

# 亚毫米波光泵激光器泵光束吸收效率

苏锦文 史国良 叶妙根

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——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与损耗的普遍计算方法,这些计算是亚毫米波激光器结构设计中必须考虑的。通过计算,比较了几种谐振腔,得到较高泵光束吸收效率的设计,并给出泵光束最佳输入条件。利用本设计实验装置,获得并测量了从70.6~570  $\mu\text{m}$  多条亚毫米波激光谱线。

## 一、引言

亚毫米波光泵激光器一般采用单模  $\text{CO}_2$  选频激光器作为泵浦源。T. Y. Chang 最早采用了具有单圆耦合孔的亚毫米波开式腔结构<sup>[1]</sup>。为了尽可能降低耦合孔损耗,泵光的输入和亚毫米波激光的输出用同一耦合孔。由于激光气体分子对泵光的吸收系数低,泵光必须在腔内往返多次才可达到一定的吸收。然而,泵光在腔内的每一次往返,都存在泵光束的耦合孔逸出损耗、腔镜对泵光束的吸收损耗以及泵光束衍射至管壁的损耗。因而对亚毫米波激光跃迁有贡献的泵光束功率仅是输入腔内泵光束功率的一部分。频率  $\nu_p$  的中红外泵光功率  $P_p$  转换为频率  $\nu_{\text{SMM}}$  的亚毫米波激光功率  $P_{\text{SMM}}$ ,其理论极限可表示为

$$P_{\text{SMM}} = \frac{1}{2} \frac{\nu_{\text{SMM}}}{\nu_p} \cdot \delta \cdot P_p \quad (1)$$

其中  $\delta$  为泵光束吸收效率。显然,泵光束吸收效率  $\delta$  与谐振腔的几何结构参数有关。例如对于半共焦腔,泵光束仅在腔内少数次往返便逸出腔外<sup>[2]</sup>。因此,亚毫米波光泵激光器设计中,一个最基本的设计思想就是要考虑谐振腔对泵光束的吸收效率<sup>[2]</sup>。低的泵浦吸收效率是造成低的亚毫米波激光输出和低的转换效率的主要原因之一。

## 二、原理

我们考虑如图1所示的谐振腔结构。

中红外泵光束  $\text{TEM}_{00}$  模通过光学系统会聚后将其光腰成象于平腔镜耦合孔平面上。

泵光束对平凹腔的往返变换矩阵  $T$  为

本文1983年11月3日收到。

$$T = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-2L/R & 2L-2L^2/R \\ -2/R & 1-2L/R \end{pmatrix}, \quad (2)$$

泵光束  $n$  次往返后有

$$\left. \begin{aligned} q_f^{(n)} &= \frac{A q_f^{(n-1)} + B}{C q_f^{(n-1)} + D}, \\ q_c^{(n)} &= q_f^{(n)} + L, \\ q_f^{(0)} &= q_0 = ik\omega_0^2/2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $q_f^{(n)}$ 、 $q_c^{(n)}$  分别为平、凹腔镜上  $n$  次往返后的复光束参数;  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  是泵光束波长;  $\omega_0$  是泵光束在耦合孔平面上的输入光腰半径。

因此,  $n$  次往返后, 平、凹腔镜上泵光束的光斑半径  $\omega_f^{(n)}$ 、 $\omega_c^{(n)}$  分别为

$$\left. \begin{aligned} \omega_f^{(n)} &= \left[ \frac{2}{I[q_f^{(n)}] \cdot k} \right]^{1/2}, \\ \omega_c^{(n)} &= \left[ \frac{2}{I[q_c^{(n)}] \cdot k} \right]^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中  $I[q_f^{(n)}]$ 、 $I[q_c^{(n)}]$  分别表示复光束参数  $q_f^{(n)}$  和  $q_c^{(n)}$  的虚部。联立第(2)、(3)、(4)式即可计算

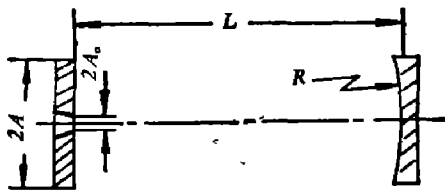


图1 单圆耦合孔开式腔结构  
2A-腔镜直径; 2A<sub>0</sub>-耦合孔直径;  
R-腔镜曲率半径; L-腔长

出泵光束在腔内各次往返过程中分别于平、凹腔镜上的光斑尺寸。于是, 可对泵光束吸收与损耗进行理论计算。计算中作了下列近似: (1) 因耦合孔的费涅尔数很小, 可认为泵光束不因耦合孔逸出而改变其高斯分布; (2) 激活介质对泵光束的吸收是通过光轴上的路程(近轴条件); (3) 泵光束为小信号输入, 即介质吸收系数可近似为常数(与光强无关)。泵光束 TEM<sub>00</sub> 模电矢量振幅为

$$|E(xyz)| = C \frac{\omega_0}{\omega} e^{-(x^2+y^2)/\omega^2(z)}, \quad (5)$$

在  $z$  截面上激光光强分布为

$$I(r, z) = D/\omega^2 e^{-2r^2/\omega^2}. \quad (6)$$

其中  $D$  是常数,  $r = \sqrt{x^2+y^2}$ ;  $\omega$  是光斑半径;  $\omega_0$  是中红外泵光束光腰半径。

由此, 半径为  $A_0$  的耦合孔逸出损耗率为

$$\varphi_H = \frac{\int_0^{A_0} I ds}{\int_0^\infty I ds} = [1 - e^{-2A_0^2/\omega^2}]. \quad (7)$$

半径为  $A$  的腔镜衍射损耗率为

$$\varphi_D = \frac{\int_A^\infty I ds}{\int_0^\infty I ds} = e^{-2A^2/\omega^2}. \quad (8)$$

腔镜单次反射的损耗率为

$$\varphi_R = 1 - \rho_0. \quad (9)$$

单程气体介质吸收率为

$$\varphi_{AB} = [1 - e^{-\alpha LP}]. \quad (10)$$

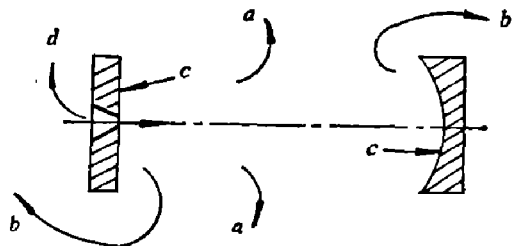


图2 每一往返过程中的泵光束  
a-气体介质吸收; b-腔镜衍射损耗; c-腔镜  
单次反射损耗; d-腔镜耦合孔逸出损耗

在上列表达式中,  $s$  代表面积;  $\rho$  是腔镜反射系数;  $\alpha$  是气体对泵光的吸收系数;  $L$  代表腔长;  $P$  是气体压力。

对于每一往返过程, 都存在图 2 所示的过程。应用电子计算机对每一往返过程进行计算, 并累计其结果, 便可得到谐振腔的泵光束吸收效率及各项损耗。

### 三、计算结果与分析

计算中以  $\text{CH}_3\text{F}$  气体分子  $496\ \mu\text{m}$  亚毫米波激光为例。  $\text{CH}_3\text{F}$  气体对  $\lambda=9.55\ \mu\text{m}$  ( $9P[20]$  谱线) 激光的吸收系数  $\alpha=1\times 10^{-6}\ \text{mm}^{-1}\cdot\text{mTorr}^{-1[3]}$ , 腔镜反射系数取  $\rho=0.98$ 。

#### 1. 泵光束输入条件对 $\delta$ 的影响

给定不同泵光输入光腰半径  $\omega_0$ , 可得到不同的泵光束吸收效率  $\delta$ , 由图 3 所示。表 1 是图 3 中各腔的结构参数。由图 3 可见, 泵光束的吸收效率  $\delta$  与输入条件有关。对于确定结构的谐振腔, 有一个最佳泵光输入光腰半径。这一结果是预料之中的。因为对于一个确定结构的谐振腔, 仅对应于某一个确定发散角的高斯光束才能达到最大的总介质吸收率。发散角过大, 泵光腔镜衍射损耗大; 发散角过小, 泵光束耦合孔逸出损耗大。因此必然存在一个最佳输入光腰半径  $\omega_{00}$ , 实验中应注意满足这一最佳输入条件。

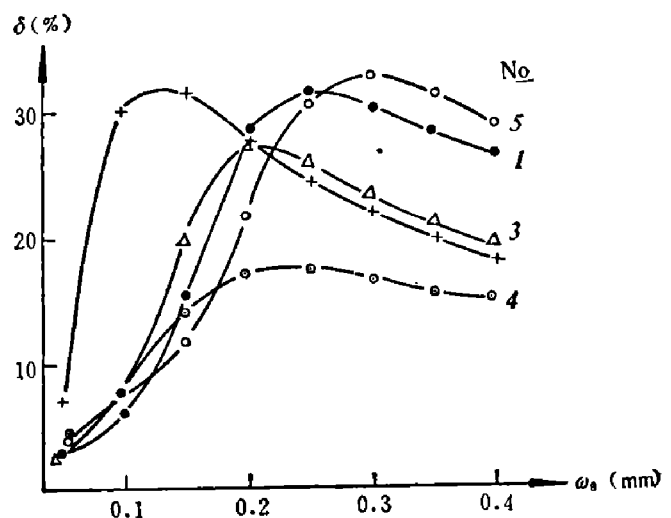


图 3 泵光吸收效率与输入光腰半径的关系

表 2 是最佳输入条件下, 泵光束吸收效率与各种损耗的计算数据。

表 1 所计算的腔的结构参数

腔	凹腔镜 曲率半径 $R(\text{mm})$	腔长 $L$ (mm)	$L/R$	腔镜半径 $A$ (mm)	耦合孔 半径 $A_0(\text{mm})$	气体压力 (mTorr)	对 $\lambda=496\ \mu\text{m}$ 亚毫米波参数			
							费涅尔数	光腰半径 (mm)	光斑半径 (mm)	模体积 ( $\text{cm}^3$ )
1 <sup>[1]</sup>	2300	930	0.4	23.75	0.6	20	1.22	13.35	17.3	638.49
2 <sup>[4]</sup>	2300	930	0.4	50	1.08	20	5.42	13.35	17.3	638.49
3 <sup>[5]</sup>	1890	770	0.41	23.75	0.6	20	1.48	12.11	15.73	435.95
4 <sup>[6]</sup>	3500	1200	0.34	35	2.5	20	2.06	16.2	19.98	1160.78
5 <sup>1)</sup>	5200	1200	0.28	35	1.25	20	2.06	18.71	21.28	1449.01

1) 本文设计选择的亚毫米波激光器开式腔

表2 泵光束吸收效率及其损耗

腔	最佳泵光输入光腰 $\omega_{00}$ (mm)	泵光束在腔内往返次数	泵光束吸收效率 (%)	耦合孔逸出损耗率 (%)	腔镜衍射损耗率 (%)	腔镜吸收损耗率 (%)
1	0.25	54	31.4	28.9	6.9	32.7
2	0.15	46	31.8	34.4	0.6	33.1
3	0.20	59	27.2	29.3	9.2	34.3
4	0.25	5	17.4	67.6	2.1	12.9
5	0.30	19	33.0	34.9	5.7	26.4

### 2. 凹腔镜曲率对 $\delta$ 的影响

图4是对5号腔改变凹腔镜曲率半径  $R$  进行计算的结果, 其泵光束吸收效率  $\delta$  为最佳输入光腰半径  $\omega_{00}$  条件下所对应的值。图4表明, 共振腔泵光束吸收效率随凹腔镜曲率  $R$  的变化而差异很大。尤其对于半共焦腔, 其  $\delta$  值最低, 仅有 8.8%。

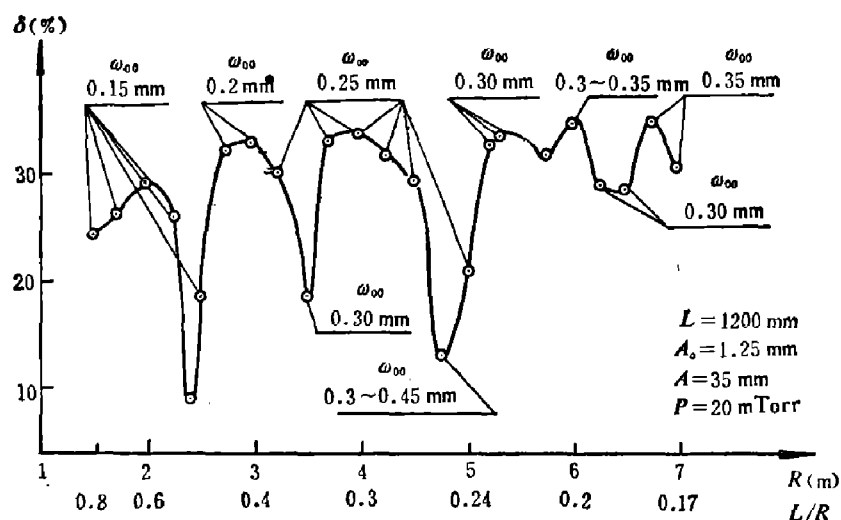


图4 泵光束吸收效率  $\delta$  与凹腔镜曲率半径  $R$  的关系

### 3. 激光工作气压对 $\delta$ 的影响

计算表明, 对于确定结构的腔, 其泵光束最佳输入光腰半径几乎是确定的数值, 不随气压变化而改变。表3是1号至4号腔的结果, 图5是5号腔的结果。计算表明,  $\delta$  随气压升高而增大。但气压的选择还受到工作物质激发振动态中转动能级热化条件的限制<sup>[7]</sup>。对于开式腔, 最佳气压数值须由实验确定。

表3 不同气压下的  $\delta$  值 (%)

腔	气体压力 (mTorr)				最佳输入光腰半径 $\omega_{00}$ (mm)
	16	20	35	100	
1	26.5	31.4	46.0	74.6	0.25
2	26.7	31.8	46.6	75.7	0.15
3	22.8	27.2	28.2	69.2	0.20
4	14.2	17.4	47.6	59.5	0.25

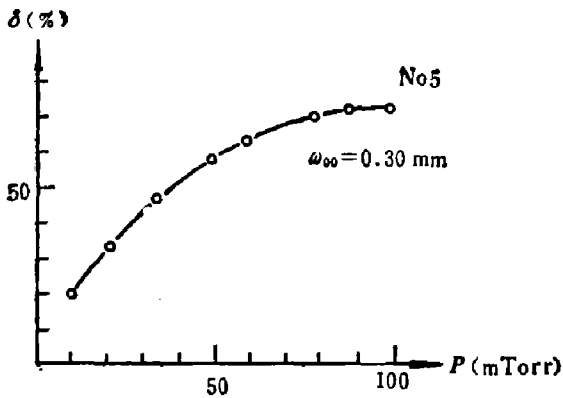


图5  $\delta$  与气压的关系

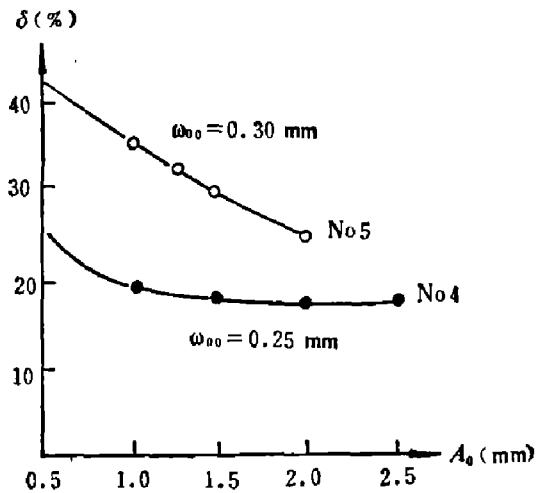


图6  $\delta$  与耦合孔半径  $A_0$  的关系

#### 4. 耦合孔半径 $A_0$ 对 $\delta$ 的影响

图6是对4、5号腔改变耦合孔半径所得到的计算结果。结果表明，随着耦合孔半径  $A_0$  的增大， $\delta$  值下降。这是因为耦合孔半径增大使其逸出损耗增大的缘故。

另一方面，当耦合孔半径变化时，泵光束在腔内耗尽所需的往返次数也有所变化。同时其最佳输入光腰半径  $\omega_{00}$  也会有所变化。对于低吸收系数  $\alpha = 1 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1} \cdot \text{mTorr}^{-1}$  条件下，对5号腔进行计算，得到图7所示结果。这一结果表明，随耦合孔半径增大，最佳输入光腰半径也相应减小。这意味着，耦合孔增大时，要求泵光束在腔内有更大的发散才能得到较大的泵光束吸收效率。

综合我们的计算结果，从泵光束吸收效率来看，应尽可能选择小的耦合孔半径。但过小的耦合孔半径又会影响亚毫米波激光的功率输出。为能兼顾到这两方面的匹配，须进一步用实验选择。

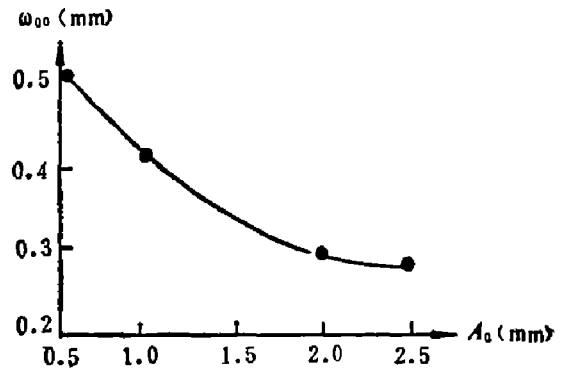


图7 最佳输入光腰半径  $\omega_{00}$  与耦合孔半径的关系

### 四、计算程序的检验

用半共焦腔特例检验计算程序是十分有效的方法。对于半共焦腔，泵光束在腔内仅可往返少数次即逸出腔外。表4数据证明了预期的结果。

由表4可看出，在半共焦腔条件下，泵光束吸收效率  $\delta$  很低，而耦合孔逸出损耗率达81~85.7%；当输入泵光束光腰半径很小时，如  $\omega_0 = 0.05 \sim 0.10 \text{ mm}$ ，由于泵光束发散很大，其腔镜衍射损耗率很大。以上结果可验证计算方法和程序的正确性。

### 五、实验结果

由以上计算结果并考虑到加工条件，我们选择了表1中5号腔结构参数。对于我们实

表4 半共焦腔的计算( $L=1200$  mm,  $A_0=1.25$  mm,  $R=2400$  mm,  $P=20$  mTorr)

泵光输入光腰半径 (mm)	泵光在腔内 往返次数	泵光束吸收效率 (%)	耦合孔逸出损耗 (%)	腔镜衍射损耗 (%)	腔镜吸收损耗 (%)
0.05	2	3.6	4.3	91.0	1.1
0.10	2	7.0	50.9	38.0	4.0
0.15	2	8.7	81.5	4.4	5.4
0.20	2	8.8	85.4	0.2	5.6
0.25	2	8.8	85.6	0	5.6
0.30	2	8.8	85.7	0	5.5
0.35	2	8.8	85.8	0	5.5

验中采用的  $\text{CO}_2$  选频激光器, 用  $f=394.14$  mm 凹反射镜, 可得到  $\omega_{00}=0.30$  mm 的最佳输入光腰半径。我们分别用甲醇、甲酸、甲基氟作为工作气体介质, 获得并测量了从  $70.6 \mu\text{m}$  ~  $570 \mu\text{m}$  亚毫米波激光谱线<sup>[8]</sup>。表5列出用腔长扫描方法测量波长的结果。其中亚毫米波激光输出功率是用定标热释电探测器测量的结果。

表5 亚毫米波激光谱线测量结果

谱线波长 $\lambda(\mu\text{m})$	波长测量 平均值 $\bar{\lambda}(\mu\text{m})$	误差 $\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	亚毫米波 激光功率 (mW)	气体分子	泵光谱线	气体压力 (mTorr)
70.6	72.5	1.9	0.5	$\text{CH}_3\text{OH}$	9P(34)	53
96	98.4	2.4	2	$\text{CH}_3\text{OH}$	9E(10)	78
118.8	119.0	0.2	15	$\text{CH}_3\text{OH}$	9E(36)	100
246	242	4	2	$\text{CH}_3\text{OH}$	10E(38)	68
254	255.5	1.5	2	$\text{CH}_3\text{OH}$	10E(38)	68
393.6	394.2	0.6	1.8	$\text{HCOOH}$	9E(18)	70
394.2	392.6	1.6	0.8	$\text{HCOOH}$	9E(16)	50
432.6	431.2	1.4	2	$\text{HCOOH}$	9E(20)	75
433.0	440.0	7.0	1.7	$\text{HCOOH}$	9E(18)	70
496	490.0	5.8	4	$\text{CH}_3\text{F}$	9P(20)	20
513.2	517.5	4.2	1.3	$\text{HCOOH}$	9E(24)	70
570	573.4	3.4	0.3	$\text{CH}_3\text{OH}$	9P(16)	50

应用本实验装置, 提供毫瓦级  $496 \mu\text{m}$  亚毫米波相干辐射源, 采用我所研制的 GaAs 肖特基二极管 4mm 混频外差接收系统, 还成功地进行了亚毫米波的混频外差接收实验。

致谢——在使用电子计算机中, 得到本所周言木、吴俊生、殷俊国、毛菊英、张园章等同志的帮助, 作者一并致谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Chang T. Y., *Opt. Commun.*, **1** (1970), 9: 423.
- [ 2 ] Hodges D. T., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-13** (1977), 6: 491.
- [ 3 ] Hodges D. T., *Infrared Phys.*, **18** (1978), 5/6: 375.
- [ 4 ] Chang T. Y., *Appl. Phys. Lett.*, **19** (1971), 4: 103.
- [ 5 ] Chang T. Y., *Appl. Phys. Lett.*, **17** (1970), 6: 249.
- [ 6 ] 傅恩生等, *激光*, **6** (1979), 12: 12.
- [ 7 ] Hodges D. T., *Infrared Phys.*, **16** (1976), 1/2: 175.
- [ 8 ] 苏锦文, 叶妙根等, *红外研究*, **3** (1984), 1: 26~32.

## PUMP ABSORPTION EFFICIENCY OF THE OPTICALLY PUMPED SUBMILLIMETER (SMM) LASER

SU JINWEN, SI GUOLIANG, YE MIAOGEN

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

A general method of calculating the pump absorption efficiency and pump loss percentage in a SMM laser is given, which is based on the Gaussian beam transformation in the resonator. By calculating and comparing different cavity constructions, a design for higher pump absorption efficiency is chosen and the optimum condition for the input of pump light is given. SMM laser lines from  $70.6\ \mu\text{m}$  to  $570\ \mu\text{m}$  are obtained by using this design.