

射频波导激光器电极参数的测量

田兆硕 王雨三 刘逢梅 赵景山 王 骥
(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

提要 根据传输线理论, 射频波导激光器的电极可近似为无损耗均匀传输线, 采用扫频方法, 可测量出射频波导激光器电极的重要参数, 如特性阻抗、相移常数、相速、分布电感及分布电容等。

关键词 传输线, 扫频, 电极

1 引 言

在射频波导激光器的研究中, 需要解决的关键问题之一是两电极间均匀放电问题, 常用的方法是在电极上并联一些电感以提供负导纳降低驻波比, 从而减小放电电极上的电压分布, 如计算并联的电感量大小, 必须先知道波导激光电极的一些参数^[1-3]。另外, 选择不同参数的放电电极, 可进一步研究工作气体放电特性, 以提高激光器的能量转换效率。

本文应用传输线理论, 采用扫频方法, 测定了射频波导激光器电极的一些参数, 如特性阻抗、相移常数、相速、分布电感及分布电容等。

2 理论分析

根据传输线理论^[4], 均匀传输线的等效电路如图 1 所示。

图中 R, L, C, G 分别为单位长度传输线的等效串联电阻、电感、并联电容和电导。

均匀传输线的传播常数为

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (1)$$

式中 ω 为圆频率, α 为衰减常数, β 为相移常数。

传输线的特性阻抗为

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

射频波导激光器的电极可近似认为是无损耗的均匀传输线, 于是 $R = 0, G = 0$, 从而得出 $\alpha = 0, \gamma = j\omega \sqrt{LC} = j\beta, Z_c = \sqrt{L/C}$ 。

由传输线理论可计算出, 无损耗传输线终端短路时可以得到距终端 x 处电压和电流值

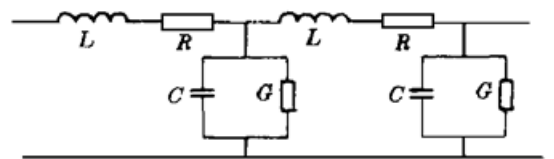


图 1 均匀传输线等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the uniform transmission line

$$V_{sc} = jI_2 Z_c \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (3)$$

$$I_{sc} = I_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (4)$$

其中 I_2 为传输线的终端电流, λ 为波长。

无损耗线终端短路时, 根据(1), (2) 式, 线上任一点的输入阻抗可求得为

$$Z_{sc} = jZ_c \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} x = jX_{sc} \quad (5)$$

可见终端短路时无损耗线上任一点的输入阻抗是纯电抗, 其性质是随距离 x 而变, 如图 2。可以看出, $0 < x < \lambda/4$ 时 X_{sc} 为感性, $\lambda/4 < x < \lambda/2$ 时 X_{sc} 为容性, 余者类推。在 $x = 0, \lambda/2, \lambda, \dots$ 时输入阻抗 $Z_{sc} = 0$, 相当于串联谐振, 而 $x = \lambda/4, \lambda/2, \dots$ 时 $Z_{sc} = \infty$, 相当于并联谐振。

终端开路时, 距终端 x 处的电压和电流为

$$V_{oc} = V_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (6)$$

$$I_{oc} = j \frac{V_2}{I_2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (7)$$

其中 V_2 为终端电压。

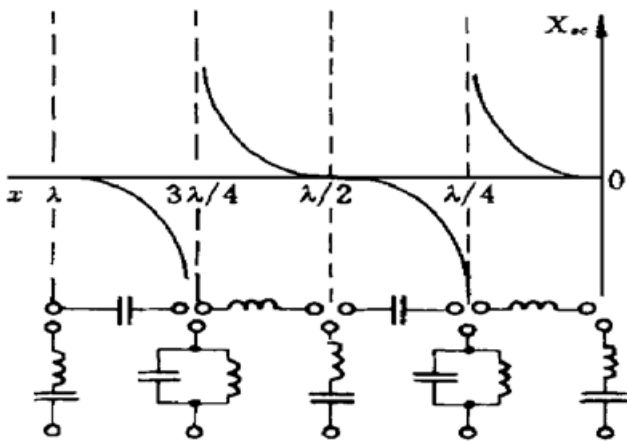


图 2 短路无损耗线的输入阻抗

Fig. 2 Input impedance of the short-circuited lossless transmission line

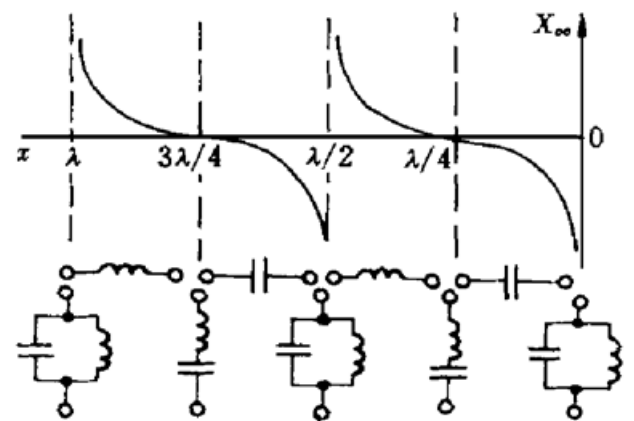


图 3 开路无损耗线的输入阻抗

Fig. 3 Input impedance of the lossless transmission line with open ends

此时, 根据(6), (7) 式可求得无损耗线上任一点的输入阻抗为

$$Z_{oc} = -jZ_c \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} x = jX_{oc} \quad (8)$$

这表明终端开路时无损耗线上任一点的输入阻抗也是纯电抗, 当 $0 < x < \lambda/4$ 时 X_{oc} 为容性, $\lambda/4 < x < \lambda/2$ 时 X_{oc} 为感性, 余者类推(见图 3)。在 $x = 0, \lambda/2, \lambda, \dots$ 处, $Z_{oc} = \infty$, 相当于并联谐振。

3 测量电路及分析

3.1 扫频法测量电极参数

3.1.1 电极终端短路测感抗

采用如图 4 所示的测量电路。测试电缆长度为 l , 波导电极长为 d , 相当于无损耗传输线。当测试电缆终端短路时, 在显示器上显示出如图 5(a) 所示的频率特性曲线。

根据传输线理论, 无损耗传输线中电磁波的传输速度为常数, 即

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \text{常数} \quad (9)$$

其中 L_0, C_0 为单位长度无损耗线的分布电感、分布电容。

由此可知

$$V_p = f_1 \lambda_1 = f_2 \lambda_2 = f_3 \lambda_3 = \dots \quad (10)$$

图 5 中凹陷点的位置表示, 在此频率时测试电缆的输入阻抗为零, 即相当于在此频率时串联谐振。

由图 2 可知在短路线长度

$$l = 0, \frac{\lambda_1}{2}, \lambda_2, \frac{3}{2} \lambda_3, \dots$$

时终端短路线的输入阻抗为零, 即相当于在波长

$$\lambda_1 = 2l, \lambda_2 = l, \lambda_3 = 2l/3, \dots$$

时测试电缆相当于串联谐振电路。

然后把测试电缆终端两根导线分别接在上下波导电极的一端, 把电极的另一端短路, 此时在显示器上显示出如图 5(b) 所示的频率特性曲线。即相当于测试电缆在频率 f_1', f_2', f_3', \dots 时加上 $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \dots$ 长的电缆。

下面求 f_1' 频率处的感抗, 由以上分析可得如下方程

$$\lambda_1' = 2l_1' \quad l_1' = l + \Delta l_1 \quad \lambda_1 = \frac{V_p}{f_1} \quad \lambda_1' = \frac{V_p}{f_1'} \quad (11)$$

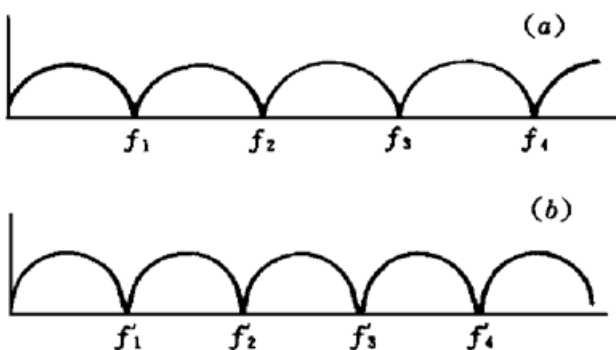


图 5 (a) 终端短路频率特性曲线;
(b) 终端加短路电极频率特性曲线

Fig. 5 (a) Frequency characteristic curve in the case of short-circuited termination; (b) Frequency characteristic curve with the short-circuited terminal electrodes

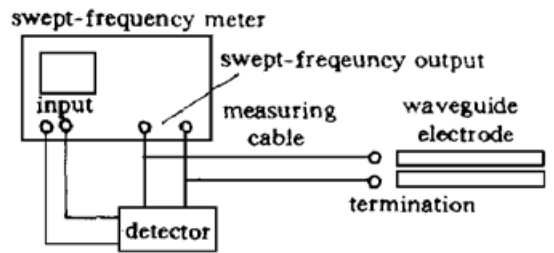


图 4 扫频法测量电极电路

Fig. 4 Circuit of electrode measurement with a frequency-scanning method

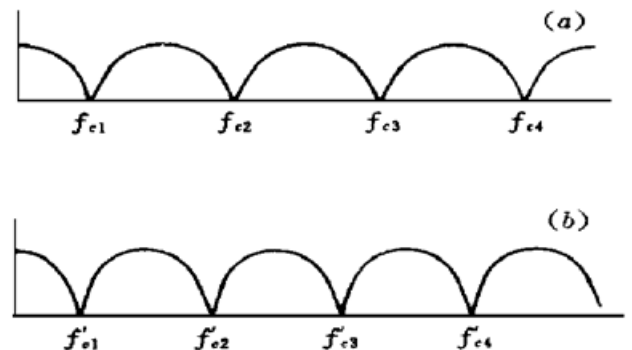


图 6 (a) 终端开路频率特性曲线;
(b) 终端开路电极频率特性曲线

Fig. 6 (a) Frequency characteristic curve in the case of open ends; (b) Frequency characteristic curve with the electrode end opened

可得

$$\Delta l_1 = \frac{V_p}{2} \left[\frac{1}{f_1'} - \frac{1}{f_1} \right] \quad (12)$$

由(3)式可得在频率 f_1' 时,终端短路电极的感抗为

$$X_{sc} = Z_{ctg} \frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta l_1 \quad (13)$$

3.1.2 电极终端开路测容抗

测试电路如图4所示。首先令测试电缆终端开路,则在显示器上显示出如图6(a)所示的频率特性曲线,然后把测试电缆终端接上激光器的两个电极,并使电极另一端开路,这时在显示器上显示出如图6(b)所示的频率特性曲线。

采用类似于3.1.1的分析方法可得出在频率 f_{c_1}' 时,终端开路电极的容抗为

$$X_{oc} = -Z_{cctg} \frac{2\pi}{\lambda_{c_1}} \Delta l_1' \quad (14)$$

3.1.3 测量电极中的相速

用波导激光电极代替图4中的测试电缆线,并把电极另一端开路,这时在扫频仪的显示器上记下第一个谐振频率 f_p 。由图2得出此频率时对应的波长为

$$\lambda_p = 4d \quad (15)$$

在电极中的相速为

$$V_p = 4f_p d \quad (16)$$

3.2 电极参数的计算

在频率为 f_1' 和 f_{c_1}' 时,电极中传播的电磁波波长为 $\lambda_1 = V_p/f_1'$, $\lambda_2 = V_p/f_{c_1}'$ 。设电极的特性阻抗为 Z_{ce} ,则终端短路电极的感抗、终端开路电极的容抗分别为

$$X_{sc} = Z_{cetg} \frac{2\pi d}{\lambda_1} \quad X_{oc} = Z_{cctg} \frac{2\pi d}{\lambda_2} \quad (17)$$

由上面两式得出

$$Z_{ce} = \sqrt{\frac{X_{sc} X_{oc}}{\text{tg} \frac{2\pi d}{\lambda_1} \text{ctg} \frac{2\pi d}{\lambda_2}}} \quad (18)$$

再由无损耗传输线理论: $Z_{ce} = \sqrt{L_e/C_e}$, $V_p = \sqrt{1/L_e C_e}$,可以得出单位长度分布电感、分布电容分别为

$$L_e = Z_{ce}/V_p \quad C_e = 1/(V_p Z_{ce}) \quad (19)$$

从而得出角频率为 ω 时的相移常数

$$\beta = \omega \sqrt{L_e C_e} \quad (20)$$

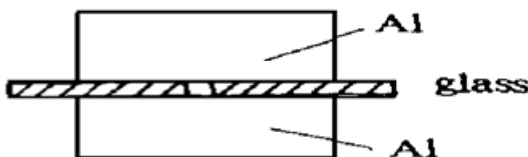


图7 电极结构图

Fig. 7 Construction of the electrodes

4 实验结果及讨论

采用扫频方法,我们测试了如图7所示的射频波导放电装置的电极参数,其中上下电极的尺寸为 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,测试电缆长为 1.25 m ,其特性阻抗为 50Ω 。扫频仪为BT-3D型频率特性分析仪,扫频范围为

2~ 300 MHz, 最小频标间隔为 1 MHz, 测量分为三个步骤, 测量结果见表 1。

表 1 扫频测量电极结果

Table 1 Results of the measurement of electrodes with a sweep-frequency method

steps	1(3. 1. 1)		2(3. 1. 2)		3(3. 1. 3)
resonant frequency	f_1	f_1'	f_{c_1}	f_{c_1}'	f_p
results/MHz	77	63	40.2	18.5	68.5

编制简单的计算机程序就可计算出波导电极的参数: 特性阻抗 $Z_c = 9 \Omega$, 相速 $V_p = 1.096 \times 10^8 \text{ m/s}$, 分布电感 $L_e = 82 \text{ nH/m}$, 分布电容 $C_e = 1013 \text{ pF/m}$, 频率为 120 MHz 时的相移常数 $\beta = 6.88 \text{ m}^{-1}$ 。

测量时应注意: 进行每一步骤测量时都会在扫频仪的显示器上观察到多个谐振频率, 这时应当选择第一个谐振频率。因为频率过高时, 可能会超过电极的自身谐振频率, 从而使计算的结果不正确。另外, 前两个步骤都需要测试电缆, 测试电缆越长第一谐振频率越小, 在显示器上观察到的谐振点越多。

利用以上测量参数, 我们计算了电极均匀放电并联电感的大小^[3], 5 个并联电感位置如图 8(a) 所示, 当并联谐振频率为 120 MHz 时, 每个并联电感的感抗为

$$Z = \frac{Z_{ce}}{2} \text{ctg} \frac{\beta \Delta d}{2} \quad (21)$$

其中 $\Delta d = 0.08 \text{ m}$, 此时电压分布如图 8(b) 中实曲线所示, 电压变化小于 4%, 再由 $Z = 2\pi f L$ 可计算出 $L = 21.2 \text{ nH}$ 。实验中电极上所加每个并联电感测量值为 20.6 nH , 此时加电感电极并联谐振于 120 MHz。调节高频信号发生器到 120 MHz, 代替射频源, 模拟气体未放电时电压沿电极纵向分布, 图 8(b) 中“○”代表用高频电压表测量的电压相对值, 可以看出电压沿电极分布均匀。根据文献[2], 当放电等离子体阻抗满足条件 $R \gg 1/\alpha x$ 时, 工作气体在放电与未放电情况下电极上电压分布基本相同。

可见理论与实验符合得很好, 在工作气体比例 $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} = 1 \cdot 1 \cdot 4$, 射频源频率 120 MHz 时, 沿 400 mm 长电极之间实现了均匀射频放电。另外, 我们自行研制了双通道不等长射频波导激光器, 其中长通道长 400 mm, 短通道长 200 mm, 并且测量了电极参数, 计算了均匀放电的并联电感量。目前, 已经实现了不等长双通道同时均匀放电, 并在双通道上实现了激光输出。

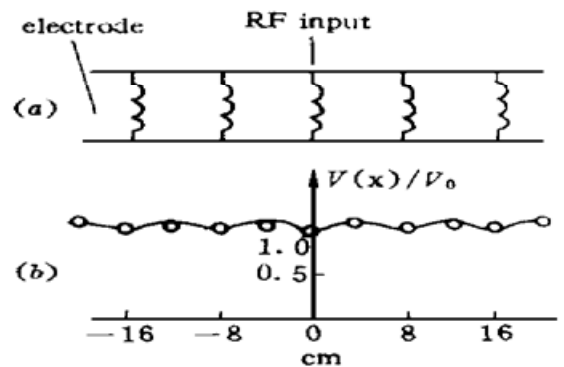


图 8 (a) 沿电极所加电感的位置;
(b) 加感电极电压分布

Fig. 8 (a) Position of the inductors along the electrodes; (b) Voltage distribution along the electrodes with the shunt inductors

参 考 文 献

- Antonio Lapucci, Francesco Rossetti, Marco Ciofini *et al.*. On the longitudinal voltage distribution in radio-frequency-discharged CO_2 lasers with large-area electrodes. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31** (8): 1537~ 1541
- D. He, D. B. Hall. Longitudinal voltage distribution in transverse of discharges in waveguide lasers. *J.*

Appl. Phys., 1983, **54**(8): 4367~ 4373

- 3 Guo Zhenhua, Huang Songjue, Wang Youqing. A method of reducing longitudinal voltage variation for RF-excited laser. *Laser Technology* (激光技术), 1994, **18**(6): 322~ 324 (in Chinese)
- 4 Qiu Guanwan. Circuit. Beijing: Higher Education Press. The third edition. 1990. Appendix A. 168~ 204 (in Chinese)

The Measurement of Electrode Parameters of RF Waveguide Lasers

Tian Zhaoshuo Wang Yusan Liu Fengmei Zhao Jingshan Wang Qi

(*Institute of Opto-electronics Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Abstract According to the transmission line theory, the electrodes of RF waveguide lasers can be approximated to a lossless uniform transmission line. By means of a frequency-scanning method, the electrode parameters of RF waveguide lasers, such as the characteristic impedance, phase constant, distributed inductance, and distributed capacitance, etc, can be measured.

Key words transmission line, frequency-scanning, electrode

国际激光物理和量子光学会议(ICLPQO'99) 征稿简则

《国际激光物理和量子光学会议》(International Conference on Laser Physics and Quantum Optics——ICLPQO'99)定于1999年8月25~28日在上海召开。会议由中国科学院上海光机所、上海交通大学和香港浸会大学主办,并得到美国光学学会、国际理论物理中心(ICTP)和国家自然科学基金委等组织的支持。预期将有二十余位国外知名学者应邀作特邀报告。会议主要议题有:高强度短波长光物理;相干光源物理;非线性光学现象和非线性材料;激光冷却、捕陷和波色爱因斯坦凝聚;辐射的非经典特性;激光与物质相互作用;原子激光器;量子干涉效应;激光光谱学;量子计算和传输及测量的量子理论。欢迎广大科研人员踊跃参加。

1999年4月30日前(以邮戳为准)将中、英文摘要200字(以及题目、作者及单位、通讯处、电话、Fax、Email、关键词等)寄至上海市800-211信箱 所办公室田守云收,邮编:201800, Fax: 021-59528896。

ICLPQO'99 秘书处

1999. 1. 15.