

中国973丛书



*Super-density and Super-speed
Optical Data Storage*

超高密度
超快速 光信息存储

徐端颐 主编



◇中国 973 丛书◇

超高密度超快速 光信息存储

Super-density and Super-speed
Optical Data Storage

徐端颐 主编

辽宁科学技术出版社

沈阳

© 2009 徐端颐

图书在版编目(CIP)数据

超高密度超快速光信息存储 / 徐端颐主编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009. 12

(中国 973 丛书)

ISBN 978-7-5381-6248-6

I. ①超… II. ①徐… III. ①光存储器 IV. ①TP333.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 243729 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳新华印刷厂

幅面尺寸: 170mm × 230mm

印 张: 43.75

插 页: 4

字 数: 790 千字

印 数: 1 ~ 2 000

出版时间: 2009 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2009 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 红 宋纯智 李伟民

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 刘 庶

书 号: ISBN 978-7-5381-6248-6

定 价: 200.00 元

联系电话: 024-23284360

邮购热线: 024-23284502

http://www.lnkj.com.cn

本书网址: www.lnkj.cn/uri.sh/6248

《中国 973 丛书》编辑工作委员会

主 任 周光召 林 泉

副主任 汤东宁 马燕合 刘昭东 周 谊

刘 红 宋纯智 林 菁 卢祥之

编 委 周凯宁 李书桢 董芳明 陈文祥

张丽华 余传隆 张登科 杨虚杰

藉顺心 记津平

编辑工作办公室主任 卢祥之

内容简介

《超高密度超快速光信息存储》一书主要介绍国家重点基础研究“新型超高密度超快速光信息存储与处理的基础研究”项目(项目编号:G199903300)的研究成果,由该项目首席科学家徐端颐教授等36位中国专家、教授编写而成。内容涉及近代光学、光化学、材料科学、信息科学及精密工程等学科领域。全书共8章,主要内容包括:研究背景、课题设置、研究目标和实施技术路线;超高密度体全息存储、多波长多阶光信息存储及其他以增加信息存储空间为基础的新型光信息存储原理、存储容量、响应速度及可靠性的研究;以近场光学为基础的各种超分辨率光存储读写原理、光与介质的相互作用及纳米级界面控制中的物理问题;适用于各种超高密度光信息存储原理的新型记录介质,包括各种新型晶体材料、聚合材料、有机-无机复合材料的分子结构设计、记录参数特性及合成机理;超高速数据存储与处理过程中,数据的多通道并行传输机理、数据结构格式、速度匹配数学模型及数据校验纠错算法;超大容量存储系统集成中,高速运动伺服机构微动力学、纳米尺度精密测量、二元光学多功能器件、微光机电混合集成、虚拟镜像光盘、高速数据内部交换接口设计及容量可扩展至PB量级的超大容量信息存储系统集成原理与技术。

Abstract

The《Super-density and Super-speed Optical Data Storage》based on achievements of the National Key Foundational Projects for“Advanced Super-density and Super-speed Optical Data Storage and Processing”(project No. G199903300). Prof. Xu Duanyi of the project chief scientist etc 36 Chinese professors or experts wrote it. The book is related to areas of the updated optics, photochemistry, materials science, information science and precision engineering etc. The book is composed of 8 chapters and intended to provide accomplishments of the project mostly as following: The research background, sub-projects, research targets and actualized technology guideline. The basic theories of the high-density volume holographic storage, near field optics, multi-wavelength and multi-level storage and other new storage based on increasing storage directions, and its dynamic range, response time and stability. Some read/written principles of super-resolution, the interaction between light and medium, non-radiation field transfer, and physical problems of nano-interface control on the near-field optics. New-typed crystalline, polymer, organic-inorganic materials composite and photochromic compounds are designed, synthesized and optimized to be suitable for previous super-density storage. The principles of data multi-channel and parallel transmission for super-speed data rate storage and processing, format of data construction, data transmission speed matching mathematical model and data interleaving checking and correcting algorithm. The mechanical micro-dynamics of super-speed serve mechanism and theory of nano-scale measurement in fast moving state, binary micro-optical multi-function devices, micro optical mechanical and electronic hybrid integrated devices, fictitious mirror of optical disk and principles of design for high-speed data exchange interface of the I/O and capacity can be extended even over PB storage system integration principles.

前 言

信息社会和知识经济对提高信息存储容量的要求是永无止境的，超高密度大容量数据存储始终是信息科学中不可缺少的研究课题，在国民经济建设、社会安全保障及军事科学技术现代化中具有十分重要的地位。同时由于光存储建立在光学、信息科学、材料科学、光化学、精密工程等多学科的基础上，为科研人员提供了较大的技术选择空间，有可能在激烈的国际竞争环境中实现跨越式发展。国家重大基础研究(973)“新型超高密度超快速光信息存储与处理的基础研究”项目(简称“光存储项目”)，是我国光信息存储领域中迄今为止规模最大的基础性研究经费投入。本项目于1999年9月启动，2004年11月完成并通过国家验收。项目所属7个子课题共取得研究成果41项，其中19项重要成果通过部委组织正式鉴定，其中3项当时被评价为“具有独创性达到国际领先水平”，16项被评价为“达到国际先进水平”，“为中国光盘产业发展开辟了一条具有自主知识产权的路线”。在研究工作中涌现出了一批优秀青年学者，出版了专著11部，发表论文572篇，其中SCI收录220篇，EI收录198篇，占论文总数的73%。有若干篇论文被 *Angew. Chem. Int. Ed* (影响因子为8.43) 和 *J. A. Chem. Soc.* (影响因子为6.52) 等重要学术刊物采用。“若干新型光功能材料的基础研究和应用探索”在光功能材料的合成机理研究方面取得重要突破，获国家自然科学基金二等奖。有三部介绍新型光存储原理与材料的专著分别获第五届国家图书奖提名奖、第十届全国优秀科技图书一等奖和第十四届中国图书奖。为了实现较完整的技术覆盖，本项目共申报了中国发明专利136项，美、日、德等国发明专利7项。目前大部分专利均已授权，其中多波长多阶存储及系统集成等专利被企业采用，与企业部门合作完成的存储容量可扩展至PB量级，持续数据传输率大于180MB/s的超大容量信息存储系统，获国家科技进步奖二等奖。另外，还有7项成果或专利被有关部门采用，获省部级以上科技进步奖和国家优秀发明专利奖，其中，以本项目完成的“多波长多阶光存储原理”为基础，研制成了具有完全独立知识产权的红光高清光盘机，用650nm波长激光器实现了单盘容量15GB，同时与光盘物理格式相关的部分专利还被用于我国自主开发的CB-HD蓝光光盘及

光盘机。

5年来,在参与本项目研究的光学、信息科学、材料科学等各学科专家的通力合作下,提出了用光的多种物理参量与记录介质之间的可逆与不可逆反应存储光信息的原理,在多种有机/无机记录介质的合成及存储机理的研究方面取得了重要突破,使光盘存储从平面二维扩大到多维空间存储,可在同样的记录光斑尺寸条件下,大幅度同步提高光盘的存储容量与数据传输率。制定了以体光栅二维耦合波体全息存储、近场光学及多波长多阶数字存储原理为基础的提高光信息存储密度的技术路线,完成了光场耦合、双光子非线性效应、近场非辐射场-隐失波光场分布函数、表面等离子增强效应、纳米光学的尺寸效应及边界表面效应等重要基础理论研究。在光物理与反应动力学、晶体双掺机理、分子自组装光致变色超晶格薄膜原理等研究方面取得了一系列的创新。完成了存储密度达到 $10.5\text{Gb}/\text{cm}^3$ 全息光盘、小型化体全息存储实验系统、单面容量 100GB 的光盘、多波长多阶存储实验系统、纳米近场飞行控制系统、多元坐标编码纠错原理、光度式只读光盘复制、阵列并行数据传输、虚拟镜像光盘模组、超高速光盘读出信号测试及 405nm 波长蓝光超分辨率多阶存储实验系统的研究。

根据科技部的要求,将全部自主研究所取得的成果整理汇编成此专著:《超高密度超快速光信息存储》。本书除了增加第一章简要介绍本项目的研究背景、课题设置和实施技术路线外,其余各章实际上为本项目所属的7个子课题的研究成果。内容基本上覆盖了当今超大容量光存储基础研究中的主要热点,并结合我国国情及原有的研究基础由各子课题的主要负责人组织编写而成。书中第一章“总论”和第四章“光子双稳态多波长多阶存储”由徐端颐编写;第二章“体全息光存储”由金国藩、何庆声、陶世荃、江竹青、王大勇、曹良才、尉昊赞、万玉红、贾克斌编写;第三章“近场光学存储”由李庆祥、李玉和编写;第五章“体全息超快速存储材料”由姚建年、孔勇发、赵业权、吴飞鹏、赵榆霞编写;第六章“超分辨与光致变色记录材料”由陈懿、曾得兴、闫起强、肖军平、樊美公、张复实、姚建年、马颖、陈朝晖、贺涛、邵柯、张光晋编写;第七章“高速数据传输与处理”由贾惠波、谢长生、董永贵、熊剑平、马骋编写;第八章“超大容量光存储系统集成”由裴京、徐端颐编写;清华大学光盘国家工程研究中心的何琳还参加了全书资料的整理和编写联络工作。在编写过程中对本项目所取得的全部研究成果重新进行了提炼和系统地梳理,并尽可能保留其中的精华,特别

是对具有我国特色的创新之处做了较详细的描述, 但为节省篇幅对部分实验过程、公式推导或在此之前已详细发表的内容尽量从简。为了便于读者对某些细节或感兴趣的问题进一步深入了解, 在每章之后都附了详尽的参考文献目录, 将各课题组已公开发表的论文资料全部汇集其中, 以便备查。另外, 考虑到广大读者的需求与应用面, 本书在以介绍基础理论研究成果为主的同时, 也用了一定篇幅介绍了部分工程实用性较强的应用技术基础研究成果, 以便与读者交流探索这些基础性的研究成果将来工程应用的可能性, 希望本书能引起我国广大光盘工业界的关注与兴趣, 起到抛砖引玉、促进本专业及其他各相关学科之间学术交流的作用。在此代表参与本项目工作的 63 名研究人员, 真诚欢迎广大读者、专家及业内人士对我们研究工作提出批评与指导性的意见或建议。

本书汇聚了参与此项研究工作的全体科技人员多年的心血, 大家已发表的论文及专著超过数百万字, 若干同仁由于各种原因未能参与本书编写, 而且许多研究工作还在继续深入进行之中, 因此难以将本项目研究工作的全部研究成果完整地展示给读者, 遗漏与错误在所难免, 敬请读者见谅。

《中国 973 丛书》编辑工作委员会及辽宁科学技术出版社的同仁为组织出版本书作出了巨大贡献, 他们精湛的业务水平和一丝不苟的科学作风, 对本书文字及版面质量具有决定性的影响, 特在此代表参与编写本书的全体人员及未来的读者向他们表示衷心的感谢。

徐端颐

2007 年 12 月于北京清华园

目 录

第一章 总 论	(1)
第一节 项目研究背景	(1)
第二节 研究基础、目标及课题设置	(12)
第三节 实施技术路线及完成情况	(23)
参考文献	(53)
第二章 体全息光存储	(58)
第一节 有限尺寸体光栅的二维耦合波理论及其算法	(60)
第二节 动态散斑全息存储原理与模型	(71)
第三节 光折变材料中全息存储的热固定	(91)
第四节 体全息存储的像质评价和调制-阵列码编译码算法	(103)
第五节 体全息图像库的光学相关识别算法	(113)
第六节 盘式体全息存储系统	(145)
参考文献	(170)
第三章 近场光学存储	(175)
第一节 近场光学存储机理	(175)
第二节 深亚微米飞行系统设计理论模型	(177)
第三节 近场光存储动态飞行实验系统	(194)
参考文献	(220)
第四章 光子双稳态多波长多阶存储	(223)
第一节 光子双稳态多波长多阶光存储原理	(223)
第二节 多波长多阶存储影响因素及无损读出	(240)
第三节 多波长多阶存储实验系统	(274)
第四节 调制编码	(291)

第五节 单波长多阶光盘存储驱动器·····	(319)
第六节 超分辨率掩膜存储·····	(330)
第七节 多波长多阶光盘复制与测试·····	(340)
参考文献·····	(379)
第五章 体全息超快速存储材料 ·····	(387)
第一节 铌酸锂晶体中双掺机理·····	(387)
第二节 铌酸锂晶体光折变新效应·····	(401)
第三节 大尺寸光学级铌酸锂晶体的生长技术 I·····	(415)
第四节 大尺寸光学级铌酸锂晶体的生长技术 II·····	(431)
第五节 全息超快速存储光致聚合材料机理研究·····	(438)
参考文献·····	(453)
第六章 超分辨与光致变色记录材料 ·····	(464)
第一节 有机光致变色材料·····	(464)
第二节 有机光致变色信息存储机理·····	(469)
第三节 有机光致变色材料的分子设计与合成·····	(476)
第四节 无机-有机复合光致变色薄膜·····	(480)
第五节 无机-无机复合光致变色材料·····	(504)
参考文献·····	(512)
第七章 高速数据传输与处理 ·····	(523)
第一节 基于光纤通道的高速数据传输·····	(523)
第二节 阵列式并行数据传输·····	(538)
第三节 速度匹配及双页缓存技术·····	(571)
第四节 浮动校验组技术·····	(580)
第五节 网络化光盘库·····	(586)
第六节 基于人工免疫的系统安全机制·····	(602)
参考文献·····	(621)
第八章 超大容量光存储系统集成 ·····	(625)
第一节 光盘库存储设备的性能解析模型·····	(626)
第二节 虚拟-镜像光盘技术与镜像盘阵列模组·····	(641)

第三节 镜像盘阵列模组·····	(646)
第四节 并行阵列控制器·····	(650)
第五节 器件的微型化及超大容量集成存储系统设计·····	(654)
参考文献·····	(676)

CONTENTS

Chapter 1 Pandect	(1)
Section 1 The research background of the project	(1)
Section 2 Research bass, targets and sub – projects	(12)
Section 3 Actualized technology guideline and achievements	(23)
References	(53)
Chapter 2 Volume Holographic Storage	(58)
Section 1 Theory and calculation of two – dimension coupling wave for finite size volume grating	(60)
Section 2 Principles and models dynamic speckle holography storage	(71)
Section 3 Heat fixup of holography storage in photo – refractive materials	(91)
Section 4 Picture quality evaluation of volume holography and calculation of modulation – array coding	(103)
Section 5 Optical correlation calculation for database of volume holography pictures	(113)
Section 6 Disk volume holography storage systems	(145)
References	(170)
Chapter 3 Near Field Optical Storage	(175)
Section 1 The mechanism of near field optical storage	(175)
Section 2 Theory and model of deep – submicron flight system design	(177)
Section 3 Dynamic flight experiment system for near field optical storage	(194)

References	(220)
Chapter 4 Multi – wavelength and Multi – level Optical Storage with Two – stable Photon	(223)
Section 1 Principles of multi – wavelength and multi – level optical storage with two – stable photon	(223)
Section 2 Influence factors and lossless readout in multi – wavelength and multi – level optical storage	(240)
Section 3 Experiment system for multi – wavelength and multi – level optical storage	(274)
Section 4 Modulation and Coding	(291)
Section 5 Driver of single – wavelength and multi – level optical storage	(319)
Section 6 Super – resolution optical storage	(330)
Section 7 Replication and testing of multi – level optical disk	(340)
References	(379)
Chapter 5 Super – speed Optical Storage Materials for Volume Holography	(387)
Section 1 Mechanism of double doped LiNbO ₃ crystal	(387)
Section 2 New photo – refraction effect of LiNbO ₃ crystal	(401)
Section 3 Growth technology of optical LiNbO ₃ crystal with great size I	(415)
Section 4 Growth technology of optical LiNbO ₃ crystal with great size II	(431)
Section 5 Composing mechanism of photo – polymerization materials for high – speed holography storage	(438)
References	(453)
Chapter 6 Super – resolution and Photo – chromic Optical Storage Materials	(464)
Section 1 Organic photo – chromic materials	(464)
Section 2 Storage mechanism of organic photo – chromic materials	(469)
Section 3 Molecule design and composing of organic photo – chromic	

materials	(476)
Section 4 Inorganic – organic composing photo – chromic films	(480)
Section 5 Inorganic – inorganic composing photo – chromic materials ...	(504)
References	(512)
Chapter 7 Super – speed Data Transfer and Processing	(523)
Section 1 Super – speed data transfer base on optical fiber channels	(523)
Section 2 Data parallel transfer with array configuration	(538)
Section 3 Double page buffer with speed matching	(571)
Section 4 Floating checkout group technology	(580)
Section 5 Jukeboxes for network	(586)
Section 6 System security mechanism base on manual immune	(602)
References	(621)
Chapter 8 Super – capacity Optical Storage Systems Integration ...	(625)
Section 1 Performances analysis model of jukeboxes array	(626)
Section 2 Virtual optical disk mirror and mirror of jukeboxes array	(641)
Section 3 Model group of mirror array	(646)
Section 4 Parallel array controller	(650)
Section 5 Design of micromation devices and super – capacity system integration	(654)
References	(676)

第一章

总 论

徐端颐

第一节 项目研究背景

超高密度大容量数据存储始终是信息科学中不可缺少的研究领域，在国民经济建设及现代军事科学技术中具有十分重要的地位。21 世纪以来，随着知识爆炸性的增长，作为信息社会和知识经济发展最重要的资源和支撑条件，对增加信息存储密度与容量的需求呈指数函数增长。如图 1-1 所示，近期目标都已达到了 TB 量级，可以认为这是一个人类所面临的永无止境的课题。

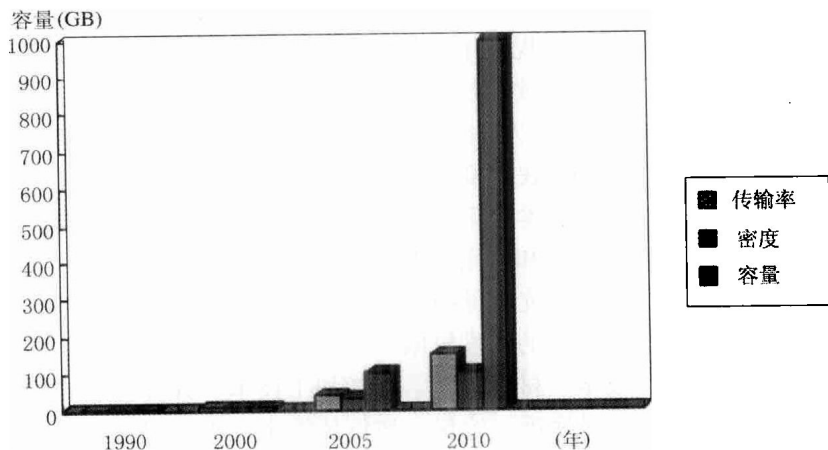


图 1-1 近 20 年信息存储系统容量、密度及数据传输率的发展与预测

目前，用于数字信息存储的技术主要包括磁存储、光存储及固态存储三种类型。这些存储技术都存在各自发展的技术空间，但光存储与磁存储及固态存储技术相比，其应用范围远超出计算机外设领域，且因生产制造成本低廉，便于携带、交换并能长期保存，在媒体传播、音视频娱乐及数据存档等许多领域具有更

广泛的用途，不仅在商业性规模生产方面获得了巨大成功，在技术上还不断取得新突破，形成了一项独立的高科技产业。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，并且因其渗透性极强和自成体系备受社会关注。光盘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。光存储技术之所以能这样快速地发展，原因在于：

①数据存储密度高、容量大、盘片可更换、携带方便。原来 VCD 光盘最小信息符所占空间面积为 $0.6\mu\text{m} \times 0.6\mu\text{m}$ ，新型的蓝光光盘尺寸已降至 $0.2\mu\text{m}$ 以下。盘容量大，按现在光盘的制造工艺水平，直径 120mm 的 DVD 光盘，面容量已达到 9GB，新一代蓝光光盘盘容量则可达到 10GB 以上，通过系统集成能比较容易地实现容量达到 PB 量级的超大容量存储，可满足不同用途的社会需求。

②信息保存寿命长。由于光存储是利用精细聚焦能量密集的激光束，对密封在保护层之间的记录介质的相互作用去实现数据写入、读取与擦除的。盘基及保护层均由性能稳定的材料制成，实验证明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。

③生产成本低廉、数据复制工艺简单、效率高，是信息出版发行传播的优良载体。无论是光盘盘片或光盘机规模生产的成本都十分低廉。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复制，全过程所需时间仅 1s 左右。按现有设备工艺材料水平计算，只读光盘每千兆字节的生产成本仅为人民币 0.2 元，一次写入光盘每千兆字节的售价也仅为人民币 0.6 元。上述生产成本今后还会随光盘容量的增加逐步下降，并成为计算机标准外设、学习办公文具和家用电器。

④从技术层面分析，传统的光存储技术虽已成熟，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。随着光存储技术的几个主要相关学科，即光学技术、微电子技术、材料科学、细微加工技术、计算机与自动控制技术的发展，光存储技术在记录密度、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、功能多样化等方向上均会有长足的进展。新一代的光存储技术，如光量子数据存储、多维存储技术、体全息技术、近场光学技术、集成光学技术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着上述学科的进步，在 21 世纪还会有更新的突破，成为信息科学中的重要研究领域之一。在光学存储技术的研究中发现有很多的原理可用于进一步提高信息存储密度与容量，研究开发和实现技术更新的技术路线选择余地较大，因此有可能近

期在大容量信息存储领域取得突破。

我国政府和企业界对光盘产业的重要性认识较早，发展迅速，2004年我国光盘机年产量已达到1.3亿台，占世界产量的83%；光盘盘片32亿片，占世界产量的20%，成为世界光盘机及光盘的生产与消费大国。但由于缺乏自主知识产权，以DVD光盘机出口为例，每台光盘机需向国外缴纳的专利费占整机生产成本的35%，利润的96%，所以我国光盘工业急需具有自主知识产权的技术支持。从社会需求的层面分析，高清数字电视即将普及，对盘容量的要求至少15GB，到第三代多媒体技术出现时，对光盘容量的要求将超过100GB。光盘工业将面临不断的技术更新换代，而且光存储技术的研究发展又存在极大的空间，如果我国真正能拥有具有自主知识产权的技术，无疑是我国光盘产业实现自我技术更新和切入国际标准的良好机遇。

传统的提高光盘存储密度的基本技术路线是减小记录光斑的尺寸，即通过减小激光波长和增大物镜数值孔径来提高光盘存储密度与容量。最早生产的CD光盘激光波长为780nm、物镜数值孔径为0.45，轨道间距为1.6 μm 、最短信息坑长度约0.8 μm ，容量为650MB；目前生产的DVD光盘，激光波长减小到650nm、物镜数值孔径增加到0.6，轨道间距减小为0.74 μm 、最短信息坑长度约0.4 μm ，实现了单面单层4.7GB的存储容量。下一代主流光盘技术仍沿着这一技术路线发展，进一步缩短激光器波长并增大数值孔径，波长缩短至蓝紫光波段（400nm左右），而数值孔径加大至0.8~0.9，轨道间距可减小到0.2 μm 、最短信息坑长度可低于0.16 μm ，最终实现直径为120mm的光盘，单面单层容量达到30GB，单面双层容量达到50GB。利用以上3种光盘技术生产的各种类型光盘上信息符形貌与尺寸对比，如图1-2所示，可以看出其基本思路都是依靠缩短半导体激光器波长及增大光学头物镜的数值孔径，通过减小信息符的尺寸来提高光盘的存储密度与容量，预计其技术生命周期大约还可延伸到2020年。

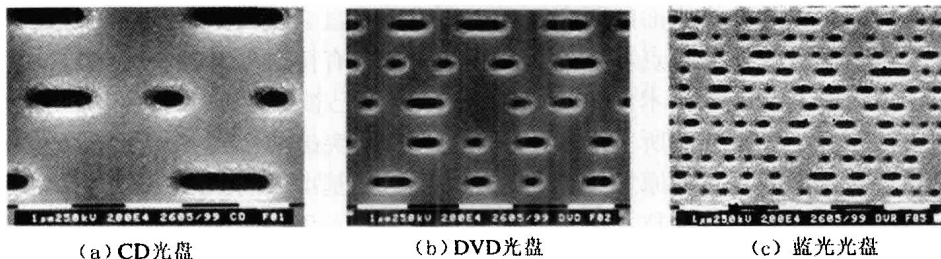


图1-2 各种类型光盘上信息符形貌与尺寸对比

继续依靠传统的光学技术提高光盘存储密度将越来越困难。首先是继续减小