

# 激 光 准 直 仪

吴存恺 孔祥林 徐永泉 孙宪政

(上海第二光学仪器厂)

## 提 要

本文介绍了激光准直仪的特性。研究了激光光轴的稳定性,接收靶类型、方位显示器性能及激光强度稳定性对激光准直仪的影响。测试了准直仪的精度。

## 引 言

机械零件的直线性测量,部件的直线性安装,在加工和机械总装时都有各种不同程度的要求,它们的测量精度都依赖于选作参考的直线。

对直线性的测量最原始的方法是拉钢丝法,用钢丝显微镜测量直线性偏差。尽管这种方法很粗糙,但由于它的直观性和简单性,在直线性要求不高的地方仍能应用。

在二十多年前,光学技术广泛地用于准直。光学准直工具给直线性测量提供了很好的仪器。用于光学准直的主要仪器是准直望远镜。光学准直的目的就是相对于一个参考坐标系,在一定的距离下定位一些部件,这些部件一般来说有六个自由度——三个平动自由度和三个转动自由度,光学准直的目的旨在对部件约束这六个自由度。

有两种技术被采用:准线(准直)和自准直。准线的目的在于约束三个平动自由度;自准直在于约束三个转动自由度。前者常采用一准线靶,后者采用一自准直镜。对于准线望远镜,它是把叉丝投射到一个参考靶上,这个靶子的中心与望远镜叉丝的中心所确定的直线即为参考直线,这条参考直线也就是仪器的光轴,经过调焦可沿此直线测量中间靶的偏差,从而确定出中间各点与参考直线的偏差。

用自准直望远镜观察由目标反射回来的叉丝象,由反射回来的叉丝象与望远镜原来叉丝的重合程度来测量角度的偏差。

在实际应用中,总是选择一个轴,例如 $z$ 轴,作为参考轴线。沿 $z$ 轴的位移是长度计量问题,绕 $z$ 轴的转动一般不感兴趣。因此,所关心的是约束与参考轴垂直的平面内两个平动自由度和两个转动自由度。

光学工具对大型工件的测量和安装带来很多好处<sup>[1]</sup>,但仍有许多缺点:

- 1) 至少需要二个人,一个人通过望远镜进行观察,一个人在靶子的位置处定靶位。
- 2) 测量精度与操作者的经验及视觉情况有关。
- 3) 望远镜必须调焦以便定位中间各个靶,这样必然带来调焦误差。
- 4) 在观察者和靶子处的人之间需要有通讯联系。
- 5) 对于长距离的准直很困难,可靠的工作距离一般认为小于30米。

随着工业的发展,要求测量和安装大而精密的部件。万吨轮船的主轴安装和定位、巨型飞机的型架安装、大型发电机中转动机械的安装、重型机床导轨的安装等都提出越来越长的准直距离和越来越高的准直精度。

由于激光特别是气体激光具有优良的单色性、方向性和高强度,因此它是准直仪理想的光源。

工作在 6328 埃的氦氖激光是肉眼可见的单色光,我们很容易发现它。它是一条看得见的直线,不象准直望远镜那样只提供一个在空间不可见的象。因此,用激光准直既有拉钢丝法的直观性和简单性,又有光学准直的精度。好的方向性和高的强度使得激光准直仪能在相当大的距离内有效地工作(获得好的信噪比、高的精度)。激光准直仪是用光电转换把直线性偏差用电量显示出来,因此其读数是客观的,并且这个偏差电量可与自动控制相配合实现自动标准定位。利用激光准直仪,其准直工作可由一个人完成,其精度可提高五倍左右,时间减少三倍<sup>[2~4]</sup>。

### 激光准直仪应满足的技术条件<sup>[2,3]</sup>

#### 激光准直仪中的激光束

激光用于准直时,激光束作为参考轴线。因此准直精度与选作参考的激光束本身的特性密切相关,作为参考轴线的激光束必须有一定特性:

1) 在激光束任意截面上其光强分布应有稳定的中心,并且这些中心的轨迹必须是一直线。激光束截面的强度分布应与有关的中心峰值成对称分布。当激光束截面的波前具有单位相时,即具有高斯分布时<sup>[5]</sup>,就能满足这个条件。

2) 为了获得高的准直精度,希望中心峰值的光强以很快的速度向两边下降。

3) 激光束要有高度的稳定性。

4) 必须同时满足光束直径最小的变化和光束能量最大的集中这两个条件。因此,应根据最大准直距离和准直精度的要求选择合适的望远镜放大倍数。

#### 光束中心的检测

1) 激光束强度分布曲线的形状应使在有效使用范围内,偏离直线轴的位移和输出信号间有近似线性关系。

2) 光束直径的变化会使线性关系发生变化,因此在放大器中需有增益调整,以补偿这种变化。

3) 在任意的确定位置能够检测系统的灵敏度。

4) 光电接收器元件要准确定位,并应有完全相同的光电特性。一般来说,应加一个平衡电阻来消除此差异。

5) 为了消除大气扰动等无规则信号的影响,可采用确定光束位置的电学平均方法。并且其平均时间应足够长,以便消除空气的短期扰动。

#### 激光准直仪的结构

1) 激光准直仪的结构应当与通常用的光学准直工具标准相一致。并且准直光束与机械轴中心的平移精度应小于  $\pm 0.02$  毫米,角精度在  $\pm 1$  秒以内。

激光束应具有良好的长期稳定性,能经受普通车间中的冲击和振动。而短期稳定性则要

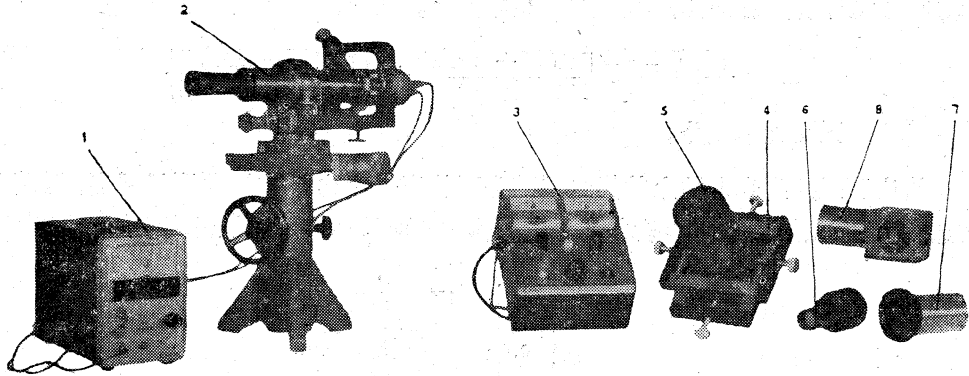


图1 激光准直仪

1—激光电源；2—激光发射装置；3—方位显示器；4—十字托板；5—锥体  
型光电接收靶；6—平面型光电接收靶；7—观察靶；8—五角棱镜

求在加热后其光束位置漂移应小于 1 秒/小时 °C。

2) 激光管应有良好的密封性,以防止灰尘、油滴等的影响。

3) 激光应稳定地以单横模  $TEM_{00}$  振荡,并且其光强应有平滑的强度分布。利用空间滤光片是必要的。

4) 激光输出功率应尽量低,以便减少热效应引起的不稳定性及安全使用。激光功率以一毫瓦左右为宜。

5) 为了消除杂散光的影响,必须采用干涉滤光片。

6) 激光管替换方便。

## 激光准直方法

自从激光广泛用于准直以来,根据使用环境、准直工件及准直精度的要求不同,采用了许多不同的准直方法<sup>[6~11]</sup>。我们采用激光准直的对称方法。

通常的光学准直望远镜的光轴是由不可见的叉丝象连线来定义的,使用激光可以用看得见的光束来定义光轴。工作在  $TEM_{00}$  基横模的激光光束波前中的强度分布近似为高斯分布,可以表示为<sup>[5]</sup>

$$I(x, y) = I_0 \exp[-2(x^2 + y^2)/W^2]$$

式中  $I_0$  是选为坐标原点的光束中心强度(最大强度);  $I(x, y)$  是波前中坐标为  $(x, y)$  的点的强度;参量  $W$  描述光束斑点尺寸,它是其强度降至最大值的  $1/e^2$  时,与中心的径向距离。

若一光电池被分成二象限,分画线中心的坐标为  $x = X$ ,分画线的宽度为  $2\Delta X$ ,那么投射到二象限光电池上的能量差为<sup>[12]</sup>

$$\Delta E = \int_{-\infty}^{X-\Delta X} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \exp\{-2(x^2 + y^2)/W^2\} dy dx - \int_{X+\Delta X}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_0 \exp\{-2(x^2 + y^2)/W^2\} dy dx$$

无限积分极限意味着所有的能量都投射到光电池上。此积分可以表示为

$$\Delta E = \frac{\pi W^2}{4} I_0 \left\{ P \left[ \frac{2(X + \Delta X)}{W} \right] + P \left[ \frac{2(X - \Delta X)}{W} \right] \right\}$$

式中  $P\left(\frac{2X}{W}\right)$  是正交几率积分。

图 2 给出了投射到光电池上的能量差随分画线宽的变化。由图可明显看出, 随着分画线宽的增加, 靠近零点的信号斜率减小, 即灵敏度降低, 而检测器的线性范围增加。

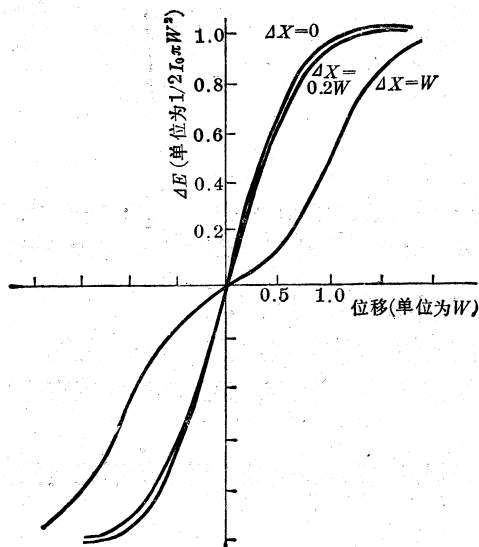


图 2 光电池间隔对输出信号的影响[12]

对于四象限光电池, 设分画线中心坐标为  $x = X$ ,  $y = Y$ , 分画线宽分别为  $2\Delta X$  和  $2\Delta Y$ 。这时, 投射到对角线上一对光电池上的能量差为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_{-\infty}^{\overline{X-\Delta X}} \int_{-\infty}^{\overline{Y-\Delta Y}} I_0 \exp\{-2(x^2 + y^2)/W^2\} dy dx \\ &\quad - \int_{\overline{X+\Delta X}}^{\infty} \int_{\overline{Y+\Delta Y}}^{\infty} I_0 \exp\{-2(x^2 - y^2)/W^2\} dy dx \\ &= \frac{\pi W^2}{4} I_0 \left\{ P \left[ \frac{2(X + \Delta X)}{W} \right] + P \left[ \frac{2(X - \Delta X)}{W} \right] \right. \\ &\quad \left. - P \left[ \frac{2(Y + \Delta Y)}{W} \right] + P \left[ \frac{2(Y - \Delta Y)}{W} \right] \right\} \end{aligned}$$

对于高斯束<sup>[5]</sup>

$$W^2(Z) = W_0^2 [1 + (2Z/kW_0)^2]$$

式中  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $W_0$  为最小束宽度,  $\lambda$  是激光波长。在准直仪中, 激光由半共焦腔的平面镜射出, 并直接投射到望远镜目镜上。因此可认为入射到望远镜中的光束光斑参量为  $W_0$ 。对于高斯束远场传播, 发散角  $\theta = 2/kW_0^2$ 。我们所使用的激光束  $\theta \approx 2 \times 10^{-3}$  弧度, 若取  $\lambda = 0.6$  微米, 可求得  $W_0 \approx 0.1$  毫米。经 10 倍望远镜放大后可得  $W \approx 1$  毫米。由图 2 可知, 在  $x/W \approx 0.5$ , 即  $x = 0.5$  毫米范围内, 可认为是线性的, 并有较高的灵敏度(当  $2\Delta X = 0$  时)。

## 激光准直仪实验结果

在激光准直仪中,最常用的光电接收靶是由四象限检测器和差分直流放大器组成。四象限检测器一般是一块硅光电池,在其上划分为四块。两对光电池的输出端分别馈送到差分放大器的输入端,差分放大器的输出与中心指零直流电流表相连。两个直流电流表的指示分别表示  $X$  和  $Y$  方向的位移。当激光光束中心与四象限检测器的中心相重合时,四块光电池接收相同的能量,因此没有差值信号输出,这时电表指零。当激光束中心与四象限检测器的中心有一位移时,那么在某一光电池上接收的能量大于相对的光电池接收的能量,因而产生差值信号。此差值信号被放大后在电表上显示,表针偏转的方向和大小即表示位移的方向和大小。

不用四象限检测器而采用一四面反射锥体或回旋反射锥体,在其锥体四周相互垂直的位置上配置四块光电池,同样可对激光束中心位置进行检测。我们研究了这两种锥体反射器。反射锥体的顶角为  $90^\circ$ ,在其四角相互垂直的位置上配置四块圆形硅光电池。

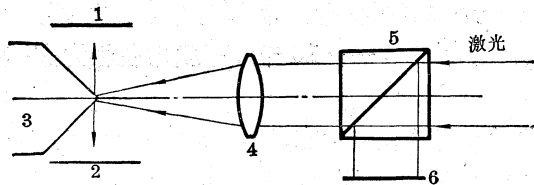


图3 同时检测四个自由度的接收靶配置图

1、2—光电池; 3—锥体反射器; 4—聚光透镜; 5—分束棱镜; 6—四象限检测器

我们对可能影响激光准直精度的各种因素进行了考察,这包括:激光光轴本身的稳定性及影响这种稳定性的原因;接收靶的类型及光敏元件的选择;方位显示器的电特性指标;激光强度稳定性的影响。为了进行这些考察,我们选取了三种不同类型的激光管:一种是用高硅硬质玻璃(GG17玻璃)材料制作的激光管(此种玻璃有低的热膨胀系数),其中毛细管的一端与玻璃外套相连,另一端用一支撑套支撑;一种是用95#软玻璃材料(有较高的热膨胀系数)制作的激光管,其中毛细管一端是悬端;第三种激光管与第二种相同,只是其毛细管用的是石英管。激光管的固定方式选用两种:一种是用带有通风孔的长金属套套在激光管外部(套总长160毫米);另一种是两个金属环(长15毫米)套在激光管两端。

对于接收靶,我们实验了两种型式:一种是用锥体做反射器的锥体靶;另一种是用四象限光电池。对于光敏元件我们实验了硅光电池和硅光电池两种元件并比较了它们的灵敏度。

在实验中,为了消除振动的影响,激光发射装置置于机械车间使用的画线平台上,下边垫有厚的硬橡皮。在接收处,接收靶置于带有配合孔的、能向两个垂直方向移动的托板中。方位显示器电表的指示与带有磁性底座的千分表指示对照,从而测出电表指针的格值。经实验表明:

1) 大气的影晌使激光腔有微小的变形,由于这种变形引起激光轴的变动。如果在置激光管处人为地造成风流,在15米处可观察到0.1毫米至0.2毫米的偏移。在激光管刚开始工作的半小时内,由于激光管尚未与周围环境达到热平衡,因此这一偏移现象更为明显。激光光轴的稳定性和激光管的固定方式很有关系。实验证明,采用后一种固定方式较好。

2) 大气抖动的影晌,在不十分长的准直距离内,一般可用电学平均方法消除或使之显著降低。

3) 硅光电池和硒光电池有相近的灵敏度。

我们对十五个回旋锥体接收靶和平面接收靶(四象限光电池)进行了精度测试。实验表明它们有相近的灵敏度。对于锥体靶,其灵敏度主要决定于反射锥体对激光的反射率、锥尖加工的锐度、光电池的性能及光电池的配置情况(对锥体反射的激光接收系数)。由于这些都能较好地控制(锥体对激光的反射率 $>85\%$ ,锥尖 $<0.1$ 毫米,光电池配对选择、光电池对锥体反射的激光接收系数近似为0.9),所以十五个锥体靶的灵敏度都近于相同。平面靶的灵敏度除与光电池的选择有关外,与四象限光电池的加工情况也有很大关系。由于我们尚不能对其很好的控制,所以其灵敏度的差异较大。我们准备对此做进一步的实验,寻求一种好的加工方法,以使平面靶既有高的灵敏度(比锥体靶灵敏度高),又能有互换性。对三十个四面反射锥体的测试结果表明,它的灵敏度要比回旋反射锥体高一倍以上。

4) 方位显示器放大倍数约30倍,在15米处可得到约0.01毫米的分辨率,并且放大器是积分型的,这样可以大大改善短期稳定性。

5) 不同的光敏元件有不同的匹配电阻值。对于锥体靶,光电池采用反向并联形式,一路串联固定电阻5.1千欧,另一路串联平衡电位器15千欧。对于硒光电池平面靶,采用反向串联形式,串联二个47千欧固定电阻和一个10千欧平衡电位器为宜;硅光电池只用一个10千欧电位器做平衡电阻。

6) 激光电源的稳定性对准直的稳定性有明显影响。因为激光管作为一个振荡源,激光电源的变动被激光管大大地放大而使激光强度有很大的波动。

基于上述考虑,我们选用高硅硬质玻璃制作的激光管,其输出功率约1毫瓦,用两铜环固定激光管。接收靶是锥体反射器,在其四周相互垂直位置处固定四块硒光电池。方位显示器采用放大倍数约30倍的积分型差分放大器。激光电源的电流稳定性在99%左右。此时所得准直精度如下(回旋锥体靶):

准直距离(米)	$<20$	20~45	45~75
准直精度(毫米)	0.05	0.1	0.15

可准直的最大距离约100米,重复精度为0.05毫米,最小分辨率为0.01毫米。实验是在无明显空气流动的情形下进行的。

## 讨 论

激光束本身的直线性与准直精度直接相关。在一般应用激光准直仪时,大气扰动是造成激光束不稳定的主要原因。大气扰动的影响表现在两个方面:一个是大气状态(温度、压力、气流)的变化引起激光器本身发射的光束轴线改变;另一方面是激光束通过大气传播,在传播路径上空气折射指数变化而对激光束产生影响。因此,研究各种大气条件对激光准直的影响是非常重要的,特别是长距离精密准直。

大气湍流的影响可引起光束转向、扩散和闪烁。对于直径约10毫米以下的光束,大气湍流的主要影响是引起光束转向。当光束从一个温度区传播到另一个温度区时,在波前上就附加了一线性位相项,这就稍微改变了光波的行进方向,这个效应等效于在光束中插入光楔,从而将坡印延矢量的方向改变了一个不大的角度。

如果光束较宽,光束中各条光线遇到不同的湍流区,于是光束分裂而扩散开。

当光束直径更大时,或者在远处观察光束时,光束的截面将比温度引起的起伏线度大。这时光束的转向和扩散减小而观察到的主要效应是光束内部的闪烁——能量的重新分布。在没有大气时,光束截面上的强度分布应当是均匀的。只显示出由于发射口径的有限大小所决定的变化。

显然,大气湍流的这些影响都与准直精度有直接的关系。

当距离大于 100 米时,大气的热扰动是精密确定激光束能量中心的主要限制。为了克服热扰动的影响,采用光电池列阵做为中心检测器<sup>[13]</sup>。光电池列阵中各光电池的输出信号被线性放大和时间积分。这时,在光电池列阵坐标系中,投射到此列阵的激光束能量中心位置为

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \int_{\Delta T} E_i dt}{\sum_{i=1}^n \int_{\Delta T} E_i dt} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

式中  $x_i$  是第  $i$  个光电池的坐标,  $E_i$  是投射到第  $i$  个光电池上的激光束瞬时光强度,  $\Delta T$  是激光强度积分时间间隔,  $\alpha_i$  是被积信号读数,与  $\int_{\Delta T} E_i dt$  成正比。

用同样的方法可以算出  $Y_0$  坐标。

用这种方法,在 1.5 公里已得到 0.2 秒的精度。

大气引起光轴偏折的影响可利用空气的色散性进行修正。同时用两个波长(如红光和绿光)进行测量,从而对大气的影晌进行补偿<sup>[14]</sup>。

如果只检测与光轴垂直的平面上两个平动自由度,平面靶完全能满足其要求,而且在机械结构上也很简单。锥体靶企望用于两个转动自由度的检测。从而可以做成能检测四个自由度的接收靶。在图 3 给出了配置简图。锥体反射器 3 的锥尖位于透镜 4 的焦平面上,对于与透镜光轴平行入射的光束,透镜 4 将此激光束聚焦在后焦点上,即锥尖上。当激光束与透镜的光轴不平行时,聚焦的光点在透镜 4 的焦平面上移动,从而引起光电池 1、2(或另外两个与其垂直方向配置的光电池)上接收的激光能量不同,从而显示出转动的角度。四象限光电池 6 用来检测两个平动自由度。图 3 中的 5 是分束棱镜。转动和平动自由度的检测可用同一个方位显示器。

## 结 论

在近代工业中,采用激光准直系统将比二十多年前引入光学工具具有更深远的影响。国外许多工业部门<sup>[15, 16, 18]</sup>,特别是航空工业、造船工业,已经普遍采用了激光准直系统。并且制造了多自由度的传感头<sup>[4, 17]</sup>。利用激光准直仪进行测量可以增加精度、提高效率、节省人力;避免人为误差,降低对使用者的技术水平的要求;与自动控制配合可实现自动准直定位。由于这些益处,激光准直仪在工业中的应用具有广阔的前途。

## 参 考 资 料

[1] P. Kissam, Optical Tooling for Precise Manufacture and Alnment, 1962, New York London.

(下转第 34 页)

从图6可得放电电流为5毫安、10毫安……25时,最佳总气压分别为23格、18格、16格、13格、11格。一米以上氦氖激光器放电电流一般在10~15毫安左右,所以总气压应选择在16~18格左右。

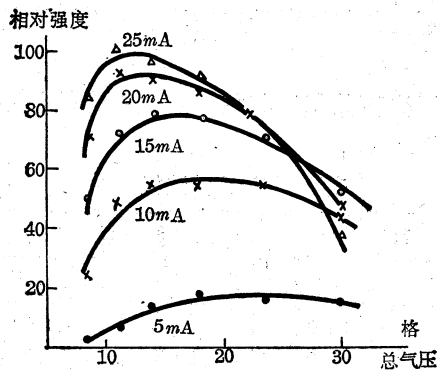


图6 总气压的选择图

用上述方法求得器件气压比和总气压的最佳值,以获得较强的输出功率。本文提出了实验的方法和一些结果。要得到较强的输出功率,除了上述提及的两个问题以外,还与腔结构、输出镜透射率的选择有关,有待今后进一步深入。

### 参 考 资 料

- [1] C. Θ. 福里斯, A. B. 季莫列娃, 《普通物理学》第三卷 93~153 页。
- [2] A. D—655437.
- [3] Klaus. D. Mielenz, Karl. F. Mefflen, *Appl. Opt.* **4** Vol. 4, No. 5, 1965, 565~567.

(上接第 61 页)

- [2] P. W. Harrison, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 183 (pt. 3D) (1968~69)
- [3] G. J. Reicher, K. D. Harris, *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 183 (pt. 3D) (1968~69)
- [4] G. Carey, P. A. Hickman, *ISA Transactions*, **9**, (1970), 222
- [5] A. Maitland, M. H. Dunn, *Laser Physics*, 1969, London
- [6] B. G. Whitford, *Appl. Opt.*, **11**(1972), 2069
- [7] W. B. Herrmannsfeldt, *et. al.*, *Appl. Opt.*, **7** (1968), 995
- [8] 安东滋等, *电子技术*, **12** (1970), 39
- [9] *Laser Letter*, **2**(1965), 2
- [10] H. D. Betz, *Appl. Opt.*, **8** (1969), 1007
- [11] T. R. Pryor, *et. al.*, *Appl. Opt.*, **11** (1972), 308
- [12] S. J. Bennett, J. W. C. Gates *J. phys. E: Scient. Instrum.*, **3** (1970), 65
- [13] A. Chrzanowski, *et. al.*, *Appl. Opt.*, **11** (1972), 319
- [14] J. Dyson, *Nature*, **216** (1967), 782.
- [15] J. A. Strasser, *Aerospace Technology*, **21** (1968), 24
- [16] P. A. Hickman, *Laser Focus*, **4** (1968), 24
- [17] J. D. Bohlin, *Appl. Opt.*, **11** (1972), 961
- [18] 黑岩英, *エレクトロニクス*, **16** (1971), 802