

横流CO₂激光器中介质的流速对激活特性的影响

吴中祥 楚泽湘 陈丽吟 徐纪华

(中国科学院力学研究所)

摘要:以横流、放电、CO₂激光器为例,用物理力学的方法,联系器件中流动的非平衡激光介质各能态间传能变化的微观动力学机制,分析研究其输出和激活特性随介质流速变化的规律。

Effects of flow velocity on activation features of the medium in transverse flow CO₂ lasers

Wu Zhongxiang, Chu Zexiang, Chen Liyin, Xu Jihua

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract: Taking a transverse flow electrically excited CO₂ laser as an example, the changing rule of output power and activation feature with the flow velocity of the medium have been studied by means of physical mechanics, together with the microdynamic mechanism concerning the change of energy transfer among energy levels in nonequilibrium flow laser medium.

一、引言

通常,讨论激活介质的流动对大功率激光器的重要性时,仅从“对流”远比“扩散”更为有效地散热,有利于“输空激光下能态”的角度予以说明,并未具体分析流速对激光介质各种激活特性影响的重要作用。本文以横流、放电、CO₂激光器为例,采用实用的参量、条件,即介质组份比CO₂:N₂:He=5:27:68,初始气压: $P_0=20$ Torr, 初始温度 $T_0=293$ K, 放电区宽度 5.5 cm, 电压 $V_0=1200$ V, 电流 $J_0=10$ A, 光腔长度 $L=100$ cm, 高度 $H=3$ cm, 输出耦合度 $C\approx 28\%$, 镜宽 5 cm, 镜

片位置: (1) $x=1\sim 6$ cm, (2) $x=3\sim 8$ cm, x 为沿流动方向的位置, 以放电区在上游的边缘处为零, 具体计算、分析了激活介质的不同流速 ($u=30, 50, 70, 100$ m/s) 对激光介质的平动温度分布 $T(x)$, 输出功率 $P_{\text{出}}$, 各种效率: η_{VE} (电能转化为振动能)、 η_{IV} (振动能转化为光能)、 η_{IE} (电能转化为光能), 特别是对与介质激活特性有关的各种物理量: 小信号增益分布 $G_0(x)$ 、稳定振荡条件下的饱和增益分布 $G(x)$, 以及相应的各振动温度分布: $T_N(x)$ (N₂ 振型的 $V=1$ 能态)、 $T_3(x)$ (CO₂ ν_3 振型的 001 能态)、 $T_{12}(x)$ (CO₂ ν_{12} 振型的 100 能态) 等的影响。结果表明: 它们的变化规律

收稿日期: 1986年11月3日。

是远为复杂的,不能仅从散热快慢,而需联系到在放电、辐射作用下,非平衡流动介质上、下能态的各种传能过程之间竞争、消长作用。

二、计算结果和分析

2.1 平动温度分布 $T(x)$

平动温度的变化最直接地反映散热的效果,在本文所取流速范围,对流散热是主要的,计算中已忽略扩散散热。

由图 1 可见, $T(x)$ 都是随 u 的增加而单调下降,这种变化规律确能反映流速增加能使散热加快。

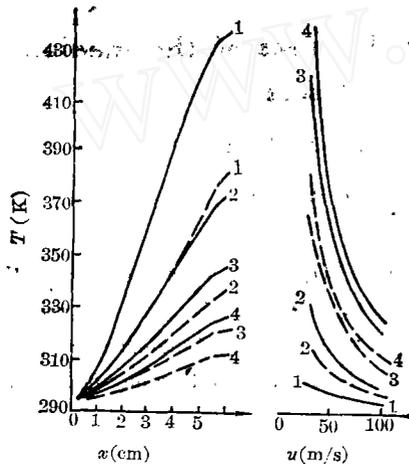


图 1 平动温度 T 随位置 x 和流速 u 的变化

虚线: $I \approx 0$
 实线: $C=28\%$ 稳定振荡

u (m/s)	x (cm)
1—30	1—1.05
2—50	2—2.05
3—70	3—5.05
4—100	4—6.05

除图 3 外,以下各图均用这些参数

2.2 输出功率 $P_{出}$ 和效率 η_{VE} 、 η_{IV} 、 η_{IE}

由图 2 可见, u 较小时, $P_{出}$ 、 η_{VE} 、 η_{IE} 都随 u 的增大而增加,但其陡度也随 u 的增大而渐缓,当 u 比较高时, η_{IE} 明显下降, $P_{出}$ 也有下降趋势, η_{IV} 则随 u 的增加而愈来愈陡地单调下降。这些变化规律已不能仅由“增加流速能使散热加快”来作解释。

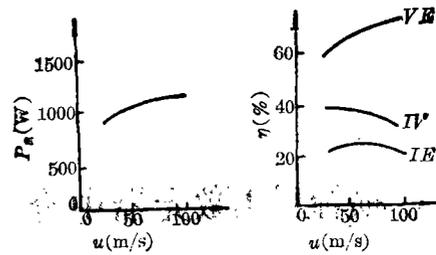


图 2 输出功率 $P_{出}$ 和各种效率 η_{VE} 、 η_{IV} 、 η_{IE} 随位置 x 和流速 u 的变化

2.3 小信号增益分布 $G_0(x)$ 、饱和增益分布 $G(x)$

由图 3 得到如下一些基本规律:

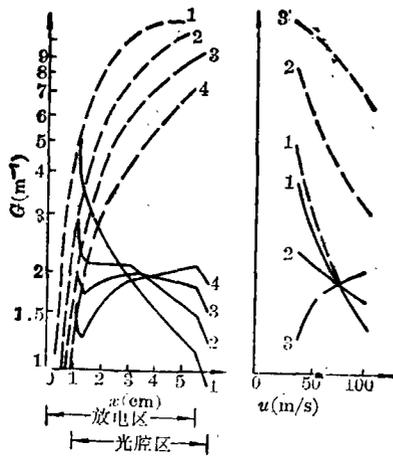
$G_0(x)$: 进入放电区后,随 x 的增大而急剧上升,当 u 较小时,在出放电区之前可达到一个稳定的值。一旦流出放电区,即随 x 的增大而急剧下降。当 u 较小时,进入放电区后 $G_0(x)$ 的上升和流出放电区后的下降都比较陡; u 增大,这种变化也都渐缓。对于给定的介质状态和放电条件, G_0 的峰值随 u 的增加而有所下降,其位置也沿流动方向 x 增大的方向移动。 G_0 的稳定区也逐渐缩短,乃至消失。当 u 达到适当的数值时,可在流出放电区后一段距离 G_0 保持稳定。

在同一 x 处, G_0 随 u 的增加而下降,但随着 x 的增加,下降变缓。

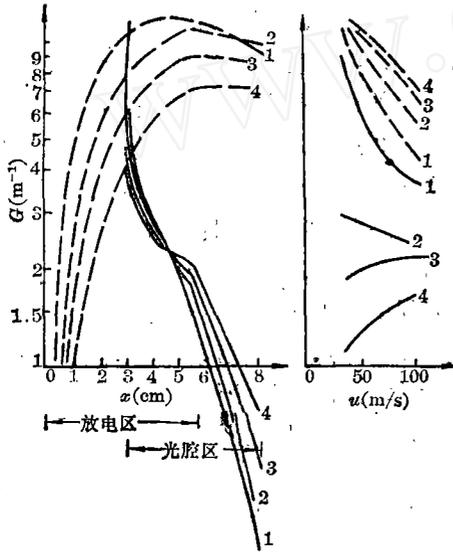
$G(x)$: $G \sim x$ 曲线随 u 的不同而有不同的形状,当 u 较小时,曲线呈单调下降;当 u 增至一定数值时,曲线中出现一段 G 值保持不变的水平线;当 u 更大时,曲线先降至极小后再上升。

在其他条件相同时,较大的 G_0 有利于单位质量流动激光介质的“出光”。 $G_0(x)$ 随 u 的上述变化规律表明,随着 u 的增大,实际上对单位质量流动激光介质的“出光”不利。

此外,还须考虑流速加大会使流过腔体的激光介质加多而增加激光功率,以及使残留的可用振动能流失较多等因素来分析流速对激光器输出特性的影响。



(a) $x(\text{cm})$ 为: 1—1, 2—2, 3—5



(b) $x(\text{cm})$ 为: 1—3; 2—4; 3—5; 4—6

图3 激光增益 G_0 、 G 随位置 x 和流速 u 的变化

2.4 振动温度 $T_N(x)$ 、 $T_3(x)$ 、 $T_{12}(x)$ 的分布

按准平衡分布公式, 各振动温度的数值可量度各能态粒子数密度。

由图4、5、6可见: 当腔内辐射强度可忽略 ($I \approx 0$) 时, 在放电区内, T_N 、 T_3 、 T_{12} 都随 x 的增加而迅速上升 (注意它们间绝对数值的差别)。介质流出放电区后, 它们随 x 变化的曲线都明显向下弯折。这反映出放电区内电激励的泵浦作用是提高各振动温度的重要因

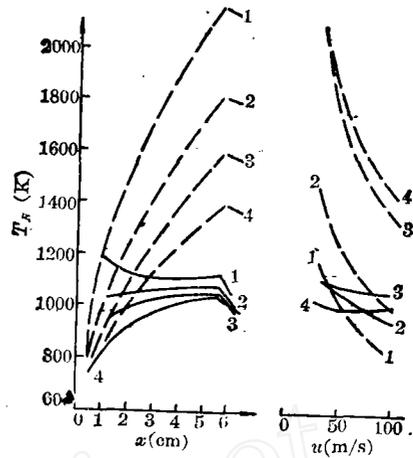


图4 N_2 振动温度 T_N 随位置 x 和流速 u 的变化

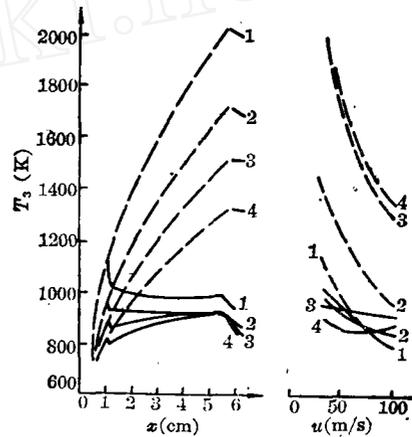


图5 $\text{CO}_2(001)$ 振动温度 T_3 随位置 x 和流速 u 的变化

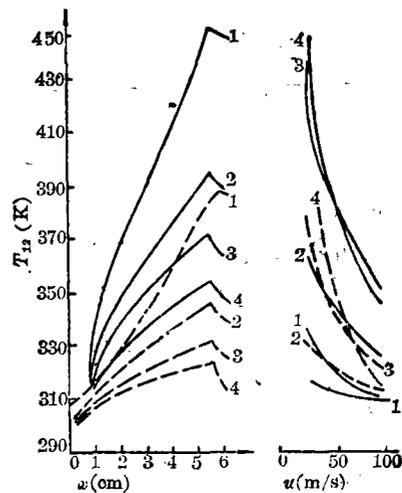


图6 $\text{CO}_2(100)$ 振动温度 T_{12} 随位置 x 和流速 u 的变化

素,当介质流速增大,它们随 x 的增加而在放电区内的上升和出放电区后的下降也都单调地变缓。这表明,流速有使各相应能态的泵浦和消激发效应向 x 增大的方向移动的作用。

2.5 $T_3(x) - T_{12}(x)$ 、 $T_N(x) - T_3(x)$ 、 $T_{12}(x) - T(x)$

在一定的稳定振荡条件下, $T_j - T_k$ 的高

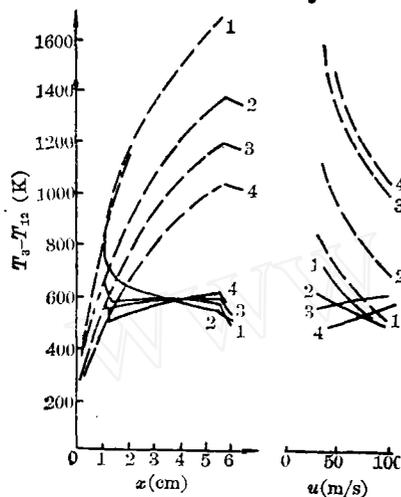


图7 $T_3 - T_{12}$ 随位置 x 和流速 u 的变化

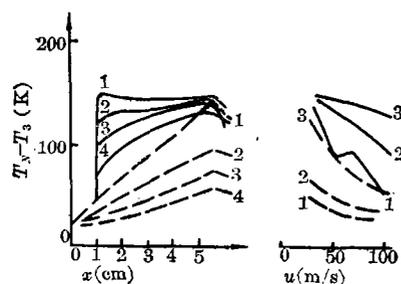


图8 $T_N - T_3$ 随位置 x 和流速 u 的变化

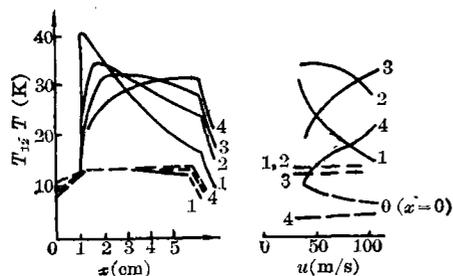


图9 $T_{12} - T$ 随位置 x 和流速 u 的变化

低能定性反映 $j-k$ 传能通道的难易。

由图7、8、9可见:当腔内辐射强度可忽略($I \approx 0$)时,在放电区内 $T_N - T_3$ 、 $T_3 - T_{12}$ 均随 x 的增加而增大,而在给定的 x 处,均随 u 的增大而减小。表明 x 的增大,不利于相应能态间的传能,而 u 的增大,有利于这种传能。 $T_{12} - T$ 基本上不随 x 和 u 改变,保持常量,呈稳定的准平衡状态。

但当光腔处于镜面损耗和输出耦合度一定的强辐射稳定振荡条件下,在光腔区内,随着 x 的增大, $T_N - T_3$ 、 $T_{12} - T$ 都有先增加继而逐渐变为减小的变化规律,而且随着 u 的增大,这种变化的转折点也沿流动向 x 增大的方向移动。 $(T_N - T_3) \sim u$ 曲线都随 u 的增大而减小,其陡度随 x 的增大而变缓。这表明在给定的稳定振荡条件下,介质流速的增大有利于 T_N 到 T_3 的能态间的传能。 $(T_{12} - T) \sim u$ 曲线是在光腔进口附近随 u 的增大而减小,随着 x 的增大,曲线由单调地下降变为先增加后减小,进而成为单调的增加,并且增加的程度也由先陡后缓变成愈来愈陡,这表明:在给定的稳定振荡条件下,介质流速对于 T_{12} 到 T 的能态间的传能作用是从有利逐渐转变为不利。对于 $(T_3 - T_{12}) \sim u$ 曲线,当 u 较小时,在光腔入口附近急骤下降,随着 x 的增大而逐渐变缓,当 u 大到一定程度,曲线出现上升段,而且随着 u 的增大,上升段也加宽。对于 $(T_3 - T_{12}) \sim u$ 曲线,在光腔入口附近,随 u 的增大而单调下降;当 x 增大,曲线逐渐转变为先降后升,乃至单调上升。这表明:在给定的稳定振荡条件下,随着 x 的增大,介质流速对于 T_3 到 T_{12} 的能态间的传能作用也是由有利逐渐转变为不利。

显然,这可反映介质流速对饱和增益,乃至输出特性影响的本质原因,对于有关传能速率及其随介质流速变化的定量分析,将另文具体计算、分析。