

文章编号: 1000-5862(2014)02-0132-04

3 阶非线性效应对飞秒脉冲在掺镁铌酸锂晶体中 时域延迟的影响分析

江蓓¹, 聂义友^{1,2*}

(1. 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022; 2. 江西光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要: 将3阶非线性效应引入至基于电光效应控制的超短脉冲群速度理论模拟研究; 当改变输入光强、操作温度、波矢失配、极化周期以及横向直流电场时2阶和3阶非线性效应的共同作用对超短脉冲在掺镁铌酸锂晶体中传播群速度的影响要明显大于仅考虑2阶非线性效应的作用效果. 3阶非线性效应的引入进一步完善了基于块状晶体电光效应的偏振耦合效应, 实现“慢光”方案的理论指导意义.

关键词: 3阶非线性; 电光效应; 脉冲延迟; 掺镁铌酸锂

中图分类号: O 437.5

文献标志码: A

0 引言

近年来, 在不同光学材料中调节和控制光脉冲速度吸引了人们的广泛关注^[1-3], 运用非线性光学手段获得慢光也引起学术界极大的兴趣. 所谓“慢光”是指在一些特定的介质结构和条件中, 光以大幅放缓的群速度在介质中传播引起的显著光学现象^[4], 一般是在光纤和各种光子晶体等介质中, 光与物质的相互作用产生. 该现象在光学缓存和光信息传递方面具有潜在应用特性. 在研究初期, 人们通常将慢光与正常或反常色散联系在一起, 目前常见的是利用诸如相干布居粒子振荡技术(CPO)^[5]、电磁感应透明效应(EIT)^[6]、四波混频(FWM)^[7]、受激布里渊散射^[8], 以及利用散射和波耦合等方法生成慢光. 虽然有较多方法都能实现“慢光”, 但由于延时大小和带宽等问题, 距实际使用都存在一些距离. 在目前通过光与物质作用来得到慢光的材料中, 铁电晶体 PPLN 作为一种改变激光波长的高效晶体, 它因能提供实际有效的波长转换而得到了充分的发展壮大. 对于掺镁 PPLN 晶体(MgO: PPLN), 通过在 PPLN 中掺入摩尔分数为 5% 的 MgO 大幅度提高了晶体的非线性系数和阈值功率, 增强了波长转换效率和提高了激光的功率密度.

文献[9]在 MgO: PPLN 晶体中运用电光效应即 2 阶非线性的方法调制群速度减缓, 该方法操作简单, 且成本较低. 但之前的研究并没有把 3 阶非线性效应考虑进去, 这与实际情况不符, 因为即使是低

于阈值功率的激光入射至体材料中容易引起材料的折射率变化, 引起脉冲相位的非线性变化, 从而导致出射脉冲的畸变. 因此, 本文关注 3 阶非线性效应对在铁电晶体传输的激光脉冲的影响. 讨论了 2 阶和 3 阶非线性效应的联合作用对激光脉冲延迟现象的影响, 并与不考虑 3 阶非线性的情况进行了对比, 直观地解释了 3 阶非线性效应对脉冲延迟的影响.

1 理论分析

在理论研究中, 假设一束 e 偏振飞秒脉冲沿 x 方向入射到一个 z 切割的 MgO 摩尔分数为 5% 的 MgO: PPLN 晶体中(图 1), 在 y 方向外加一个直流电场, 在横向电光效应作用下, 晶体中正畴和负畴的光轴沿传播方向相对于 z 轴依次交替承 $+\theta$ 和 $-\theta$ 角. 这样入射光沿 x 方向穿过 MgO: PPLN 中的每个正负畴都相当于穿过一个半波片, 偏振方向会在 yz 平面内来回摆动.

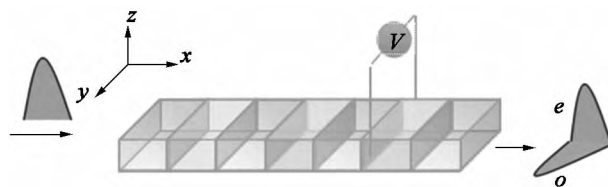


图1 外加直流电场的 MgO: PPLN 晶体

由于晶体极化周期特意选择在入射波长准相位匹配周期附近, 不能够发生严格的准相位匹配现象, 即相位失配, 因此必将出现“级联效应”. 在晶体传

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61265001)和江西省自然科学基金(20122BAB202005)资助项目.

通信作者: 聂义友(1963-), 男, 江西丰城人, 教授, 主要从事量子信息的研究.

播时,首先入射脉冲(e 光)中的部分能量转移为 o 光,但是在级联效应的作用下,入射光的能量不会全部转移至 o 光,并且能量从 o 光流回 e 光,因此 o 光与 e 光的相互能量耦合过程使得脉冲将以非固定的速度传播,是 e 光与生成的 o 光之间的群速度失配产生了“慢光”现象.整个耦合过程能够用耦合波方程概况为

$$\frac{\partial E_1}{\partial Z} + \frac{ik''_1}{2} \frac{\partial^2 E_1}{\partial t^2} = i\rho_1 E_2 \exp(i\Delta k_0 Z) + i\sigma_1 [|E_1|^2 E_1 + 2 |E_2|^2 E_1], \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial Z} + \delta \frac{\partial E_2}{\partial t} + \frac{ik''_2}{2} \frac{\partial^2 E_2}{\partial t^2} = i[-\rho_2 E_1 \exp(-i\Delta k_0 Z)] + i\sigma_2 [|E_2|^2 E_2 + 2 |E_1|^2 E_2], \quad (2)$$

其中 $\rho_i(z) = \omega_i n_1^2 n_2^2 E_y \gamma_{51} / (c \sqrt{n_1 n_2})$ ($i = 1, 2$ 分别表示 e 光和 o 光) $\sigma_i = 3\omega \chi^{(3)} / (8cn_i)$ E 表示外加直流电场 $E_i(z, t)$ 为脉冲电场振幅 n_1, n_2 分别表示 e 光和 o 光折射率 ω_i 表示角频率,时间 t 是测量得出的输入脉冲时间范围. $\delta = k'_1 - k'_2$ 是输入脉冲和转换脉冲之间的群速度失配(GVM),其中 k'_i 为群速度倒数 $k''_i = d^2 k_i / d\omega^2$ 为群速度色散(GVD), $\Delta k_0 = k_2 - k_1 = 2\pi(n_2 - n_1) / \lambda_0$ 是相位失配,其中 λ_0 是输入脉冲的中心波长 k_i 是脉冲中心频率的波矢. 方程(1)和方程(2)右边第2项表示3阶非线性过程,包括自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM).

2 结果讨论

在模拟中,中心波长为1550 nm、脉冲持续时间为70 fs的 e 偏振的飞秒脉冲入射至一个长度为20 mm、极化周期为18.8 μm 的MgO:PPLN晶体.此时,操作温度设定在21 $^{\circ}\text{C}$.在准相位匹配条件中,1550 nm匹配极化周期是19.8 μm ,因此波矢失配为 $\Delta k = 0.0168 \mu\text{m}^{-1}$,如图1~图3所示.

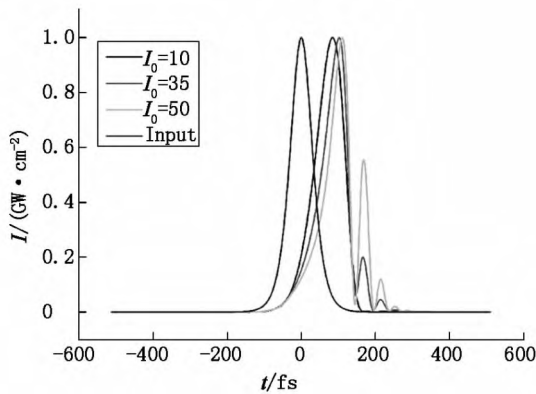


图1 当 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时出射脉冲的脉冲形状延迟的关系

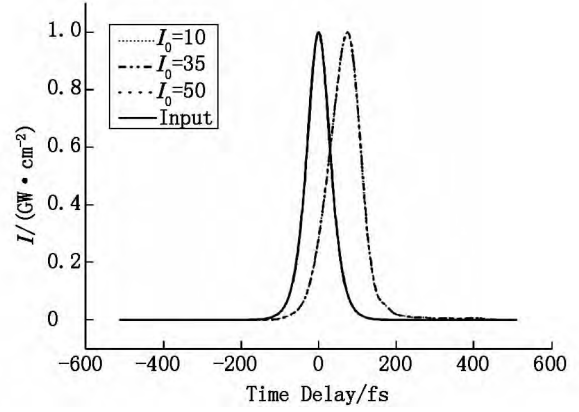


图2 当 $\chi^{(3)} = 0$ 时出射脉冲的脉冲形状延迟的关系

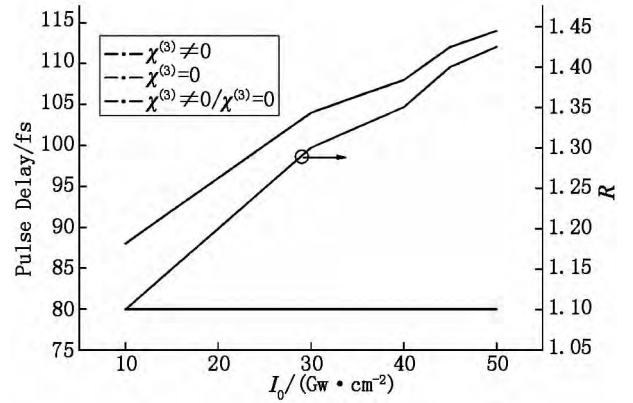


图3 出射脉冲时间延迟关系曲线和延迟比值曲线

通过在不同输入光强时输出脉冲的时间延迟的图形(图1)发现,当考虑3阶非线性效应时,即3阶非线性极化率 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时,随着输入光强在10~50 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 内递增,输出脉冲的时间延迟也逐渐增大.这表明输入光强对时间延迟有影响,只调节输入光强也可以达到控制脉冲延迟的目的.但从图2看出,在 $\chi^{(3)} = 0$ 的情况下,3种不同强度的输入光强所对应的输出光强图形完全重叠,说明输入光强不会对脉冲延迟有影响.这是因为存在3阶非线性性的情况下,会产生自相位调制、交叉相位调制等多种光学现象,导致脉冲延迟,而不考虑3阶非线性作用时则缺少了这些影响的因素.图3表现了输入光强从10 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 改变到50 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的过程中,在3阶非线性效应影响下,脉冲延迟从82 fs增加至114 fs,而没有3阶非线性作用时脉冲延迟则呈一条平稳直线,没有产生变化.从图3明显可以看出3阶非线性效应对脉冲延迟的影响. R 为2种情况下脉冲延迟时间的比值,更直观地表明3阶非线性效应对时间延迟的调制大于仅存在2阶非线性效应时的情况.继续仔细观察图1,输入光强为50 $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 对应的出射脉冲图形,出现了114 fs的延时,但

分裂出了 3 个明显的峰而产生脉冲失真,表明此时由于光强过大致使折射率改变,导致相位变化使脉

冲展宽,因此调制脉冲延时的输入 e 光强度不应高于 $50 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

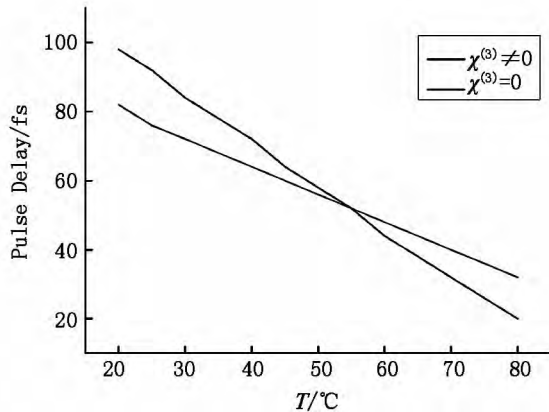


图 4 $\chi^{(3)} = 0$ 时和 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时操作温度 T 与脉冲延迟的关系图

图 4 显示脉冲延迟随着操作温度的增大而减小,这表明能通过调制操作温度来控制脉冲延迟.主要原因是由于温度的升高 e 光与 o 光的折射率差随之减小,造成 2 个脉冲的群速度失配减小,从而造成延迟量的减小.图 5 反映了波矢失配量与脉冲延迟的关系,当温度从 21°C 上升至 80°C 后,由于折射率的变化,造成 Δk 从 $-0.0167 \mu\text{m}^{-1}$ 减小到 $-0.0257 \mu\text{m}^{-1}$,使得脉冲延迟量逐渐增加,在 $\chi^{(3)} = 0$ 时,脉冲延迟从 82 fs 减小至 32 fs ,而在 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时,脉冲延迟从 98 fs 减小至 20 fs . 高的温度

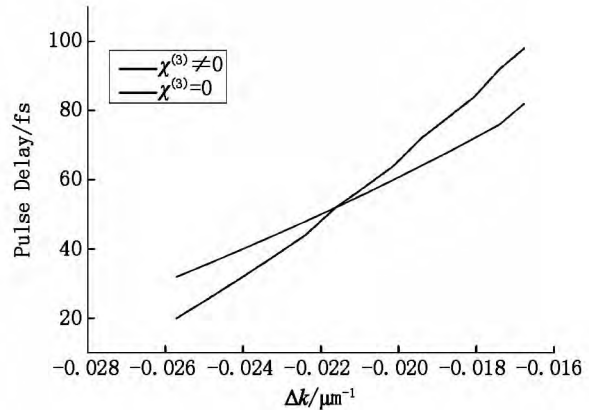
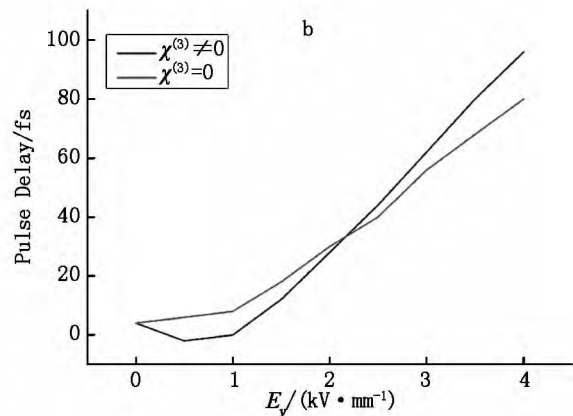
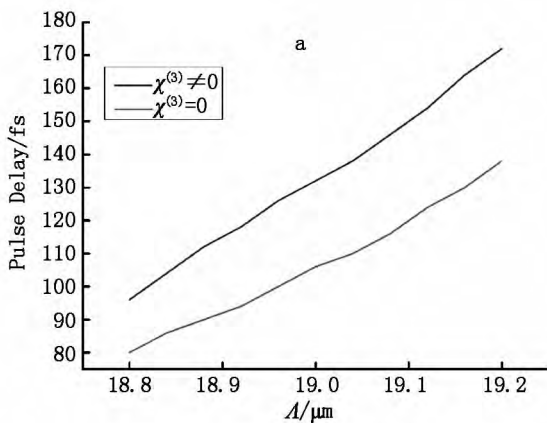


图 5 Δk 对脉冲延迟的影响

使波矢失配距离零值越来越远,导致 e 光同 o 光之间的能量交换减少,因此对脉冲群速度的影响减弱.图 4 ~ 图 5 数据显示 2 种情况相比,在相同温度变化和相同波矢失配变化时 $\chi^{(3)} = 0$ 比 $\chi^{(3)} \neq 0$ 对脉冲延迟的调制范围更小.

在相同情况下分别只改变极化周期 Λ 和横向外加电场 E_y ,得到的变化曲线如图 6 所示.由于极化周期增大,导致波矢失配减小,时间延迟增大,从图 6(a) 能够明显看出 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时比 $\chi^{(3)} = 0$ 时改变极化周期对脉冲延迟的影响值更大,当 Λ 为 $19 \mu\text{m}$



注: $E_y = 4 \text{ kV/mm}$, $T = 21^\circ\text{C}$.

图 6 $\chi^{(3)} = 0$ 时和 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时 (a) 极化周期同脉冲延迟的关系图 (b) 外加电场对脉冲延迟的影响情况

时,在 $\chi^{(3)} \neq 0$ 的情况下获得的时间延迟值为 132 fs ,大于 $\chi^{(3)} = 0$ 时 106 fs 的时间延迟值.相同情况下只改变 E_y ,如图 6(b) 得到 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时与 $\chi^{(3)} = 0$ 时的时间延迟曲线也呈现出递增的情况,因外加电场的增加使 o 光和 e 光速度变化加快,导致群速度减缓,时间延迟增加,因此在外加电场逐渐增加的情况下,3 阶和 2 阶非线性效应共同作用时对时间延迟的调制幅度比仅存在 2 阶非线性时更大.

3 结论

通过数值模拟了一束超短脉冲入射至一个外加电场的 MgO:PPLN 中,讨论了在存在 3 阶非线性效应 ($\chi^{(3)} \neq 0$) 和不存在 3 阶非线性效应 ($\chi^{(3)} = 0$) 的情况下,观察分别改变输入脉冲强度、操作温度、波矢失配、外加电压、极化周期这些因素脉冲延迟的变

化,并将它们进行对比后发现 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时脉冲延时能够随着输入脉冲强度的增加而增加,在 $\chi^{(3)} = 0$ 时改变输入脉冲强度对脉冲延时没有影响;然而,改变温度、波矢失配、极化角以及外加电场这些因素都能够对脉冲延迟起到调制作用,且在 $\chi^{(3)} \neq 0$ 时比 $\chi^{(3)} = 0$ 时对延迟的调制范围更广,因此,同忽略3阶非线性效应且只考虑2阶非线性(即电光效应)用于控制脉冲群速度的情况相比,二者的共同作用能获得更大的调制结果,符合实际情况,具有更加完整的理论指导意义。

4 参考文献

- [1] Boyd R W, Gauthier D J. "Slow" and "Fast" Light [EB/OL]. [2013-11-16]. <http://www.phy.duke.edu/~qelectron/pubs/SFLProgressInOptics.pdf>.
- [2] Stenner M D, Gauthier D J, Neifeld M A. The speed of information in a 'fast-light' optical medium [J]. *Nature*, 2003, 425: 694-698.
- [3] Ku Peicheng, Forrest Sedgwick, Connie J, et al. Slow light in semiconductor quantum wells [J]. *Opt Lett*, 2004, 29: 2290-2293.
- [4] 杨凡. 浅谈慢光技术研究现状 [J]. *绵阳师范学院学报*, 2012, 31(5): 32.
- [5] 陈译联. 基于CPO的慢光技术研究及其进展 [J]. *大众科技*, 2011(3): 39-41.
- [6] 李文博. 基于EIT效应的慢光波混频及慢光时空孤子 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [7] Mcmillan J F, Yu M B, Kwong D L, et al. Observation of four-wave mixing in slow-light silicon photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2010, 18(15): 15484.
- [8] 侯尚林, 孔谦, 黎锁平, 等. 光子晶体光纤中基于SBS实线慢光的数值模拟 [J]. *兰州理工大学学报*, 2012, 38(3): 90-93.
- [9] Lu Wenjie, Chen Yuping, Miu Lihong, et al. All-optical tunable group-velocity control of femtosecond pulse by quadratic nonlinear cascading interactions [J]. *Opt Soc Am*, 2008, 16(1): 356-360.
- [10] 桑明皇, 周行, 戴海浪. Laplace方程的Green函数解法的研究 [J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(5): 479-481.

A Simulation of Pulse Delay of Femtosecond Pulse Passing through in MgO: PPLN by Employing the Cubic Nonlinearity

JIANG Bei¹, NIE Yi-you^{1,2*}

(1. College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China;

2. Key Laboratory of Photo Electronic & Telecommunication of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: Cubic nonlinearity has been included and introduced into the study on the group velocity control of ultra-short pulse based on the electro-optic effect. The simulation, as changing several influential impacts such as input intensity, operating temperature, wave vector mismatching, poling period, and transverse DC electric field, shows that the modulation effect on the group velocity of ultrashort pulse passing through in the MgO: PPLN by means of the combination of quadratic and cubic nonlinearity is greater than the one solely controlled by quadratic effect. The employment of cubic nonlinearity takes a further step to perfect the theoretical guiding significance of scheme for slow light realized in bulk crystal.

Key words: cubic nonlinearity; electro-optic effect; pulse delay; MgO: PPLN

(责任编辑: 冉小晓)