

The background of the cover features a complex, abstract graphic. It consists of a large, dark, circular shape in the upper left, from which numerous thin, multi-colored lines (blue, green, yellow, orange, red, and purple) radiate outwards, creating a sense of dynamic energy and light. These lines overlap and intersect, forming a web-like pattern that fills the upper half of the cover. The overall color palette is dark, with the vibrant lines providing a strong contrast.

PRINCIPLE AND DESIGN OF OPTICAL STORAGE SYSTEMS

光盘存储系统 设计原理

徐端颐 著

国防工业出版社

光盘存储系统设计原理

PRINCIPLE AND DESIGN
OF
OPTICAL STORAGE SYSTEMS

徐端颐 著

国防工业出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

光盘存储系统设计原理/徐端颐著. —北京:国防工业出版社, 2000. 1

ISBN 7-118-01986-0

I. 光… II. 徐… III. 激光光盘存储器-信息存储 IV. TP333. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 24686 号

75.162 / 111

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 42 1/2 984 千字
2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷
印数:1—2000 册 定价:86.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

序

当今跨世纪之交,由于科学技术的迅猛发展,特别是信息科学技术的进步,使人类进入了信息时代。无可非议,以电子作为信息载体的微电子半导体技术和计算机技术的发展起了主导作用。但也必须指出,光学作为载体的一种形式,也起着相当大的作用。溯自本世纪下半叶,光学技术的突出进展,为信息时代的形成和发展起到的作用主要表现为:光纤通信、光电图像显示技术、光学信息处理和光信息存储。而这些技术所以起到时代的作用,正是因为它与电子技术一道相互为用的。

这里单独提出光信息存储的问题。众所周知,传统的光存储手段主要是摄影感光技术,时至今日还有着广阔而重要的应用,并有很大的市场,而且还有新进展,如全息照相等。但是它的弱点是信息显示须通过化学显影过程,需要时间(至少要几分钟),而且信息难于量化(例如与计算机直接联用)。这就导致光盘信息存储的出现,并成为一种崭新的信息存储手段,不仅是传统摄影技术的补充,甚至与之相匹敌,进而可与常用的磁盘、磁带互争高低。

本书是作者和清华大学光盘国家工程研究中心的同仁 20 多年研究工作的系统集成,是现代光学技术领域的一部重要专著。应当指出,本书内容是以光盘驱动器的研究发展为主体写成的,关于光盘存储技术的其他方面,如母盘的制作,包括信息写入、复制系统,空白带预刻槽光盘制造与可擦除材料等方面的科技问题,由于已另有专著,未包括在本书范围之内,因此建议本书定名为“光盘存储系统设计原理”。

本书的出版为有关光学信息存储这一领域贡献了一部崭新而极有价值的文献,谨此祝贺。



1999 年 5 月 20 日

前 言

近年来光盘存储技术不仅已取得重大技术突破,而且迅速投入了商业性规模生产,并逐渐形成一项引人注目的高科技产业。以光盘为代表的光学数字式数据存储技术已成为当代信息社会中不可缺少的信息载体和渗透性极强的自成体系的新技术产品。这项技术和产品在我国的研究、开发、生产及推广应用中也取得了显著成效,受到社会广泛关注,不少专业人员及广大用户对此项技术产生浓厚兴趣。为满足读者的这一需要,作者收集整理了清华大学自1979年开始从事光存储技术研究工作以来的主要成果,以及迄今为止在这一领域已公开发表的文献资料,著成《光盘存储系统设计原理》一书。全书共分十章,系统介绍光盘驱动器(光盘机)、光盘库、光盘阵列等光学数字式数据存储系统硬件结构原理、设计方法、标准及有关应用技术。

光盘存储技术之所以能这样快速发展,原因如下。

一、光学数字式数据存储密度高、容量大、盘片可更换、携带方便。目前每比特所占空间面积为 $0.6\mu\text{m}\times 0.6\mu\text{m}$,近期内还可降至 $0.2\mu\text{m}\times 0.2\mu\text{m}$ 以下。盘容量很大,按现已成熟的工艺水平,直径120mm的光盘,面容量已达到9GB;直径90mm的可擦写光盘,盘容量也达到3GB。

二、寿命长、功能多。光盘存储利用精细聚焦能量密集的激光束,通过厚度达0.6~1.2mm的保护层,与密封在保护层之间的记录介质相互作用,实现数据写入、读取与擦除。而盘基及记录介质均由性能稳定的材料制成,在常温环境下数据保存寿命在100年以上,而且还可根据其用途挑选不同的介质制成只读、一次写入不可改写及可反复擦写等不同功能的光盘。相应的光盘驱动器(光盘机)也可以设计成单一功能或多功能的系统,以满足不同用途的需要。

三、生产成本低廉、数据复制工艺简单、效率高。目前,无论是光盘盘片或光盘机生产技术已完全成熟。盘片主要用有机高分子材料注塑而成,而且对于只读盘片,盘上所记录的信息也在注塑过程中同时完成了复制。全过程所需时间仅1~2s。按现有设备工艺材料水平计算,每兆字节的直接成本已低于0.5分人民币,一次写入光盘每兆字节成本也仅1分人民币。光盘机的生产成本随生产量的增加逐年大幅度下降,已成为计算机标准外设和常规的家用电器。所以光盘将会成为各种类型信息,包括数据、文字、图形、图像、声音的重要载体,部分替代纸质介质、胶片及磁记录介质,成为新一代文化传播媒体,前景十分广阔。

四、光盘存储技术虽已成熟,但仍存在巨大潜力。现在的产品还远远没有达到这一技术的物理极限。随光盘存储技术的几个主要相关学科,即光学技术、微电子技术、激光技术、材料科学、细微加工技术、计算机与自动控制技术的发展,光存储在记录密度、容量、数据传输率、平均寻址时间、盘片与盘机小型化甚至微型化、功能多样化方面均会有长

足的进展。新一代的光存储技术,如光量子数据存储、体存储、全息、近场光学、集成光学等在光盘存储中的应用,也正在研究开发之中。可以预料,光盘存储技术随上述学科的进步,在下一世纪还会有更新的突破。

鉴于光盘存储技术在信息社会中可以预见到的特殊重要地位,清华大学在全校多种学科支持和配合下,自1979年开始从事光盘驱动器、记录介质及数据处理技术方面的研究开发工作,1983年完成了国内第一台可擦重写的光盘实验样机。“七五”期间得到国家重点支持,于1990年完成了可直接改写的相变型光盘机的研制。“八五”期间,在对“光/热效应光盘读写擦除技术及系统”进行深入研究和工程化开发的基础上,先后完成了多种功能和容量的光盘机、光盘库、光盘阵列、光盘塔、光盘应用系统、光盘电子出版物制作系统、专用测试设备及各种特殊用途的系统的研究开发。其中大部分已通过中间试验生产,为企业部门所采用,并形成了一定的规模。作者在收集整理这些成果的基础上,按照单元技术、系统、整机及应用的顺序,归纳成十章。除第一章全面介绍光存储技术发展现状外,其余九章分别系统介绍光盘机的光学系统,精密机械及伺服系统,控制系统,信号读取与处理系统,装配、调整与测试技术,光盘阵列,光盘库,光盘应用系统设计中的具体技术,最后一章介绍光盘存储标准化技术及典型标准范本。

本书的编写得到清华大学光盘国家工程研究中心潘龙法教授、贾惠波教授、陆达教授,及研究生马立军、成先富、蔡忠平、张海川、张意、徐敏、周治平、巩马理、裴京、熊剑平、吕悦川、杨进、范易伟、袁玲、汪莹、杨朝芳、刘伟、张晖、张毅、杨秀萍、宋刚、王睿、吴建亚、王常挺、陈利宁、岳宏达的全力支持和热情协助,因此本书也是清华大学光盘国家工程研究中心多年来集体研究工作的结晶。国防工业出版社负责本书的责任编辑王晓光女士,为本书的编审、校对付出了极为艰辛的劳动,是在她的努力和鼓励之下,本书才能以今日之面貌与读者见面。

作者更要特别提出的是王大珩院士在百忙之中审阅了本书,亲自撰写了序言,并建议将书定名为“光盘存储系统设计原理”,对明示本书的写作思想具有十分重要的指导意义,作者谨代表清华大学光盘国家工程研究中心参与本书写作的有关同仁向王大珩先生表示衷心的感谢。

干福熹院士、金国藩院士对本书的出版给予了极大的关注与支持,亦致以诚挚的谢意。

由于工作繁忙,时间紧迫,加上光盘存储技术本身发展很快,书中错误难免,敬请广大读者赐教。

作 者

内 容 简 介

本书系统介绍光学数字式数据存储系统的结构原理、设计方法、测试技术、典型应用系统及标准化技术。主要包括:光盘存储系统基本类型、结构原理及应用发展状况;光盘机光学系统、精密机械、控制、信号处理系统的设计;光盘机装配、调整与测试;光盘阵列与光盘库的结构原理及设计;光盘文档信息管理系统、光盘工程图纸管理系统等典型光盘应用系统的设计与数据恢复技术;可擦写光盘及光盘机标准、只读光盘数据结构及 DVD 光盘标准。

本书适合于从事光盘存储系统及现代光、机、电一体化系统设计、研究、开发、生产及使用维修工程技术人员参考,也可作大专院校有关专业的教学参考书。

The principle of the construction, design testing, typical application systems and standardization technology of the optical data storage systems were described in this book. Topics covered inside include:

- An overview of optical storage technology, classification and application.
- Design of optical system, precision mechanism, controller and signal processing system of the optical drive.
- Assembly, correction, testing and accuracy analysis of components in optical drive.
- Theory and design of optical disk array and jukebox.
- Typical design to create an optical disk filling information system and engineering drawing management system, and data recovering technology.
- How to perform the standard of overwrite optical disk and drive, the data construction of CD-ROM and DVD.

This book is suitable for engineers and technicians to design, research, develop and manufacture optical storage systems, and students to study for reference.

目 录

第一章 光盘存储及应用技术简介	1
1.1 光盘存储及应用现状	1
1.2 光盘存储系统的主要类型及特性.....	24
1.3 高密度光盘——DVD 技术	36
第二章 光学系统	53
2.1 光学头的基本结构.....	53
2.2 光盘信息衍射的物理模型.....	61
2.3 典型光学系统设计.....	73
第三章 精密机械及伺服机构	125
3.1 系统典型机构优化设计及精度分析	125
3.2 快速寻道系统	136
3.3 光学头精密伺服机构	160
第四章 控制系统	179
4.1 典型系统基本结构及功能	179
4.2 伺服控制系统数学模型	202
4.3 伺服控制系统	224
第五章 信号读取与处理系统	237
5.1 信号读取系统的基本原理及功能	237
5.2 系统建模原理及物理数学模型	249
5.3 光盘机读出信号处理系统设计	275
第六章 装配、调整与测试	310
6.1 光学头装调工艺分析	310
6.2 光学头中元件位置安装误差对读出信号的影响	340
6.3 专用测试设备及技术	349
第七章 光盘阵列	373
7.1 数据可靠性及传输率	373
7.2 数据分配与传输模型	386
7.3 系统设计与分析	395
第八章 光盘库	427
8.1 光盘库的基本结构	427
8.2 运动学及动力学分析	450
8.3 DE—1000 型光盘库设计	464

第九章 应用系统	487
9.1 光盘文档信息管理系统	487
9.2 光盘工程图纸管理系统	517
9.3 光盘文档存储中的信息压缩技术	544
第十章 标准化技术	584
10.1 磁光盘及驱动器标准.....	584
10.2 只读光盘及数据结构标准.....	599
10.3 DVD 光盘标准	624
参考文献	658

CONTENTS

Chapter 1	An overview of optical storage technology and application	1
1.1	Development of optical storage and application	1
1.2	Classification and performance of optical storage systems	24
1.3	High density optical storage——DVD	36
Chapter 2	Optical system	53
2.1	The construction of optical head	53
2.2	Physical diffraction model of information mark on optical disk	61
2.3	Design of typical optical system	73
Chapter 3	Precision mechanism and servo	125
3.1	Optimization design and accuracy analysis of typical mechanism	125
3.2	High speed track seeking system	136
3.3	Precision servo of optical head	160
Chapter 4	Control system	179
4.1	Function and main construction of typical system	179
4.2	Mathematical model of the servo control system	202
4.3	Servo control system	224
Chapter 5	Read out and processing system of signal	237
5.1	The principle and functions of signal output system	237
5.2	The theory of model and physic-mathematical model	249
5.3	Signal processing system design of optical drive	275
Chapter 6	Assembly, adjustment and testing	310
6.1	Assembly technology analysis of optical head	310
6.2	Components installation accuracy effect on output signal	340
6.3	Special testing equipment and technology	349
Chapter 7	Optical disk array	373
7.1	Reliability and transfer rate of data	373
7.2	Distribution and transfer model of data	386
7.3	System design and analysis	395
Chapter 8	Jukebox	427
8.1	Essential construction of jukebox	427
8.2	Kinematics and dynamics analysis	450
8.3	Design of Model DE—1000 jukebox	464
Chapter 9	Application systems	487

9.1	Optical disk filing management system	487
9.2	Optical disk engineering drawing management system	517
9.3	The information compression technology for optical storage	544
Chapter 10	Standardization technology	584
10.1	Standard of M—O disk and drive	584
10.2	Standard of CD—ROM and data construction	599
10.3	Standard of DVD	624
References		658

光盘的记录格式是指光盘记录的微观结构。如图 1-1-2 所示,以一种可写的光盘为例,数据经过编码后记录在由沟槽构成的数据记录道上。信息记录在沟槽内,也可同时记录在沟槽内外。在最近几年内主要性能指标的发展变化如表 1-1-1 所列,其密度和容量基本上每两年增加一倍。

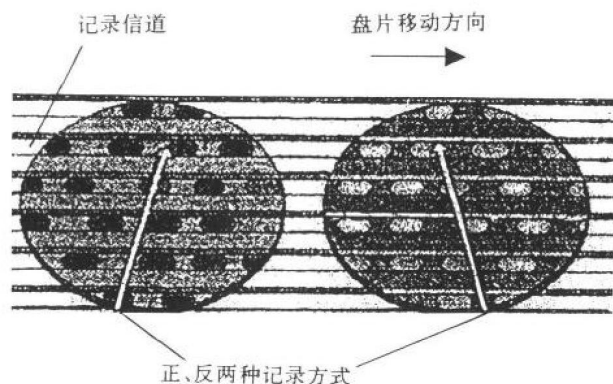


图 1-1-2 光盘记录的微观结构

表 1-1-1 直径 130mm 可擦写光盘发展状况

年 代 性 能	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
容量	650MB	→ 1.3GB	→	2.6GB	→	5.2GB	→	10.4GB	
数据传输速率 MB/s	0.7~1.5	→ 2.4	→	3.5~7	→	5~10	→	7.5~15	
寻址时间	50~80ns	→ 50~58ns	→	20~40ns	→				
激光波长	830nm	→ 780nm	→	680nm	→	630~635nm	→	530nm	
重写次数	10 ⁶								
是否高分辨率	否					→ 是			
编码方式	PPM		→ PWM	→	PPML				
MCAV	否					→ 是			
跨道压缩	否					→ 是			

光盘存储技术集中了近代光学、激光技术、精密机械、电子技术、自动控制、计算机及材料科学中的许多新成果,近年来不断取得重大突破,并已形成一独立的产业,应用范围也在不断扩大,已进入国民经济各部门及家庭。若根据其技术特性和应用范围可分为两大类,即用于信息存储的可写光盘系统及用于信息传播为主的只读型光盘系统,如图 1-1-3 所示。

第一类光盘机的主要特点是用户可根据需要自己存入包括数据、文字、图形、图像及声音在内的各种信息,其中又分为可改写和不可改写两种机型和记录介质,对多数光盘机都可做到一机多能,即通过更换记录介质便可达到上述两种功能,用户可根据对所用信息保存的要求选用不同盘片如 DVD-R 及 DVD-RW,但光盘机的功能可以合二为一。两种类型的盘片由于用途不同,则将长期共存。这类光盘每比特(b)的空间尺寸(直径)已小于 $0.5\mu\text{m}$,一张直径 130mm 的单盘容量可达到 7.5GB,平均寻址时间已降到 30ms 以下,数据传输率超过 10MB/s(表 1-1-1),外型尺寸已做到与 130mm 半高软盘驱动器完全兼容,即长×宽×高为 205mm×148mm×42mm,自重已降到 0.5kg 左右,可通过标准 SCSI 接口与各种计算机相连,成为其标准外部设备之一。在公元 2000 年以前,90mm(3.5in)光盘的容量将达到 2.6GB。由于盘小,平均寻址时间当然更短。正在研究开发的新一代光盘

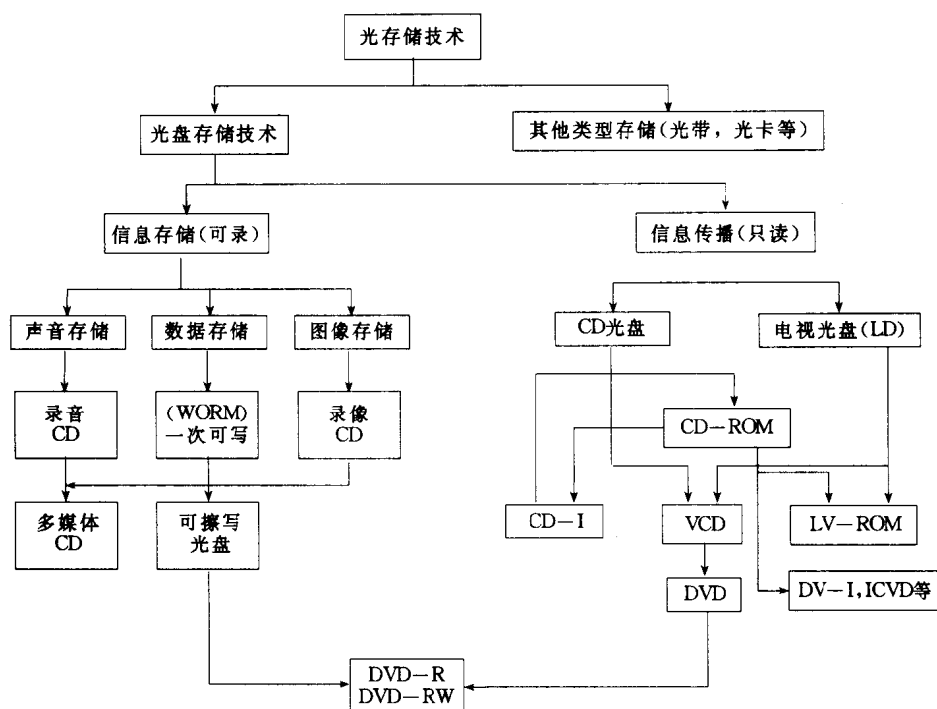


图 1-1-3 光盘数字式信息存储技术及主要的应用类型

系统,每比特所占空间小于 $0.3\mu\text{m}$,存储密度还可进一步提高 4~10 倍。在光盘主轴转速为 3600r/min 时,平均寻址时间低于 15ms。这些技术不限于用在可写的光盘机,在只读型的光盘机中也采用,高密度或超高密度的(VHD-CD,DVD)光盘机,其单盘容量可达到 4.7GB 和 9.4GB。这种光盘机的特性还在不断改进,如果用多层结构容量还会倍增。另外还有提高转速和数据传输率以及采用恒角速度的 O-ROM,其数据传输率比最早的 CD-ROM 光盘机提高 10~30 倍,平均寻址时间可大幅度地降到 100ms 以下;用于播放视频图像的 VCD 和 DVD;存储静态图片的 Photo-CD;可人机交互使用的 CD-I、CD-IV、DV-I 及 ICVD 等多媒体的光盘及光盘机。此外还可把可写技术引入这类光盘机而形成可自写节目的 DVD-R、DVD-RW 和直接录入视频模拟信号的 OMDR 和 EDDD 等类型的光盘和光盘机。与此同时光盘机的硬件结构也正趋于标准化,结构上与磁盘机靠拢,并吸收原磁盘机的各种优点设计成多盘多头的光盘机,使单机容量、数据传输率在现有单盘单头机的基础上提高数倍至数十倍。由于光盘可换,若用户需更大的容量可通过自动换盘系统而设计成各种容量的光盘库(Jukebox)。根据用户对存入数据使用频率的不同在库内放入 1~5 台光盘机,库内盘片的存放原则上设计成积木式模块结构,通常盘片数为 10 至数百片,容量从 10GB 到数 TB 不等。由于盘片数量基本上没有限制,且库内是多机同时工作,所以对用户来说相当于一台容量几乎无限的大光盘机或光盘阵列。从 1978 年以来,各种类型的光盘及光盘机相继形成国际标准,如表 1-1-2 所列。

二、应用技术

光盘存储技术除了自身原有的若干优点,如容量大、寿命长、盘片可更换、成本低、复

表 1-1-2 光盘产品的类型及标准化进程

存储功能	盘片或记录介质	盘机	尺寸/mm	标准(发表年代)及建议单位	商品化年代
只读型 (ROM)	LD(LV) (激光视盘(LD 盘))	相应的 播放机 或 驱动器	300/(200)	IEC857(1986), Philips	1978
	CD(CD-DA) (激光唱盘(CD 盘))		120/80	红皮书, IEC908(1987) Philips/Sony	1982
	CD-G (记录静止图像的 CD 盘)		120	同上	1987
	CD-ROM 与 CD-ROM/XA (计算机用 CD 盘)		120/80	黄皮书, ISO/IEC10149(1989), Philips/Sony	1985 与 1991
	CD-I (具有交互功能的 CD 盘)		120/80	绿皮书(1990), Philips/Sony	1989
	Photo-CD (存储照片的 CD 盘)		120/80	Philips/Kodak(1992) (CD-ROM/XA Bridge Disc)	1991
	V-CD (数字视频 CD 盘)		120	白皮书(1994) Philips/Victor/Sony/Panasonic	1993
	DVD (数字通用 CD 盘)		120/80	Book A, B, C, D, E (十大公司联合提案)	1996
	一次写入型 (WORM)		CD-R(花青, 酞菁染料) (一次写 CD 盘)	CD-R 光盘机	120/80
烧蚀型 起泡型 纹理型(熔绒型) 相变型 光致变色型等		WORM 光盘机	130	ISO/IEC 9171, 1, 2(1990)	1985
			300	ISO/IEC 13403(12GB)(1995) ISO/IEC 13614(12GB)(1995)	1985
			350	ISO/IEC 10885(7GB)(1993)	1985
可擦写型 (RW, DOW)	MD(MO)	可 擦 写 (RW) 光 盘机, 直接 重 写 (DOW) 光 盘机, 多功 能光盘机	60	彩(虹)皮书, IEC1909	1991
	CD-E 可擦写 CD 盘		120	橙皮书(1994), Philips/Sony	1996
	磁光型(MO) 相变型(PC) 光致变色型 光谱烧孔型 电子俘获型 光子效应型		90	ISO/IEC 10090(128MB), MO	1991
				ISO/IEC 13963(230MB), MO	1993
				ISO/CD 15041(640MB), MO	1996
				ISO/WD 14760(1.3GB), PC	1997
			120	ISO/DIS 15485(1.3GB), PC	1995
			130	ISO/IEC 10089(650MB), MO	1989
				ISO/IEC 13481(1GB), MO	1990
				ISO/IEC 13549(1.3GB), MO	1991
				ISO/IEC 13842(2.0GB), MO	1994
				ISO/CD 14517(2.6GB), MO	1996
				ISO/WD 15286(5.2GB), MO	1998
附:	光卡(一次写), 86mm×54mm ×0.76mm			ISO/IEC 11693, 11694(1995)	1995
	CD-ROM 的卷和文件格式			ISO 9660(1988) Philips/Sony/Microsoft	1988

制速度快等以外,光盘机的品种及功能也已相当完善,因此除了作为各种计算机的外围设备,在国民经济各领域均有重要用途,而且光盘可同时用于记录声音、文字、图形及动、静态图像,是多媒体技术不可缺少的工具,也在未来家用电器及国民教育中占有重要位置。