

光盘系统原理

〔荷〕G.布休斯 等著

匡正芳 译

333.4

XS/1

国防工业出版社

TP333.4
BXS/1

光盘系统原理

〔荷〕 G. 布休斯 等著

匡正芳 译



国防工业出版社

0 18209

内 容 简 介

本书主要叙述光盘系统的物理原理和工程技术基础,着重介绍了光盘的读出技术、衍射的向量理论、光盘系统的控制原理和母版制造方法,并对在线光学录刻材料、光盘系统的信道编码和它们的应用、发展作了介绍。

全书共分八章:①绪言;②光盘的读出;③衍射的向量理论;④控制机理;⑤母版制造;⑥在线光学录刻材料;⑦光盘系统的信道编码;⑧应用。

本书可供在计算机技术、信息工程、光盘系统等领域里工作的工程技术人员使用,也可供有关专业的学生和研究生参考。

Principles of Optical Disc Systems

G. Bouwhuis et al.

Adam Hilger Ltd, 1985

光盘系统原理

〔荷〕G. 布休斯 等著

王江秀 译

国防工业出版社出版、发行

(北京市丰台区西路老庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 8 1/2 225千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷 印数: 00,001—2,000册

ISBN 7-118-00333-6/TP42 定价: 5.25元

译 序

光盘作为一种先进的信息存储工具，已经广泛地应用于各个领域。它的“海量”信息容量，快速存取和易于复制生产的特性是其它信息存储手段所不能比拟的。我们翻译出版《光盘系统原理》一书，目的是把光盘系统的物理原理和技术基础介绍给广大读者。

全书共分八章。第一章简要地介绍了光盘系统的原理和发展历史；第二章用了较长的篇幅来叙述光盘的读出原理及其数学模型，并对信号质量和光学误差信号进行了讨论；第三章着重介绍了衍射的向量理论，并与衍射问题的标量处理作了比较；第四章阐述了控制系统的原理，介绍了机电设计的方法，给出了有指导意义的实际伺服系统的设计实例；第五章介绍了母版制造技术及其光化学过程；第六章讨论直接录刻系统和有关材料的特性，简要地介绍了正在开发中的各种光学 DRAW 效应和 DRAW 光盘；第七章叙述了光盘系统中采用的各种代码，介绍了数字光盘系统的误差纠正方案；第八章介绍了光盘系统的应用以及一些已成为商品的系统的实例。

本书主要由六位作者合著，他们在飞利浦研究实验室从事光盘系统研制工作达十年之久，有着宝贵的实践经验。他们都在各自的专业方面作了叙述，读者可以根据自己的需要和兴趣，从不同的角度来阅读。

本书不但对从事计算机技术、信息工程和光盘系统工作的工程技术人员有所裨益，而且对于有关专业的大专院校师生也具有一定的参考价值。

本书由孙志超校对，周兴文、王伟珠同志为本书做了许多工作，深圳市科委主任叶华明对本书的出版给予了支持，在此表示感谢。

由于水平有限，翻译过程中错误在所难免，望广大读者给予批评指正。

一九八七年于深圳

目 录

第一章 绪言	7
第二章 光盘的读出	7
2.1 引言	7
2.2 扫描显微镜	8
2.3 光盘读出的数学模型	23
2.4 信号质量	48
2.5 光学误差信号	69
2.6 光学读出系统	80
参考文献	85
第三章 衍射的向量理论	87
3.1 引言	87
3.2 数学分析	89
3.3 结果	97
参考文献	122
第四章 控制机理	123
4.1 引言	123
4.2 历史	124
4.3 误差种类	126
4.4 降低误差	132
4.5 控制理论	133
4.6 执行机构	141
4.7 误差降低的极限	168
4.8 滑架	173
4.9 摆动	179
参考文献	184
第五章 母版制造	185
5.1 引言	185
5.2 母版制造工艺	186

5.3 压制	201
5.4 非常规母版制造	203
参考文献	206
第六章 在线光学录刻材料	207
6.1 引言	207
6.2 与系统要求有关的DRAW材料特性	208
6.3 光学DRAW盘	210
6.4 光学DRAW效应	212
参考文献	222
第七章 光盘系统的信道编码	225
7.1 PAL和NTSC激光视盘的编码格式	225
7.2 激光唱片数字音响系统	234
参考文献	252
第八章 应用	254
8.1 引言	254
8.2 LV激光视盘系统	255
8.3 激光放象机的专业应用	256
8.4 CD数字音响系统	257
8.5 CD系统的专业应用	258
8.6 一次写入系统	259
8.7 一次写入系统的应用	262
参考文献	264

第一章 绪 言

G Bouwhuis

过去的十年中光盘已经应用于各个方面，刻有数码音响节目的直径为 12cm 的小光盘正在迅速地进入消费市场，较大的视频信息光盘可用于家庭娱乐和教育。高信息容量并易于复制生产使得光盘适合于这些方面的应用。在数据存储方面，光学直接录制系统作为计算机的外围设备正在普及。

读出时扁平光盘的简单扫描便于快速随机存取，这是数据存储的重要特征。光盘的另一个优点是：由于采用了现有的电磁波光谱范围内辐射的简单聚焦方法，读出头和信息层之间没有物理接触，信息面上覆盖着透明的膜片以防止精细部分遭到损坏，避免遮阴物质。

和普通的唱机一样，信息存储在叫做纹迹的螺旋线里。大多数情况下虽然既没有槽也没有连续的线，只有斑点形成的螺旋形虚线（图1.1）。这些斑点的面积很小，相对其周围的镜面显示出光学反差，例如表面上的黑色线形元或者长椭圆形压痕（坑点）。这就使得反射光沿着纹迹随斑点变化。取代唱机中机械唱针的光学唱头将反射光的变化转换成电信号。唱头的透镜将激光束聚焦成很小的光点射在纹迹上，并把从光盘上反射回来的光传送给光电探测器。这样，光信号就沿着旋转光盘上的纹迹按斑点随时间变化。

采用类似于中倍率扫描显微镜的光学装置可以获得高信息密度。在焦点处，由光的衍射限制的最小光斑直径大约为 $\lambda/2NA$ ，这里 λ 是波长， NA 是被聚焦光束的数值孔径。所以信息密度大约为 $(NA/\lambda)^2$ ，相当于每个光盘 $10^9 \sim 10^{11}$ 比特，也就是说本书[●]的全部内容可存储在视盘上 25 个纹迹内，占据 40 μ m 宽的圆环。

●指英文版原书。——译者

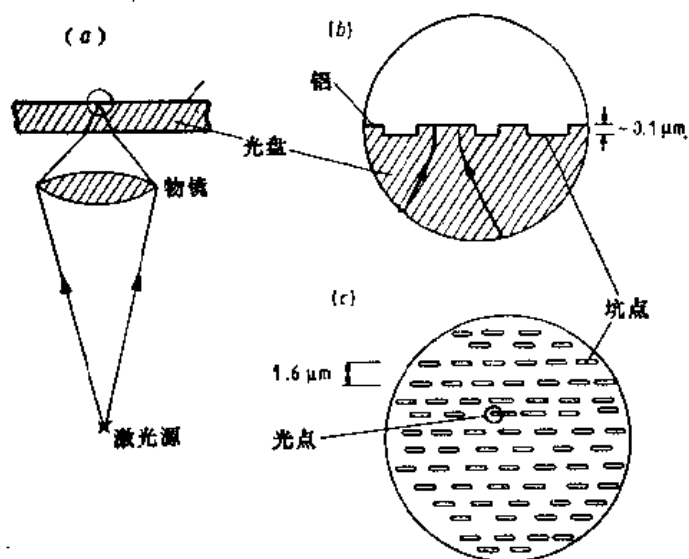


图1.1 光盘和读出光点

- (a) 光点聚焦在另一侧的反射面上；(b) 表面上的坑点；
 (c) 坑点形成纹斑，光点的半宽略大于坑点的宽度。

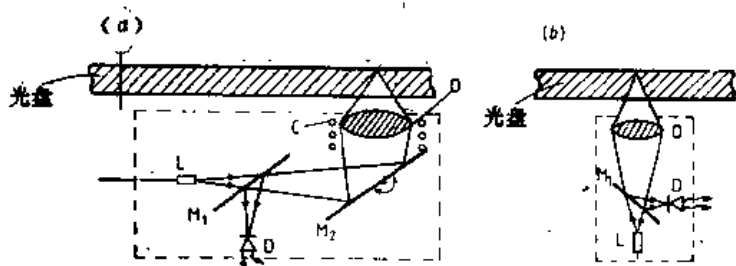


图1.2 放送机基本光学原理

(a) 激光器发出的激光束 L 通过倾斜镜 M_2 由物镜 O 聚焦。物镜装在一个扬声器用的线圈 C 上，这样可保持光点在信息面上聚焦。返回的光束由半透镜 M_1 反射到光电探测器 D 上。整个装置可在光盘下作径向滑动。

(b) 无倾斜镜的小型化结构 (光针)，整个光针可以跟踪小而高频的纹迹位移。

图 1.2 表示读出头的基本光学元件。激光器（半导体）通过一个显微镜物镜穿过衬底在光盘背面成象。由同一块物镜聚集起来的反射光被送到光电探测器。图 1.2(a) 中用一块倾斜的镜子来校正光点相对于纹迹的径向偏差使之小于物镜的视场。为了对整张光盘进行扫描，整个装置都安装在一个滑架上。图 1.2(b) 中，小型化的装置也必须跟踪小而变化迅速的径向寻迹误差。当然，径向和轴向寻迹伺服控制回路需要误差信号，也就是说一般情况下光电探测器前面需要加入一个辅助光学元件，并且光电探测器必须是复合型的。

选用调制的反射光而不是透射光有几个理由。首先，反射式光盘在一侧进行光学处理可以简化放送机的结构。其次，信息面只需一面有保护层，而透射式二面都需保护层，因为在一般凹凸信息结构情况下不得损失光学反差，这就给光盘生产提出了一些问题。再其次，反射式的凹凸结构必须有一个 $4n$ ($\approx \times 6$) 的表层因子，这有助于大批量压制。最后，反射式比透射式本来就具有较多的简单而可行的聚焦控制方法。

由于光强反射系数的变化、反射光相位的变化(凹凸结构)或者偏振态的变化造成了斑点反差特征。因为采用压制的方法进行视盘和唱盘大批量生产最容易，所以选择凹凸结构是必然的。因此光盘表面包含着凹痕和凸面（见图 1.1）。如果光点射在凹痕上反射光的相位发生变化，光点的一部分发生散射而偏出返回光束，并减弱了光信号。光信号的变化包含着恢复声频、视频或数据信号的信息。声频信号以数字方式存储在光盘上。以 44.1kHz 的速率对声音进行采样，每个声道的每一个样本的电平被转换成以二进制 16 位代码字表示的数值。加上附加位以后，按调制和纠错码纠正的要求重新整理，一个 4.3218MHz 的二进制字串被存储在光盘上。低光信号电平表示“0”，高电平表示“1”，纹迹包括凹痕和离散间距的平面。为了得到 1h 的播放时间，读出时从凹痕到平面的跃迁必须限制在 $0.3\mu\text{m}$ 宽的窗口内。另一方面，因为数字存储要求的带宽太高，所以视频信号以模拟的形式存储。复

合的视频信号（亮度和色度）在 7.5MHz 的载波上调频（FM）。声频以占空因数调制加上。这就使得凹痕中心间距离随调频频率和凹痕长度对平面长度之比值而变化，平面的长度随声音的内容而变化。

尽管光学原理为人熟知已有一个世纪多了，只是 70 年代以来，光盘的应用才得到广阔的发展。在数据存储方面除了位密度外，位速率是个重要的量。激光问世以前，没有一个合适的光源可以在 $1\mu\text{s}$ 内从照明面积为 $1\mu\text{m}^2$ 的光电探测器上得到满意的信噪比。现在有许多激光器可以利用，其中小型半导体激光器最适用于光盘读出；它的功率足以有效地以兆赫频率在金属层上烧孔。比较现代的发展包括简单而便宜的硅光电探测器以及用于母版实时生产的电光和声光调制器。现在已经研制出长寿命高效率的家用录刻材料。可擦除材料的改进已被列入许多现代的研究计划。

本书的目的在于介绍光盘构造的物理原理和工程原理。许多学科有着重要的作用，光学、电子学、机械、化学等方面的科学家和工程师的合作是必不可少的。本书的作者都从事过这项工作，也都在自己的专业方面作了叙述。所以读者可以从不同的着眼点来学习本书，并且进一步理解不同研究分枝间的联系。

虽然本书注意了物理学在光盘系统中的应用，但一些作者用较大的篇幅来处理广泛有兴趣的基础知识。

实际发生的不理想情况决定了相对于价格的系统性能极限，所以较多地注意了光盘的变形、光盘的缺陷，例如脱落、翘曲和偏心旋转。

第二章涉及到光学方面，仅考虑一个光点（清晰点）用于信息传输的情况，而一个较好设计的透镜可以承载 10^4 通道。然而，可利用的光功率限制了通道的数目，并且，电子工程师的首要工作是产生一个时间序列数据串。

使系统接近基本极限的决定性因素是光点的质量，因此对于特定的光盘结构讨论扫描光束相互作用时尤其要注意衍射理论。对于相位结构沿纹迹调幅需要不同的检查模式，除主信号外，还

得考虑聚焦和寻迹控制所需要的误差信号的产生。

虽然对于几何尺寸大于辐射波波长的物体来说衍射处理采取的近似方法是完全足够的,但对于尺寸小到 $0.6\mu\text{m}$ 的光盘的微小压痕来讲需采用不同的近似方法。在第三章中,标量处理和精确的矢量计算相比较,可以看到标量近似中误差可达到15%。

为了正常地录刻和读出信息,聚焦和寻迹系统必须满足附加条件。第四章介绍控制回路的机电理论。传动机构设计中的充足经验具有较大价值。自飞利浦开始开发该项目起作者就参加了光盘伺服系统的工作,那时已经研制出许多形式的传动机构,给出了指导性的实际伺服系统的例子。

下一章介绍只读存储器情况下母版上的信息转换。视频和音频节目的母版质量必须优于在放送机上的质量,这样由于母版引起的信号衰落的影响可以忽略。这就需要多学科的高水平工程设计,其中包括精密机械和光化学。

第六章讨论直接录刻。录刻是这样进行的,通过旋转光盘上聚焦光点的功率调制局部地改变薄膜的反射率。加热情况下光学特性,例如反射率、发生变化的介质对于大量数据的现场存储是很重要的,即使存储数年后,对于误差概率的要求仍然是极高的。

作为电子信号的通道,光盘的特点不同于磁的或者其它常用的介质,尤其在噪声和故障方面。带有误差校正的调制和编码系统的研究导致了用于模拟视盘、数字式唱盘和直接数据存储在的奇异格式。第七章解释录刻中适用的光学通道和材料特性,着重介绍老化信号情况下数据的恢复。采用全息存储的方法可以防止由于存储介质变质而引起的信息破坏,在光学上这是众所周知的。不管数字光盘系统的误差校正方案是如何地强健和精致,毫无疑问光学工程师仍然认为全息光盘是可取的。

最后一章给出了市售系统和专用系统的设计实例。

自从Compaan和Kramer (1973)关于光盘理论和应用的文章公开发表以来,Korpel (1980)发表了各个公司在这方面研究

发展的历史背景和一般评述。许多光盘方面的文章继续在发表,大部分是关于直接录刻材料和可擦除的材料。然而,本学科的主要观点是基本的,并且技术也已经稳定,完全值得编一本关于光盘的教科书。该学科有着美好的前景。

参 考 文 献

- Compaan K and Kramer P 1973 The Philips 'VLP' system *Philips Tech. Rev.* 33 178-80
Korpel A 1980 Laser applications: video disc in *Laser Applications* Vol. 4 71-123 (New York: Academic)

第二章 光盘的读出

J Braat

2.1 引言

已经广泛应用的也就是本章所要讨论的光盘系统都基于压制盘（视盘和唱盘）上凹凸纹迹的读出或者基于幅值形式的读出，也即数字盘上的烧孔（Bouwhuis 和 Braat, 1978和1983）。信息以沿着螺旋纹迹的一系列压痕或烧孔的形式储存。用一个小光点对纹迹扫描，光学读出系统将产生检测信号，该信号是原先刻制在光盘上的信号的真实再现。

显然，将表面高度起伏的形状转换成检测器上光强的变化基本上是一个非线性过程，甚至烧孔形式的反射率变化也不是线性地转换成检测器上的光强变化。光学读出时从光的幅值到光的强度，最终转换成检测器电流，不可避免地会引入平方运算。

根据线性系统的概念，可以确定一个光学系统的频率响应。所考虑的频率是空间频率（单位 mm^{-1} ），并以一维光栅结构表示。当光栅通过一个光学系统成像时，它的调制深度的损失表示了该空间频率的频率响应。为了应用较复杂物体成像的线性叠加原理，物光栅必须被弱调制（小信号近似）。

确定光盘系统的某种频率响应（或传递函数）也是可能的。由于光盘上的强调制，信号的畸变是不可忽略的，那就是为什么信号的完整描述应包括象数码盘的码间干扰和视盘的相互调制一类的科目。进而，由于纹迹的稠密分布必须对很可能发生的交叉影响进行处理。

本章下面三节将和信噪比计算及非理想光学系统一起讨论频率响应和信号质量。第5节将讨论如何通过聚焦和伺服系统的帮助来维持最佳读出条件，伺服系统由光学误差信号来驱动。第6节主要介绍一个光学读出系统的实例（光学传感器）。

2.2 扫描显微镜

光盘系统中采用的光学读出方法是扫描显微镜(图2.1(a))。就其最简单形式来说,一个点光源 P 通过物镜 O_s 在运动物体 M 上成象。通过物体衍射的光部分地被检测器 D 接收。很早人们就认识到这种装置非常类似于经典的显微镜(图2.1(b))。Welford (1960)指出经典显微镜象平面上空间光强分布类似于用扫描显微镜对同样物体扫描时得到的随时间变化的检测器信号。为了明了起见,这两种显微镜都以透射方式工作来表示,但它们都可以等地用在反射情况下。

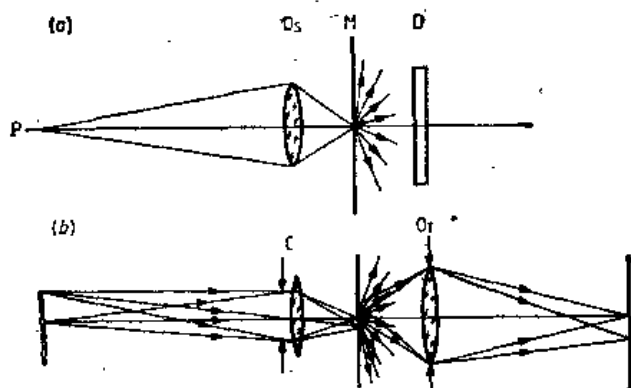


图2.1 扫描显微镜(a)和经典显微镜(b)的原理图

经典显微镜和扫描显微镜的相似之处涉及到扫描物镜 O_s 和成像物镜 O_r 的作用,其次涉及到扫描显微镜检测器 D 和经典显微镜聚光镜 C 的作用。由经典显微镜成像系统理论(Zernike, 1938)可知,只有聚光镜的数值孔径决定了物理照度的相关性,并且聚光镜无需精确调准。然而为了得到最高的分辨力物镜 O_r 必须精确调准并聚焦在物体上。在2.2.1节中可以看到,就检测器 D 和扫描物镜 O_s 而论扫描显微镜采用了类似的推理。

2.2.1 扫描显微镜的频率响应

光栅和它的衍射级 为了研究光学系统的频率响应, 我们用具有确定空间频率 f_v 的弱调幅图形 (光栅) 作为输入。 f_v 是光栅周期的倒数:

$$f_v = \frac{1}{p}$$

光栅的光强传播函数 $I(u)$ 为:

$$I(u) = a [1 + m \cos(2\pi u/p)] \quad (m \ll 1) \quad (2.1)$$

幅值传播函数为:

$$A(u) = \sqrt{I(u)} \approx \sqrt{a} \left[1 + \frac{1}{2} m \cos(2\pi u/p) \right] \quad (2.2)$$

一个平面波入射到光栅上 (角度 α_0) 将被分裂成一个强的 0 级平面波和二个弱的 1 级平面波, 它们的方向由光栅定律得到 (图 2.2):

$$\sin \alpha_N - \sin \alpha_0 = N\lambda/p \quad (N = -1, 0, +1) \quad (2.3)$$

式中 λ 是光的波长。

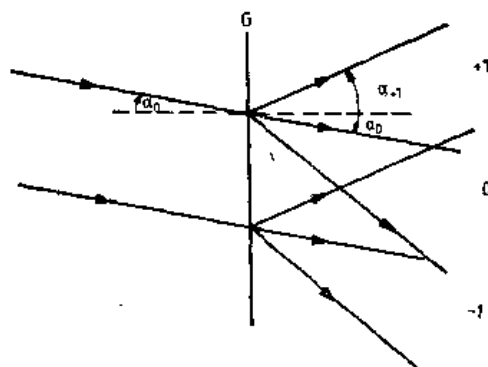


图 2.2 通过光栅 G 的平面波衍射 (标记 0), 通过光栅产生的两个衍射级 (+1 和 -1)

衍射级的幅值和相位取决于光栅的几何参数和位置。图 2.3 表示了光栅和它的衍射级, 并在确定的参考点 R 上测量衍射级的相位 (为了简化起见考虑垂直入射)。衍射级的波阵面用 W_v

W_{-1} 和 W_{+1} 表示。如果参考点 R 在光栅的对称位置上, 波阵面 W_{-1} 和 W_{+1} 一定具有相同的相位。光栅的位移 (或者参考点 R 的位移) 影响了波阵面 W_{-1} 和 W_{+1} 的相位, 但不影响 0 级波阵面 W_0 的相位。在图 2.3 中 +1 级附加光程等于 $+\Delta d$, -1 级为 $-\Delta d$ 。由图可以看到:

$$\Delta d = u_0 \sin \alpha = u_0 \lambda / p \quad (2.4)$$

式中 $u_0 = RR'$ 是光栅的位移。

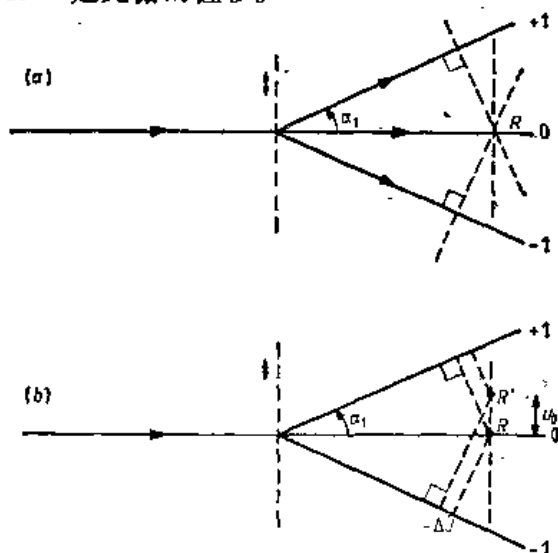


图2.3 由于光栅位移 u_0 , (a)、(b)为1级衍射相对于0级衍射的相位变化

级间的相位变化等于:

$$\Delta \phi = \pm 2\pi \Delta d / \lambda = \pm 2\pi u_0 / p \quad (2.5)$$

一般来讲, 对于 N 级衍射我们有:

$$\Delta \phi_N = 2\pi N u_0 / p \quad (2.6)$$

我们注意到光栅的位置影响了衍射级的相位但不影响它们的幅值。相位的变化是通过干涉实验光学地检测到的。恒定的 0 级与相位偏移的 1 级衍射之间的干涉产生了光栅位置的信息。

衍射级的干涉 扫描显微镜中球面波被聚焦在测试光栅上。我们将球面波分解成一组不同入射角的平面波 (平面波的角谱

(Goodman, 1968))。通过光栅的衍射光由三个球面波组成, 参考图 2.4, 并且它们部分地互相重叠。

下面的假设是很有用的, 假设光投射在一个曲率为 R_0 的中空球面屏幕上, 光栅位于球心。如果在该屏幕上从光轴起测得高度 h , h 被 R_0 除得到一个量:

$$x = h / R_0 = \sin \alpha \quad (2.7)$$

由式 (2.3) 表示的光栅定律与入射角的正弦成线性关系 (角度为球面波边缘射线和中心射线的夹角, 它的正弦通常叫做波的数值孔径 (NA), 该数值通常为显微镜物镜的特征值)。

如果我们相对于入射球面波的数值孔径 $NA = \sin \alpha$, 将 x 归一化, 可以得到:

$$x' = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} = \frac{h / R_0}{NA} \quad (2.8)$$

以该坐标 x' 和对应的坐标 y' 来表示, 充满单位圆的 0 级和其它衍射级单位圆只偏移一个距离 $\Delta x'$, 由下式给出:

$$\Delta x' = \frac{\lambda / p}{NA} = \frac{\lambda f_{sp}}{NA} \quad (2.9)$$

扫描显微镜的检测器 D 也可用以坐标 (x', y') 表示的范围来描述。反射式扫描显微镜中的检测器范围通常也等于单位圆。

产生光栅位置信息的范围也就是 0 级和 1 级相互干涉和重叠的范围。式 (2.6) 叙述了 0 级和较高级之间的相位差线性地随光栅位置 u 变化。当光栅以速度 s 线性移动时, 我们得到:

$$\Delta \phi_0 = 2\pi N s t / p = 2\pi N v t \quad (2.10)$$

式中 v 是时间频率, 等于 s / p 。

相位差为 $\Delta \phi_{+1}$ 和 $\Delta \phi_{-1}$ 的三个衍射级 A_0 , A_{+1} 和 A_{-1} 的混合得到一个与时间有关的强度函数 $I(t)$ 。如果 $\Delta \phi_{+1} = -\Delta \phi_{-1}$, 并且 $A_{-1} = A_{+1}$, 我们得到:

$$\begin{aligned} I(t) &= |A_0 + A_{+1} \exp(i\Delta \phi_{+1}) + A_{-1} \exp(-i\Delta \phi_{+1})|^2 \\ &= A_0^2 + 4A_0 A_{+1} \cos(\Delta \phi_{+1}) + 2A_{+1}^2 + 2A_{-1}^2 \cos(2\Delta \phi_{+1}) \\ &\approx A_0^2 \left(1 + \frac{4A_{+1}}{A_0} \cos(2\pi v t) \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$