

电光晶体乘法器及其应用*

李长胜 崔翔

(华北电力大学电力工程系 保定 071003)

提要 基于电光晶体的双横向普克尔斯效应,设计并实现了一种电光晶体乘法器,可以利用电光晶体和光载波实现两个电信号的乘法运算。实验证明这种电光晶体乘法器能够用于产生光调幅波和传感电功率,直流电功率传感实验的非线性误差低于3.3%。

关键词 双横向普克尔斯效应,电光晶体乘法器,光调幅波,电功率传感

1 引言

两个电信号的乘法运算在电子技术和电磁测量中已被广泛应用,例如调幅波的产生需要实现调制波与载波电信号的相乘,电功率的测量需要实现电压与电流信号的相乘。在电子技术中,一般采用模拟乘法器来生成调幅波。目前电功率的电磁测量方法主要依据电磁感应原理;此外,基于硅酸铍晶体的电光效应和磁光效应,文献[1]提出了一种电功率的光学测量方法。

1963年,C. F. Buhner等人对电光晶体的双横向普克尔斯效应进行了理论与实验研究^[2],结果表明,当将两个电信号同时施加于一块电光晶体时,通过对穿过晶体的被调制光信号的检测,可以分离并恢复原来的两个电信号。此后,这种效应已经成功地应用于光信号的测量与控制^[3,4]。但目前尚未见到应用这种效应直接实现电信号乘法的研究报道。

本文首先以铌酸锂晶体为例介绍双横向普克尔斯效应,然后提出电光晶体乘法器,最后讨论这种电光晶体乘法器在调幅波产生和电功率传感中的应用,并给出有关的实验结果。

2 双横向普克尔斯效应

任何具有三次轴的电光晶体均可呈现双横向普克尔斯效应,这种效应的基本结论可概括为,晶体对光波的电光相位延迟和晶体的电感应主轴取向分别受控于外加横向电场的大小和方向^[2]。如图1所示,对于铌酸锂晶体(简称LN),这种双横向普克尔斯效应可表示为

$$\Gamma = kE_m \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}\alpha \quad (2)$$

式中

* 国家自然科学基金资助项目,编号59507006。

收稿日期:1996-11-04;收到修改稿日期:1997-01-06

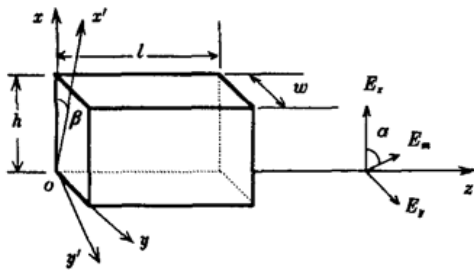


图 1 铌酸锂晶体的双横向普克尔斯效应原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the dual transverse Pockels effect in lithium niobite crystal

电场的两个正交分量可表示为

$$E_x = E_m \cos \alpha = \frac{\Gamma}{k} \sin 2\beta \quad (4)$$

$$E_y = E_m \sin \alpha = \frac{\Gamma}{k} \cos 2\beta \quad (5)$$

将(4),(5)两式相乘可得

$$E_x E_y = \frac{1}{2k^2} \Gamma^2 \sin 4\beta \quad (6)$$

(4)~(6)式描述了电光晶体内电信号与光信号之间的联系。

图 1 中 LN 晶体的电感应快轴为 y' , 其方位角为 $(\pi/2 + \beta)$, 电光延迟相位为 Γ 。根据文献[5], 此时 LN 晶体的米勒矩阵为

$$M(\Gamma, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2\sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)\sin^2(2\beta) & \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)\sin(4\beta) & \sin\Gamma\sin(2\beta) \\ 0 & -\sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)\sin(4\beta) & 1 - 2\sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)\cos^2(2\beta) & -\sin\Gamma\cos(2\beta) \\ 0 & -\sin\Gamma\sin(2\beta) & \sin\Gamma\cos(2\beta) & \cos\Gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

当外加电场大小使 $\Gamma \leq 0.24 \text{ rad}$ 时, 可作近似 $\sin\Gamma \approx \Gamma$, $\sin^2(\Gamma/2) \approx (\Gamma/2)^2$, 再考虑(4)~(6)式, 则(7)式可近似为

$$M(E_x, E_y) \approx M(\Gamma, \beta) \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{1}{2}k^2 E_x^2 & \frac{1}{2}k^2 E_x E_y & k E_x \\ 0 & -\frac{1}{2}k^2 E_x E_y & 1 - \frac{1}{2}k^2 E_y^2 & -k E_y \\ 0 & -k E_x & k E_y & \cos(k E_m) \end{bmatrix} \quad (8)$$

米勒矩阵中的每一项均可通过适当的偏振光学系统得以检测, 因此根据(8)式, 利用 LN 晶体的双横向普克尔斯效应可以检测下面一组电信号

$$\{E_x, E_y, E_m, E_x E_y, E_x^2, E_y^2\} \quad (9)$$

文献[2]已经实现了前两项 E_x, E_y 的检测, 文献[6]给出了第三项 E_m 的一种测量方法。本文设计一种电光晶体乘法器, 可以实现第四项 $E_x E_y$ 的检测。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r_{22} l \quad (3)$$

为常数, λ_0 为自由空间光波长, n_0 为 LN 晶体寻常光折射率, r_{22} 为电光系数, l 为 LN 晶体通光方向(三次轴)上的长度, Γ 为电光延迟相位, β 为 LN 晶体电感应主轴旋转角, E_m 为外加电场大小, α 为外加电场方向角。

3 电光晶体乘法器

根据图 1 和(1),(2)两式, LN 晶体横向外加

一种可以实现两个电信号相乘运算的偏振光学系统如图 2 所示, 图中 $o-xyz$ 为 LN 晶体的物理参考坐标系, 两个横向外加电场 E_x, E_y 由两个外加电压 u_x, u_y 和两对平行板电极引入, 起偏器方位角取为 45° , 则 LN 晶体入射光波的斯托克斯矢量为

$$S_i = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0]^T \quad (10)$$

式中上角标 T 表示向量转置。此时出射光波斯托克斯矢量为

$$S_o = M(\Gamma, \beta)S_i \approx M(E_x, E_y)S_i = \left[1 \quad \frac{1}{2}k^2E_xE_y \quad 1 - \frac{1}{2}k^2E_y^2 \quad kE_y \right]^T \quad (11)$$

其中第二分量记为

$$Q_o = I_{ox} - I_{oy} \approx \frac{1}{2}k^2E_xE_y \quad (12)$$

式中 I_{ox}, I_{oy} 为出射光波 x, y 分量的光强, 它们是可测量的, 因而电信号乘积 E_xE_y 可以从光信号 Q_o 的检测中获得。

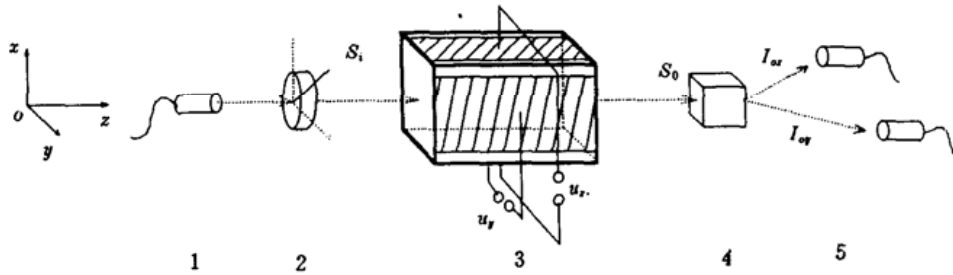


图 2 电光晶体乘法器原理图

1: 激光源; 2: 起偏器; 3: 铌酸锂晶体及外加电信号 u_x, u_y ; 4: 渥拉斯顿棱镜; 5: 光电检测器

Fig. 2 Schematic diagram of the electrooptic crystal multiplier

1: laser; 2: polarizer; 3: LN crystal and applied electric signals u_x, u_y ; 4: Wollaston prism; 5: photodetector

光信号 Q_o 的检测通常采用双光路法, 利用渥拉斯顿棱镜将出射光波同时分成两束 (即 x, y 分量), 再经过光电检测和信号处理同时获知 I_{ox} 和 I_{oy} , 取其差值即为 Q_o ; 也可采用单光路法, 用检偏器取代渥拉斯顿棱镜, 通过转动检偏器分时检测 I_{ox} 和 I_{oy} ; 若要实时观测 Q_o 中的乘积信号, 一个方便的办法是固定检偏器为 x 或 y 方向, 即只检测 I_{ox} 或 I_{oy} , 由琼斯矩阵分析法易知

$$I_{ox} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2}k^2E_xE_y \right) \quad (13)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2}k^2E_xE_y \right) \quad (14)$$

本文将图 2 所示利用电光晶体在光载波中实现两个电信号乘法运算的装置称为电光晶体乘法器, 其数学表达式由 (12) 式给出。

4 实验结果

4.1 应用电光晶体乘法器产生调幅波

调幅波是载波信号与调制信号的乘积, 根据 (12) 式, 如果让图 2 中 LN 晶体的两个横向外加电场分别为载波和调制波, 则可由电光晶体乘法器获得调幅波。

如图 2 所示, 令载波电信号为

$$u_x = \sqrt{2} U_x \sin \Omega t \tag{15}$$

调制波电信号为

$$u_y = \sqrt{2} U_y \sin \omega t \tag{16}$$

式中电信号角频率 $\Omega \gg \omega$, U_x, U_y 为电信号有效值, 其取值应满足米勒矩阵(8)式的近似条件。根据图 1, 2 以及(12)式, 可知此时有

$$Q_o = \frac{k^2}{2hw} u_x u_y = \frac{k^2}{hw} U_x U_y \sin \omega t \sin \Omega t = \frac{k^2}{2hw} U_x U_y [\cos(\Omega - \omega)t - \cos(\Omega + \omega)t] \tag{17}$$

(17)式即为抑制载波的双边带调幅信号。

实验系统如图 2 所示。光源为激光二极管准直光源, 中心波长为 670 nm, 光束发散度为 1 mrad, 最大光功率为 5 mW, 功率稳定度为 1%。电光晶体采用 z 向透光铌酸锂晶体, 其静态消光比大于 20 dB, 晶体尺寸为 4×4×35 (mm), 垂直于 x 轴的侧面镀金电极, 电极面积为 4×35 mm², 极间电容约为 42 pF, 垂直于 y 轴的侧面粘贴铂电极, 电极面积为 3×35 mm², 极间电容约为 32 pF。载波信号 u_x 取自 XFD-7A 型低频信号发生器, 调制信号 u_y 取自 TZI-0.5/250 型单相调压变压器。用检偏器取代渥拉斯顿棱镜由单光路实时检测出射光波的 x 或 y 分量。光电检测电路如图 3 所示, 光电管采用 Si-PIN 管, 检测输出电压为 u_o , 其交流部分 u_{oAC} 与 Q_o 成正比, 即

$$u_{oAC} = -\frac{1}{2} k_{oe} R_f Q_o \tag{18}$$

式中 k_{oe} 为 Si-PIN 管的光电转换系数, R_f 为变换电阻。

当取 $U_x = 90$ V, $U_y = 120$ V, $\Omega = 2000 \pi$ rad/s, $\omega = 100 \pi$ rad/s 时, 由示波器 AC 档观测到的光电检测信号如图 4 所示, 此信号即为 u_{oAC} , 是抑制载波的双边带调幅波。

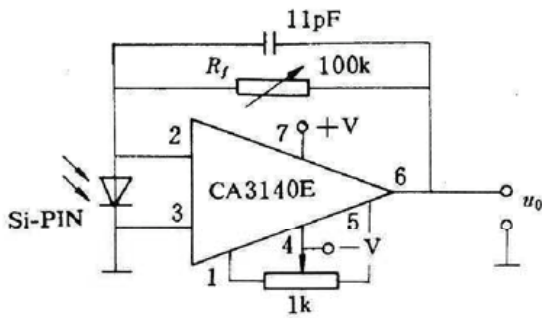


图 3 光电检测电路

Fig. 3 Schematic drawing of the photo detector

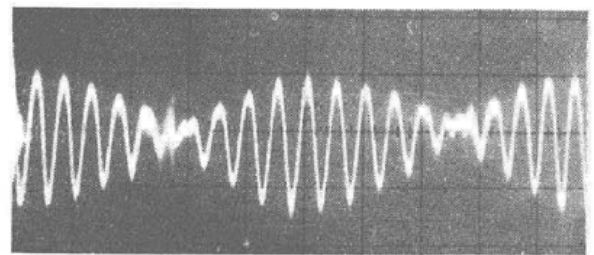


图 4 利用电光晶体乘法器生成的光调幅波

(示波器扫描时间: 2 ms/格)

Fig. 4 Oscillogram of the amplitude modulated optical signal

(Horizontal division: 2 ms/div)

4.2 应用电光晶体乘法器传感直流电功率

电功率是电压、电流的乘积, 如果将被测电功率的电压、电流均转换成电光晶体的匹配电压(即满足(8)式近似条件的晶体外加电压), 电光晶体乘法器即可用于电功率的测量。

一种被测电压、电流匹配变换电路如图 5 所示。图中电源为 DH1722 型直流稳定电源, 稳压范围为 0~250 V, 稳流范围为 0~1.2 A; 功率表为 D40-W 型 0.2 级; R_L 为纯电阻性负载, 阻值为 160 Ω ; R_v 为 100 k Ω 可变电阻, 用来将负载电压 u_L 变换为电光晶体匹配电压 u_y , 即

$$u_y = k_v u_L \tag{19}$$

式中 k_v 为电阻分压系数; R_t 为 50 Ω 滑线式变阻器, 作为电流取样电阻, 可将负载电流 i_L 变换成

匹配电压 u_x , 此处近似认为 $i_L \approx i_C$, 则有

$$u_x = R_L i_C \approx R_L i_L \tag{20}$$

将 u_x 和 u_y 同时施加于上述 LN 晶体, 则有

$$Q_o = \frac{k^2}{2hw} u_x u_y = \frac{k^2}{2hw} k_V R_L u_L i_L = \frac{k^2}{2hw} k_V R_L p \tag{21}$$

式中 $p = u_L i_L$ 为被测负载电功率。

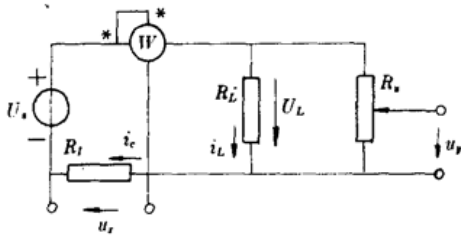


图 5 被测电压、电流的匹配变换电路
Fig. 5 Circuit for the applied voltage and current matching conversion

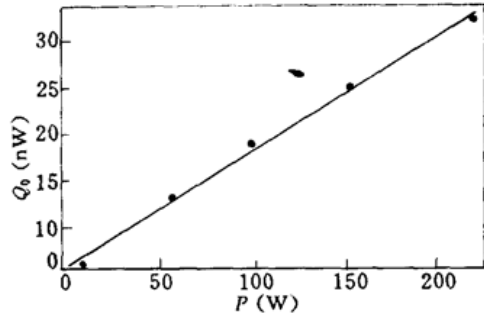


图 6 利用铌酸锂晶体测量直流电功率的实验结果
Fig. 6 Graphical representation of the experimental result of the electric power measurement based on LN crystal

实验系统仍如图 2 所示, 通过改变电源 U_s 的输出电压和电流来改变负载消耗的电功率 p ; 用检偏器取代渥拉斯顿棱镜, 采用转动检偏器的方法测量出射光波 x, y 分量的光强 (由 LM-5 型激光功率计测得), 再由 (12) 式计算出 Q_o ; 负载功率 p 变化时, Q_o 随之变化, 当被测电功率在 6 ~ 220 W 范围内变化时, 实验数据的线性拟合曲线如图 6 所示, 线性拟合公式为

$$Q_o = 0.12p + 6 \text{ (nW)} \tag{22}$$

其非线性误差低于 3.3%。

5 结 论

理论与实验表明: 利用具有双横向普克尔斯效应的电光晶体, 可以在光载波中实现两个电信号的乘法运算。本文利用 LN 设计出一种电光晶体乘法器, 并在实验室内进行了光调幅波的生成和直流电功率的光学传感实验。直流电功率传感实验的非线性误差低于 3.3%。这种电光晶体乘法器在光学传感和光通信领域中具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 藤井阳一, 林 淳. 单一结晶による电压・电流・电力ヤンサ. レヘザへ研究, 1984, 12(4): 36~42
- 2 C. F. Buhner, L. R. Bloom, D. H. Baird. Electro-optic light modulation with cubic crystals. *Appl. Opt.*, 1963, 2(8): 839~846
- 3 H. Shimizu, K. Kaede. Endless polarization controller using electro-optic waveplates. *Electr. Lett.*, 1988, 24(7): 412~413
- 4 Yoshinori Namihira, Hiroharu Wakabayashi. Real-time measurement of polarization fluctuations in an optical fiber submarine cable in a deep-sea trial using electrooptic LiNbO₃ device. *J. of Lightwave Technol.*, 1989, LT-7(8): 1201~1206
- 5 新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光. 北京: 原子能出版社, 1994, 68

- 6 C. Li, X. Cui. Measuring two-dimensional electrostatic field by using electro-optic crystal. in *Electro-optic and Second Harmonic Generation Materials, Devices, and Applications*. Manfred Eich, Bruce H. T. Chai, Minhua Jiang, Editors, *Proc. SPIE*, 1996, 2897 : 243

Electro-optic Crystal Multiplier and its Application

Li Changsheng Cui Xiang

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003)

Abstract Based on the dual transverse Pockels effect in some crystals, a novel Electro-Optic Crystal Multiplier (EOCM) is advanced. The multiplying operation between two electric signals can be done by an electro-optic crystal in a light carrier. It is experimentally verified that EOCM is capable of being applied to make the amplitude modulated optical signal and to measure the electric power. The nonlinearity error in measuring the DC electric power by a lithium niobite crystal is less than 3.3%.

Key words dual transverse Pockels effect, electro-optic crystal multiplier, amplitude modulated optical signal, electric power sensor