

直接相位调制产生周期性线性啁啾脉冲特性研究*

田小程¹⁾²⁾ 隋展^{1)†} 黄志华¹⁾³⁾ 林宏奂¹⁾ 王建军¹⁾ 张锐¹⁾
许党朋¹⁾ 张永亮¹⁾ 朱娜¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

3) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2012年12月10日收到; 2013年1月28日收到修改稿)

提出一种利用周期性抛物线调制信号对光脉冲进行相位调制以获得周期性线性啁啾脉冲的方法, 并对其进行了数值模拟与实验研究. 数值模拟结果表明: 增益饱和效应、群速度色散以及同步误差对啁啾脉冲的时间-光谱特性影响较大; 自相位调制对啁啾脉冲的影响较小. 实验获得了 0.52 nm 带宽的周期性线性啁啾脉冲, 与模拟结果符合较好. 实验结果同时表明装置中存在较大的偏振模色散, 导致幅频效应较大, 后续的研究中需加入对此的考虑. 模拟及实验研究表明: 直接相位调制是一种新型的可方便地获得周期性线性啁啾脉冲的方法, 其在光谱色散平滑中具有潜在应用.

关键词: 直接相位调制, 周期性线性啁啾脉冲, 幅频效应

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.62.104216

1 引言

具有周期性啁啾的调频脉冲可用于光谱色散平滑 (smoothing by spectral dispersion, SSD) 方法中. SSD 最早由 Skupsky 等^[1] 于 1989 年提出, 其目的为在惯性约束聚变 (ICF) 实验中实现靶面的均匀辐照. 传统的 SSD 基于正弦相位调频脉冲, 光束扫频时存在速度为零的区域 (对应于正弦调制波波峰与波谷处), 不利于 SSD 的实现. 2006 年, 张锐等^[2,3] 提出基于周期性线性啁啾脉冲的 SSD 方法, 该方法克服了传统的 SSD 的远场焦斑两端存在强度尖峰的问题, 并且对不能由相位板控制的一类高频调制也具有较好的平滑效果. 目前主要利用啁啾脉冲堆积的方法获得周期性线性调频脉冲, 但由于相邻脉冲之间相互交叠, 且各路脉冲均来自相同的光源, 因此, 脉冲堆积方式存在着各路脉冲之间相互干涉的问题, 导致脉冲波形出现调制, 并且由于堆积脉冲光路较多, 光路调节困难. 本文提出一种新

的获取周期性啁啾脉冲的方法, 即利用直接相位调制获得周期性啁啾脉冲. 利用直接相位调制的方法可克服啁啾脉冲堆积方法的缺点, 并且光路调节简单, 集成度高, 可很方便地获得周期性啁啾脉冲. 目前, 国际上主要有两套基于直接相位调制的方案, 这两套方案的特点是都采用了直接相位调制获得所需的啁啾脉冲, 但其仅限于获得线性啁啾脉冲, 其中 Howe 等^[4] 利用正弦调制信号的峰值位置对脉冲进行调制以获得线性啁啾脉冲, 而 Xin 和 Zuegel^[5] 则利用二次方的单周期信号获得线性啁啾脉冲. 结合直接相位调制具有调制信号灵活可变的特点以及 SSD 对周期性线性啁啾脉冲的实际需要, 我们提出基于直接相位调制的周期性啁啾脉冲的产生方法.

本文通过对直接相位调制理论的分析, 在现有实验方案的基础上, 提出了利用直接相位调制获得周期性啁啾脉冲的方法, 并对获得的啁啾脉冲的特性以及在光纤中的传输进行了模拟, 同时开展实验

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2012B0401060, 2011B0401063) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tianxc203@126.com

对模拟结果进行验证, 实验获得了带宽为 0.52 nm 的周期性线性啁啾脉冲, 与模拟结果符合较好.

2 理论分析

相位调制是利用晶体的电光效应, 在外加电场的作用下, 晶体产生随电场变化的电致折射率变化, 当光经过该晶体后就会产生调制, 其原始的相位会附加上随电场变化的相位信息.

经相位调制后的光脉冲为

$$\tilde{E}_{\text{PM}}(t) = E_0(t)e^{-i\omega_0 t} \times e^{-ih(t)}, \quad (1)$$

其中, $E(t)$ 为缓变包络, ω_0 为中心角频率, 相位变化量 $h(t)$ 与电驱动脉冲函数成正比. 经相位调制后的相位变化函数为

$$\phi(t) = -\omega_0 t - h(t), \quad (2)$$

而脉冲的啁啾量即为

$$C(t) = \frac{d^2 h(t)}{dt^2}, \quad (3)$$

因此相位调制器对光脉冲添加的瞬时相位函数 $h(t)$ 的二阶导数即为脉冲频率的瞬时啁啾量.

若施加的电驱动脉冲函数为抛物线形, 即 $h(t) = m - \frac{4m}{\tau^2}t^2$, 式中 m 为调制深度, τ 为脉冲的全宽度, 则

$$C(t) = \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = -\frac{8m}{\tau^2}, \quad (4)$$

即施加抛物线形的驱动脉冲即可得到一个线性变化的瞬时频率, 且啁啾量为常数, 即线性啁啾脉冲.

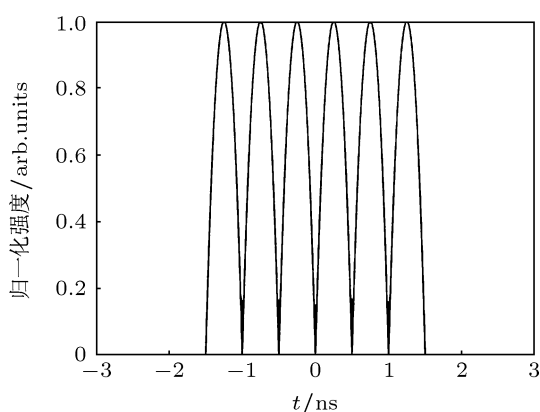


图1 周期性抛物线调制信号

如果在光脉冲时间范围内只添加一个相位调制驱动脉冲, 则得到的就是单次相位调制脉冲, 如果在光脉冲时间范围内添加相同相位调制驱动脉

冲的一个序列, 得到的就是周期性相位调制脉冲. 若施加的驱动脉冲为周期重复的抛物线信号 (图 1), 即可得到瞬时频率变化同样为周期重复的周期性线性啁啾脉冲, 其瞬时频率变化分布如图 2 所示.

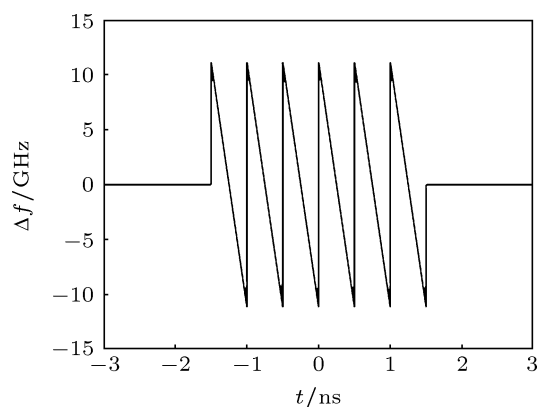


图2 瞬时频率变化

3 数值模拟

对直接相位调制获得的啁啾脉冲在光纤环形腔中的周期增益、传输以及相位调制等过程的模拟采用 Ginzburg-Landau equation (GLE) 进行求解. GLE 形式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{i}{2}(\beta_2 + ig_0 T_2^2) \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} \\ = i\gamma |\psi|^2 \psi + \frac{1}{2}(g_0 - \alpha)\psi, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 ψ 为脉冲复振幅包络, β_2 为光纤的二阶群速度色散 (group velocity dispersion, GVD), $T = t - \beta_1 z$ 为延迟时间, $\beta_2 + ig_0 T_2^2$ 为增益色散 (gain dispersion, GD), g_0 为掺杂光纤的增益系数, T_2 为掺杂元素偶极子的弛豫时间, γ 为光纤的非线性系数, α 为光纤损耗系数. 光纤中损耗很低, 与增益相比可忽略.

模拟时采取的参数如下: 环形腔的总损耗为 30 dB, 对应的增益光纤的总小信号增益为 30 dB, 以保证环形腔的净增益为 1. 增益光纤的长度设置为 2 m, 无源光纤的长度设置为 25 m, 总计腔长约为 135 ns, 与实验装置 (后述) 基本一致. 相位调制驱动信号为周期性的抛物线信号, 调制频率为 2 GHz, 调制深度为 $4/9\pi$.

数值计算的流程图如图 3 所示, 脉冲多次在环形腔内循环以获得足够大的带宽. 当脉冲进入环形腔以后首先经过一段 2 m 长的增益光纤, 获得 30 dB 的增益, 随后引入 12 dB 的损耗, 紧接着通过 25 m 的无源光纤传输, 接着引入 18 dB 的损耗, 使

净增益为 1, 光脉冲在引入随机延迟以后通过相位调制器, 调制后的脉冲再回到增益光纤进行下一次循环, 最后循环到设定次数后输出调制脉冲。

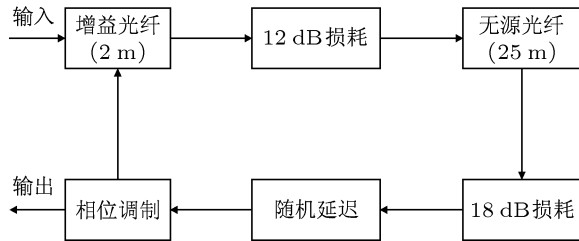


图3 数值计算流程图

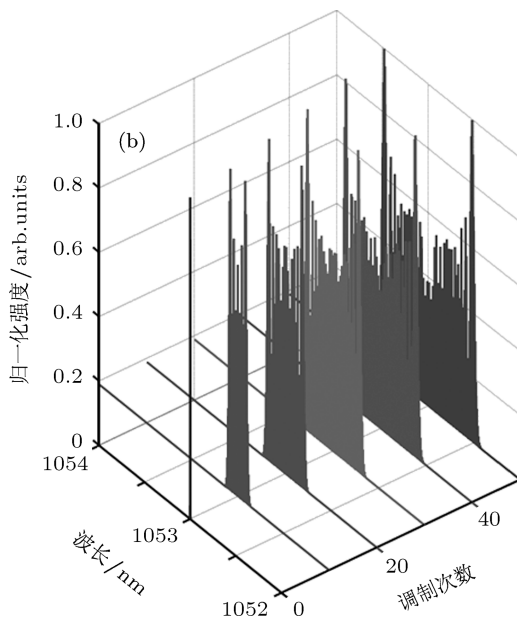
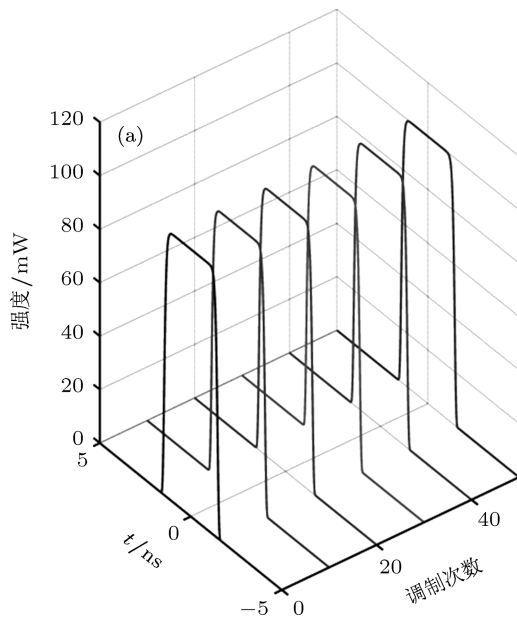


图4 理想情况下直接相位调制结果 (a) 时间波形; (b) 光谱

首先对理想情况进行了数值模拟, 不考虑增益饱和、群速度色散、自相位调制、同步误差等的影响, 模拟结果如图 4 所示。

理想情况下, 相位调制对脉冲幅度无影响, 脉冲幅度基本保持不变, 顶部平坦无调制, 光谱宽度随调制次数的增加而增加, 经 50 次相位调制后光谱被展宽到 0.95 nm, 且光谱对称分布。

分别考虑增益饱和、群速度色散、自相位调制、同步误差等的影响, 模拟的结果如图 5—8 所示。

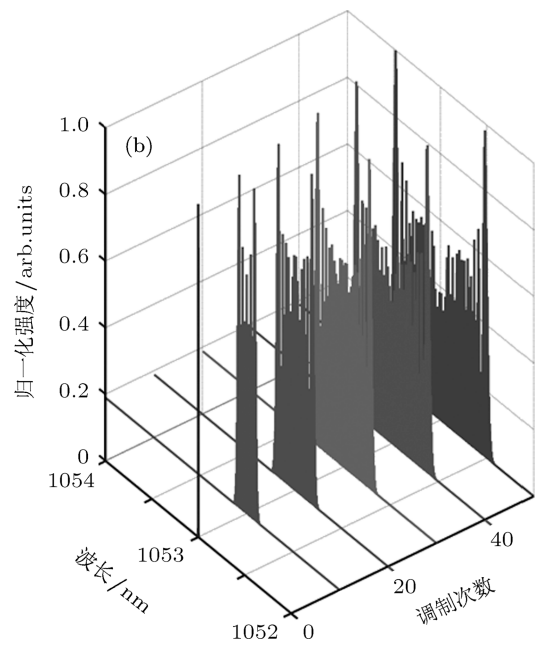
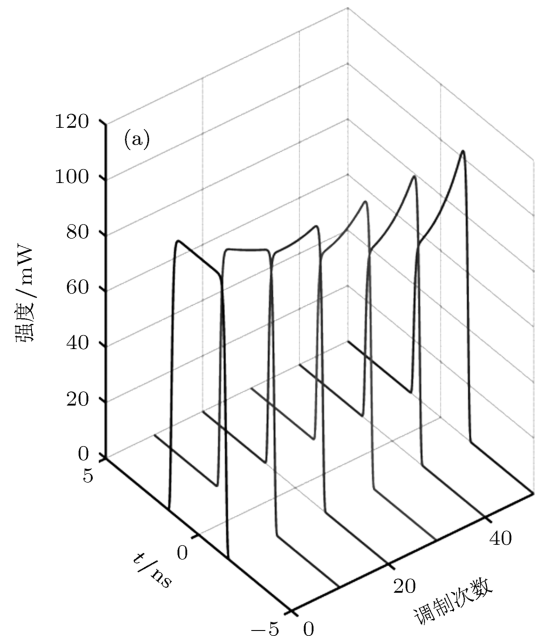


图5 考虑增益饱和时的直接相位调制结果 (a) 时间波形; (b) 光谱

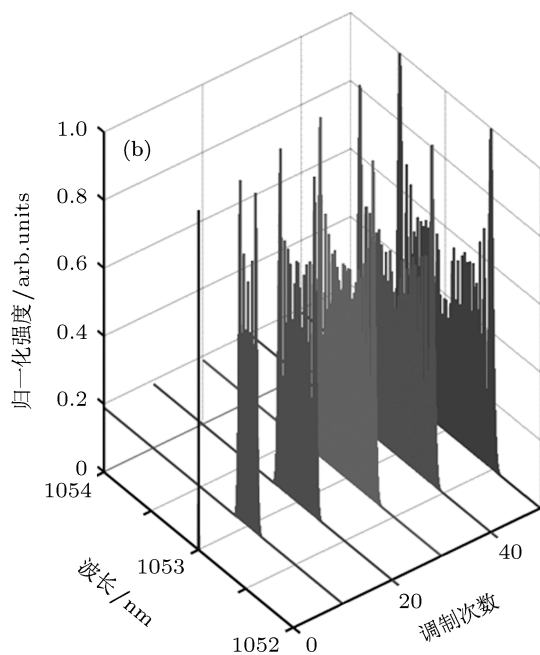
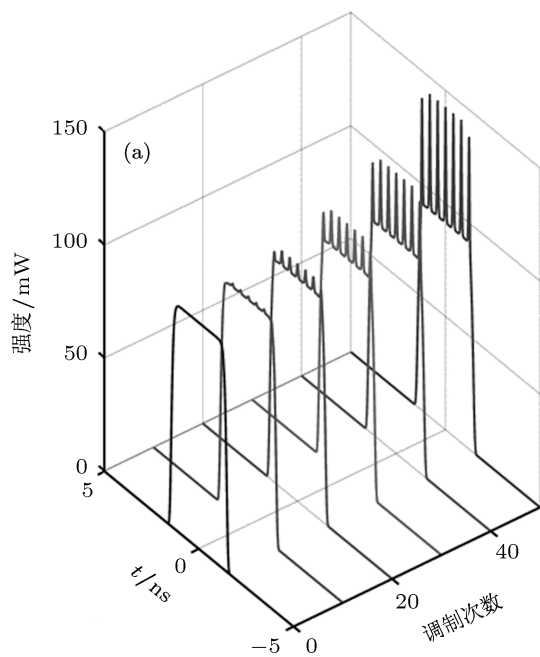


图6 考虑群速的色散时的直接相位调制结果 (a) 时间波形; (b) 光谱

图5所示为单独考虑增益饱和时的模拟结果. 从图中可以看出, 随着调制次数的增加, 增益饱和效应愈加明显, 脉冲前沿变陡, 后沿变缓, 造成较大的脉冲畸变. 虽然经过一次放大后的能量远低于饱和能量, 一次放大的饱和效应可以忽略, 但由于每一次增益饱和效应所引起的脉冲波形畸变在下次循环时是保持下来的, 并且线性的损耗只改变了脉冲的整体幅度, 对脉冲波形没有影响. 因此, 在经过多次循环后, 增益饱和效应造成的畸变会累积, 从而造成显著的脉冲畸变. 经50次调制后, 脉

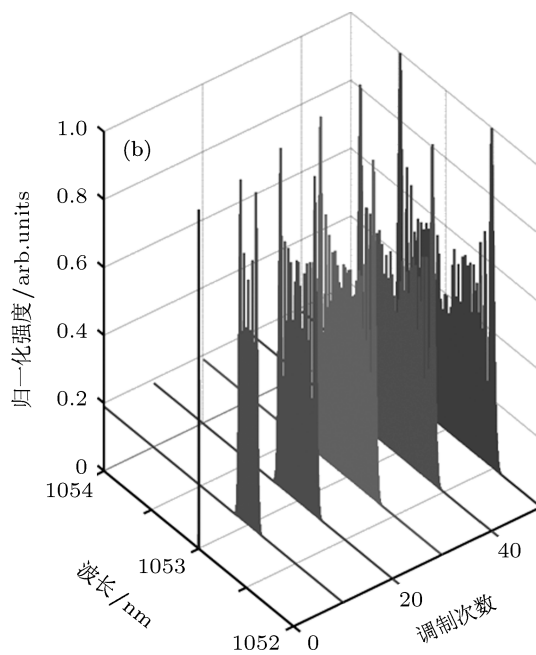
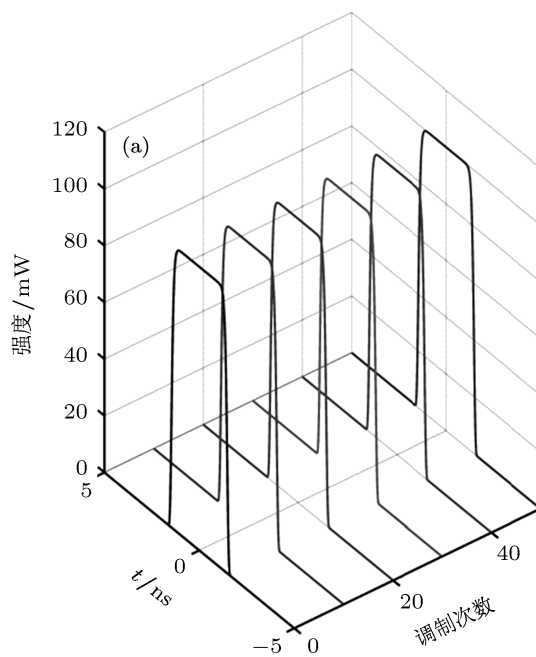


图7 考虑自相位调制时的直接相位调制结果 (a) 时间波形; (b) 光谱

冲出现了明显的窄化, 顶部斜坡下降了约40%. 图6为考虑群速的色散时的相位调制结果. 对于单纵模脉冲来说, 群速度色散的作用主要是展宽了脉冲的宽度, 而对于宽带啁啾脉冲来说, 群速度色散还将引入较大的幅频效应 (FM-to-AM), 导致脉冲波形出现显著的调制波形. 从模拟结果可以看出, 随着调制次数的增加, 群速度色散导致的 FM-to-AM 效应越来越大, 模拟的腔长为 27 m, 经过 50 次循环调制后相当于传输了 1.35 km, 由群速度色散引入了显著的脉冲调制, 调制深度约为 30%, 但其对

光谱基本无影响. 图 7 为考虑自相位调制的模拟结果. 当峰值功率较高时, 自相位调制的作用主要是使脉冲频谱展宽, 但其不改变脉冲的波形; 但当脉冲峰值功率较小时, 自相位调制导致的光谱变化基本可以忽略, 因此可以控制脉冲的峰值功率以减小自相位调制对光谱的影响. 将环形腔的净增益维持在 1 左右, 以保证脉冲峰值功率不会因循环次数增加而变得太大, 模拟结果显示在控制净增益的情况下, 随着调制次数的增加, 自相位调制对脉冲波形和光谱基本无影响, 光谱对称性略有破坏. 因此, 对纳秒级的峰值功率较小 (1 W) 的脉冲, 自相位调制

对脉冲的影响不大. 图 8 为存在同步误差时的模拟结果, 模拟采取的误差为正负 100 ps 的均匀随机分布的同步抖动, 从图中可以看出, 在较小同步误差范围内, 同步误差对脉冲波形没有明显的影响, 但其对光谱产生了显著的影响, 同步误差不仅破坏了光谱的对称性, 也使光谱的展宽量减小, 理想情况下经 50 次调制后光谱展宽到 0.95 nm 左右, 存在同步误差是光谱带宽为 0.60 nm, 减小了 0.35 nm, 因此在实验中需要精确地控制脉冲与调制信号的同步关系.

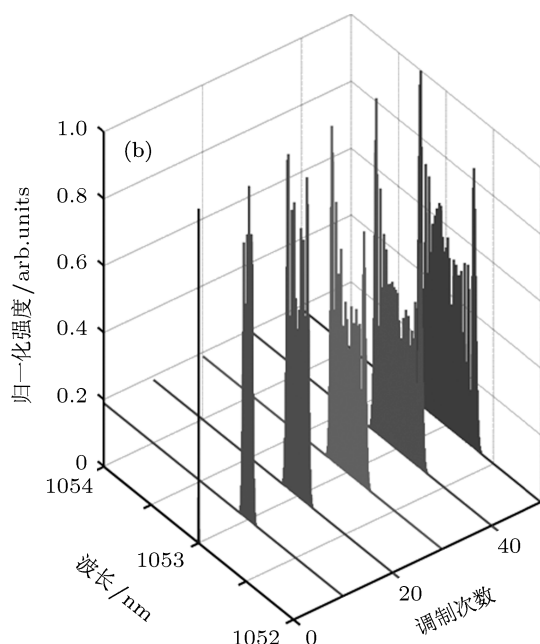
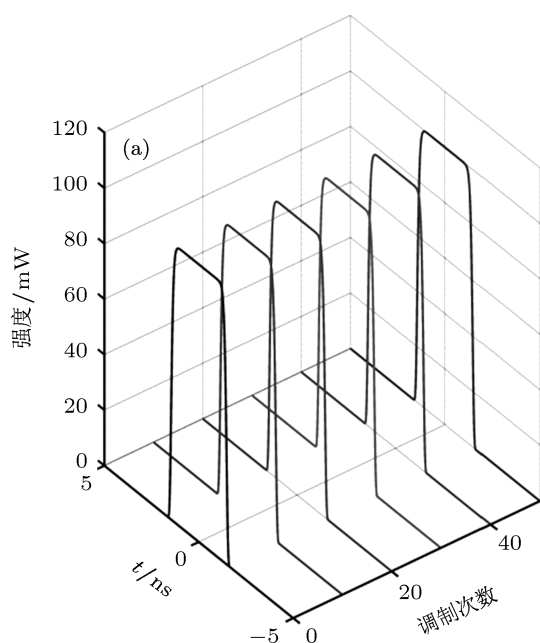


图 8 存在同步误差时的直接相位调制结果 (a) 时间波形; (b) 光谱

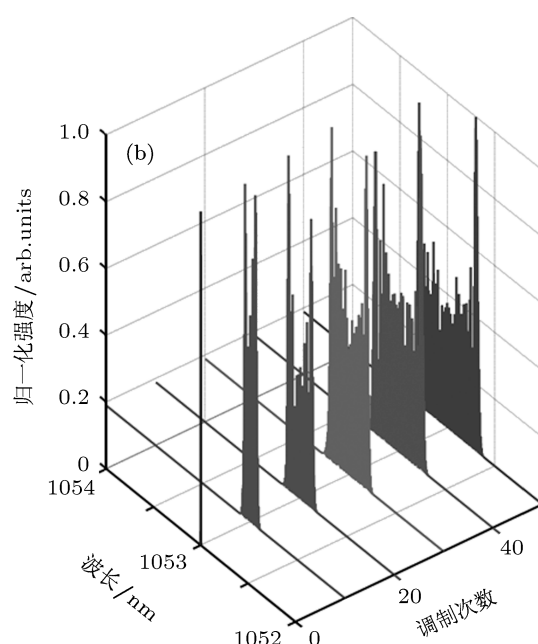
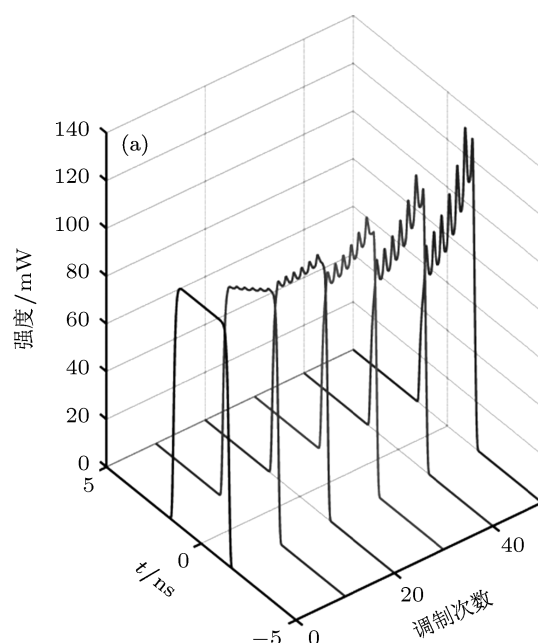


图 9 直接相位调制模拟结果 (a) 时间波形; (b) 光谱

图 9 为同时考虑增益饱和、群速度色散、自相位调制、同步误差等的影响. 从图中可以看出, 增益饱和使脉冲发生了显著的畸变, 脉冲宽度变窄; 群速的色散导致了较大的 FM-to-AM 效应, 使脉冲波形出现了调制; 同步误差使光谱的展宽量变小, 光谱对称性变差. 经过 50 次的相位调制后, 脉冲出现了显著的增益窄化和 FM-to-AM 效应, 顶部斜坡下降约为 46%, 波形调制深度约为 20%, 光谱的展宽量相较理想情况也有显著地降低, 带宽约为 0.60 nm 左右.

4 实验研究

实验采用的实验装置如图 10 所示. Front End 为具有产生整形纳秒脉冲能力的光纤前端系统, 种子脉冲经偏振控制器 (polarization controller, PC) 和波导开关 (waveguide switch) 后进入环形腔, 在环形腔内首先经相位调制器 (phase modulator, PM) 进行相位调制, 然后经过掺镱光纤放大器 (ytterbium-doped fiber amplifier, YDFA) 进行损耗补偿, 利用可调延迟线 (variable delay line, VDL) 进行 500 ps/0.1 ps 的同步微调, 随后利用 PC 调整到所需的偏振方向以后回到波导开关. 波导开关用以控制光脉冲在腔内的循环次数, 当达到设定的循环次数后经另一端输出. 相位调制驱动脉冲信号由任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG) 产生, 经射频驱动源放大后作用于相位调制器, 同时波导开关的选通信号也由 AWG 产生.

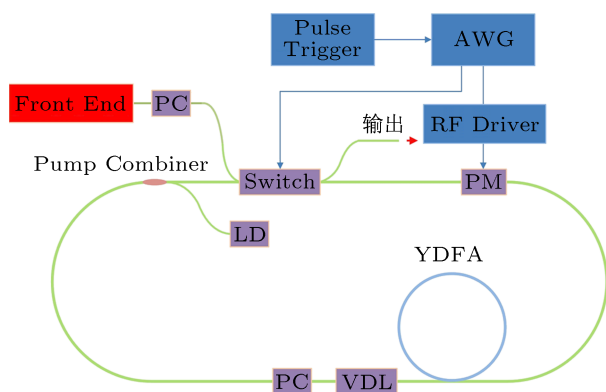


图 10 基于直接相位调制的实验光路示意图

实验采用的啁啾性抛物线脉冲如图 11 所示, 驱动脉冲宽度为 4 ns, 图中虚线为 AWG 编译的波形, 实线为 AWG 输出经驱动源放大后的实测波形.

注入的初始脉冲如图 12 所示, 为脉宽 3 ns 的

单频脉冲, 经 50 次相位调制后的波形与光谱如图 13 所示, 光谱带宽由初始注入的 0.003 nm 展宽到 0.52 nm.

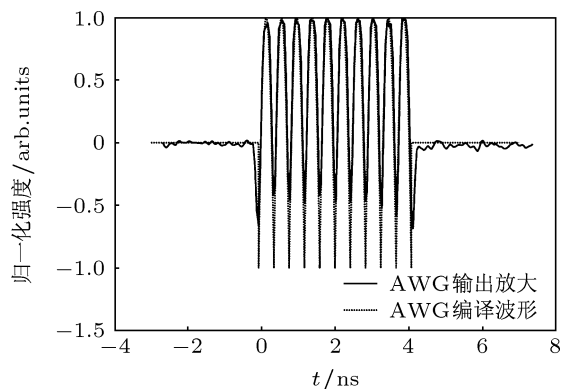


图 11 AWG 编译波形与实测波形

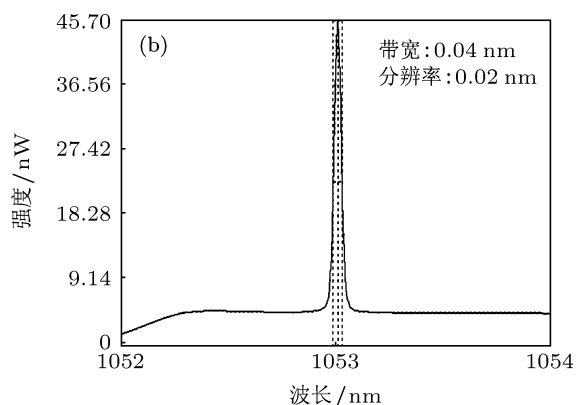
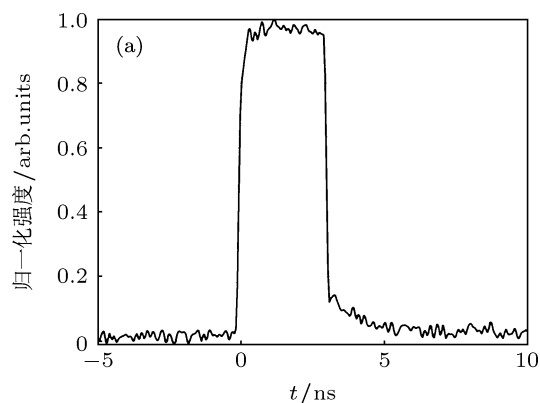


图 12 初始注入的波形与光谱 (a) 时间波形; (b) 光谱

经 50 次直接相位调制后, 光脉冲由于增益饱和和效应出现了波形畸变, 顶部斜坡下降了约 40%, 与理论模拟的结果相差不大. 实验结果同时也显示脉冲出现了显著的 FM-to-AM 效应, 脉冲的调制深度约为 40%, 比数值计算结果稍大, 可能的原因是光纤环路中存在对偏振态比较敏感的器件, 如相

位调制器, 而光路中所用的器件并非全为保偏器件, 同时所用光纤既有保偏光纤又有单模光纤, 因此光纤环路中存在较大的偏振模色散效应, 而偏振模色散也会引起较大的 FM-to-AM 效应, 从而导致 FM-to-AM 效应比较严重. 因此在后续的研究中还需加入对偏振模色散的考虑. 另外由于 AWG 最高的调整精度为 83.3 ps (12 GHz), 并且由于循环次数较多, 每次循环的光程略有差别, 导致虽然利用可调延迟线对同步进行精确调整, 但仍然很难对其进行完全的精确同步, 并且随着循环次数的增加, 同步误差会越来越大, 因此对同步误差的控制是本实验的一个难点. 经 50 次调制以后, 脉冲的光谱展宽为 0.52 nm, 与理想情况下的模拟结果 (0.95 nm) 相比相差较大, 但和存在同步误差时的模拟结果 (0.60 nm) 相当, 说明实验过程中的确存在较大的同步误差.

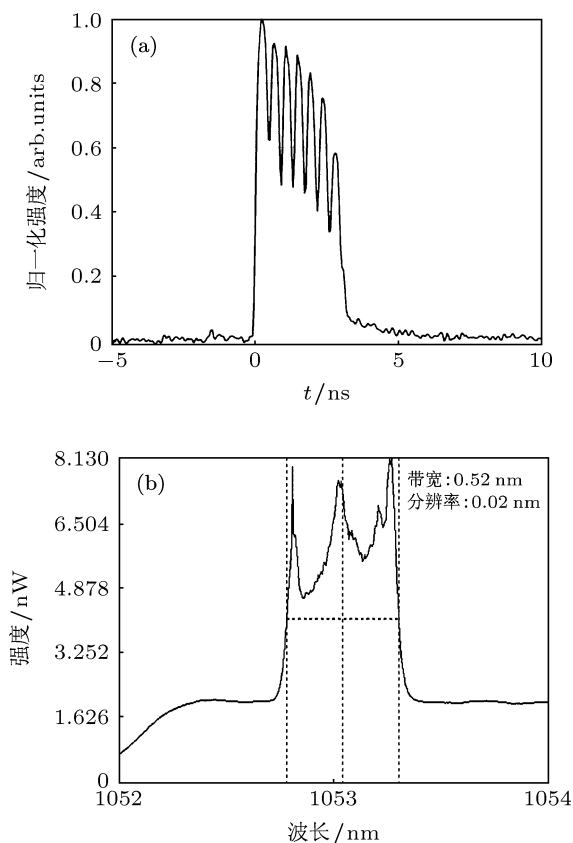


图 13 经 50 次直接相位调制后的波形与光谱 (a) 时间波形; (b) 光谱

从数值模拟中可看出群速度色散将导致脉冲时间波形出现调制, 若初始脉冲为线性啁啾高斯脉冲

$$A(0, t) = A_0 \exp\left(-\frac{(1+iC)t^2}{2t_0^2}\right), \quad (6)$$

C 为初始啁啾参量, t_0 为初始脉宽. 则该线性啁啾高斯脉冲沿光纤经群速度的色散传输到 z 处的振幅为 [6]

$$A(z, t) = \frac{A_0 t_0}{[t_0^2 - i\beta_2 z(1+iC)]^{1/2}} \times \exp\left\{-\frac{(1+iC)t^2}{2[t_0^2 - i\beta_2 z(1+iC)]}\right\}, \quad (7)$$

式中 β_2 为光纤的二阶群速度色散. 啁啾脉冲传输后的波形, 其振幅反比于脉冲的初始啁啾参量 C , 当啁啾参量 C 为常数时, 传输后的脉冲波形仍然能保持高斯脉冲形状, 不过脉冲的宽度发生了变化. 当啁啾参量 C 是时间 t 的函数, 即非线性啁啾脉冲的时候, 传输后脉冲的波形将发生形变, 如果 $\beta_2 z C$ 足够大, 输出后的波形将会表现为同啁啾参量 C 一样的变化规律. 对于超高斯脉冲与矩形脉冲, 时间波形也有同样的变化规律, 因此可从脉冲经多次相位调制后时间波形出现的调制波形判断脉冲的啁啾特性. 实验所获得的经 50 次相位调制后的时间波形如图 14(a) 所示 (局部放大), 理想周期性线性啁啾脉冲的频率变化如图 14(b) 所示. 从图中可看出, 调制后的波形与频率变化规律一致, 因此可证实实验所获得的脉冲为周期性线性啁啾脉冲.

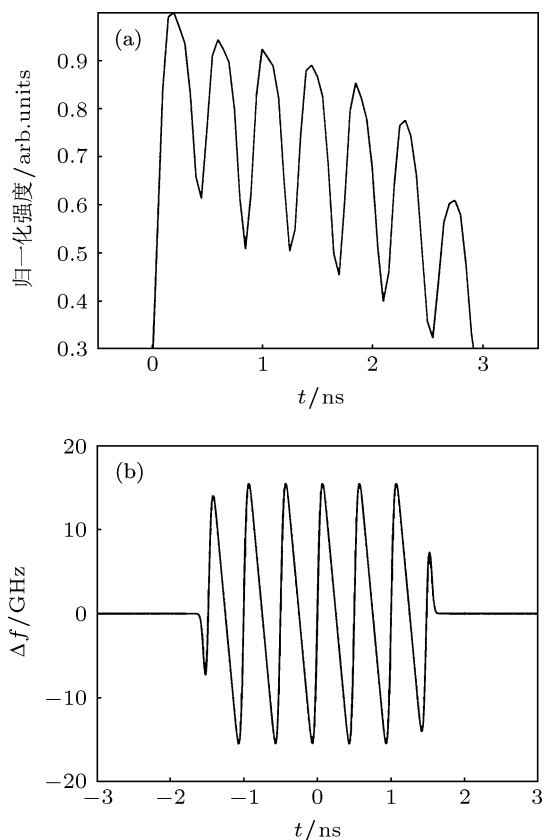


图 14 脉冲调制波形与瞬时频率变化对比 (a) 调制波形; (b) 瞬时频率变化

5 结论

提出了一种新型的获得周期性线性啁啾脉冲的方法,即利用直接相位调制获得周期性线性啁啾脉冲的方法,对获得的啁啾脉冲在光纤中的传输进行了模拟,数值计算表明:增益饱和效应、群速的色散,以及同步误差对调制脉冲的传输影响较大,增益饱和效应会使脉冲出现较大的畸变,使脉冲前沿变陡,后沿变缓,脉冲宽度变窄,在经过 50 次循环调制后引起了约 40% 斜坡下降;群速度色散将使脉冲产生较大的 FM-to-AM 效应,脉冲波形上出现较大的调制波形,经过 50 次循环调制后光脉冲上形成了约 30% 的调制深度;光脉冲与驱动信号的同步误差会严重影响光谱的展宽程度,并使光谱的对

称性变差,在存在 100 ps 的随机同步误差时,经过 50 次相位调制后,光谱的展宽量减小了 0.35 nm;数值计算同时也表明,由于脉冲的峰值功率不大,自相位调制的影响较小,脉冲光谱的对称性略有退化.

实验研究验证了上述模拟结果,50 次循环调制以后,光脉冲顶部斜坡下降了约 40%,光谱的带宽展宽为 0.52 nm,比存在同步误差时的模拟结果小 0.08 nm. 模拟与实验研究证实了该方法获得周期性线性啁啾脉冲的可行性.

实验研究同时表明,经过 50 次相位调制后的光脉冲出现了约 40% 的调制深度,与模拟结果相差加大,其原因为装置中存在较大的偏振模色散,后续的模拟及实验中需加入对偏振模色散的考虑.

-
- [1] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [2] Zhang R, Zhang X M, Su J Q, Sui Z, Lin H H, Jing F, Wang W Y 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1512 (in Chinese) [张锐, 张小民, 粟敬钦, 隋展, 林宏奂, 景峰, 王文义 2006 光学学报 **26** 1512]
- [3] Zhang R, Wang J J, Su J Q, Liu L Q, Deng Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1088 (in Chinese) [张锐, 王建军, 粟敬钦, 刘兰琴, 邓清华 2010 物理学报 **59** 1088]
- [4] van Howe J, Lee J H, Xu C 2007 *Opt. Lett.* **32** 1408
- [5] Xin R, Zuegel J D 2010 *Advanced Solid-State Photonics* Los Angeles AMD3
- [6] Govind P A (Translated by Jia D F, Yu Z Y, Dan B, Hu Z Y) 2002 *Non-linear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p45 (in Chinese) [Govind P A 著 (贾东方, 余震红, 谈斌, 胡智勇 译) 2002 非线性光纤光学原理及应用 (北京: 电子工业出版社) 第 45 页]

Periodic linear chirped pulse generation based on direct phase modulation*

Tian Xiao-Cheng¹⁾²⁾ Sui Zhan^{1)†} Huang Zhi-Hua¹⁾³⁾ Lin Hong-Huan¹⁾
Wang Jian-Jun¹⁾ Zhang Rui¹⁾ Xu Dang-Peng¹⁾ Zhang Yong-Liang¹⁾ Zhu Na¹⁾

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

2) (Beijing Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

3) (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 10 December 2012; revised manuscript received 28 January 2013)

Abstract

A new method of generating periodic linear chirped pulse is proposed, and a 0.52 nm bandwidth periodic chirped pulse is generated. Numerical simulation shows that the gain saturation, group velocity dispersion and synchronization jitter have great influences on chirped pulse; and self-phase modulation has little influence since the peak power stays at a low level. The experimental results indicate that the polarization mode dispersion will lead to a great intensity modulation, and the amplified spontaneous emission will break the light stability, which leads to the fewer round-trips of light. Research shows that the direct phase modulation is a novel method of generating periodic linear chirped pulse, which could be used for smoothing the spectral dispersion.

Keywords: direct phase modulation, periodic linear chirped pulse, FM-to-Am

PACS: 42.81.-i, 42.81.Dp, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.62.104216

* Project supported by the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 2012B0401060, 2011B0401063).

† Corresponding author. E-mail: tianxc203@126.com