

# 三维均匀场电极的设计

绳宇纲 万重怡

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**提要** 提出“线性扩展法”用于构造电极端部的三维造型,并采用该方法设计了一种基于 Chang 造型的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器放电电极,在其三维表面获得了满意的均匀电场分布。

**关键词** 均匀场电极, TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 三维电场分布, 线性扩展法

## 1 引言

为了从双放电、电子束和紫外光预电离的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器获取高功率及高光束质量的激光输出,主放电电极间的辉光放电应在设计的截面范围内尽可能地均匀。为此,电极的截面要求有适当的造型,使电极表面放电区域内的电场强度分布均匀,电极边缘附近的电场强度低于放电范围内的电场。迄今已有若干种近似满足以上要求的电极造型,如 Rogowski 电极<sup>[1]</sup>, Chang 电极<sup>[2]</sup>, Ernst 电极<sup>[3]</sup>等。这些造型都是电极横截面的二维曲线,这对于理想情形即无限长电极来说是满足均匀场电极设计要求的。而实际的放电电极是有限长的,因此存在如何设计端部造型的问题。本实验室的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[4]</sup>曾采用的电极其横截面就是 Chang 电极曲线,而端部采取将 Chang 曲线旋转 180°成型的方法<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。但是在实际应用中特别是在高重复频率工作时,该电极的两个端部往往会产生电弧,不利于进一步提高激光器的功率。利用电荷模拟法<sup>[6]</sup>计算的结果表明,这样的电极在端部三维表面的电场分布已不再满足均匀电场的要求<sup>[7]</sup>。为此,本文提出了一种巧妙而简便的设计端部造型的方法,即线性扩展法,获得了满意的均匀场电极。

## 2 Chang 电极端部的三维电场分布

### 2.1 Chang 电极的设计

Chang 电极横截面的曲线方程是一族二维解析函数方程,该族曲线由以下参数方程描述

$$x = u + k \cos v \sinh u \quad (1)$$

$$y = v + k \sin v \cosh u \quad (2)$$

对于一对特定的电极来说,参数方程中的  $k$  和  $v$  均为常数,从而电场强度  $E$  是  $u$  的函数,记为  $E(u)$ 。定义符号如下:

$\delta_m$ : 电极表面放电区域所能允许的最大场强偏差,对于最大平坦电场设计来说,该值在放

电区域边界处得到。

$x_m$ : 上述场区边界处的或  $u$  (或  $x$ ) 记为  $x_m$  (或  $u_m$ ), 有  $\delta_m = [E(0) - E(u_m)]/E(0)$ 。

本文所研究的 TEA 激光器所需的放电区域截面的纵横比  $x_m/y_0 = 1$ , 其中  $y_0$  为两电极中心距离的一半, 如图 1(a) 所示。

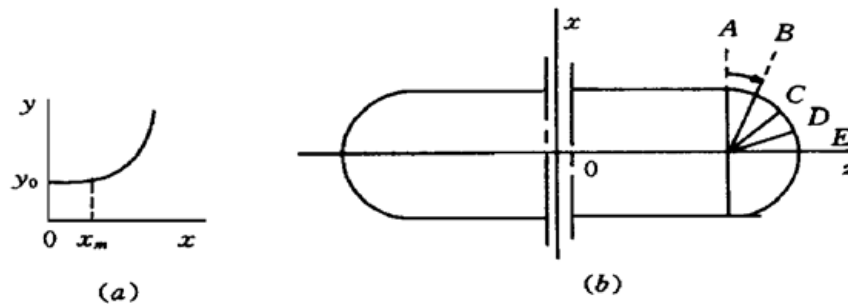


图 1 Chang 电极示意图

(a) 电极的截面曲线; (b) 电极的俯视图, 其中央截面 (即  $z = 0$ ) 曲线以及端部不同旋转角 ( $A \sim E$ ) 的曲线均为 Chang 曲线

Fig. 1 Sketch of Chang's electrode

(a) Chang's profile in the first quadrant; (b) Top view of the electrode. The central section ( $z = 0$ ) and the sections of different rotation angles ( $A \sim E$ ) at the end are Chang's profile

根据对电场均匀程度的需要确定允许场强偏差  $\delta_m$  为 0.005。方程中的参数  $k$  为 0.054,  $v$  为 1.72。从而曲线方程化为

$$x = u - 0.008\sinh u \quad (3)$$

$$y = 1.72 + 0.05\cosh u \quad (4)$$

## 2.2 电极表面的场强

如前所述, 电极端部通常的加工方法是将 Chang 曲线旋转  $180^\circ$  成型, 下面通过计算分析采用这种成型方法后端部表面场强的畸变。

计算静电场的数值方法很多, 这里选用电荷模拟法。根据静电场的唯一性原理, 将空间连续分布的电荷 (此处即为电极表面的电荷) 以有限数量的、布置在原场域以外一定位置上的离散电荷来等效代替, 使其在原场域边界上所形成的电位或场强在允许误差范围内符合所给的边界条件, 然后利用叠加法由这些离散电荷来计算场域的电场分布, 这种求解静电场问题的方法叫电荷模拟法。所选用的离散电荷称为模拟电荷<sup>[6]</sup>。

考虑电场的对称性, 选用了点电荷和线电荷两种模拟电荷。在 PC 机上利用 C 语言编写数值计算程序<sup>[7]</sup>, 得到图 2 所示的计算结果。(a) 曲线是中部截面 ( $z = 0$ ) 电极表面的相对场强分布; (b) 曲线组中的五条分别是在端部不同截面 (各截面位置见图 1(b)) 的电极表面上相对场强分布, 具体为: A 为电极端部横截面 (Chang 曲线); B 为端部 Chang 曲线旋转  $22.5^\circ$  截面; C 为端部 Chang 曲线旋转  $45^\circ$  截面; D 为端部 Chang 曲线旋转  $67.5^\circ$  截面; E 为端部 Chang 曲线旋转  $90^\circ$  截面。

由图 2 (a) 可以看出, 在电极中央截面 ( $z = 0$ ) 上  $x \leq 5$  mm 的放电区域内,  $E_{\max}/E_0 = 1.0047$ , 即  $(E_{\max} - E_0)/E_0 = 0.0047$ , 不超过设定值  $\delta_m$ ; 而由图 2 (b), 在端部各截面的电极表面, 放电区域内的  $(E_{\max} - E_0)/E_0$  均大于  $\delta_m$ , 特别是在旋转  $45^\circ$  截面上的电极表面, 该值为 0.0809。这说明采用上述三维电极造型可以在电极中部获得满意的均匀电场, 但端部放电区域

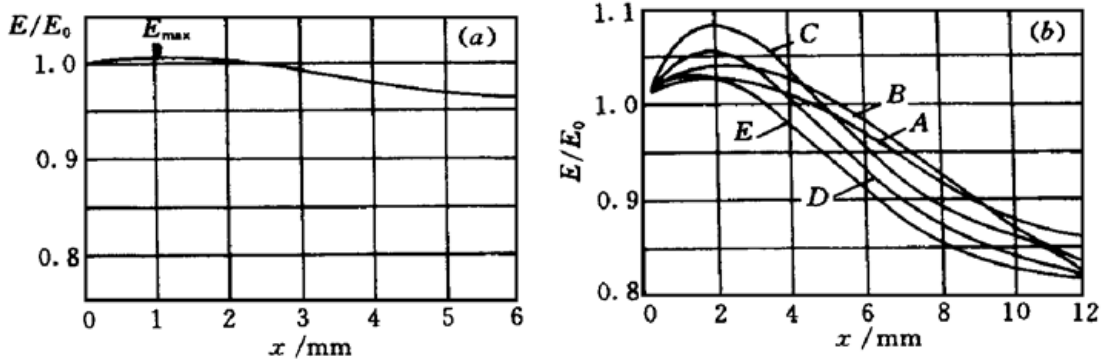


图 2 原电极表面的相对场强

(a) 中央截面( $z = 0$ ); (b) 端部不同旋转角截面

Fig. 2 Relative field strength at the surface of the original electrode

(a) Central section ( $z = 0$ ); (b) Sections of different rotation angles at the end

内表面电场畸变严重。这正是采用该电极易于在端部产生电弧的原因。

### 3 电极造型的改进及实验结果

上面证明, 在构造端部曲面时若简单采用将 Chang 曲线旋转  $180^\circ$  的方法, 将导致端部曲面局部曲率较大, 从而场强偏差增大。因此, 进一步的改进设计重点应放在端部造型上。

为了设计和加工的方便, 设法在保持原有电极主体的情况下只对电极的端部进行局部范围内的改动。从上述计算结果可以看出, 电极表面场强在电极端部某两点有最大值, 而这两点恰好处于其所属 Chang 曲线(即旋转  $45^\circ$  截面)的中部。因此考虑一种减小端部曲面曲率的方法: 在构造端部曲面时, 不是将 Chang 曲线直接旋转产生端部曲面, 而是在旋转过程中使其沿着原来半圆旋转轨迹的径向做一扩展, 旋转轨迹由半圆变为半椭圆, 其长半轴和短半轴分别沿  $z$  轴和  $x$  轴方向, 如图 3 所示。这样就可以使原来出现最大场强的端部表面曲率减小, 进而场强减小, 并保持中部表面场强变化不大。

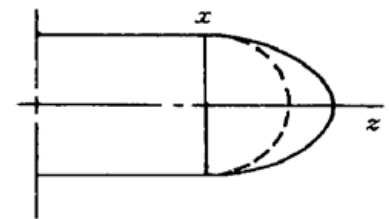


图 3 线性扩展生成的电极端部

Fig. 3 End of the electrode with linear extension

定义椭圆的长半轴与短半轴之比为扩展系数  $T$ , 那么旋转角为  $\theta$  的截面曲线在空间直角坐标系中的方程为

$$\begin{aligned} x &= (u + k\cos v \sinh u) \cos\theta \\ y &= v + k\sin v \cosh u \\ z &= T(u + k\cos v \sinh u) \sin\theta \end{aligned}$$

对于扩展后的坐标, 有

$$z/x = T \tan\theta$$

当  $T = 1$  时,  $z/x = \tan\theta$ , 即原来没有扩展而直接旋转  $180^\circ$  的情形, 旋转轨迹为半圆; 当  $T > 1$  时, 旋转轨迹为长轴沿  $z$  轴的半椭圆, 得到扩展后的端部曲面。这种方法相当于将端部曲面沿  $z$  轴拉伸为原来的  $T$  倍, 故称其为“线性扩展法”。

改变扩展系数  $T$  的值, 发现在  $1 < T < 2$  的范围内, 当  $T = 1.71$  时端部表面的电场分布

最均匀。从图4中可以看出,在电极中部表面,场强分布与改造前相比变化不大;而在端部表面,  $(E_{\max} - E_0)/E_0$  由 0.0809 减小至 0.0058, 接近设定值  $\delta_m$ 。考虑到实际电极尺寸的限制,对于  $T > 2$  的扩展情况不做进一步研究。最后选定端部扩展系数  $T$  为 1.71。

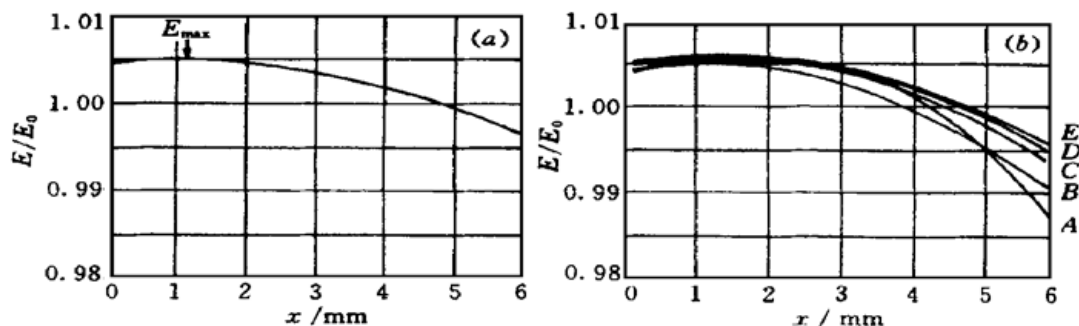


图4 改进后的电极表面相对场强 ( $T = 1.71$ )

(a) 中央截面 ( $z = 0$ ); (b) 端部不同旋转角截面

Fig. 4 Relative field strength at the surface of the redesigned electrode ( $T = 1.71$ )

(a) Central section ( $z = 0$ ); (b) Sections of different rotation angles at the end

在本实验室的 TEA 激光器上应用上述改进的电极造型,整体放电均匀性跟改进前相比有明显提高。在放电重复频率不超过 40 Hz 时,电极端部不再产生电弧。

### 参 考 文 献

- 1 J. D. Cobine. Gaseous Conductors. New York, London: McGrall-Hill, 1941
- 2 T. Y. Chang. Improved uniform-field electrode profiles for TEA laser and high-voltage applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, **44**(4): 405~ 407
- 3 G. J. Ernst. Uniform-field electrodes with minimum width. *Opt. Comm.*, 1984, **49**(4): 275~ 277
- 4 Wan Chongyi, Jian Zhuanghua, Xia Shengqin *et al.*. An ultraviolet photopreionized high-pressure tunable CO<sub>2</sub> laser. *J. Electron.* (电子学报), 1978, **1**(1): 42~ 48 (in Chinese)
- 5 H. J. Seguin, K. Manes, J. Tulip. Simple inexpensive laboratory-quality rogowski TEA laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1972, **43**(8): 1134~ 1139
- 6 Tan Kexiong, Xuejiaqi. Numerical Calculation of High Voltage Static Field. Beijing: Hydroelectricity, 1990 (in Chinese)
- 7 Sheng Yugang, Wan Chongyi. A calculation of 3-D field of Chang electrode. *Appl. Laser* (应用激光), 1999, **19**(4): 151~ 153 (in Chinese)

## Design for 3D Uniform Field Electrodes

Sheng Yugang Wan Chongyi

(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** A novel method of Linear Extension for designing the 3D profile at the end of the electrode is proposed. Using this method, an electrode based on Chang's profile is designed for a TEA CO<sub>2</sub> laser, where a satisfying uniform field distribution on the 3D surface is achieved.

**Key words** uniform field electrode, TEA CO<sub>2</sub> laser, 3D field distribution, linear extension