

团 体 标 准

T/CI 201—2023

全息数据存储系统

Holographic data storage system

2023 - 11 - 30 发布

2023 - 11 - 30 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 全息数据存储读写方式	3
4.1 信息上载方式	3
4.2 信息记录方式	3
4.3 信息读取方式	3
4.4 读写光源	3
4.5 复用方式	3
5 数据通道编解码方式	3
5.1 编码方式	3
5.2 解码方式	3
6 全息光盘伺服系统	4
6.1 伺服光	4
6.2 光盘转速	4
6.3 伺服精度要求	4
6.4 光轴补偿	4
7 全息光盘的结构与规格	4
7.1 全息光盘物理结构	4
7.2 全息光盘地址层	5
7.3 全息光盘规格	5
8 全息存储介质及性能评价方式	5
8.1 全息存储介质体系	5
8.2 全息存储介质性能评价方法	5
8.3 介质记录衍射效率	6
8.4 介质记录湿热试验指标	6
9 全息数据存取性能评价方式	6
9.1 全息数据存取性能评价系统	6
9.2 原始误码率	7
9.3 校验后误码率	7
9.4 数据误码率	7
附录 A（规范性） 全息存储介质的湿热试验	8
参考文献	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由福建师范大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：福建师范大学、上海理工大学、中国科学院光电技术研究所、华中科技大学、重庆大学、福建盘盛信息光学有限公司、青岛盘谷信息光学有限公司。

本文件主要起草人：谭小地、郑继红、李雄、曹强、贾云健、林泉、任宇红。

全息数据存储系统

1 范围

本文件规定了全息数据存储读写方式、数据通道编解码方式、全息光盘伺服系统、全息光盘的结构与规格、全息存储介质及性能评价方式、全息数据存储性能评价方式。

本文件适用于数据存储行业的全息数据存储应用。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

全息数据存储 holographic data storage (HDS)

利用信号光与参考光干涉在介质中形成全息图，并利用参考光照射全息图衍射出信号光的过程。

3.2

全息光盘 holographic disc

采用全息数据存储技术写入与读取数据的光盘。

3.3

信号光 signal beam

携带有编码数据页信息的光束。

3.4

参考光 reference beam

写入时与信号光干涉形成全息图、读取时让全息图产生衍射重建光的光束。

注：在全息数据存储中，写入时参考光与读取时参考光应完全一致，因此统称参考光。

3.5

重建光 reconstructed beam

由参考光读取全息图后衍射出的光。

注：重建光与信号光具有相似的光场分布。

3.6

同轴系统 collinear system

信号光与参考光沿同一光轴进行传播的系统。

3.7

复用 multiplexing

在介质上记录两幅以上全息图且这些全息图在物理空间上存在两两交叠的方法。

3.8

位移复用 shifting multiplexing

一幅全息图记录完后位移至其附近具有交叠范围的地方进行另一全息图的记录。

3.9

误码率 bit error rate (BER)

表征读出数据后的错误数据占原有全部数据总数的比例。其计算公式为：

$$BER = \frac{\text{读出数据中错误数据个数}}{\text{原有数据总数}} \dots\dots\dots (1)$$

3.10

编码阶数 encoding level

在所定义编码空间中离散的取不同值进行编码的数量。

示例：4 阶相位编码可在 $0-2\pi$ 编码空间中取 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 作为该 4 阶相位编码。

3.11

标志点 sync mark

在获取重建光进行解码时用于快速精确定位数据页的具有特定分布的位置。

3.12

记录介质 recording medium

可吸收一定波长范围的光并引发自身某一项物化参数的改变,且该物化参数的改变量与入射光强相关的材料。

3.13

二向色镀膜层 dichroic layer

针对记录介质的感光波段具有高反射率,且对材料的不感光波段具有高透射率的镀膜层。

3.14

衍射效率 diffraction efficiency

读取全息图的能量耦合效率,通常用 η 表示。计算公式为:

$$\eta = \frac{\text{1 级衍射光的强度}}{\text{1 级衍射光的强度} + \text{0 级光的强度}} \times 100\% \quad (2)$$

3.15

折射率调制度 refractive index modulation

记录介质通过干涉条纹的折射率差来响应干涉光场,折射率调制度反映了记录介质可产生折射率差的能力,通常可由 Δn 表示。计算公式为:

$$\Delta n = \frac{\lambda \cos \theta_0}{\pi d} \arcsin \sqrt{\eta} \quad (3)$$

式中:

λ ——记录波长(单位:毫米);

θ_0 ——信号光与干涉法线之间的夹角;

d ——记录介质的厚度(单位:毫米);

η ——记录全息图的衍射效率。

3.16

光敏度 photosensitivity

不同记录介质在同一曝光量下的全息图记录效率。计算公式为:

$$S = \frac{1}{I d} \left(\frac{\partial \sqrt{\eta}}{\partial t} \right) \quad (4)$$

式中:

I ——信号光强度;

d ——记录介质厚度(单位:毫米);

η ——记录全息图的衍射效率。

3.17

光轴补偿 optical axis compensation

用于补偿物镜伺服移动带来的光轴偏心的方法。

3.18

空间光调制器 spatial light modulator (SLM)

一种二维图像信息上载器件,上载后光照射携带的信息可以是振幅型的也可以是相位型的。

3.19

跟踪误差 tracking error (TE)

驱动器测量径向跟踪伺服剩余误差信号的大小。

注:改写 DA/T 74-2019, 3.15

3.20

聚焦误差 focus error (FE)

驱动器测量垂直聚焦剩余误差信号的大小。

注：改写DA/T 74-2019, 3.15

4 全息数据存储读写方式

4.1 信息上载方式

采用同轴系统，利用同一个空间光调制器对信号光和参考光进行上载。信号光与参考光在物理空间中是分离的，如信号光在上载图案的中心位置，参考光在上载图案的周边位置。

4.2 信息记录方式

利用较高数值孔径的物镜将信号光和参考光同时汇聚，在物镜后焦面处两束光将相互干涉，记录介质对干涉光场进行响应，以全息图的形式固定干涉光场分布，即为全息数据存储系统的信息记录方式。

4.3 信息读取方式

在空间光调制器上只上载参考光，且读取时参考光应与记录时的完全一致。使参考光照射介质中的全息图位置，将衍射出重建光。利用光电探测器对重建光进行成像采集即完成信息的读取。

4.4 读写光源

写入与读取的光源为300nm-570nm的激光光源。

4.5 复用方式

采用位移复用方式，位移记录间距范围为3 μm -100 μm 。

5 数据通道编解码方式

5.1 编码方式

全息数据存储的编码方式可采取下述任意一种或几种的组合。

5.1.1 振幅编码

利用振幅型空间光调制器上载的二维图像编码，其编码显示效果为不同编码值对应的像素显示的强度不同。以振幅型空间光调制器的编码空间256阶为例，振幅编码阶数选取范围为2-8阶。振幅编码页的信息图案的部分应划分子页，每个子页均具有标志点，子页的其余部分为最小编码单元，可由4*4像素组成。振幅编码页的参考光图案部分应在信息图案的外圈，围绕信息图案中心呈辐射线分布，且参考光图案像素总强度应与信息图案像素总强度大致相同。

5.1.2 相位编码

利用相位型空间光调制器上载的二维图像编码，其编码显示效果为不同编码值对应的像素显示的相位不同。以相位型空间光调制器的编码空间256阶为例，相位编码阶数选取范围为2阶-16阶。

5.1.3 复振幅编码

利用振幅型和相位型空间光调制器分别上载的带有振幅分布和相位分布的二维图像编码，其编码显示效果为不同编码值对应的像素显示的复振幅不同。以空间光调制器的编码空间256阶为例，复振幅编码阶数选取范围为4阶-128阶（振幅2阶-8阶，相位2阶-16阶）。

5.1.4 偏振通道编码

利用记录介质对不同偏振态的信号光与参考光干涉结果的不同响应，实现多阶偏振通道记录，提升存储密度。同一记录位置的偏振通道阶数范围为2阶-8阶。

5.2 解码方式

全息数据存储的解码方式根据其对应的编码方式可采取下述任意一种或几种的组合。

5.2.1 振幅解码

根据拍摄到的二维重建光图进行振幅解码，由标志点定位整体页面和编码子页，从编码子页中按照编码坐标提取编码单元，根据编码单元对应的编码表图案找到相对应的二进制编码，并转换为最终的数据。

5.2.2 相位解码

利用非干涉、非迭代方式进行相位解码，使系统鲁棒性更高。通过拍摄重建光的近场衍射强度图并利用训练后的深度学习网络模型进行相位解码。

5.2.3 复振幅解码

利用非干涉、非迭代方式进行复振幅的同时解码。通过拍摄重建光的近场衍射强度图并利用训练后的深度学习网络模型进行复振幅同时解码。

5.2.4 偏振通道解码

利用互为正交偏振态的参考光对全息图进行读取，得到不同的偏振态组合下的重建光图案进行解码。

6 全息光盘伺服系统

6.1 伺服光

伺服光是为了实现光盘震动下光学头与光盘相对位置固定而使用的探测光，由于伺服光将通过记录材料，因此伺服光波长选择为不能引起材料物化性质变化的波段，其波长范围通常为600nm-850nm。

6.2 光盘转速

以直径120mm标准光盘尺寸为例，全息光盘转速为1r/s-10r/s。

6.3 伺服精度要求

6.3.1 跟踪误差

跟踪误差TE<100nm。

6.3.2 聚焦误差

聚焦误差FE<1000nm。

6.4 光轴补偿

因光盘移动时的偏心所导致的伺服系统带动光学头移动带来光轴偏离中心，须利用反射镜移动对光轴进行补偿，光轴补偿误差<1000nm。

7 全息光盘的结构与规格

7.1 全息光盘物理结构

全息光盘物理结构从上到下应分别为保护层，全息介质，胶合层，二向色镀膜层，平整层，地址层，基底。其中保护层厚度<0.6mm；全息介质厚度范围0.5mm-1.0mm；二向色镀膜层对记录光反射率>85%，对伺服光透射率>85%。图1为全息光盘物理结构示意图，记录光波长以532nm为例，伺服光波长以650nm为例。

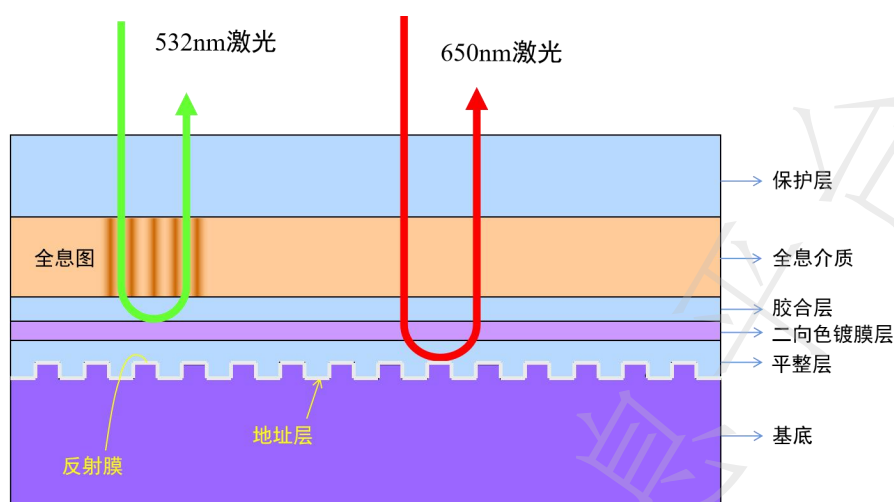


图1 全息光盘物理结构

7.2 全息光盘地址层

7.2.1 凹槽宽度

范围600nm-700nm。

7.2.2 凹槽深度

范围100nm-116nm（该参数以650nm作为伺服光为例）。

7.2.3 轨道间距

范围1600nm±50nm。

7.3 全息光盘规格

参照传统光盘规格，盘体外径120mm，内径15mm。

8 全息存储介质及性能评价方式

8.1 全息存储介质体系

根据存储介质的物化性质改变是否可逆分成两种体系：可擦写与不可擦。前者采用有机光致聚合物体系材料，例如PQ/PMMA，可一次写入多次读出，不可重复擦写；后者采用无机晶体体系材料，如铌酸锂晶体，可多次写入多次读出，可重复擦写。

8.2 全息存储介质性能评价方法

需搭建专门的介质全息存储性能评价系统，如图2所示。该系统使用光致聚合物材料PQ/PMMA，采用532nm单纵模激光器作为记录光源。该系统可调信号光与参考光的写入与读取光强度、信号光与参考光的写入与读取偏振态、写入曝光时间、读取曝光时间、光斑大小等。通过控制快门开关，实现全息图的记录与读取，通过功率计得到零级光和1级衍射光的强度可以计算介质的衍射效率、折射率调制度、光敏度、均匀性等参数。通常衍射效率越高、折射率调制度越高、光敏度越高、其多个采样点的参数方差越小代表介质性能越佳。

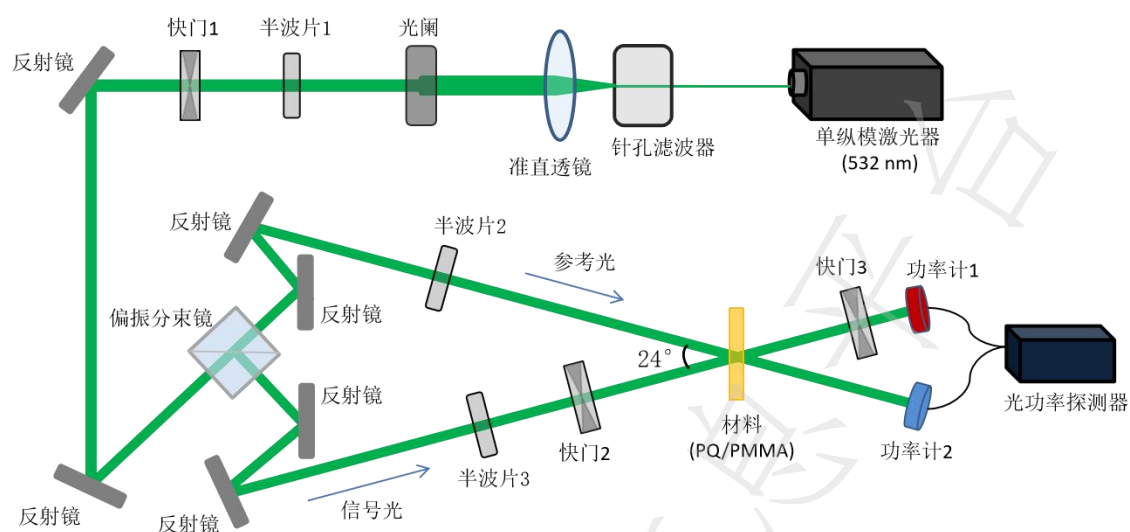


图2 介质全息存储性能评价系统

8.3 介质记录衍射效率

介质记录单幅全息图的最高衍射效率应 $>60\%$ 。

注：上述衍射效率以材料外干涉角 24° （材料折射率1.5）来计算。

8.4 介质记录湿热试验指标

根据图2系统，在介质中记录全息光栅后，在温度 80°C 、相对湿度 80% 的环境条件下放置96h(按附录A执行)，将介质取出放置回系统原位后，读取全息光栅衍射效率 $>$ 刚记录全息光栅衍射效率的 80% 。

9 全息数据存取性能评价方式

9.1 全息数据存取性能评价系统

根据图3系统，利用同轴全息数据存储系统记录与读取数据。记录时，在空间光调制器上加载信号光与参考光，将信息记录在全息光盘上。读取时，在空间光调制器上加载参考光，衍射重建光被相机拍摄，并进行后续解码，解码后的结果以计算误码率为依据，评价全息数据存取性能。该系统可调参数为记录信号光与参考光强度、读取参考光强度、信号光与参考光编码、记录全息图大小、记录频谱分布、曝光量、位移复用距离、介质暗反应效果、介质固化和老化读取效果等。

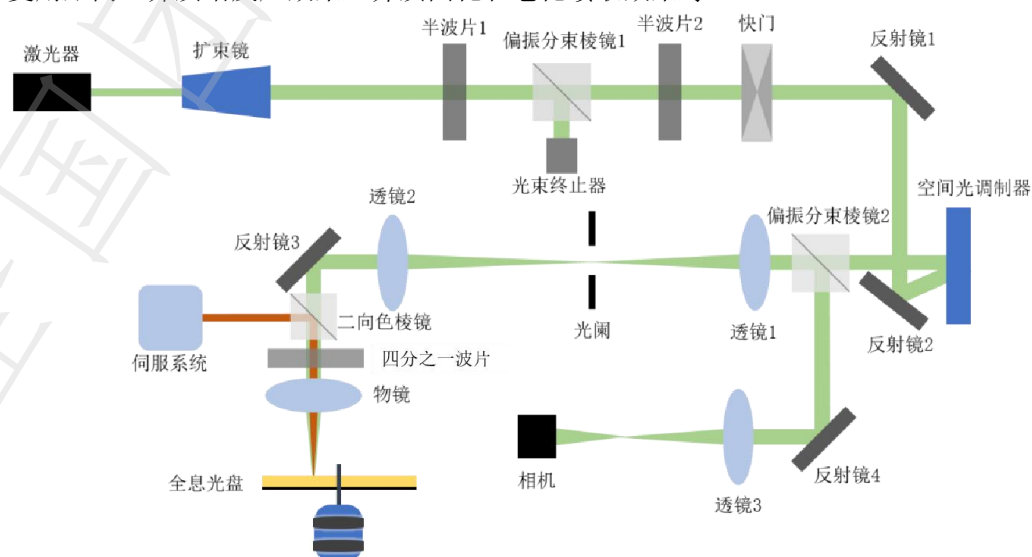


图3 同轴全息数据存储系统示意图

9.2 原始误码率

不同编码方式和编码阶数对应不同原始读取误码率标准,原始误码率应以降噪解码后可校验程度为标准,例如2阶振幅编码,通常原始误码率小于 10^{-2} 时,降噪解码后误码率可小于 10^{-3} ,经校验后误码率可小于 10^{-4} 。

9.3 校验后误码率

校验后误码率应 $<10^{-4}$ 。

9.4 数据误码率

数据误码率应 $<10^{-10}$ 。

附录 A
(规范性)
全息存储介质的湿热试验

为测试全息存储介质抵抗温湿度的能力,规定全息存储介质在模拟室外湿热大气的人工气候加速老化环境条件下,仍能达到规定的技术指标。

将待测全息存储介质垂直放置在温度80℃、相对湿度80%的温湿度老化试验箱内,持续96h后取出。将全息存储介质放置在检测环境(温度15℃~35℃、相对湿度45%~75%)中24h后,经检测,全息存储介质性能参数应符合8.4的要求。

参 考 文 献

- [1] DA/T 74-2019 电子档案存储用可录类蓝光光盘(BD-R)技术要求和应用规范
-

全国团体标准信息平台