

空心阴极型氦-镉离子激光器 单纵模运转的实验研究

宋耀祖* 夏学江 秦明华

(清华大学物理系)

提要: 本文用实验方法测量了空心阴极型 He-Cd⁺ 激光器输出的模式结构及激光跃迁 5378 Å 的自发辐射线型。实验表明,不用任何光学选模装置,激光器就可以自发地呈现单纵模输出。对激光器的这一输出特性进行了分析研究。

Experimental research of single-longitudinal-mode operation of a hollow-cathode He-Cd⁺ laser

Song Yaozhu, Xia Xuejiang, Qing Minghua

(Physics Department, Qinghua University)

Abstract: We present in this report an experimental study of the mode structure of the hollow-cathode He-Cd⁺ laser and a measurement of the profile of spontaneous emission of the laser transition at 5378 Å. The experiments show that the laser can operate in a single-longitudinal-mode without optical mode-selection. The output characteristics of the laser is analysed.

激光器的模式结构,特别是激光器的单纵模、单横模运转是激光物理学的一个重要课题。我们用实验的方法测量了空心阴极 He-Cd⁺ 激光器的模式结构与激光跃迁 5378 Å 的自发辐射线型。在此实验基础上分析研究了空心阴极 He-Cd⁺ 激光器自发呈现单纵模输出的特性。

一、激光器模式结构的实验观察

观测模式结构的实验装置如图 1 所示。对激光输出模式的分析采用了北京第二光学

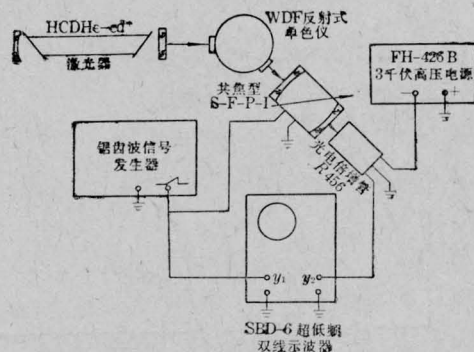


图 1 观测激光器模式结构的实验装置示意图

收稿日期: 1983 年 5 月 31 日。

* 原为清华大学物理系研究生, 现在中国科学院工程热物理研究所。

仪器厂生产的共焦扫描式法布里-珀罗干涉仪。其中测定红光 6360 \AA 的扫描干涉仪的自由光谱区为 4 千兆赫, 精细系数 100, 仪器线宽为 40 兆赫。测定绿光 5378 \AA 与蓝光 4416 \AA 的扫描干涉仪的自由光谱区为 1.5 千兆赫, 精细系数 80, 仪器线宽约 20 兆赫。用 SBD-6 超低频双线示波器或 $X-Y$ 函数记录仪进行观测或记录。我们在自加热与外加热两种不同类型的空心阴极 He-Cd⁺ 激光器^[1]上, 通过改变谐振腔的结构(包括腔长从 1 米到 1.5 米, 采用不同曲率半径的反射镜), 改变激光器的工作条件(如改变氦气压力, 镉蒸气的工作温度、放电电流等), 并在激光器以三色或单色输出的不同情况下, 观测了它们的模式结构。实验表明, 在以上种种条件的变化下, 激光器都能呈现单纵模输出, 而与谐振腔的长度无关, 且不必使用任何光学选模装置。单纵模输出的谱线宽度在很大程度上仅与激光输出的横模结构有关。我们得到的主要实验结果有: ① 选择合适的谐振腔结构, 当激光器以单横模振荡时, 测量得到的激光输出线宽均小于谐振腔的纵模间隔。例如: 采用大曲率半径的平面-球面腔(球面反射镜的曲率半径 $R=11$ 米), 在腔长为 1.3 米时, 纵模间隔为 115 兆赫, 这时测得的激光输出

线宽分别是 6360 \AA 为 80 兆赫; 5378 \AA 为 50 兆赫, 4416 \AA 为 50 兆赫, 如图 2 所示。以上的测量值均包括仪器宽度, 实际的激光输出线宽还应小于上述数据。

我们所观测到的上述数据, 对 6360 \AA 与 5378 \AA 而言与文献[2]的报道基本相接近, 存在的差别很可能是由于仪器或实验误差所引起, 文献[2]中测量所使用的仪器宽度仅 10 兆赫。尽管具体的数值在定量上有些差异, 但是不用任何选模装置, 这些激光谱线就能呈现单纵模输出的定性结论却是一致的。然而对于 4416 \AA 的蓝光而言, 我们所观测到的数据与文献[2]却有较大的差异[如图 2(b)所示]。文献[2]认为 4416 \AA 并不运转在单纵模上, 但从我们的实验现象来看, 激光输出线宽依然是小于一个纵模的间隔, 因而 4416 \AA 的输出也应是单纵模的。② 当激光器以多横模振荡时, 激光输出线宽一般随横模阶数的增大而增大, 我们测得的输出线宽一般在 200~300 兆赫左右。图 3 给出了多横模振荡时, 单纵模输出的实验图示。③ 放电参量对激光输出的横模结构也有一定的影响。实验表明, 在同样的谐振腔结构下, 降低氦压, 降低镉蒸气的工作温度, 将有利于使激光器获得单横模振荡, 从而减小激光器单纵模的输出线宽。④ 为了便于比较, 我们还在正柱放电型 He-Cd⁺ 激光器上观察了 4416 \AA 激光跃迁的模式结构。实验表明, 若不采用选模技术, 它只能呈现多纵模运转。这表明空心阴极 He-Cd⁺ 激光器的单纵模运转是与空心阴极的放电形式密切有关的。

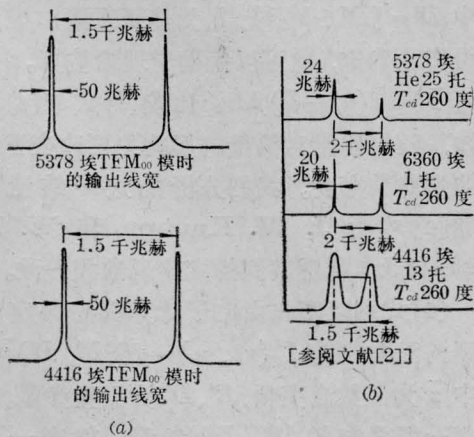


图 2 激光器呈单横模振荡时输出的单纵模线型图示

(a) 我们的实验结果; (b) 文献[2]的实验结果

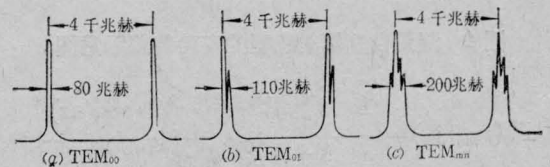


图 3 激光器呈多横模振荡时单纵模输出的实验图示

二、激光跃迁 5378 Å 自发辐射线型的实验观察

为了进一步研究空心阴极 He-Cd⁺ 激光器不用选模装置而呈现单纵模输出的特性,我们观测了 5378 Å 激光跃迁的自发辐射线型。利用平面扫描式法布里-珀罗干涉仪来测量自发辐射线型的实验装置如图 4 所示。我们在实验中所使用的法布里-珀罗干涉仪间距为 2 厘米,自由光谱区为 7.5 千兆赫,反射镜的反射率为 88%。这种实验方法的一个特点是光谱线宽度的测量对仪器线宽与细度的要求较为宽裕,即使在反射镜反射率较低场合仍能适用。这是因为该实验方法所获得的线型是待研究光谱线型与仪器线型的卷积。利用 E. A. Ballik^[3] 所提出的退卷积的方法,可以依据实验线型所提供的特征参数而获得待研究光谱线型的多普勒宽度与洛仑兹宽度。具有综合展宽的 Voigt 线型函数的入射光经平面扫描式法布里-珀罗干涉仪后,其中心条纹的透射光强 $I_T^*(\nu_m, \nu_i)$ 随干涉仪谐振频率 ν_i 而变化的归一化线型函数为:

$$\text{自变量 } z = 2\pi(\nu_m - \nu_i) / \Delta\nu_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{参量 } R' &= Re^{-L}; L = 2\pi\Delta\nu_L / \Delta\nu_i; \\ D &= 2\pi\Delta\nu_D / (\Delta\nu_i \sqrt{\ln 2}) \end{aligned} \quad (3)$$

$\Delta\nu_i$ 为法布里-珀罗干涉仪的自由光谱区, R 为平面镜的反射率, ν_m 为 Voigt 线型的中心频率。 $\Delta\nu_D$ 、 $\Delta\nu_L$ 分别为半极值强度处谱线的多普勒半宽度与洛仑兹半宽度。

然而,实验记录的曲线并非完全可以用公式(1)来描写,这是由于实验仪器、条件的限制所引起的随机误差而产生的。例如干涉仪平面镜的不平度、两平面镜并非绝对平行、由于振动而引起的腔间距离的变化等,都使得干涉仪的谐振频率 ν_i 以随机变量的形式呈现微小变化。由概率论的知识可知,一个随机变量如果是大量微弱原因的总效果,则这个变量就近似地服从正态分布。为此我们设想 ν_i 的变化也服从正态分布。在此条件下,我们对上述的理论分析引入一个修正。这时得到的干涉仪中心条纹的透射光强 $I_T^*(\nu_m, \nu_i)$ 随 $\bar{\nu}_i$ (干涉仪谐振频率 ν_i 的平均值) 而变化的归一化线型函数应为:

$$I_T^*(\nu_m, \bar{\nu}_i) = \frac{1 + 2 \sum_n R'^n \cdot e^{-n^2 D'^2/4} \cdot \cos(nz)}{1 + 2 \sum_n R'^n \cdot e^{-n^2 D'^2/4}} \quad (4)$$

其中 $D' = [D^2 + b^2]^{1/2}$, b 为修正系数,它可以由实验确定,也可以借助于理论估算。自变量 $\bar{z} = 2\pi(\nu_m - \bar{\nu}_i) / \Delta\nu_i$ 。比较(1)式与(4)式可知,随机因素对测量的影响主要改变了视在的多普勒宽度。我们分析的这一结论与文献[4]中由 J. W. Knutson 和 W. R. Bennett Jr. 所观察到的实验现象相一致。

(4)式可以事先由电子计算机打印出一系列的函数曲线 $I_T^*(\nu_m, \nu_i) = f[(R', D')\bar{z}]$ 。其中 \bar{z} 为函数自变量, R' 、 D' 为函数参量。对于每一组确定的 (R', D') 参量,就有一条 $I_T^*(\bar{z})$ 的曲线与它相对应。该曲线上有两个特征值(如图 5 所示),其一是 $\bar{z} = \pi$ 时归一化的最小光强 I_{\min}^* ; 其二是线型在半极值处的

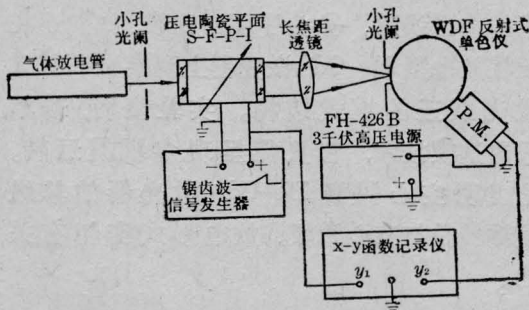


图 4 测量自发辐射线型的实验装置示意图

$$I_T^*(\nu_m, \nu_i) = \frac{1 + 2 \sum_n R'^n \cdot e^{-n^2 D'^2/4} \cdot \cos(nz)}{1 + 2 \sum_n R'^n \cdot e^{-n^2 D'^2/4}} \quad (1)$$

其中:

全宽度 $\Delta z_{1/2}$ 与峰峰之间的距离 z^* 的比值 $k = \frac{\Delta z_{1/2}}{z^*}$ 。这两个特征值都可以从实验曲线上获得,由此确定函数参量 R' 、 D' 。再进一步利用(3)式,便可确定待研究光谱线型的多普勒宽度 $\Delta\nu_D$ 与洛仑兹宽度 $\Delta\nu_L$ 的大小了。

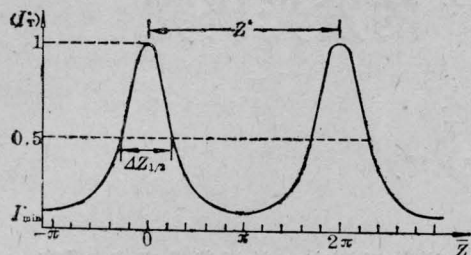


图5 实验记录的 $I_T^* = f(z)$ 曲线图示

我们的实验表明 5378 \AA 的自发辐射线型函数可以近似地用 Voigt 线型函数来描写,这与文献[8]的描述相一致。其中多普勒宽度约为 (0.94 ± 0.08) 千兆赫,与理论估算基本一致。洛仑兹宽度约为 (0.91 ± 0.05) 千兆赫。

在以上实验研究的基础上,我们对空心阴极 He-Cd⁺ 激光器自发呈现单纵模的输出特性进行了分析研究。我们认为这一输出特性的根本原因是由于自发辐射的均匀展宽与非均匀展宽具有差不多的大小。Smith 在实验中^[5]已证实了当上述两种展宽具有差不多的大小时,激光器的增益饱和过程就可以用均匀展宽的过程来描写。因此我们认为空心阴极 He-Cd⁺ 激光器自发单纵模输出特性是

起因于均匀展宽激光器所特有的模式竞争效应。我们还认为在单纵模输出时,允许多横模同时振荡的原因是横模的空间烧孔效应。由于不同阶次的横模在空间的场分布不同,它们可以利用不同空间区域的反转粒子数而同时获得振荡,其结果导致了激光器的多横模运转。

最后,值得指出的是,在空心阴极氦-镉离子激光器中所呈现的自发单纵模输出特性,在空心阴极金属离子激光器(如 He-Cu⁺⁺^[6])与惰性气体离子激光器(如 He-Kr⁺^[7])中亦存在。因此可以期望利用空心阴极放电来获得较大功率输出的运转在可见光区域的单纵模气体激光器。

参 考 文 献

- [1] 徐亦庄,傅云鹏等;《清华大学学报》,1978, No. 3, 1; 傅云鹏;《激光》1980, 7, No. 12, 10.
- [2] L. Csillag *et al.*; *Opt. Commun.*, 1977, 21, No. 1, 39.
- [3] E. A. Ballik; *Appl. Opt.*, 1966, 5, No. 1, 170.
- [4] J. W. Knutson *et al.*; *Phys. Rev.*, 1976, A13, No. 1, 318.
- [5] P. W. Smith; *Appl. Lett.*, 1971, 19, 132.
- [6] J. R. McNeil *et al.*; *Appl. Phys.*, 1979, 50, No. 10, 6183.
- [7] M. Janossy *et al.*; "Laser 79 Opto-Electronics", p. 89.
- [8] 周开亿主编; "空心阴极放电及其应用(上册)", p. 353, 真空科学与技术杂志社出版, 1982年.