

TEA CO₂ 激光器均匀场电极的设计

耿玉民, 李殿军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:介绍了 TEA CO₂ 激光器大面积均匀场放电电极的设计以及实验结果。无限大平行平板电极两极间的电场分布是均匀的,要在有限的(电极)尺寸条件下实现电场的均匀性设计,即将设计问题转变为放电电极剖面形状的理论 and 工程计算问题。本文根据 TEA CO₂ 激光器工作的实际情况,选择 Chang 氏理论作依据设计了均匀场放电电极。实验结果表明,使用该电极 TEA CO₂ 激光器可在 500 Hz 高重复频率脉冲条件下连续工作 10 min,并在 55 mm 放电电极宽和平坦部分为 40 mm 剖面的平行平板两个主放电电极之间实现了大面积稳定的均匀场辉光放电,解决了主放电电极大面积放电易产生弧光放电影响 TEA CO₂ 激光器长期稳定工作的问题。

关键词:辉光放电;均匀场电极;电极剖面;TEA CO₂ 激光器

中图分类号:TN248.22 文献标识码:A

Design of electrodes with uniform electric fields in TEA CO₂ lasers

GENG Yu-min, LI Dian-jun

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: The design of electrodes with large area uniform electric fields for TEA CO₂ lasers and the experimental results are introduced in this paper. Generally, the distribution of electric fields is uniform between two electrodes with boundless parallel slabs, but the design of uniform electric fields in the condition of limited sizes of electrodes has been transformed to the theoretical and engineering computations for profiles of discharge electrodes. According to the practical working conditions, the Chang's theory is chosen as the reference to design the electrodes with uniform electric fields. The experimental results show that the TEA CO₂ laser with designed electrodes is able to continuously work for 10 min in the condition of high repetition rate 500 Hz and the uniform glow discharge has been realized in a large area between two main electrodes with a width of 55 mm and flatness part of 44 mm. The electrodes designed here overcome the problem of arc discharge from the large area discharge in main discharge electrodes and provide a long work stability for TEA CO₂ lasers.

Key words: glow discharge; uniform electrode; electrode section; TEA CO₂ laser

1 引言

高功率、高重复频率 TEA CO₂激光器是指横向激励、且采用大面积放电电极和预电离技术,工作电压为 30 ~ 50 kV 而气压为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ Pa 的脉冲气体激光器,其输出的脉冲峰值功率可达 10^8 MW 以上,脉冲能量为几十至百焦耳,在激光推进、空间探测、激光加工和光电对抗等领域都有着广泛的应用。

与 Ar⁺离子和 Kr⁺离子等弧光放电激光器不同,CO₂激光器属于典型的辉光放电系统。系统中的弧光放电对于 CO₂分子不会产生激光的增益作用,而且对于脉冲 TEA CO₂激光器而言,以大电流放电为特征的弧光放电还会导致放电回路中元器件的损坏,因此,避免弧光放电的产生、优化放电电极的设计是高功率 TEA CO₂激光器系统的关键技术之一。在紫外预电离维持的 TEA CO₂激光器中,为获得高功率、高重复频率和高能量脉冲激光,必须增加放电面积,实现大体积的均匀放电。但面积越大,实现辉光放电的难度也越大,由此产生的问题是如何设计激光器的放电电极方能保证电极放电过程中的均匀性和稳定性^[1],避免发生从辉光放电到弧光放电的转变而影响激光能量输出。本文论述了如何实现大面积均匀场电极的设计问题,并通过对电极的放电试验,验证其设计是否满足 TEA CO₂激光器运转工作的实际要求。

2 均匀场 Chang 氏电极剖面

为提高激光器的光电转换效率,使放电电极在放电空间获得面积尽可能大的均匀辉光放电,电极的剖面必须满足工程实际的需求。其要点是在保证电极中间具有尽可能大的均匀电场分布条件下,确保边缘电场的强度不会超过中间电场。有几种能够近似满足这种要求的电极设计方法,其中常用的有 Rogowski^[2,3]电极和 Chang 氏电极^[4]以及类似的电极设计^[5~9]等。Rogowski 电极的剖面形状主要由对数函数描绘,而 Chang 氏电极的剖面形状主要由指数函数描绘。从物理学的角度分析来看,这两者所描绘的图形几乎没有本

质上的差别,但两种电极的设计方法都存在着一一定的缺陷,即只适合于宽度较窄的放电电极,电极较宽时则无法直接应用。基于对 Rogowski 电极和 Chang 氏电极理论的分析,本文选择 Chang 氏放电电极作为设计基础,是因为 Chang 氏电极有较好的均匀场的特点,而且 Chang 电极理论在设计应用时具有较大的灵活性。

在直角坐标系中,通常将下式指数函数:

$$y = \frac{1}{2} \cdot ke^x, \quad (1)$$

描写的剖面称为 Chang 氏电极剖面,其中参数 $k > 0$ 。一般来说, k 值越大,电极形状越紧凑,但电场的均匀性也越差。作为工程应用, k 的取值大约在 0.02 左右。公式(1)所描绘的 Chang 氏电极剖面的缺点就是中间没有平坦的部分,在实际应用中往往实现的均匀辉光放电的面积较小。为增加平坦部分,人们经常对 Chang 氏电极剖面做各种修正,以使其增加电极的均匀辉光放电面积。由电极的等位剖面公式(2)和(3)可以导出改进型的 Chang 氏电极剖面形状:

$$x = u + k \cos v \sinh u, \quad (2)$$

$$y = v + k \sin v \cosh u, \quad (3)$$

式中 u 为运算参数, $|v| < \pi$, 最佳均匀场所对应的 v 的取值略小于 $\pi/2$ 。对于工程的实际应用而言, $v = \pi/2$ 时的精度也完全满足实际的要求,而且对于分析问题是很有指导意义的,当 $v = \pi/2$ 时可以得出:

$$y = \frac{\pi}{2} + k \cosh x, \quad (4)$$

上式通常称为改进型 Chang 氏电极剖面。如图 1 所示,式(4)电极剖面与式(1)比较可以看出,两者的差别只是在于边缘处的曲率有所变化,但是差别很小,中间平坦部分增加得不多,不能满足宽电极均匀辉光放电的设计需求。Elizondo 等人和绳宇纲等人^[10~12]均对三维电极的设计与加工进行了研究,对放电电极面型和电极放电均匀性的影响没有做较深入的探讨。对于一个实际的激光器系统,放电电极的放电间距、长度(l)、宽度(b)和厚度(h)都是有限制的,例如,当要求实现均匀辉光放电的宽度达到 4 cm 并且限制激光电极的厚度控制在 3 cm 以内时,按照公式(1)和

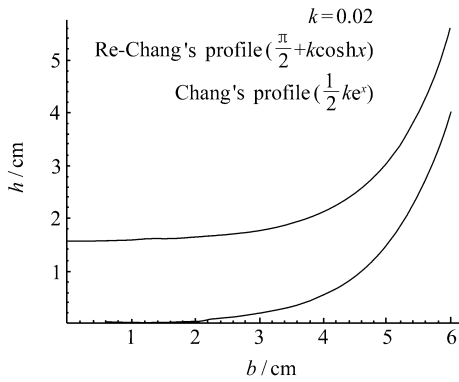


图1 Chang's 氏与改进型 Chang's 氏电极剖面

Fig. 1 Chang's and reshaped Chang's profiles

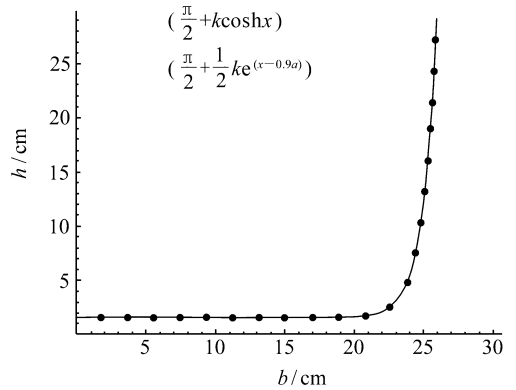


图2 平坦部分 40 mm 宽的电极剖面形状

Fig. 2 Electrode section with a profile of 40 mm width

(4) 则完全不能给出设计结果。为解决这个问题,必须在满足工程精度要求条件下应用近似公式灵活地替代上述公式完成电极的设计任务。

3 放电电极设计及实验验证

公式(4)在 x 值较大时可由下列公式表示:

$$y = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}ke^x, \quad (5)$$

为获得较宽的中间均匀电场分布,利用公式(5)尝试构造一个新的函数:

$$y = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}ke^{(x-0.9a)}, \quad (6)$$

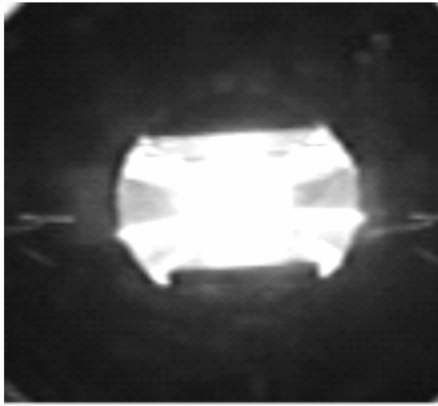
式中 $a = D/2$, D 表示电极中间平坦部分的宽度值。利用公式(6)很容易解决宽电极的设计问题。例如,设计一个要求中间均匀场宽度为 D 的电极,只要将 D 值带入公式(6)中计算即可。接下来需要回答的问题是,新构造的这个函数所描绘的电极剖面是否符合电场均匀性的要求。为验证公式(6)的正确性,利用计算机模拟和计算了公式(4)与公式(6)所描绘的剖面的符合性问题。结果表明:在满足 $k > 0$ 的条件限制下,利用公式(6)得出的剖面形状完全符合公式(4)的要求,图2所示就是其中的一个模拟结果。以设计一个中间平坦宽度为 40 mm 并且限制激光电极的厚度在 30 mm 以内的放电电极为例,公式(6)的计算结果为实心圆点所描绘的轨迹,与公式(4)的剖面曲线(细实线)几乎完全重合,说明由公式(6)计算的结果也能满足均匀场分布的要求。完成剖

面设计之后,利用TEA CO₂激光器放电电极整个辉光放电体积比激光输出能量值(即单位体积输出的激光输出),可以计算出电极的长度,最后完成电极的整个设计。

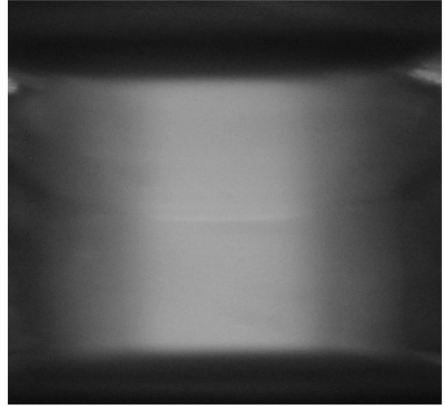
对于实际的大尺寸放电电极提出很高的精度要求是不和时宜的,因为大尺寸的放电电极在完成加工后很难保证不会产生电极变形问题,而且还要考虑到绝缘、密封、导电、气体流道通畅、低电感接触传导等实际限制,电极在装配过程中也会产生较大的形变,这些“形变”值通常大于相对于加工精度的要求。因此,一个实际的放电电极是否能够满足激光器系统实际的使用,需要经过放电过程的检验。工程经验表明,即使是一个加工精良的放电电极系统,其放电电极也需根据放电的实际情况对电极的面型进行数次修整后才能达到实际使用要求。分析认为,产生这种情况的原因可能是电极使用前需要进行“放电老化”的试验,这个放电过程(尤其是在发生弧光时)将因为电极材料本身的不均匀性(或者缺陷)和一对电极的装配误差产生电极表面面型的不均匀性,老化过程的修整修正了激光电极使其达到了实际使用要求。本文按照公式(6)共完成了4对激光电极的设计,分别用于不同的脉冲TEA CO₂激光器系统中,均达到了实现均匀辉光放电的要求。图3表示的是其中的一对电极之间的均匀辉光放电的试验照片,图3a表示的是包括紫外预电离的主放电电极放电情况,图3b表示的是主放电电极间均匀辉光放电的情况。在脉冲高达500 Hz 重复频

率放电时,仍然能够保证每个脉冲放电处于均匀辉光放电状态。为进一步说明激光器放电电极均匀辉光放电的情况,图4给出了激光器高重复频率运转时输出光束辐照耐火材料的照片,说明激

光器电极之间的放电始终保持在辉光状态下,因为一旦产生弧光时,激光器储能充放电路的自动保护装置将会因为放电电流过大自动切断电源电能的供应,激光器主机将会停止运转。



(a) 主放电电极的放电
(a) Discharge of main electrode



(b) 主放电电极间均匀辉光放电
(b) Uniform glow discharge between the two main electrodes

图3 图3 电极辉光放电照片

Fig. 3 Photos of glow discharge between the two electrodes

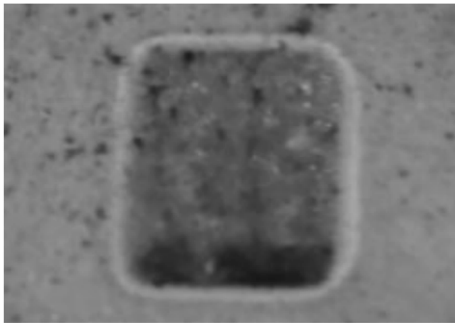


图4 TEA CO₂激光照射耐火砖照片

Fig. 4 Photo of firebrick radiated by TEA CO₂ laser beam

4 结 论

本文分析和讨论了大尺寸电极剖面形状和大

面积均匀场放电电极的设计。实验研究结果与实际放电应用证明,设计的放电电极使 TEA CO₂ 激光器在 500 Hz 高重复脉冲条件下能够连续工作 10 min, 在 55 mm 放电电极宽和平坦部分为 40 mm 剖面的平行平板两个主放电电极之间实现了大面积稳定的均匀场辉光放电,解决了主放电电极大面积放电易产生弧光放电而不能使 TEA CO₂ 激光器长时间稳定工作的技术问题,使 TEA CO₂ 激光器获得千瓦或万瓦量级的高功率激光输出,放电过程验证了分析结果的适用性和正确性。主要的结论可以总结为:采用本文提出的设计方法解决了宽尺寸电极的剖面形状和均匀场的工程设计问题;激光电极在满足实际使用前必须经过“放电老化”及其表面面型的修整过程;将所设计的放电电极应用到实际的激光器系统中,证明完全达到预期的技术指标和实际应用要求。

参考文献:

- [1] 楼祺洪,徐捷,傅淑芬,等.脉冲放电气体激光器[M].北京:科学出版社,1993.
LOU Q H, XU J, FU SH F, et al. Pulsed Discharge Gas Laser[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)
- [2] 郝光生,雷仕湛.激光器设计基础[M].上海:上海科学技术出版社,1979.

- HAO G SH, LEI SH ZH. *The Basic of Laser Design*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1979. (in Chinese)
- [3] ERNEST G J. Uniform field electrodes minimum width[J]. *Opt. Commun.*, 1984, 49(4): 275-277.
- [4] CHANG T Y. Improved uniform-field electrode profile for TEA laser and high-voltage applications[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, 44(4): 405-407.
- [5] 雷仕湛. 激光技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
LEI SH ZH. *Laser Technology Manual*[M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [6] 赵翔, 左都罗, 卢宏, 等. TEA CO₂激光器几种放电电极的比较[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(5): 569-574.
ZHAO X, ZUO D L, LU H, *et al.*. Comparison of several discharge electrodes for TEA CO₂ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. 2006, 18(5): 569-574. (in Chinese)
- [7] 赵翔. TE(A)激光器中放电电极的设计与选择[J]. *光学与光电技术*, 2008, 6(5): 45-49.
ZHAO X. Design and selection of discharge electrodes for TE(A) lasers[J]. *Opt. Optoelectronic Technol.*, 2008, 6(5): 45-49. (in Chinese)
- [8] 赵翔, 左都罗, 卢宏, 等. TEA CO₂激光器的电极与放电研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(4): 33-35.
ZHAO X, ZUO D L, LU H, *et al.*. Electrode and discharge of TEA CO₂ laser[J]. *Opt. Optoelectronic Technol.*, 2005, 3(4): 33-35. (in Chinese)
- [9] ERNST G J. Compact uniform field electrode profiles[J]. *Opt. Commun.*, 1983, 47(1): 47-51.
- [10] ELIZONDO J M, BENZE J W, MONEY W M, *et al.*. High performance electrode profile generation method[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, 56: 532-534.
- [11] 绳宇纲, 万重怡. 三维均匀场电极的设计[J]. *中国激光*, 2000, A27: 1093-1096.
SHENG Y G, WAN CH Y. Design for 3D uniform field electrodes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, A27: 1093-1096. (in Chinese)
- [12] 陈钰琪, 左都罗, 程祖海. 电极型面对横向激励高气压激光器放电的影响[J]. *推进技术*, 2007, 28(5): 550-554.
CHEN Y Q, ZUO D L, CHENG Z H. Effects of electrode profiles on the discharge of transversely excited atmospheric pressure CO₂ laser[J]. *J. Propulsion Technol.*, 2007, 28(5): 550-554. (in Chinese)

作者简介: 耿玉民(1954—), 男, 吉林长春人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事气体激光器技术及其应用的研究。

E-mail: ccgjs8188@yahoo. cn