

由温度波所引起的呢,对于这一疑问,似乎要作一解答,但这只能有待于今后的实验研究。

## 结 束 语

关于模式同步 Q 开关微微秒脉冲激光器及其应用,从它的特性和产生方法到最新的应用领域作了叙述,象超高速光选通法那样,笔者没有直接从事研究的领域,本文

丝毫没有谈及,今后如有机会打算依次进行解说。另外附带说明一下,关于本文中仅作了概要记述的利用二硫化碳作上转换和气体激光引起的自发散现象,打算接着本文进行解说。

## 参 考 资 料 ( 略 )

取自:加藤列,《电子科学》,1970,20, № 3, 109~115

# 横模选择技术提高了激光器的亮度 ( I )

**提要:**横模选择技术提高了固态激光器的亮度,这对于等离子体的产生、微电路加工、打孔和非线性光学都很有用。本文列举了横模选择的优点,并叙述了模和共振腔的背景。固态激光器采用选模以后,可靠性和重复性有所改进,去除了一些最严重的障碍。第二部分以平面-凹面共振腔为例,阐明选模的基础,并广泛地讨论各种共振腔。非稳定共振腔在选模方面特别有希望。

已有很多文章 (Daneu 等, 1966年; Sencini 和 Svelto, 1967 年)描述了横模选择技术在固态激发器中的应用。尽管这些简单的技术有很多优点,但在固态激光器中仍未广泛采用。轴向模选择技术倒是在使用,而且 Magyar 曾作过评论(1969 年)。

## 横模选择技术在激光应用中的优点

一般说来,横模选择限制了激光器中发生振荡的横截面,没有改变单位面积发射的功率,因此总功率输出降低。

它减小了束散,产生仅受衍射限制的光束。因此,总功率是降低了,但选模的总效果一般说来还是提高了激光的亮度(功率/单位面积/立体角)。

在很多应用中,需要的不是所发射的总功率而是亮度。Rempel (1963 年)已就若干种应用情况详细比较了空间相干源和空间非相干源的效果。同样的讨论也适用于比较横

模选择的激光器和未经选择的激光器,而且本文简略给出了一些有关亮度的结论。这个量很有用,因为从任何光学系统所构成的像和物(或光源)有相同亮度(吸收和反射所引起的损失不计)这一事实来看,它是一个不变量(Born 和 Wolf, 1965 年)。

在光学系统的每单位焦平面上所能产生的最大功率(不限制焦点大小)正比于光源的亮度。在产生等离子体的应用中可能会提出这种要求。对于激光器的一种更普通的要求是它应该能够在大小近于衍射极限的点上产生尽量高的功率。Rempel(1963 年)已指出,在一个受衍射限制的点内每单位面积所能产生的最大功率正比于光源的亮度。这样的点在微电路加工和修整以及打孔应用中都很需要,因为在这些场合需要有所控制地除去极小面积上的材料。Cohen 等人(1968 年)已论证过单模激光器在这些微电子学应用中的价值。

通常的另一点要求是：激光器在透镜的焦点范围内应能产生一定的功率密度，而且束散必须很小，以使这样的功率密度在相当长的距离上能维持不变。此外，决定激光器满足这种要求的能力不是总功率而是亮度。这种要求非线性光学中是普通的，因为必须在1厘米量级的路程上维持高功率密度，才能有效地产生相位匹配的二次谐波或参量振荡。

类似的要求也适用于染料激光器的纵向泵浦。Soffer 和 Evtuhov (1969年)最近的工作说明了，TEM<sub>00</sub> 模红宝石激光器的高亮度（尽管总功率中等，只有20千瓦）如何能产生高效率二次谐波，所产生的二次谐波辐射的高亮度光束又如何能在有机染料中引起激光振荡。用非模选择的红宝石激光器进行的实验已使用了几十兆瓦红宝石功率。

全息照相应用对空间和时间相干性都有所要求。过去固态激光器采用横模选择技术所遇到的困难意味着，为了发展无须满足严格的相干要求而摄制全息照片的技术，已作了相当大的努力 (Brooks 等, 1966年)。Jacobson 和 Mc Clung (1965年)采用选模技术已提高了红宝石激光的相干性，并摄成了很好的全息照片。那时功率输出低（由于横模选择）是一种严重的障碍。最近，用相同的激光功率，La Macchia 和 Bjorkhom (1968年)已表明他们的选模红宝石激光器能摄得极好的全息照片。如果使用最近制成的更灵敏的照相底片，现有的选模红宝石激光器能用来提高全息照片的质量。

横模选择的另一优点是功率和强度分布有极好的重复性 (例如 Daneu 等, 1966年; Bjorkholm 和 Stolen, 1968年; Ananev 等, 1969年; Arnold 和 Hanna 1969年)。这样，就有可能在接近光学元件 (如反射镜) 的损坏

阈的功率水平上运转，而不致因极高功率的无规出现而造成损坏。此外，在仔细控制之下，可在极高功率密度之下迅速而容易地进行实验。这就大大加强了固态激光器这种科学工具的作用。

## 模和共振腔——背景

直到最近，几乎所有的固态激光器都使用由两块平面镜构成的共振腔。Fox 和 Li (1961年)首次分析了这种共振腔的模。在另一篇文章中，Boyd 和 Gordon (1961年)叙述了一种特殊反射镜共振腔——共焦共振腔——的模的分析处理方法。这些分析表明，球面镜共振腔的衍射损失比平面镜共振腔小几个数量级，因此球面镜共振腔很快就为其后出现的低增益气体激光器所采用。

但以后固态激光器仍在用平面镜，因为它们的增益比衍射损失大，而且对准的容差也不那末严格。已提出两条理由来说明这种对于对不准的不灵敏性。第一，固态激光器晶体的光学质量不如气体激光器高；第二，激光棒中的热畸变引起一种透镜效应，这就使得本来的平面平行共振腔的作用类似于一个球面镜共振腔，而且对准程度也有所降低。关于后一种理由，目前有足够的事实可供证明 (例如，Evtuhov 和 Neeland, 1965年; Stickley, 1966年)。因此，应用球面镜共振腔的模理论，能很好地分析平面平行固态激光器共振腔的模的性质。

在各种可能的球面镜共振腔中，共焦共振腔特别重要。首先它是具有最大模选择的共振腔，其次它的模的性质用简单的分析形式就能相当准确的描写。因此，这些模都具有厄米特-高斯场分布，波前是球形的。最低次模 (TEM<sub>00</sub>) 具有简单的高斯场分布。

这些模的简单的分析性质使得人们能很

容易地把这种分析用于非共焦球面镜共振腔 (Boyd 和 Gordon, 1961年)。此外,根据傍轴几何光学的光线转移矩阵,还导出了这些模的一种简单计算方法(Kogelnik 和 Li, 1966年)。利用这种计算方法,很容易就算出模的频率、光点大小和波前的曲率。甚至对于很复杂的共振腔,如包含了厚透镜(如热变形的激光棒)的共振腔,这种方法也适用(Stickley, 1966年)。利用它还能简单的计算这些光束在共振腔外通过空间或各种光学元件传播时的性质。无论对于激光器设计者或是使用者,进行这些计算的价值都是巨大的。

设计单模激光器时,模的衍射损失也很重要,因为横模的选择是通过这种机理完成的。一般说来,这种  $TEM_{00}$  模是需要的,因为它的束散最小,因而亮度最高,衍射损失最小。因此,在选择  $TEM_{00}$  模时就必须使高次模的损失大得不能振荡,而  $TEM_{00}$  振荡则能发生,激光器设计者必须知道各种共振腔结构中  $TEM_{00}$  模的衍射损失和下一个有损失的模的损失。

Li(1965年)的文章特别有用,对于各种各样具有足够小夫累涅尔数的圆孔径的球面镜共振腔,文章给出了衍射损失的计算结果。尽管 Li 的结果不包括所有可能的球面镜结果,但借助于某些等价关系,这些结果的范围就能延伸(Gordon 和 Kogelnik, 1964年)。这些关系表明,如果两个共振腔有相同的  $N$ 、 $G_1$  和  $G_2$  值(见图 1),那末它们相同的模就有相同的衍射损失。已利用光线转移矩阵把这些等价关系表示成更普遍的形式(Baues, 1969年)。这就使得 Li 的结果能推广到更复杂的共振腔(如象包括有透镜的共振腔)的情况。实际上,从 Li 直接处理的共振腔的范围所能得到的模选择性对于一般的固态激光器已经足够。

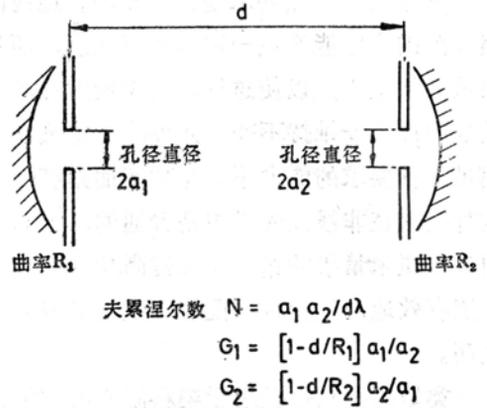


图 1 对于有相同  $N$ 、 $G_1$  和  $G_2$  的两个共振腔,同一模的衍射损失是相同的。

### 平面—凹面共振腔

关于图 2a 所示的对称共振腔中的  $TEM_{00}$  和  $TEM_{10}$  模的衍射损失, Li 已就  $N$  值小到 0.1、 $|g|$  值从 0 到 1 的情况作过计

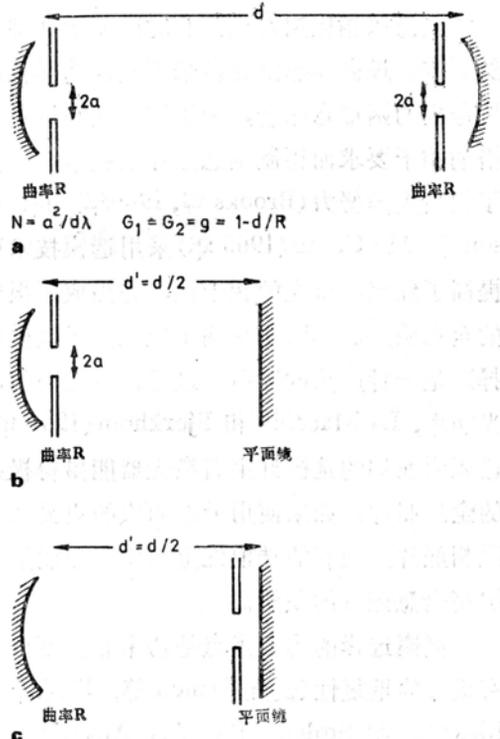


图 2 a. 对称共振腔; b. 平面—凹面镜共振腔的衍射损失是 a 的一半; c. 平面镜附近有单孔径的平面—凹面共振腔,其模选择性 with b 的相同。

算。现在考虑图 2b 中的平面-凹面共振腔，在其曲面镜附近有一单孔。倘若平面镜比模的横向尺寸大很多，那末平面镜边缘的孔径效应所引起的衍射损失就可略去不计。这样，图 2b 的平面-凹面共振腔的两次通过衍射损失就与图 2a 的对称共振腔的单次通过衍射损失完全相同。

借助于上面的等价关系，就能用同样的方式处理平面镜附近带有单孔的平面-凹面共振腔(图 2c)的情况。模选择性与图 2b 的共振腔完全相同，那就是说，对于给定的  $TEM_{00}$  衍射损失， $TEM_{00}$  模的衍射损失在两种结构中都相同。欲达到相同的  $TEM_{00}$  衍射损失，在图 2c 的结构中就要使用较小的孔径，因为模的腰部都是在平面镜上构成的。

为了弄清其中的一些概念，这里准备把过去 L. W. Davis(1968 年)用来从红宝石激光器获取  $TEM_{00}$  模输出的共振腔结构作为例子(图 3a)。这种共振腔的两次通过衍射损失与图 3b 所示的、有关的参量为  $N=0.58$  和  $g=0.75$  的共振腔的单次通过衍射损失相同。知道  $N$  和  $g$  之后，就能根据 Li 的计算

(1965) 估计：对于共振腔 3b， $TEM_{00}$  模的单次通过衍射损失约为 20%， $TEM_{10}$  模约为 50%。

一般把  $TEM_{10}$  损失与  $TEM_{00}$  损失之比作为模选择性的量度(如 Li, 1963 年)。但在 Q 开关固态激光器中，由于建立脉冲无须通过很多次，因此用 Sooy 首次(1965 年)连同轴模选择一起讨论过的方法来计算模的相对强度是比较有益的。假设图 3a 中的激光器采用 Q 开关，从 Q 开关打开到巨脉冲达到峰值历时 100 毫微秒。这一时间相当于 12 次往返，因此，根据 Sooy 的分析，在脉冲峰值处， $TEM_{00}$  和  $TEM_{10}$  的强度的比为

$$\left( \frac{100-20}{100-50} \right)^{12} \sim 300$$

由于作了若干简化假设，这样得到的数字不过是一个粗略的估计。这样的计算忽略了模畸变效应，而由于激光棒中存在着非均匀增益分布，这种影响就必然发生。

这样产生的模畸变可以认为是  $TEM_{00}$  模的功率耦合到高次模里去。即使增益最初是均匀的，但由于  $TEM_{00}$  模在其中部有一个强度极值，因此最后增益在模的中部仍比在两翼消耗得多。如果气泡和掺杂物这类缺陷处在模所占据的区域内，它们就能强烈地影响衍射损失，并最后会限制能够取得的最大的模尺寸。在第二部分中可以看到，用普通的激光材料就很容易达到 1 毫米左右的模直径。对于  $Nd : CaWO_4$  激光器，直径大约 1 毫米的  $TEM_{00}$  模的衍射损失的测量值与 Li 的计算值非常吻合(Arnold 和 Hanna, 1969 年)。

(未完待续)

### 参考资料(略)

取自 *Opt. & Laser Technol.*, 1970 (Aug.), 2, № 3, 122~125

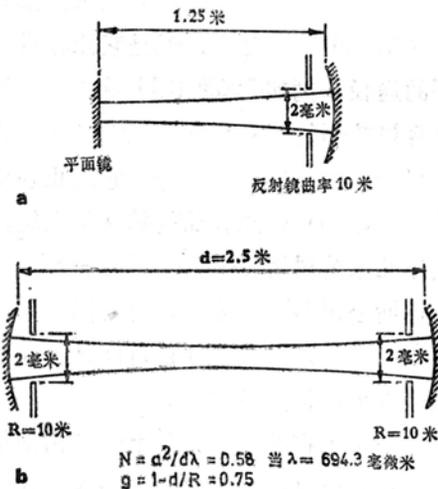


图 3 a. Davis (1968) 用以获得红宝石激光器  $TEM_{00}$  模的共振腔； b. 有关的共振腔，其衍射损失可根据 Li (1965) 的计算确定。