

文章编号: 1001-3806(2017)05-0680-04

准分子激光器中张氏面型电极的电场仿真研究

朱能伟^{1,2}, 方晓东¹, 梁 勳^{1*}, 赵读亮^{1,2}

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

摘要: 为了获得准分子激光器高脉冲能量输出, 采用张氏面型电极的理论, 设计了一套能产生大面积均匀电场的紧凑型电极。通过 ANSYS 软件数值仿真获得了电极表面电场分布, 并与紧凑型张氏面型电极的理论计算结果进行了对比验证; 分析了紫外火花预电离结构对电极放电的影响, 并进行了电位和电场分布仿真。结果表明, 预电离板的存在直接影响了电极之间的电位和电场分布; 电场仿真结果解释了预电离板的顶端与阳极形成放电的原因。该研究为大面积辉光放电电极设计提供了更深入的理论支持。

关键词: 光学器件; 激光器; 电场分布; 数值仿真; 紧凑型张氏面型电极

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.012

Simulation study on electric field of Chang electrodes in excimer lasers

ZHU Nengwei^{1,2}, FANG Xiaodong¹, LIANG Xu¹, ZHAO Duliang^{1,2}

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to obtain high pulsed energy output from an excimer laser, the Chang's electrode theory was used to design a compact electrode for producing large area uniform electric field. Through numerical simulation of ANSYS software, the electric field distribution on the electrode surface was obtained and compared with the theoretical results of the compact Chang electrode. The effect of ultraviolet pre ionization structure on electrode discharging was analyzed. The potential and electric field distribution were simulated. The results show that the presence of preionization plate directly affects the potential and electric field distribution between electrodes. The simulation results of electric field can be used to explain the formation of discharging between the top of preionization plate and anode. The study provides deeper theoretical support for the design of large area glow discharge electrodes.

Key words: optical devices; lasers; electric field distribution; numerical simulation; compact Chang electrode

引 言

准分子激光器已广泛应用于工业、医疗和科研等领域。液晶平板退火、微细结构加工和表面处理等应用促进了大功率准分子激光器的发展^[1]。实现准分子激光高平均功率输出的基本途径有两条:(1)高单脉冲能量运行;(2)高重复频率运行^[2]。获得高单脉冲激光输出能量,一方面需要在电极间实现大面积均匀辉光放电,常用的电极主要有张氏面型电极、紧凑型张氏面型电极^[3]、Ernst 面型电极^[4]和 Stappaerts 面型电极^[5]等;另一方面需要预电离技术为放电提供大量的初始电子分布,常用的预电离方式有紫外火花预电

离^[6]、电晕预电离^[7]、X 射线预电离^[8]等。ZHAO 等人使用模拟电荷法数值计算了几种电极面型的表面电场分布^[9]。CHEN 等人使用有限元算法讨论了电极板安装结构、电极板厚度对电场分布及放电均匀性的影响^[10]。SHENG 等人也使用模拟电荷法用于张氏面型电极的 3 维均匀电场改进^[11]。这些报道中着重关注电极表面的电场分布,但是实际应用中,更加关注电极之间的电场分布。AN 等人对基于印刷电路板预电离的横向激励高气压 CO₂ 激光器预电离结构电极系统进行了电场仿真研究,并给出了电极之间的电场分布^[12],同时指出预电离器导体的引入对电极系统的电场分布产生了影响。CHEN 等人^[13]对 ArF 准分子激光器电晕预电离下的电极电场进行了仿真,并给出了电极之间的电场分布情况。

本文中对紧凑型张氏面型电极进行了电场仿真,给出了电极之间的电场强度分布和电极表面的电场分布。在此基础上,对准分子激光器中带火花预电离结

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61307112)

作者简介:朱能伟(1988-),男,博士研究生,现从事准分子激光器结构方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liangxu@ aiofm. ac. cn

收稿日期:2016-11-11;收到修改稿日期:2016-11-30

构的电极电场进行了仿真和放电实验。

1 放电电极设计与仿真

1.1 张氏面型电极的设计理论

紧凑型张氏面型曲线是通过保角变换和归一化处理得到的,其曲线和曲线电场强度表达式为:

$$x = \frac{u + k \cos v \sinh u}{v + k \sin v} \quad (1)$$

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

$$v = \pi/2 + \arcsin k + t \quad (3)$$

$$E = \left[\frac{(1 + k \cos v \cosh u)^2 + (k \sin v \sinh u)^2}{(1 + k \cos v)^2} \right]^{-0.5} \quad (4)$$

式中, x 和 y 为归一化后空间坐标, u 为电通量, v 为电位函数, 窄特征常数 $k > 0$, t 是一个微小调节量, E 为归一化后电极表面电场分布。对于给定一个 k 和 t 值, x, y, E 是关于 u 的函数。

当 $t = 0$ 时, (1) 式 ~ (2) 式构成一条“最大平坦”条件下归一化张氏面型曲线。

当 $t > 0$ 时, (1) 式 ~ (2) 式构成一条归一化紧凑型张氏面型曲线。在 $u = \pm u_d$ 时, 将获得两个电场强度峰值 $E(u_d)$ 和 $E(-u_d)$, u_d 可表示为:

$$u_d = \operatorname{arcosh} \left(\frac{-\cos v}{k} \right) \quad (5)$$

此时的电场不均匀度 δ_m 为:

$$\delta_m = \frac{E(u_d) - E(0)}{E(0)} \quad (6)$$

取 $k = 0.458$ 和 $t = 0.079$, 设计一副用于大面积辉光放电的紧凑型张氏面型电极。电极间距 30mm, 电极宽度 40mm, 长度 510mm。图 1 是电极及预电离结构与放电主回路原理图^[14]。高压电源 (high voltage source, HVS) 通过电感 L_1 、电阻 R 和二极管 D 给储能电容 C_1 和 C_2 充电。当充电到位时, 闸流管开关 S 导通, 储能电容 C_2 经过电感 L_2 形成电压反转, 储能电容 C_1 和 C_2 电压叠加, 磁开关 (magnetic switch, MS) 前端电压继续提升。当达到设计的伏秒积分值时, 磁开关导通, 储能电容 C_1 和 C_2 通过电感 L_4 和火花预电离放

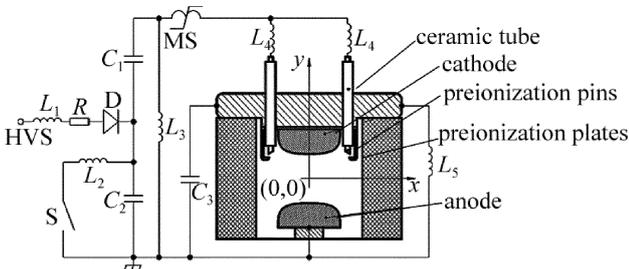


Fig. 1 Electrode construction and discharge circuit

电通道后, 向放电电容 C_3 转移能量, C_3 通过紧凑型张氏电极形成大面积辉光放电。火花预电离放电通道由带有间隙的预电离针和预电离板构成。在火花预电离放电形成后, 预电离针对电极主放电无影响, 但是预电离板和阴极电极是连接在一起的, 它们是等位体。预电离板的存在直接影响了电位和电场强度分布。

1.2 电极静电场理论

电极静电场仿真实质是在给定区域内, 对电极加载电位, 求解该区域内的电位函数或电场强度分布。该问题可以归结为在给定边界条件下求解泊松方程的边值问题。电位 φ 的泊松方程^[15]为:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon \quad (7)$$

式中, ρ 为体电荷密度; ϵ 为气体的介电常数。在气体未击穿前, 假定自由电荷仅分布在电极表面, 在电极之外不存在自由电荷, 即电极之外区域的体电荷密度 $\rho = 0$ 。泊松方程化为简单的拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (8)$$

边界条件为: 阴极表面电位 $\varphi = U$ (U 为给定电压); 阳极表面电位 $\varphi = 0$ 。

通过 ANSYS 软件求解 (8) 式, 可以得到电极间各点的电位 φ , 根据 $\vec{E} = -\nabla \varphi$ 可以计算出电极间各点的电场强度 \vec{E} 。

1.3 ANSYS 软件建模与仿真

在 ANSYS 软件中导入紧凑型张氏面型电极实际模型, 并在外围增加一个边长为 240mm 的正方形作为无穷远边界条件。电极是一个等势体, 其中电极内部电场为 0, 无需考虑电极内部情况, 只需在电极表面加载电位边界条件。采用三角形网格对模型进行网格划分, 其结果如图 2 所示。

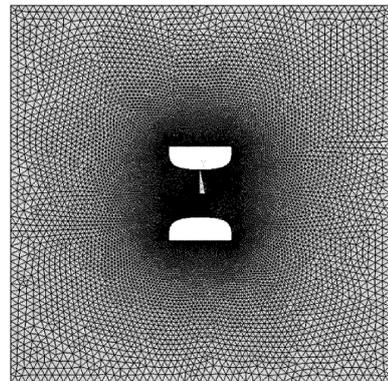


Fig. 2 Meshing result

图 2 中网格划分结果显示电极之间区域网格密集有利于在电极放电区获得较高的仿真精度, 无穷远处区域网格稀疏有利于减少计算时间。对阴极和阳极分别加载电压载荷 -30kV 和 0V 后, 对模型进行计算求解。

2 仿真和实验结果

2.1 紧凑型张氏面型电极仿真结果

图 3a 为 -30kV 下的紧凑型张氏面型电极电位云图,由图可以看出电位分布关于 x 轴对称。图 3b 为电极电场云图,电极表面中心电场平坦,两边各有一个电场强度峰值。该峰值是紧凑型张氏面型电极表面电场

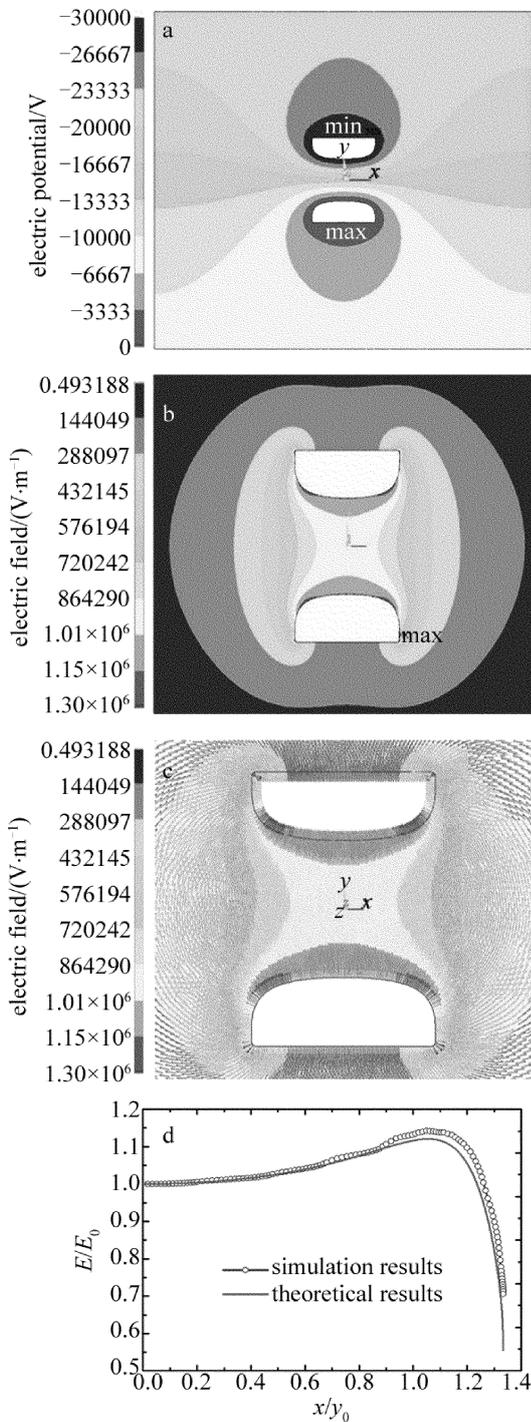


Fig. 3 Simulation results of electrodes

a—contour graph of electric potential b—contour graph of electric field
c—vector graph of electric field d—electric field distribution on the surface of normalized electrode

强度分布的特征峰。电极之间的电场分布较均匀,电场强度介于 $(0.86 \sim 1.15) \times 10^6 \text{V/m}$ 之间。图 3c 为电极电场矢量图,从图中可以看出,电极之间中心区域的电场方向基本一致,有利于形成电极之间的主放电。图 3d 为归一化后的电极表面电场分布的理论和仿真结果的对比。实际电极面型曲线是通过一定数量的两两相切的圆弧来拟合张氏面型曲线,以降低机械加工难度。拟合的误差是理论和仿真结果误差的主要来源。

2.2 有预电离板的电极仿真和实验结果

图 4 带有预电离板的电极仿真结果。图 4a 显示在增加预电离板后,阳极和阴极的电位分布发生变化,两电极之间的电位不再关于 x 轴对称。火花预电离结构在为电极放电提供大量初始电子浓度的同时,对张氏面型电极之间的电位分布产生较大影响。图 4b 直观显示了预电离板对张氏面型电极之间的电场分布的影响。尽管电极之间的电场强度保持在 $(0.70 \sim 1.17) \times 10^6 \text{V/m}$,但是最大电场强度从电极表面转移到预电离板的顶端。阳极表面两边依旧保持着电场强度峰值,但是阴极表面由电场强度双峰变为中心单峰。通过对该结构的电极进行放电实验,发现阳极与预电离板的顶端发生了放电,如图 5 所示。通过对电场的分析,可以看到预电离板顶端与阳极之间的电场强度与主放电通道的电场强度相当。因此有必要增加预电离板的顶端与阳极之间的间距来减小它们之间的电场强度,从而消除该放电通道。

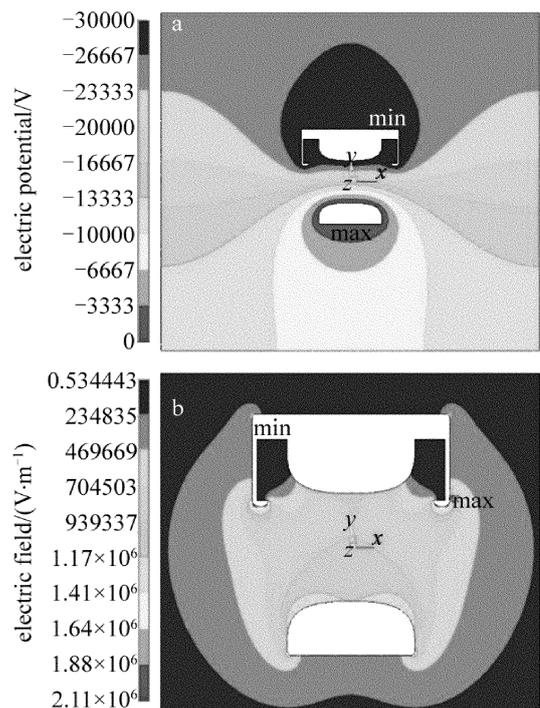


Fig. 4 Simulation results of electrodes with preionization plates

a—contour graph of electric potential b—contour graph of electric field

通过提高预电离板顶端的高度 2mm ,进一步进行

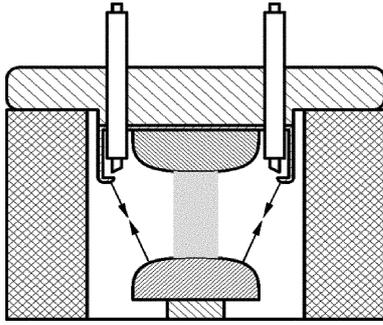


Fig. 5 Schematic diagram of discharging between the top of preionization plate and anode

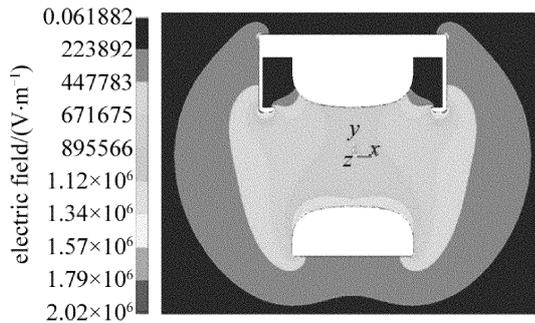


Fig. 6 Contour graph of electric field after increasing the height of the top of preionization plates

仿真和放电实验。图 6 为提高预电离板顶端的高度后的电极电场云图。主电极之间的电场强度明显比预电离板的顶端与阳极之间的电场强度大,有利于形成单一的电极之间主放电。通过放电实验,预电离板的顶端与阳极的放电已消除。

3 结 论

张氏面型电极的设计理论提供了一个设计电极的方法,但是仅考虑电极之间的电位和电场分布,无法提供增加了火花预电离结构等复杂情况下的电极之间的电位和电场分布。基于 ANSYS 软件的电场仿真有效地解决了该问题。相比通过实验验证设计的合理性,这是一种既经济又快捷的设计方法。本文中仅进行了 2 维静电场仿真,实际 3 维瞬变电场比 2 维静电场复杂得多,需要更复杂的模型和算法来计算。

参 考 文 献

[1] BASTING D, STAMM U. The development of excimer laser technolo-

- gy—history and future prospects[J]. International Journal of Research in Physical Chemistry & Chemical Physics, 2001, 215(15):75-79.
- [2] YU Y Sh, YOU L B, LIANG X, *et al.* Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9):2253-2269 (in Chinese).
- [3] CHANG T Y. Improved uniform-field electrode profiles for TEA CO₂ laser and high-voltage application [J]. Review of Scientific Instruments, 1973, 44(4):405-407.
- [4] ERNST G J. Uniform-field electrodes with minimum width[J]. Optics Communications, 1984, 49(4):275-277.
- [5] STAPPAERTS E A. A novel analytical design method for discharge laser electrode profiles[J]. Applied Physics Letters, 1982, 40(12):1018-1019.
- [6] JUDD O P. An efficient electrical CO₂ laser using preionization by ultraviolet radiation [J]. Applied Physics Letters, 1973, 22(3):95-96.
- [7] von BERGMANN H M, HASSON V. Low-impedance high-voltage pulsers for travelling-wave excitation of high-power UV gas lasers[J]. Journal of Physics, 1976, E9(11):982-984.
- [8] HASAMA T, MIYAZAKI K, YAMADA K, *et al.* 50J discharge-pumped XeCl laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(1):113-120.
- [9] 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(4):569-574 (in Chinese).
- [10] CHEN Y Q, ZUO D L, CHENG Z H. Effects of electrode profiles on the discharge of transversely excited atmospheric pressure CO₂ laser [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(5):550-554 (in Chinese).
- [11] SHENG Y G, WAN C Y. Design for 3-D uniform field electrodes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(12):1093-1096 (in Chinese).
- [12] AN R, TAN R Q, GUO Y D, *et al.* Field uniformity of electrode system with preionization structure for TEA CO₂ laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(9):1281-1285 (in Chinese).
- [13] CHEN J X, XU X Y, WANG Y. Electrodes system design and electric field simulation research of ArF excimer laser [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2014, 51(1):011402 (in Chinese).
- [14] ZHAO J M, YOU L B, YU Y Sh. Characteristics of KrF excimer laser with an output of 0.73J [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11):3060-3064 (in Chinese).
- [15] FENG C Zh, MA X K. Introduction to engineering electromagnetic field [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 1-35 (in Chinese).