

TEA CO₂ 激光器非对称电极系统的电场分布*

郭亚丁^{1,2}, 谭荣清¹

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 设计了一种非对称电极, 这种非对称电极的阳极是 Chang 电极或 Ernst 电极, 阴极是由直线和圆弧构成的简单电极。通过比较和分析非对称电极和对称电极的特点发现, 非对称电极系统中简单电极的边缘电场起伏最大。采用有限元方法计算了非对称电极系统中的简单电极取不同的直线长度和弧线半径时, 非对称电极系统的电场分布, 给出了选择非对称电极系统中的简单电极参数的依据。结果表明: 这种非对称电极系统结合了解析电极和简单电极的优点, 通过选择非对称电极系统的简单电极参数, 它可以在 TEA CO₂ 激光器中产生边缘电场起伏小于 0.06, 且满足电极表面均匀场面积宽度要求的电场。

关键词: TEA CO₂ 激光器; 均匀场电极; 非对称电极; 电场计算; 解析对称

中图分类号: TN82 **文献标志码:** A

为了横向激励大气压 (TEA) CO₂ 激光器能稳定工作, 需采用能产生大面积均匀电场的均匀场电极。目前已有多种均匀场电极的解析造型, 如: Rogowski^[1], Chang^[2] 和 Ernst^[3-4] 造型等。这些造型是电极横截面的 2 维曲线, 是在给定电场均匀度的条件下, 通过一组或多组解析公式推出的。由这种曲线加工成电极, 主要是离散采样曲线上的点, 然后利用高精度数控机床加工成型。为了精确描述曲线, 必须采用足够多的数据点, 这就导致电极加工周期长、加工难度和费用高, 并且很难完全保证加工的电极的对称性和平滑性。以往研究表明: 在对称电极系统中, 电极表面具有良好的电极均匀性^[5-8]。本文主要对非对称电极系统所形成的均匀电场截面进行分析。比较了对称电极系统与非对称电极系统所形成电场的均匀性, 给出了解析电极和简单构型电极相结合时简单构型电极的构型参数。

1 计算和结果

本文的解析构型电极分别采用 Ernst 构型和 Chang 构型, 称为解析电极。其简单电极构型是以加工简单和容易把握为主要的目的, 因此采用直线加圆弧的方式构造。在电极系统中, 有两个电极, 其中一个为解析电极, 另外一个为简单电极, 这样的电极系统称为非对称电极系统。而两个电极同时采用解析电极或者简单电极, 称为解析对称电极系统或简单对称电极系统。

本文计算的非对称电极系统中, 解析电极为电极系统的阳极, 简单电极为阴极。在计算电场时, 假设两电极相互平行并且在 z 方向上无限延伸, 因此电场的分析和计算就变成了一个 2 维问题。电极系统的坐标和简单电极的构型如图 1 所示。

另外, 假设两电极之间不存在等离子体, 介质是均匀线性的。设两电极半间距 $y_0 = 50$ mm, 则电极间距为 100 mm, 放电截面大小为 100 mm × 100 mm。需要指出的是, 计算和分析数值的绝对大小没有任何意义, 这些数值的比较和变化趋势才是应该被关注的。

图 2 给出了电场的 x 方向上非对称电极系统、解析电极对称系统和简单电极对称系统的电场均匀性比较图。其中电场强度表示为 x 坐标的函数, 分别取靠近阳极 ($E(A)$), 两电极中心 ($E(M)$) 和靠近阴极 ($E(C)$) 的电场来分析电场均匀性。从图 2 中看出: 简单电极的电极表面电场起伏较大, 这种较大的波动很可能是造成激光器放电不稳定的一个重要因素; 非对称电极系统的解析电极表面电场大小波动不超过 2%, 基本呈均匀分布。因此非对称电极系统中的解析电极性质并不会因为简单电极的存在而产生较大改变。

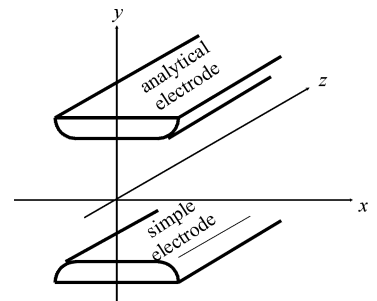


Fig. 1 Coordinate system

图 1 电极坐标系

* 收稿日期: 2008-05-19; 修订日期: 2009-01-04
作者简介: 郭亚丁 (1984—), 男, 硕士, 从事激光器研究; adenguo@gmail.com.

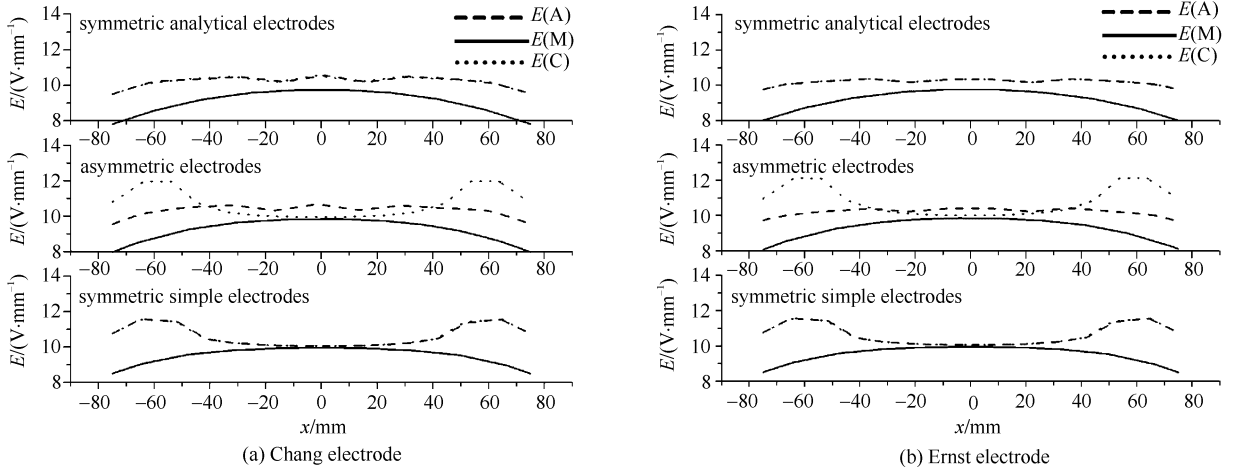


Fig. 2 Electric field variation along x direction

图 2 沿 x 方向电场变化

y 方向上的电场变化对放电的影响比 x 方向上的电场大小变化对放电影响小。文献[9]指出,靠近电极表面的电场梯度,也就是在 y 方向上靠近电极表面的电场变化,也是影响气体放电激光器的放电电场均匀性的一个重要方面。图 3 为非对称电极系统、解析电极对称系统和简单电极对称系统的电场强度表示为 y 坐标的函数时,电极表面的电场梯度。从图 3 可以看出: y 方向的电场分布因为简单电极的存在而变得均匀,这主要是因为简单电极在放电截面内是直线。所以,简单电极的非对称电极系统能够有效降低 y 方向电场变化幅度,即电极表面电场梯度大小。

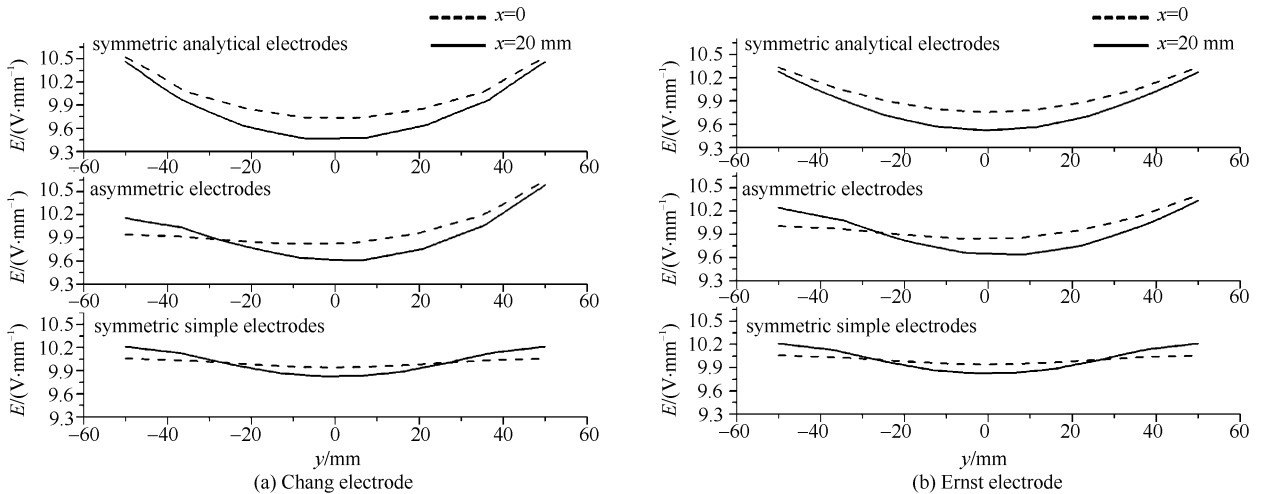


Fig. 3 Electric field variation along y direction

图 3 沿 y 方向的电场变化

需指出的是,本文的均匀电场并不是电场强度完全相同,而是在一定范围变化的电场强度。大小范围称为均匀度要求。本文均匀度要求是,与参考点的电场强度偏差小于 2%,即

$$\frac{|E(x,y) - E(0,y)|}{E(0,y)} \leq 0.02 \quad (1)$$

式中: $E(x,y)$ 为点 (x,y) 的电场大小; $E(0,y)$ 为参考点的电场大小, y 轴为参考线。

图 4 为 Chang 和 Ernst 电极的均匀电场分布,其中深色部分的电场满足式(1)的要求,称为均匀电场。从图 4 可以看出:非对称电极系统中的解析电极表面附近的均匀电场分布与解析对称电极系统中的电极表面附近基本一致;而简单电极的表面附近均匀电场分布与简单对称电极系统中的电极表面附近基本一致。均匀电场的大小和形状再次说明了非对称电极中的解析电极的性质不会因为简单电极的存在而改变。另外,Chang 电极和 Ernst 电极形成的电场都是具有相似的规律,这是由于这两种电极线形都是同一种数学变换的结果。

2 简单电极的参数选择

简单电极的构成如图 5 所示,由长度为 L 的直线和半径为 R 的圆弧组成。这两个参数的变化将引起电场

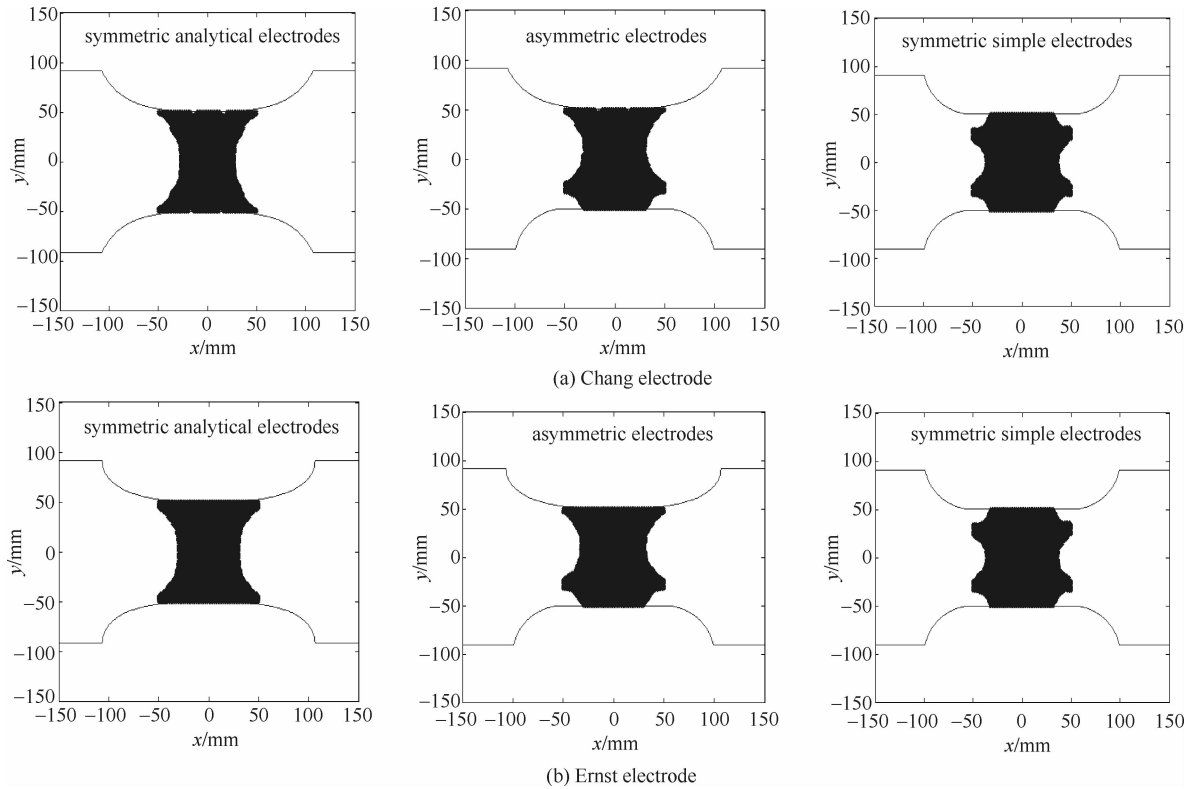


Fig. 4 Uniform field in electrode system

图 4 电极产生的均匀电场

分布的变化。以 Chang 电极为例,在一个非对称电极系统中,解析电极分布的构型不变,通过分析不同简单电极下的电场来说明如何选择简单电极的参数。

图 6 为参数 R 对电场分布的影响,图 6(a)为 $L=y_0$ 时, R 取的不同值时,均匀电场面积占放电截面百分比的大小变化情况,均匀电场要求满足式(1),图 6(b)为不同的 R 下,靠近简单电极表面的电场强度随 x 轴的变化情况。从图 6 可以看出,对于一定的放电截面, R 取值变大时,均匀场面积占放电截面的比例也会近似线性增大;当 R 逐渐增大时,电极表面电场的变化越来越小,但这样的变化并不是线性的,而是当 R 增大到一定阶段时,电极表面的电场起伏不会再显著减小。因此在非对称电极中, R 的取值要控制在一定的范围内,当 $R < y_0$ 时,容易使电极表面电场分布起伏大于 10%,而 $R > 1.5y_0$ 时,电极又太宽。

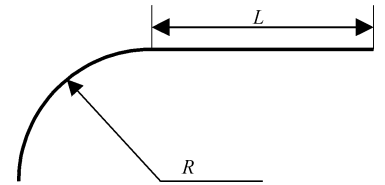


Fig. 5 Structure of simple electrodes

图 5 简单电极的构成

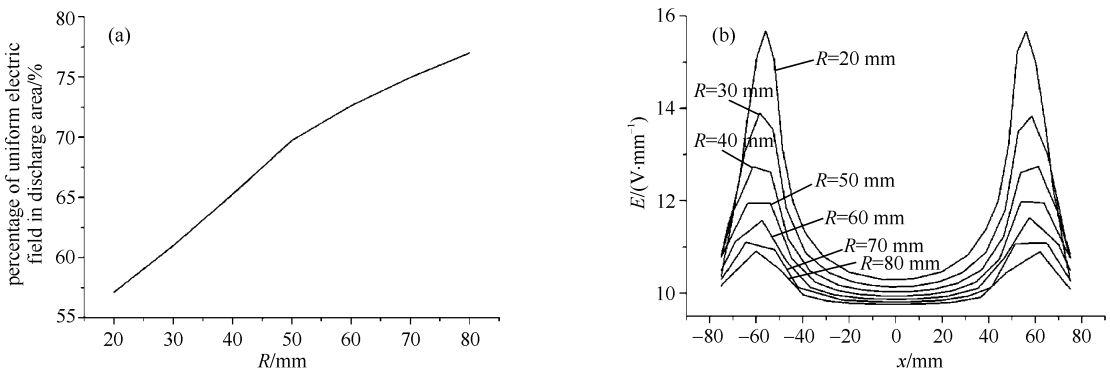


Fig. 6 Effects of arc radius on distribution of uniform field

图 6 圆弧半径对均匀电场分布的影响

图 7 是 L 对电场分布的影响情况。其中,图 7(a)为 $R=y_0$ 时, L 取不同值时,均匀电场面积占放电截面的百分比的情况,图 7(b)为不同 L 下,靠近简单电极表面的电场强度随 x 轴的变化情况。比较图 6 和图 7 可以

看出:参数 L 与 R 对整体电场影响不同,当不断增大 L 的时候,放电截面内的均匀电场面积不是一直增大,当 L 增大到约为 $1.5y_0$ 时,放电截面内的均匀电场面积有最大值; L 与 R 电极表面电场的影响也不同,电极表面电场起伏的大小是随 L 的增大而线性减小的。

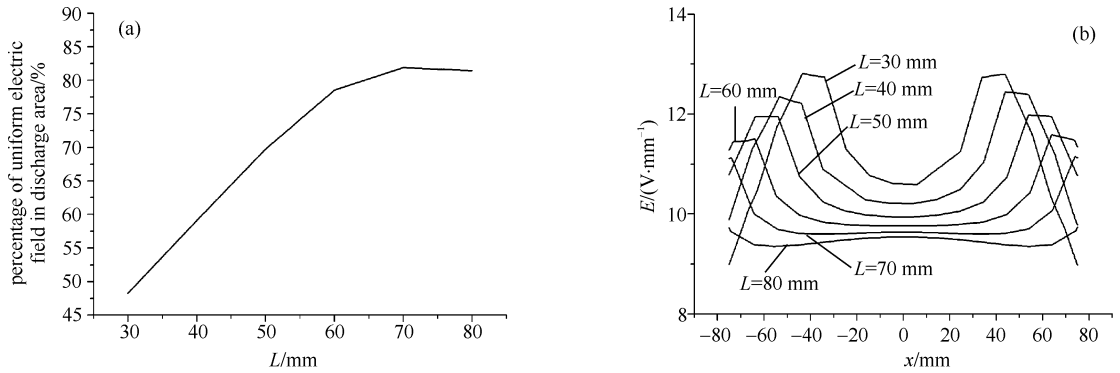


Fig. 7 Effects of straight line length on distribution of uniform field

图 7 直径长度对均匀电场分布的影响

图 8 为电极半宽度固定为 $2y_0$ 时,分别取不同的 L 和 R ,电场均匀度的变化。从图 8(a)可以看出:当 L 增大时,以 y 轴为参考点计算的均匀电场面积也会增大,但是由于受到电极整体宽度的限制,在 $L < 1.5y_0$ 之前, L 每增大 $0.2y_0$,均匀电场面积增大 $5\% \sim 10\%$,当 $L \geq 1.5y_0$, L 每增大 $0.2y_0$,均匀场面积增大只有 1% 左右,因此随着 L 的增加,均匀电场面积的增加趋势明显减缓。图 8(b)是简单电极表面的电场强度。可以看出:电场最大值都是在直线和圆弧连接处产生的,在固定的电极宽度下,随着 L 的增大,半径 R 必然减小,直线与圆弧连接处的斜率变化剧烈,电场强度随之增大;随 L 的增加,连接处电场的突变并不是线性变化的,当 $L = 0.2y_0$ 时,连接处的电场强度只比中心电场强度高大约 5% ,而 L 增加到 $1.4y_0$ 时,连接处的电场强度比中心高约 20% ,当 $L = 1.8y_0$ 时,连接处的电场强度比中心高约 60% ,当 $L > 1.4y_0$ 时,连接处的电场突增较为明显;虽然随着 L 的增加,直线与圆弧的连接处电场突增,但是电极表面的均匀电场面积也增大, $L = 0.2y_0$ 时,电极表面均匀电场面积最小,不到 $0.5y_0$;当 $L = y_0$ 时,电极表面均匀电场大小约为 y_0 ;当 $L = 1.8y_0$ 时,电极表面均匀电场面积约为 $1.5y_0$ 。

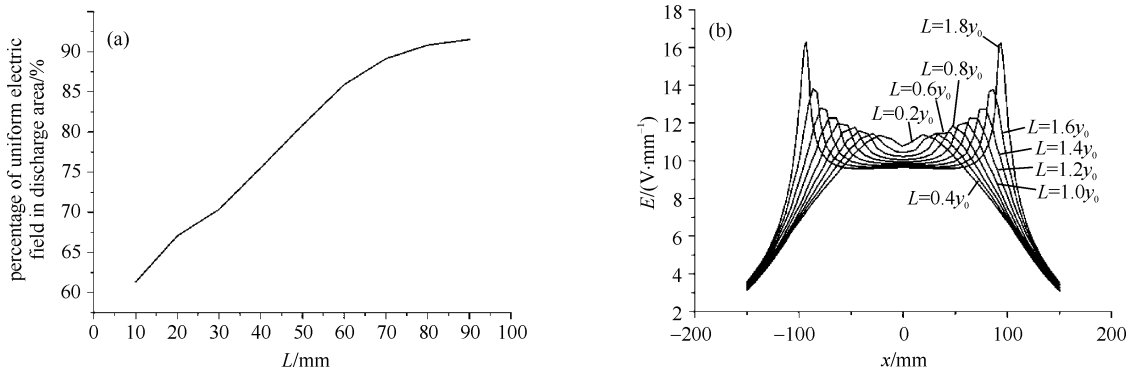


Fig. 8 Effects of straight line length with same width on distribution of uniform field

图 8 相同半宽度下不同参数对于均匀电场分布的影响

从以上分析可以看出:非对称电极系统中的简单电极直线部分的长度 L 和圆弧部分的半径 R 都不能大于 $1.5y_0$,大于 $1.5y_0$ 的 L 和 R 对增大均匀场面积作用减小,并且会增大电极宽度。因此,在有限的电极宽度之内,较大的 L 虽然能增大简单电极表面的均匀电场面积,但是会导致直线和圆弧连接处较大的电场强度突变。因此,考虑到参数 R 对电极表面电场的影响是非线性的,因此可以将 R 略大于 L ,这样有利于改善电极表面电场的均匀性。如固定电极半宽度为 $2y_0$ 时,当 $L = y_0$ 时,使 $R = 1.025y_0$,这时连接处的电场强度比中心电场强度电极变化小于 6% ,且电极表面均匀电场宽度大于 y_0 ,均匀电场面积也达到基本对称电极系统产生的均匀电场面积的要求。

3 结论

本文分析和比较了由高精度有限元方法得出的数值电场,结果发现:在非对称电极系统中,解析电极附近

的电场能够保持与对称电极系统中基本一致的均匀分布。从整个电场的角度看,在非对称电极系统中,简单电极引入了一定的电场大小起伏,这起伏最大值位于电极边缘位置。但简单电极设计简单,易于加工,安装简便,可在简单电极附近放置放电需要的其它器件,另外,简单电极在一定程度上改善了电极附近电场变化的梯度。对多种简单电极形成的电场的计算和分析得出,在电极宽度固定时,选择简单电极的两个参数直线长度和圆弧半径的一些依据:当电极半宽度固定为 $2y_0$, 直线长度为 y_0 , 圆弧半径略大于直线长度。这样构成的非对称电极系统,即具有较大的均匀电场面积,又可以有效地减少由于电极构型而产生的电极表面电场的起伏。

参考文献:

- [1] Cobine J D. Gaseous conductors[M]. New York: Dover,1985:177-181.
- [2] Chang T Y. Improved uniform-field electrode profiles for TEA laser and high-voltage applications[J]. *Rev Sci Instrum*, 1973, **44**(4): 405-407.
- [3] Ernst G J. Uniform-field electrode with minimum width[J]. *Opt Commun*, 1984, **49**(4): 275.
- [4] Ernst G J. Compact uniform field electrode profiles[J]. *Opt Commun*, 1983, **47**(1): 47-51.
- [5] Luce C A. Field uniformity in a Chang electrode system[J]. *Optics and Laser Technology*, 1989, **21**(2): 99-104.
- [6] Harrison J A. A computer study of uniform-field electrodes[J]. *Brit J Appl Phys*, 1967, **18**(1): 1617-1627.
- [7] 吕岩,万重怡. Ernst 电极系统电场均匀性分析[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(3): 302-306. (Lü Yan, Wan Chongyi. Field uniformity analysis of an Ernst electrode system. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(3): 302-306)
- [8] 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**(4): 569-574. (Zhao Xiang, Zuo Duluo, Lu Hong, et al. Comparison of several discharge electrodes for TEA CO₂ laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 569-574)
- [9] Dilazzaro P, Giordano G, Mezi L, et al. Field uniformity of discharge lasers; electrode profiles and current return path effects[J]. *Optics and Laser Technology*, 1994, **26**(1): 15-19.

Electric field of asymmetric electrodes for TEA CO₂ laser

Guo Yading^{1,2}, Tan Rongqing¹

- (1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Features of a practical asymmetric electrode system were studied. The anode of this system is an analytical electrode such as Chang electrode and Ernst electrode, and the cathode is a simple electrode with line-arc structure. The electric field of the system was calculated with high-precision finite element method(FEM), and was analysed and compared with that of two symmetric electrode systems. With the analysis of effects of the parameters used in construction of the asymmetric electrodes, some suggestions were made for optimal choice of the shape of simple electrodes. The results show that the asymmetric electrodes are suitable for TEA CO₂ lasers, and uniform electric field with required size can be obtained by proper choices of electrode parameters.

Key words: TEA CO₂ laser; uniform field electrode; asymmetric electrodes; electric field calculation; analytical symmetry