

VCD 和 DVD 用全息光栅衍射效率的分析*

梁万国¹ 郑婉华¹ 谢敬辉² 梁恩主¹ 陈良惠¹ 李 卉¹ 刘 浩¹

(1 中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083)

(2 北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要: 在 VCD 和 DVD 中由于使用了全息光学元件, 全息光学读出头的元件数量比传统光头的元件数量少。分析了光盘信号探测、聚焦、循迹原理, 推出了光栅衍射效率的一般计算公式, 并给出了光栅沟槽形状为“方波”时光栅衍射效率的计算公式, 由此计算出了 VCD 和 DVD 实用的全息光学元件的蚀刻深度。

关键词: 全息光学元件; 光学读出头; 衍射效率

EEACC: 4320J; 4270; 4140

中图分类号: O438.1

文献标识码 A

文章编号: 0253-4177(2001)06-0784-04

1 序言

八十年代末、九十年代初, 夏普(SHARP)^[1]、松下(MATSUSHITA)^[2]等 CD 唱机、CD-ROM 及其元器件的主要生产厂家先后研制出集成了或部分集成了半导体激光器(LD)、光电集成电路(集成有半导体光探测器 PD 和放大电路)和全息光学元件(HOE)的混合集成元件, 以满足对 CD 和 CD-ROM 提出的小型化、高速度的要求。96 至 97 年以来, 随着 DVD 的出现和迅速发展, 几家大公司在原有 CD 用 OEIC 的基础上, 推出了几种不同形式的 DVD 用 OEIC, 甚至 DVD/CD 兼容的 OEIC 组件。

从构成上看, 这种 OEIC 组件有的包括 LD、PD、放大器和 HOE, 有的只包含上述部分元件。从集成方式上看, 有两种典型方式。一种以夏普公司的产品为代表, 另一种以松下公司的产品为代表。

夏普公司的组件中, LD 与 OPIC 分别安装在底座不同位置上, 由带有玻璃窗口的管帽封装。在玻璃窗口上方, 是一个全息光学元件。该全息光学元件由玻璃制成, 在其上、下两面, 分别刻有全息光栅, 光栅由标准的光刻工艺制造。OPIC 采用硅双极工艺制造, PD 与放大电路实现单片集成。夏普公司此类组件已成系列, 从用于 CD/CD-ROM 到 97 年推出的

用于 2 倍速 DVD-ROM。其用于 2 倍速 DVD 的组件响应频率大于 20MHz。最近, 该公司正在开发用于 4 倍速 DVD 的 OPIC。

总之, 经多方调查, DVD/CD 用 OEIC 组件的开发与研制已成为实现 DVD/CD 系统高速度、高可靠性、小型化的关键, 因而也成为各商家竞争的焦点之一。

本文研究各种沟槽形状光栅的衍射效率的计算方法。

2 全息光学头的结构和探测原理

2.1 全息激光头的结构

图 1 为 SHARP 公司生产的传统光学读出头和全息光学读出头的结构示意图^[1]。在图 1(a)传统的光头中, 由激光器(Laser Diode)发出的激光经光栅(Grating)衍射后分为 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 等衍射级, 在光盘信号的读出、聚焦和循迹中, 只用 $0, \pm 1$ 级衍射光(其它级的衍射光当杂散光处理), 它们经分束镜(Beam-Splitter)反射后进入准直镜和物镜, 经准直镜和物镜聚集成很小的光斑入射到光盘上, 经光盘反射后的光束再经准直镜、物镜后入射到分束镜上, 经分束镜透射后入射到一凹面镜(Concave

* 国家“863”高技术计划资助项目。

2000-06-19 收到, 2000-08-22 定稿

Lens) 上, 最后诸光束入射到光电探测器(Photodiode)上.

在图 1(b) 所示的激光全息光学读出头中, 由 LD 发出的激光, 经光栅衍射后分为 0, $\pm 1, \pm 2, \dots$ 等衍射级, 在光盘的读出、聚焦和循迹中, 只用 0, ± 1 级衍射光, 它们再入射到全息光学元件(Holographic Optical Element, HOE)上, 它的衍射光进入准直镜和物镜, 经准直镜和物镜聚焦成很小的光斑入射到光盘上, 然后再经过光盘反射后的诸光束经过物镜和准直镜后入射到 HOE 上, 它们经过 HOE 衍射后产生实像, 在该实像处放置光电探测器.

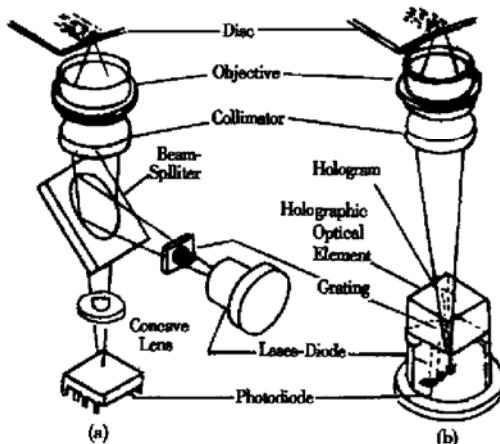


图 1 (a) 传统的光头结构; (b) 全息激光头结构

FIG. 1 (a) Structure of Conventional Optical Head; (b) Structure of Holographic Optical Head

比较传统的光学读出头和激光全息光学读出头, 显然激光全息光学读出头所用的光学元件的数量少, 并且其体积也比传统的光学读出头的体积小, 从而可以降低光头的成本和减小光头的体积.

2.2 全息激光头的读出、聚焦和循迹原理

图 2 所示为全息激光头的探测原理图, 由 LD 发出的激光, 经 Grating 衍射后分为 0, $\pm 1, \pm 2, \dots$ 等衍射级, 在光盘信号的读出、聚焦和循迹中, 只用 0, ± 1 级衍射光, 它们再入射到全息光学元件上, 该 HOE 是由条纹形状不同的两个 HOE 级联而成具有分束和成像的功能, 经它们透射后的光进入准直镜和物镜, 经准直镜和物镜聚焦成很小的光斑入射到光盘上, 然后再经过光盘反射后的诸光束经过物

镜和准直镜后入射到 HOE 上, 反射回的 0, ± 1 级光经不同的 HOE 衍射后产生不同的实像, 经过精确计算后, 使得诸实像分别位于 D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 等阵列探测器上, 经过探测器的光电转换后将光信号转化为电信号, 分别表示为 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 .

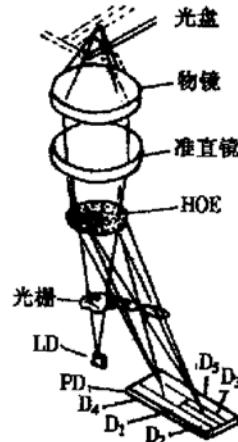


图 2 全息激光头的探测原理

FIG. 2 Detecting Principle of Holographic Optical Head

探测到的读出信号为

$$RF = S_2 + S_3 + S_4 \quad (1)$$

聚焦信号为

$$FES = S_2 - S_3 \quad (2)$$

如 $FES = 0$, 则表示光斑刚好聚焦到所循迹的光盘轨迹上;

如 $FES \neq 0$, 则表示光斑未聚焦到光盘轨迹上.

循迹信号为

$$RES = S_1 - S_5 \quad (3)$$

如 $RES = 0$, 则表示光斑刚好达到所循迹的光盘轨迹上;

如 $RES \neq 0$, 则光斑偏离所循迹的光盘轨迹.

根据 FES 和 RES 的大小和符号来决定伺服控制电路的动作.

3 光栅衍射效率的计算

薄光栅还是厚光栅由 Q 因子决定^[3], Q 因子定义如下

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{nT^2 \cos\theta} \quad (4)$$

其中 λ 是入射光的波长; d 是光栅的沟槽深度; n 是平均折射率; T 是光栅周期; θ 是入射角. 若 $Q \ll 1$, 则光栅为薄光栅, 否则为厚光栅.

在 VCD 和 DVD 用的全息光栅中, 一般 $\lambda=780\text{nm}$ (VCD) 或 650nm (DVD), $d \approx 300\text{nm}$, $n \approx 1.5$, $T \approx 10\mu\text{m}$, 正入射时, $\theta=0$, 则 Q 为 10^{-4} 的数量级, 所以可以把该光栅当作薄光栅处理.

对于厚光栅衍射的处理, 用耦合波理论^[4]进行计算; 对于薄光栅, 用傅氏变换法进行夺目计算. 下面用傅氏变换法计算光栅的衍射.

由于沟槽(浮雕)形状为矩形的位相型浮雕光栅容易加工, 所以在 VCD 和 DVD 光学度出头中常采用占空比为 $1:1$ 的矩形位相型浮雕光栅.

讨论图 3 所示的具有矩形沟槽的浮雕光栅, 图 3(a) 为浮雕位相光栅的位相分布 $\phi(x)$ 曲线, 其中 ϕ_0 表示从光栅的“陆地”和“沟槽”部分透过的光波的位相差. 设光栅的沟槽深度为 d , 折射率为 n , 则有

$$\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}nd - 2i\pi, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

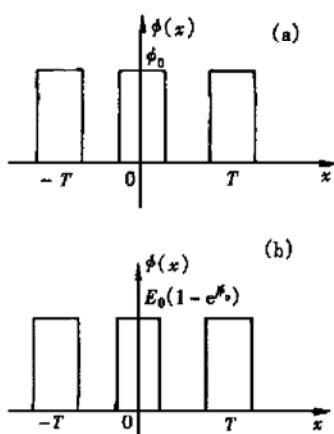


图 3 光栅沟槽形状为“方波”

FIG. 3 Grating with Rectangular Profile

用振幅为 E_0 的单色平面波正入射照明, 则光栅出瞳处的复振幅分布如图 3(b) 所示, 可表示为

$$E(x) = \frac{E_0}{T}(1 - e^{j\phi_0}) \operatorname{rect}\left(\frac{2x}{T}\right) \odot \operatorname{comb}\left(\frac{x}{T}\right) \quad (6)$$

它的 Fraunhofer 衍射可通过 $E(x)$ 的傅里叶变换求出

$$\begin{aligned} e(f_x) &= F.T.[E(x)] \\ &= E_0\left(\frac{1 - e^{j\phi_0}}{2}\right) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \operatorname{sinc}\left(\frac{Tf_x}{2}\right) \delta(f_x - \frac{i}{T}) \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式可求出各级衍射光的复振幅和衍射效率.

对于一级衍射, $i=1$, 空间频率 $f_x=\frac{1}{T}$

一级衍射复振幅为

$$\begin{aligned} e_1 &= E_0\left(\frac{1 - e^{j\phi_0}}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2}\right) \\ &= E_0 \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 - e^{j\phi_0}}{2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

一级衍射效率为

$$\begin{aligned} \eta_1 &= |e_1|^2 = \left|E_0 \frac{2}{\pi} \left(\frac{1 - e^{j\phi_0}}{2}\right)\right|^2 \\ &= \frac{2}{\pi^2} (1 - \cos\phi_0) \end{aligned} \quad (9)$$

当 $\phi_0=\pi$ 时, 可得最大一级衍射效率 $\eta_{1m}=\frac{4}{\pi^2}=40.53\%$.

在光学读出头的应用中, 采用玻璃基片上的光栅复制, 要求 $\eta_1=1/4$, 代入(9)式可得

$$\cos\phi_0 = \frac{8 - \pi^2}{8} = -0.2337 \quad (10)$$

由(5)式, 可得出光栅的蚀刻深度 d 为

$$d = \frac{\lambda}{n}(i + 0.7125)\mu\text{m}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

对于 VCD 光学读出头, $\lambda=780\text{nm}$, $n=1.47$, 算出

$$d_i = (0.3781 + 0.5306i)\mu\text{m} \quad (12)$$

选 $i=0$ 时的数据, 即为 $0.3781\mu\text{m}$.

对于 DVD 光学读出头, 如果 $\lambda=650\text{nm}$, $n=1.47$, 算出

$$d_i = (0.3150 + 0.4422i)\mu\text{m} \quad (13)$$

选 $i=0$ 时的数据, 即为 $0.3150\mu\text{m}$.

本实验中采用折射率为 1.47 的玻璃进行光栅复制, 复制深度分别为 $0.3150\mu\text{m}$ (对于 DVD), 实验得出的光栅 AFM 测量结果见图 4、5 所示.

从图 4、5 可看出, 光栅的周期为 $28\mu\text{m}$, 台面宽度为 $12\mu\text{m}$, 沟槽宽度为 $16\mu\text{m}$, 沟槽深度为 $0.3135\mu\text{m}$, 与设计的深度有点差别, 这可以通过改变腐蚀液的浓度和腐蚀时间以达到精确控制腐蚀深度的目的.

4 结论

本文分析了光盘信号探测、聚焦、循迹原理. 推出了光栅衍射效率的计算公式, 并在沟槽形状为“方波”这种特殊情形时给出了光栅衍射效率的计算公式. 分析表明, 矩形沟槽的位相型浮雕光栅有多级输出, 又有较高的衍射效率, 加上沟槽(浮雕)形状为矩形的位相型浮雕光栅容易加工, 故较适合 VCD 和 DVD 光头的应用.

本实验中采用湿法和干法蚀刻方法加工沟槽(浮雕)形状为“方波”的光栅,并计算出了 VCD 和 DVD 实用的光栅的蚀刻深度。

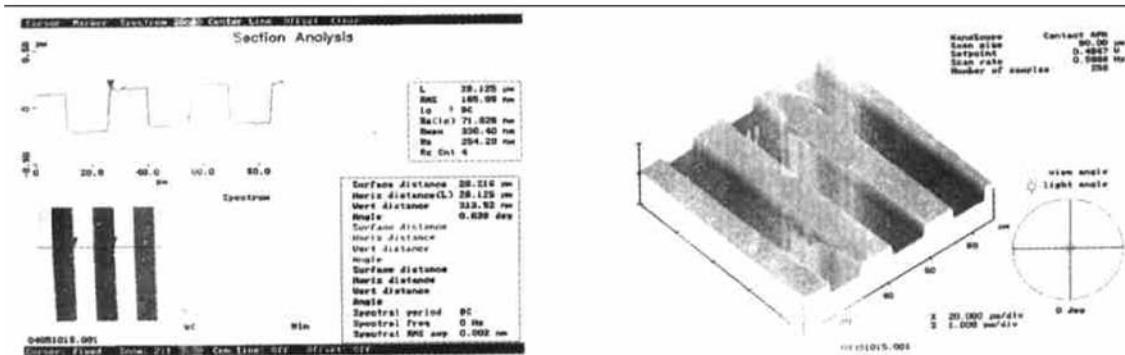


图 4 光栅的 AFM 分析图

FIG. 4 AFM Analysis Diagram for Grating

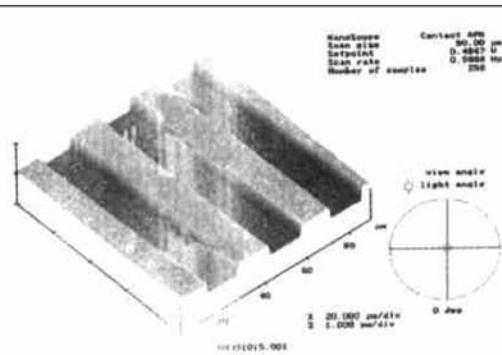


图 5 光栅的立体图

FIG. 5 Three-Space Diagram for Grating

参考文献

- [1] Naoki Fukunaga, Motohiko Yamamoto *et al.*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, **43**(2): 157—164.
- [2] Akio Yoshikawa, Hideyuki Nakanishi *et al.*, IEEE

Transactions on Components, Packing, and Manufacturing Technology, 1995, **18**(2): 245—249.

- [3] R. Magnusson and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am., 1978, **68**(6): 806—809.
- [4] R. Magnusson and T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am., 1978, **68**(6): 809—815.

Analysis of Diffraction Efficiency of the Holographic Optical Elements in VCD and DVD*

LIANG Wan-guo¹, ZHENG Wan-hua¹, XIE Jing-hui², LIANG En-zhu¹, CHEN Liang-hui¹, LI Hui¹ and LIU Hao¹

(1 National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In VCD and DVD pick-up head systems, the number of the optical elements in a holographic optical pick-up head is less than that used in the conventional one due to the application of holographic optical elements. The principles of the signals detecting, focusing and tracking of the optical disk are analyzed. The general formulas of the diffraction efficiency for gratings are deduced, especially for the gratings with rectangular relief profile. The useful depths between land and groove of the gratings used in VCD and DVD are also given.

Key words: holographic optical element; optical pick-up head; diffraction efficiency

EEACC: 4320J; 4270; 4140

Article ID: 0253-4177(2001)06-0784-04

* Project Supported by National High Technology Research and Development Program of China.