

用低压 KTP 普克尔盒和微带传输线进行 调 Q 长脉冲的任意整形*

卢秀权 陈绍和

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 利用新电光材料 KTP 晶体的有效电光系数 γ_{e1} , 制成电光开关, 实验研究了它的热光效应。成功地用它对输出脉宽为 50 ns 的 Nd:YLF 单纵模调 Q 激光削波整形。实验表明, KTP 普克尔盒的半波电压低及电容小, 配合微带传输线后, 能够获得脉宽为 1~10 ns, 形状几乎任意可调的整形脉冲, 改变了过去那种只把普克尔盒当作简单的削波元件、而无整形能力的状况。并提出了采用双块晶体、补偿结构 KTP 普克尔盒的设想。

关键词 KTP 电光开关, 微带传输线, 时间整形

1 引 言

在激光核聚变的研究中, 不仅要求前级驱动器输出的激光脉冲有一定的能量, 而且多种物理实验要求激光脉宽和时间分布是可控的^[1], 这就要求主振荡器系统应该有脉冲的任意整形能力。90 年代初, 美国 LLNL 实验室为 NOVA 升级的主振荡器提出了新的设计思路, 即主振加功放的结构, 这套系统 1992 年在 BEAMLET 上演示成功, 其间用波导调制器实现了激光脉冲的任意整形。我国高功率激光物理国家实验室试图采用这一方案, 并且用 LiNbO₃ 波导调制器获得了一些可喜实验结果^[2], 但是, 整形后脉冲能量仅为 pJ 量级。为了使主振荡器最后输出脉冲的能量达到 mJ, 再生放大器设计增益应达到 10⁹, 然而, 研制如此高增益再生放大器的经济和技术条件还不成熟, 另外, 要解决波导调制器的长期稳定性、可靠性及插入损耗进一步降低等问题, 还需要一段时间。

传统的脉冲削波都是在块状的普克尔盒上进行的, 起先, 普克尔盒是用 KDP 晶体制作的, 由于这种材料电光效应不大, 一块尺寸为 10 mm × 10 mm × 20 mm 的 KDP 普克尔盒, 半波电压高于 16 kV, 所以材料击穿和绝缘性能降级问题严重, 可靠性不能保证。而后改用 KD*P 普克尔盒, 将半波电压降至 8 kV 左右, 但普克尔盒的电容却增为 40 pF, 大电容导致高压驱动源响应更慢, 削出的脉冲最短, 为 4.5 ns, 以致无法对脉冲作更细致的整形工作。

KTP 是较新发展起来并广为应用的非线性晶体, 表 1 列出了它的一些参数^[3~6], 光学破坏阈值比 KDP 还高。大电光系数和小介电常数使得 KTP 普克尔盒能够同时较好地满足脉冲

* 国家高技术 863 基金资助项目。

收稿日期: 1997-12-17; 收到修改稿日期: 1998-02-25

整形所提出的低半波电压及小电容的要求。KTP 晶体还不潮解,只需在它的两个通光端面直接镀增透膜,即可进一步减小它的插入损耗。另外,由于晶体的压电效应小,所以,用 KTP 普克尔盒作为整形元件时,由压电效应引起的额外声光调制影响小。然而,KTP 是双轴晶体,在应用 KTP 普克尔盒时,关键是要补偿它的静态双折射,本文通过温控,实现了晶体的静态双折射补偿,然后将带温控的 KTP 普克尔盒用于调 Q 激光脉冲的削波整形,实验表明,KTP 普克尔盒的半波电压低、电容小,它配合微带传输线后,能够获得脉宽为 1~10 ns,形状几乎任意可调的整形光脉冲,改善了高功率激光系统前级驱动器的时间整形能力。

表 1 电光开关晶体 KTP, KD*P, KDP 的有关参数

Table 1 Parameters of Pockels cell crystals KTP, KD*P, KDP

	n	$\gamma_e/\text{pm/V}$	ϵ	$n^3\gamma/\epsilon/\text{pm/V}$	$P_{\text{th}}/\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}$
KTP	1.86	27	15.4	11.28	> 500
KD*P	1.47	24	48	1.59	1000
KDP	1.47	10	21	1.51	500

2 KTP 电光开关及其热光效应

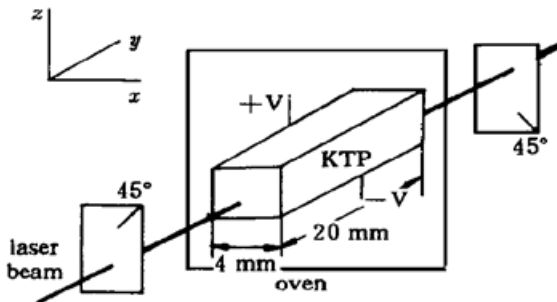


图 1 受温控的 KTP 电光开关

Fig. 1 The temperature-controlled KTP EO switch configuration

图 1 是一个 KTP 电光开关的基本结构,晶体垂直主轴切割,光沿 y 方向传播,通光长度为 l , z 方向加电场,电极间距为 d 。放在晶体两端的两个偏振片的起偏方向相互正交,并且起偏方向都与 z 轴成 45° 角。光通过长为 l 的晶体后,位相延迟

$$\Gamma = -\frac{2\pi}{\lambda}l(n_z - n_x) + \frac{\pi}{\lambda}n_z^3\gamma_{c1}V_z \frac{l}{d} \quad (1)$$

其中

$$\gamma_{c1} = \gamma_{33} - (n_x/n_z)^3\gamma_{13}$$

(1) 式等号右边第一项称为晶体的静态双折射 Γ_s ,它是温度和波长的函数,可写成

$$\Gamma_s = \Gamma_0 + \Gamma_\lambda + \Gamma_t = -\frac{2\pi}{\lambda}l_0(n_{z0} - n_{x0}) \left[1 + \left(\frac{1}{l_0} \frac{\partial}{\partial T} + \frac{\frac{\partial n_z}{\partial T} - \frac{\partial n_x}{\partial T}}{n_{z0} - n_{x0}} \right) \Delta T + \left(\frac{\frac{\partial n_z}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_x}{\partial \lambda}}{n_{z0} - n_{x0}} \right) \Delta \lambda \right] \quad (2)$$

其中, $\Gamma_0 = -\frac{2\pi}{\lambda}l_0(n_{z0} - n_{x0})$, 对应于参考温度和参考波长。实验用晶体沿 x, y, z 的尺寸为 $4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 假设方程(2)中的常数与温度无关,根据文献[3],晶体沿 y 方向的热膨胀系数 $\frac{1}{l_0} \frac{\partial}{\partial T} = 0.9 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 折射率随温度的变化是线性的,对于波长 $\lambda = 1.06 \text{ } \mu\text{m}$, 有 $\frac{\partial n_z}{\partial T} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\frac{\partial n_x}{\partial T} = 1.1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $n_{z0} = 1.8639$, $n_{x0} = 1.7634$, 可算得 Γ_s 每变化 2π , ΔT 变化 $8.97 \text{ }^\circ\text{C}$ 。对于波长 $\lambda = 1.053 \text{ } \mu\text{m}$, 可进一步估算得温度周期 $\Delta T = 8.41 \text{ }^\circ\text{C}$, 为了证明这

一点,我们将晶体置于温控炉里,两边放置两块起偏方向相互正交的偏振片,晶体 z 轴与偏振片的起偏方向成 45°,用一束功率恒定的波长为 1053 nm 的激光照射光开关。调节温度,测得的透过率随温度的变化示于图 2,在 32.2℃时,静态位相延迟得到补偿,变化的周期约为 8℃,与计算结果基本相符。

由方程(1)可以计算本开关的半波电压 $V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_z^3 \gamma_{cl}} \left[\frac{d}{l} \right]$,对于波长 $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$ 的 Nd·YLF 激光, $V_{\lambda/2} = 1.16 \text{ kV}$,测得它的静态电容值为 2 pF。

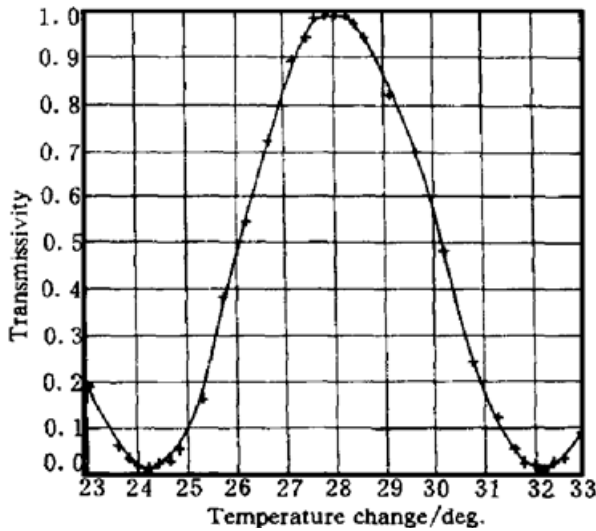


图 2 KTP 电光开关对 $\lambda = 1053 \text{ nm}$ 激光的透过率随温度的变化

Fig. 2 Transmission of a KTP Pockels cell at $\lambda = 1053 \text{ nm}$ vs temperature

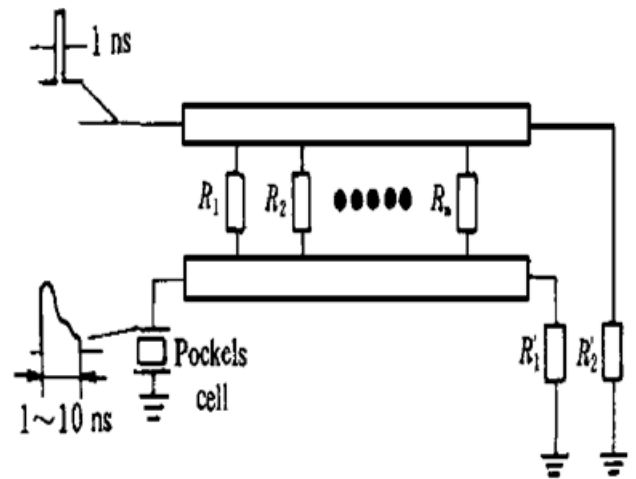


图 3 微带传输线

Fig. 3 The microstrip transmission lines used as an arbitrarily shaped electrical pulses generator

3 微带传输线

实验中,一对微带传输线^[2]是产生任意整形电脉冲的重要单元,它的结构如图 3 所示, $R_1 \cdots R_n$ 为分布在微带传输线上的一系列电阻,它们使输入端的初始电脉冲在传输过程中受到不同的分压和延迟, R'_1, R'_2 为匹配电阻。它的工作过程是这样的,当脉宽为 1 ns,幅度为 7 kV 的高压电脉冲经电阻耦合到一条微带传输线上时,受到 $R_1 \cdots R_n$ 的分压和延迟,然后 n 个电脉冲在输出端叠加,就会在普克尔盒两电极间形成峰值振幅为千伏左右、具有特定形状的整形电脉冲,只要调整传输线上的阻抗分布和改变传输线的长度,就能获得各种物理实验需要的不同脉宽和形状的整形电脉冲。

4 长脉冲的削波整形实验

实验装置如图 4 所示,其中 1 是 Nd·YLF 单纵模调 Q 激光器,工作波长为 1053 nm,输出 50 ns 的长脉冲; 2 为分光镜; 3 为 GaAs 光电导开关; 4 为冷阴极管高压脉冲发生器,输出幅度可调的电脉冲; 5 为一对微带传输线; 7 为 KTP 普克尔盒,置于温控炉里面; 6, 8 为洛匈双棱镜,分别作为起偏和检偏。

当 GaAs 光电导开关接收到从分光镜反射出来的光信号后, GaAs 光电导开关导通,输出

与光脉冲形状一致的电脉冲送至冷阴极管高压脉冲发生器,冷阴极管高压脉冲发生器由2CJIC 硅阶跃恢复二极管电脉冲幅度检测电路,2N5551 雪崩三极管,KN-22B 冷阴极管及 Blumlein 脉冲成形电缆组成。当 GaAs 光电导开关输出电脉冲幅度大于预定值后,二极管幅度检测电路即向雪崩三极管输出一个阶跃触发信号,雪崩三极管导通,然后由雪崩管推动冷阴极管输出高压,再经 Blumlein 脉冲成形电缆产生 ns 高压电脉冲。冷阴极管高压脉冲发生器输出电压振幅最高为 7 kV,输出脉宽随 Blumlein 线长度而定,实验中获得的脉宽为 1 ns,整个冷阴极管高压脉冲发生器的固有延时小于 40 ns,时间抖动小于 ± 0.5 ns。最后,幅度为 7 kV,脉宽为 1 ns 的高压电脉冲通过微带传输线上一系列电阻的分压和延迟,在 KTP 普克尔盒两电极间形成峰值振幅为千伏左右、具有特定形状的整形电脉冲。这种光同步工作方式使得我们能够

图 4 长脉冲整形的实验装置

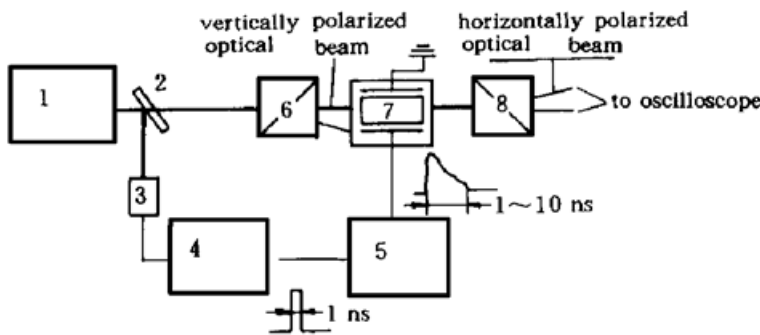


Fig. 4 Experimental setup for slicing and shaping the single axial mode Nd:YLF Q-switched laser pulses
 1: laser oscillator; 2: beam splitter; 3: GaAs photoconductive switch; 4: H. V. pulse generator; 5: microstrip transmission lines; 6, 8: polarizer; 7: KTP with an oven

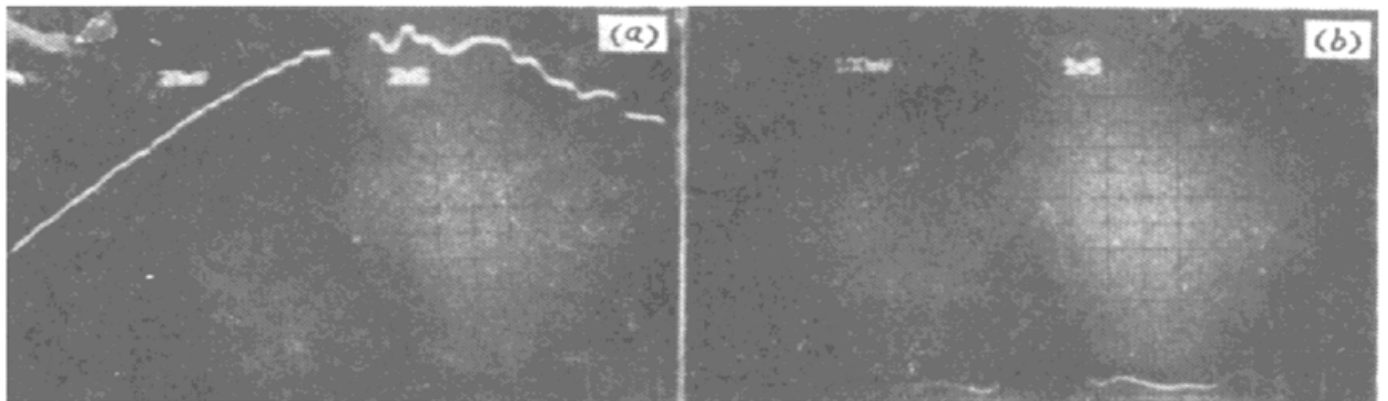


图 5 冷阴极管高压脉冲发生器直接驱动 KTP 普克尔盒削得的 1 ns 光脉冲时间波形

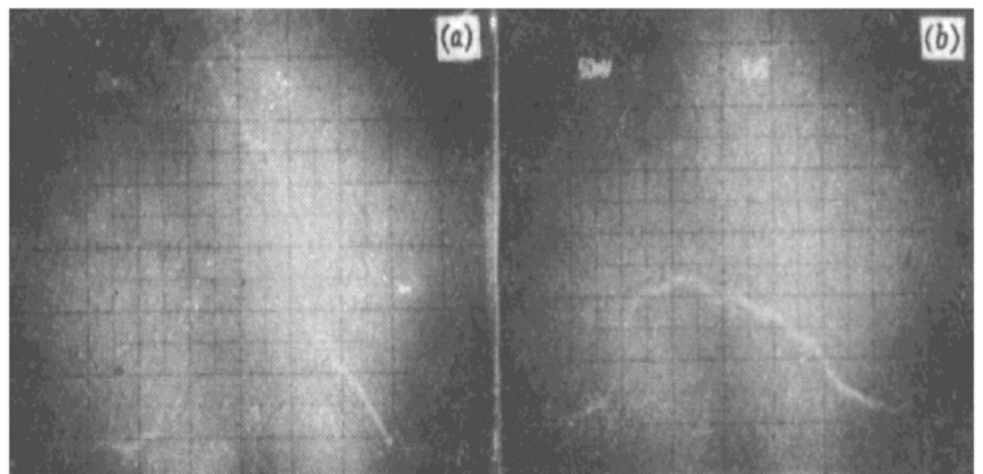
(a) 被开关挡掉的光脉冲; (b) 削得的光脉冲

Fig. 5 The sliced-out 1 ns optical pulse by KTP Pockels driven directly by H. V. pulse generatory

(a) the rejected pulse; (b) the sliced-out pulse

图 6 通过改变微带传输线上的阻抗分布而获得的两个任意整形光脉冲

Fig. 6 The two arbitrarily shaped pulses obtained by adjusting the impedance distribution along the microstrip transmission lines



实验中, KTP 普克尔盒的工作温度为 32.2℃; 实际得到的半波电压稍高于理论计算值,

为 1.2 kV; 图 5 是不用微带传输线、直接用冷阴极管高压脉冲发生器产生的电脉冲驱动 KTP 普克尔盒削出的 1 ns 光脉冲, 图 6 是通过改变传输线上的阻抗分布获得的整形光脉冲。本实验还只是原理判断实验, 设想如果把微带传输线上的电阻用可变电阻代替, 并且根据实验需要设计几根长度不等的微带线, 它们之间用转换开关切换, 就可方便地得到物理实验需要的脉宽在 1~ 10 ns 变化、有不同对照度(Peak-to-foot contrast ratio)、形状任意可调的光脉冲。

5 双块晶体结构的 KTP 普克尔盒的设想

我们用单块晶体结构的低压 KTP 普克尔盒配合一对微带传输线进行长脉冲的任意整形获得成功, 但热光效应实验表明, 该普克尔盒的温度带宽 $< 1^{\circ}\text{C}$, 使得在整形实验过程中必须对它采取严格的温控。另外, 根据 Sellmeier 色散方程^[3]及方程(2)可以求得, 该开关在 $1\ \mu\text{m}$ 附近的波长带宽不大于 0.05 nm, 这也限制了它从调 Q 锁模序列选出脉宽小于 100 ps 的巨锁模激光脉冲的能力。这两个问题的产生是因为 KTP 的静态双折射是温度和波长的函数, 这其实是一般双轴晶体共有的性质, 然而如果使用双块晶体结构的普克尔盒, 其中两块长度一样的 KTP 晶体相对旋转 90° , 那么, 不难想象这种补偿结构开关的温度和波长带宽都会大大提高。在两块晶体的长度加工误差 Δl 足够小的情况下, 这种普克尔盒将不需温控。

参 考 文 献

- 1 D. J. Kuizenga. Short-pulse oscillator development for the Nd-glass laser-fusion systems. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1694~ 1708
- 2 Xie Xinglong, Chen Shaohe, Zhou Liangxi *et al.*. Continuously tunable system for arbitrarily forming of laser pulse using a integrated LiNbO₃ waveguide modulator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(4): 393~ 398 (in Chinese)
- 3 John Ierlein, Herman Vanherzeele. Potassium titanyl phosphate: properties and new applications. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(4): 622
- 4 Amon Yariv, Pochi Yech. *Optical Waves in Crystals*. New York: Wiley-Interscience, 1984. 230~ 234
- 5 Liu Songhao, He Guangsheng. *Optics of Intense Light and Its Applications*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 1995. 27~ 28
- 6 K. L. K Cheng, L. T. Cheng, J. D. Bierlein *et al.*. Preparation of single-domain KTiOAsO₄ crystals for device applications. *Proc. SPIE*, 1993, **1863**: 40~ 53

A System for Arbitrary Shaping of Q-switch Laser Pulses Using KTP Pockels Cell and Microstrip Transmission Lines

Lu Xiuquan Chen Shaohe

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A Pockels cell utilizing the effective EO coefficient γ_{e1} of the relatively new EO crystal KTP is fabricated. Its thermo-optic properties were studied experimentally, and compensation of the static birefringence of the switch was achieved by temperature turning. Then the device was successfully used to slice and shape the 50 ns single axial mode, Nd:YLF Q-switched laser pulses. The experiments demonstrated that the KTP Pockels cell required a low half-wave voltage and had small capacitance. When driven by a pair of microstrip transmission lines, 1~ 10 ns pulses with almost arbitrarily tunable shapes could be obtained, and the Pockels cell was not only the simple pulse-slicing device (as usually believed before) any more. A thermally and dispersion compensated KTP Pockels cell is also discussed.

Key words KTP electro-optic switch, microstrip transmission line, temporal shaping