

综合评述

气体激光位相阵列

最高指示

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

一、引言

欲使光对目标发生有效的作用，就必须在目标上造成一定的照度。一个距激光器的距离为 R 的目标所获得的照度约为：

$$E_T = 4ET/\pi(R\theta)^2 \text{ (焦耳/单位面积)} \quad (1)$$

其中，

E ——激光器输出能量，

T ——大气透过系数，

R ——到目标的距离，

θ ——光束发散角。

以 CO_2 激光器为例，它的大气透过系数约为 0.7，光束发散角为 1 毫弧度，为了使 50 公里高空上的目标获得 100 焦耳/厘米² 的照度，就要求有 2.8×10^7 焦耳的能量输出。对距离更远的目标，例如相距几百公里，要获得同样的照度，对激光器输出能量及光束方向性的要求就更高。单台器件要获得如此高的输出能量以及如此狭窄的发散角是比较困难的。由于技术条件，单台器件的尺寸受到一定的限制，单靠扩大工作物质的体积

来增加输出能量也有其局限性，另外，激光输出的发散角近似地为：

$$\theta \approx \sqrt{\frac{2(2+m)\lambda}{3nd}} \quad (2)$$

其中 d 为谐振腔的间隔， n 为折射率， m 是一个整数， $m=0, 1, 2, \dots$ 。对于 CO_2 激光器， $\lambda=10.6$ 微米，取 $d=10$ 米， $m=0$ ，求得 $\theta \approx 1.2$ 毫弧度。用长等离子体管作为激光管时，发散角似乎好一些，但是，长度在超过某一值之后，外轴模就出现，引起方向性变坏大于增长长度所得的好处，另外，在输入强度增大时，也往往导致外轴模出现，实验上获得方向性与输入能量关系绘于图 1。

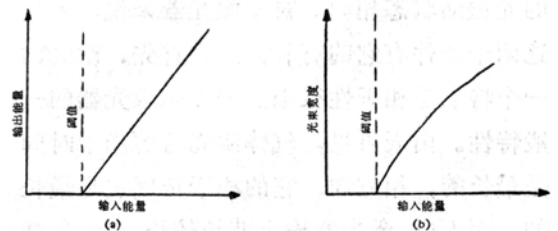


图 1 (a) 输出能量与输入能量的关系；
(b) 光束宽度与输入能量的关系。

同时，以上还未考虑工作物质不均匀性、反射界面上反射时位相突变引起的影响，总的来说，在实际上能获得光束发散角总是比由孔径衍射所决定的值要大得多。

能不能设想把几台器件作适当的组合，使其输出能量强，方向性又好呢？这种方法就是所谓的激光位相阵列技术。

在物理光学中，我们熟知的 N 缝衍射，它的中央主最大的强度为：

$$I = N^2 I_0, \quad (3)$$

其中：

I_0 ——单缝在观察点的强度，

N ——缝的数目。

而光束的衍射角为：

$$\theta = \frac{1}{N} \theta_0, \text{ 对于立体角, } \mathcal{I} = \frac{1}{N^2} \mathcal{I}$$

其中 θ_0 为单缝的衍射角。有人设想把 N 台器件这样进行组合，使每台器件相当于 N 缝衍射中的一个缝，利用它们的干涉效应，把 N 台器件的能量压缩到一个更狭窄的空间范围。

二、气体激光器实现位相阵列的优越性

若干束光发生干涉的头等重要条件是，它们之间保持一个恒定的位相差，以及它们的光振动状态相同。对于激光器来说，实现这两个条件有它的有利因素。首先，激光的一个特点是相干性很强。表 1 是激光器的一般特性。由表可见，气体激光器的相干时间是最长的，相应地，它的相干长度也是最长的。而 CO_2 激光器输出波长较长（10.6 微米），相干范围比其他固体激光器（如钕玻璃、红宝石等激光器）宽。

表 1 激光器的一般特性

参 数	范 围
A. 时间特性	
频 率	$3 \times 10^{12} \sim 10^{15}$ 赫
带 宽	$\left\{ \begin{array}{l} \text{固体} < 3 \text{ 兆赫} \\ \text{气体} < 20 \text{ 赫} \\ \text{半导体} \approx 8 \text{ 兆赫} \end{array} \right.$
B. 空间特性	
光束直径	0.3 ~ 3 厘米
束 宽	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1}$ 弧度
C. 相干性	
相干时间	$0.3 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-2}$ 秒
相干长度	$10^{-2} \sim 1.5 \times 10^6$ 米

第二，气体激光器已有较好的单模稳频实验基础。对 He-Ne 激光器来说，短时单模稳频可达 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ ，长时可达 10^{-8} [1]； CO_2 激光器，随着输出功率的提高，振荡仅发生在一两个频率上 [2]，适当设计谐振腔，即可获得单模输出。

第三，气体激光器的工作物质均匀、折射率小，外界条件（如泵功率的改变、工作物质温度的改变等）对获得最低价单模影响程度小。

第四，气体激光器能连续工作，主振荡器和放大器可采用同一类型的激光器，同时，位相变化也较易控制。

三、技术设计

(一) 激光器列阵方块图

图 2 是激光位相阵列的方块图。图 3 是 1964 年提出的一个列阵排布方案 [3]，该方案计划用钕玻璃激光器作放大器，用 $\text{Nd} : \text{CaWO}_4$ 或氦-氖激光器（波长 1.06 微米）作主振荡器。根据气体激光器的特点，排布设计的形式可以有多种。在此不作详细介绍。

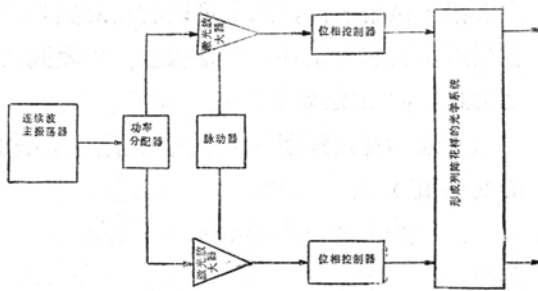


图 2 激光位相阵列方块图

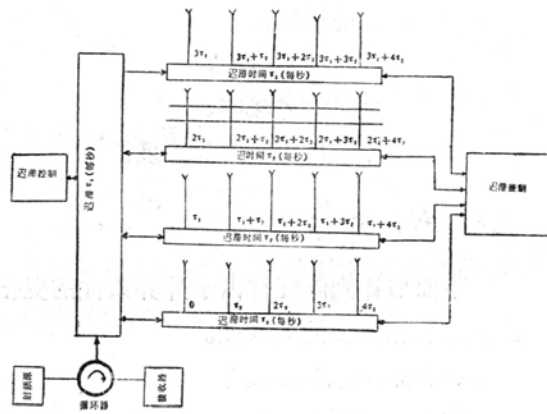


图 3 二维阵列排布草图

(二) 主振荡器和放大器

激光位相阵列所产生的辐射花样是单个激光器花样的函数，且相应于一个光栅的中心花样。

N 缝衍射的强度分布是

$$I = I_0 \left[\frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \right] \left[\frac{\sin^2 N\alpha}{\sin^2 \alpha} \right] \quad (4)$$

其中， $\beta = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$ ， $\alpha = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$ ， a ， d 分别为缝宽和两缝间的间距， λ 为波长， θ 为衍射角， N 为缝的数目。其图解见图 4。

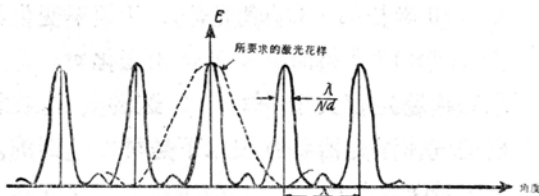


图 4 激光位相阵列光束花样

α 因子表征相邻两缝在观察点上的干涉效应，而 β 则表征在观察点上的孔径衍射效应。显然

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{d \sin \theta}{a \sin \theta} = \frac{d}{a}$$

若 $\frac{d}{a} \gg 1$ ，则 $\alpha \gg \beta$ ，这意味着单缝衍射作用不显著，即能量不够集中。

若 $\frac{d}{a} = 1$ ，即各缝紧挨，以光栅术语来说，所有的干涉级都缺级，这时大部分能量集中在零带上。我们所要求的激光阵列花样正是这种形式。

单台激光器在垂直于光束的平面上的输出花样是^[4]

$$U_m(x, y) V_n(y, z) \sim$$

$$H_m(\alpha x) H_n(\alpha y) e^{-\left(\frac{\alpha^2}{2}\right) \cdot (x^2 + y^2)} \quad (5)$$

在此函数中，腔之轴取于轴，坐标原点选在反射镜的焦点上， H_m 和 H_n 分别表示 m 价和 n 价 Hermite 多项式， α 是一个常数，它的形式是：

$$\alpha^2 = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{R}{R + 4z^2} \quad (6)$$

由这函数形式所决定的花样形式绘于图 5。5(b) 是表示对应的偏振状况，5(c) 是表示所拍摄的对输出花样。

从图 5 可以看出，仅有基模 (TEM_{00q}) 或最低级模才适用于阵列。因此，作为主振荡器，它必须设计和调整到输出花样是基模形式；对于输出放大器——组成阵列的发射元——也必须设计得使它不至破坏原有的模结构。

(三) 阵列系统的位相变化灵敏度

为使各台器件的输出光束发生干涉，必须保证各光束有一恒定位相关系，这样，对于主振荡器、放大器及其他光学元件的工作

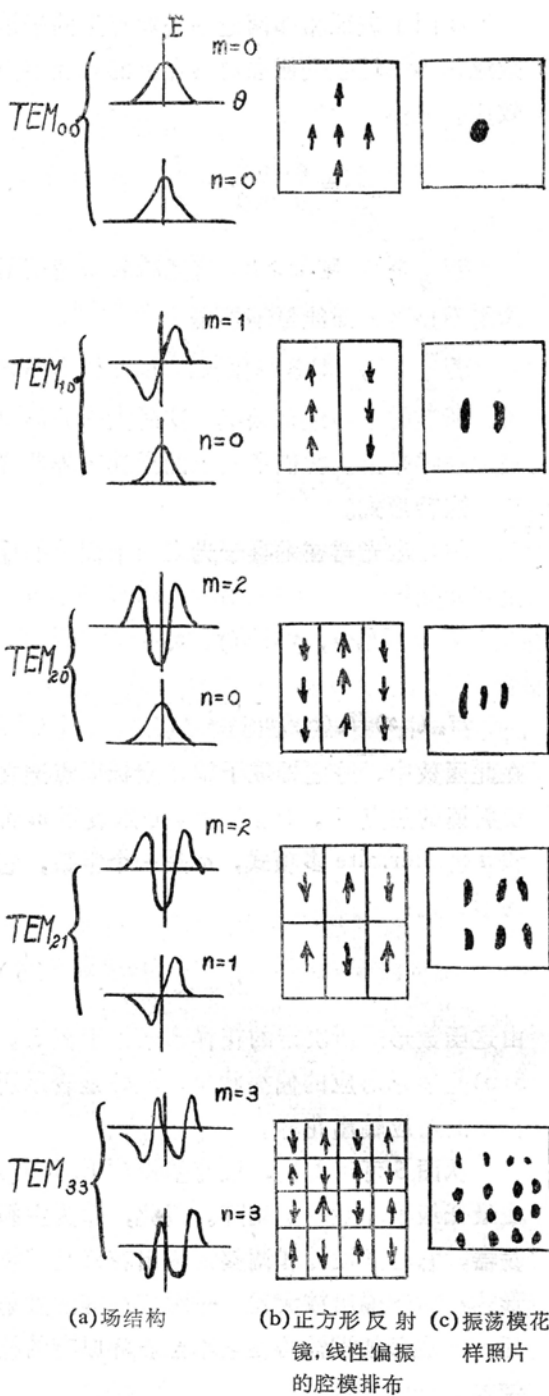


图 5 共焦距的模特性

状态就提出了一定的要求。这些要求须比较严格地控制达到, 否则, 位相的不规则起伏就会破坏列阵原来的面目, 下面对几个主要

因素作一粗略估计, 从中可以看出对实现位相列阵所要求的条件的严格程度, 以及到目前为止, 尚未实现的原因。

一束光通过厚度为 d 的平板后, 其位相的变化值 φ 为

$$\varphi = (k - k_0)d = 2\pi d\nu(n-1)/c,$$

其中,

$$k \text{——传播系数} = \frac{2\pi\nu n}{c},$$

d ——板的厚度,

n ——物质的折射率,

ν ——通过的光频率,

c ——光在自由空间的速度。

$$d\varphi = \varphi \left[\frac{d\nu}{\nu} + \frac{dd}{d} + \frac{dn}{n-1} \right].$$

下面估计列阵元件由于外界条件的变化而引起位相变化的灵敏度。

(A) 频率变化灵敏度

由于某种原因, 使列阵元中某一元输出频率发生变化 $d\nu$, 则工作物质及位相元件、光学元件的色散所引起的该元光束的位相变化为

$$d\nu_\nu = \frac{dn}{d\nu} d\nu = \frac{dn}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\nu} \cdot d\nu$$

其中, $\frac{dn}{d\nu}$ ——频率色散; $\frac{dn}{d\lambda}$ ——波长色散。

位相的总变化为

$$d\varphi_{0\nu} = \sum_i \frac{2\pi d_i}{c} \left(1 + \nu \frac{dn_i}{d\nu} \right) d\nu.$$

d_i ——第 i 元件的长度, $\frac{dn_i}{d\nu}$ ——第 i 元件的频率色散。

10 米长的 CO_2 激光器, 其频率变化约为 1.5×10^{-5} 赫时, 引起位相变化 π , 即要求频率稳定度大于 5×10^{-9} 。这种要求, 在目前的气体激光器稳频技术下是可以达到的。

(B) 温度变化

由于主振荡器和放大器的工作物质温度

发生改变，或由于位相元件和其他光学元件的温度发生变化，都导致通过它的光束位相改变，这种改变是通过折射率、长度等改变来实现的。

(i) 放电管长度改变的灵敏度

$$\Delta \varphi_e = 2\pi \frac{n \Delta d}{\lambda_0}。$$

对 CO₂ 激光器来说，长度变化约 5 × 10⁻⁴ 厘米，便导致光束位相变化 π。激光管长 10 米，就要求相对变化小于 5 × 10⁻⁹。放电管采用膨胀系数最大的玻璃——线胀系数 α = 1 × 10⁻⁵，发生这样长的变化要求管壁温度变化小于 60°C。位相元件及其他光学元件的变化要求小于 10⁻⁴ 厘米。

(ii) 工作物质折射率改变的灵敏度

工作物质的折射率变化 Δn 时，引起位相变化 Δφ，以 10 米长的 CO₂ 激光器来计算，要求折射率变化小于 5 × 10⁻⁷。因为折射率与气压及温度有关。所以相应地，要求温度变化小于 25°C，气压要求变化小于 9 × 10⁻³ 托。看来温度的变化要求并不苛刻，对于气体压力的要求就比较苛刻了。

(C) 光学元件反射角变化的灵敏度

光从光学表面反射，反射光束的位相随入射角变化。对于电介质表面，反射光束的位相变化是：

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_s}{2} = \frac{\sqrt{n^2 \sin^2 \phi - 1}}{n \cos \phi}，$$

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_p}{2} = \frac{\sqrt{n^2 \sin^2 \phi - 1}}{\cos \phi}。$$

对于金属反射面，

$$\operatorname{tg} \delta_s = \frac{2b \cos \phi}{a^2 + b^2 - \cos^2 \phi}，$$

$$\operatorname{tg} \delta_p = \frac{2b \cos \phi (a^2 + b^2 - \sin^2 \phi)}{a^2 + b^2 - n^4 (1 + K^2) \cos^2 \phi}。$$

其中，

δ_s——垂直入射面振动的光分量，

δ_p——在入射面振动的光分量，

φ——入射角，

n——物质的折射率，

$$a^2 = \frac{1}{2} \left\{ [n^2(1-K^2) - \sin^2 \phi]^2 + 4n^4 K^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + n^2(1-K^2) - \sin^2 \phi，$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left\{ [n^2(1-K^2) - \sin^2 \phi]^2 + 4n^2 K^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - n^2(1+K^2) + \sin^2 \phi，$$

$$K = \frac{K_0}{n}， \quad K_0——消光系数。$$

为了估计入射角的灵敏度，设 φ = 45°，n = 2，则反射角每变化 1 度，引起的位相变化约为 170 度。

(四) 位相变换器

从上节可看到，列阵元件本身的某些起伏会造成光束位相误差，虽然列阵各元件已合乎设计要求，但一些起伏总是存在的。为了保证各列阵元位相有一定严格关系，需要一个位相调节元件，这个元件就是位相变换器。它是列阵的关键元件之一。

最简单的位相变换器是如图 6 所示的楔形位相补偿器。改变光所通过的厚度，就增加或减少通过光束的程差，从而达到位相调节。但这种元件是用机械法控制的，位相变化的反应灵敏程度不合乎要求，所以，实际上并不采用。通常认为有前途的是所谓电-光元件，如 KDP、ADP、KTN、Te、GaAs 等。在 CO₂ 激光器的情况下，GaAs

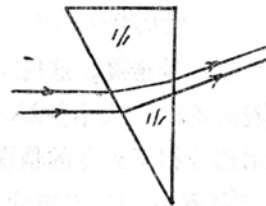


图 6 楔形位相变换器

是采用的对象，它的位相变换关系是：

$$\Gamma = \frac{\pi l}{\lambda} \frac{n_0^3}{d} r_{41} V$$

其中 l 、 d 为 GaAs 的两个边长(见图 7)， V 为沿子方向所加的电压值， n_0 为折射率 ($n_0 = 3.34$)， r_{41} 为电光系数^[5] (其测量结果为 $r_{41} = 1.6 \times 10^{-10}$ 厘米/伏)。

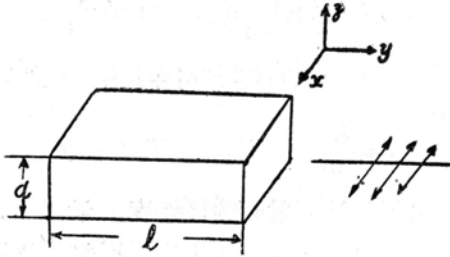


图 7 GaAs 中的位相变换关系

(五) 列阵花样的传输

大气对在其中传播的光束的影响除吸收部分能量外，还有其他一些(如大气抖动等)。它们在光束上产生无规的调制。更为严重的是由于大气中局部地区的温差、密度不均匀性所造成的折射率的局部变化，造成了光束的无规位相变化。为避免这种大气的限制，有人考虑使列阵花样通过聚光系统进行传输。

图 8 表示孔径为 d 的光源发出的相干光在空间传播的情形。这种传播情况是假定在整个孔径内位相及振幅都均匀分布的情况下得出的。在相干光源前加一聚焦于无穷远的

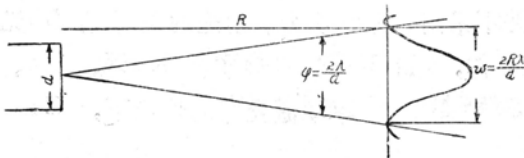


图 8 相干光源远场的束宽

透镜，就相当于这种情况，这时主带宽度 $\sim 2\lambda/d$ ，远场花样的斑点大小 $\sim 2R\lambda/d$ 。

图 9 表示部分相干光源的情况。这时，离光源的距离为 R 处的斑点尺寸为

$$\omega = R\varphi。$$

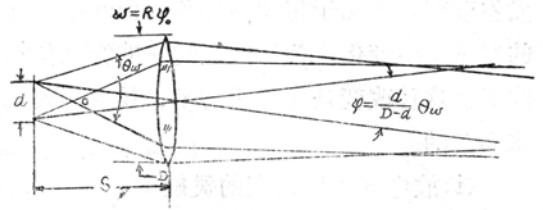


图 9 部分相干光源置于焦点($S=F$)时的光束特性

四、结束语

激光列阵技术是一项新技术，看来这是一种获得狭窄强光输出的办法。一些帝国主义者们在谈到激光列阵时总爱吹嘘，说它是实现“死光”的手段。

从前面简单的讨论可以看出，实现 CO_2 激光列阵的条件并不过分苛刻，它是有可能实现的。当然还有不少困难。激光列阵的想法在 1964 年就已提出，到目前为止，看来还在试验阶段。尤其是红外光，测量装置不如可见光那样多，那样容易观察，因而在进行有关的基本实验测量时尚存在不少困难。但是，正如毛主席经常教导我们那样，“社会的财富是工人、农民和劳动知识分子自己创造的。只要这些人掌握了自己的命运，又有一条马克思、列宁主义的路线，不是回避问题，而是用积极的态度去解决问题，任何人间困难总是可以解决的。”

参 考 文 献

- [1] Bloom A. L., *Appl. Opt.*, (1966) 5, № 10, 1500—1512.
- [2] Patel C. K. N., *Appl. Phys. Lett.*, (1965), 7, № 1, 15.
- [3] Meisels M., *Coherent Optical Beam Steering Techniques*, AD—428203 (1964)
- [4] Boyd G. D. & Gordon J. P., *Bell. Sys. Tech. J.*, 1961, 40, № 2, 489~508,
- [5] Yaric A., Mead C. A. et al., *IEEE. J. of Quantum Electronics*, (1966), QE-2, №8, 243—245.

(雷仕湛，刘振堂编写)