

20级数字光偏折器的设计和性能

本文给出由一系列硝基苯克尔盒和双折射冰洲石棱镜组成的20级数字光束偏折器的光学设计依据和实验结果。激光束被偏折成 1024×1024 位置的二维画面和 500KHz 的偏折速率。偏折器本身的透过率对绿色激光为79%。还给出有关背景光和分辨率以及用字母数字和图表表示的显示器例子的资料。

一、前言

我们继续前已报导了的在偏折器方面的工作^(1, 2)，现在已完成20级偏折器，它是能分辨 1024×1024 光束位置的二维器件。本文中我们描述了考虑到一定工作条件下这个系统的一些光学设计依据。第二部分中我们给出实验室模型的实验资料。

一般说来，偏折的分辨率和速率是一个偏折系统的两个最重要参数，这一点已有许多作者指出（例如见参考3）。因此当设计数字偏折系统时，要力求这些参数为极大，这一点，乍然看来，似乎是合理的。实现这些的设计程序已在一些文章中描述了^(4, 5)。但更进一步的审查指出，这些程序常常并不是最好的。数字偏折器的调制结构允许我们在宽范围内去改变设计参数，以更适于某一种特殊应用。下面的针对某些特殊应用的设计考虑证明了这一点。那里它希望达到最大的分辨率，但偏折速率仅仅对偏折器的小区域内是最大的，就是说，在这些区域之间开关激光束的偏折速率是受限制的。这一特殊应用是字母数字和图表的显示器，在那里这种限制是完全可容许的。这里，激光束写一个符号，通常在移动到另一远离位置上之前扫描紧密排在一起的许多位置。在扫描近处位置时常常是由小劈裂角的偏折级来完成的。在光束位置的这一部分内要求有最大的偏折速率，偏折器仅仅对这些级要求有最大的偏

折速率。在另一文章中我们已指出，如人们要设计这样的偏折系统使对最后偏折级使用最小驱动电压，也恰好得到这个结果⁽⁵⁾。这里，该分析适用于直接联接的各个偏折级。本文中我们表明当把一个扩束透镜系统插入偏折系统的第一和第二部分之间可得到怎么样的改进。

二、20级偏折器的设计：

我们从以前文章中重述对分析所需要的一些系统参数：

d_0 = 在 $1/e^2$ 强度点的被偏折的准直激光束直径，

d = 偏折器的孔径宽度（各自电极间隔），

λ_0 = 激光束的真空波长，

n = 光学介质的折射率，

ϵ = 激光束在无穷远处衍射极限发散角，

Φ_i = 第 i 级光束图的最大角，在这里 $\Phi_1 = 0$ 和 Φ_2 = 最小的偏折角，

U = 加在克尔盒上的电压，

m = 激光束偏振平面旋转 90° 数的整数，

l = 克尔盒的长度，

B = 克尔常数。

使用下列二方程式：

$$\Phi_2 = \epsilon/2 = 2\lambda_0 / (\pi n \cdot d_0) \quad (1)$$

$$U = \sqrt{m[d / (2lB)]^{1/2}} \quad (2)$$

我们现在把偏折器进行最佳化使最后一

级有最小驱动电压，先考虑 N_2 级的一维偏折器。让我们在 N_1 级的第一组和 $(N_2 - N_1)$ 级的第二组之间放置一远心透镜系统 (图 1)，该系统允许我们改变初始激光束直径 d_0 和偏折角 Φ_0 为新的数值 d'_0 和 Φ'_0 ：

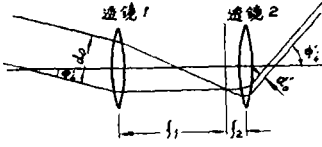


图 1 远心透镜系统符号的定义。

$$d_0/d'_0 = \Phi'_0/\Phi_0 = f_1/f_2 \quad (3)$$

此处 Φ_i 是 $i-1$ 级和 i 级间光束图的最大角， f_j 是第 j 个透镜的焦距。

此外，我们放置该透镜系统使 N_1 级的孔径成像到偏折器的最后 N_2 级上〔见附录〕。当所有其它参数保持常数时，它保持电极间隔 d_{N_2} 和该级的孔径尽可能的小。

在这些假定下：

$$d_{N_1} = \frac{f_2}{f_1} \left(d_0 + \sum_{i=1}^{N_1} \Phi_i l_i \right) + \sum_{i=N_1+1}^{N_2} (\Phi_i - \Phi_{N_2+1}) l_i \quad (4)$$

对于等光束距离的器件，可应用方程式

(1) 使此式变为：

$$d_{N_2} = \frac{f_2}{f_1} d_0 + \frac{f_2}{f_1} \frac{2\lambda_0}{\pi n d_0} \sum_{i=1}^{N_1} (2^{i-1} - 1) l_i + \frac{f_1}{f_2} \frac{2\lambda_0}{\pi n d_0} \sum_{i=N_1+1}^{N_2} (2^{i-1} - 2^{N_1}) l_i \quad (5)$$

将方程式(5)对 d_0 微分，为最小的电极间隔和相应于最小的驱动电压得到最佳的激光束直径：

$$d_{0,最佳} = \left[\frac{2\lambda_0}{\pi n} \sum_{i=1}^{N_1} l_i (2^{i-1} - 1) + \frac{2\lambda_0}{\pi n} \sum_{i=N_1+1}^{N_2} l_i (2^{i-1} - 2^{N_1}) \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

将此式代入方程式 (5)，我们得到在第

一和末级孔径间的一般关系：

$$d_{N_2} = 2(f_2/f_1) \cdot d_{0,最佳} \quad (7)$$

现在我们推广考虑到二维偏折器。除偏折的激光束垂直于电极 (d 级) 的 N_2 级外，我们添加平行于它们 (h 级) 的 M_2 级。假定 d 和 h 的顺序是任意的。以上的最佳化仍是有效并得下面结果：

$$d_{0,最佳} = \left[\frac{2\lambda_0}{\pi n} \sum_{i,K=j^*,1}^{N_1, N_1+M_1} l_{i,K} (2^{i-1} - 1) + \frac{2\lambda_0}{\pi n} \sum_{i,K=j^*,1}^{N_2, N_2+M_2} l_{i,K} (2^{i-1} - 2^{N_1}) \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8a)$$

$$h_{0,最佳} = \left[\frac{2\lambda_0}{\pi n} \sum_{j,K=j^*,1}^{M_1, N_1+M_1} l_{j,K} (2^{j-1} - 1) + \frac{2\lambda_0}{\pi n} \sum_{j,K=j^*,1}^{M_2, N_2+M_2} l_{j,K} (2^{j-1} - 2^{M_1}) \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8b)$$

$$\text{并得 } d_{N_2, N_2+M_2} = 2(f_2/f_1) \cdot d_{0,最佳} \quad (9a)$$

$$\text{和 } h_{N_2, N_2+M_2} = 2(f_2/f_1) \cdot h_{0,最佳} \quad (9b)$$

此处第二个注脚表示级数 1, ..., $N_2 + M_2$ 与级的型式 (d 或 h 型) 无关。相反，第一个注脚按计算 d 或 h 值来给出 d 或 h 的级数； $i(j)$ 常常表示位于最靠近 K 级的 $d(h)$ 级，而 $i, j \leq K$ 。

显然，一般说来 $h_{0,最佳} \neq d_{0,最佳}$ ，因为各 d 级间的间隔可能有变化，而且和 h 的间隔也可能不相同。

因此，在两偏折平面上都最佳化的偏折器会得到一个椭圆光束直径，它仅仅在交棒串联 d 和 h 级的情况下接近为圆光束。

我们现在将这些方程式用来设计一个偏折系统并限定一些参数如下：

1. 偏折器的分辨率是 1024×1024 的光束位置；即 $N_2 = M_2 = 10$ 。

2. 我们假定各个级的长度相等 $l_{i,j} =$

$l_0 = 16\text{mm}$.

3. 我们放置远心透镜系统在第十级偏折级的后面, 这样带来二个偏折盒有等长度的工艺优点,

4. 我们为了进一步简化, 使激光为圆光束, 因此减少了最佳化程序, 它仅仅或是 d_0 或是 h_0 的最佳化。我们选择最佳的 d_0 , 是为了获得最小的驱动电压。现在立刻明白, 这将要求所有 h 级都放在 d 级的前面。因为这将导致电极高度得到难以实用的尺寸, 我们折衷地取下面的级数次序: 5 个 h 级, 5 个 d 级, 三个 h 级, 三个 d 级, 一个 h 级, 一个 d 级, 一个 h 级, 一个 d 级。 h 和 d 级的次序是按光束方向上劈裂角增加来排列。这样选择同时确保了先头的十级位于远心系统的前面, 它们将是快速的级, 使光束偏折成为 32×32 见方的相邻光束位置, 如在前言中所阐明的那样, 这满足字母数字和图表显示器的快速要求。

从上述在方程式 (8a) 和 (9a) 中一些参数的定义, 可得到 d_0 , 最佳, $d_{10,20}$ 和 f_2/f_1 之间的关系:

$$d_{10,20} = [4bd_0^2 / (d_0^2 - a)]^{1/2} \quad (10)$$

$$f_2/f_1 = d_{10,20} / (2 \cdot d_0) \quad (11)$$

$$\text{而 } a = (52/\pi)(\lambda_0 l_0/n) \text{ 和 } b = (3072/\pi)(\lambda_0 l_0/n).$$

$h_{10,20}$ 的最佳值按方程式 (5) 计算:

$$h_{10,20} = (f_2/f_1)d_0 + a'(f_2/f_1) / (1/d_0 + b'(f_1/f_2)(1/d_0)) \quad (12)$$

而 $a' = (362/\pi)(\lambda_0 l_0/n)$ 和 $b' = (5952/\pi)(\lambda_0 l_0/n)$ 对 $\lambda_0 = 647[\text{nm}]$ 和 $n = 1.55$ (硝基苯) 方程式 (10) 用 f_2/f_1 和 $h_{10,20}$ 作为参数以图表形式示于图 (2) 中。

为了证明远心透镜系统的影响, 我们首先对上述级结构的 20 级偏折器给出数值 (它在 10 级和 11 级之间是直接联结) 如下:

$$d_0 \text{ 最佳} = 2.95\text{mm}; \quad d_{10,20} = 5.9\text{mm};$$

$$h_{10,20} = 8.4\text{mm}.$$

观察图 2, 我们看出, 使用了远心透镜 (在 $f_2/f = 1-3$ 范围) 后, 在没有可观地

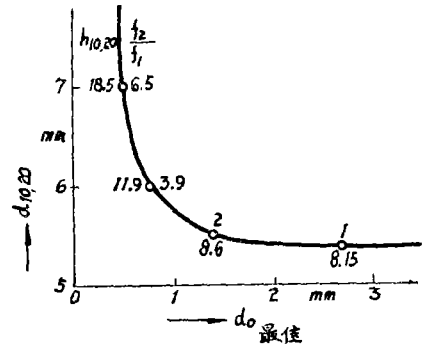


图 2 假定 $h_0 = d_0$ 最佳, 计算 d_0 , 最佳, $d_{10,20}$, 和 f_2/f_1 ; $h_{10,20}$ 间的最佳关系。

增大 $d_{10,20}$ 下, d_0 , 最佳, 因而入射孔径有猛烈减小的可能。如前言中所述, 我们有兴趣于先头级的高偏折速率; 这就是, 在这些级中得到小的电极间隔即得到小的 d_0 值。由此在图 2 中选择 $f_2/f_1 = 2$ 作为我们的工作点, 它与以上值相比, 给了我们许多的改进: $f_2/f_1 = 2$; d_0 , 最佳 = 1.4mm; $d_{10,20} = 5.5\text{mm}$; $h_{10,20} = 8.6\text{mm}$ 。

三、实验结果:

A. 光学装置:

图 3 表示 20 级系统及其尺寸的原理性装置。相干光源是氦离子激光, 它允许选择各种波长。激光发生器随后为偏振器, 第一偏折盒。联结光学, 第二偏折盒并跟着二个投象物镜, 它用来变换激光束的方向图形为银幕上的等距点的图形; 克尔盒和偏振滤波器

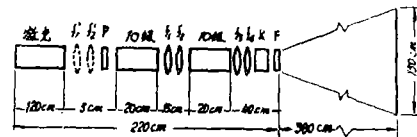


图 3 20 级偏折系统的光学装置: p , 偏振器; $f_1(40\text{mm}) + f_2(80\text{mm})$, 远心光学; $f_3(90\text{mm}) + f_4(35\text{mm})$ 投象光学; K , 克尔盒; F , 偏振滤波器; $f'_1 + f'_2$ 调节透镜组。

直接放在物镜的后面，用来消除第一阶的串音⁽²⁾。透镜 f_1, f_2 是要求用来调整光束直径到 d_0 最佳；用在我们试验中的氦激光束直径为 1.4mm，使这组透镜就不需要了。

二偏折盒的数据列于表 I 中，由于工艺上的理由导致设计电极间隔是相等的。

B. 性能数据：

二盒一起的光学透过率对绿光(520.8nm)并扣去四个涂膜窗口损失而言为79%。(偏折器可工作在整个可见波段上，多色显示器系统和相应的一些问题在下文叙述)。由于透镜和窗口没有涂膜，系统的总透过率为40%。

投影了含有一些字母数字和图表组成的典型显示器的例子，对其背景光进行了测量。总的背景光对信号光的比率为0.25；滤波装置(克尔盒和滤波器)滤到0.033。这样我们在投影屏上有3.3%的背景光。但这些光是不均匀地分布在整个投影屏上的；它们集中在一些不连续的位置上。在滤波装置工作时，这些错误点的最亮度为一个图案点强度的0.3%。

电开关线路在开关运行每秒500000次时功率消耗为400W；开关时间为300—900ns。硝基苯的静态质量是这样的，在电场为35kv/cm时欧姆电阻为 $1.1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

图4(a)论证了投影点图形的分辨率；屏上的强度分布表示为一个典型的点线，此处每一个第二点已被去掉。平均强度起伏小于 $\pm 10\%$ 。图4(b)给出激光束通过没有20

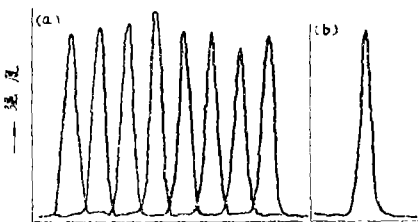


图1 一个显示点的强度分布，此处每一个第二点已去掉(a)，和一个单点，激光束通过了没有20个偏折级的光学装置(b)。

个克尔盒和20个棱镜光学装置的强度分布；光束宽度仅仅比图4(a)中的小1%，它说明该偏折器没有显著地改变激光束的衍射性质。

图5给出显示一些字母数字和图表的一个例子⁽⁶⁾。该图包含显示的画面速率为12.5Hz的40000个点。

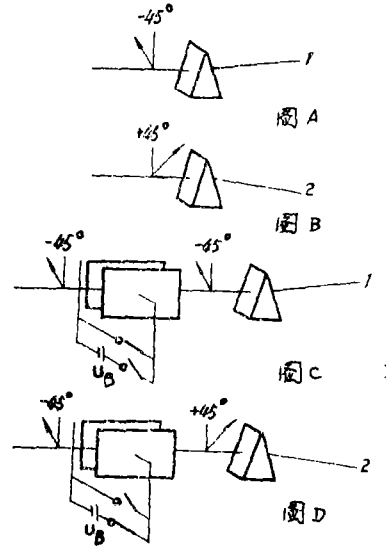


图5 显示的画面速率为12.5Hz含有40000个点的显示器例子。

作者极为感谢 E. Brinkmann, H. F. L. Meyer 和 U. Neumann 在制造20级偏折器中的贡献。

附录：远心转播透镜系统的设计

为了使 N_1 级孔径能在 N_2 级上成实像，远心系统必须满足某些条件：

1. 像的放大倍数常常是常数 $m = f_2/f_1$ ，

2. 容易找出二透镜焦距，物体和第一透镜间的距离 e ，像和第二透镜间的距离 x 间的关系如下：

$$x = (f_2/f_1) [f_1 + f_2 - (f_2/f_1)e]$$

实像仅对 $0 \leq e \leq (f_1/f_2)(f_1 + f_2)$ 得到；决定 x 和 e 是考虑远心系统要尽量短，并且使偏折盒尺寸要求对 x 和 e 为某一定最小值。考虑到 x 和 e 是光学长，它不同于几何长，因为偏折盒充满了硝基苯。我们得到

$f_1 = 4.1\text{cm}$, 和 $f_2 = 8.2\text{cm}$, 对比率 $f_2/f_1 = 2$, 几何长为 $e = 4\text{cm}$ 和 $x = 22\text{cm}$ 。

a. 最后二级棱镜是负的, 使偏折图形有好的温度稳定性。

表I 两偏折盒的数据

级数 n_0	棱镜角度		光学孔径 $d(\text{mm}) \times h(\text{mm})$	电极间隔 (mm)	电压(对 $\lambda = 520.8\text{nm}$)	
	d级	h级			偏压 (kv)	开关(kv)
1		6'	1.4×1.4	1.6	5.3	2.1
2		12'	1.4×1.4	1.6	5.3	2.1
3		24'	1.4×1.4	1.6	5.3	2.1
4		48'	1.4×1.4	1.6	5.3	2.1
5		1°36'	1.4×1.5	1.6	5.3	2.1
6	6'		1.4×1.6	1.6	5.3	2.1
7	12'		1.4×1.7	1.6	5.3	2.1
8	24'		1.4×1.8	1.6	5.3	2.1
9	48'		1.4×1.9	1.6	5.3	2.1
10	1°36'		1.5×2.0	1.6	5.3	2.1
11		1°36'	3.0×4.0	4.5	14	6.5
12		3°11'50"	3.0×4.1	4.5	14	6.5
13		6°22'20"	3.0×4.2	4.5	14	6.5
14	1°36'		3.1×4.6	4.5	14	6.5
15	3°11'50"		3.0×4.9	4.5	14	6.5
16	6°22'20"		3.3×5.3	4.5	14	6.5
17		12°35'15"	3.6×5.6	4.5	14	6.5
18	12°35'15"		4.0×6.4	4.5	14	6.5
19a		-25°11'30"	4.7×7.0	6.0	20	8.8
20a	-25°11'30"		5.5×8.6	6.0	20	8.8

译自«Applied Optics»Vol 11. №8. pp. 1732—1736, 1972.

(季钟霖译 顾去吾校)