

连续波光泵远红外玻璃镀金波导激光器

苏锦文 熊守仁 史国良

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文介绍采用特殊工艺制作的光泵远红外玻璃镀金波导激光器,并讨论了其运转特性。这种新型金属波导激光器是一种性能优良的激光器,具有较高的远红外增益和泵浦吸收效率。

本文应用 CH_3OH 、 HCOOH 、 CH_3I 、 CD_3I 等工作物质,获得了 $70.6\ \mu\text{m} \sim 1.25\ \text{mm}$ 激光谱线的输出。

一、引 言

A. Scalabrin^[1] 等人应用 CD_3OD 工作物质获得了至今被认为波长最长(2.9 mm)的激光谱线。由于一般远红外开式谐振腔的费涅尔数小,激光衍射损耗严重。采用远红外过模波导谐振腔比采用开式腔具有远红外增益高、结构紧凑、适用于长波工作等优点。

目前普遍采用玻璃介质或熔融石英介质波导管,但由于这些波导管远红外传输损耗以及泵浦激光损耗较大,因而泵浦激光功率转换效率低。而铜或黄铜金属波导管,加工困难。作者研制了玻璃镀金波导管,具有很低的远红外传输损耗,同时玻璃镀金波导管可将衍射至波导壁的泵浦激光束折回腔内,增强了谐振腔内的泵浦激光功率密度,提高了远红外激光工作物质的泵浦吸收效率。本实验装置中,为充分利用远红外激光输出功率,设计了双光路激光输出窗口,为实际应用提供了方便条件。

二、两种效率

光泵远红外激光器研究中,提高泵浦激光功率转换效率始终是重要研究内容。谐振腔中泵浦激光功率 P_P 转换为远红外激光功率 P_{FIR} 的效率为

$$\epsilon = \frac{P_{FIR}}{P_P} = \frac{1}{1 + g_j/g_k} \cdot \frac{\nu_{FIR}}{\nu_P} \cdot \delta_{FIR} \cdot \delta_P \cdot g_0 \quad (1)$$

式中 g_j 、 g_k 分别为远红外激光辐射上、下转动能级的简并度; ν_{FIR} 、 ν_P 分别为远红外激光和泵浦激光的频率; δ_{FIR} 、 δ_P 分别为远红外激光器谐振腔在远红外波长和泵浦激光波长上的效率; g_0 为远红外激光气体工作物质的正增益因子。由速率方程可得^[2]:

本文 1986 年 1 月 23 日收到。

$$g_0 = 1 - \frac{h\nu_{FIR}}{kT} f_j \frac{\tau_v}{\tau_{d,j}} \quad (2)$$

式中, h 为普郎克常数; f_j 为激光上转动能级的玻尔兹曼因子; τ_v 为振动弛豫时间; $\tau_{d,j}$ 为转动碰撞时间。由式(2)可知, 远红外激光正增益条件为

$$\frac{h\nu_{FIR}}{kT} f_j \frac{\tau_v}{\tau_{d,j}} < 1. \quad (3)$$

式(1)表明, 连续波光泵远红外激光器性能的最大改进在于提高 δ_{FIR} 和 δ_P 两方面的效率。而

$$\left. \begin{aligned} \delta_{FIR} &= \frac{T}{T+A}; \\ \delta_P &= \frac{\alpha L m \alpha}{L m + A_P}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, T 为远红外激光耦合输出; A 为远红外在谐振腔内的损耗; α 是远红外激光气体工作物质的泵浦吸收系数; L 为谐振腔长度; m 为泵浦激光功率在腔内耗尽过程中泵光束往返的次数; A_P 为泵浦激光功率损耗。

式(4)表明, 提高 δ_{FIR} 关键在于降低远红外在谐振腔内的损耗和获得最佳耦合输出。

对于开式腔激光器, 首先要克服的是远红外衍射损耗。为此增大腔镜直径, 如 CH_3F 496 μm 激光器, 腔镜直径为 10 cm^[3]。作者采用腔镜直径 7 cm, 腔长 1.2 m 的远红外开式腔, 获得 70~570 μm 的激光谱线^[4]。

为得到较大激光增益并获得更长波长的激光谱线, 对于开式腔必须采用更大直径的腔

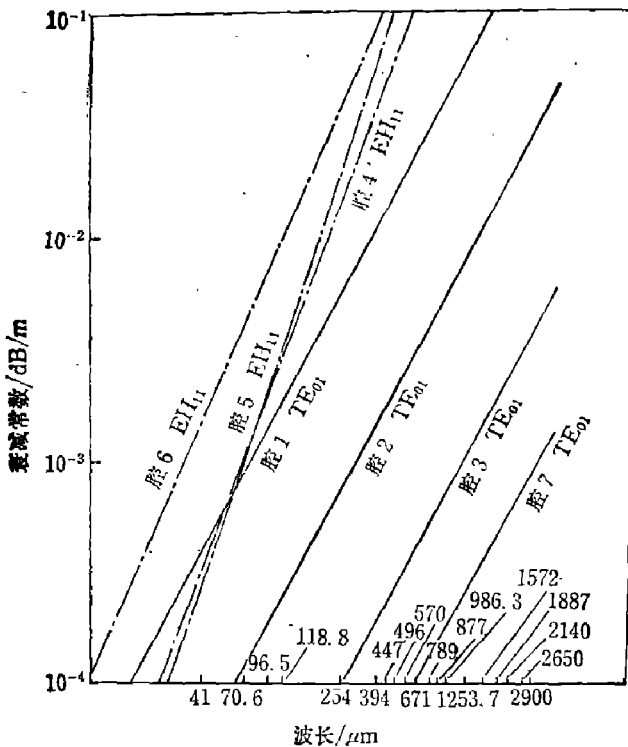


图1 几种波导管最低损耗模衰减常数与波长的关系(横坐标所标出的波长为光泵远红外激光器的强输出功率谱线)
Fig. 1 The attenuation constants of the lowest-loss mode in several tubes as a function of the wavelength

镜, 以维持较大的费涅尔数。但增大腔镜直径, 一方面会使激光器体积变得庞大; 另一方面, 由于远红外激光器中工作气体激发振动态的消激发是通过气体扩散过程或振动——平动 (V-TR) 过程将激发振动态的能量传递给管壁的, 而谐振腔腔镜直径增大, 使消激发过程缓慢, 因而 τ_v 增大。由式(2)可见, 降低了激光增益, 甚至使式(3)不能满足, 呈现振动弛豫瓶颈效应 (bottleneck effect), 致使增益为零。

D. T. Hodges^[5] 最早研究了光泵远红外 CH_3OH 波导谐振腔。由于波导壁对远红外电磁场的约束作用, 降低了传输损耗。远红外波导激光器具有结构紧凑、增益高等优点。

作者在文献[6]中详细地计算并讨论了应用于光泵远红外波导激光器的空心圆柱金属波导管及玻璃介质波导管在亚毫米波及近毫米波谱区的传输损耗。这些波导管都是过模波导, 即满足 $\lambda_0 \ll 2A$ 条件。其中 λ_0 为自由空间波长, $2A$ 为波导管直径。图1是表1列出的几种光泵远红外波导激光器所采用的波导管衰减

常数和波长的关系曲线。金属波导中最低损耗模是 TE_{01} 模; 玻璃介质波导中最低损耗模是 EH_{11} 模。

作者研制了镀金层厚度 $>0.3 \mu\text{m}$ 、直径 40 mm 的空心圆柱玻璃镀金波导管^[6], 它具有很低的亚毫米波和短毫米波传输损耗。例如, 对 TE_{01} 模, 波长 $118.8 \mu\text{m}$ 的衰减常数为 $1 \times 10^{-5} \text{dB/m}$; 波长 $496 \mu\text{m}$ 为 $6 \times 10^{-5} \text{dB/m}$; 波长 1.25mm 为 $2.5 \times 10^{-4} \text{dB/m}$ 。

另一方面, 光泵远红外激光谐振腔 δ_P 值低是造成低的远红外输出和低的转换效率的主要原因之一^[7]。由式(4)可见, δ_P 是远红外激光谐振腔中远红外激光工作物质的泵浦吸收效率。

作者曾通过高斯光束在腔内的往返变换, 给出了亚毫米波光泵激光器泵光束吸收和损耗的普遍计算方法^[8], 并具体设计了具有较高泵浦吸收效率 δ_P 的远红外开式腔激光器^[9]。应用同样原理, 改变若干具体条件, 我们对平面平行腔结构也进行了计算(另文报道)。表 1 中输出耦合孔直径($2A_{02}$)为零值, 表示采用介质耦合输出镜。表 2 是表 1 所列各种波导管泵浦吸收效率及各项损耗率的计算结果。

计算表明, 波导管中泵浦的最大损耗是泵光束衍射至波导壁的损耗。尤其对于小管径和低气压下工作, 其损耗更大。测量表明, 玻璃镀金波导管镀金层对 $9 \sim 11 \mu\text{m}$ 波长具有 $>72\%$ 的反射率, 因此波导壁可将衍射的泵光束绝大部分能量再折回腔内, 从而极大地提高了 δ_P 值。考虑到镀金波导管壁对泵光束的作用, 表 2 中腔 7 之 δ_P 约为 76% , 而衍射损耗

表 1 几种波导激光器的腔参数

Table 1 Structural parameters of different FIR waveguide laser

腔号	腔长 $L(\text{mm})$	输入耦合孔直径 $2A_{01}(\text{mm})$	输出耦合孔直径 $2A_{02}(\text{mm})$	波导管直径 $2A(\text{mm})$	波导材料
1 ^[1]	1600	1.5	1.5	6	铜
2 ^[10]	1600	1.5	3	12	铜
3 ^[10]	1600	1.5	3	24	铜
4 ^[7]	1100	5	0	38	玻璃
5 ^[11]	1500	2	4	34	玻璃
6*	1500	2	0	30	玻璃
7**	1200	1.5	3	40	玻璃镀金

* Apollo lasers Inc.说明书用的腔

** 本文使用的腔

表 2 波导激光器中泵浦吸收效率和损耗率*

Table 2 Pump absorption efficiency and relevant losses of the waveguide laser

腔号	泵光束在腔内往返次数	泵浦吸收效率 $\delta_P(\%)$	耦合孔逸出损耗率($\%$)	衍射至波导壁损耗率($\%$)	腔镜吸收损耗率($\%$)
1	2	15.6	0.4	84.0	0.1
2	2	17.7	1.5	80.4	0.4
3	3	24.5	1.5	72.6	1.3
4	4	28.7	2.1	65.6	3.6
5	3	29.3	3.2	65.3	2.3
6	3	27.8	0.1	70.0	2.0
7	4	30.0	3.0	68.7	3.4

* 计算中 $\alpha=7.5 \times 10^{-6} \text{mm}^{-1} \text{Pa}^{-1}$, $\lambda=9.55 \mu\text{m}$, 气体压力 $P=13.33 \text{Pa}$, 输入光腰半径 $\omega_0=0.3 \text{mm}$

降到 18%。同样腔 1、2、3 由于磨光铜管壁的作用, δ_P 值也比表 2 中所列数值有所增加^[10]。

三、实验与装置

实验装置如图 2 所示。

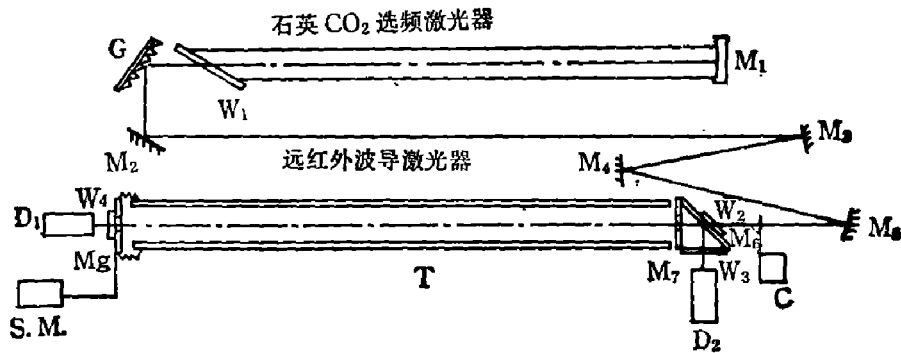


图 2 光泵远红外玻璃镀金波导激光器实验装置

Fig. 2 The experimental setup of the optically pumped FIR waveguide laser with gold-coated glass tube

图中 CO_2 石英选频激光器腔长为 190 cm; 放电区长度为 166 cm; 放电管直径为 12 mm; 凹腔镜 M_1 曲率半径为 5.9 m。光栅 G 为不锈钢基底原刻 120 条/mm, 闪耀波长约为 $10 \mu\text{m}$, 一级衍射效率约为 65%。 W_1 是 ZnSe 材料布氏窗。 CO_2 激光由与光栅垂直的反射镜 M_2 输出。 M_2 与光栅台联动, 便于光路调节。旋转光栅台, 可获得 85 条以上 CO_2 激光谱线。 CO_2 激光器 $9P(20)$ 谱线输出功率约为 30 W; $9P(36)$ 谱线输出功率约为 20 W。采用 0°C 水(冰与水混合物)冷却 CO_2 激光器, 可增加 33% 以上的激光功率, 强支线输出功率可达 47 W。

CO_2 泵光束经反射镜 M_3 、 M_4 反射后, 被凹反射镜 M_5 聚焦。 M_5 曲率半径 $R=792.28 \text{ mm}$, 聚焦的泵光束通过 ZnSe 窗口 W_2 、反射镜 M_6 的中心孔以及反射镜 M_7 的耦合孔进入波导谐振腔, 泵光束输入光腰半径约为 0.3 mm。

反射镜 M_6 与远红外波导激光器光轴成 45° 角, 其中心孔直径约为 1.8 mm; 采用我所研究的硬铝复制金工艺制作, 镜面光学指标可达到: $N=1$, $\Delta N=0.2$, B 约为 III 级 (N 为光圈, ΔN 为光圈局部误差, B 为镜面光洁度)。由波导腔镜 M_7 、 M_8 和直径 40 mm 的玻璃镀金波导管 T 构成过模金属波导谐振腔。其中腔镜 M_7 、 M_8 也是采用硬铝复制金工艺制作。 M_7 镜上输入耦合孔直径约为 1.5 mm; M_8 镜上输出耦合孔直径约为 3 mm。 M_8 通过波纹管与波导管相接被安装在测微平台上, 用扫描电机 S. M. 驱动, 可使远红外波导激光器腔长连续调谐。 M_7 与波导管端面间隙约为 2 mm; M_8 与波导管端面间隙约 6 mm。作者在文献 [6] 中详细介绍了玻璃镀金波导管的制作与性能。波导激光器腔长 $L=1200 \text{ mm}$ 。 W_3 、 W_4 都是 Z 向切割的晶体石英窗口。 D_1 、 D_2 是我所研制的 GAT302(PV) 型远红外热释电探测器, 被安装在 W_3 、 W_4 窗口处作远红外激光输出双光路接收。图 2 中 C 为调制盘, 调制频率为 10 Hz 或 80 Hz。热释电探测器 D_1 、 D_2 输出信号分别经前置放大器放大后, 由远红外激光测试仪、示波器、 x - y 记录仪等显示或记录。其中 D_1 输出信号约为 D_2 输出信号的 5 倍, D_2 可作为参考信号或监视信号。若应用 D_1/D_2 信号检测, 可得到更为稳定的测量结果。

四、实验结果和讨论

分别用甲醇、甲酸、甲基碘、氘化甲基碘等为工作物质, 获得了波长 $70.6 \mu\text{m} \sim 1.25 \text{mm}$ 多条远红外激光谱线(见表3)。实验中发现, 氘化甲基碘容易析出游离的碘, 并且挥发较快。

表3 玻璃镀金波导激光器输出谱线

Table 3 FIR laser lines of the waveguide laser with gold-coated glass tube

谱线波长(μm)	工作物质	泵浦谱线	激光功率相对值	工作气压(Pa)
70.6	CH ₃ OH	9P(34)	92	7.47
96.6	CH ₃ OH	9R(10)	36	13.33
118.8	CH ₃ OH	9P(36)	100	12.67
254	CH ₃ OH	10R(38)	36	12.67
432.6	HCOOH	9R(20)	43	10.00
444.4	CD ₃ I	9R(32)	25	13.33
447	CH ₃ I	10P(18)	43	9.33
570	CH ₃ OH	9P(16)	13	12.00
1253.7	CH ₃ I	10P(38)	6	12.00

图3是玻璃镀金波导激光器波长 $570 \mu\text{m}$ 和 1.25mm 激光输出的腔长扫描调谐曲线, 并同时标出远红外开式腔激光器波长 $570 \mu\text{m}$ 的腔长扫描曲线。

对于 TE_{nm} 模, 波导波长 λ_g 与自由空间波长 λ_0 关系为^[18]

$$\lambda_g = \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{CE}} \right)^2 \right]^{-1/2}; \quad (5)$$

式中 $\lambda_{CE} = 2\pi a / u'_{nm}$; $2a$ 为波导管直径; u'_{nm} 为第 n 阶贝塞尔函数一阶导数 $J'_n(u')$ 的第 m 个不为零的根, 即满足方程 $J'_n(u'_{nm}) = 0$ 。

对于过模波导 ($\lambda_0 \ll 2a$), 式(5)可表示为

$$\lambda_g = \lambda_0 (1 + \beta); \quad (6)$$

式中 $\beta = \frac{1}{2} (\lambda_0 / \lambda_{CE})^2$ 。对于 TE_{01} 模直径 40mm 的波导激光器, 波长 λ_0 与 β 计算值的关系如表4所示。

由表4可见, 本实验装置的工作谱区, 均有 $\lambda_g \approx \lambda_0$, 因此满足 TE_{01} 模谐振的条件, 所对应的腔长 L_{q01} 为

$$L_{q01} = q\lambda_g(\text{TE}_{01})/2 \approx q\lambda_0/2; \quad (7)$$

式中 q 为纵模指数, $q \gg 1$ 。由此可见, 应用腔长扫描法可近似测量远红外波导激光谱线的波

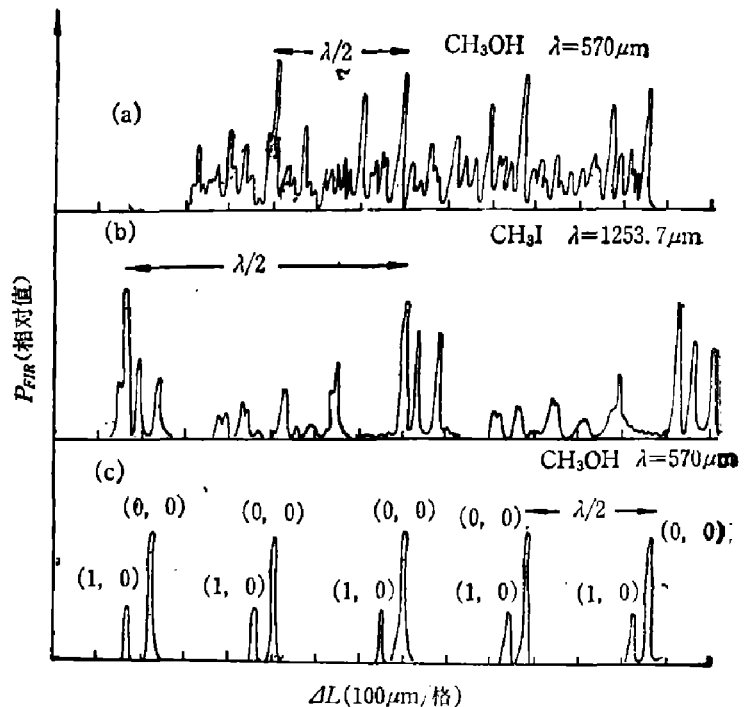


图3 远红外激光谱线腔长调谐扫描曲线
Fig. 3 Cavity tuning curves for the $570 \mu\text{m}$ and 1.25mm lines

表 4 TE₀₁ 模直径 40mm 波导 β 值

Table 4 Values of β at different λ₀ for the waveguide of 40mm diameter in the TE₀₁ mode

λ ₀ (μm)	40	100	400	570	1000	1253	2000
β	7.4×10 ⁻⁷	4.6×10 ⁻⁶	7.4×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻⁴	4.6×10 ⁻⁴	7.3×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁻³

表 5 远红外波导激光谱线波长测量

Table 5 Measurements of FIR laser lines

谱线波长(μm)	波长测量(平均值)(μm)	相对误差(%)	工作物质	泵浦谱线
96.5	102.0	3.5	CH ₃ OH	9R(10)
570.5	567.8	0.46	CH ₃ OH	9P(16)
1253.7	1262.5	0.70	CH ₃ I	10P(32)

长,其测量结果见表 5。

由图 3 可看出,玻璃镀金波导激光器腔长扫描曲线中通常出现较强的多模运转,常常难

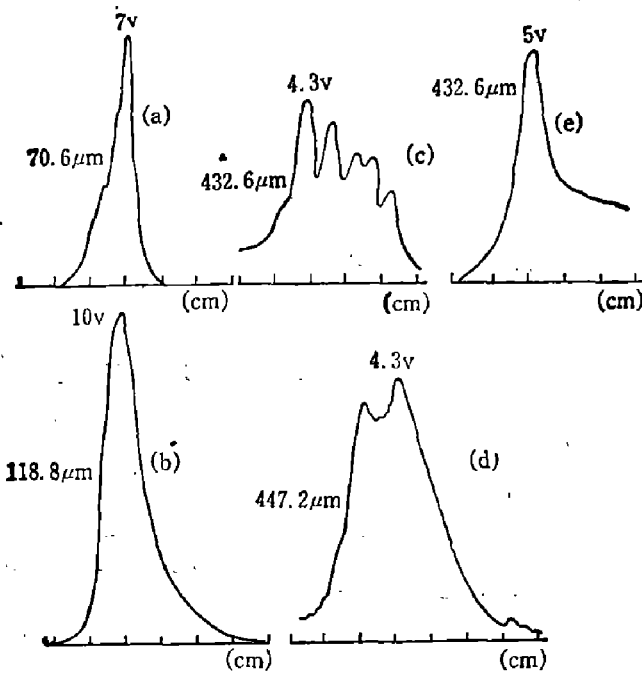


图 4 远红外激光输出横向强度分布

横坐标为热释电探测器相对输出窗口横向扫描的距离;纵坐标为远红外激光输出功率相对值。图中标出热释电探测器输出电压信号的峰值

Fig. 4 The transverse intensity profile of the FIR laser line across the output window

以从腔长扫描曲线上分清最低损耗模TE₀₁的位置。然而开式腔激光器腔长扫描曲线中,虽然也出现高阶模,但一般强度较低,由腔长扫描曲线极其容易判断TEM₀₀模位置^[4]。

使热释电探测器相对于远红外激光输出窗口横向扫描运动,可得到远红外激光谱线的输出模式(横向强度分布),如图4所示。图中A、B、D是M₈镜中心孔直径为3mm、D₁距离M₈镜窗口约为40mm处的横向扫描测试结果;C是M₈镜无输出孔、M₇镜中心孔直径为5mm、D₂距离W₈窗口40mm处的横向扫描测试结果;E是对远红外开式腔实验装置^[4]的测试结果。

实验表明,对70.6 μm、118.8 μm(图4中A与B)激光谱线测量,得到接近高斯分布的结果;与开式腔中432.6 μm(图4中E)的测试结果相近;而镀金波导腔

432.6 μm、447.2 μm)谱线的测量结果即不同,尤其是图4中c,可得到多峰值分布。

图4的分布曲线可作如下解释:玻璃镀金波导腔对70.6 μm、118.8 μm激光谱线,其费涅尔数分别为4.76和2.8,可以认为仍是开式腔结构,因而振荡模是近TEM₀₀模;对于432.6 μm、447.2 μm等波长,其费涅尔数分别为0.77和0.75,这只能是波导激光的作用。图4中D接近TE₀₁模分布;而图4中c由于输出耦合孔及M₈镜中心孔对TE₀₁模的干扰以及波导弯曲(非轴心对称)等,使激光输出分布发生变形,得到发散的多峰输出分布。

若采用混合耦合输出镜^[7]或铜网格输出镜将可得到均匀输出^[14]。

实验中还发现,当波导激光器动腔镜远离波导管端面进行腔长扫描时,腔长扫描曲线中远红外激光输出的峰值逐步下降。这是由于玻璃镀金波导管内 TE_{01} 模在波导管端面的损耗随着动腔镜远离而迅速增大的缘故。 TE_{01} 模在波导管端面腔镜边缘的损耗比 EH_{11} 模大得多。限于实验条件,波导管端口平面与腔镜 M_7 、 M_8 间隙较大。为此,我们曾将动腔镜改为“活塞”型,腔镜可在波导管端口内平移。但由于技术原因,腔镜“活塞”与波导管内径不能紧密配合,尚未解决间隙问题。

五、结 语

玻璃镀金波导激光器对于提高远红外增益,尤其对于提高泵浦吸收效率 δ_P 有明显的优点。但实验装置中,由于存在输出耦合孔不能对 TE_{01} 模有效地耦合输出等原因,未能达到本设计最好的性能。由式(4),预计采用新的耦合输出方式,如介质耦合输出镜^[7]等,将会有所改观。

致谢——本所过柱南同志提供复制金镜;陈宁铨同志提供 $ZnSe$ 材料;陈祖培、马述侃、马继富同志提供热释电探测器及其测量参数,作者一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Scalabrin A. et al., *Conf. Digest Ninth International Conference on Infrared and MM Waves*, 1984, 505.
- [2] Tueker J. R., *Conf. Digest International Conf. Submillimeter Waves and Thier Applications*, Atlanta, Ga, IEEE Cat. No. 74CH0856-5 MIT, 1974, 17.
- [3] Chang T. Y., *Appl. Phys. Lett.*, **19** (1971), 4: 103.
- [4] 苏锦文等, *红外研究*, **3**(1984), 1:26.
- [5] Hodges D. T. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973), 5:252.
- [6] 熊守仁等, *红外研究*, **5**(1986), 3: 161
- [7] Hodges D. T. et al., *IEEE J. Quantum Electronics*, (1977), 6: 491,
- [8] 苏锦文等, *红外研究*, **3**(1984), 2:95,
- [9] Su Jinwen et al., *Conf. Digest Ninth International Conf. on Infrared and MM Waves*, 1984, 512.
- [10] Atsuo Tanaka et al., *Japan J. Appl. Phys.*, **13** (1974), 9:1491.
- [11] 傅恩生, *光学学报*, **2**(1982), 1:9.
- [12] Roser H. P., et al., *International J. Infrared and MM-Waves*, **3** (1982), 6:839.
- [13] Wood R. A. et al., *Infrared Phys.*, **16** (1976), 201.

A CW OPTICALLY PUMPED FIR WAVEGUIDE LASER WITH GOLD-COATED GLASS TUBE

SU JINWEN, XIONG SHOUREN, SHI GUOLIANG

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A CW optically pumped gold-coated glass waveguide FIR laser with higher FIR gain and absorption efficiency developed by special technique is reported. Its characteristics are investigated. FIR lines in the wavelength range from $70.6\mu\text{m}$ to 1.25mm using CH_3OH , HCOOH , CH_3I and CD_3I as working materials are obtained.