

# 相干耦合效应对光克尔脉冲净化器输出特性影响

邓 颖 王建军\* 林宏奂 张 锐 许党朋 李 晶 朱 娜

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 对光克尔脉冲净化器中,不同双折射度光纤中相干耦合效应对光克尔脉冲净化器透射率以及输出脉冲的时间波形、光谱以及脉冲自身透射率等特性进行了模拟分析。结果表明:高双折射光纤中,两偏振光的相干耦合效应影响可以忽略;普通单模光纤中两偏振光的相干耦合导致透射率幅值变化在 $\pm 1\%$ 左右;低双折射光纤中相干耦合效应影响较大,且相干耦合效应对输出脉冲时间波形与光谱以及脉冲自身透射率曲线都有一定影响。

**关键词** 光纤光学;脉冲净化;光克尔效应;相干耦合;模式双折射

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100310

## Analysis of Coherent Coupling Effect for Optical Kerr Pulse Cleaner

Deng Ying Wang Jianjun Lin Honghuan Zhang Rui Xu Dangpeng Li Jing Zhu Na

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In optical Kerr pulse cleaner, the used fibers with different mode birefringence degrees can produce different coherent coupling degrees at the two polarization light. Different coherent coupling degrees will affect the output of the optical Kerr pulse cleaner. The pulse, spectrum, transmissivity of pulse itself and system with different mode birefringence degrees are simulated. For high birefringence fiber, the coherent coupling effect at the two polarization light can be neglected. For common single mode fiber with medium birefringence degree, the change of pulse's transmissivity is about  $\pm 1\%$ . But for low birefringence fiber, the infection of the coherent coupling is much higher, and the coherent coupling affect also has much higher infection for the temporal and spectral shape and the transmissivity of the pulse itself.

**Key words** fiber optics; pulse cleaner; optical Kerr effect; coherent coupling; mode birefringence

**OCIS codes** 060.2420; 190.4370; 320.5540

## 1 引 言

与固体激光器相比,光纤激光器因其拥有更高的转换效率,更小的热光效应,高可靠性,高稳定性,低运行成本,结构紧凑,易实现小型化与全固化等优点,因此用于强场物理实验等的高能拍瓦激光装置将采用全光纤的前端系统<sup>[1]</sup>。强场物理实验要求高功率密度激光输出的同时,还对激光脉冲的质量提出了非常严格的要求,要求在激光主脉冲到达前相当长的时间范围内,激光脉冲必须保持非常“干净”(高信噪比)而不会造成由于靶面的预电离所导致的靶物质破坏,而激光脉冲本身更不能有较高的基座。

而全光纤前端系统由于多级放大引起较高的放大自发辐射(ASE)基座,信噪比较低,因此必须采取措施提高全光纤前端系统的信噪比,以发挥其在高能拍瓦激光等装置前端系统中的全固化、体积小、可靠性高、能长时间稳定运行的优势。利用滤波器结合时间快门、非线性光纤环镜、光孤子等方法都可以提高光纤系统的信噪比,但受器件损伤阈值等的限制不适合高功率情况。而利用光纤中光克尔效应来提高脉冲的信噪比,是一种简单而有效的方法,广泛用于提高压缩脉冲的信噪比,并取得一定成效<sup>[1~4]</sup>。在理论分析方面,主要从耦合模方程出发,但大多分析

收稿日期: 2011-02-23; 收到修改稿日期: 2011-04-12

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(9140C6803010905)和国家自然科学基金(60878058)资助课题。

作者简介: 邓 颖(1981—),女,助理研究员,主要从事光波导激光技术方面的研究。E-mail: tjudengying@sina.com.cn

\* 通信联系人。E-mail: wjjcaep@126.com

中忽略相干耦合效应的影响。实际上,相干耦合效应的存在对光克尔脉冲净化器的效率等输出特性有较大影响。本文主要从相干耦合项的来源出发,分析其对光克尔脉冲净化器输出特性的影响。

## 2 光克尔脉冲净化器的理论模型及相干耦合项来源

### 2.1 光克尔脉冲净化器原理

光克尔效应指的是在强光场作用下,非线性晶体表现出双折射现象。强脉冲引起非线性偏振旋转<sup>[5~8]</sup>,响应时间 2~4 fs,当脉冲通过光纤和检偏器时,其透射率与强度有关,使脉冲中心较强部分通过,而脉冲的低强度基座被阻挡,从而达到提高信噪

比的目的<sup>[3]</sup>。光克尔脉冲净化器主要由一对垂直放置的起偏与检偏器、一个用于改变注入线偏振光的偏振方向的 $\lambda/2$ 波片和一段用于发生光克尔效应的光纤组成,如图 1 所示。光脉冲经过起偏器 P1 后输出线偏振光,再经 $\lambda/2$ 波片以与光纤一个主轴成 $\theta$ 角入射,通过控制光纤的长度、注入光功率以及 $\theta$ 角,使线偏振光脉冲的高强度部分发生非线性偏振旋转,而低强度的基座没有非线性偏振旋转。然后再经一个与起偏器垂直放置的偏振片 P2,使偏振方向未发生旋转的基座被检偏器抑制而偏振方向发生旋转的脉冲高强度部分高透,从而达到提高脉冲信噪比的目的。

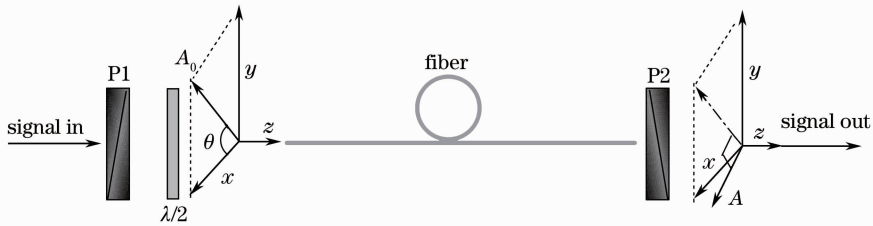


图 1 光克尔脉冲净化器原理图

Fig. 1 Pulse cleaner based on optical Kerr effect

### 2.2 超短脉冲传输理论模型

假定非线性效应对光纤模式无显著影响,描述两偏振分量沿光纤变化的耦合模方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_x = i\gamma |A_x|^2 A_x + \frac{2i\gamma}{3} |A_y|^2 A_x + \frac{i\gamma}{3} A_x^* A_y^2 \exp(-2i\Delta\beta z) \\ \frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_{1y} \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A_y = i\gamma |A_y|^2 A_y + \frac{2i\gamma}{3} |A_x|^2 A_y + \frac{i\gamma}{3} A_y^* A_x^2 \exp(2i\Delta\beta z) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $A_j(z, t)$ 是慢变振幅, $\beta_{0j}$ 是相应传播常数, $j = x, y$ 分别表示 $x, y$ 方向偏振; $\Delta\beta = \beta_{0x} - \beta_{0y}$ ; $\beta_{1j}$ 为模群速度倒数; $\beta_2$ 为色散系数; $\gamma$ 为光纤的非线性系数; $\alpha$ 为光纤的损耗系数。

### 2.3 相干耦合项来源

耦合模方程中[即(1)式]最后一项,即是相干耦合项,来源于强激光束在光纤中传输时两偏振分量间的相干耦合,也称作简并四波混频项,与光纤的模式双折射有关。

理想情况下,单模光纤能够维持沿两正交方向偏振的简并模,因而虽是单模光纤也并非真正的单模。在光纤的形状为严格的圆柱形、材料为各向同性的理想条件下, $x$ 方向偏振态的模式不会与正交的 $y$ 方向偏振态的模式耦合。然而,由于其实际形状略偏离圆柱形以及材料各向异性的微小起伏,破坏了模式简并,导致了两个偏振态的混合。在数学上,模

传输常数 $\beta$ 对于 $x, y$ 方向偏振模稍有不同,光纤的这个性质称为模式双折射。模式双折射度 $B_m$ 定义为两个正交偏振态的有效折射率差,即 $B_m = n_x - n_y$ , $n_x, n_y$ 是两个正交偏振态的有效折射率。一般单模光纤 $B_m$ 值在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 之间, $B_m < 10^{-6}$ 称为低双折射光纤, $B_m > 10^{-5}$ 为高双折射光纤<sup>[9]</sup>。

## 3 相干耦合效应的影响分析

以光纤长度 $L = 10$  m,光纤非线性系数 $2 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ ,脉冲半峰全宽 5 ps,脉冲峰值功率 630 W,中心波长 1053 nm 为例,计算不同的模式双折射度 $B_m$ 对光克尔脉冲净化器输出特性影响。由于石英光纤的色散系数为 $17.2 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,对于 10 m 长光纤,色散导致的展宽量不到 1 fs,因此忽略色散的影响;并且忽略群速度走离效应。

### 3.1 高双折射光纤情况下相干耦合效应影响

取模式双折射度  $B_m = 1 \times 10^{-4}$ ，注入脉冲线偏振方向与光纤慢轴夹角  $35^\circ$ 。图 2(a)和(b)给出了时间波形及光谱变化，时间波形出现窄化，光谱被展宽；图 2(c)和(d)给出了  $x$  方向与  $y$  方向偏振光强度变化，可以看到两个偏振方向强度基本不变，这说明两偏振方向的相干耦合效应为零；图 2(e)给出了脉冲自身的透射率曲线，脉冲峰值透射率达 85% 以

上；图 2(f)给出了光克尔脉冲净化器整体透射率，其中内插图透射率细节，可以看到透射率曲线存在微弱的振荡，主要由两偏振光之间的相干耦合引起，但由于高双折射光纤的相干长度较短 ( $B_m = 1 \times 10^{-4}$ ，对应偏振拍长为 1 cm)，相干耦合项导致两偏振光在光传输过程中来回微弱耦合，可以忽略。

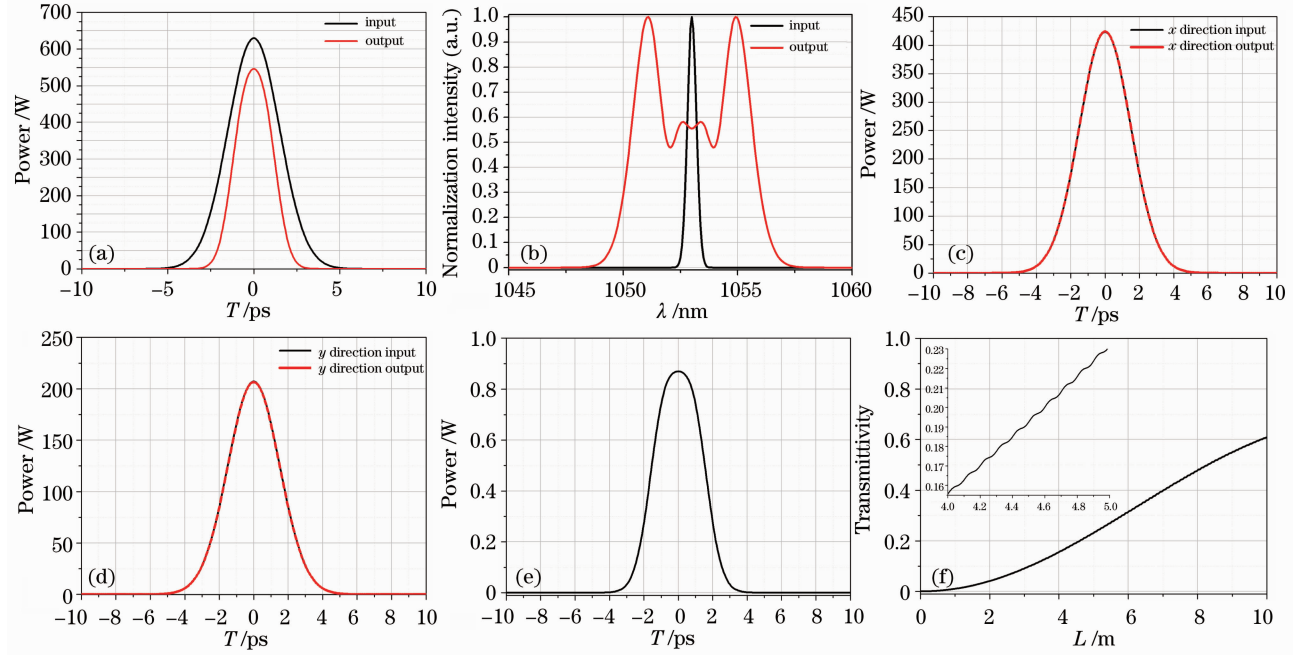


图 2 (a)输入输出脉冲时间波形,(b)输入输出脉冲光谱,(c) $x$ 方向偏振光强度变化,(d) $y$ 方向偏振光强度变化,(e)脉冲自身透射率,(f)系统透射率(插图透射率曲线细节)

Fig. 2 (a) Input and output pulses, (b) spectra of input and output pulses, (c) pulse intensity change of  $x$  direction, (d) pulse intensity change of  $y$  direction, (e) transmissivity of pulse itself, (f) transmissivity of system (insert figure gives the detail)

### 3.2 普通单模光纤中相干耦合效应影响

取模式双折射度  $B_m = 1 \times 10^{-6}$ ，注入脉冲线偏振方向与光纤慢轴夹角  $35^\circ$ 。图 3(a)和(b)给出了时间波形及光谱变化，时间波形依然出现窄化，光谱也被展宽；图 3(c)和(d)给出了  $x$  方向与  $y$  方向偏振光强度变化，可以看到两个偏振方向发生了明显的相干耦合， $y$  方向部分能量耦合到  $x$  方向；图 3(e)给出了脉冲自身的透射率曲线，脉冲峰值透射率出现回落，主要受入射光偏振方向影响；图 3(f)给出了光克尔脉冲净化器整体透射率，可以看到透射率曲线呈明显的振荡周期，主要由两偏振光之间的相干耦合引起，由于偏振拍长约 10 m，因此两偏振光之间的相干耦合作用变得明显，但透射率幅值变化在  $\pm 1\%$  左右。

### 3.3 低双折射光纤中相干耦合效应影响

取模式双折射度  $B_m = 1 \times 10^{-7}$ ，注入脉冲线偏振方向与光纤慢轴夹角  $45^\circ$  (实际上注入脉冲线偏振方向对脉冲输出特性也有影响，仅取脉冲透射率接近最高点时的角度， $B_m = 1 \times 10^{-9}$  情况亦同)。图 4(a)和(b)给出了时间波形及光谱变化，时间波形窄化严重，且光谱上自相位调制周期变小；图 4(c)和(d)给出了  $x$  方向与  $y$  方向偏振光强度变化，可以看到两个偏振方向发生了较强的相干耦合， $y$  方向很大部分能量耦合到  $x$  方向；图 4(e)给出了脉冲自身的透射率曲线，峰值透射率在 90% 以上；图 4(f)给出了光克尔脉冲净化器整体透射率，可以看到透射率曲线呈较大的振荡周期，由于偏振拍长约 100 m，因此两偏振光之间的相干耦合作用对透射率影响很大。

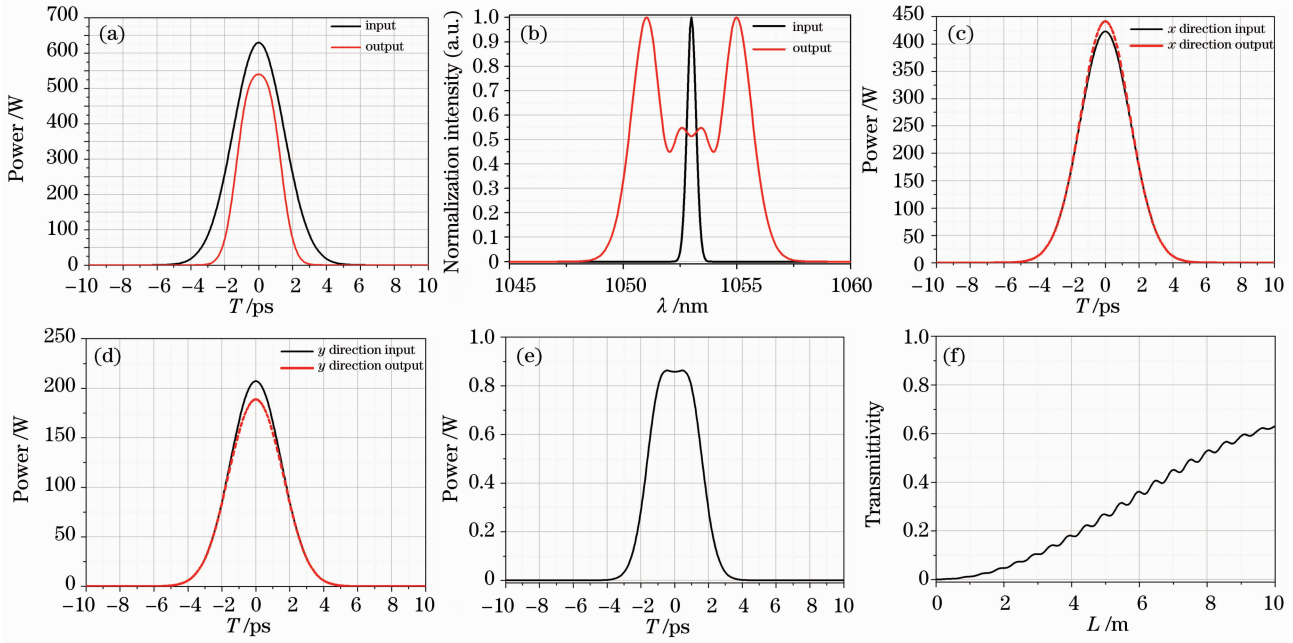


图 3 (a)输入输出脉冲时间波形,(b)输入输出脉冲光谱,(c) $x$ 方向偏振光强度变化,(d) $y$ 方向偏振光强度变化,  
(e)脉冲自身透射率,(f)系统透射

Fig. 3 (a) Input and output pulses, (b) spectra of input and output pulses, (c) pulse intensity change of  $x$  direction,  
(d) pulse intensity change of  $y$  direction, (e) transmissivity of pulse itself, (f) transmissivity of system

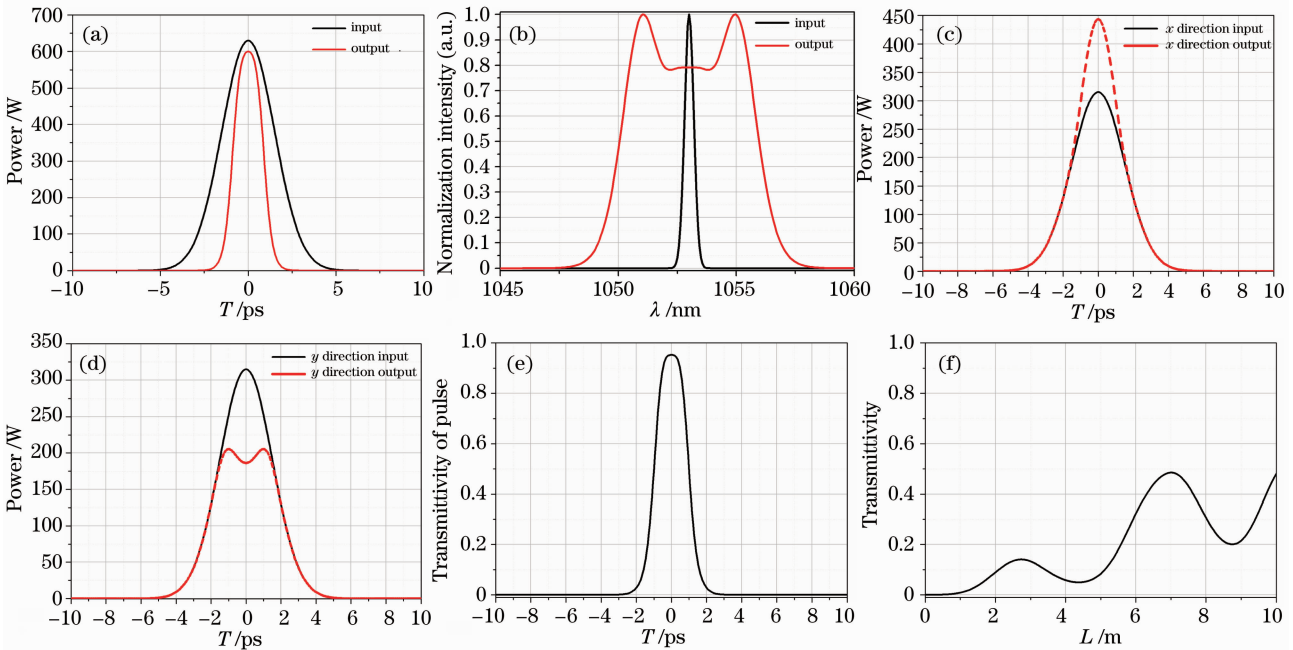


图 4 (a)输入输出脉冲时间波形,(b)输入输出脉冲光谱,(c) $x$ 方向偏振光强度变化,(d) $y$ 方向偏振光强度变化,  
(e)脉冲自身透射率,(f)系统透射率

Fig. 4 (a) Input and output pulses, (b) spectra of input and output pulses, (c) pulse intensity change of  $x$  direction,  
(d) pulse intensity change of  $y$  direction, (e) transmissivity of pulse itself, (f) transmissivity of system

如果取模式双折射度  $B_m = 1 \times 10^{-9}$ , 注入脉冲线偏振方向与光纤慢轴夹角  $32^\circ$ , 则相干耦合情况又发生变化。图 5(a)和(b)给出了时间波形及光谱变化;图 5(c)和(d)给出了  $x$  方向与  $y$  方向偏振光

强度变化,可以看到两个偏振方向也发生明显的相干耦合;图 5(e)给出了脉冲自身的透射率曲线,峰值透射率不到 70%;图 5(f)给出了光克尔脉冲净化器整体透射率,可以看到透射率曲线没有振荡周期,

这是因为偏振拍长约 1000 m，而光纤长度仅为 10 m，而振荡周期大于光纤长度。

将不同双折射度下，输出脉冲的时间波形、光谱形状、脉冲自身透射率以及系统整体透射率进行比

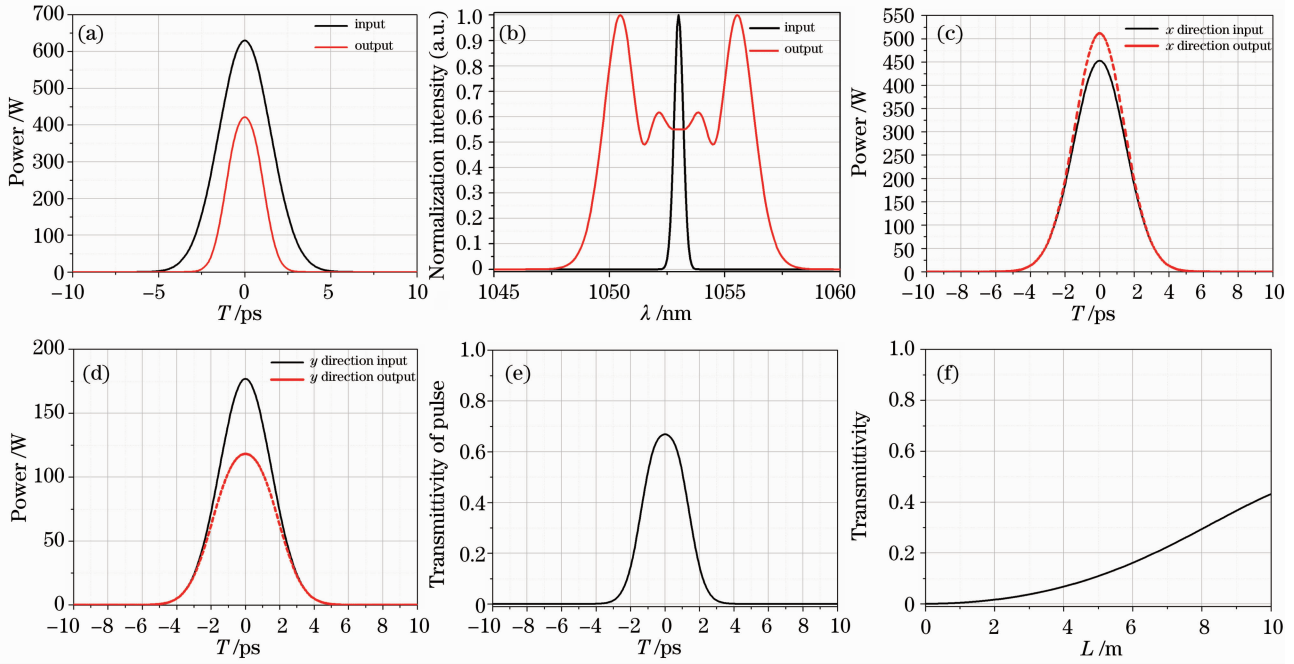


图 5 (a)输入输出脉冲时间波形,(b)输入输出脉冲光谱,(c)x 方向偏振光强度变化,(d)y 方向偏振光强度变化, (e)脉冲自身透射率,(f)系统透射率

Fig. 5 (a) Input and output pulses, (b) spectra of input and output pulses, (c) pulse intensity change of x direction, (d) pulse intensity change of y direction, (e) transmissivity of pulse itself, (f) transmissivity of system

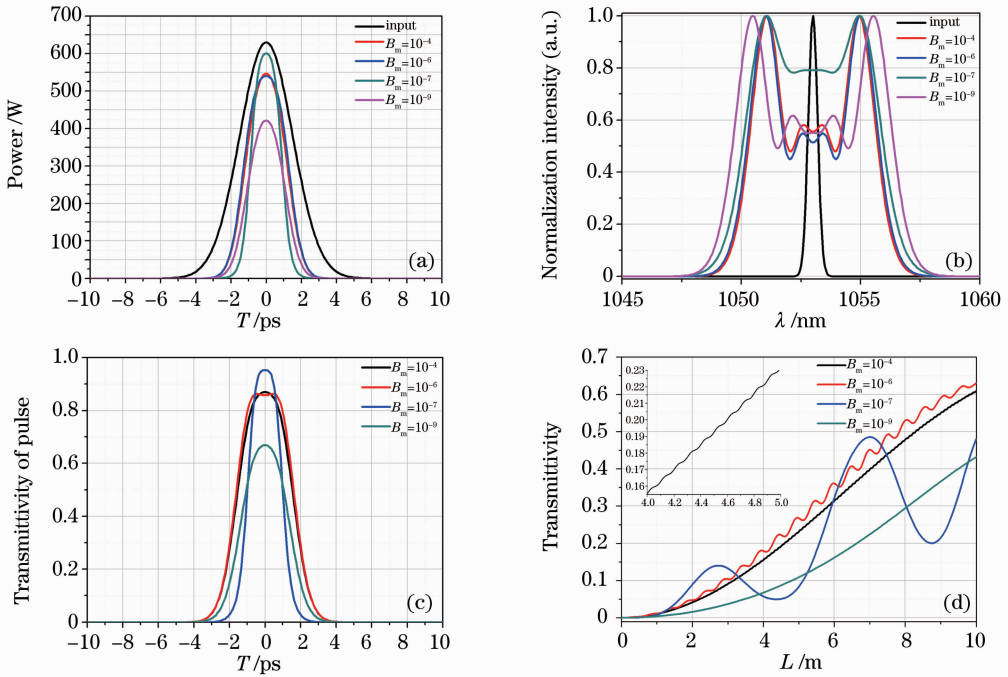


图 6 (a)不同双折射度光纤输出脉冲波形,(b)不同双折射度光纤输出脉冲光谱,(c)不同双折射度光纤脉冲自身透射率, (d)不同双折射度光纤的透射率

Fig. 6 (a) Output pulse with different degree mode birefringence degrees, (b) spectra of output pulses with different mode birefringence degrees, (c) transmissivity of pulse itself with different mode birefringence degrees, (d) transmissivity of system with different mode birefringence degrees

较,分别见图 6(a)~(d)。从图中可以看到,高双折射光纤下,两偏振光的相干耦合效应影响可以忽略;普通单模光纤中两偏振光的相干耦合较明显,但透射率幅值变化在 $\pm 1\%$ 左右;低双折射光纤中相干耦合效应影响明显,且相干耦合效应对输出脉冲时间波形与光谱以及脉冲自身透射率曲线都有一定影响,双折射度越低,光谱展宽越大,但输出脉冲形状以及脉冲自身透射率曲线受双折射度、光纤长度及脉冲入射角度与功率的综合影响,当参数选取合适时,脉冲自身透射率可以达到 90% 以上。

## 4 结 论

综上所述,高双折射光纤下,两偏振光的相干耦合效应影响可以忽略;普通单模光纤中两偏振光的相干耦合较明显,但透射率幅值变化在 $\pm 1\%$ 左右;低双折射光纤中相干耦合效应影响明显,且相干耦合效应对输出脉冲时间波形与光谱以及脉冲自身透射率曲线都有一定影响,双折射度越低,光谱展宽越大,但输出脉冲形状以及脉冲自身透射率曲线受双折射度、光纤长度及脉冲入射角度与功率的综合影响,当参数选取合适时,脉冲自身透射率可以达到 90% 以上。

## 参 考 文 献

1 Andrew J. W. Brown, Johan Nilsson, Donald J. Harter. High energy, short pulse fiber laser front end for kilo-Joule class CPA

systems[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 610214

2 B. Nikolaus, D. Grisckowshy, A. C. Balant. Optical pulse reshaping based on the nonlinear birefringence of single-mode optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(3): 189~191

3 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. (3rd ed) Calif.: Academic Press, 2001

4 Deng Ying, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. Analysis of the temporal and spectral characteristics of output pulse for an optical pulse cleaner under different initial pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105001

邓颖, 王建军, 林宏奂等. 初始脉冲对光克尔脉冲净化器时谱特性影响分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105001

5 Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqiang *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 648~652

张祖兴, 桑明煌, 叶志清等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 648~652

6 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu. Study on generation of the multiwavelength laser using the symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 787~791

田佳俊, 姚勇, 孙云旭. 利用对称非线性光纤环镜产生多波长激光的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 787~791

7 Xu Huiwen, Yang Hua, Wen Shuangchun. Tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2272~2276

徐慧文, 杨华, 文双春. 基于非线性偏振旋转的可调谐多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2272~2276

8 Zhao Yu, Liu Yongzhi, Zhao Deshuang. Study on side bands in passively mode-locked fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 991~995

赵羽, 刘永智, 赵德双. 被动锁模光纤激光器光谱边带[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 991~995

9 Liao Yanbiao. *Fibers Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004

廖延彪. *光纤光学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004