

用于产生太赫超宽边带光谱的 新型电/光调制器*

郭凤珍 于长泰 汪伟 猿渡荣道 森本朗裕 小林哲郎

(浙江大学信电系, 杭州 310008) (大阪大学基础工学部, 日本)

摘 要 报道了利用周期性的极性反转技术制作准速度匹配型电/光调制器, 并以这种调制器产生超宽边带光谱的结果。电光晶体 LiTaO_3 的极性分布周期反转之后, 在 16.25 GHz 的调制频率下, 实现了微波与光波的准速度匹配, 可以不局限于调制频率的高低, 从而在增加相互作用长度的前提下充分提高调制效率, 调制度已达到 57 rad, 产生的宽边带光谱的半值全宽为 1.85 THz。

关键词 电/光调制器, 边带, 准速度匹配, 调制度。

为产生超短光脉冲曾采用过各种方法, 并已获得过 6 fs 之短的光脉冲^[1], 但存在输出光脉冲的波形和宽度由于其非线性而强烈地依赖于输入的激光功率、且难以对脉冲参数进行外部控制等问题。而各种电/光调制方法在产生光脉冲的稳定性和可控性方面具有其固有的优点^[2]。其产生的光脉冲宽度与激光媒质的线宽及激光功率无关, 就是说使用一个窄线宽的气体激光器也可能产生出亚皮秒光脉冲。由于电光晶体中光波与微波的速度不同, 所以调制频率越高, 光波与微波之间的相互作用长度就越难以增加, 从而很难施加大幅度调制。使光波与微波的速度匹配有几种方法, 其中之一是根据调制频率所确定的周期性来反转电光晶体的极性^[3], 这种方法已获得成功的验证。

本文报道一种全新的电/光调制器, 它的特点在于高调制频率下能对光波进行大振幅调制以产生极宽的光边带。同时, 还报道了已获得的高达 1.85 THz 的光边带展宽的最新结果。

1 准速度匹配型电/光调制器的原理

以频率为 f_m 的微波信号对频率为 f_0 的光波信号进行调制时, 调制后的光波瞬时电场为:

$$E(t) = E_0 \exp \{ j2\pi f_0 t + j\Delta\theta \sin(2\pi f_m t) \} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\theta) \exp \{ j2\pi(f_0 + n f_m)t \} \quad (1)$$

式中 $\Delta\theta$ 为调制度。被调制光的光谱是振幅为贝塞尔函数 $J_n(\Delta\theta)$ 、间隔为调制频率 f_m 的边带信号列。所产生的边带展宽 $\Delta f = 2\Delta\theta f_m$, 可见, Δf 与调制频率 f_m 和调制度 $\Delta\theta$ 均成正比, 也即在高频、大幅度调制下, 可得到宽的频带。

如图 1 所示, 当光波和微波沿 y 方向传播时, 即行波调制的场合, 晶体中的折射率变为:

* 本课题系国家基金资助的国际合作项目。

收稿日期: 1994 年 4 月 19 日; 收到修改稿日期: 1994 年 7 月 11 日

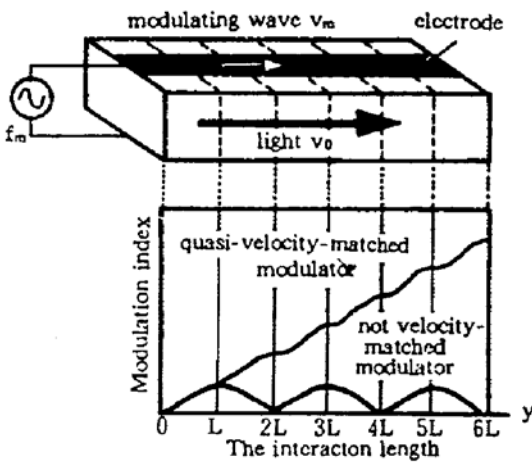


Fig. 1 The relationship between interaction length and modulation index in the travelling-wave modulation

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_e y, \quad \Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_m y \frac{\sin(U)}{U}, \quad U = \pi f_m y (1/v_0 - 1/v_m)$$

可见，仅当 $v_0 = v_m$ 时， $\Delta\theta$ 才与 y 成比例地增加。但是在一般的电光晶体中 $v_0 \neq v_m$ ， $\Delta\theta$ 以与 f_m 成反比的长度 L 为周期反复地增减着^[4]。其中 L 为：

$$L = \frac{1}{2f_m(1/v_0 - 1/v_m)} \tag{5}$$

显然，当 f_m 大时，相互作用长度无法增加，也就难以获得大的调制度 $\Delta\theta$ 。对此，如果能把晶体中调制度下降部分的极性（即晶体的轴向）反转，则在该部分中，电场引起的折射率变化也就反向，使得相应频率下的微波的位相得到补偿，以达到准速度匹配的效果。

t_0 时刻入射的光波在反转区域内受到的折射率为：

$$n_{inv} = n_e - n_m \cos \{2\pi f_m [t_0 + (1/v_0 - 1/v_m)y]\} \tag{6}$$

自入射进晶体到达 y 处，其间光波的位相变化量 θ 为：

$$\begin{aligned} \theta &= \int_0^L n dy + \int_L^{2L} n_{inv} dy + \dots + \int_{qL}^y (n \text{ or } n_{inv}) dy \quad (q: \text{整数}) \\ &= \theta_0 + \Delta\theta \cos(2\pi f_m t_0 + \Phi) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\Delta\theta = \begin{cases} \frac{2n_m \sqrt{q^2 + (2q+1) \sin^2(U)}}{\lambda f_m (1/v_0 - 1/v_m)}, & (q: \text{偶数}) \\ \frac{2n_m \sqrt{q^2 + (2q+1) \cos^2(U)}}{\lambda f_m (1/v_0 - 1/v_m)}, & (q: \text{奇数}) \end{cases} \tag{8}$$

式中， q 为反转的段数。

2 电/光调制器的制作

器件的尺寸为 $30 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ，蒸银微带线用作微波电极，宽为 1 mm。在 16.25 GHz 下计算出有效介电常数为 35。根据上述数据，用(5)式计算得 L 约为 2.59 mm，以 L 为周期作极性反转。为了制作极性反转结构，以往的方法是将多块晶体依晶轴反向顺序粘贴而成，这种方法的缺点是需要将晶体以光学精度接合，制作很麻烦，而且稳定性差。为此而尝试常温下，通过在 LiTaO_3 晶体上施加直流电压而实现设定区域内的极性反转，成功地制作出复杂

$$n = n_e + n_m \cos [2\pi f_m (t - y/v_m)] \tag{2}$$

$$n_m = n_e^3 \gamma E / 2$$

式中 n_e 为未加电场时的折射率； n_m 为折射率变化的振幅； v_m 为晶体中微波的位相速度； γ 为电光系数； E 为调制电场的振幅。时间为 t_0 时，光波入射到晶体上，设晶体中光波的群速度为 v_0 ，则 y/v_m 秒后，光波到达 y 的位置，这时折射率变为：

$$n = n_e + n_m \cos \{2\pi f_m [t_0 + (1/v_0 - 1/v_m)y]\} \tag{3}$$

若光在自由空间中波长以 λ 表示，光的位相改变量为 θ ，则：

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^y n dy = \theta_0 + \Delta\theta \cos(2\pi f_m t_0 + U) \tag{4}$$

而其中：

的极性分布构造。具体方法是：在晶体上要进行极性反转区域的 +C、-C 面上分别制作电极，然后通过电极在两面分别施加正负电压。当电压加到 11 kV(相当于 22 kV/mm)时，反转电流急剧增大，稳定数秒后，电流下降至初值。这时，极性反转即告完成(参见图 2)。

为确认反转效果，可根据电光晶体的压电效应所产生的电流方向来判断。同时，为了使反转后的晶体极性结构稳定并防止对光的散乱现象，应在 550 °C 下退火 6 小时。

图 3 示出调制器电极性设计为终端开路的谐振形式。调整电极的长度可使其在 16.25 GHz 下谐振，并提高电场作用效率。关于谐振器构造，如果图形设计合理可同时对行进波和反射波产生调制，但这里仅考虑了行波调制，相互作用长度为 27.5 mm。

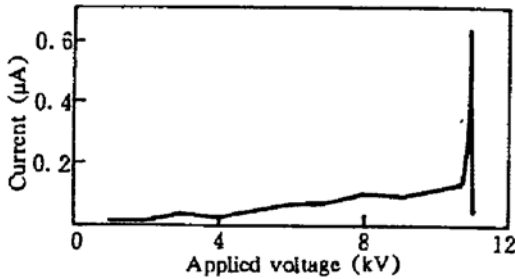


Fig. 2 The I-V characteristics of the polarity inversion in the LiTaO₃ crystal

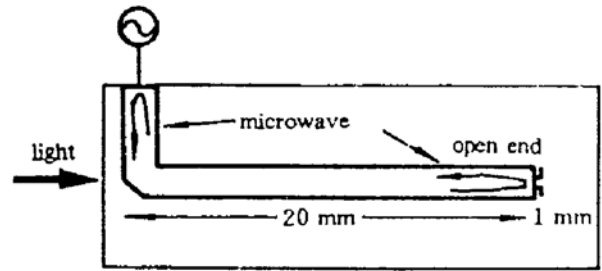


Fig.3 The diagrams of open- circuited- end microstrip resonator structure

3 实验与结果

如图 4 所示，以波长为 514.5 nm 的 Ar⁺ 激光器作为光源，使用的调制电源是频率为 16.25 GHz、脉冲宽度为 1 µs、最大输出功率为 11 kW 的磁控管。因为送入调制器的功率很大，必须用专用液体以防止调制电极放电。由于磁控管是脉冲工作的，为了使光信号与微波同步地入射进调制器，在光路系统中运用了声光(AO)调制器以将 CW 光斩成脉冲光波。在本实验中，光二次通过调制器以增加相互作用长度。

由调制器出射的光在 1/2400 mm 的光栅上衍射，使其第一级衍射光入射到焦距为 1.5 m 的透镜上进行时/空傅里叶变换，得到的光信号的空间分布用 CCD 摄像机观测并在显示器上显示出来。由于各个边带信号的强度与(1)式中得到的贝塞尔函数的各成分的平方成比例，所以只要将实验所观测到的图形与理论计算值相比较，就可以求出实际的调制度 $\Delta\theta$ 。图 5 是用 CCD 摄像机观测到的图形，中央是光源基波，两侧是由调制产生的间隔为 16.25 GHz 的

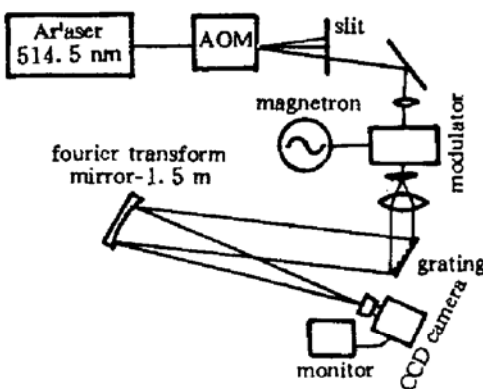


Fig. 4 Experiment arrangements

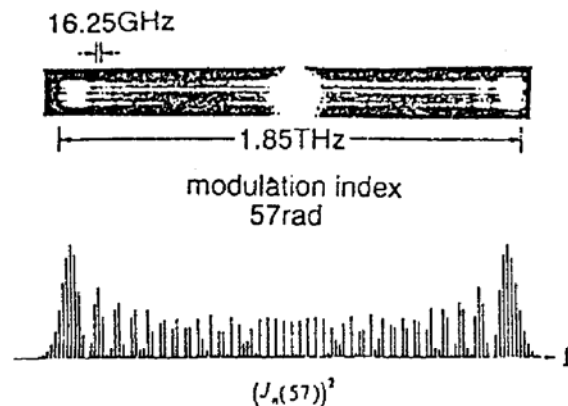


Fig. 5 Frequency spectra of the phase-modulated light

(a) Observed by CCD camera, (b) Calculated $(ccJ_n(57))^2$

边带部分。根据与理论计算值对应,可得知调制度为 57 rad,而边带展宽的幅度为 1.85 THz。

结 论 本文研制出了一种新型光学位相调制器,作为实验结果:1)已获得 57 rad 的高调制度;2)光谱展宽达 1.85 THz,属目前该方式下所取得的国内外最高水平。

将这种具有超宽频谱的光束通过群速度延迟色散介质(如:光纤)或色散元件(如:一对光栅)加以压缩,产生出的超短光脉冲宽度近似地由下式给出:

$$\tau_p = (0.7 \sim 0.8) / (2\Delta\theta\Delta f) \quad (13)$$

由上式实验结果计算可知,将得到 0.4 ps 宽的超短光脉冲,而所产生光脉冲的波形可以通过空间滤波器等对展宽光谱的空间调制来控制。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork, C. H. Briot-Cruz, P. C. Becker *et al.*, Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation., *Opt. Lett.*, 1987, 12(7): 483~485
- [2] T. Kobayashi, A. Morimoto, *OSA Proc. on Picosecond Electronics on and Optoelectronics.*, ed. by T. Soller, D. M. Bloom, Opt. Soc. American, Washington, DC, 1989, 4: 81
- [3] Ito, C. Takyu, H. Inaba, Fabrication of periodic domain grating in LiNbO₃ by electron beam writing for application of nonlinear optical processes., *Electron. Lett.*, 1991, 27(14): 1221~1222
- [4] 末田正, 光エレクトロニクス(昭晃堂, 东京, 日本, 1985)第七, 八章
- [5] T. C. Edwards, *Foundations for Microstrip Circuit Design*, New York, John Wiley & sons, 1977, Chaps. 5 and 8

A Novel Type of Electrooptic Modulator Suitable for THz-Width Sidebands Generation

Guo Fengzhen Yu Changtai Wang Wei

(Department of Information & Electric Engineering, Zhejiang University, Six Pagoda, Hangzhou 310008)

Eiji Saruwatari Akihiro Morimoto Tetsuro Kobayashi

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, Japan)

(Received 19 April 1994; revised 11 July 1994)

Abstract In this paper, we report a quasi-velocity-matched electrooptic (EO) modulator constructed by periodic domain inversion technology and the newest experimental results with it for generation of ultra-wide optical sideband. The quasi-velocity-matching between phase velocity of microwave and the group velocity of light, not depending on the modulation frequency, was established by using periodic domain inversion of an EO crystal LiTaO₃. Consequently, long effective interaction length was obtained at 16.25 GHz to increase the modulation efficiency. As a result, we have obtained modulation index 57 rad and extended the sidebands as wide as 1.85 THz.

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