

波导型 CO₂ 激光器

张兵临

(郑州大学物理系)

波导气体激光器首先是由 Marcatili 和 Schmeltzer 于 1964 年提出的。他们计算了在空心电介质和金属波导中光频波的传播特性, 由于它的低损耗性提出了作成气体波导激光器的可能。此后, 由 Steffen 和 Kneubuhi, 以及 Smith 等人得到了证实。先后制成了波导型 ICN 亚毫米波激光器以及波导型 He-Ne、CO₂、CO 等气体激光器。由于它具有较宽的增益带宽及小型化等特点, 引起了人们的注意。尤其是波导型 CO₂ 激光器, 国外已制成了纵向激励横向激励等不同形式的圆孔或方孔波导激光器。这里对波导型 CO₂ 激光器的特点、结构、损耗作一简述。

(一) 电磁波在波导中的传播

众所周知, 在均匀介质的无限空间传播的电磁波是横电磁波, 即传播方向与电力线、磁力线垂直, 通常用 TEM 表示横电磁波。

理论和实践证明, 在波导中不能传播横电磁波, 它仅能传播具有场的纵向分量的另一类型的电磁波。这类型电磁波可以分成三种情况:

(1) 横电波(用 TE 字母表示): 它具有横向和纵向磁场, 而电场与波导轴垂直。该种波型亦称为磁波, 亦可用字母 H 表示。

(2) 横磁波: 它具有横向和纵向电场,

而磁场与波导轴垂直, 以 TM 表示。该种波型亦称为电波, 亦可用字母 E 表示。

(3) 混波: 属于上述两种波的混合, 用字母 EH 表示。

TE 波、TM 波均可看成是由若干个横电磁波迭加而成, 这些横电磁波在波导内不是沿波导轴线传播, 而是在管壁上经过多次反射曲折行进。

上述三种波的模式结构, 通常用符号 TE_{nm}、TM_{nm}、HE_{nm} 或 EH_{nm} 表示。脚注数字表示波导横截面上驻立半波数目。例如 EH_{nm}, 对于圆形波导, 脚注第一个数字表示沿半圆周上驻立半波数目, 脚注第二个数字表示沿半径的驻立半波数目。对于矩形波导, 脚注第一个数字表示沿波导横截面短边的驻立半波数目, 第二个数字表示沿长边的驻立半波数目。

(二) 波导型 CO₂ 激光器的特点

普通纵向 CO₂ 激光器的放电管直径一般在 1 厘米之上, 而波导型 CO₂ 激光器的放电管直径要小得多, 一般在 1~2 毫米之间, 随着放电管直径的减小, 使得波导型 CO₂ 激光器具有许多引人注目的特点。这可从下列相似关系中看到。

关系 (1)~(10) 仅包含放电参量, 而 (11)~(15) 包含光的相互关系。(11a)、(12a)

相似关系

(就两个直径分别为 D_1 、 D_2 的放电管相比较)

物理量	关系式	
气体温度 T_g	$T_{g2} = T_{g1}$	(1)
气体密度 N	$D_2 N_2 = D_1 N_1$	(2)
气体压强 P	$P_2 D_2 = P_1 D_1$	(3)
电子温度 T_e	$T_{e2} = T_{e1}$	(4)
电子密度 N_e	$N_{e2} D_2 = N_{e1} D_1$	(5)
电流密度 J	$J_2 D_2 = J_1 D_1$	(6)
电流 I	$I_2 / D_2 = I_1 / D_1$	(7)
电场 E	$E_2 D_2 = E_1 D_1$	(8)
直流电阻 z	$z_2 D_2^2 = z_1 D_1^2$	(9)
输入功率/长度 P_g/L	$P_{g2}/L = P_{g1}/L$	(10)
增益系数 α	$\alpha_2 D_2 = \alpha_1 D_1$	(11a)
	$\alpha_2 = \alpha_1$	(11b)
饱和光能流强度 S	$S_2 D_2 = S_1 D_1$	(12a)
(饱和参量)	$S_2 D_2^2 = S_1 D_1^2$	(12b)
输出功率/体积 P_0/V	$(P_{02}/V_2) D_2^3 = (P_{01}/V_1) D_1^3$	(13)
输出功率/长度 P_0/L	$P_{02}/L = P_{01}/L$	(14)
效率 η	$\eta_2 = \eta_1$	(15)

给出的是多普勒加宽线的情况, (11b)、(12b) 给出的是压强加宽(碰撞加宽)线的情况。

根据上述相似关系, 和通常大孔径 CO_2 激光器相比较, 可以看出波导型 CO_2 激光器的一些特点:

(1) 工作气压较高, 普通大孔径纵向 CO_2 激光器工作气压在 20 托左右, 而放电管直径在 1 厘米以上。由相似关系 (3) $P_2 D_2 = P_1 D_1$ 可知随着管径减小, 气压相应增加。对于波导型 CO_2 激光器, 一般管径为 1.5 毫米左右。因而工作气压可以达到 300 托甚至超过 300 托, 这种激光器在高气压下工作, 就使它具备了以下突出优点: 第一, 因为在这种器件中谱线的增益带宽主要决定于压强加宽, 在压强加宽的情况下, 已知线宽变化以 5 兆赫/托随压强成正比变化。如果压强达到 300 托, 那么线宽可达 1500 兆赫。而普通 CO_2 激光器线宽仅 50 兆赫, 可见波导 CO_2 激光器比普通 CO_2 激光器线宽超过 30 倍。这样大的调谐范围, 尤其对于星际通讯是十分吸引人的。第二, 在这样高的气压下阴极溅射很低, 可望获得较长的使用寿命。

(2) 由相似关系(7)式得知, 随着放电管直径的减小, 激光工作电流减小, 这对于供电系统是有利的。

(3) 由相似关系(8)式得知, 随着放电管直径的减小, 管电压相应升高。

(4) 由相似关系(14)式得知, 每单位长度的输出功率保持相同。

(5) 由相似关系(15)式得知, 效率保持相同。

从后面两条可见, 并不象普通 CO_2 激光器那样, 减小管径会带来很大的衍射损耗, 而仍然保持应有的输出功率和效率, 这对于使激光器作到小型化是十分有利的。

(三) 波导型 CO_2 激光器的结构

最初的波导形 CO_2 激光器是用派莱克斯玻璃制作的, 以后人们测定了几种材料的波导损耗, 而以 BeO 材料损耗最小(见下表), 因此, 目前多采用 BeO 波导管或金属波导管制成 CO_2 激光器。

现就几种典型结构介绍如下:

(1) 派莱克斯玻璃管波导型 CO_2 激光器结构见图 1。

(2) BeO 圆孔结构, 这是一个全部金属陶瓷结构。

BeO 管规格是 18 厘米 \times 1.5 毫米内径, 两端采用低损耗 CdTe 布儒斯特窗, 镀金全反镜, 曲率半径 23 厘米, 放置在距离激光器毛细管孔一端 22 厘米处。输出镜反射率 95%, 曲率半径 14 厘米, 放置在距离激光器毛细管另一端 10 厘米处, 在阴极端有一铝水冷套, 足可以依靠 BeO 良好的热导性, 使整个管长维持在恒定的 10°C 之内, 沿管壁横截面温差小于 0.5°C 。

测量了不同的 $\text{He}:\text{CO}_2$ 气体比例下输出功率随压强的变化, 电流为 3.0 毫安, 测量结果见图 3。图 4 是不同气体混合比的放电电压、效率和总压强的关系。

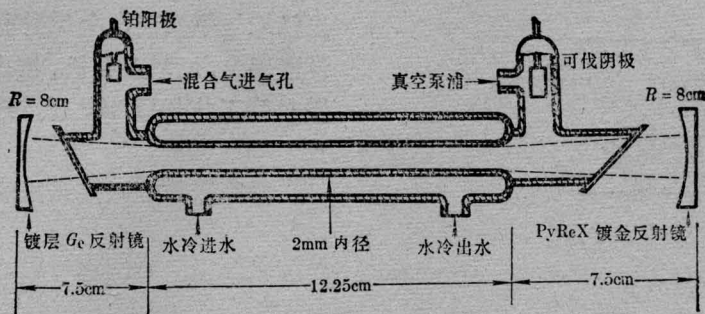


图1 最初的CO₂波导激光器(由派莱克斯玻璃制成)

几种材料的波导损耗比较表

材 料	损耗系数 α (分贝/米)
派莱克斯玻璃	1.6
SiO ₂	1.4
BeO	0.037

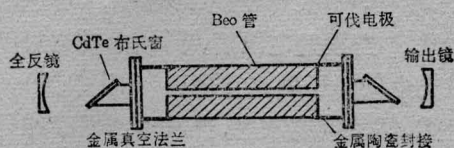


图2 氧化铍(BeO)毛细管波导型CO₂激光器结构图

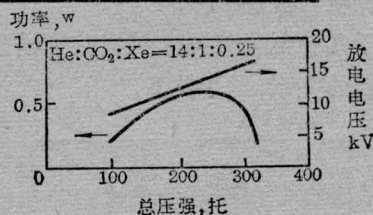
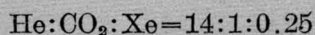


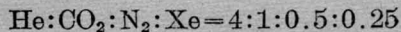
图5

图5给出了加入Xe气之后放电电压及功率与总压强关系,加入Xe气后使放电电压降低,气体比例为:



所采用的全反射镜与前面测量中所用的相同,输出镜是采用同样曲率半径,但反射率为98%。

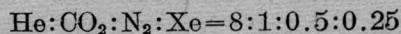
用上面这种激光器,对于



在总气压为150托下,给出4.0瓦输出,激光效率为7.1%,相当于每单位长度的功率是0.22瓦/厘米。

(3) BeO 方孔结构

它是由四块研磨抛光好的BeO板封接在一起组成,波导腔规格95毫米×1毫米。如果其中一反射镜用压电单元调谐,在



比例下,总压强260托,获得1.2千兆赫可变频带,中心频率输出功率为80毫瓦。

实验证明,缩小波导管管径,提高气体的

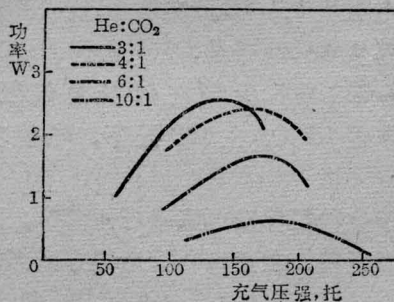


图3

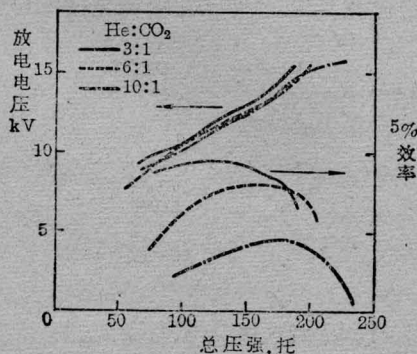


图4

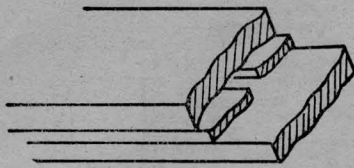


图6 BeO 波导腔

冷却效果可以增大效率。

(4) 金属方孔波导 CO₂ 激光器，是一个由金属铝材料加工成的，规格 7.5 厘米 × 1.5 毫米。全反镜和一个 3% 的输出镜都是平面镜，直接封贴在放电孔两端。

中间阴极是中孔的，可以作为充气通道。两端是针状阳极(图 7)。

对于几种混合气体比例实验了输出功率与总压强的关系，示于图 8。

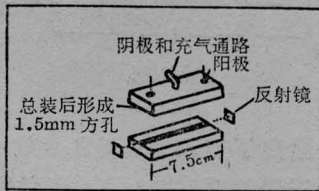


图 7

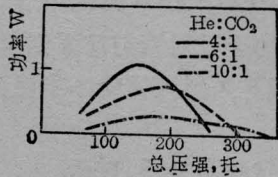


图 8

对于加入 Xe、N₂ 之后，He:CO₂:N₂:Xe = 4:1:0.5:0.25，总气压为 150 托，获得 1.4 瓦输出。效率为 6% (在 350 托下，获得 0.3 瓦)，单位长度的输出功率为 0.19 瓦/厘米，这和 BeO 管具有的 0.22 瓦/厘米相接近。

(5) 纵向激励脉冲波导 CO₂ 激光器

以上几种器件均是纵向激励连续输出的器件。近几年也有人作出了纵向激励脉冲波导 CO₂ 激光器。激光器是 BeO 方孔结构，具体规格是：10 厘米长，1.5 毫米见方。将管子固定在一个水冷散热装置上，全反射镜和输

出镜均是平面镜，全反射镜固定在一个压电调谐器上，以调整腔长。输出镜反射率 95%，激光管工作气压 150 托，连续输出可达一瓦。

激光器和电源接线如图 9 所示：

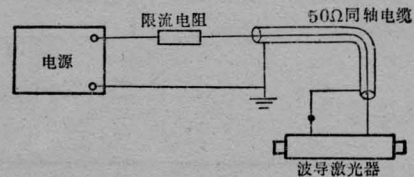


图 9 激光器及电源接线图

50 欧姆同轴电缆提供了一个 ~1 微微法/厘米电容，一根 60 厘米的电缆，电容约 60 微微法。当接通电源后，同轴电缆通过限流电阻充电到管子的击穿电压 (6.5 千伏)，管子点燃，同轴电缆放电，当放电到低于维持电压，管子熄灭，同轴电缆重新充电，周而复始。

改变同轴电缆长度从 30~120 厘米，改变限流电阻从 1.5~6.6 兆欧姆，所得到放电重复频率从 4~20 千赫，充气比例 He:CO₂:N₂:Xe = 4:1:0.5:0.25 在 60 托总气压下，峰值功率达 15 瓦，在 120 托下，峰值功率 5 瓦。

由于这种器件及电路小巧而简单，而且重复频率可调，在通讯和雷达等方面都是有用的。

(6) 横向激励波导 CO₂ 激光器

这种激光器的波导腔结构见图 10 所示。

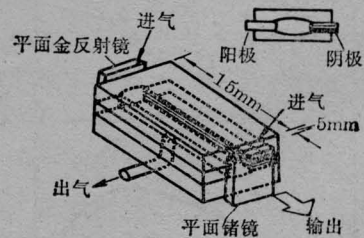


图 10 波导 CO₂ 激光器结构图

它的上下面是由一对稍微弯曲的平行板

组成, 这种结构的优点是具有较低的传输损耗以及自聚焦作用。由于自聚焦作用, 使得两电极插入, 对于波导场没有任何干扰。因此, 这里采取了水平放电激励。构成波导腔的上下两平板, 最好采用 BeO 材料, 但若受条件限制, 采用一对平行凹面玻璃板亦可。板长 15 厘米, 宽 5 毫米, 曲率半径 4.5 毫米, 二者间距 2.6 毫米。

Ge 输出镜反射率 95%, 二反射镜距波导两端 5 毫米。激光器底板和一个电致冷元件连接, 以实现冷却。混合气体比例是 12% CO₂, 8% N₂, 80% He, 从两端流入, 从中间流出。

激光器工作的激励电脉冲是峰值电压 3 千伏, 电流 0.5~3 安培, 脉宽 2~6 毫秒, 重复频率 3 千赫。

在 250 托总气压下, 峰值功率达 30 瓦。在 3 千赫重复频率下, 最大平均功率 0.3 瓦。

四、波导耦合损耗

象一般激光器一样, 在工作物质实现了粒子数反转的条件下, 尚需两个反射镜构成谐振腔, 以实现激光输出。所不同的是, 在波导激光器中, 波导腔的每一端可以作为一个辐射源, 位相面与反射镜面相匹配时, 呈现最大的耦合效率。据此考虑, 谐振腔的耦合与放电管长无关。

全反射镜采用镀金膜反射镜, 输出镜采用锗, 其上镀介质膜, 实现所要求的反射率。

对于波导形激光器使用价值较大的是 EH₁₁ 模。因此, 这里仅就 EH₁₁ 模考虑耦合损耗问题。

对于 EH₁₁ 模, 耦合损耗作为波导和反射镜参数的函数示于图 11。

该图描绘了耦合效率与参数 $\alpha \cdot \beta$ 的函数关系, 根据大量实验数值, 选定 $\gamma = 11$ 较宜。

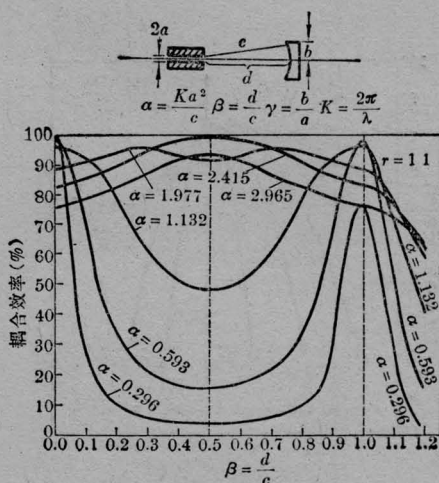


图 11

其中 α 代表波导孔半径
 b 代表反射镜孔径
 c 代表反射镜曲率半径
 d 代表反射镜与波导端距离

从图 11 中可以看出, 存在着三种低损耗情况:

第一种低损耗情况: 大曲率半径反射镜和波导密合。

理想情况是用一个平面反射镜和波导孔紧密结合。

相当于图中 $\beta = 0$, 耦合效率近于 100%。

耦合损耗(平面反射镜) $\approx 6.05 \left(\frac{d}{Ka^2} \right)^{3/2}$

这是一个计算平面镜耦合损耗的近似公式。

第二种低损耗情况: 大曲率半径反射镜曲率中心大致位于波导一端。相当于图(11)中 $\beta = 1$ 情况。

令 $\alpha \cdot \gamma = Kab/c = \text{常量}$, 画出耦合损耗与参数 $\alpha \cdot \beta$ 的关系, 见图 12(a)~(c)。

从图 12(a)~(c) 看出, 最佳反射镜间距随 α 的增加而处于 $B = 1$ 附近趋向内移。

把图 12 中所得的每一个 α 值的最小损耗, 画成随 α 变化的曲线, 得图 13。

从图 13 看出, 对于小的 α 值, 耦合效率与 α 关系近似为一直线, 表明若 $\alpha \gamma$ 保持不变,

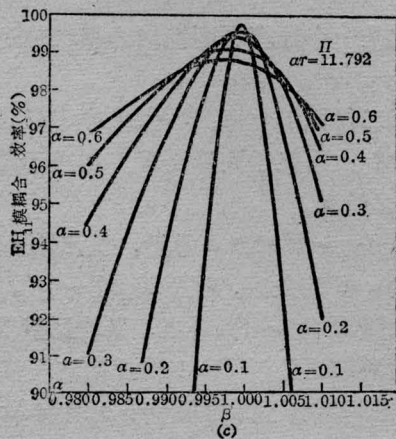
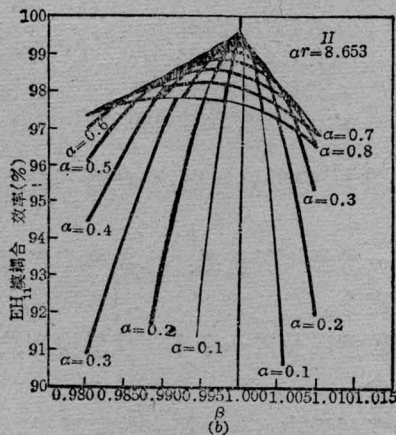
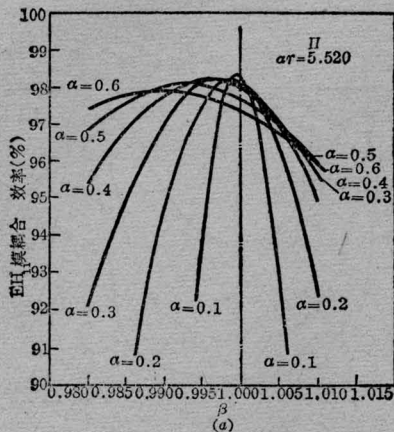


图 12 EH_{11} 耦合损耗作为反射镜曲率和镜间距的函数关系

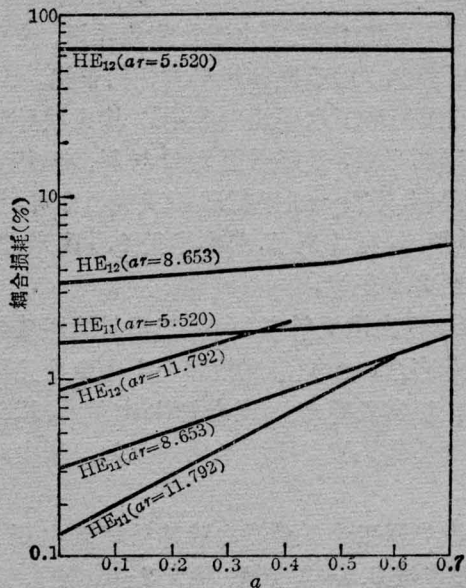


图 13 EH_{11} 、 EH_{12} 模作为镜曲率和镜间距的函数关系

损耗随 α 而线性增加。

当波导孔径 a 不变时, α 越大, 相当于反射镜曲率半径越小。因此, 也可以说, 当 $\alpha\gamma$ 保持不变时, 反射镜曲率半径越小, 耦合损耗越大。

第三种低损耗情况: 从图 11 可见, 对于 $\alpha=2.415$, $\beta=0.5$ 时, 耦合效率最高。即反射镜放置在距波导一端的距离等于曲率半径的一半处。

对于多数应用来说, 工作在波导基模 EH_{11} 模是适合的。因此对于 EH_{11} 模的三种低损耗情况, 仅就 CO_2 波导谐振腔设计的参考数据列于下表, 供参考。

对于表中情况 II 曲率的数值相当于 $\alpha=0.6$ ($\alpha\gamma=11.792$) 的情况。

当然如果对于情况 I, 尽量使平面镜靠近波导孔, 或者在情况 II 中选择反射镜曲率半径大于表中数值均可进一步减少损耗。

究竟设计腔结构时选用上述三种低损耗的哪一种要看具体情况。若希望使器件小型化, 情况 I 是合适的; 若要求比较高的耦合效率且腔内还要插入其他光学元件, 则情况 II 为宜; 若既要插入腔内光学元件, 又要腔长相

设计 10.9 微米 CO₂ 波导激光器的参考数据

孔直径 (毫米)	情况 I(损耗=1.3%)		情况 II(损耗=1.3%)			情况 III(损耗=1.3%)		
	c(厘米)	d(厘米)	c(厘米)	d(厘米)	b(毫米)	c(厘米)	d(厘米)	b(毫米)
0.50	∞	0.06	6.1	6.08	4.9	1.53	0.76	0.6
1.00	∞	0.25	24.7	24.65	9.8	6.14	3.07	1.3
1.50	∞	0.56	55.5	55.39	14.7	13.8	6.9	1.9
2.00	∞	0.99	98.8	98.6	19.7	24.5	12.25	2.6

应短些,则情况 III 是合适的。

五 波导损耗

当光在波导管内传播时,由于光和物质的相互作用,不可避免的要有一部分光能被波导壁所吸收,变为热能而损耗掉。

Marcatili 和 Schmeltzer 给出了混波 EH_{nm} 模的电介质波导损耗系数为:

$$\alpha_{nm} = \left(\frac{u_{nm}}{2\pi} \right)^2 \frac{8\lambda^2}{D^3} \operatorname{Re}(\nu_n) \quad *$$

其中 λ 为波长, D 为波导直径, u_{nm} 是贝塞尔函数 J_{n-1} 的第 m 个根, ν_n 是包含管壁材料的复折射系数的一个表示式。

管壁材料复折射系数

$$\nu = N - iK = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$$

$$\text{则 } \nu_n = \frac{\frac{1}{2}(\nu^2 + 1)}{(\nu^2 - 1)^{1/2}}$$

从 * 式可以看出波导损耗与 λ^2 成正比,与 D 成反比。因此对于某一确定波长,径管越小波导损耗越大。根据 * 式对 BeO、SiO₂ 两种材料进行了计算,在 1 毫米直径、10.6 微米波长下:

$$\alpha = \begin{cases} 4.3 \times 10^{-5} \text{ 厘米}^{-1} & \text{BeO} \\ 1.8 \times 10^{-3} \text{ 厘米}^{-1} & \text{SiO}_2 \end{cases}$$

由此可见和激光介质增益系数 (0.01 厘米⁻¹) 相比,对于 BeO 管波导损耗可以忽略,对于 SiO₂ 损耗约为增益的 18%。

管径增加 2 倍,即 2 毫米,波导损耗减小 8 倍,以致于两种材料的波导损耗均可忽略。

但是,缩小管径一半,即 0.5 毫米,那么 SiO₂ 的损耗增加到 0.014 厘米⁻¹ 以致于超过介质增益,管子将不能维持振荡,无激光输出。

对于 Al₂O₃、SiO₂、BeO 这三种材料的波导损耗和波长的关系画在图 14 中,对于 BeO、Al₂O₃ 均采用单晶材料进行测量。对于多晶陶瓷材料尚没有典型数据,但是可以认为多晶陶瓷材料处于两种曲线之间的某一位置。

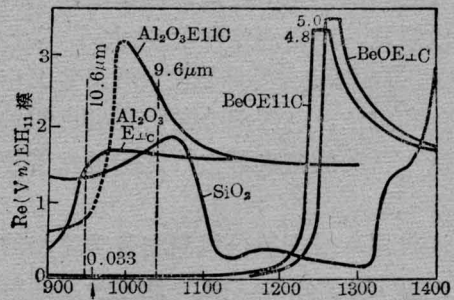


图 14

从图中看出,在 10.6 微米处,BeO 材料具有最低的波导损耗。

几点看法

1. 随着卫星通讯、激光雷达等项技术的发展,以及一些应用上对器件小型化的要求,波导型 CO₂ 激光器在我国必将得到应有的发展。

2. 由于氧化铍材料的低波导损耗和高的导热率,因此氧化铍波导激光器将是最优越的波导激光器件。

(下转第 64 页)

XJX-1 型细胞激光显微仪研制成功

“XJX-1 型细胞激光显微仪”是具有多种用途的激光微束装置。它是通过光学系统将激光聚焦成 2~3 微米的光束,作为研究细胞的理想“手术刀”,在细胞生活条件下准确地对细胞的指定部位进行照射或局部破坏,以研究细胞内部结构与功能间的关系,揭示生物体微观机构的奥秘,使激光的应用进入到细胞水平。对于研究遗传特性、育种以及探索癌细胞恶性分裂的原因等都具有实际意义,是细胞学、生物学、遗传学等学科进行基础理论研究的有力工具。

吉林医科大学组织胚胎教研室应用本仪器先后对体外培养的活癌细胞、神经细胞、蛔虫卵等进行照射实验。照射了癌细胞分裂中、后和末期各阶段的中心体,发现在中期到后期早阶段照射时,有抑制分裂进行的作用,为治癌、防癌提供了理论根据和线索。

吉林市科学技术委员会受吉林省科学技术委员会和吉林省教育局委托,于 1978 年 3

月 2 日至 5 日主持召开了“XJX-1 型细胞激光显微仪”鉴定会。中国科学院长春光机所、动物所、生物物理所、遗传所、吉林应化所、中国科学医学院首都医院、中国人民解放军 59172 部队、北京师范大学等 32 个单位派人参加了鉴定会。经鉴定,“XJX-1 型细胞激光显微仪”整机性能达到了原设计技术条件,原理正确,结构合理,指标先进,性能基本稳定,符合使用要求,可以投入小批量试生产。

会议一致认为:吉林医科大学、吉林市光机实验厂在华主席“抓纲治国”战略方针指引下,坚持毛主席的革命路线,发扬独立自主,自力更生,艰苦奋斗,敢于创新,敢攀高峰的革命精神,在较短时间内研制成功“XJX-1 型细胞激光显微仪”,为我国医学、生物学、遗传学、农业育种以及国防医学等基础理论研究提供了新型工具,填补了我国的空白,为早日实现科学技术现代化作出了一定贡献。

更正启事

本刊 1978 年第 2 期(总第 20 期)封三刊登的照片说明,原文为“衡阳电机厂生产的激光育种机”,系为“湘潭电机厂生产的激光育种机”之误,特此更正。

(上接第 61 页)

3. 由于金属材料来源丰富,易于加工制作,且结构坚实,因此金属波导激光器也必将得到一定发展。

参 考 资 料

[1] R. L. Abrams and W. B. Bridges, *IEEE J. Q. E.*, **QE-9**, No. 9, 940~946 (1973).

[2] J. J. Degnan and DR. Hall, *IEEE J. Q. E.*, **QE-9**, No. 9, 901~910 (1973).

[3] J. J. Degnan et al., *IEEE J. Q. E.*, **QE-9** No. 4, 489~491 (1973).

[4] R. I. Ruako, *IEEE J. Q. E.*, **QE-10**, No. 5, 497~498 (1973).

[5] Richard J. Davis, *Microwaves*, **11**, No. 11, (1972).

[6] H. Nishihara et al., *Appl. Phys Lett.*, No. 9, 577~576 (1976).