

电极面型对横向激励高气压 CO_2 激光器放电的影响^{*}

陈钰琦, 左都罗, 程祖海

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 计算并讨论了均匀场电极中电极板安装结构、电极板厚度对实际电场分布影响。计算表明在基本参数类似的条件下, 近罗可夫斯基电极表面电场强度具有 17% 的非均匀性, 但在垂直放电方向的对称面上却有更好的均匀性。对放电区辉光的时间积分照片和像增强型 CCD 相机记录的瞬态照片进行了分析, 结果表明: 电极表面的电场强度分布, 仅对放电的初始发展具有影响, 而放电区中央的电场分布以及预电离强度, 对最终放电区的均匀性具有决定性的影响。

关键词: 二氧化碳激光器; 电极面型⁺; 脉冲放电⁺

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0550-05

Effects of electrode profiles on the discharge of transversely excited atmospheric pressure CO_2 laser

CHEN Yu-qi ZUO Du-luo CHENG Zu-hai

(Inst. of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The effects of thickness and installing structure on the distribution of electric field are calculated and discussed. It is revealed that the non-uniformity of electric field on the surface of a near-Rogowski electrode can be as high as 17% but the uniformity on the central symmetrical plane will be better than that of Emst electrode when their fundamental parameters are similar. Time-integrated photos taken by common digital camera and time-resolved photos taken by ICCD were analyzed. It indicates that the initial discharge development is influenced by the distribution of electric field on the electrode surface while the uniformity in the whole pulsed discharge process mainly depends on the distribution of electric field on the central area and the preionization strength.

Key words Carbon dioxide laser; Electrode profile⁺; Pulse discharge⁺

1 引 言

高功率脉冲 CO_2 激光器是激光推进应用的首选激光器^[1]。为了实现激光推进要求的功率和能量指标, 必须实现高气压大体积的均匀放电。在高气压脉冲放电激励气体激光器中, 一般要求主放电电极面形有适当的形状, 使电极表面电场分布均匀, 放电稳定。最初, 常采用由直线和指数函数组成的 Rogowski 面型^[2]。1973 年, Chang 等人提出了一种均匀场电极^[3]。之后, 又诞生了紧凑型张氏电极, Emst 电极^[4]

和 Stappaerts 电极^[5]等多种均匀场电极面型。除非采用双放电的动态面型方法^[6], 在高气压脉冲放电激励气体激光器的主放电电极采用均匀场电极已成为人们的共识。以上几种均匀场电极面型的获得, 利用了二维空间解析函数的特性或者保角映射。实际应用与这种理论模型存在着差别: 电极面型是三维的, 在轴向必须截断, 并且侧向的型线也不能无限制地延伸。Elizondo 等人^[7]、绳宇纲等人^[8]均对三维电极的设计与加工进行了研究。但这些工作对电极面型对放电均匀性的影响没有作深入的探讨。

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-26

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 陈钰琦 (1982—), 女, 博士生, 研究领域为高功率气体激光器。E-mail: chenyuqilase@163.com

为了探索提高放电稳定性、均匀性的方法,我们对直线圆弧近 Rogowski 电极、紧凑型张氏电极、Emst 电极等电极面型及其对放电均匀性、注入能量密度和电光转换效率的影响等进行了一系列的理论和实验研究,获得了优化主放电电极面型的方法。赵翔等人^[9]已报道了初步结果。这里将着重报道电极板安装结构、电极板厚度对电场分布以及放电均匀性的影响、电极表面电场对脉冲放电等离子体辉光时间发展的影响等进一步的结果。

2 均匀场电极理论

按获得的途径均匀场电极面型可分为两类:利用保角映射,根据电极表面电场均匀性要求确定面型的张氏电极、紧凑型张氏电极和 Emst 电极和利用解析函数的特性,根据放电区中心面电场均匀性要求确定面型的 Stappaerts 电极。目前我们的实验研究仅限于前一类,因此这里主要介绍由保角映射出发的均匀场电极理论。采用如下的保角映射^[2]

$$\zeta = \omega + k_0 \sinh \omega + k_1 \sinh 2\omega + k_2 \sinh 3\omega + \dots \quad (1)$$

式中 $\omega = u + iv$, $\zeta = x + iy$, 可将 uv 空间的水平线、竖直线映射为 xy 空间的相互垂直的曲线。若 uv 空间中 $v = v_m$ 的直线代表等势面,则 xy 空间对应于 $v = v_m$ 曲线 (u 为变参量) 同样为等势面^[10]。在 xy 空间的电场强度可表示为

$$E^{-2} = \left| \frac{d\zeta}{d\omega} \right|^2 \quad (2)$$

E 在 $u = 0$ 点 (等势面的对称点) 可按式展开

$$E = a_0(v) + a_2(v)u^2 + a_4(v)u^4 + \dots \quad (3)$$

为在电极表面获得尽可能均匀的电场,要求 $a_2(v)$, $a_4(v)$, ... 等系数尽可能多地取零值。由这一约束条件,可以确定 v_m 及 $k_0, k_1, \dots$ 等系数的值。仅使用 k_0 一个参数的均匀场电极,称为张氏电极面型;使用 k_0, k_1 两个参数,称为第 iv 类 Emst 电极面型;使用 k_0, k_1, k_2 三个参数,称为第 ⑤ 类 Emst 电极面型。

图 1 和图 2 给出了由 $x_m/y_0 = 1$, $\delta_0 = 0.005$ (张氏电极, x_m 点的电场强度与 $x = 0$ 点电场强度的相对差), $\delta_0 = 0.005$ (紧凑型张氏电极, $x = 0$ 点电场强度极小值与极大值电场强度的相对差) 等参数决定的张氏电极、紧凑型张氏电极以及 $x = 0$ 点曲率与紧凑型张氏电极相等的 Emst 电极的线型示意图以及按式 (2) 计算获得的电极表面电场强度。

张氏电极最高电场强度位于电极面型的中点;紧

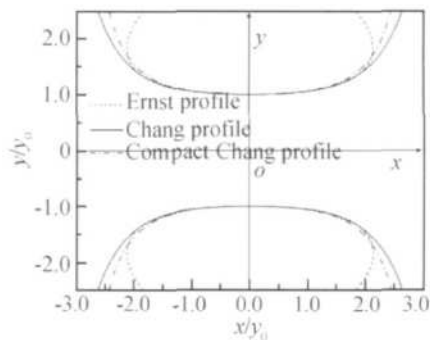


Fig. 1 Chang's electrode profile compact Chang's electrode profile and Ernst electrode profile

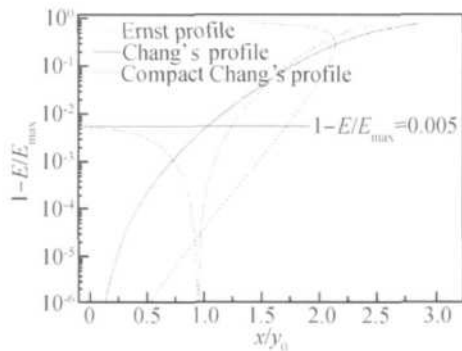


Fig. 2 Distribution of the surface electric field

凑型张氏电极,电极面型中点是电场强度的一个极小值点,最高电场强度点位于两侧,图 1 可看出,电极宽度明显窄于张氏电极;Emst 电极最高电场强度点与张氏电极相同,位于电极面型的中点。三种电极中,Emst 电极具有最窄的电极宽度,最高的电场均匀性。

3 放电区静电场数值计算

由于在组成放电区时电极型线被截断并且放电区结构对静电场分布也存在影响,式 (2) 获得的电场强度已不严格成立。对放电区静电场数值计算,有助于了解型线截断、放电区结构等实际因素对放电区静电场的影响。绳宇纲、赵翔等人^[8,9]在进行放电区静电场数值计算时采用了镜向电荷法的方法。为改善计算方法的普适性,采用有限元计算方法。

静电势满足 Poisson 方程

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (4)$$

静电场的数值计算,即是对以上 Poisson 方程的求解。在计算中,首先对放电区进行网格划分,然后利用四边形等参元进行单元矩阵计算,组装成系统方程,加入边界条件,最后利用 LU 分解法求解系统方程计算出静电场。

对电极背面存在大面积金属衬板的放电区,由于

放电区具有以 X 轴、 Y 轴为对称面的镜面反演称性, 因此只需计算图 3(a) 所示的封闭区域 $OABCD$ 即可。这一区域的边界条件如下:

BCD 段, $\Phi = 1$ 。其中 BC 段为金属基板, CD 为电极型线, 它们具有同一电势。图中的电极型线可以是近 Rogowski 型线也可以是张氏电极等均匀场电极的型线。 D 点坐标为 $(Q, 1)$ 。

OA 段, $\Phi = 0$ 。 OA 位于竖直方向镜面反演对称轴 X 轴上, 设定 OA 段的电势为 Q 相当于设定了与 BCD 段相对的另一电极的电势 $\Phi = -1$ 。 A 点的坐标可根据电极的宽度设定。在计算中设 A 点的坐标为 $(3, 0)$ 。

OD 段及 BC 段, 自由边界条件, 即 $\partial\Phi/\partial n = 0$ 。 OD 段的这一边界条件是根据静电场的对称性, BC 段的这一边界条件相当于假设固定放电电极的金属基板可侧向无限延伸。

放电区电极不采用大面积金属衬板时, 采用图 3(b) 的计算区域 $OAEDCB$ 。该区域的边界条件是:

BCD 段, $\Phi = 1$ 。 BC 为电极型线, 截止于 C 点, CD 为电极背面。 B 点坐标为 $(Q, 1)$ 。

OA 段, $\Phi = 0$ 。 OA 段可以是放电区的对称中心面, 也可以是平面金属网板电极。当 OA 段是网板电极时, 假设网板电极是无限大平面。

AE , ED , OB 段, 自由边界条件。 AE 段是以 O 点为圆心的 90° 圆弧, 是对无穷远边界的近似, 在计算中取 A 点坐标 $(1Q, 0)$ 。 ED , OB 段的自由边界条件, 来自放电区的对称性。

3.1 计算结果

图 4 给出了 $|y| = 2y_0$ 处截断电极型线 (相当于电极厚度为 y_0) 的紧凑型张氏电极和 I 类 Emst 电极在带和不带大面积金属衬板的电极表面电场强度。在不带大面积金属衬板时, 电极表面的电场强度与理想电极的理论结果相当一致: 紧凑型张氏电极, 电场

强度极大值与极小值比率的误差在 0.1% 的量级。电极底面加上大面积金属衬板后, 电场强度的分布发生明显改变: 紧凑型张氏电极的电场强度极大值点, 由 $|x| = y_0$ 点移动至 $|x| = 0.5y_0$, 而电场强度不均匀性小于 0.005 区域的半宽度, 紧凑型张氏电极由 $1.25y_0$ 减小到 y_0 , Emst 电极由 $1.55y_0$ 减小到 $0.8y_0$ 。

图 5 给出了 Emst 电极和一种近 Rogowski 电极的电场强度分布的比较。该近 Rogowski 电极由直线和与直线相切的 90° 圆弧组成。圆弧半径 $R = y_0$, 为使该电极和 Emst 电极有相同的宽度, 直线段的半宽度取 $1.12y_0$ 。为便于比较垂直放电方向的对称面上的电场强度分布, 图 5 中的数据按放电区中央点的电场强度值进行了归一化处理。图中由 $E = 1.0$ 开始单调下降的曲线, 表示对称面上的电场强度分布。其余曲线, 表示电极表面和背面的电场强度分布, 在 $x/y_0 = 2.12$ 处的电场强度的急剧上升, 是因为此处存在截断形成的尖角的缘故。电极表面的电场强度均匀性, Emst 电极明显优于近 Rogowski 电极, 近 Rogowski 电极在电极表面的电场强度非均匀性, 达 17%。但在中央对称面的电场强度均匀性, 近 Rogowski 电极优于 Emst 电极。图 5 还给出了前述近 Rogowski 电极的放电极间距拉升 40% 后的电场强度分布。电极表面的电场强度非均匀性, 增加至 23%, 但中央对称面上的电场强度均匀性, 仍优于 Emst 电极。拉升 Emst 电极的放电极间距, 同样使电场均匀性变差。Poisson 方程 (4) 是一线性齐次方程, 拉开放电极间距, 只有电极面型也进行了等比例的放大, 才有可能保持放电区的电场均匀性不变。

图 6 给出了在不同位置截断 Emst 电极型线对电场分布的影响。图 6 的 Emst 电极型线, 采用了实验室 100 mm 放电装置的 Emst 电极面型参数。与该 Emst 电极相对的电极平面网板电极, 因此采用了

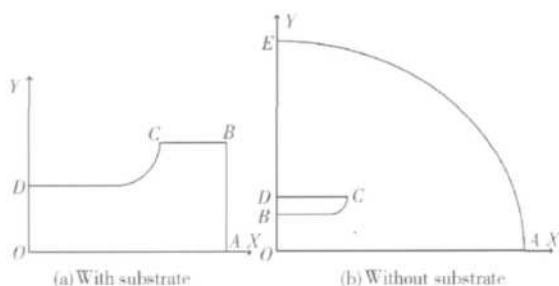


Fig. 3 Calculation area of electric field

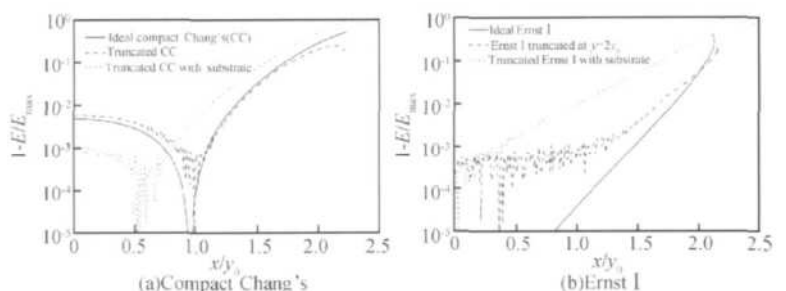


Fig. 4 Distribution of the surface electric field

$x_m = 0.5 y_0$ 的参数进行设计。图 6(a)的数据显示, 在 $y = 2y_0$ 处截断时, 电场强度的分布与理想电极的分布基本一致。在 $y = 1.5y_0$ 处截断时, 图 6(b)显示, 在电极表面, 尽管仍保持基本均匀的电场分布, 但电场强度的变化趋势发生了改变, 电极顶点由原来的极大值点变为了极小值点。而由 $E = 0.94$ 开始单调下降曲线表示的平面网板电极上的电场强度分布没有明显改变。

4 实验结果及讨论

用 Nikon Coolpix 4500 数字相机记录了各种面型放电电极的 TEA CO₂ 激光放电等离子体照片, 并采用 Princeton Instruments 公司的 PIMAX 1300 初步观测了 TEA CO₂ 激光器脉冲放电的时间发展过程。这些实验结果对揭示电极面型对放电的影响有重要价值。

图 7 给出了 100 mm 间距放电装置的典型照片, 照片中左侧为阴极, 右侧为阳极。图 7(a) 为 Emst 电极和平面网板电极组成的放电区的放电照片。该 Emst 电极面型, 即是图 6 中空心方框点对应的电极面型。即使采用了网眼电极紫外火花预电离 (左侧) 的方式, 放电区仍集中于放电区中部, 与 50 mm 放电区 Emst 面型放电区的结果^[9] 类似, 与图 6 显示的电极表面电场强度分布无对应关系。这说明, 电极表面的均匀电场分布, 不足以保证均匀的较宽的放电区。图 7(b) 给出了直线圆弧近 Rogowski 电极对 (电极直线段 100 mm) 的放电照片, 这里采用了双侧预电离 (上、下) 的方案。由于预电离远离放电区中心, 并且近 Rogowski 边沿存在较高的电场强度 (图 5), 仅在放电区的两侧形成了电极圆弧段出发狭窄辉光放电通道。图 7(c) 给出了近 Rogowski 电极和平面网板电极组成的放电区的等离子体照片, 可以看到, 放电区宽度和极间距的比率接近 1。等离子体辉光的分布,

与近 Rogowski 电极表面电场的不均匀性无明显关系, 但与网板电极下的预电离的强点存在对应关系, 图 7(a) 也可以看到这一点。图 7(d) 给出了直线段 56 mm 的近 Rogowski 电极对间距 70 mm 时的放电照片, 该放电区的静电场计算结果为图 5 中的空心方框数据。由于预电离与图 7(b) 相比更靠近主放电区, 在电极间形成了基本均匀的放电, 由照片的亮度数据可以发现, 边沿的放电略强于中心的放电。

图 8 给出了用 ICCD 相机记录的两侧火花紫外预电离、放电极间距 40 mm 的近 Rogowski 电极对的放电照片。实验中利用脉冲放电产生的电磁干扰作为触发信号拍摄了延时从 0.2~3.5 μs 时的放电照片。照片的左方为阴极, 右方为阳极。在图中可以看出, 由于小放电极间距采用的电极较窄, 双侧预电离可保证较强的预电离, 仅在 0.2 μs 时刻, 可以观测到与电场强度不均匀性相关的边沿处的较强的辉光, 其后的发展, 与放电区的静电场分布无明显关系。

4 结 论

对放电区的静电场分析显示: 在相同放电区间距、相同电极宽度的条件下, 直线圆弧组成的近 Rogowski 电极在电极表面, 有高达 17% 的电场强度非均匀性, 但在垂直放电方向对称面上的电场均匀性, 优于 Emst 电极。均匀场电极对组成的放电区, 电极厚度为放电极间距的一半, 或者均匀场电极和平板电极组成的放电区, 电极厚度等于放电极间距时, 电场强度均匀性基本上与理想均匀场电极的结果一致。

实验结果表明, 电极表面的电场强度均匀性, 并不能完全决定放电区的均匀性。采用网板、双侧火花紫外的混合预电离方式, 和近 Rogowski 电极, 获得了 100 mm 装置的纵横比接近 1 的放电效果, 而网板、Emst 电极组成的放电区, 放电区宽度远小于由电极

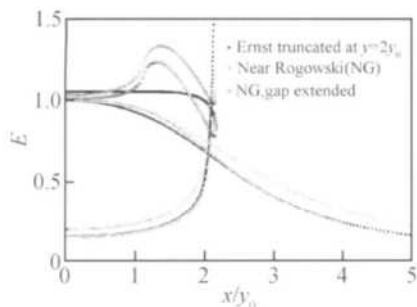


Fig. 5 Distribution of electric field on surface and symmetrical plane

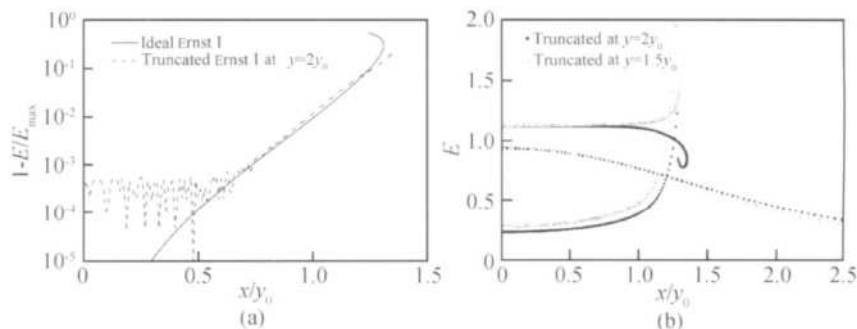


Fig. 6 Distribution of the surface electric field when the profile is truncated

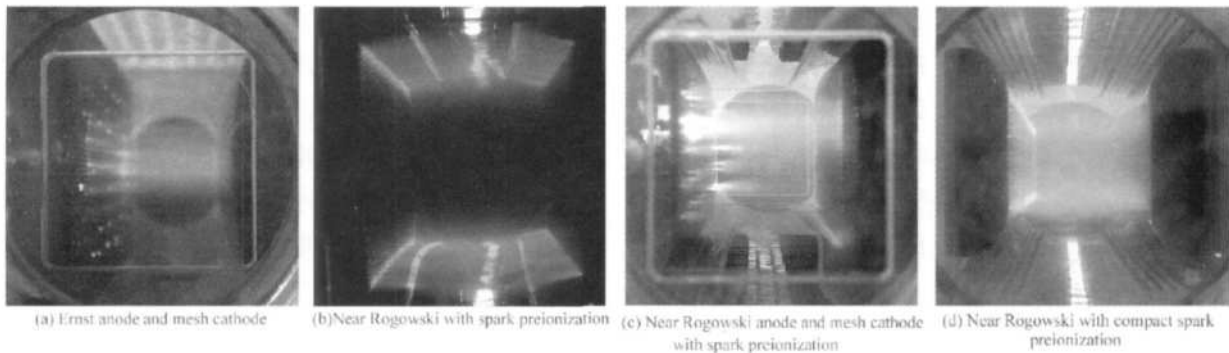


Fig. 7 Time-integrated photos of the pulsed-discharge plasma obtained from several kinds of electrode at discharge apparatus

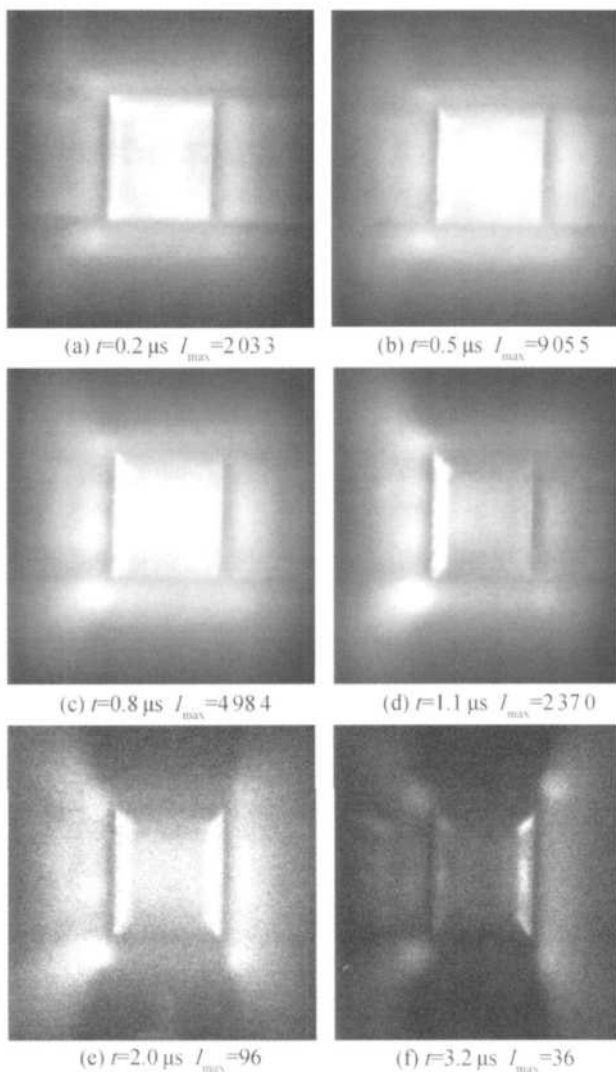


Fig. 8 Time-resolved photos of pulse discharge

表面电场均匀性期望获得的宽度。结合 ICCD 相机记录的放电瞬态过程, 可以认为, 电极表面的电场强度分布, 仅对放电的初始发展具有影响, 以放电区中央的电场分布以及预电离强度, 对最终放电区的均匀性具有决定性的影响。

参考文献:

- [1] Willy L Bohn, Wolfgang O Schall. Laser propulsion activities in Germany [C]. *Beamed Energy Propulsion. AIP Conference Proceedings*, 2002, 664: 79~94.
- [2] Wittenan W J. The CO₂ laser [M]. London: Springer-Verlag, 1987: 170~171.
- [3] Chang T Y. Improved uniform-field electrode profiles for TEA CO₂ laser and high-voltage application [J]. *Rev Sci Instrum.*, 1973, 44(4): 405~407.
- [4] Gerard J Emst. Compact uniform field electrode profiles [J]. *Optics Communications*, 1983, 47(1): 47~51.
- [5] Stappaerts E A. A novel analytical design method for discharge laser electrode profiles [J]. *Appl Phys Lett*, 1982, 40(12): 1018~1019.
- [6] Apollonov V V. High power self-controlled volume-discharge based molecular lasers [J]. *Opt Eng.*, 2004, 43(1), 1~18.
- [7] Elizondo JM, Benze JW, Money W M, et al. High performance electrode profile generation method [J]. *Rev Sci Instrum.*, 1985, 56: 532~534.
- [8] 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.
- [9] 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).
- [10] 梁昆淼. 数学物理方法 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [11] Akin J E. 有限元法的应用与现实 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.

(编辑: 刘梦威)