

文章编号: 0258-7025(2001)11-0981-04

任意偏振态极短光脉冲在各向同性 介质中的非线性传输

刘宏利¹ 杨少辰¹ 于光辉² 赵中龄¹

(北方交通大学¹ 理学院应用技术研究, ² 光电子技术研究所 北京 100044)

摘要 只有几个光振荡周期长的飞秒脉冲不能采用传统的慢变包络方法描述, 这样的极短光脉冲可以用单向波近似将电场的波动方程简化后结合物质方程给出封闭的电场的传输方程。用如上方法给出了新的具有任意偏振态的极短光脉冲在各向同性介质中的传输方程, 并用数值方法研究了脉冲两个偏振分量间的相互作用。

关键词 极短光脉冲, 任意偏振态, 脉冲自作用

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Nonlinear Propagation of Extremely Short Optical Pulses with Arbitrary State of Polarization in Isotropic Medium

LIU Hong-li¹ YANG Sao-chen¹ YU Guang-hui² ZHAO Zhong-ling¹

(¹ Institute of Applied Technology of Science School, ² Institute of

Optoelectronics Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract The traditional slowly varying envelope method can't be used for propagation of femtosecond pulse with duration of several optical oscillation periods. By simplifying the electric field's wave equation with unidirectional wave approximation and incorporating the material equation the propagation equation of electric field of such extremely short optical pulse can be attained. With this method the new propagation equation of extremely short optical pulse with arbitrary polarization state in isotropic medium has been presented. The interaction between two polarization parts has also been studied numerically.

Key words extremely short optical pulses, arbitrary state of polarization, self-action of pulses

1 引言

超短激光脉冲产生技术的进步使人们获得了只有几个光振荡周期长的飞秒脉冲^[1,2], 并推动了相应的光脉冲传输理论的发展。飞秒脉冲的光谱宽度已经和光谱中心频率相当, 不能采用传统的慢变包络近似(SVEA), 相应地也不能使用在此基础上得到的广延的非线性薛定谔方程^[3](GNLSE), 这样的脉冲称之为极短光脉冲^[4,5]。此方向近十年来一直是人们研究的热点, 由于不能再采用慢变包络方法, 文献[6,7]对麦克斯韦方程组和物质方程直接用有限差分方法处理, 获得了极短光脉冲的孤子解。为了获得解析结果, 在发表的大量文献中多选用二能

级的介质模型^[8,9], 但在二能级模型中唯一的非线性机制是激发态和基态布居数的变化, 相应地只能得到 $n_2 < 0$ (n_2 是非线性折射率系数) 的结果, 注意到固体介质的 $n_2 > 0$, 所以这种方法只适合描写气体介质和某些液体。

文献[4,10]用三能级模型描写介质的各种非线性机制, 给出了各向同性固体介质的物质方程, 获得 $n_2 > 0$ 的结果且理论和实验符合得很好。文献[4]利用非共振条件对物质方程进行了简化, 结合单向波近似给出了封闭的极短光脉冲的传输方程。

文献[11]用经典 Duffing 模型给出具有任意偏振态的极短光脉冲的传输方程, 但 Duffing 模型给出的 n_2 的表达式和量子理论给出的结果不一致^[12]。所以本文从三能级的介质模型给出的非线性极化强度的表达式出发, 结合单向波近似建立了

新的具有任意偏振态的极短光脉冲在各向同性介质中的传输方程。该方程表现为脉冲电场两个偏振分量耦合的方程组,为了进一步考察极短光脉冲的自作用(包括脉冲同一偏振分量的自作用和两偏振分量间的相互作用)对耦合方程进行了数值解。

2 传输方程

由麦克斯韦方程组得到脉冲电场的两偏振分量满足的波动方程为

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_x}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_y}{\partial t^2} \quad (2)$$

P_x, P_y 为电极化强度的不同偏振分量。用单向波近似可以将方程(1), (2)降阶^[4,13]

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} + \frac{n_0}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{\mu_0 c}{2n_0} \frac{\partial P_{1x}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} + \frac{n_0}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{\mu_0 c}{2n_0} \frac{\partial P_{1y}}{\partial t} \quad (4)$$

式中, $P_{x,y}(t) = P_{0x,0y}(t) + P_{1x,1y}(t)$, $P_{0x,0y} = \alpha E_{x,y}$, $n_0 = (1 + \alpha/\epsilon_0)^{1/2}$, P_0 为静态线性极化强度, P_1 描写非线性极化强度和线性极化强度的色散。 n_0 为低频折射率。选用三能级模型描写介质的非线性机制,在非共振和忽略非线性延迟效应的条件下,得到 P_{1x}, P_{1y} 满足的物质方程^[4]

$$P_{1x} = \frac{2n_0}{\mu_0 c} \left(-a \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} + b \int_{-\infty}^t dt' \int_{-\infty}^{t'} E_x dt'' + \frac{1}{3} g E_x^3 + \frac{1}{3} g E_x^2 E_y \right) \quad (5)$$

$$P_{1y} = \frac{2n_0}{\mu_0 c} \left(-a \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + b \int_{-\infty}^t dt' \int_{-\infty}^{t'} E_y dt'' + \frac{1}{3} g E_y^3 + \frac{1}{3} g E_x^2 E_y \right) \quad (6)$$

将(5), (6)式代入方程(3), (4)得

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E_x}{\partial \tau^3} + b \int_{-\infty}^{\tau} E_x d\tau' + g E_x^2 \frac{\partial E_x}{\partial \tau} + \frac{1}{3} g E_y^2 \frac{\partial E_x}{\partial \tau} + \frac{2}{3} g E_x E_y \frac{\partial E_y}{\partial \tau} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E_y}{\partial \tau^3} + b \int_{-\infty}^{\tau} E_y d\tau' + g E_y^2 \frac{\partial E_y}{\partial \tau} + \frac{1}{3} g E_x^2 \frac{\partial E_y}{\partial \tau} + \frac{2}{3} g E_x E_y \frac{\partial E_x}{\partial \tau} = 0 \quad (8)$$

(7), (8)式选用了延时系, $\tau = t - n_0 z/c$, 对于熔石英, 其中的常数为: $a = 2.889 \times 10^{-22} \text{ s}^3 \text{ m}^{-1}$, $b =$

$$3.661 \times 10^{19} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}, g = 2.133 \times 10^{-28} \text{ msW}^{-1}.$$

耦合方程(7), (8)是描述具有任意偏振态的极短光脉冲在各向同性介质中非线性传输的基本方程。它们左边第二项和第三项分别表示来源于电子和离子(原子核)的正常和反常群速度色散,第四项对应于自相位调制(SPM)和自陡峭效应,最后两项反映极短光脉冲两偏振分量间的相互作用。方程(7), (8)的推导忽略了非线性延迟效应。文献[4, 10]指出,对于只包含几个光振荡周期的极短光脉冲,非线性延迟效应被“冻结”,这样作为一级近似该项被忽略。对于线偏振脉冲(不妨假定沿 x 方向偏振)的情况,方程(7)的第五和第六项为零,得到和文献[3]相一致的方程。

因为三能级模型给出的 n_2 的表达式和实验结果高度一致^[4],所以本文在该模型基础上建立的具有任意偏振态的极短光脉冲的传输方程和文献[5]以及[1]在唯象 Duffing 模型基础上给出的传输方程相比较,更准确反映了极短光脉冲在各向同性介质中传输的实际情况。

耦合方程(7), (8)适合描写仅有几个光学周期宽度的飞秒脉冲两偏振分量的演化,这两个耦合方程同样适用脉宽较宽的情况。在脉宽较宽时,可采用慢变包络近似

$$\vec{E}(\vec{r}, \tau) = \frac{1}{2} [\hat{x} A_x(z, \tau) \exp(i\beta_x z - i\omega_0 \tau) + \hat{y} A_y(z, \tau) \exp(i\beta_y z - i\omega_0 \tau)] + C.C. \quad (9)$$

将(9)代入(7), (8)中,可以得到和文献[3]一致的耦合方程,由此得出,本文采用模型得到的耦合方程是慢变包络近似下耦合方程的推广。

3 数值解和分析

非线性偏微分方程组(7), (8)在一般条件下是难以解析求解的,所以下面选用分步傅里叶变换法^[5]进行数值解,考虑具有椭圆偏振态的双曲正弦入射脉冲

$$E_x(0, \tau) = E_{x0} \text{sech}(\tau/\tau_0) \cos(\omega_0 \tau)$$

$$E_y(0, \tau) = E_{y0} \text{sech}(\tau/\tau_0) \sin(\omega_0 \tau)$$

选用如下参数进行数值解:

$$2\tau_0 = 6 \text{ fs}, \omega_0 = 1.216 \times 10^{15} \text{ rad/s} (\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}), E_{x0} = 1.0 \times 10^{10} \text{ V/m}, E_{y0} = 8.0 \times 10^9 \text{ V/m}, n_0 = 1.45.$$

图1(a), (b)分别为极短光脉冲电场的 x 和 y

分量的演化。可以看出,在脉冲传输的最初阶段,因为非线性较强,群速色散效应可忽略,同一偏振分量的SPM和自陡峭效应以及两偏振分量间的非线性相互作用是影响脉冲传输的主要因素。因为 $E_x > E_y$, E_x 的自作用大于 E_y 对 E_x 的相互作用,所以图1(a)中 E_x 脉冲包络的后沿的变化主要是 E_x 自作用引起的。与此相反, E_x 对 E_y 的相互作用大于 E_y 自作用,两偏振分量间的相互作用是影响 E_y 传输的主要因

素。与图1(a)相比,图1(b)中脉冲包络的后沿发生更显著的变化,出现更高频率的振荡。图2给出 E_y 在 $z=0$ 和 $80\mu\text{m}$ 处的频谱,可以看出 E_y 的自作用特别是 E_x 对 E_y 相互作用使脉冲频谱展宽,展宽的频谱覆盖了从红外到紫外的全部光谱范围。另外,由图1(b),图2图形面积变化可以看出, E_y 的能量在增加,说明脉冲的能量由 E_x 向 E_y 转移。

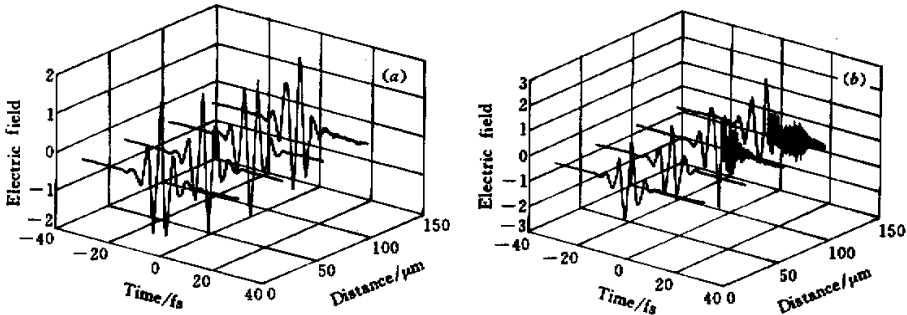


图1 脉冲电场的演化

(a) x 方向;(b) y 方向

Fig.1 Evolution of pulse electric field

(a) along x ; (b) along y

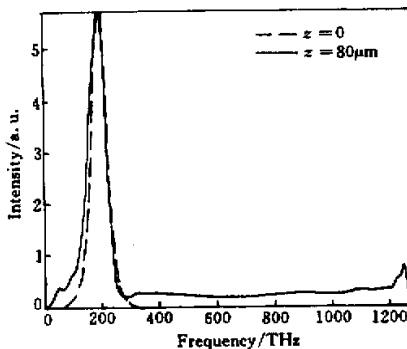


图2 在 $z=0, 80\mu\text{m}$ 处脉冲的频谱

Fig.2 Spectra of pulses of $z=0, 80\mu\text{m}$, respectively

文献[14]的实验给出了不同偏振分量间的交叉相位调制(XPM)效应引起的不对称光谱展宽,和本文的数值结果基本一致,不过飞秒脉冲两偏振分量的XPM有其新的特征。XPM效应使脉冲的弱偏振分量发生光谱超展宽,得到白光连续谱。文献[1]进行的光纤压缩实验得到 5fs 的极短光脉冲,光谱超展宽主要利用的是SPM效应。本文给出的耦合方程的数值结果表明,同一极短光脉冲不同偏振分

量间的XPM同样可以使脉冲产生光谱超展宽,获得白光连续谱,对于飞秒强光脉冲,这方面的实验还未见报道。

4 结论

由三能级模型给出的物质方程允许描写固体介质的各种非线性机制。将在非共振近似和忽略非线性延迟效应条件下得到的极化强度的表达式代入利用单向波近似降阶后的电场的波动方程,可以得到极短光脉冲两偏振分量演化的耦合方程组。该耦合方程组允许描写极短光脉冲同一偏振分量的自作用和不同偏振分量间的相互作用以及非线性双折射效应。其中脉冲不同偏振分量间的相互作用使能量在脉冲电场的不同偏振分量间转移,并使脉冲包络后沿出现更高频的振荡,相应地在频域出现脉冲频谱超展宽,其超宽带频谱已扩展到了可见光和紫外区。

最后应当指出,本文考虑的是极短光脉冲在横向均匀介质中的传输,若考虑极短光脉冲在波导(光纤)中的传输,耦合方程组(7),(8)应适当改写,其中的系数 a, b, g 将依赖于电场的横向结构。

参 考 文 献

- 1 A. Baltuška, Z. Wei, M. S. Pshenichnikov *et al.*. Optical pulse compression to 5 fs at a 1-MHz repetition rate. *Opt. Lett.*, 1997, 22(2):102~104
- 2 S. Sartania, Z. Cheng, M. Lenzner *et al.*. Generation of 0.1-TW 5-fs optical pulses at a 1-kHz repetition rate. *Opt. Lett.*, 1997, 22(20):1562~1564
- 3 G. P. Agrwal. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 1995. 43~46, 50~54
- 4 S. A. Kozlov, S. V. Sazonov. Nonlinear propagation of pulse with duration of several optical oscillation periods in a medium. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1997, 111(2):404~418
- 5 A. I. Maimistov. Some models of propagation of extremely short electromagnetic pulses in a nonlinear medium. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, 36(4): 287~304
- 6 P. M. Goorjian, A. Taflove. Direct time integration of Maxwell's equations in nonlinear dispersive media for propagation and scattering of femtosecond electromagnetic solitons. *Opt. Lett.*, 1992, 17(3):180~182
- 7 V. N. Serkin, E. M. Schmidt, T. L. Belyeva *et al.*. Femtosecond Maxwell's solitons: Part I. Modeling of Maxwell's solitons dynamics on personal computer. *Quantum Electron.*, 1997, 24(10): 923 ~ 928 (in Russia)
- 8 L. W. Casperson. Few-cycle pulses in two-level media. *Phys. Rev. A*, 1998, 57(1):609~621
- 9 S. V. Sazonov, L. S. Yakupova. Non-linear video pulse in two-level σ -transition medium. *J. Phys. B*, 1994, 27(2):369~375
- 10 A. N. Azarenkov, G. B. Altshuler, N. R. Belashenkov *et al.*. Nonlinearity of refractive index of laser dielectric solids. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29(8):733 ~ 757 (in Russia)
- 11 A. I. Maimistov. Propagation of an ultrashort pulse of polarized radiation in nonlinear medium Duffing's vector model. *Optics and Spectroscopy*, 1999, 87(1):104~108
- 12 S. A. Kozlov. On the classical theory of dispersion of high-intensity light. *Optics and Spectroscopy*, 1995, 79(2):290~292
- 13 A. A. Akopyan, D. L. Oganesyan. Propagation of a femtosecond laser pulse with duration of several oscillation periods in a medium with a quadratic nonlinearity. *Quantum Electron.*, 1998, 25(10): 954 ~ 956 (in Russia)
- 14 M. N. Islam, L. F. Mollenauer, R. H. Stolen *et al.*. Cross-phase modulation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1987, 12(8):625~627