85°C/60%RH	75°C/85%RH	65°C/85%RH
1	517	1574	2601	1356	4585
2	535	1890	2633	1369	5018
3	548	1961	2722	1372	5332
4	645	2016	2891	1383	5691
5	678	2207	2894	1386	5800
6	681	2224	2898	1387	5803
7	700	2237	3070	1390	5815
8	788	2238	3276	1394	5834

9	823	2286	3428	1401	5834
10	825	2301	3448	1403	5837
11	831	2319	3507	1408	5923
12	885	2353	3642	1418	5944
13	892	2491	3642	1426	5950
14	912	2497	3681	1446	6127
15	917	2551	3686	1447	6153
16	918	2566	3728	1459	6177
17	918	2616	3743	1515	6393
18	930	2699	3825	1518	6407
19	958	2804	3935	1559	6419
20	976	2883	3959	2201	6496
21					6497
22					6524
23					6529
24					6575
25					6616
26					6658
27					6738
28					6957
29					7105
30					7263

3.5 加速老化试验数据分析

3.5.1 蓝光寿命计算公式推导

1. 对数正态分布模型及点估计

如图 3-14 所示, 由于故障时间 t 即蓝光光盘寿命呈对数正态分布 $LN(\mu, \sigma^2)$, 也就是故障时间的对数($y=\ln t$)呈普通正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 这里 μ 、 σ 分别是 y 的期

望和方差。 μ 可以由 x 的函数表示，如下：

$$y = \mu(x) + \sigma \cdot z$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \sigma \cdot z$$

注意， x 是一个二维变量(x_1, x_2)

其中， z 表示一个 $N(0,1)$ 正太分布中的百分数， $\beta_0 = \ln A$ ， $\beta_1 = \Delta H / k$ ， $\beta_2 = B$ (A 表示指数时间常数， B 表示 RH 指数常数)， x_1 代表温度的倒数，即 $x_1 = 1/T$ ， x_2 表示相对湿度，即 $x_2 = RH$ 。百分数 p 代表蓝光光盘寿命的分布，在工程中一般使用 B_p 时间来表示。 $\ln B_p$ 的线性回归方程如下：

$$\ln \hat{B}_p = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + z_{p/100} \hat{\sigma}$$

从而可以得出，生存概率为 5% 和 50% 的点估计值分别为：

$$\ln \hat{B}_5 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{10} + \hat{\beta}_2 x_{20} - 1.64 \hat{\sigma}$$

$$\ln \hat{B}_{50} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{10} + \hat{\beta}_2 x_{20}$$

这里， x_{10} 、 x_{20} 表示测试是的环境条件 (25°C 以及 50% RH)。

$$x_{10} = 1/(273.15 + 25), \quad x_{20} = 50$$

注意，蓝光光盘寿命估计的目的是估量蓝光光盘的群体的存活情况，所以这里 $(\sigma)^2$ 使用无偏方差。

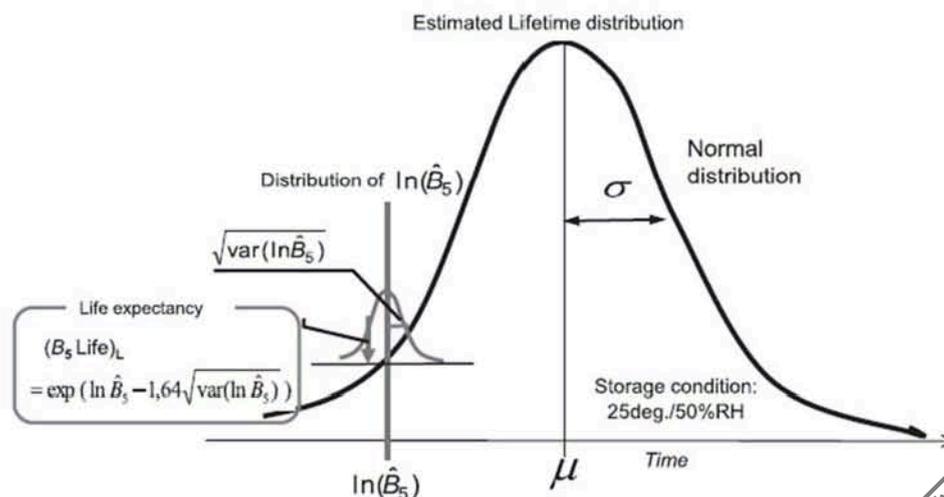


图 3-14 对数正态分布模型

2. 光盘的区间估计

对于一个光盘寿命的区间估计，可以只考虑下界。蓝光光盘寿命的 $(100-\alpha)\%$

置信区间可以通过下面的等式得出：

$$(\ln \hat{B}_p)_L = \ln \hat{B}_p + z_{\alpha/100} \sqrt{\text{var}(\ln \hat{B}_p)}$$

这里 $\text{var}(\ln \hat{B}_p)$ 表示 $\ln \hat{B}_p$ 的方差。

3.使用最小二乘法估计 β 和 σ

对 i_{jth} 数列的多元线性回归模型可以表示为：

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \varepsilon_{ij} \quad (i \text{ 从 } 1 \text{ 至 } n_j) (j \text{ 从 } 1 \text{ 至 } J)$$

这里的 ε_{ij} 表示错误数， n_j 表示每组样本个数， J 表示总实验组个数；

估计值 \hat{y}_j 可以这样得出：

$$\hat{y}_j = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1j} + \hat{\beta}_2 x_{2j}$$

公式中， $x_{1j} = 1/(273.15 + T_j \text{ (in } ^\circ\text{C)})$ $x_{2j} = RH_j$.

并且可以得出平方残差 S_e 为：

$$S_e = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \hat{y}_j)^2$$

如果寿命数据是完整的，分布是对数正态分布的，那么通过最小二乘法得到的估计回归系数与通过最大似然法得到的应该相同，此时的估计回归系数是有效的，可以应用于估计光盘使用寿命。下面显示了利用最小二乘法得到的计算结果的方法。

估计回归系数 \hat{y}_j 可以通过对 S_e 使用最小二乘法的方式得到。估计数 $\hat{\beta}_0$ 、 $\hat{\beta}_1$ 、 $\hat{\beta}_2$ 是对样本组 ABCDE 的 110 线性回归方程得到的。将 $(\hat{\sigma}_{ism})^2$ 取值为通过最小二乘法计算出的均方差，即

$$(\hat{\sigma}_{ism})^2 = \frac{S_e}{(n-3)} = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \hat{y}_j)^2}{(n-3)}$$

其中， $n = \sum_{j=1}^J n_j$ ，表示样本总数。 $n-3=n-2-1$ ，减 1 是因为取样数量限制，减 2 是因为自由度个数（温度和湿度）。这个方法使用的是艾林模型，如果使用 Arrhenius 模型，自由度只有温度，这样 $n-3$ 就变成 $n-2$ 。

对于 $\hat{\beta}_0$ 、 $\hat{\beta}_1$ 、 $\hat{\beta}_2$ 以及残差估计方差 $(\hat{\sigma}_{ism})^2$ 这里使用回归分析统计软件工具

计算得出。

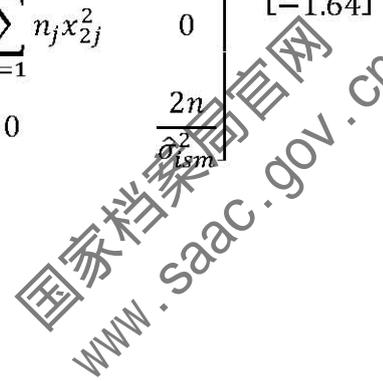
B_{50} 寿命估计, B_5 寿命估计以及 B_5 的 95%置信区间可以通过以下公式计算:

$$\begin{aligned}
 B_{50}Life &= \exp(\ln\hat{B}_{50}) \\
 &= \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_{10} + \hat{\beta}_2x_{20}) \\
 B_5Life &= \exp(\ln\hat{B}_5) \\
 &= \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_{10} + \hat{\beta}_2x_{20} - 1.64\hat{\sigma}) \\
 &= \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1x_{10} + \hat{\beta}_2x_{20} - 1.64\hat{\sigma}_{ism})
 \end{aligned}$$

其中, x_{10} 、 x_{20} 表示测试是的环境条件 (25° C 以及 50% RH)。通过将 $\hat{\sigma}$ 替换成 $\hat{\sigma}_{ism}$, $\text{var}(\ln\hat{B}_{50})$ 以及 $\text{var}(\ln\hat{B}_5)$ 可以通过下述方式获得:

$$\begin{aligned}
 &\text{var}(\ln\hat{B}_{50}) \\
 &= [1 \ x_{10} \ x_{20}] \begin{bmatrix} \frac{n}{\hat{\sigma}_{ism}^2} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} \\ \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j}^2 & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} \\ \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{10} \\ x_{20} \end{bmatrix} \\
 &\text{var}(\ln\hat{B}_5) \\
 &= [1 \ x_{10} \ x_{20}] \begin{bmatrix} \frac{n}{\hat{\sigma}_{ism}^2} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} & 0 \\ \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j}^2 & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} & 0 \\ \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{1j} x_{2j} & \frac{1}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \sum_{j=1}^J n_j x_{2j}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2n}{\hat{\sigma}_{ism}^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ x_{10} \\ x_{20} \\ -1.64 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

其中 $n = \sum_{j=1}^J n_j$, 表示样本总数;



使用上述等式的结果，对于蓝光光盘使用寿命 $\ln\hat{B}_5 = (B_5\text{Life})_L$ 的置信下线可以使用如下等式表示：

$$(B_5\text{Life})_L = \exp\left((\ln\hat{B}_5)_L\right) = \exp\left(\ln\hat{B}_5 - 1.64\sqrt{\text{var}(\ln\hat{B}_5)}\right)$$

3.5.2 蓝光寿命计算公式参数计算

$\ln(t) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \sigma \cdot z$ 计算结果如表 3-6

表 3-6 蓝光寿命计算公式结果

No	$\ln(t)$	$x_1 (=1/T)$	$x_2 (=RH)$
1	6.24804	0.002792	80
2	6.28227	0.002792	80
3	6.30628	0.002792	80
4	6.46925	0.002792	80
...			
110	8.89054	0.002957	80

将加速老化实验数据采用最小二乘法进行回归分析，分析过程如图 3-15 所示。

回归统计	
Multiple R	0.944951
R Square	0.892932
Adjusted R Square	0.890931
标准误差	0.248984
观测值	110

方差分析					
	df	SS	MS	F	gnificance F
回归分析	2	55.32021	27.66011	446.182	1.22E-52
残差	107	6.633237	0.061993		
总计	109	61.95345			

	Coefficient	标准误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-20.6351	1.037305	-19.893	9.72E-38	-22.6915	-18.578805
X Variable 1	12094.52	412.1283	29.34648	5.42E-53	11277.52	12911.5145
X Variable 2	-0.08117	0.003742	-21.6902	5.76E-41	-0.08859	-0.0737549

图 3-15 加速老化分析过程

分析结果如图 3-16 所示。

回归系数			对数标准偏差
$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\sigma}_{ISM}$
-20.6351	12094.52	-0.08117	0.248984

图 3-16 加速老化分析结果

3.6 蓝光光盘寿命推算结果

3.6.1 蓝光寿命计算结果

蓝光光盘的标准期待寿命（温度 30℃、相对湿度 70%、光盘存活率 95%）计算结果：

$$\begin{aligned} \ln \hat{B}_5 &= \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{10} + \hat{\beta}_2 x_{20} - 1.64 \hat{\sigma} \\ &= 59 \text{ 年} \end{aligned}$$

基于 ISO/IEC 16963-2013 进行艾林模型加速老化实验，确定蓝光光盘介质存储寿命。在环境 30℃、70%RH 的条件下，蓝光光盘寿命已经超过了 50 年，参考图 8 艾林模型。与硬盘、磁带存储介质相比，蓝光光盘对于数据长期存储具有更高的可靠性。

另外一种基于 Arrhenius 模型方法对 300GB AD 光盘进行了加速试验来估算其预期寿命。300GB AD 光盘在温度 40 度，湿度 80%的环境下使用寿命至少超过 40 年（如图 3-17）。图 3-17 中的比特误码率为测试光盘所有数据区域中 ECC 纠错最差的地方。

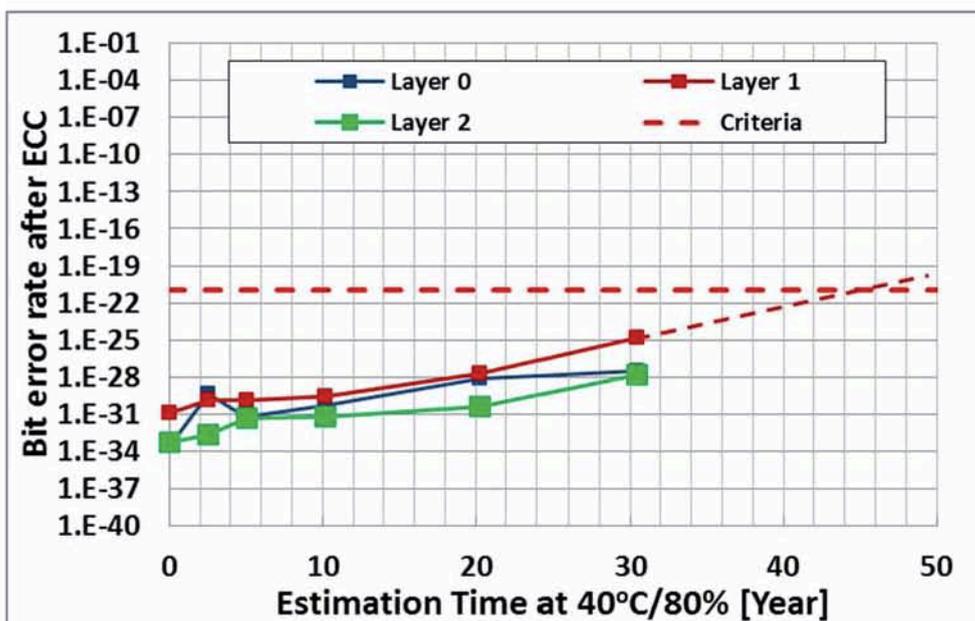


图 3-17 光盘寿命测试结果

数据长期存储应该有一个基本年限，一般存储时效为 10 年、30 年、永久。但永久保存并不是要介质永久而是数据永久。存储介质能够实现 40 年或 100 年的长期保存就已经相当满意了。一般认为 40 至 50 年的保存期是一个有意义的存储期限，它覆盖了 10 年和 30 年的存储期限，并保留了相当的时间余量，是被认可的一个保存期限。

3.6.2 附加可靠性测试结果

ISO 艾林模型测试是估算存储介质寿命一种非常好的方法，但为保证存储介质在未来使用中的可靠性还需要进行其他项持续性测试。300GB AD 蓝光光盘汲取了光盘在商业应用过程中获得的问题反馈并针对性的进行了专项测试。在完成下列各专项测试中无一例出现错误无法校正的情况。结果如图 3-18 所示。

测试项	详细内容	测试结果
储存测试	90deg/80%RH 200 小时	通过
温/湿度循环测试	10deg/44%RH & 60deg/80%RH 12 小时 10 周期	通过
热循环测试	-30deg&+70deg 1 小时 30 周期	通过
低温测试	-40deg for 200 小时	通过
老化测试	70deg/dry 168 小时	通过
划痕耐磨测试	Taber 耐磨测试 with 250g load	通过
跌落测试	1m 高处跌落	通过
弯曲测试	将光盘弯曲至 150 度 50 次	通过
硫化氢腐蚀测试	50deg 下 72 小时	通过
UV 辐射测试	7.68+E7J/m ² (普通日光灯照射 100 年以上)	通过
连续读取稳定性测试	单张光盘连续读取 100 万次	通过
防水测试	将光盘在水中放置两周	通过

图 3-18 附加可靠性测试结果