

光 信 息

存储的原理、工艺及系统设计

戎 霭 伦 司 徒 活 张 忠 麟 等 著

国 防 工 业 出 版 社

光信息存储的原理、工艺 及系统设计

戎霭伦 司徒活 张忠麟 等 著

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

此书旨在对光信息存储的原理、工艺及系统设计作一全面论述。

全书共三篇：第一篇论述不同光记录介质的存储原理及材料优选，光盘的结构设计、制备工艺及性能检测；第二篇论述光盘静态、动态测试仪，光盘驱动器的光学、电器伺服系统以及信道码、纠错码等；第三篇论述光信息存储的最新进展，包括光子选通三维存储、光致色变，光电子俘获及全息存储等。最后结合实例说明光盘应用开发系统的新进展。

本书可作为理工科大学信息、材料、物理、计算机等相关专业的教学参考书；亦可供从事光盘存储系统研究、开发、应用的科技人员，以及从事计算技术及信息处理的科技人员参考。

光信息存储的原理、工艺 及系统设计

戎露伦 司徒活 张忠麟 等著

责任编辑 杨其眉

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)

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 印张13 343千字

1993年9月第一版 1993年9月第一次印刷 印数：0001—2000册

ISBN 7-118-01068-5/TN·173 定价：13.00元

序 言

“光信息存储”不仅是信息科学中一个十分活跃的前沿领域，也是薄膜物理中发展迅速的新兴学科。本书主要是北京航空航天大学在凝聚态物理、近代光学、自动控制、电子工程及计算机科学等领域的教授、副教授、讲师，工程师根据 80 年代在国内外进行光信息存储研究的科研成果和教学实践经验汇集著成。书中一些学术上的创新和技术上的新尝试都是在国家攻关、“八六三”、自然科学基金和航空科学基金的支持下完成的。本书的特色是理论与实践结合，材料研究与系统设计并重。理论部分力求避免冗长的数学推导，只介绍计算的思路和方法。科学实践、测试结果都是我们自己得出的。

全书共分为三篇。第一篇重点是光盘的存储原理、制备工艺、性能检测及材料优选。第二篇重点是光盘静态、动态测试系统及光盘驱动器中的光学系统、伺服控制系统及信道编码。第三篇重在光信息存储的新进展。每篇又分为三章，作者都是第一线的科教人员，顺序如下：第一章戎霭伦，第二章王之焘、于泓涛，第三章叶倩青、戎霭伦，第四章司徒活，第五章李晓白、王睿，第六章赵晶、（复旦大学）忻鼎稼，第七章张忠麟、施履青，第八章丁汉泉，第九章（清华大学）徐端颐。全书由戎霭伦统稿。

参加本书工作的还有吕燕伍等各届研究生，协助打字及描图的有杨长永、舒莉等，均在此致谢。

由于本书是集体著作，在内容编排和文字、文风上不尽相同，再加上时间紧促，作者水平有限，书中难免有缺点与不妥之处，诚恳希望读者指正。

戎霭伦 1992 年北京

目 录

第一篇 光信息存储的原理及工艺

第一章	光盘的存储原理、相变机制及材料优选	1
第一节	引言	1
第二节	只读存储光盘	4
第三节	一次写入光盘	6
第四节	可擦重写相变光盘的存储原理与写 \rightleftharpoons 擦可逆变化	17
第五节	激光的光致相变、能带计算及直接重写相变光盘	30
第六节	可擦重写磁光光盘的存储原理	54
第七节	光盘衬盘材料研究	57
第二章	相变光盘的结构设计及制备	68
第一节	概述	68
第二节	膜系设计	69
第三节	光盘制备——热蒸发法	78
第四节	光盘制备——溅射法	87
第五节	溅射靶的制备工艺	96
第六节	光盘封盘工艺	99
第七节	相变光盘的研制	100
第三章	相变光盘记录介质的检测与分析	104
第一节	概述	104
第二节	记录介质热学参数的测试	109
第三节	记录介质光学参数的检测	122
第四节	记录介质光能隙的测定	134
第五节	反射率谱、透射率谱及吸收率谱的测定	137

第二篇 光盘静态、动态测试系统及光盘存储器

第四章	光信息存储设备中的光学系统及光盘静态测试	
-----	----------------------	--

系统	148
第一节 概述	148
第二节 半导体激光器	152
第三节 光学头及其光学系统	159
第四节 相变光盘静态测试系统	166
第五节 静态测试软件及测试结果分析	171
第六节 磁光存储器中的光学系统	182
第七节 进一步提高存储密度和数据速率	184
第五章 相变光盘动态测试系统	188
第一节 相变光盘动态测试系统概述	188
第二节 相变光盘动态测试系统的 HP-IB 总线结构	196
第三节 相变光盘动态测试系统中的伺服控制系统	209
第四节 数据传输与数据处理	230
第五节 动态测试仪的测试功能	246
第六章 光盘预格式码与纠错编码	270
第一节 光盘预格式码简介	270
第二节 光盘扇区预格式码	274
第三节 光盘预格式码信号发生器设计	281
第四节 光盘用户数据纠错码和它的标准化	292

第三篇 光信息存储的新进展

第七章 新型光信息存储	309
第一节 持续光谱烧孔和三维光信息存储	309
第二节 光致变色存储	331
第三节 电子俘获光存储技术	340
第八章 全息信息存储	346
第一节 光学傅里叶变换	347
第二节 傅里叶变换全息图	355
第三节 等效傅里叶变换全息图	364
第四节 傅里叶变换全息存储系统	370
第五节 随机相移抽样全息图	373
第六节 全息信息存储密度	376

VI

第七节	数字信息存储器	380
第八节	全息相联存储器	387
第九章	光盘机及其应用系统	389
第一节	光盘机及亚系统	389
第二节	光盘文档系统	394
第三节	光盘图像系统	397
第四节	光盘多媒质信息存储系统	404

第一篇 光信息存储的原理及工艺

第一章 光盘的存储原理、 相变机制及材料优选

第一节 引言

随着信息社会的需要，研究和开发文档、图纸、数据等大容量信息的存储和检索系统已迫在眉睫。用磁带或磁盘进行磁记录，记录密度的极限量级为 10^8bit/cm^2 ；70 年代发展起来的光记录，记录密度的极限量级为 10^{10}bit/cm^2 （见图 1-1）。光信息存储就是利用激光的单色性和相干性，将要存储的信息、模拟量或数字量，通过调制激光聚焦到记录介质上，使介质的光照微区（直径一般在 $1\mu\text{m}$ 以下）发生物理、化学变化以实现记录，这就是通常所说的信息“写入”过程。读取信息时，用低功率密度的激光扫描信息轨道，其反射光通过光电探测器检测、解调以取出所要的信息，

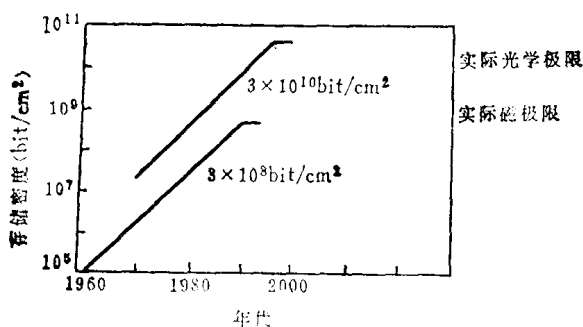


图1-1 光盘、磁盘存储密度极限对比

这就是通常所说的信息“读出”过程。这种在衬盘上淀积了记录介质及其保护膜的盘片，叫做光盘。

光盘与磁盘相比，存储潜力更大、优点更多，概述如下：

(1) 高存储密度：存储密度是指记录介质单位长度或单位面积内所能存储的二进制位数。前者是线密度，后者是面密度。光盘的线密度一般是 10^3 bit/mm ，道密度一般为 $600 \sim 700 \text{ 道/mm}$ ，故面密度可达 $10^7 \sim 10^8 \text{ bit/cm}^2$ 。

(2) 高数据传输速率：数据传输速率可达每秒几至几十兆字节的量级。

(3) 长存储寿命：记录介质薄膜封入两层保护膜之中，激光的写入和读取都是无接触过程，因此寿命很长，一般在 10 年以上。

(4) 低信息位价格：每位 10^{-3} 美分，这是存储密度高的必然结果。

此外，光盘不用固定在光盘存储器中，更换容易。表 1-1 列出直径为 130 mm (5.25 in) 的光盘、磁盘与软盘的性能对比。由于光信息存储的这些优点，在生产力发达的国家中，近年来光盘技术发展迅速，各类光盘竞相问世。表中列出的光盘数据是 1990 年推出的商品。

表 1-1 光盘、磁盘及软盘的性能对比

130 mm 盘片性能	光盘	磁盘	软盘
存储密度 (MB/盘)	1000	20	2
数据传输速率 (MB/s)	≤ 5	5	0.6
平均存取时间 (ms)	30	25	100
每兆字节价格 (\$/MB)	0.2	> 10	3
存储寿命 (年)	> 10	3	< 3

自美国 ECD 及 IBM 公司共同研制出第一片光盘以来^(1,2)，光盘的存储功能，经历了第一、二、三代的发展，目前已跨入第四代，说明如下：

(1) 只读存储光盘 (ROM)：这种光盘只能用来播放已经

记录在盘片上的信息。目前市场上的视频录像盘及数字音响唱盘属此。

(2) 一次写入光盘 (WORM): 这类光盘具有写、读两种功能, 它可用来随录随放, 也可用于文档存储和检索以及图像存储和处理。

(3) 可擦重写光盘 (REWRITE): 这类光盘除用来写、读信息外, 还可将已经记录在盘上的信息擦去, 然后再写入新的信息; 但擦、写需要两束激光、两次动作才能完成, 即先用擦激光将某一信道上的信息擦除, 然后再用写激光将新的信息录入。

(4) 直接重写光盘 (OVERWRITE): 这类光盘可用一束激光、一次动作录入信息, 也就是在写入新信息的同时旧信息自动被擦除, 勿需两次动作。

可擦重写光盘从记录介质写、读、擦的机理来讲, 目前主要分为两大类:

(1) 主要用多元半导体元素配制成的记录介质: 利用激光与介质薄膜相作用时, 激光的热和光效应导致介质在晶态 \rightleftharpoons 玻璃态之间的可逆相变来实现反复写 \rightleftharpoons 擦的要求。这是结构相变介质, 用这种介质制成的光盘叫做相变盘。

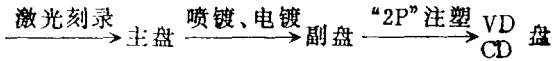
(2) 用稀土-过渡金属 (RE-TM) 合金制成的记录介质: 这种合金具有垂直于薄膜表面的易磁化轴, 利用光致退磁效应以及偏置磁场作用下磁化强度取向的“正”或“负”来区别二进制中的“0”或“1”。这是磁性相变介质, 用这种介质制成的光盘称为磁光盘。

结构相变和磁性相变的机制虽然不同, 但都属于二级相变。它与一级相变不同, 不存在两相共存的情况, 故可用介质的两个稳定状态来区别二进制中的“0”和“1”。可擦重写光盘的反复写/擦过程与记录介质中的可逆相变过程相对应。从广义的角度讲, 任何具有光致双稳态变化的材料都可用作可擦重写记录介质。

本章着重论述各类光盘的存储原理、相变机制、材料优选以及必要的理论计算。

第二节 只读存储光盘

只读存储光盘的制备过程可用下式纲要地给出，



它的存储原理可由图 1-2 形象地描述。

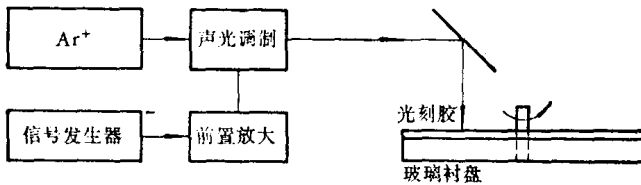


图1-2 激光刻录示意图

将事先记录在主磁带上的视频或音频信息通过信号发生器、前置放大器去驱动电光、声光调制器，使经过调制的激光束以不同的功率密度聚焦在甩有光刻胶的玻璃衬盘上，光刻胶曝光后，通过图 1-3 所示的步序制成主盘（又称母盘，Master）和副盘（又称印模，Stamper），再经过图 1-4 所示的“2P”复制过程制成视频录像盘（Video Disk-VD 盘），或数字音响唱盘（Compact Disk-CD 盘）。简述如下：

一、主盘制备工序

在经过精密研磨、抛光和超声清洗的玻璃衬盘上均匀甩上光刻胶（图 1-3(a)），干燥后置于高精度激光刻录机中，按预定声光调制进行曝光（图 1-3(b)）。若衬盘以恒定角速旋转、刻录机的光学头沿径向匀速平移，则在甩胶盘片上就可刻出螺旋形的信息道。经过监控显影，曝光部分脱落，各信息道就出现按声光调制的信息凹坑，坑形、坑深及坑间距离与携带信息有关。这种具有凹凸信息结构的盘片，就是正像主盘（图 1-3(c)），即 Master。

二、副盘制备工序

在主盘表面喷镀一层银（图 1-3(d)），一方面用来提高信息

结构的反射率以便检验主盘质量；另一方面用它作为电极，通过电镀锌镍使主盘又长上一层厚度符合要求的金属镍模（图 1-3 (e)），经化学处理后使它从主盘剥离，就形成一个负像子盘，即副盘（图 1-3 (f)）。用此副盘又可制出若干个正像镀镍母盘，每一个母盘又可生产出若干个负像子盘。每一个子盘都可用作“2P”复制过程中的印模，即 stamper。

三、“2P”复制过程⁽³⁾

“2P”是光致聚合作用 (photopolymerization) 一词的缩写，它的物理过程如图 1-4 所示。

将上述原模加工中心孔和外圆后装入图 1-4 所示的“2P”过程的喷注器中。与此同时，用靠模法将聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA (Polymethyl-methacrylate) 或聚碳酸酯 PC (Polycarbonate) 等有机玻璃材料压制

厚度为 1.2mm 的衬盘 (Blank Disk)，然后放入喷注器中与印模保持平行的位置。利用中心喷嘴将“2P”溶液喷注在衬盘和原模之间（图 1-4 (a)），喷注时在中心轴施加适当的压力以防止气泡浸入。待溶液均匀分布后，用紫外光照射，使“2P”溶液中的单体混合物因光聚合作用而固化，并粘结在衬盘上。将衬盘从喷注器取出（图 1-4 (b)），并在带有信息结构的一面喷镀一层银作为反射层，然后再淀积覆盖层，即制成视像录相盘 VD 或数字音响 CD 盘。也可以将两个同样的盘片在覆盖层的一面用粘胶粘结在一起作成双面盘。

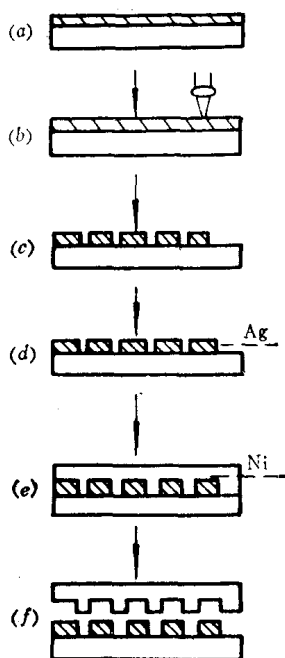


图1-3 主盘、副盘的制备工序

- (a) 甩光刻胶；(b) 调制曝光；
(c) 显影刻蚀；(d) 喷镀银层；
(e) 电镀镍层；(f) 镍模脱离。

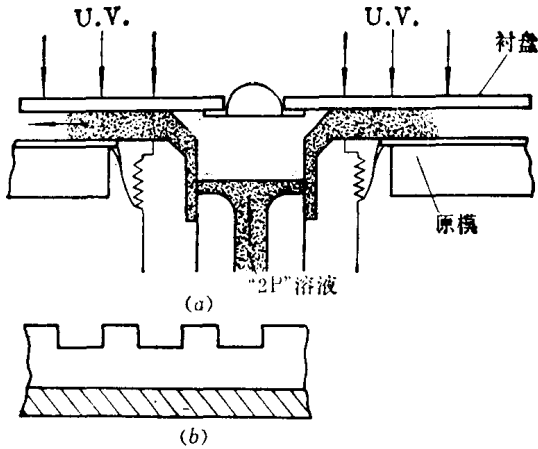


图1-4 “2P”复制过程示意图

(a) “2P”溶液的光聚合作用示意图；

(b) 固化后的光聚合树脂带有信息结构。

总的讲来，只读存储光盘的记录介质是光刻胶，记录方式多数是用声光调制的氦离子激光将信息刻录在介质上，然后制成主盘及副盘，再用副盘作为原模，大量复制视频录像盘或数字音响唱片。一个原模一般可复制至少 5000 片盘片。

用户只要有一台播放机就能享受光盘上的逼真音、像节目。但是这样的光盘系统只能读取，不能录入。用户想自行录像（兼录音），必须采用一次写入的光盘系统。

第三节 一次写入光盘

一次写入光盘是利用激光光斑在存储介质的微区产生不可逆的物理化学变化以进行记录的盘片，它的记录方式多种多样，现择其主要并有特色的列举如下。

一、记录方式

(一) 烧蚀型

存储介质可以是金属、半导体合金、金属氧化物或有机染料，利用激光的热效应，使介质的微区熔化、蒸发以形成信息坑孔（图 1-5(a)）。

(二) 起泡型

存储介质由聚合物-高熔点金属两层薄膜组成。激光照射使聚合物分解排出气体，两层间形成的气泡使上层薄膜隆起，与周围形成反射率的差异而实现信息的记录（图 1-5(b)）。

(三) 熔绒型

存储介质用离子刻蚀的硅，表面呈现绒面结构，激光光斑使照射部分的绒面熔成镜面，实现反差记录（图 1-5(c)）。

(四) 合金化型

用 Pt-Si、Rh-Si 或 Au-Si 制成双层结构，激光加热的微区熔成合金，形成反差记录（图 1-5(d)）。

(五) 相变型

存储介质多用硫属化合物或金属合金制成薄膜，利用激光的热效应和光效应使被照微区发生相变。这种相变可以从非晶相 1 到另一个非晶相 2、晶相 1 到另一个晶相 2，或是非晶相到晶相的转变（图 1-5(e)）。这类相变将在第四至五节详细论述。

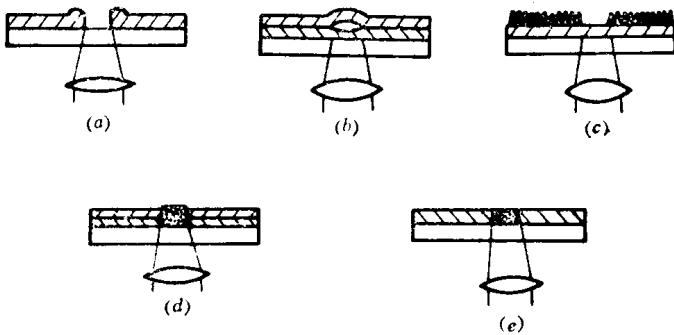


图1-5 各种类型的一次写入光盘

(a) 烧蚀型；(b) 起泡型；(c) 熔绒型；
(d) 合金化型；(e) 相变型。

在上述各类一次写入光盘中，以烧蚀型光盘率先推出商品。本节将以它为实例，着重讨论光盘的介质优选、存储原理以及结构的优化设计。

二、写/读光盘对存储介质的基本要求

(一) 高分辨率及信息凹坑的规整几何形状——以保证光盘能在高存储密度的情况下获得较小的原始误码率。

图 1-6 示出已记录的信息坑孔, 坑孔边缘不规整形状的偏差程度用 δ 表示。当读取激光束从信息道的无记录区扫入或扫出信息凹坑时, 定为读取信号的“1”, 否则为“0”, 这样得到的读取信号波形如图 1-6 中下方所示。若存储密度为 10^8 bit/cm^2 , 每信息位仅占有 $1 \mu\text{m}^2$ 的面积, 存储介质应能保持这些显微坑孔的规整几何形状并以更高精度分辨它们的位置, 就要求边缘偏差 δ 落在 $\pm 100 \text{ \AA}$ 以内, 确保在这样高的记录密度情况下, 原始位错率小于 10^{-6} 。

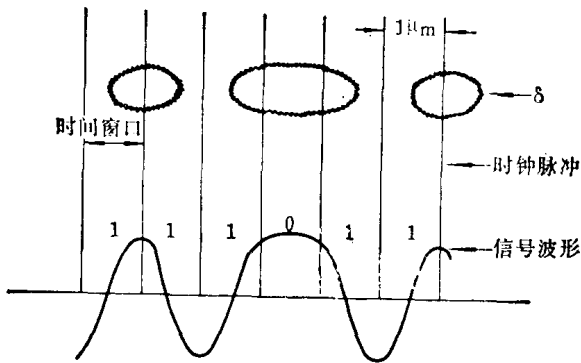


图 1-6 读取分辨率示意图

(二) 没有中间处理过程——使光盘能实现写后直读 (即 DRAW-direct read after write 功能) 以保证记录数据的实时检验。

图 1-7 示出显微镜视场中的记录数据光斑和跟随在它后面的读取数据光斑。存储介质应能实时记录并及时读出信息, 不需要任何中间处理过程, 才可实现记录数据的实时检验。

(三) 较高的记录灵敏度

记录灵敏度是指存储介质对所用的激光波长具有吸收系数

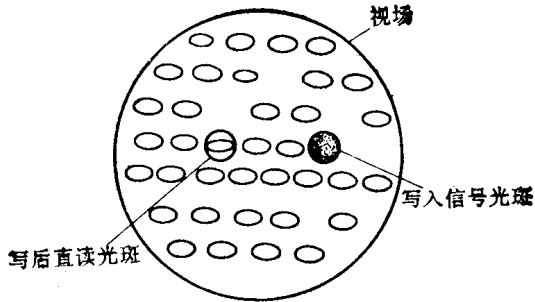


图1-7 写后直读 (DRAW) 示意图

大、光响应特性好，以致能在读出波形不失真的情况下用最低的激光功率在介质中形成可靠的记录标志。存储介质有足够的灵敏度，就能在较高的数据传输速率下，用毫瓦级半导体激光器进行录入。例如我们用 $\lambda = 830 \sim 840 \text{nm}$ 、到达盘面的功率 $P = 8 \sim 15 \text{mW}$ 、脉宽可调的激光对多元半导体材料进行记录，在盘片高速转动情况下，可获得每秒几兆字节的数据速率。

(四) 较好的记录阈值

记录阈值是指在存储介质中形成规整信息标志所需要s的最小激光功率密度。记录阈值过高或过低都会影响凹坑质量和读出效果。只有适当的记录阈值可以使记录信息被读出无限次，也就是说读出次数大于 10^8 ，也不会使信息凹坑发生退化。

(五) 较高的反衬度

反衬度是指信道上记录微区与未记录区的反射率对比度，定义为：

$$C = \frac{R_s - R_0}{\frac{1}{2}(R_s + R_0)}$$

式中 R_s ——存储介质记录微区的反射率，

R_0 ——存储介质未记录区的反射率。

存储介质以及经过优化设计的光盘应有尽可能高的反衬度，

以便使读出信噪比 (SNR) 达到最佳值。

(六) 稳定的抗显微腐蚀能力

存储介质应作到大面积成膜均匀、致密性好、显微缺陷密度小、抗缺陷性能强, 从而得到低于 10^{-4} 数量级的原始误码率及至少大于10年的存储寿命。

(七) 与预格式化衬盘相容

一次写入光盘可用来存储和检索文档资料, 因此光盘上应有地址码, 它包括信道号、扇区号及同步信号等。这些码都以标准格式预先刻录并复制在光盘的衬盘上。本书第六章将专门讨论衬盘的预格式化。这里只强调存储介质应与预格式化衬盘相容, 包括力、热及光学的匹配, 以保证轨道跟踪的顺利进行并能实现在任一轨道的任一扇区进行信息的写和读。

(八) 高生产率、低成本

低成本意味着存储介质原材料的选用应立足于国内, 这一点已经做到。

三、一次写入光盘的存储原理

利用激光热效应对存储介质单层薄膜进行烧蚀, 信息坑孔形成的过程如图1-8所示。

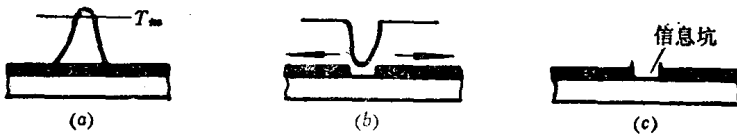


图1-8 烧蚀信息坑孔的形成

(a) 激光到达; (b) 中心熔融; (c) 坑孔形成。

以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 为衬底, 厚 1.2mm, 上面溅射一介质薄层。用 830nm 激光, 聚焦在 $1\mu\text{m}^2$ 范围内, 温度呈高斯型空间分布 (图 1-8(a))。当中心温度超过介质熔点 T_m 时, 在介质表面形成一熔融区, 周围的表面张力将此熔区拉开成孔 (图 1-8(b))。激光脉冲拆去, 孔的边缘凝固, 在记录介质膜上形成与输入信息相应的坑孔 (图 1-8(c))。