

等离子体电极电光开关大面积辉光放电的产生及其特性

鲁敬平 吕传信 吴关女 范 敏 刘丰香 宋影松

(西南核物理与化学研究所, 成都 525 信箱 80 号, 610003)

摘 要 在电光开关的晶体两侧, 用辉光放电产生的高电导率透明等离子体作为施加开关脉冲电压的电极, 可大大增加开关的通光口径。利用设计建造的一个 $80\text{mm} \times 80\text{mm}$ 口径的等离子体电极电光开关, 研究了用于电光开关中的大面积辉光放电的产生方法及放电特性。描述了等离子体电极普克尔盒的结构、放电室和电极的几何尺寸、放电电路及其参数, 实验观测了预电离和工作气压对放电的影响。

关键词 辉光放电 等离子体电极 电光开关

ABSTRACT Large area glow discharge plasma can be used as transparent and high conductive electrodes in electro-optical switches that considerably extended the switch aperture. To investigate problems related to this technology we designed and constructed an $80\text{mm} \times 80\text{mm}$ electro-optical switch with plasma electrodes. This paper describes the Pockels cell configuration, the discharge electrode geometries, the discharge circuit and parameters. Experimentally, the effect of preionization and gas pressure on discharge performance is observed.

KEY WORDS glow discharges, plasma electrodes, electro-optical switches

0 引 言

在研制新一代高功率激光器过程中, 发展并应用了大口径多通放大器列阵方案^[1]。大口径等离子体电极电光开关是该方案赖以实现的关键技术之一, 它使光脉冲在最后一个光程从放大腔取出, 得到多通放大的高功率输出。因此, 研究等离子体电极大口径电光开关对发展高功率激光器是至关重要的。

等离子体电极电光开关就是以透明等离子体作电极的纵向普克尔盒电光开关。即在普克尔盒的电光晶体 (KDP 或 KD^*P) 两侧, 通过辉光放电形成大面积高电导率透明等离子体, 并以此作为施加开关驱动脉冲的电极, 将一个幅值为半波电压 $V_{\lambda/2}$ 的矩形电压脉冲加于电光晶体的两个端面之间, 使通过晶体的线偏振光出射后的偏振方向旋转 90° 。如果在普克尔盒的出口外放置与人射光偏振方向正交或平行的偏振器, 就构成一个电光开关。由于等离子体直接同晶体面接触, 所以只要满足辉光放电均匀性要求, 晶体口径上的电场分布就会均匀, 从而使开关透射率的空间均匀性满足要求。此外, 辉光放电等离子体还应具有高透射率和高电导率, 以使电光开关具有高的透射率和快的上升时间。1984 年以来, 美国 LLNL 报导了 $260\text{mm} \times 260\text{mm}$ 口径等离子体电极电光开关的原理性实验结果^[2, 3], 目前正在建造用于 Beamlet 激光装置的口径为 $370\text{mm} \times 370\text{mm}$ 的开关^[4]。

1995 年 1 月 23 日收到原稿, 1995 年 9 月 14 日收到修改稿。

为了掌握建造等离子体电极大口径电光开关的技术,我们设计建造了口径为 $80\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的等离子体电极电光开关。本文报导用于电光开关的大面积辉光放电的产生及其特性,描述了等离子体电极普克尔盒的结构、放电室和电极的几何尺寸、放电回路及其参数,介绍了预电离和工作气压对放电的影响,给出了实验观测结果。

1 实验装置简介

图1为等离子体电极普克尔盒的结构示意图。在KDP晶体两侧各有一个有机玻璃制成的放电室,结构完全相同。在放电室外侧安装镀减反膜的K₉玻璃窗,晶体与光窗间距50mm。在放电实验阶段,晶体及光窗均用有机玻璃板替换。放电室严格密封,防止漏气。两放电室侧壁各装两根足够长的聚乙烯管,分别用于充气和气压测量,另一侧各装一根聚乙烯管用于抽气。放电室上方和下方分别装不锈钢制成的阴极和阳极,阴极-阳极间距为100mm。

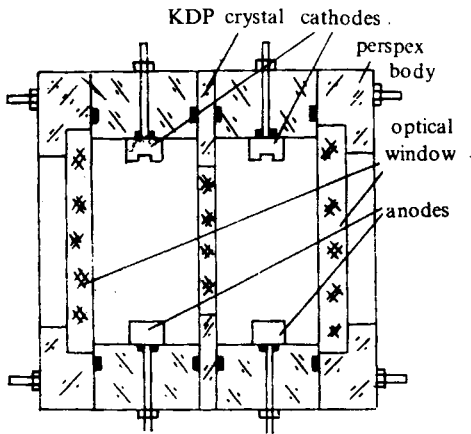


Fig.1 Configuration of the Pockels cell with plasma electrodes

图1 等离子体电极普克尔盒结构示意图

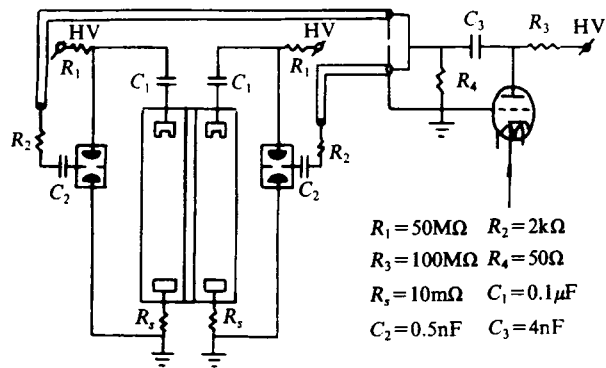


Fig.2 Schematic diagram of the discharge circuit

图2 放电回路简图

两放电室的放电回路和参数是完全相同的。正极性高压电源向储能电容器 C_1 充电,触发场畸变火花隙开关使放电室产生气体放电。火花隙由闸流管脉冲发生器输出的负脉冲触发,如图2所示。

两个放电室的同步放电是必须保证的,为此要尽量减小火花隙的触发延时和抖动。通过调整场畸变开关的间隙比、触发回路及触发电压幅值,得到触发延时 $\leq 20\text{ns}$,抖动 $\leq \pm 2\text{ns}$ 。

放电实验是在流动的氦气中进行的,气压通过调节充气 and 抽气速率控制,工作范围一般在 $100 \sim 300\text{Pa}$ 之间。实验前将放电室抽空,以消除残存气体及其它杂质成份对放电的影响。气压用ZDO-54微机型定温式热偶真空计监测。放电电压和电流分别用电阻分压器和分流器测量,以Tek7834示波器记录。示波器由一个时间基准信号(取自火花隙的触发信号发生器)触发,以实现电流与电压的时间关联。

2 实验观测和结果

众所周知, 在均匀场和低气压气体中实现均匀的自持辉光放电是比较容易的。但在大口径等离子体电光开关的放电室中, 由于放电电极间的距离远大于电极尺度, 电场很不均匀, 实际上很难得到均匀的自持辉光放电。实验观察了气压 $60 \sim 300\text{Pa}$ 氩气中的脉冲放电。工作电压升高到 18kV , 气体放电无论在时间上还是空间上都是极不稳定的, 表现在击穿延时大范围抖动 (大至几微秒), 放电区位置变化不定。这说明即使在低气压, 非均匀场中的自持放电极不稳定。改善放电稳定性的方法是采用预电离, 使得预电离在气体中的电子产生速率超过电场作用下电子增长速率, 从而克服电场不均匀对放电的不利影响; 同时, 由于预电离也明显降低辉光放电的电压阈值。由于这两方面的原因, 使得预电离既有助于改善放电的空间稳定性, 又有助于改善放电的时间稳定性。在实验中, 阴极通过限流电阻接到高压电源提供直流预电离。当预电离电流为 0.2mA 时, 放电起点稳定地发生在电压脉冲前沿, 击穿延时 200ns 左右。放电区位置、范围及其均匀性将依赖于预电离的状况, 后者实际上取决于与电场分布相关的电极构形以及预电离方式和强度。下面详细描述实验现象和观测结果。

首先用具有梯形断面的长条阴极和圆柱面长条形阳极进行了放电实验。阴极面中心线上开有一条 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的槽, 二电极长均为 150mm 。阴极顶部宽 20mm , 底面宽 25mm , 电极棱边和两端圆滑过渡。阳极面曲率半径为 12.5mm , 宽为 25mm , 两端也圆滑过渡, 以求消除局部电场增强对放电产生不利影响。但是由于电极端部场增强依然存在以及不同位置放电起动的涨落, 预电离并不是在阴 - 阳极之间的整个区域均匀分布, 而往往集中到电极的两端, 从现象上看就是在阳极端部形成发光的等离子体鞘层 (直流预电离时, 阴极处于正电位, 阳极始终是地电位, 因此阳极侧出现的等离子体鞘实际上就是通常所说的阴极等离子体鞘)。在这种情况下观察到的脉冲放电是不均匀的, 电极端部强而中间弱。因此, 这种整体阴极结构不能满足要求。

改用分体式阴极可以改善预电离的均匀性。实验中阴极由四个分体式扭扣电极组成。扭扣直径 25mm , 表面为曲率半径 12.5mm 的球面, 中间开槽 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。四个扭扣电极顺槽方向直线排列, 其轴线间距离为 42mm 。阳极仍然是前面所说的圆柱面长条电极。采用直流预电离的放电回路如图 3 所示。两端的扭扣电极提供直流预电流, 预电离强度由限流电阻 R_2 调整。中间两个扭扣电极与储能电容器 C_1 连接, R_3 为充电接地电阻或电阻分压器, R_4 为电阻分流器。

由于中间扭扣电极处于近地电位, 所以直流预电离在扭扣电极表面及其间隙形成发光的雾状等离子体鞘层, 其形状和位置随气压和预电离强度的改变而变化。当预电离限

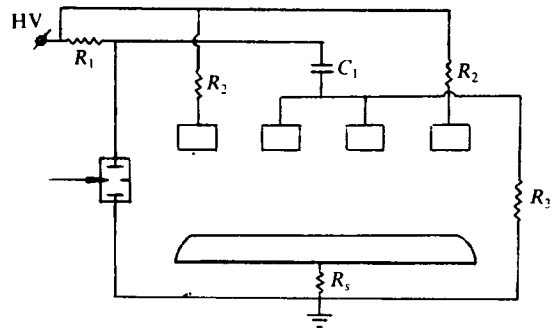


Fig. 3 Schematic diagram of the discharge circuit with DC preionization
 $R_1 = 50\text{M}\Omega$, $R_2 = 50 \sim 100\text{M}\Omega$, $R_3 = 15\text{k}\Omega$,
 $R_4 = 10\text{m}\Omega$, $C_1 = 0.1\mu\text{F}$

图 3 直流预电离的放电电路简图

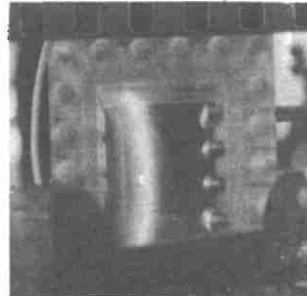
流电阻 $R_2 = 100\text{M}\Omega$ (两个外扭扣并联预电离, 总预电离电阻为 $50\text{M}\Omega$) 时, 观察到如下的结果: 在气压 $100 \sim 200\text{Pa}$ 范围, 阴极侧等离子体鞘为连续的一层, 中间向外突出呈月牙形. 气压降到 100Pa 以下, 阴极侧等离子体变稀, 发光变弱. 由于低气压下电子迁移率大, 电子扩散作用强, 因而预电离范围增大, 导致阳极侧也出现稀薄的等离子体鞘层, 形状与阳极面平行, 如图 4 (a) 所示. 气压降到 60Pa 以下, 阴极侧和阳极侧的等离子体鞘渐渐远离电极面而相互靠近, 中间部分向外突出更严重. 反之, 气压升高时, 等离子体变浓, 发光变强, 但由于电子扩散作用变弱, 预电离范围变小. 气压 300Pa 以上时, 鞘层从中间逐渐断离, 以致发展到局限于两端的扭扣间隙. 实验表明, 在气压 $150 \sim 300\text{Pa}$ 辉光放电区复盖了整个阴极和阳极间的范围, 且均匀性很好.

实验中改变预电离限流电阻 (从而改变预电离电流) 可引起等离子体鞘的变化, 因而也引起辉光放电的变化. 增加 R_2 值导致外扭扣电极电位降低, 电子迁移速度减小, 因而预电离范围变小, 引起阴极侧等离子体鞘在较低的气压断离, 而阳极侧等离子体鞘在更低的气压才能形成, 甚至不能形成; 反之, 减小 R_2 值则导致阴极侧等离子体鞘在较高的气压才能断离, 而阳极侧等离子体鞘在较高的气压也能形成. 例如当 $R_2 = 50\text{M}\Omega$ 时, 阴极侧等离子体鞘在气压上升到 700Pa 才开始断离, 而阳极等离子体鞘在气压上升到 400Pa 才消失. 从均匀放电对应均匀连续的等离子体鞘形状而言, 小的限流电阻 R_2 使均匀辉光放电向高压方向扩充了可工作范围; 另外从均匀辉光放电要求足够的预电离电子密度 (一般认为应大于 $10^{14}/\text{cm}^3$) 而言, 小的 R_2 值有利于形成高电子密度, 因而也同时向低气压方向扩充了工作范围. 实验观测到 $R_2 = 50\text{M}\Omega$ (二扭扣电极并联后的预电离限流电阻为 $25\text{M}\Omega$) 时均匀辉光放电对应的气压范围为 $100 \sim 400\text{Pa}$.

实验观察了中间扭扣电极不接充电接地电阻 (或电阻分压器), 即 $R_3 \rightarrow \infty$ 时的放电情况. 这时储能电容器 C_1 的充电是通过放电室中的气体完成的. 由于中间二扭扣电极处于悬浮电位, 所以直流预电离只在阳极侧产生等离子体鞘层. 在 $R_2 = 50\text{M}\Omega$ 时, 气压 $100 \sim 300\text{Pa}$, 等离子体鞘大体同阳极面平行, 如图 4 (b) 所示, 这时辉光放电也是均匀的, 同连接充电接地电阻的情况相比没有明显差别. 气压 $< 100\text{Pa}$, 等离子体鞘变暗, 鞘形状变成向外突出的月牙形; 气压 $> 300\text{Pa}$, 等离子体鞘变亮, 鞘层缩短, 偏向阳极一端而不能复盖整个阳极. 这两种情况都观察到放电变得不均匀. 总之, 对于以上两种预电离接线方式, 当预电离电阻 $R_2 = 50\text{M}\Omega$ 时, 气压在 $100 \sim 300\text{Pa}$ 范围都可获得均匀



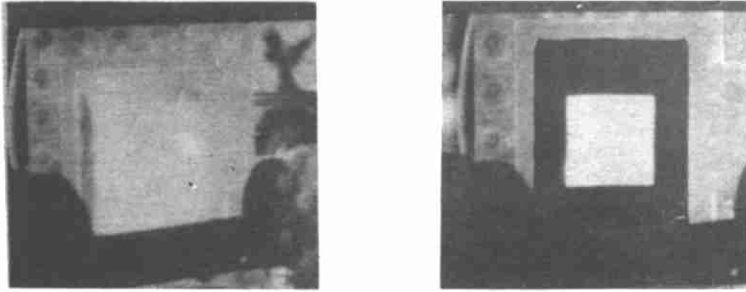
(a) with grounded resistor



(b) without grounded resistor

Fig. 4 Photographs of plasma sheathes produced by DC preionization

图 4 直流预电离产生的等离子体鞘照片



(a) in full region between the electrodes

(b) in 80mm × 80mm aperture

Fig.5 Photographs of glow discharge

图 5 辉光放电照片

辉光放电, 这可以从图 5 (a) 阴极 - 阳极间全区放电照片和图 5 (b) 80mm × 80mm 通光口径上的放电照片看出来。

电光开关要求辉光放电均匀而不成弧, 放电等离子体具有高的电导率, 反映在放电阻抗曲线上应该是维持长时间低而不为零的阻抗特性。图 6 为测得的辉光放电电流与放电电压的时间关联波形。在电极间电压上升到 6kV 时气体击穿, 0.5 μ s 后电流达到峰值 1.3kA。为了得到阻抗曲线, 对电压的电感性成分进行修正, 由任一时刻的电流测量值 i 和修正后的电压值 V' (即电阻性压降) 求出该时刻的等离子体阻抗。从阻抗曲线看出, 放电初期阻抗较高, 随着电流上升而急剧下降, 至电流峰值处达到最低阻抗值 0.6 Ω , 并一直维持到电流波的末尾。根据放电区尺度推断, 相应的等离子体电阻率约为 5 $\Omega \cdot$ cm。预期通过改变工作电压和电路参数, 可使电流幅值和脉宽调整到适合电光开关的要求。

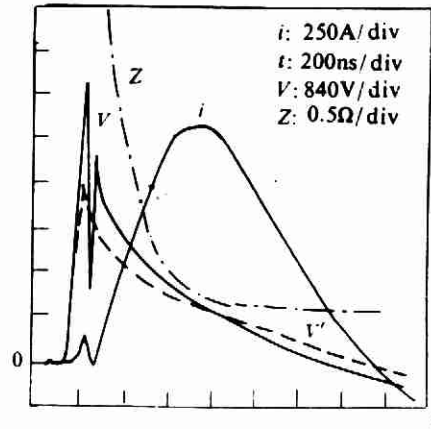


Fig.6 Time-correlated waveforms of discharge current with voltage and curve of discharge impedance

图 6 电流 - 电压时间关联波形和阻抗曲线

3 结 语

在通光口径 80mm × 80mm 普克尔盒的放电室中, 利用分体式扭扣阴极和圆柱面长条阳极, 在直流预电离电流超过 0.2mA 条件下, 氮气压为 100 ~ 300Pa, 获得了均匀的大面积辉光放电, 放电区 $\geq 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。在工作电压为 18kV, 放电电流为 1.3kA, 脉宽 0.7 μ s。在电流峰值处放电等离子体阻抗下降到 0.6 Ω , 并维持到电流波的尾部。相应的等离子体电阻率约为 5 $\Omega \cdot$ cm。

参考文献

- 1 Campbell EM. *J. Fusion Energy*, 1991, 10: 277 ~ 293
- 2 Henesian MA and J. Goldhar, *Opt. Lett.*, 1984, 9: 516 ~ 518
- 3 Goldhar J and Henesian MA. *IEEE J. Quantum. Electronics*, 1986, QE-22: 1137 ~ 1147
- 4 Rhodes MA and Taylor J. UCRL-JC-109579, 1993

PRODUCTION AND PERFORMANCE OF LARGE AREA GLOW DISCHARGE IN ELECTRO-OPTICAL SWITCHES WITH PLASMA ELECTRODES

Lu Jingping, Lü Chuanxin, Wu Guannui, Fan Min, Liu Fengxiang, Song Yingsong
(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, P. O. Box 525-80, Chengdu, 610003)

Large aperture electro-optical switch with plasma electrodes is one of the critical components in high power lasers based large aperture multi-pass amplifier array scheme. To investigate problems related to this technology, we designed and constructed a 80mm×80mm aperture electro-optical switch with plasma electrodes. This switch is a longitudinal Pockels cell between two polarizers aligned parallel or crossed to each other. The Pockels cell contains two discharge chambers and a KDP (or KD*P) crystal between them. Large area transparent plasma is formed in both chambers by low pressure glow discharges and will be used as electrodes to which a switch pulse is applied. Based on requirements for the switch operation, the glow discharge must be uniform in full aperture, the plasma must be transparent and with high conductivity for a good temporal and spatial switching performance, specifically a fast risetime, a high transmission uniformity and a small optical attenuation. This paper describes the Pockels cell configuration, the electrode geometries, the discharge circuit and parameters, the preionization and gas pressure which effect on discharge performances. For 100 ~ 300Pa pressures of Helium with DC preionization, a uniform glow discharge is obtained in excess of the 80mm×80mm aperture. With capacitance of 0.1μF and charge voltage of 18kV, the peak current is about 1.3kA with 1.2μs half period. Typically, the discharge plasma impedance reaches to 0.6Ω at point of peak current and maintains constant until the current drops to zero. It is possible to obtain a desirable current amplitude and pulse width by adjusting the charge voltage and the circuit parameters.