

# 等离子体电极电光开关实验研究<sup>\*</sup>

鲁敬平 吕传信 张雄军 隋展 张小民

(中物院核物理与化学研究所, 成都525信箱80号, 610003)

**摘 要** 设计建造了以辉光放电形成的等离子体作电极, 通光口径为80mm × 80mm 的普克尔盒实验, 实验检测了它的开关性能。阐述了普克尔盒的结构, 辉光放电等离子体电极的形成, 开关驱动脉冲的产生及输出特性, 电光开关的开关效率和开关速度的检测方法, 给出了典型的实验结果。

**关键词** 电光开关 普克尔盒 辉光放电 等离子体电极 脉冲形成网络

**ABSTRACT** Electro-optical switch with plasma electrodes is one of critical components in high power CF drivers based on the large aperture multipass amplifier array scheme. To investigate problems related to this technology an 80mm × 80mm Pockels cell using a plasma electrode formed by a glow discharge on either side of a KDP crystal was designed and constructed and the switching performance was tested. This letter describes the configuration of the Pockels cell, the plasma electrode formation by glow discharge, the switch pulse generation and output performance, as well as the measurement of the switching speed and the switching efficiency across the aperture. Some typical results in the switching experiment are given.

**KEY WORDS** electro-optical switch, Pockels cell, glow discharge, plasma electrode, pulse forming network

## 0 引 言

等离子体电极电光开关是以高电导率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, 以辉光放电形成的大面积等离子体作为施加开关驱动脉冲的电极, 将普克尔盒置于两个相互正交或平行的偏振器之间而构成的电光开关。由于等离子体电极直接与晶体通光面接触, 使晶体全口径上的电场分布均匀, 从而使得这种电光开关可以定标到大口径。80年代初, 美国 LLNL 开展了口径为260mm × 260mm 的等离子体电极电光开关研究并报导了实验结果<sup>[1, 2]</sup>, 90年代初进而研究用于 Beam let 和 NIF 的370mm × 370mm 开关, 并于1994年成功应用于 Beam let 装置<sup>[3-5]</sup>。

为了研究这种开关, 我们设计建造了通光口径为80mm × 80mm 的等离子体电极电光开关, 开展了原理性实验研究。研究了大面积辉光放电等离子体电极的形成, 开关驱动脉冲的产生及输出特性, 测量了电光开关的开关速度、接通时间、开关效率及其空间均匀性, 并简要报导取得的研究结果。

## 1 实验装置简介

图1为实验装置示意图, 主要包括普克尔盒、偏振器、等离子体发生器、开关驱动脉冲发生

<sup>\*</sup> 国家863惯性约束聚变领域资助课题,  
1996年5月7日收到原稿, 1996年11月14日收到修改稿。  
鲁敬平, 男, 1936年3月出生, 副研究员。

器、He-Ne 光源和光学诊断系统。

等离子体电极普克尔盒由电光晶体 KDP 及其两侧的放电室组成<sup>[6]</sup>。晶体尺寸暂定为 80mm × 80mm, 厚 14mm, 用硅胶粘结于有机玻璃框架上。放电室腔体用有机玻璃制成, 外侧装镀减反膜的 K9 玻璃光窗。放电腔厚 50mm, 上方装阴极, 下方装阳极, 阴-阳极间距 100mm, 电极长 150mm。

等离子体发生器由直流高压电源、储能电容器、火花隙开关和放电电极组成。气体放电在流动的氩(或氦)气中进行, 气压通过调节进气和抽气速率控制, 并由 ZDO-54 定温式热偶真空计监测。

开关驱动脉冲由仿真线成形, 经输出电缆加于二放电室的阳极之间。驱动脉冲发生器和辉光放电由同一台触发器控制以实现同步关联。脉冲电压和脉冲电流分别用电阻分压器和电阻分流器测量。

为了检测普克尔盒的光开关性能, 将普克尔盒放在两个相互正交的偏振器 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 之间。He-Ne 激光(λ= 632.8nm)经 P<sub>1</sub> 变成线偏振光, 入射到普克尔盒。实验中取驱动脉冲电压幅值为半波电压 V<sub>λ/2</sub> = 9.8kV, 因而通过偏振器 P<sub>2</sub> 的光强达到极大值。用两只光电倍增管测量开关特性参数, 包括开关速度、开关接通时间、开关效率及其空间均匀性, 从而可对电光开关的时间、空间特性做出评估。

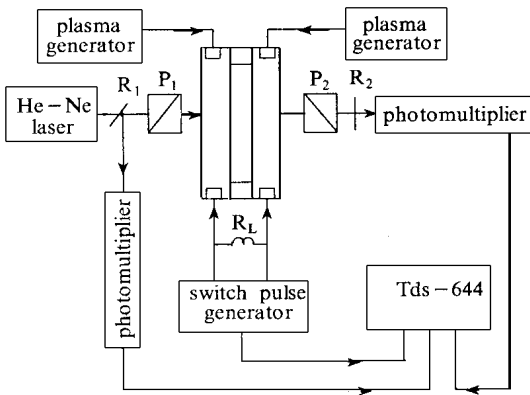


Fig 1 Schematic diagram of the PEPC electro-optical switch experimental set-up

图1 等离子体电极普克尔盒电光开关实验装置示意图

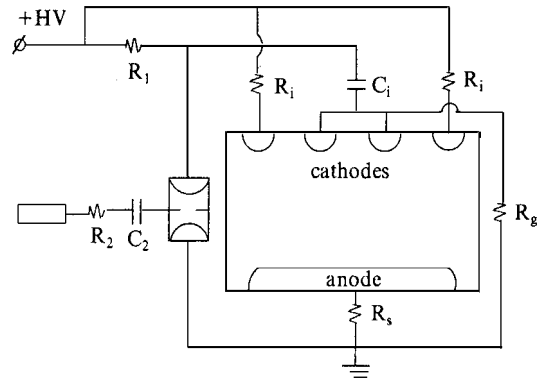


Fig 2 Schematic diagram of the discharge circuit with DC preionization

图2 直流预电离的放电电路简图

### 2 辉光放电等离子体电极的形成

为了研究大面积辉光放电等离子体电极形成的条件, 对放电电极构形、预电离方式和强度、气压以及电路参数对放电均匀性和稳定性的影响进行了实验观测, 部分结果已作过报导<sup>[6]</sup>, 这里仅对规律性的实验结果加以概括。

通过对不同电极构形放电实验结果比较, 最终采用了有利于均匀放电的分体式四球面钮扣阴极和板条形圆柱面阳极结构。采用了预电离以改善放电稳定性和均匀性。图2为放电电路。正极性直流预电离由两个外钮扣电极提供, 预电离电流通过限流电阻 R<sub>i</sub> 控制。中间二钮扣电极接于储能电容器 C<sub>1</sub> 的低压端, 当火花隙触发导通后, 电容器上电压极性翻转, 中钮扣电极变为负高压, 引发气体放电。R<sub>g</sub> 为充电接地电阻, 它对放电稳定性起着重要作用。

放电实验中氦气压为200~ 400Pa。在直流预电离阶段,外钮扣处于正电位,中钮扣为近地电位,预电离首先发生在内外钮扣之间。典型的预电离电流为0.4~ 0.6mA (每个钮扣为0.2~ 0.3mA),这时可观察到在钮扣阴极侧形成灰白色连续弧面等离子体鞘,同时在阳极侧也形成与阳极面平行的连续等离子体鞘,如图3(a)所示,这种鞘形状有使阴-阳极间电场分布趋于均匀的作用,因而有助于形成大面积均匀辉光放电等离子体电极。图3(d)为工作电压15kV时的照片,可以看出,均匀放电复盖了几乎整个阴-阳极间的区域。

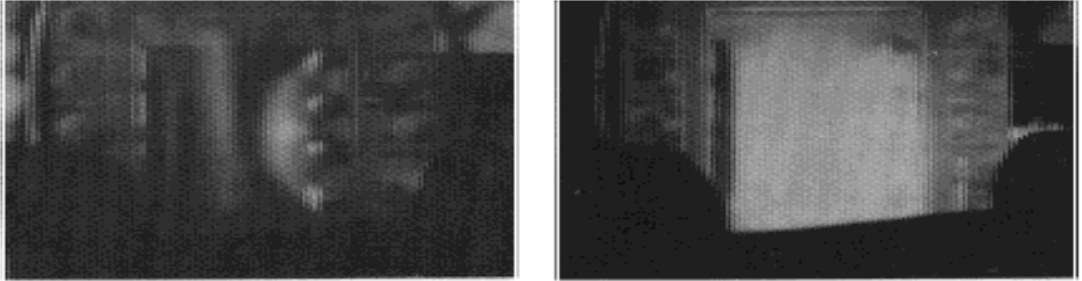


Fig 3 Photographs of the plasma sheath and the glow discharge  
 (a)plasma sheath on anode and cathode sides (b) photograph of the glow discharge  
 图3 阴极和阳极等离子体鞘并存(a)和辉光放电(b)

升高气压或减小预电离电流,可观察到先是阳极鞘消失,阴极仍保持连续弧面形状,放电依然均匀。进一步升高气压或减小预电离电流,则观察到阴极鞘从中间断开,导致放电不均匀。减小气压,鞘的发光变暗,气压过低会因预电离电子密度低而不能形成均匀放电。增加预电离电流会使均匀放电的气压向高、低两个方向扩展可工作范围。此外,预电离电流的大小也影响气体放电的时间稳定性。

接地电阻  $R_g$  对放电有重要影响。不接  $R_g$  时,等离子体鞘仅出现在阳极侧,虽然也能形成均匀放电,但气体击穿延时并抖动大,不利于两个腔放电同步。实验中取  $R_g = 100\Omega$ ,得到了满意的结果。

图4为氦气压300Pa,预电离电流0.6mA,接地电阻100Ω,工作电压15kV 情况下两个腔放电电流的时间关联波形。电流峰值为1.8kA,脉宽(FWHM)为1.1μs,二腔放电同步偏离20ns,峰值电流偏差 5%。

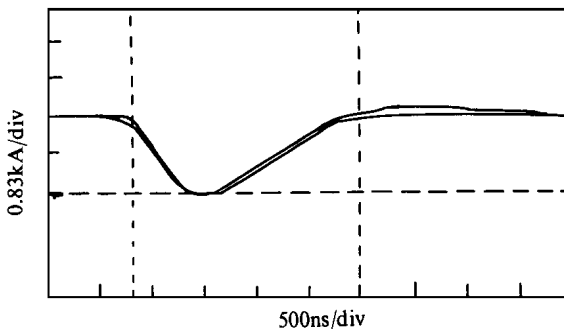


Fig 4 Time-correlated waveforms of the discharge current in either cavity  
 图4 两个腔的放电电流时间关联波形

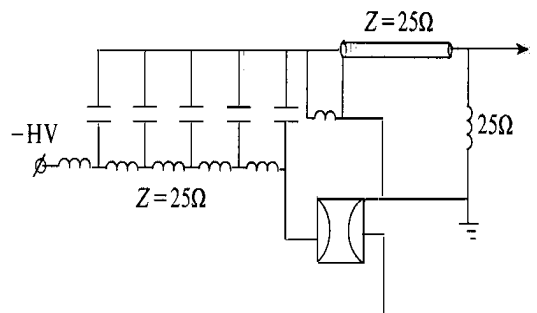


Fig 5 Schematic diagram of the pulse shaping network  
 图5 脉冲成形网络简图

### 3 驱动脉冲的产生及输出特性

电光开关对驱动脉冲波形的要求是: 前沿陡、后沿短、顶部平 ( $\Delta V \pm 2\%$ ), 尾部电压回零 ( $\Delta V \pm 2\%$ )<sup>[7]</sup>。为了获得这种脉冲波形, 我们通过实验对几种不同的成形线路进行了比较。前已报导用电缆成形—延时线输出方法所取得的结果<sup>[8]</sup>, 存在的主要问题是脉冲顶部不够平, 尾部电压回零不理想。分析其原因是由于触发放电发生在线畸变火花隙的触发环与高压电极之间, 触发脉冲向形成线始端传输, 反射回来叠加到输出脉冲上所致。后改用图5所示的仿真线成形—倒相—电缆延时线输出线路。由于倒相方式采用触发管火花隙作开关部件, 触发放电发生在触发针与接地电极之间, 抑制了触发脉冲对输出波形的影响; 此外, 仿真线阻抗易于小范围调节, 有利于实现阻抗匹配, 抑制波形畸变; 再加上仿真线成形的脉冲平顶、前沿和后沿可根据要求在一定范围调整, 得到了比较满意的结果。

图6为阻抗25Ω仿真线成形、25Ω电缆延时线终端接匹配电阻情况下测得的脉冲波形, 脉宽(FWHM)为410ns, 上升时间(10%~90%)为50ns, 后沿(90%~10%)为110ns, 顶部  $\Delta V \pm 2.0\%$ , 尾部  $\Delta V \pm 4.0\%$ 。

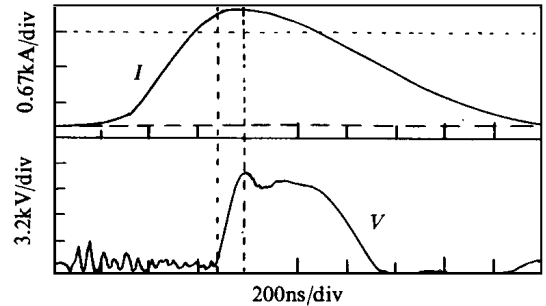
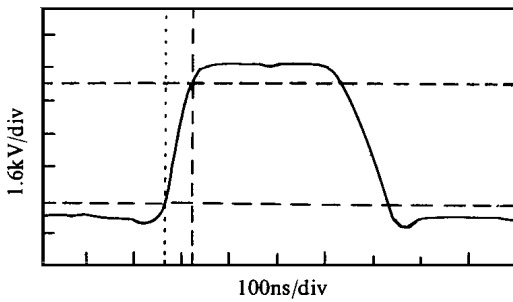


Fig. 6 Output pulse of the switch pulse generator Fig. 7 Time-correlated waveform of the switch pulse

图6 开关脉冲发生器的输出脉冲波形

with the glow discharge current

图7 开关驱动脉冲与辉光放电电流的时间关联波形

在开关通光实验中, 驱动脉冲与辉光放电电流脉冲的时间关联是通过触发信号传输电缆的长度控制的, 通常将驱动脉冲定时在电流峰值附近或稍后, 即放电等离子体阻抗很低且电流足够大的位置。在我们的实验条件下, 开关驱动脉冲与辉光放电电流脉冲的时间关联波形如图7所示。

### 4 普克尔盒的开关特性参数测量

根据图1, 考虑 He-Ne 激光束经过偏振器 P<sub>1</sub> 所产生的线偏振光通过普克尔盒和偏振器 P<sub>2</sub> 的透射率为

$$T = I_{out}/I_{in} = T_0 \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V_z$$

式中  $I_{in}$  为入射到普克尔盒的线偏振光的光强,  $I_{out}$  为通过偏振器 P<sub>2</sub> 后的光强,  $T_0$  代表由于晶体、窗镜和偏振器 P<sub>2</sub> 的反射和吸收损失而得出的静态透射率,  $n_o$  为晶体的折射率,  $\gamma_{63}$  为晶体的电光系数,  $V_z$  为加于晶体上的纵向电压,  $\phi$  代表线偏振光通过晶体后分解的两条振动方向相互垂直的线偏振光 (o 光和 e 光) 之间的相位差。当  $\phi = \pi$  时,

$$V_z = V_\pi = V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_0^3 \mathcal{V}_63}$$

经过晶体出射后的线偏振光的振动方向旋转 $90^\circ$ ；使通过 $P_2$ 的光强达到极大值， $V_\pi$ 或 $V_{\lambda/2}$ 称作半波电压。实际上由于晶体和窗镜的应力退偏，在半波电压条件下的透射率 $T$ 仍小于 $T_0$ ，以 $T_s = T/T_0$ 表示开关效率（也称作动态透射率）。在全口径上开关效率的不均匀性与辉光放电的空间均匀性有关。

由于通光口径大，电压波沿晶体传播要经历一个过程，因此，在驱动脉冲传输的始端（即阳极侧）和终端（即阴极侧）透射率达到极大值的时间不同。以两端最大透射率上升到95%所对应时间之差定义开关速度（也称开关时间），而从始端最大透射率的5%到终端最大透射率的95%之间的时间定义为开关接通时间（也称开关上升时间）。开关速度取决于普克尔盒的充电时间，而开关接通时间除了与充电时间有关外，还受开关电压脉冲上升时间的限制。通过开关速度、开关接通时间、开关效率及其空间均匀性的检测，可以对等离子体电极电光开关动态特性做出全面评价。

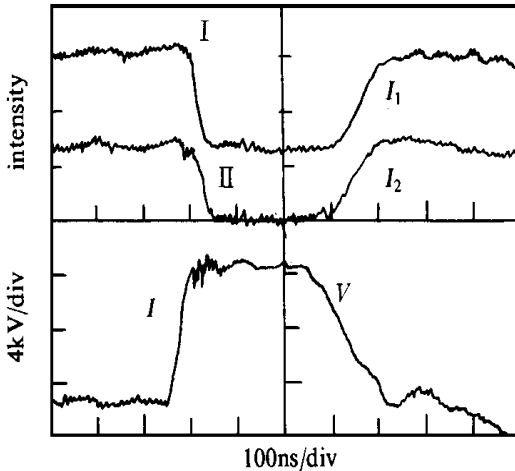


Fig 8  $P_2$   $P_1$ , time-correlated waveforms of the one and two-pass laser pulses with the switch pulse

图8  $P_2$   $P_1$ ，一次通过和二次通过的激光脉冲与开关驱动脉冲时间关联波形

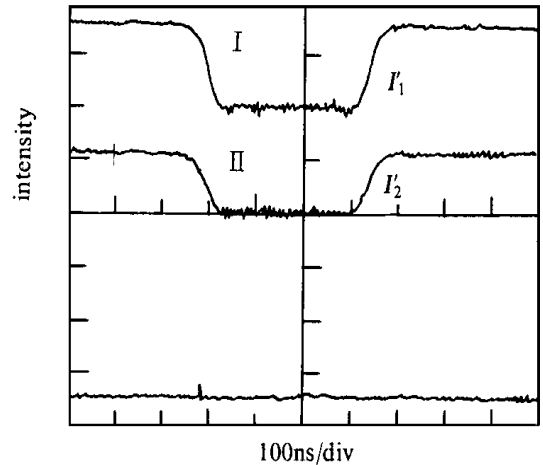


Fig 9  $P_2$   $P_1$ , time-correlated waveforms of the one and two-pass chopped laser pulse

图9  $P_2$   $P_1$ ，一次通过和二次通过的斩波光脉冲时间关联波形

测量方法示于图1。用He-Ne激光连续光源，在 $P_2$   $P_1$ 时外加驱动脉冲电压幅值等于半波电压（实验中 $V_{\lambda/2} = 9.8\text{kV}$ ），用两只光电倍增管分别测量一次通过和二次通过普克尔盒及 $P_2$ 的激光脉冲 $I_1$ 和 $I_2$ ，如图8所示。另外，在 $P_2$   $P_1$ 和不加开关驱动脉冲条件下，用斩波器将连续光源改变为宽 $350\mu\text{s}$ 的脉冲光束，测得一次通过和二次通过的激光脉冲 $I_1'$ 和 $I_2'$ ，如图9所示，则得到开关效率为

$$T_s = (I_2/I_1)/(I_2'/I_1')$$

即分别测出两种情况的一次通过和二次通过光强比即得出开关效率。这种方法除了造价低、简便易行外，还具有许多其它特点，如连续光源便于光路调整；一次通过和二次通过的光自动实现时间关联，省去了光—电同步措施；比值测量自动修正了光源不稳定（如漂移和工频调制）的影响，二个探头只要在线性响应范围内，可以有不同灵敏度，也无需相对标定；此外，在测量开

关效率过程中也获取了开关时间特性。

为了测量开关效率的空间分布, 在通光口径上设置了九个阵列式测量点  $A_{ij}$  ( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ ) 各点纵横间距30mm。测量结果列于表1。

表1 各测量点的开关效率  $T_S$ (%)

Table 1 Switching efficiencies  $T_S$ (%) at the seperated positions

$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	$A_{31}$	$A_{32}$	$A_{33}$
98.5	95.6	99.6	98.1	97.8	98.8	97.0	95.8	98.8

即在整个通光口径上的平均开关效率为97.8%, 最大  $\Delta T_S/T_S = 4.0\%$ 。

实验中我们以一次通过的光在  $A_{3i}$  和  $A_{1i}$  点脉冲上升至最大幅值95% 所对应的时间之差表示开关速度, 而以  $A_{1i}$  点脉冲幅值的5% 至  $A_{3i}$  点脉冲幅值的95% 之间的时间作为开关接通时间。选择开关驱动脉冲电压幅值上升到10% 对应的时刻作时间基准  $t_0$ , 发现  $A_{1i}, A_{2i}, A_{3i}$  各点透射光脉冲幅值的5% 基本上都对应同一时刻  $t_{5\%}$ , 以  $t_{95\%}$  表示透射光脉冲幅值上升到95% 的时刻, 各点测量结果列于表2。

由以上测量值得到开关速度

$$t_S = 10\text{ns}.$$

开关接通时间  $t_{on} = 52\text{ns}$

显然, 普克尔盒的充电时间是由盒电容  $C$ 、开关脉冲发生器的等效阻抗  $Z_{eff}$  和等离子体电极的电阻  $R_p$  决定的, 即充电时间常数为  $\tau = (Z_{eff} + R_p)C$ 。考虑晶体充电至

$0.98V_{\sqrt{2}}$  的时间为  $t_{ch} = 4\tau$  已知  $Z_{eff} = 12.5\Omega$ , 晶体及其框架的总电容  $C = 0.2\text{nF}$ , 得  $t_{ch} = 10\text{ns} + 4R_p C$ 。实测的开关速度10ns, 表明等离子体电极电阻与发生器阻抗相比是可以忽略的。

总之, 开关效率和开关速度的测试结果间接证明了大面积辉光放电的均匀性和低电阻特性, 也显示等离子体电极普克尔盒具有优越的光开关功能。

### 5 结论

通光口径80mm × 80mm 等离子体电极电光开关实验研究取得了预期的结果。

辉光放电实验表明, 不同的电极构形和预电离方式影响预电离均匀性和电场的分布, 从而引起放电均匀性改变; 预电离电流大小和气压高低的变化对放电均匀性和稳定性的影响也呈现出规律性。利用分体式球面钮扣阴极和板条形圆柱面阳极, 外钮扣正极性直流预电离电流0.4~0.6mA, 氦气压200~400Pa 条件下获得了复盖阴-阳极间全区的均匀辉光放电。工作电压在15kV 时峰值电流为1.8kA, 电流脉宽为1.1μs, 调整电路参数, 实现了两个腔的放电同步和平衡, 达到时间同步偏离 20ns, 峰值电流偏差 5%。

利用仿真线脉冲成形—倒相—延时电缆输出方法产生开关驱动脉冲, 得到脉冲上升时间50ns, 脉宽410ns, 后沿110ns, 顶部  $\Delta V = 2.0\%$ , 尾部  $\Delta V = 4\%$ 。

以 He-Ne 激光作光源, 在驱动脉冲电压为半波电压  $V_{\sqrt{2}} = 9.8\text{kV}$  下检测了普克尔盒的光开关特性参数, 得到开关速度10ns, 全口径开关效率在95.6%~99.6% 之间, 表明等离子体电极电光开关具有优越的开关功能。

在大面积辉光放电等离子体电极的形成、开关驱动脉冲的产生及开关特性参数检测等项

表2 各点  $t_{5\%}$  和  $t_{95\%}$  测量结果

Table 2  $t_{5\%}$  and  $t_{95\%}$  measured at the seperated positions

time/ns	$t_{5\%}$	$t_{95\%}$	$t_{95\%} - t_{5\%}$
$A_{1i}$	34	76	42
$A_{2i}$	34	80	46
$A_{3i}$	34	86	52

技术的研究中取得的进展为下一步研究更大口径等离子体电极电光开关奠定了基础。

### 参考文献

- 1 Henesian MA and Goldhar J. *J opt Lett*, 1984, **9**: 516~ 518
- 2 Goldhar J and Henesian MA. *IEEE J Quantum Electronics*, 1986, **QE22**: 1137~ 1147
- 3 Rhodes M A De Yoreo JJ, Woods B W, and A therton L J. UCRL- LR- 105821- 92- 1, 1992
- 4 Rhodes M A, Woods B, De Yoreo J, and A therton J. UCRL-JC-115579, 1994
- 5 Rhodes MA, A therton L J, Woods B W, Robb CL, DeYoreo J J, and Roberts D H. UCRL-LR-105821-95-1, 1995
- 6 鲁敬平, 吕传信, 吴关女等. 强激光与粒子束, 1996, **8**(1): 117~ 122
- 7 Rhodes M A and Taylor J. UCRL-JC-109579, 1993
- 8 范 敏, 鲁敬平, 吴关女等. 强激光与粒子束, 1996, **8**(1): 112~ 116

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ELECTRO- OPTICAL SWITCH USING PLASMA ELECTRODES

Lu Jingping, Lü Chuanxin, Zhang Xongjun, Sui Zhan, and Zhang Xiaomin

*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 525-80, Chengdu 610003*

An 80mm × 80mm Pockels cell is designed and constructed. In contrast to the ordinary cell, it uses a plasma electrode formed by a glow discharge on either side of a crystal to replace the ring electrode. An important advantage of this configuration is the uniform field distribution which leads to a highly homogeneous optical transmittance, so that the cell can be scaled up to a large aperture, for example, 370mm × 370mm in Beamlet.

The Pockels cell contains two discharge chambers and a KDP crystal between them. The chamber is consisted of a plexiglass body and two discharge electrodes separated by 100mm. The cathode is composed of four buttons and the anode is a cylindrical bar. The 50mm thick cavity is vacuum sealed with the crystal and an antireflective glass window. Typical pressure is 200~ 400Pa for helium gas. With a DC preionizing current of 0.4mA or more, a uniform glow discharge is obtained in excess of 100mm × 100mm area. At a voltage of 15kV, the peak discharge current is 1.8kA with a pulse width of 1.1μs. Time synchronization and current equilibration of the discharges in both cavity is achieved with time departure of less than 20ns and current deviation of less than 5%. A switch pulse with a half-wave voltage of 9.8kV for He-Ne laser (λ= 632.8nm) is generated by a pulse forming network and then applied across the crystal through the plasma electrodes at the peak or later of the discharge current pulse. The switch pulse width (FWHM) is 410ns with a rise time (10%~ 90%) of 50ns and a trailing edge (90%~ 10%) of 110ns, the ringing of the voltage is less than 2% at the flat-top and 4% at the tail. By placing the Pockels cell between two polarizers crossed to each other, an optical switch is realized. Two photomultipliers are used to monitor the one-pass and two-pass transmitted laser beams respectively and deduce the switching performance. It is indicated that a switching speed of 10ns is achieved and a switching efficiency of 95.6%~ 99.6% is obtained across the aperture.