

文章编号: 1001-4322(2006)04-0569-06

TEA CO₂ 激光器几种放电电极的比较*

赵 翔, 左都罗, 卢 宏, 程祖海

(华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 从均匀场电极理论出发, 计算并讨论了近似 Rogowski 电极、Chang 电极(含紧凑式 Chang 电极)和 Ernst 电极的形状、理论电场分布和实际电场分布。对实验室所用的几种电极进行了脉冲放电实验, 从而获得了 TEA CO₂ 激光器的放电参数与输出特性, 并对这些结果进行了比较和分析。计算表明, 在基本参数相同的情况下, Ernst 电极具有最紧凑的外形和最佳的均匀电场分布。实验表明, 采用近似 Rogowski 电极的 TEA CO₂ 激光器具有最大放电辉光范围和 44 kV 的最小放电击穿电压; 采用 Ernst 电极的 TEA CO₂ 激光器具有 25 J 的最高单脉冲能量和最大 17.2% 的斜率效率。最后提出了 TEA CO₂ 激光器主电极的选择建议。

关键词: TEA CO₂ 激光器; 放电电极; 均匀放电; 电场强度; 模拟电荷法; 输出特性
中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A

在双放电、紫外预电离及电子束维持的 TEA CO₂ 激光器中, 放电均匀性和稳定性是获得高能量、高功率脉冲激光的必要条件。采用大面积均匀场电极是 TEA CO₂ 激光器的特点之一, 也是提高放电均匀性和稳定性的有效途径。所谓均匀场电极, 是其截面要求有适当的形状, 使得在阴阳两极的中央部分电场强度均匀分布, 且分布范围大, 而在电极两侧的电场强度迅速减小, 低于电极中央部分的电场强度。

目前, 在 TEA CO₂ 激光器中广泛使用的电极之一是 Rogowski 电极^[1] (或近似 Rogowski 电极), 但它不是真正的均匀场电极。均匀场电极有 Chang 电极^[2] (含紧凑式 Chang 电极)、Ernst 电极^[3] 和 Stappaerts 电极^[4-5]。

本实验室在过去的研究中, 常采用由直线段与圆弧组成所谓的近似 Rogowski 电极。图 1 给出了固定在金属衬板(上下两长条矩形所示)上的近似 Rogowski 电极示意图。金属衬板两侧表面既可以布置预电离电容, 又可以方便地固定电极。但是这种电极设计较为随意, 没有解析式表达电场分布情况, 故无法从理论上说明其电场分布的均匀性。

为了探索提高 TEA CO₂ 激光器放电稳定性和均匀性的方法, 从而提高激光的单脉冲输出能量, 我们又制造了理论上电场分布较为均匀的紧凑式 Chang 电极和 Ernst 电极, 并先后对实际使用的近似 Rogowski 电极、紧凑式 Chang 电极和 Ernst 电极进行了一系列的理论研究、数值计算和实验测试, 获得了设计、分析和选择主放电电极的方法。

从实验结果看, 虽然 Ernst 电极在辉光放电范围上较近似 Rogowski 电极的要窄得多, 且放电击穿电压较高, 但是其具有最高的单脉冲输出能量和最高的斜率效率; 而近似 Rogowski 电极输出能量较低、斜率效率也最低。所以 Ernst 电极可用于对 TEA CO₂ 激光器的输出能量和功率有较高要求的场合, 而近似 Rogowski 电极因其制造成本较低和易于加工等因素可用于激光打标等工业领域。

以下首先对均匀场电极理论作简单介绍, 并计算出均匀场电极表面的理论电场分布; 接着数值计算出带有金属衬板的放电电极表面的静电场分布; 然后对不同电极面型进行放电实验比较; 最后给出采用不同电极面型的 TEA CO₂ 激光器的输出特性曲线, 并从电极表面的电场分布、电极结构和预电离方式等几方面对各种实验现象进行初步分析, 得出选择 TEA CO₂ 激光器放电电极的方法。

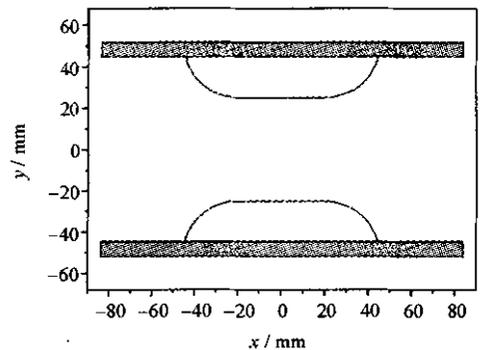


Fig. 1 Line-arc model of near Rogowski electrode fixed on the metal underlay

图 1 固定于金属衬板上的直线圆弧型近似 Rogowski 电极

* 收稿日期: 2005-08-09; 修订日期: 2005-12-22

基金项目: 国家 973 计划项目资助课题

作者简介: 赵翔(1979—), 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事大功率 CO₂ 激光器研究; xzhao230826@126.com.

1 均匀场电极理论

Chang 电极(含紧凑式 Chang 电极)和 Ernst 电极等均匀场电极的面型都是应用保角变换理论获得的,其保角变换^[2-3]为

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

式中: $\omega = u + iv$, $\zeta = x + iy$ 。Chang 电极和 Ernst 电极就是取(1)式的前两项或前三四项得到的。通过保角变换,可以将 ω 平面(uv 坐标系)上任意两条相交线变为 ζ 平面(xy 坐标系)上交角不变的两条线。所以,在 ω 平面中,若以 $v = \text{const}$ 的直线代表等势面,则 ζ 平面上对应于 $v = \text{const}$ 的参数方程 $x = x(u)$, $y = y(u)$ (u 为自变量)所描述之曲线同样为等势面。

在 ζ 平面的电场强度 E 为

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

E 在 $u=0$ 处(等势面的对称点,即电极面型曲线的中间点)可展开为

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

为了在电极表面获得尽可能均匀的电场,要求 $a_2(v)$, $a_4(v)$, \dots 等系数尽可能多地取零值。由这一约束条件,可以确定 v 及 k_0, k_1, \dots 等系数的值^[2-3]。仅使用一个参数 k_0 的均匀场电极,称为 Chang 电极;使用两个参数 k_0 和 k_1 的均匀场电极,称为 Ernst 电极;紧凑式 Chang 电极是在 Chang 电极基础上的一种变形,该型电极既可以得到工程上要求的均匀电场分布,又可使 Chang 电极较窄。这三种电极中,Ernst 电极具有最窄的电极宽度和最好的电场均匀性。

图 2 给出了这几种电极的线型结构及按(2)式计算获得的电极表面电场强度分布。Chang 电极($k_0 = 0.0539$, $v = 1.625$),最大电场强度位于电极面型的中点, x 在 $-1.0 y_0$ 到 $1.0 y_0$ 范围内电极表面电场强度相对偏差($\Delta E/E_{\text{max}}$)的最大值为 0.5% 。紧凑式 Chang 电极($k_0 = 0.0539$, $v = 1.724$)电场强度在其电极面型的中点取得一个极小值,最大电场强度点对称地分居在此中点的两侧,电场强度相对偏差不超过 0.5% 的范围扩展到 $x = \pm 1.23 y_0$,并且从图 2(a)可以看出,电极宽度比 Chang 电极的窄。Ernst 电极($k_0 = 0.0539$, $v = \pi/2$, $k_1 = (1 - \sqrt{1 - k_0^2})/4$),最大电场强度点与 Chang 电极的相同,都位于电极面型的中点,电场强度相对偏差不超过 0.5% 的范围扩展到 $x = \pm 1.70 y_0$,并且从图 2(a)可以看出,Ernst 电极具有最窄的宽度,其面型的横坐标有一个最大值,达到最大值之后,面型曲线会向中间收拢。Chang 电极和紧凑式 Chang 电极也会向中间收拢,只是收拢“速度”不及 Ernst 电极的快。图 2(b)的电场强度分布,是利用(2)式计算的结果。然而(2)式假设电极面型参数 u 从 $-\infty$ 至 $+\infty$ 范围内变化,即面型曲线无截止,并且电极周围不存在导体或者非均匀分布的绝缘介质。这与实际情况有较大不同;用于 TEA CO_2 激光器的电极必须在一定位置截止,否则无法固定在衬板上,且会造成激光器体积过于庞大;主放电电极周围可能还布局有预电离电容,因此会出现空间电荷;整个放电电极可能被固定在一块金属衬板上或者嵌于绝缘介质的箱体内。这些都可能对实际的电场分布乃至均匀放电造成影响。下面对实验室所用的电极表面电场的数值计算,不仅考虑了电极有限的横向尺寸,而且考虑了两侧金属衬板对于电场分布的影响。

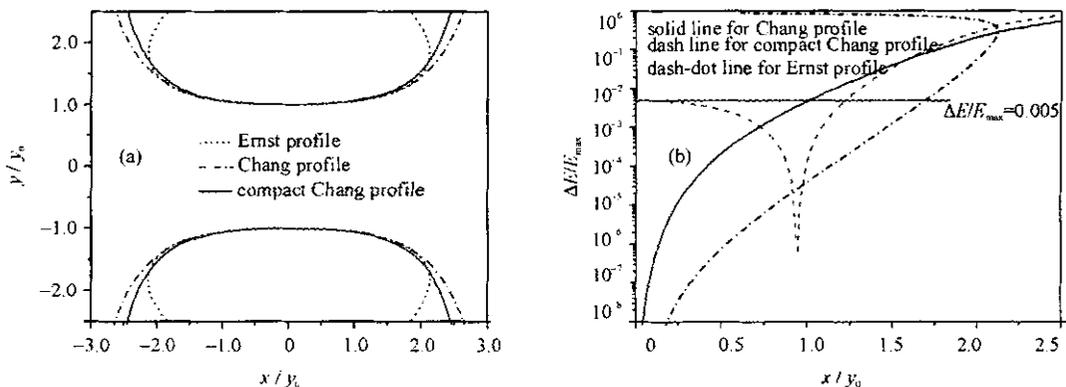


Fig. 2 Shapes of Chang, compact Chang and Ernst electrode(a) and their theoretical electric field distributions on electrodes(b)

图 2 Chang 电极、紧凑式 Chang 电极和 Ernst 电极的形状(a)及其表面的理论电场分布(b)

2 电极表面静电场数值计算

我们选用模拟电荷法^[6-7]数值计算了带有金属衬板的近似 Rogowski 电极(如图 1 所示)、紧凑式 Chang 电极和 Ernst 电极的表面电场分布。模拟电荷法是对静电场进行数值计算的主要方法之一。根据静电场的唯一性定理,可以将导体上原本连续分布的电荷,离散为一定数量的、布置在一定空间位置上的各种电荷,即模拟电荷。模拟电荷对场域会产生相应的电位系数和场强系数,而电位系数和场强系数与模拟电荷的电量无关,只与模拟电荷的种类、位置分布和电极表面所处的电介质有关。这样,可以通过边界条件(如导体表面的电位值),求出所有模拟电荷的电量。随后就可以将这些模拟电荷对场域某点产生的电位和电场进行叠加,以求出该点的电位和电场强度。模拟电荷法的优点是易于掌控,计算速度快,只要模拟电荷布置得当,就可以得到很高的计算精度。但也有不足——计算时需要一定的选择模拟电荷类型和布置模拟电荷位置的经验。不过已经有不少前人的经验^[6-7]可以借鉴。

若要精确计算电极表面的电场强度,应该选择三维场域的模拟电荷,但是考虑到我们的放电电极的长度都至少 10 倍于放电间距,所以在计算中可以选择无限长直线电荷作为模拟电荷,在确保较高计算精度的前提下,可以快速得到场域的仿真结果。

计算中,近似 Rogowski 电极的参数按图 1 所示选定:电极的间距为 50 mm,电极的平直部分为 40 mm,两侧各有 20 mm 长度的衬板露于场域中;紧凑式 Chang 电极对和 Ernst 电极对的顶端距离亦为 50 mm,即三种电极的 y_0 值均为 25 mm,两侧也都有 20 mm 长度的衬板露于场域中。电极表面电场强度的计算结果如图 3 所示。从图 3 可以看出:近似 Rogowski 电极电场强度的最大值出现在 $x = \pm 0.99y_0$ 处,结合近似 Rogowski 电极的具体几何参数可知:电场强度的最大值在电极中部平面与圆弧面的切点外侧。而 $x = 0$ 处电场强度值与这个最大值的相对偏差为 16.42%,故近似 Rogowski 电极的电场分布具有较大的不均匀性。对于带有衬板的紧凑式 Chang 电极,其电场强度的最大值出现在 $x = \pm 0.91y_0$ 处,电极中央部分的表面电场强度相对偏差不超过 0.5%的范围是 $-1.20y_0$ 至 $1.20y_0$ 。这两个指标表明:本实验所用的紧凑式 Chang 电极的电场分布与理论上的紧凑式 Chang 电极的电场分布基本一致,但在电场非均匀区的电场减小速率大于理论计算结果。而对于带有衬板的 Ernst 电极,虽然变化趋势基本上与图 2(b)所示的一致,但是除了在电场的非均匀区中电场的减小速率大于理论计算结果之外,还有一个显著不同:电极中央部分的表面电场强度相对偏差不超过 0.5%的范围是 $-1.50y_0$ 至 $1.50y_0$,即有较大缩小。这些区别应该是电极衬板带来的影响。因此,进行主放电电极面型设计时,理论计算公式(2)只具有一定的参考价值,而应根据放电区结构,对静电场进行数值计算,才有可能获得更有价值的结果。另外,我们还对图 1 所示的近似 Rogowski 电极在不同 y_0 值条件下进行了电场强度的数值计算^[8],结果表明其电场强度的极小值也都位于 $x = 0$ 处;其电场强度的最大值也都位于中央平板和圆弧切点的外侧; y_0 越大, $x = 0$ 处电场强度值与最大值的相对偏差也越大。虽然 y_0 值较小时,电场的均匀性较好,但是考虑到应该有适当的放电体积,选择 $y_0 = 25$ mm 左右是比较合适的。

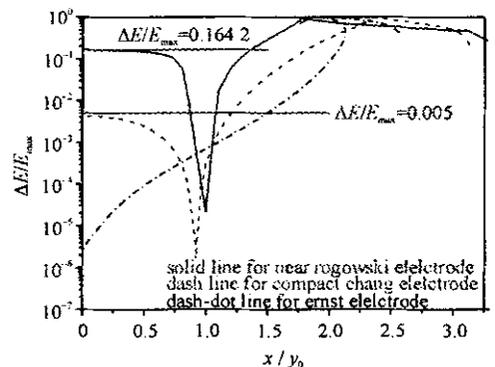


Fig. 3 Electric field calculation results of practical electrodes by numerical method

图 3 实际使用电极的表面电场强度数值计算结果

进行主放电电极面型设计时,理论计算公式(2)只具有一定的参考价值,而应根据放电区结构,对静电场进行数值计算,才有可能获得更有价值的结果。另外,我们还对图 1 所示的近似 Rogowski 电极在不同 y_0 值条件下进行了电场强度的数值计算^[8],结果表明其电场强度的极小值也都位于 $x = 0$ 处;其电场强度的最大值也都位于中央平板和圆弧切点的外侧; y_0 越大, $x = 0$ 处电场强度值与最大值的相对偏差也越大。虽然 y_0 值较小时,电场的均匀性较好,但是考虑到应该有适当的放电体积,选择 $y_0 = 25$ mm 左右是比较合适的。

3 脉冲放电实验

从以上的理论分析和数值计算得知,不同面型的电极有不同的表面电场分布。这种电极结构上的不同和表面电场分布的差异在两侧紫外预电离 TEA CO₂ 激光器的放电特性和输出特性中充分地表现出来。

3.1 等离子体辉光放电照片

我们用数字照相机记录了 TEA CO₂ 激光器的脉冲放电产生的等离子体辉光。激光器的脉冲重复率为 1 Hz。图 4(a),(b),(c),(d)分别给出了近似 Rogowski 电极对、紧凑式 Chang 电极对、Ernst 电极对和近似 Rogowski-Ernst 混合电极对在脉冲放电时的等离子体辉光放电照片。照片上方为阳极,下方为阴极。在阴极上可以看到丝状亮斑。其中,近似 Rogowski 电极的阴极亮斑较少;而紧凑式 Chang 电极和采用了 Ernst 电极的亮斑密度非常高,如图 4(b),(c),(d)所示。

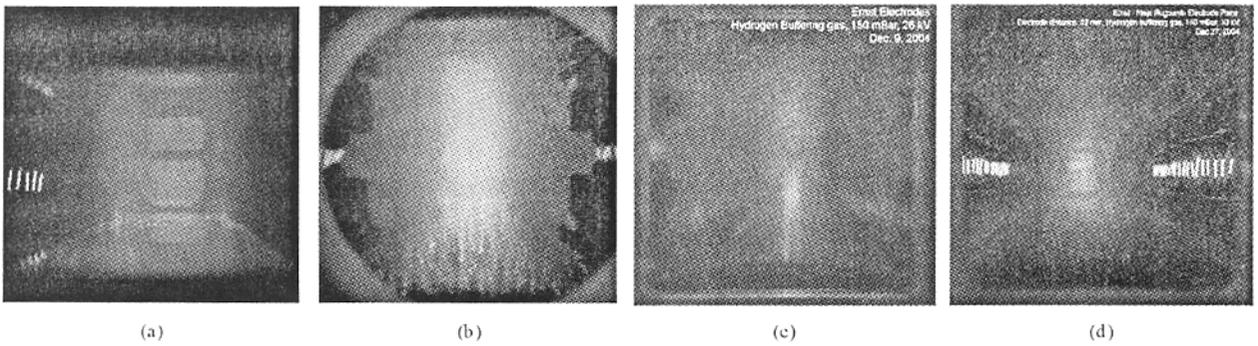


Fig. 4 Photographs of plasma glow from pulse discharge

图 4 脉冲放电等离子体辉光照片

图 4(a)所示的近似 Rogowski 电极辉光放电区最宽,并且最亮的辉光区域较明显地出现在两侧,即表现出与图 3 所示近似 Rogowski 电极表面电场强度的数值计算结果的一致性^[8]。图 4(b)所示紧凑式 Chang 电极的辉光放电区,仍有较宽的宽度。图 4(c)所示的 Ernst 电极放电辉光,宽度最窄。图 4(d)给出了由近似 Rogowski 电极与 Ernst 电极组成的混合电极对产生的放电辉光,靠近近似 Rogowski 电极一端(照片下方),辉光放电区宽度较宽;靠近 Ernst 电极一端,辉光放电区宽度较窄。由此可见,电极表面的电场强度分布对辉光放电区的宽度及强度有显著的影响。电极结构和预电离方式也是影响放电辉光范围的因素。对于近似 Rogowski 电极,其电场强度的最大值出现在其两侧,且明显高于电极中点处的极小值,又因为最大值的出现位置距预电离源较近,所以得到的预电离支持较好,放电辉光宽度较宽。而紧凑式 Chang 电极虽然其电场强度的最大值也位于其两侧,但是这个最大值仅比零点处的电场强度极小值高 0.5%,且由于紧凑式 Chang 电极间距是向两边渐远的,所以两侧紫外预电离对其支持不明显。至于 Ernst 电极,其最大值出现在零点处,电极间距向两边渐远的程度更大,得到的预电离支持最差,故更不易获得大范围的辉光。如果放电区的辉光和电极表面电场强度分布存在严格的对应关系,从图 4(b)和图 3、图 2(b)的比较中,我们认为,考虑了金属衬板的电场强度数值计算结果更接近实际的电场强度分布。

3.2 放电电压波形

我们用高压探头和数字示波器测得了 TEA CO₂ 激光器电极上的典型放电电压波形。除电极面型不同外,其他条件基本相同,而所得的各种放电电压波形具有相似性^[9],仅电压峰值有所不同。图 5 显示的为近似 Rogowski-Ernst 混合电极的放电电压波形图。图中放电电压波形的最高峰应该对应当时实验条件下的击穿电压。可看出混合电极的击穿电压达到 52 kV。我们还观察到近似 Rogowski 电极具有最低的击穿电压,达到 44 kV;而 Ernst 电极具有最高的击穿电压,达到 60 kV。

我们认为:放电电压波形曲线与采用的预电离方式有关。由数值计算可知,不同面型的电极在间距都为 d 的阴阳极之间加上相同的电压 U ,电极中心处的电场强度基本相等——都略高于 U/d 。由于各种放电系数均为 E/N 值的函数,所以在具有一定初始电子数密度的条件下,只要电场强度达到要求,就可以发生击穿。相对于紧凑式 Chang 电极和 Ernst 电极,近似 Rogowski 电极在其两侧能产生比 U/d 高得多的电场强度。正是因为近似 Rogowski 电极的电场强度最高处位于两侧,这里同时又是预电离较强、初始电子密度较高的地方,所以在这几种电极结构中,近似 Rogowski 电极具有最低的击穿电压。近似 Rogowski 电极在两侧发生击穿时产生的紫外辐射,对中央放电区有强化预电离的作用。因此,两侧击穿后,中央放电区也能够进行稳定的放电。

Ernst 电极的电场强度极大值点位于其中间点,且我们设计的 Ernst 电极在其中央部分的电场强度的相对波动很小(最多为 0.5%),又如 3.1 节所述,得到的预电离支持远不如近似 Rogowski 电极的显著,故击穿电压较近似 Rogowski 电极的高得多。

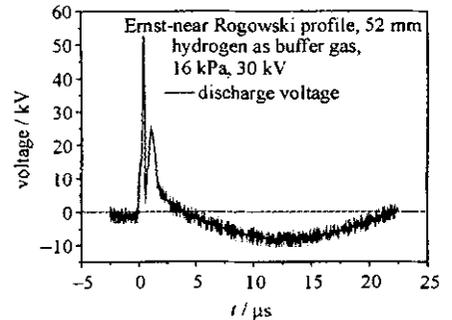


Fig. 5 Typical discharge voltage temporal waveform of three electrodes

图 5 三种电极的典型放电电压波形

4 激光器输出特性的实验测定

图 6 给出了采用近似 Rogowski 电极对、近似 Rogowski-Ernst 混合电极及 Ernst 电极对等主放电电极的 TEA CO₂ 激光器的输出特性。采用近似 Rogowski 电极对的 TEA CO₂ 激光器斜率效率最低,仅 7.5%;单脉冲能量也最低,在工作气压 20 kPa、储能电容电压 34 kV 时,获得最大激光能量仅 13.4 J。采用近似 Rogowski-Ernst 混合电极的 TEA CO₂ 激光器可达 17.1%的斜率效率;可获得的最大单脉冲能量为 20.8 J。采用 Ernst 电极对的 TEA CO₂ 激光器获得了最高的单脉冲激光能量——工作气压 23 kPa,储能电容电压 34 kV 时,可以得到 25.0 J 的最大单脉冲激光能量;其斜率效率也最高,达到 17.2%。

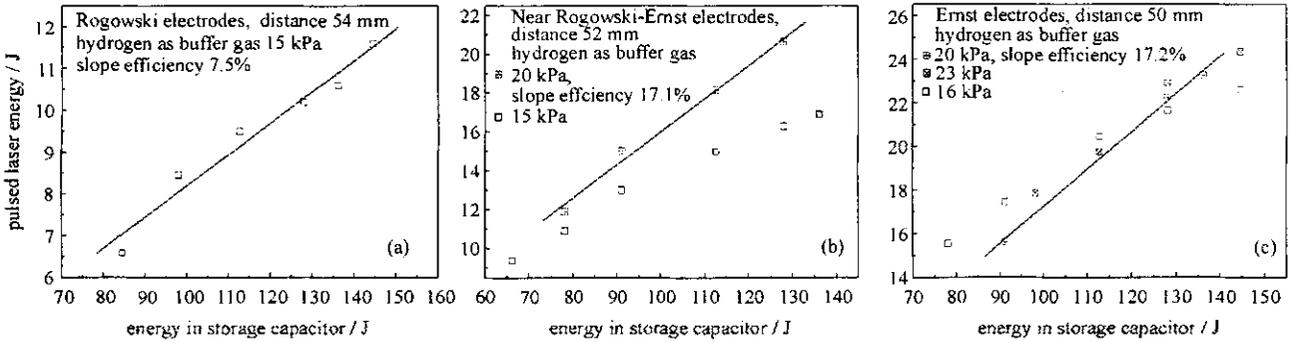


Fig. 6 Output characteristics of near Rogowski electrode(a), near Rogowski-Ernst electrode(b) and Ernst electrode(c)

图 6 输出特性:(a)近似 Rogowski 电极;(b)近似 Rogowski-Ernst 混合电极;(c)Ernst 电极

我们认为 TEA CO₂ 激光器的输出特性同样与电极表面场强分布引起的放电辉光分布有关。近似 Rogowski 电极,其两侧电场强度最高,放电辉光最强,则相应地在两侧具有最强的激光增益。虽然采用近似 Rogowski 电极时放电辉光的范围最宽,但电场均匀性不好,在电极两侧振荡的激光辐射很容易逃逸出谐振腔,对激光能量输出的贡献有限。因此使用近似 Rogowski 电极的激光器斜率效率最低。反之,Ernst 电极的电场分布相对最均匀,且电场强度的最大值出现在电极中点处,相应地,在其中部分具有较强的激光增益,而使得光子不易逃逸出谐振腔,因此使用 Ernst 电极的激光器具有较高的斜率效率。

5 结 论

从以上的研究中我们发现,虽然直线-圆弧式近似 Rogowski 电极具有最不均匀的电场强度分布,但在采用两侧火花紫外预电离的放电实验中,这种电极表现出了击穿电压低、放电区宽的优点;另外它的加工制造较为容易,成本低。虽然采用它时,TEA CO₂ 激光器最大输出能量仅略高于 10 J,但是可以满足激光打标等工业应用要求。

虽然 Ernst 电极有很好的电场均匀性和最紧凑的形状,但在两侧紫外预电离支持下,实际放电区的宽度却大幅度小于直线-圆弧式近似 Rogowski 电极。尽管如此,激光器输出能量和斜率效率,却是采用 Ernst 电极时最高。这预示着,应该针对不同的预电离方式,设计不同的电极面型。对于两侧紫外预电离方式,宜采取紧凑式 Chang 电极。通过合理设置两侧电场强度极大值点的位置及极大值与中心极小值的偏差,有可能兼顾降低击穿电压、扩大放电区宽度、提高输出效率的要求;而对于网眼阴极预电离方案,由于预电离源紧邻放电区,且阴极可以得到大范围的预电离支持,这样可能会降低击穿电压,进一步提高输出能量和斜率效率,所以在要求使用高能量、大功率 TEA CO₂ 激光器的场合,可以考虑采用 Ernst 电极。

参考文献:

- [1] Witteman W J. The CO₂ laser[M]. London: Springer-Verlag, 1987:170-171.
- [2] Chang T Y. Improved uniform-field electrode profile for TEA laser and high-voltage applications[J]. *Rev Sci Instrum*, 1973, **44**(4): 405-407.
- [3] Ernst G J. Uniform-field electrodes with minimum width[J]. *Opt Commun*, 1984, **49**(4):275-277.
- [4] Stappaerts E A. A novel analytical design method for discharge laser electrode profiles[J]. *App Phys Lett*, 1982, **40**(12): 1018-1019.
- [5] Flora F, Mezi L. New techniques for compact discharge electrodes design[J]. *Rev Sci Instrum*, 1994, **65**(12): 3639-3645.
- [6] 谈克雄, 薛家麒. 高压静电场数值计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 85-89. (Tan K X, Xue J Q. Numerical calculation on high voltage static electric field. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990: 85-89)

- [7] 倪光正, 钱秀英. 电磁场数值计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 288-291. (Ni G Z, Qian X Y. Numerical calculation on electromagnetic field. Beijing: Higher Education Press, 1996: 288-291)
- [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. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, 3(4): 33-35)
- [9] 李小芬, 左都罗, 陈冰, 等. 紫外预电离 TEA CO₂ 激光器放电特性的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 697-700. (Li X F, Zuo D L, Chen B, et al. Experimental study on discharge characteristics of a UV-preionized TEA CO₂ laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(6): 697-700)

Comparison of several discharge electrodes for TEA CO₂ laser

ZHAO Xiang, ZUO Du-luo, LU Hong, CHENG Zu-hai

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: From the theory of uniform-field electrodes, profiles of electrodes, theoretical and practical distributions of electric field on the surface of near Rogowski electrode, Chang electrode (including compact Chang electrode) and Ernst electrode were calculated and discussed. Using these electrodes in our laboratory, pulsed discharge experiments were carried out on TEA CO₂ laser, so discharge performance and output characteristics were obtained, and the results of the experiments on these electrodes were compared and analyzed. The calculation results show that Ernst electrode has the most compact profile and optimal uniform electric-field distribution if electrodes have the same fundamental parameters. The experiment results indicate that TEA CO₂ laser gains the biggest glow discharge area and has the lowest discharge breakdown voltage of 44 kV by using near Rogowski electrode; and the maximum pulsed laser energy of 25 J and highest slope efficiency of 17.2% were obtained by using Ernst electrode.

Key words: TEA CO₂ laser; Discharge electrode; Uniform discharge; Electric field intensity; Mock-charge method; Output characteristics