

准速度匹配电光相位调制器*

郭凤珍 于长泰

(浙江大学信息与电子工程学系 杭州 310027)

小林哲郎

(大阪大学基础工学部 日本大阪 560)

提要 报道了一种具有周期性极性反转结构的 LiTaO_3 电光相位调制器, 在 16.25 GHz 调制频率下, 实现了微波与光波的准速度匹配。在合成超短光脉冲实验中获得了 16.25 GHz 下 57 rad 的调制度, 调制带宽达 1.85 THz(FWHM)。

关键词 电光调制器, 调制度, 准速度匹配

1 引 言

高频下的深度电光相位调制在许多领域具有重要意义, 例如超短光脉冲的产生和整形、光谱学、频率梳状波发生等等^[1~3]。但是当微波范围超过 10 GHz 后, 由于微波与光波之间的速度失配, 很难实现深调制。为了解决这个问题, 我们探讨过电光晶体反转拼接法、利用高阶微波模式等方法, 最后研制成功了一种新型的电光相位调制器。这种电光调制器采用周期性极性反转结构, 在一定微波频率下实现了光与微波的准速度匹配。

2 原 理

由于电光晶体的非线性, 在电场作用下与光传播方向垂直的两正交固有偏振光的折射率发生变化, 变化量值与施加电压成正比。这种折射率的变化使得通过晶体的光的位相随之而变化, 即光的相位调制。相位调制后的光波电场可以写成如下形式

$$E(t) = E_0 e^{j[2\pi\nu_0 t + \Delta\theta \sin(2\pi f_m t)]} \quad (1)$$

其中 $\Delta\theta$ 为调制度, ν_0 为光波固有频率, f_m 为调制频率。显然被调制光的瞬时频率以固有频率为中心, $\Delta\theta f_m$ 为振幅而周期性增减着^[4], 将(1)式展开为傅里叶级数形式

$$E(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\Delta\theta) e^{j2\pi(\nu_0 + n f_m)t} \quad (2)$$

其中 J_n 为 n 阶贝塞尔函数。式(3)给出了频域中被调制光的各边带成分的振幅和相位。其光谱幅宽 $\Delta\nu$ 近似表示为

$$\Delta\nu = 2\Delta\theta f_m \quad (3)$$

即光谱展宽幅度分别与调制度和调制频率成正比。合成超短光脉冲要求尽可能宽的边带光谱, 而要获得大的 $\Delta\nu$ 值, 在提高调制频率的同时, 还要求施加深度相位调制, 为此设计一种适合于

* 国家自然科学基金资助项目。

高频工作的大振幅行波调制器便成为超短光脉冲合成器研究的核心。当光波和微波沿 y 轴方向传播时, t 时刻, 晶体中 y 处的折射率可写成下式形式

$$n(t, y) = n_e + n_m \cos \left[2\pi f_m \left(t - \frac{1}{V_m} y \right) \right]$$

$$n_m = \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_m \tag{4}$$

其中 n_e 为无调制时晶体的折射率; V_m 为微波在晶体中的速度; γ_{33} 为晶体的电光系数。

设群速度为 V_0 的光在 t_0 时刻入射至晶体, 则 $t_0 + y/V_0$ 时刻到达晶体中 y 处, 此处晶体的折射率为

$$n(t_0 + \frac{y}{V_0}, y) = n_e + n_m \cos \left[2\pi f_m \left[t_0 + \left[\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right] y \right] \right] \tag{5}$$

波长为 λ 的光到达 y 处的相位变化量为

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^y n dy = \theta_0 + \Delta\theta \cos(2\pi f_m t_0 + U) \tag{6}$$

其中

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_e y \tag{7}$$

$$\Delta\theta = \frac{2\pi n_m y}{\lambda} \cdot \frac{\sin U}{U} = \frac{4L}{\lambda} n_m \sin U \tag{8}$$

$$U = \pi f_m y \left[\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right] = \frac{\pi}{2L} y \tag{9}$$

$$L = \frac{1}{2f_m \left[\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right]} \tag{10}$$

当晶体中光与微波速度相等, 即 $V_m = V_0$ 时 $U = 0$, 调制度表示式为

$$|\Delta\theta| = \frac{2\pi n_m y}{\lambda} \tag{11}$$

但是一般情况下 $V_m \neq V_0$, 从而 $U \neq 0$, $\Delta\theta$ 以 $2L$ 为周期增减着。

图 1 示出速度失配的模式。光入射至晶体时受到微波“ \uparrow ”调制电场调制的光传播距离 L

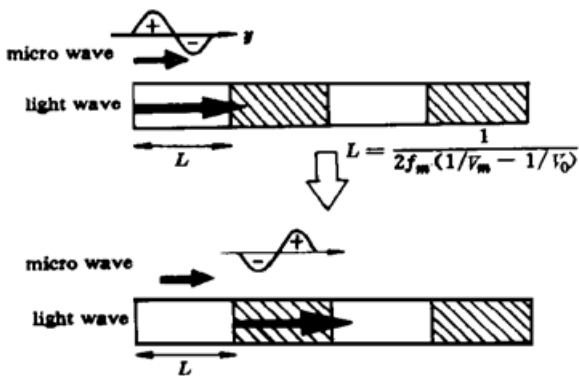


图 1 光与微波速度失配机理

Fig. 1 Mechanism of velocity mismatching between light and microwave

后, 由于光速远大于微波的速度而受到微波的反向调制, 其后在整个 $2L$ 区域内受到的调制与 L 区内的调制度相抵消。无论 y 如何增长, 所能得到的调制度都不能超过 $|\Delta\theta|_{\max}$, 且

$$|\Delta\theta|_{\max} = 4L n_m / \lambda \tag{12}$$

作为提高调制度 $\Delta\theta$ 的途径之一, 我们将晶体中调制相消区域的极性反转, 使之作用于光的调制电场反向, 以实现光与微波的准速度匹配。晶体中 y 处的光相位变化量 θ 可以表示为:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^y n \left[t_0 + \frac{y}{V_0}, y \right] dt$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n dy + \int_0^L n dy - \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{2L} n dy + \dots + (-1)^q \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{qL} n dy \\
 &= \theta_0 + \Delta\theta \cos(2\pi f_m t_0 + \phi)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

可实现的调制度为

$$\Delta\theta = \begin{cases} \frac{2\pi}{f_m} \left[\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right] \sqrt{q^2 + (2q + 1) \sin^2(U)} & (q : \text{even}) \\ \frac{2\pi}{f_m} \left[\frac{1}{V_m} - \frac{1}{V_0} \right] \sqrt{q^2 + (2q + 1) \cos^2(U)} & (q : \text{odd}) \end{cases}
 \tag{14}$$

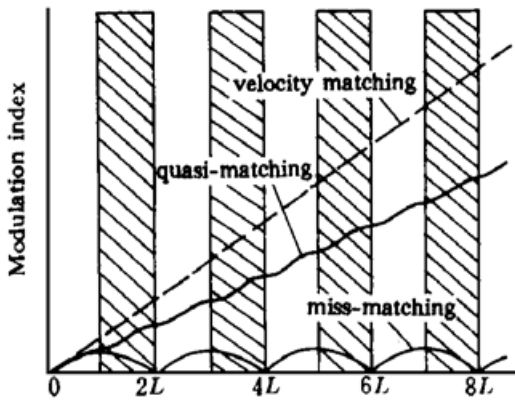


图 2 速度匹配、准速度匹配与速度失配三种情况下行波调制器的调制度, 其中 $L = 1/\{2f_m(V_m^{-1} - V_0^{-1})\}$, f_m 是调制频率, V_m 是微波相速度, V_0 是群速度

Fig. 2 Modulation index of a traveling wave modulator with perfect velocity matching, quasi matching, and mismatching as a function of interaction length $L = 1/\{2f_m(V_m^{-1} - V_0^{-1})\}$, where f_m is modulation frequency, V_m is phase velocity of microwave, and V_0 is group velocity of light

行波调制器的调制度与相互作用长度之间的函数关系示于图 2。图中虚线表示光与微波速度完全匹配时得到的调制度与相互作用长度成正比; 实线表示速度失配时一个普通调制器的调制度是一个周期函数, 数值小而且有效相互作用长度很短; 粗实线表示准速度匹配时得到的调制度近似与相互作用长度成正比 ($2/\pi$)。换言之, 利用这种准速度匹配型电光相位调制器, 调制度将不受相互作用长度的限制。理论上只要增大光与微波间的相互作用长度, 就可以获得相当高的调制度。实验中可达到的调制度还受到二方面因素的限制, 其一是光束通过晶体时的衍射展宽效应限制了相互作用长度的增加, 其二是调制器所能承受的调制电场强度将是另外一个决定调制度大小的参数 ($n_m \propto E_m$)。在此限度内已获得了足够大的调制度。

3 调制器的制作

调制器的制作方法如下: 室温下, 在置于电绝缘液中的 LiTaO₃ 晶体(厚 0.5 mm, 长 30 mm) 的电极上加高电压 (> 10 kV/mm, + Z 表面), 使晶体的极性以 $L = 2.65$ mm 为周期^[5]周期性地反转。当电极下的晶体极性反转完成时, 通过晶体的电流迅速下降。除去反转用电极在晶体上蒸上银微带线, 形成在工作频率下的微波谐振器。调制器的结构如图 3 所示。

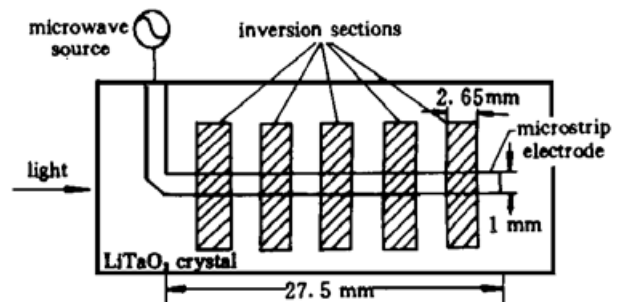


图 3 在 K_u 波段具有极性反转结构的准速度匹配 LiTaO₃ 电光调制器结构, 在 16.25 GHz 下, 反转区宽及间隔均为 2.65 mm

Fig. 3 A bulk LiTaO₃ phase modulator quasi velocity matched with periodic domain inversion at K_u band. Both the inversion width and the separation are 2.65 mm at 16.25 GHz

4 实验与结果

应用该调制器于超短光脉冲合成器中,采用 Ar^+ 激光器(514.5 nm) 和一个 K_u 波段的数千瓦磁控管微波发生器。图 4(a) 是典型的调制光谱,这是光往返两次通过调制器取得的调制结果。图 4(b) 示出了根据极性反转结构的调制度计算公式(14) 计算得到的理论计算结果。通过拟合确定:在 16.25 GHz 下获得的边带光谱宽度是 1.85 THz(FWHM), 调制度是 57 rad。据我们所知这是利用一个简单电光相位调制器所能获得的最宽边带。

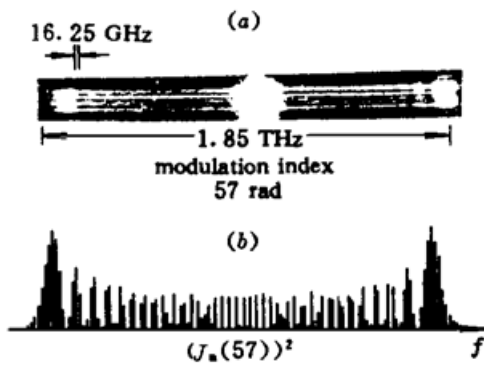


图 4 (a) 16.25 GHz 下,光两次通过调制器后产生的边带光谱,幅宽 1.85 GHz,位相调制度为 57 rad,光谱中心亮点起因于 AOM 所漏未调制光;(b) 16.25 GHz 下的数值计算结果

Fig. 4 (a) A sideband spectrum obtained by double pass modulation at 16.25 GHz. The spectral width is 1.85 THz (FWHM) and the phase modulation depth is 57rad; (b) The bright spot near the center of the photograph is due to the leakage light without modulation

研究结果证明了极性反转技术对于实现电光调制器中准速度匹配是一种有效途径。其优点在于晶体结构稳定,容易制作,调制器的电极结构也相应简化。实验中得到了 1.85 THz 的超宽调制光谱。这个结果说明可由电光方式直接产生亚微微秒光脉冲。在不久的将来,利用这种方式可望在几十 GHz 的频率下得到更宽的调制光谱(> 10 THz)。

参 考 文 献

- 1 T. Kabayashi, A. Morimoto. Electro-optic synthesis of picosecond optical pulses. OSA Proc. on Picosecond Electron and optoelectron., Vol. 4, ed. by T. Soller, D. M. Bloom. Opt. Soc. American, Washington, DC, 1989, 81~ 86
- 2 B. Lee, T. Kobayashi, A. Morimoto *et al.*. Velocity matched electro-optic phase modulator for wide optical sideband generation. *Electr. Lett.*, 1992, **28**(3) : 330~ 332
- 3 K. Amano, T. Kobayashi, H. Yao *et al.*. Generation of 0.64-THz-width optical sidebands by a novel electrooptic modulator for the purpose of forming ultrashort optical pulses. *J. of IEEE Lightwave Technology*, 1987, **LT-5**(10) : 1454~ 1458
- 4 末田正. 光エレクトロニクス. 东京: 昭晃堂, 1985, 第七、八章
- 5 T. C. Edwards. Foundations for microstrip circuit design. New York : John Wiley & Sons, 1977, Chaps. 5 and 8

Quasi Velocity Matched Electrooptic Phase Modulator

Guo Fengzhen Yu Changtai

(Dept. of Information & Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Tetsuro Kobayashi

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, Japan 560)

Abstract In this paper, we report a quasi velocity matched electrooptic phase modulator in LiTaO_3 with periodic inversion. The modulation of 57 rad at 16.25 GHz (sideband width: 1.85 THz(FWHM)) obtained experimentally is the deepest ever reported to our knowledge.

Key words electrooptic modulator, modulation index, quasi-velocity-matching