

用于获取大调制度的驻波型电光调制器的设计与制作*

陈 磊 于长泰

(浙江大学信电系, 杭州 310027)

摘 要 设计并制作了一种采用微波驻波电极的电光调制器, 该调制器被用于光谱展宽。通过非周期极性反转方法, 在 16.25 GHz 的调制频率下实现了微波驻波与光波的相位匹配, 从而获得了大调制度。实验中的光谱展宽达到 2.5 THz。

关键词 驻波, 电光调制器, 调制度。

1 引 言

在超短光脉冲技术和任意波形光脉冲合成器研究中, 一个在单一射频频率下工作并能获得大调制度的电光调制器作为关键器件而受到重视^[1]。根据调制原理, 一个连续激光器的输出光波在受到频率为 f_m 的微波相位调制后, 其频谱展宽 Δf_0 可表示为:

$$\Delta f_0 = 2\Delta f_m, \quad (1)$$

式中的 $\Delta\theta$ 就是调制器的调制度(调制深度)。在调制微波频率 f_m 一定的条件下, 具有足够大调制度的调制器能将连续激光器输出的单频光的频谱极大地展宽。其输出若接到一个群延迟网络中, 将产生重复频率为 f_m 的超短光脉冲序列; 其输出若接到可进行频率选择的空腔调制器阵列, 就成为可波形可控的超短光脉冲源, 如图 1 所示。

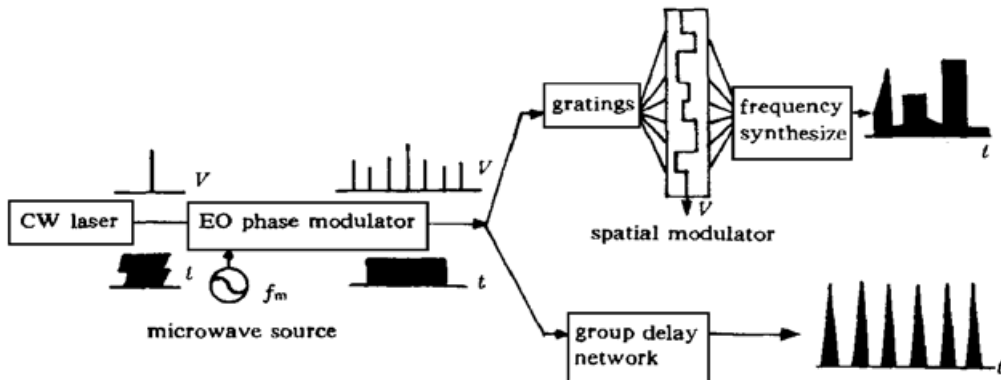


Fig. 1 The application of EO phase modulator in ultra short optical pulses generation

* 国家自然科学基金资助课题。

上述应用中,在特定频率微波调制下所能得到的调制度成为电光相位调制器最重要的性能指标。普通的行波相位调制器由于光波和微波之间的速度差导致的相位失配而无法获得足够大的调制度。Alferness 等提出一种相位反转方法在单一微波频率下获得了微波和光波的相位匹配^[2],该方法中调制器的微波电极被周期性地移位。在另一种被称作准速度匹配(QVM)调制器的设计中则用晶体极性的周期性反转来实现相位匹配^[3],该方法获得了超过 1 THz 的频谱展宽。

在相同微波功率下,处于谐振状态的驻波电极能提供比行波电极高得多的微波峰值电压,而电光效应的绝对值与微波电压成正比,这就提供了获得更大调制度的潜力。为获得更大的调制度,本文提出了一种采用微波驻波电极的电光(EO)相位调制器。但由于微波驻波具有与行波完全不同的相位特性,周期性的相位匹配技术不再有效。本文提出了一种非周期的极性反转方案,较好地克服了光波与微波驻波之间的相位失配。

2 非周期极性反转驻波电光相位调制器的设计

考察如图 2 所示的驻波型电光调制器。

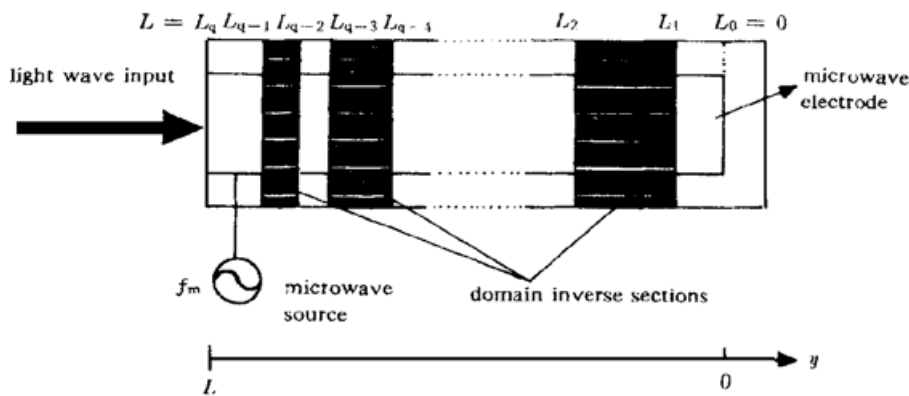


Fig. 2 The electrode structure of standing wave EO modulator with domain inverse sections

调制器电极终端开路,并被设计成在工作频率 f_m 下达到谐振,因此它可以被看作一个微带谐振器;该调制器拥有一个任意安排的极性反转结构,在反转区一次电光系数为 $-n_m$,在非反转区一次电光系数为 n_m 。当电极在 f_m 下达到谐振时,考虑到终端开路点应为驻波波腹,建立如图所示的坐标系,则微波电压在整个电极上的电场分布可以写为两个相反方向的微波行波之和:

$$E_m(y) = E \{ \cos [2\pi f_m(t - \frac{y}{v_m})] + \cos [2\pi f_m(t + \frac{y}{v_m})] \}, \quad (2)$$

式中 E 为微波源的振幅, v_m 为微波行波在晶体中的相速度。根据泡克耳斯(Pockels)效应,晶体在 y 方向上的折射率分布可以写为:

$$n(y) = \begin{cases} n_0 + n_m E_m(y) & \text{在非反转区域,} \\ n_0 - n_m E_m(y) & \text{在反转区域.} \end{cases} \quad (3)$$

假设一速度为 v_0 的光波前于 t_0 时刻到达 L_0 点(即坐标零点),则它到达 L 和 0 之间的某一点 y 点的时刻是 $t = t_0 + y/v_0$ (注意,在目前坐标系下 y 是一个负值),由(2)式可得到此时该点的微波电场为:

$$E_m(y) = E \{ \cos [2\pi f_m t_0 + 2\pi f_m(1/v_0 - 1/v_m)y] + \cos [2\pi f_m t_0 + 2\pi f_m(1/v_0 + 1/v_m)y] \}, \quad (4)$$

于是波长为 λ 的光波从 L 点到 0 点的总相移为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} \int_L^0 n(y) dy = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [n_0 |L| + (-1)^{q-1} \int_{L_q}^{L_{q-1}} n_m E_m(y) dy + (-1)^{q-2} \int_{L_{q-1}}^{L_{q-2}} n_m E_m(y) dy + \dots + \int_{L_1}^{L_0} n_m E_m(y) dy] = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \{n_0 |L| + n_m E [A \sin(2\pi f_m t_0) + B \cos(2\pi f_m t_0)]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \sum_{n=1}^q (-1)^n \left\{ \frac{1}{K_1} \sin[K_1(L_{n-1} - L_n)] \sin[K_1(L_{n-1} + L_n)] + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{K_2} \sin[K_2(L_{n-1} - L_n)] \sin[K_2(L_{n-1} + L_n)] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B &= \sum_{n=1}^q (-1)^n \left\{ \frac{1}{K_1} \sin[K_1(L_{n-1} - L_n)] \cos[K_1(L_{n-1} + L_n)] + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{K_2} \sin[K_2(L_{n-1} - L_n)] \cos[K_2(L_{n-1} + L_n)] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$K_1 = \pi f_m (1/v_0 - 1/v_m), \quad (8)$$

$$K_2 = \pi f_m (1/v_0 + 1/v_m). \quad (9)$$

对不同的光波波前来说, t_0 显然是一个变量。 t_0 变化时的相位变化的振幅就是调制度, 它的归一化表示为:

$$\Delta\theta = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{|L|}. \quad (10)$$

由上面的推导可知, 当微波的功率 ($|E|^2$) 和频率 (f_m) 确定后, 调制度就成为极性反转点的数目 (q) 及它们的位置 ($L_1, L_2 \dots L_{q-1}$) 的函数。目的就是对他们进行优化, 以求获得尽量大的调制度。对于这样一个多变量而且变量数目 (q) 未定的优化问题, 普通的方法是无能为力的。因此提出了一种图解匹配方法对该问题进行优化。首先可把 (4) 式改写为复向量的叠加形式:

$$E_m = E \operatorname{Re} [\exp(j\varphi_1) + \exp(j\varphi_2)] = E \sqrt{2(1 + \cos(4\pi f_m \frac{y}{v_m}))} \operatorname{Re} [\exp(j\varphi)], \quad (11)$$

$$\text{式中} \quad \varphi_1 = 2\pi f_m t_0 + 2K_1 y, \quad \varphi_2 = 2\pi f_m t_0 + 2K_2 y,$$

φ 是 $\exp(j\varphi_1)$ 和 $\exp(j\varphi_2)$ 叠加后的和向量的幅角。获得大调制的障碍是光波波前在晶体中遇到的微波电场有正有负, 因此由电光效应引起的相移也相互抵消。如果光波波前所遇到的由电光效应引起的折射率变化都保持正(或负)方向, 那么将获得大得多的相移和调制度。由于 E 是一个正的振幅值, φ 就完全决定了 E_m 的正负, 而在非极性反转区 E_m 与电光效应 $n_m E_m$ 符号相同, 在极性反转区 E_m 与电光效应 $-n_m E_m$ 符号相反。因此可以提出以下的相位匹配方法: 在 E_m 小于 0 (相位幅角 φ 处于二、三象限) 的区域进行极性反转, 而在 E_m 大于 0 (相位幅角 φ 处于一、四象限) 的区域则不进行极性反转。要做到这一点, 必须首先了解 φ 随 y 变化的特性。为简化起见, 不妨假设当光波波前到达 $y = 0$ 点时遭遇到的微波电场达到了正的最大值(对于所使用的连续激光器而言, 这个条件总是能达到的)。当 $y = 0$ 时, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = 0$, 三个向量重合于实轴[图 3(a)]; 随着 y 的减小, $\exp(j\varphi_1)$ 以逆时针方向旋转(K_1 小于

零), $\exp(j\varphi_2)$ 则以顺时针方向旋转(K_2 大于零), 它们的和向量 $\exp(j\varphi)$ 的幅角 $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2 = 2\pi f_m y/v_0$, 随着 y 减小 $\exp(j\varphi)$ 也以顺时针方向转动[图 3(b)]; 当 y 进一步减小, $\exp(j\varphi_1)$ 和 $\exp(j\varphi_2)$ 的夹角逐渐加大, 当这个角度达到 π 的时候, φ 会有一个突然的 $-\pi$ 跃变(也就是说在这一点 φ 是不连续的), 从第四象限跳到了第二象限[图 3(c)], 然后 φ 又转入线性变化, 直到 $\exp(j\varphi_1)$ 和 $\exp(j\varphi_2)$ 的夹角又达到 π (或 π 的奇数倍)时, 再一次跃变。

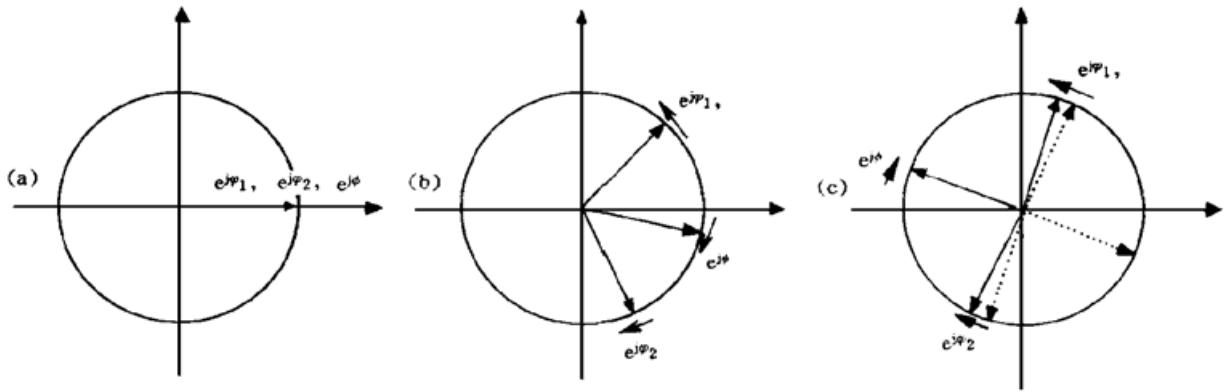


Fig. 3 Movement of electrical field phase angle φ of microwave encountered by optical wave front. [$\varphi_1 = 2\pi f_m t_0 + 2K_1 y$, $\varphi_2 = 2\pi f_m t_0 + 2K_2 y$, $\exp(j\varphi) = \exp(j\varphi_1) + \exp(j\varphi_2)$]

由此可以作出 φ 随 y 变化的曲线[图 4(a)], 根据该图, 就能够以相位匹配方法确定极性反转方案: 当 φ 位于一、四象限时($E_m > 0$) 不进行极性反转, 当 φ 位于二、三象限时($E_m < 0$) 进行极性反转, 在两区交界处, φ 满足

$$\varphi = k\pi + \frac{1}{2}\pi, \quad k = -1, -2, -3, \dots, \tag{12}$$

具体的极性反转区域安排方案见图 4(b)。

对采用该反转方案设计的驻波电光调制器进行了数值模拟, 得到的调制度与电极长度的关系如图 5 所示。可看出, 该调制器在电极长度增长时, 调制度近似线性增加。

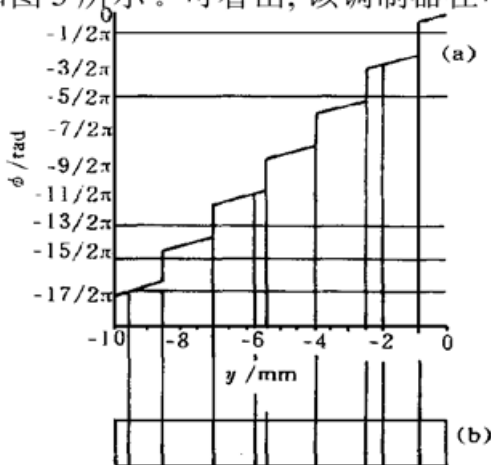


Fig. 4 Optimization of microwave standing electrode domain inverse design (Calculation condition: $v_0/v_m = 2.47$, $f_m = 16.25$ GHz). (a) Electrical field phase angle of microwave encountered by optical wave front with electrode length, (b) Optimization design

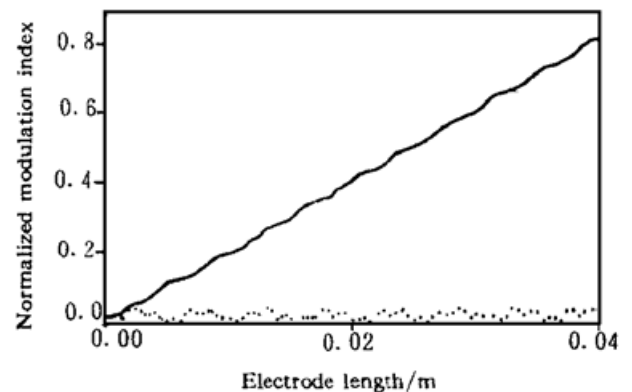


Fig. 5 Modulation index of standing wave nonperiodic-domain inverse-optimization EO modulator with electrode length. (Calculation conditions are same as Fig. 4. Dotted line is the result of EO modulator without domain inverse optimization)

3 调制器的制作与测试

按上述设计方案制作了一个用于在单一微波频率下获取大调制度的驻波电光调制器, 其制作流程如图 6 所示。

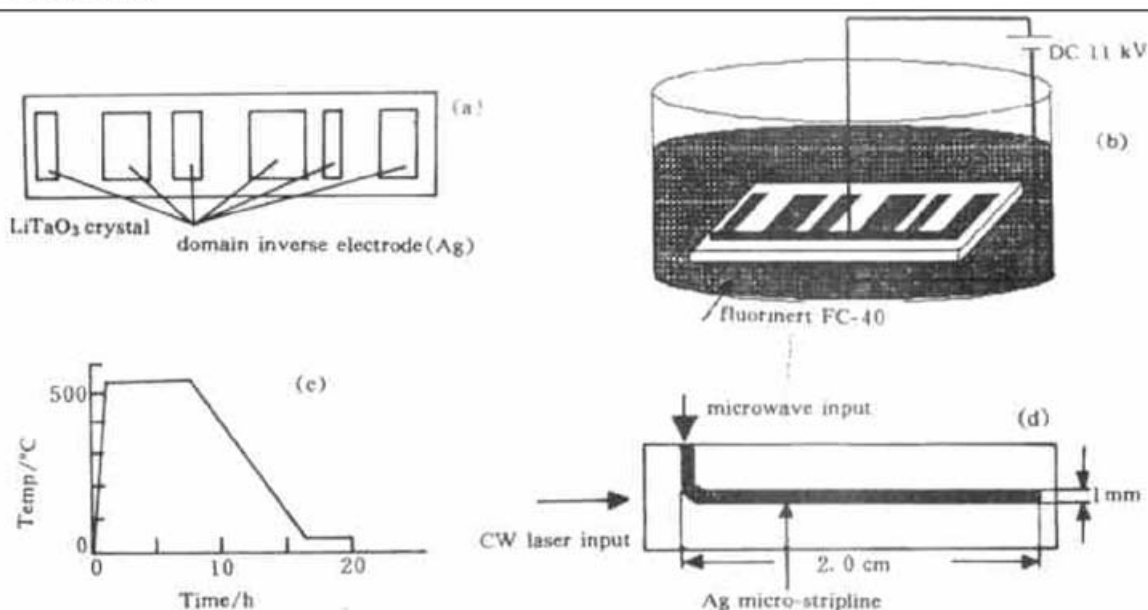


Fig. 6 Fabrication flow of standing wave EO phase modulator with nonperiodic domain inverse optimization. (a) Fabrication of domain inverse electrode, (b) Domain inverse operation under high DC voltage, (c) Annealing operation, (d) Fabrication of standing wave electrode

器件的尺寸为 $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 调制器制作在 z 向切割的 LiTaO_3 晶体上, 晶体厚度为 0.5 mm , 首先按照确定好的极性反转方案在晶体表面利用光刻和蒸发工艺制作反转电极(图中所画仅为示意, 并非实际图形), 在晶体的另一面制作背电极[图 6(a)]; 其次对晶体施以 11 kV 的直流高压(反转电极接正极, 背电极接负极)一定时间, 反转电极覆盖之下的晶体的电光效应系数将发生反转。为防止放电和打火, 在此过程中晶体被浸泡在 Fluorinert(一种绝缘性能优良的氟碳化合物)中[图 6(b)]; 在将反转电极去除后, 为消除高电压造成的晶格散乱, 将晶体置于退火炉中, 在 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行 8 个小时的退火[图 6(c)]; 最后, 在晶体表面制作 Ag 微带电极(第二次电极制作), 并确认该电极在工作微波频率下处于谐振状态以保证微波驻波分布的实现[图 6(d)]。

调制器制作完成后, 对其频带展宽性能测试由如图 7 所示的系统进行。在该系统中, Ar 激光器输出的连续激光通过所制作的电光调制器后频谱获得很大展宽, 然后一个光栅将不同频率分量的光波在角度上分开, 一个傅里叶转换凹镜再将这种角度上的区别转换为空间上的区别并被一个 CCD 摄像机拍摄下来。图 8 就是 CCD 摄像机观测到的图形。经测量, 光波的频谱展宽达到了 2.5 THz 。值得指出的是, 与图 8(b) 的计算结果相比, 图 8(a) 的测量结果的中心有很强光边带, 实际上这是未被调制的基波光。另外, 多次重复实验表明, 同一调制器在每次

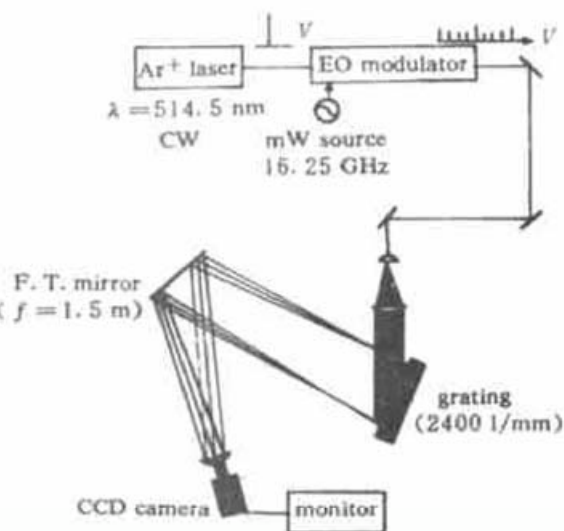


Fig. 7 Experiment system of optical spectrum expanding by EO modulator

实验中都能稳定地获得相同的光谱展宽。



Fig. 8 EO-expanded optical spectrum. (a) 2.5 THz optical spectrum observed by CCD camera, (b) Calculated optical spectrum

结 论 研制了一种工作于单一微波频率下的驻波型电光调制器，它采用一种非周期的极性反转方法达到了微波与光波间的相位匹配而能获得很大的调制度。作为实验结果，观察到的光谱展宽达到 2.5 THz。由于该种调制器的调制度与电极长度的近似线性关系，可以预计采用更长的调制电极可以获得更大的调制度和光谱展宽。

参 考 文 献

- [1] Amano K, Kobayashi T, Yao H *et al.*. Generation of 0.64 THz width optical sidebands by a novel electrooptic modulator for the purpose of forming ultrashort optical pulses. *IEEE J. Lightwave Tech.*, 1987, **LT-5**(10): 1454-1458
- [2] Alferness R C, Korotky S K, Marcatili E A J. Velocity matching techniques for integrated optic traveling wave switches/modulators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(3): 301-309
- [3] 郭凤珍, 于长泰, 汪 伟等. 用于产生太赫超宽边带光谱的新型电光调制器. *光学学报*, 1995, **15**(7): 935-938

Design and Fabrication of Novel Standing Wave Electrooptical Modulator for Getting Large Modulation Index

Chen Lei Yu Changtai

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 23 February 1999; revised 21 May 1999)

Abstract A novel Electrooptical modulator with standing microwave electrode is designed and fabricated. This modulator is used to expanding optical spectrum width from CW laser. With the nonperiodic domain inverse method, the phase matching between light wave and standing microwave, and hence the large modulation are obtained. As an experiment result, the width of optical spectrum expanding is as wide as 2.5 THz.

Key words standing wave, Electrooptical modulator, modulation index.