

# 光泵远红外波导激光器的 泵浦吸收和损耗

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**——通过高斯光束在平面平行腔中往返变换, 计算了光泵远红外波导激光器中泵浦吸收、损耗与波导谐振腔结构参数的关系。计算表明, 泵光束衍射至波导壁的损耗一般高达 57% 以上, 这是波导激光器弱泵浦吸收的主要原因。

## 一、引 言

光泵远红外波导激光器与开式腔激光器相比具有结构紧凑、远红外增益高, 适合于宽阔谱区工作等特点。然而, 至今可获得的泵浦激光功率转换效率仍然很低, 仅达到理论最大值的百分之几。Hodges D. S.<sup>[1]</sup> 认为, 其主要原因是由于谐振腔对泵浦激光的弱吸收和没有达到远红外激光最佳耦合输出。

作者曾通过高斯光束在腔内的往返变换, 给出了亚毫米波激光开式腔泵浦吸收和损耗的普遍计算方法<sup>[2]</sup>, 并设计了具有较高泵浦吸收效率的远红外开式腔激光器<sup>[3]</sup>。本文应用同样原理, 改变若干具体条件, 计算了多种波导谐振腔的泵浦吸收和损耗, 由计算结果, 分析了波导谐振腔弱泵浦吸收的原因, 并与开式腔对比, 提出了有效的改进方法。

## 二、原 理

光泵远红外波导激光器和光泵远红外开式腔激光器对于中红外泵浦波长, 起作用的都只是谐振腔两端的激光腔镜。远红外波导激光谐振腔一般采用平面平行腔镜结构。在讨论泵浦激光和吸收和损耗时, 考虑如图 1 所示的结构。

中红外泵光束 TEM<sub>00</sub> 模通过光学系统会聚后将其光腰成象于耦合孔 A<sub>01</sub> 平面上。

泵光束对波导平面平行腔的往返矩阵  $T$  为

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

因此泵光束在谐振腔内  $n$  次往返后有:

---

本文 1985 年 11 月 5 日收到。

$$\begin{cases} q^{(n)} = q_0 + 2nL; \\ q_0 = iK\omega_0^2/2; \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $q^{(n)}$  为腔镜上的复光束参数;  $K = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  是泵光束波长;  $\omega_0$  是泵光束在输入耦合孔  $A_{01}$  平面上的输入光腰半径。

$n$  次往返后, 腔镜上泵光束的光斑半径  $\omega^{(n)}$  为

$$\omega^{(n)} = \left[ \frac{2}{I(q^{(n)}) \cdot K} \right]^{1/2}; \quad (3)$$

式中,  $I[q^{(n)}]$  表示复光束参数  $q^{(n)}$  倒数的虚部。由式(2)、(3)解得:

$$\begin{cases} \omega_{in}^{(n)} = \left[ \left( \frac{2L}{K\omega_0} \right)^2 \cdot (2n)^2 + \omega_0^2 \right]^{1/2}; \\ \omega_{out}^{(n)} = \left[ \left( \frac{2L}{K\omega_0} \right)^2 (2n-1)^2 + \omega_0^2 \right]^{1/2}; \end{cases} \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

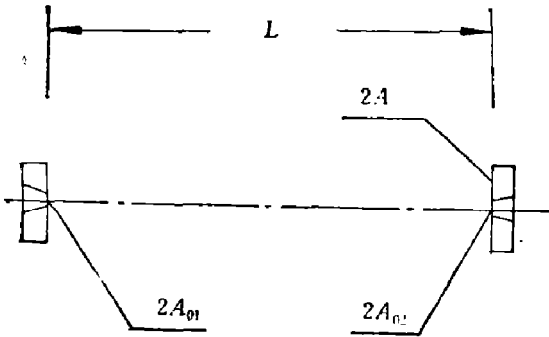


图1 波导谐振腔结构

Fig. 1 The configuration of waveguide laser cavity

$L$ —腔长;  $2A$ —波导管直径;  $2A_{01}$ —输入耦合孔直径;  $2A_{02}$ —输出耦合孔直径

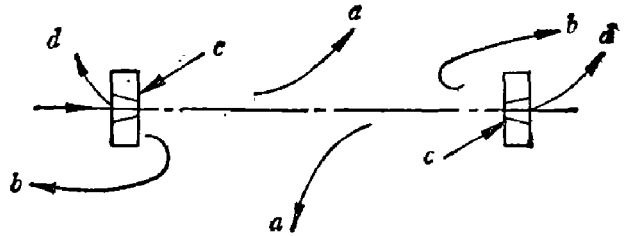


图2 每一往返过程中的泵光束

Fig. 2 The pump beam during each roundtrip

$a$ —气体介质吸收;  $b$ —衍射损耗;  $c$ —腔镜单次反射损耗;  $d$ —耦合孔逸出损耗

式中,  $\omega_{in}^{(n)}$  和  $\omega_{out}^{(n)}$  分别为泵光输入和输出平腔镜上的泵光束光斑半径。泵光束在腔内每一往返中, 都有如图2所示的过程。

采用文献[2]所指出的近似条件和方法, 对每一往返过程进行计算, 并累计其结果, 便可得到波导谐振腔的泵浦吸收效率  $\delta_p$  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  $\alpha = 7.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ , 取腔镜反射系数  $\rho = 0.98$ 。

#### 1. 波导腔中泵浦最大损耗——衍射损耗

表1是对几种波导腔结构参数计算的结果。表中  $L$ 、 $2A$ 、 $2A_{01}$ 、 $2A_{02}$  含义同图1;  $H$  为耦合孔逸出损耗率;  $D$  为衍射损耗率;  $R$  为腔镜吸收损耗率。表中腔5采用金属网格输入、输出腔镜, 腔6~10、16~18、20采用介质耦合输出腔镜, 其  $2A_{01}$ 、 $2A_{02}$  值均为零。腔11、12是小型波导谐振腔, 其中腔12采用波导壁耦合输出, 因此  $2A_{02}$  值也为零。计算中取激光工作气体压力  $P = 13.3 \text{ Pa}$ , 取泵光束输入光腰半径  $\omega_0 = 0.3 \text{ mm}$ 。

表1 波导谐振腔结构参数和泵浦吸收效率损耗率计算结果

Table 1 Structural Parameters for different waveguide cavities and calculated results of pump absorption efficiency and losses

腔号	L (mm)	2A <sub>01</sub> (mm)	2A <sub>02</sub> (mm)	2A (mm)	n	δ <sub>P</sub> (%)	H (%)	D (%)	R (%)
1 <sup>[4]</sup>	700	1	2	10	3	11.2	3.8	83.7	1.3
2 <sup>[5]</sup>	1600	1.5	1.5	6	2	15.6	0.4	84.0	0.1
3 <sup>[5]</sup>	1600	1.5	3	12	2	17.7	1.5	80.4	0.4
4 <sup>[5]</sup>	1600	1.5	3	24	3	24.5	1.5	72.6	1.3
5 <sup>[6]</sup>	1000	0	0	12	3	14.4	0	84.5	1.1
6 <sup>[7]</sup>	1200	1.5	0	22	3	21.9	0.1	76.1	1.9
7 <sup>[1]</sup>	1000	5	0	38	4	27.9	2.6	65.6	3.9
8 <sup>[1]</sup>	2000	5	0	38	3	34.0	0.4	63.8	1.8
9 <sup>[1]</sup>	3000	5	0	38	3	37.5	0.1	61.5	0.9
10 <sup>[8]</sup>	1100	3.5	0	38	4	28.9	1.0	66.5	3.6
11 <sup>[9]</sup>	200	1.5	1.5	12	5	6.8	31.0	57.1	5.0
12 <sup>[9]</sup>	170	1.3	0	6	4	5.1	7.0	83.7	4.2
13 <sup>[10]</sup>	1500	1	5	25	3	24.2	4.6	69.7	1.5
14 <sup>[11]</sup>	1500	1	5	24	3	23.6	4.6	70.3	1.4
15 <sup>[15]</sup>	2000	2	4	34	3	31.7	1.7	65.1	1.5
16*	1500	2	0	30	3	27.8	0.1	70.0	2.0
17**	1500	2	0	25	3	25.0	0.1	73.3	1.6
18***	1200	3	0	40	4	30.5	0.6	65.4	3.5
19***	1200	1.5	3	40	4	30.0	3.0	63.7	3.4
20***	1500	5	0	40	4	32.5	1.0	63.8	2.7

\* 美国 Apollo lasers 公司说明书;

\*\* 英国 Edinburgh 公司说明书;

\*\*\* 本文设计。

计算结果表明,各种波导腔中,泵浦的最大损耗都是泵光束衍射至波导壁的损耗。由表1可见,泵浦衍射损耗率在57%以上,严重的达85%。这是因为波导谐振腔波导管直径较小,以及平面平行腔镜结构所致。开式腔情况不同,其腔镜直径较大,凹腔镜对泵光束又有会聚作用,泵浦的最大损耗是耦合孔逸出损耗<sup>[2]</sup>。因此,光泵波导激光器设计中,首先要考虑的是尽可能降低泵光束衍射至波导壁的损耗。

### 2. 泵光束输入条件对 δ<sub>P</sub> 的影响

开式腔计算中发现泵浦吸收效率 δ<sub>P</sub> 与输入光腰半径 ω<sub>0</sub> 有关,而且对每一种确定的腔结构,都存在一个泵光输入最佳光腰半径 ω<sub>00</sub><sup>[2]</sup>。但波导腔的计算表明,在泵光束输入耦合孔半径 A<sub>01</sub> 允许条件下(ω<sub>0</sub> ≤ A<sub>01</sub>),不一定能达到极值。输入光腰半径 ω<sub>0</sub> 过小,则泵光束发散过大,衍射至波导壁的损耗增大。因此,波导谐振腔实验中尽可能采用较大的 ω<sub>0</sub> 值,如图3中腔1、3、4、18。但对某些谐振腔结构参数,如图3中腔7、10,当 ω<sub>0</sub> 值过大时,因泵光束耦合孔逸出损耗增大,也会使 δ<sub>P</sub> 值下降。对于腔10,当 ω<sub>0</sub> = 1.4 mm 时,出现最大值 δ<sub>P</sub> = 50.7%。这正是文献[1]所指,增大泵光输入耦合孔 A<sub>01</sub> 的作用。因此,适当增大 A<sub>01</sub>,调整 ω<sub>0</sub> 为合适的数值,有利于提高 δ<sub>P</sub>。

### 3. 波导管直径 2A 对 δ<sub>P</sub> 的影响

表2是对腔10、15改变波导管直径 2A 的计算结果。图4是腔7、20所计算的 δ<sub>P</sub> ~ 2A

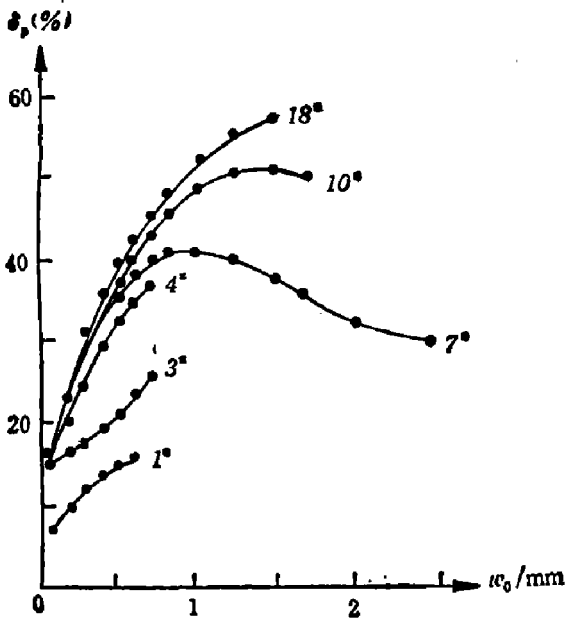


图3 泵浦吸收效率与输入光腰半径关系  
Fig. 3 Pump absorption efficiency vs the radius of input beam waist

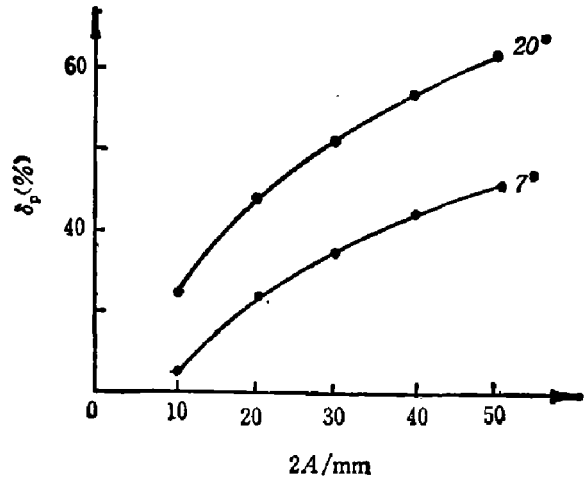


图4 泵浦吸收效率与波导管直径的关系  
Fig. 4 Pump absorption efficiency vs Waveguide diameter

表2 波导管直径对泵浦吸收效率及其损耗率的影响  
Table 2 Influence of different waveguide diameters on pump absorption efficiency and relevant losses

腔号	2A(mm)	$\delta_P$ (%)	H(%)	D(%)	E(%)
10	10	28.6	18.8	49.0	3.6
	20	39.8	20.9	33.5	5.8
	26	44.3	21.3	27.7	6.6
	30	46.8	21.5	24.6	7.1
	38	50.7	21.7	19.6	7.9
15	10	27.9	16.2	54.8	1.1
	20	39.6	17.0	40.9	2.4
	26	44.2	17.3	35.6	2.9
	30	46.9	17.4	32.5	3.2
	34	49.3	17.5	29.8	3.5

关系曲线。表2与图4结果均表明,随着波导管直径2A增大, $\delta_P$ 值增大,这是因为,随着直径的增大,泵光束衍射至波导壁的损耗减小的缘故。由表2可见,波导管直径改变过程中,泵光束耦合孔逸出损耗率H与腔镜吸收损耗率E变化不大,泵浦功率主要在泵浦吸收效率 $\delta_P$ 和衍射损耗率D之间重新分配。因此,一般光泵远红外波导激光器设计中,应采用较大波导管直径的过模波导。这不仅对增大模体积,提高远红外激光增益有利,而且对提高 $\delta_P$ 值也有利。Hodges D. T.<sup>[6]</sup>曾用实验方法选择了直径为38mm的过模波导激光器,得到400mW远红外激光输出功率。

#### 4. 耦合孔半径对 $\delta_P$ 的影响

由图5可见,泵光束 $\omega_0=0.5$ mm输入时, $\delta_P$ 值随耦合孔半径 $A_{01}$ 的变化很小。而开式腔计算表明, $\omega_0=0.3$ mm时,腔镜耦合孔半径增大, $\delta_P$ 值迅速下降<sup>[2]</sup>。这是因为开式腔

中, 泵浦最大损耗是耦合孔逸出损耗,  $\delta_P$  值对耦合孔半径的变化十分敏锐; 而波导谐振腔

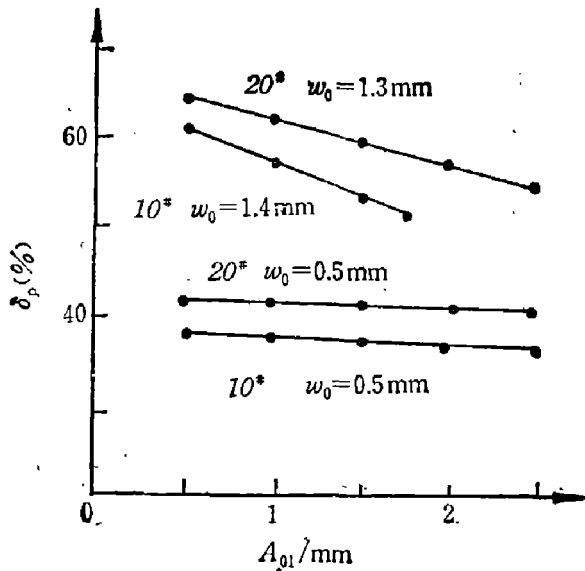


图 5 泵浦吸收效率与泵光输入耦合孔半径的关系

Fig. 5 Pump absorption efficiency vs the radius of input coupling aperture

的增大而增大; 但  $L$  过大的实验装置很不方便, 因此设计中, 应选取  $\delta_P$ - $L$  曲线斜率较大区间的  $L$  值。

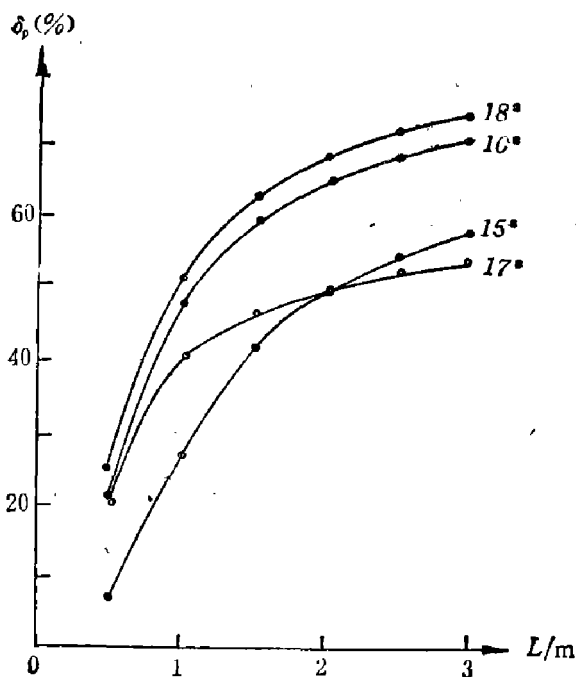


图 6 泵浦吸收效率与腔长的关系

Fig. 6 Pump absorption efficiency vs cavity length

中, 衍射损耗是占优势的泵浦损耗,  $\delta_P$  值随耦合孔半径的变化不大。但随着  $\omega_0$  数值增大, 即泵光束发散度的减小, 泵光束耦合孔逸出损耗随之增大; 因而在  $\omega_0$  数值较大情况下, 如图 5 中  $\omega_0 = 1.3 \text{ mm}$  及  $\omega_0 = 1.4 \text{ mm}$  (分别为腔 20、10 的最佳输入条件),  $\delta_P$  值随  $A_{01}$  数值增大而明显下降。输出耦合孔  $A_{02}$  对  $\delta_P$  值的影响, 也出现上述情况。波导腔设计中, 考虑到实验中泵光束输入的方便, 可取输入耦合孔半径  $A_{01}$  稍大一些数值。而输出腔镜采用介质耦合输出镜 ( $A_{02} = 0$ ) 最有利<sup>[1]</sup>。

### 5. 腔长 $L$ 对 $\delta_P$ 的影响

开式腔设计中, 必须精心地选取腔长  $L$ , 注意到  $L$  与凹腔镜曲率半径  $R$  的关系, 特别要避免半共焦腔条件<sup>[2]</sup>。但波导腔与开式腔完全不同。图 6 的计算结果表明, 波导腔  $\delta_P$  随  $L$

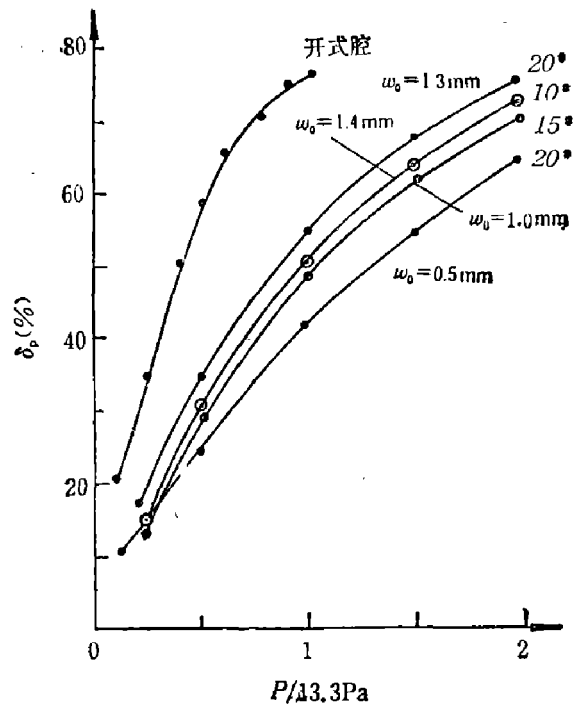


图 7 泵浦吸收效率与气体压力的关系

Fig. 7 Pump absorption efficiency vs gas pressure

### 6. 激光工作气压对 $\delta_P$ 的影响

图 7 是波导腔 10、15、20 以及开式腔<sup>[3]</sup> 改变气压  $P$  的计算结果。随着气压  $P$  升高,  $\delta_P$

值增大。但波导腔与开式腔相比,相同气压  $P$  下,开式腔  $\delta_P$  值较高。因为,气压  $P$  相同条件下,波导腔的泵光束衍射损耗大于开式腔的泵光束耦合孔逸出损耗。因此,尽管波导激光器由于波导管直径减小,使激光最佳工作气压升高,对增大  $\delta_P$  值有利,但是如果波导腔的结构参数选择不佳,也得不到比开式腔激光器高的  $\delta_P$  值,也就得不到比开式腔激光器高的亚毫米波激光输出功率。

图 7 是采用最佳输入条件对腔 10、15、20 进行  $\delta_P \sim P$  计算的结果。若采用一般实验中应用的  $\omega_0 = 0.3 \text{ mm}$ , 其  $\delta_P$  值还要低得多。为了比较,图 7 中还标出腔 20 在  $\omega_0 = 0.5 \text{ mm}$  条件下的计算结果。

#### 四、计算程序的检验

开式腔计算中,应用半共焦腔特例检验计算程序是十分有效的方法。但波导谐振腔计算中,没有这样的特例。为此,分别取  $P, A_{01}, A_{02}$  为零值,以及分别取  $A$  为很大的数值、取反射镜反射率  $\rho = 100\%$  值,应该分别可得到  $\delta_P, H, D$  以及  $R$  为零值的预期结果。这一预期结果,从表 3 程序检验计算结果得到验证。

表 3 程序检验计算结果

Table 3 Calculation for the check of programme

$L$ (mm)	$2A_{01}$ (mm)	$2A_{02}$ (mm)	$2A$ (mm)	$P$ (Pa)	$\rho$ (%)	$\delta_P$ (%)	$H$ (%)	$D$ (%)	$R$ (%)
1200	5	5	40	0	98	0	4.1	90.4	5.5
1200	0	0	40	13.3	98	35.7	0	59.9	4.4
1200	2	5	2000	13.3	98	74.3	14.3	0	11.4
1200	2	5	40	13.3	100	32.9	13.8	53.3	0

#### 五、提高 $\delta_P$ 值的方法

本文计算表明,降低泵光束衍射至波导壁的损耗是光泵远红外波导激光器设计中首先要考虑的问题。精选波导腔的结构参数,可在一定程度上提高  $\delta_P$  值,对提高远红外激光输出功率有利。但更为有效的方法是将衍射至波导壁的泵光束功率转变为有用的泵浦功率。

事实上,远红外金属波导激光器中,经过精密磨光加工的黄铜(brass)或铜(copper)波导管,在一定程度上可使泵浦功率折回腔内<sup>[5]</sup>。

作者采用特殊工艺,研制了玻璃镀金波导管<sup>[13]</sup>,并装置了一种新型远红外玻璃镀金波导激光器<sup>[14]</sup>,其结构参数如表 1 中腔 18,19,20。其中玻璃镀金波导管具有很低的远红外传输损耗。同时,波导管镀金层反射率在  $9 \sim 11 \mu\text{m}$  谱区大于 72%,因而镀金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  $\delta_P$  值。考虑到镀金波导壁的作用,表 2 中腔 18~20 的  $\delta_P$  大于 76%,而衍射损耗  $D$  下降到 18% 左右。

## 参 考 文 献

- [1] Hodges D. T., *IEEE J. of Quantum electronics*, **QE-13**(1977), 6:491.
- [2] 苏锦文等, 红外研究 **3**(1984), 2:95. Su J. W. et al., *Chinese Phys*, **4**(1984), 4:927.
- [3] Su J. W. et al., Conf. Digest, *Ninth International Conference on Infrared and MMwaves* (1984), 512.
- [4] Hodges D. T. and Hartwick T. S. *Appl. Phys. Lett.*, **23**(1973), 5:252.
- [5] Atsuo Tanaka et al., *Japan. J. Appl. Phys.* **13**(1974), 9:1491.
- [6] Wood R. A. et al., *Infrared. Phys.* **16**(1976), 201.
- [7] Thomas A. Detepls. et al., *IEEE J. of Quantum Electronics*, **QE-12**(1976), 1:40.
- [8] Hodges D. T. *Appl. Phys. Lett.* **29**(1976), 10:662.
- [9] Yamanaka M., *J. O. S. A.* **67**(1977), 7:952.
- [10] Wood R. A. et al., *Opt. Lett.* **5**(1980), 4:153.
- [11] Davis B. W. et al., *Opt. Comm.* **37**(1981), 4:303.
- [12] 付恩生等, 光学学报, **2**(1982), 1:9.
- [13] 熊守仁等, 红外研究, **5**(1986), 3:161.
- [14] 苏锦文等, 红外研究, **5**(1986), 3:167.

## PUMP ABSORPTION AND LOSSES OF THE OPTICALLY PUMPED FIR WAVEGUIDE LASER

SU JINWEN, XIONG SHOUREN, SHI GUOLIANG  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

The relations between pump absorption losses and the waveguide cavity configuration parameters are calculated based on the Gaussian beam transformation in the plane-parallel resonator. It can be seen from the calculating that the pump loss due to the pump beam diffraction on the wall of the waveguide is generally more than 57%, and is the main source that leads to a low pump absorption.