

## 光谱扫描滤波法提升飞秒激光信噪比的理论分析\*

马再如<sup>1)2)4)†</sup> 隋展<sup>3)†</sup> 冯国英<sup>2)</sup> 孙年春<sup>2)</sup> 王屹山<sup>4)</sup> 张彬<sup>2)</sup> 陈建国<sup>2)</sup>

1) (西华大学物理与化学学院, 成都 610039)

2) (四川大学电子信息学院, 成都 610064)

3) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

4) (西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2011年8月27日收到; 2011年12月2日收到修改稿)

在时间-频率域中, 啁啾脉冲被淹没在放大自发辐射等噪声中, 且其瞬时频率线性分布, 基于此, 提出采用光谱扫描滤波的办法来提提高功率飞秒激光系统的信噪比, 并以法布里-珀罗干涉仪作为光谱扫描滤波器, 对该法提升信噪比的效果进行了详细的理论分析. 采用短时傅里叶变换方法, 研究了光谱扫描滤波器对自发辐射放大 (ASE) 的滤波效果, 数值分析表明, 在时间抖动为  $-2$  ps 到  $2$  ps 之间、光谱扫描滤波器的通带宽度为  $0.4$  nm 条件下, 该法能将飞秒激光系统的信噪比提升 2 个量级, 而啁啾信号光以超过 90% 的透光率通过光谱扫描滤波器; 级联光谱扫描滤波方式能进一步提升飞秒激光信噪比.

**关键词:** 超快激光技术, 信噪比, 光谱扫描滤波, 短时傅里叶变换法

**PACS:** 42.60.Rn, 42.65.Re

## 1 引言

啁啾脉冲放大技术和宽带高增益介质的出现, 将超短脉冲高功率激光装置输出的激光脉冲峰值功率由 GW 量级迅速推至 TW, 甚至 PW 量级<sup>[1-4]</sup>, 正向 EW 量级的更高峰值功率迈进. 与此相应, 激光脉冲的聚焦功率密度也被迅速提高, 达到  $10^{19}$ — $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> 量级以上<sup>[1]</sup>. 在强激光与物质相互作用的过程中, 当强度达到  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> 水平, 即使是时间极短的飞秒脉冲, 它与靶材相互作用, 会产生等离子体; 即使激光脉冲强度为  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> 水平, 只要作用时间足够长, 也能显著改变靶材的性质<sup>[5-7]</sup>. 当先于主脉冲到达的激光噪声满足上述条件时, 它与物质的相互作用将影响甚至破坏后续主脉冲与物质作用的效果. 信噪比通常被认为是信号光的峰值强度与激光预脉冲峰值强度之比<sup>[8]</sup>, 因此要求此类激光系统的信噪比达到  $10^{11}$ — $10^{12}$  或以上, 对更高功率的激光系统而言, 其信噪比要

求更高.

现阶段, 提升激光信噪比技术主要有电光开关技术、非线性滤波技术<sup>[9,10]</sup>、可饱和吸收体技术<sup>[11]</sup>、等离子体镜技术<sup>[12]</sup>、环形腔放大技术<sup>[13]</sup>、注入强的清洁种子脉冲的技术<sup>[14]</sup>、双啁啾脉冲放大技术<sup>[15]</sup>、光参量啁啾信号光放大技术<sup>[16-21]</sup>等. 当前, 超短脉冲高功率激光装置的信噪比水平一般为  $10^7$ — $10^{10}$  水平; 另外, 这些技术还存在一些如转换效率不高、存在非线性效应或稳定性差等缺点.

滤波技术是提高信噪比的常用手段, 通常而言, 滤波器的中心频率是固定的, 其通带宽度越窄, 则滤波效果越好. 而对啁啾激光脉冲而言, 其带宽很宽, 通带宽度过窄的滤波器, 则啁啾信号光透过率低; 通带宽度过宽的滤波器, 则去噪效果很差.

在时间-频率域中, 啁啾信号光被背景噪声 (主要考虑 ASE) 淹没, 且其频率为线性分布. 我们利用噪声和啁啾信号光的这种时频分布特

\* 国家高新技术研究发展计划和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLST201007) 资助的课题.

† E-mail: suizhan2011@yahoo.cn

‡ E-mail: zairu-sima@163.com

点,首次提出采用光谱扫描滤波法来提升激光信噪比.光谱扫描滤波器的中心频率随时间变化,且其中心频率与啁啾信号光的中心频率相等,因此,在滤波器扫描的过程中,使啁啾信号光高效率通过,而将大部分 ASE 滤掉,从而达到提升激光信噪比的目的.

本文旨在提出提升飞秒激光信噪比的新技术——光谱扫描滤波法,建立其物理模型,结合扫描滤波器,进行数值分析.在激光与物质相互作用过程中,脉冲峰值前沿 10 ns 到 10 ps 的噪声是其关键的影响因素,其中,ASE 是噪声的主要构成成分.在啁啾脉冲放大系统中,在压缩阶段,常常使用光栅对作为压缩器,由于光栅对本身带宽约为 40 nm,它将起到滤波的作用.因此,本文主要分析的是光谱扫描滤波法对光谱范围为 780 nm 到 820 nm (啁啾信号光的中心波长为 800 nm)、-10 ns 到 -10 ps 的 ASE 的滤波结果.

## 2 光谱扫描滤波法的物理模型

在啁啾脉冲放大系统中,来自于钛宝石的飞秒脉冲经过光栅对展宽后,啁啾信号光为

$$E_{s0}(t) = A_{s0} \exp \left[ -\frac{1+jC}{2} \left( \frac{t}{T} \right)^2 \right] \times \exp(-j\omega_0 t) + \text{c.c.} \quad (1)$$

式中  $A_{s0}$  是信号光的振幅,  $t$  为本地时间,  $\omega_0$  为信号光的中心角频率,  $C$  为啁啾系数,  $T$  是脉冲半宽度(在光强峰值的  $1/e$  处), c.c. 表示复共轭.

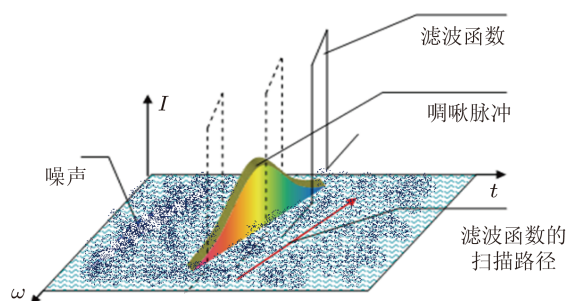


图1 扫描滤波法提升飞秒激光信噪比的示意图

图1是光谱扫描滤波法提升飞秒激光信噪比的示意图,啁啾信号光近似线性分布于时间-频谱域内,在其周围,随机分布着存续时间更长、频谱范围更广的噪声,其瞬时频率可表示为  $\omega_s(t) = -\partial\phi_s/\partial t = \omega_0 + Ct/T^2$ . 设计一种窄

带光谱滤波器,该滤波器的中心频率  $\omega_f(t)$  与啁啾信号光的频率  $\omega_s(t)$  相等,即  $\omega_f(t) = \omega_s(t)$ ;该窄带滤波器可将先期到达或在滤波器通带宽度之外的 ASE 噪声滤掉,使啁啾信号光高效率通过,从而实现光谱扫描滤波.在扫描滤波器的扫描时间范围内,其扫描率  $C_f = \Delta\lambda_c/\tau$ ,  $\Delta\lambda_c$  与  $\tau$  分别为信号光的光谱范围与存续时间.

伴随啁啾信号光  $E_s(t)$  进入扫描滤波器的 ASE 强度为 [22,23]

$$I_{ASE}(\lambda) \propto G(\lambda), \quad (2)$$

式中  $G(\lambda)$  是系统的放大增益.假设增益介质的增益线型为高斯型函数,即

$$g(\lambda) = g(\lambda_0) \exp \left[ -\left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$g(\lambda_0)$  为中心波长对应的增益系数,  $\Delta\lambda$  是介质的增益带宽.

ASE 在时域内可表示为

$$E_{ASE}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} E_{ASE}(\omega) \exp[j\phi_{ASE}(\omega)] \times \exp(j\omega t) d\omega \quad (4)$$

式中  $E_{ASE}(\omega)$  和  $\phi_{ASE}(\omega)$  分别为 ASE 的光谱振幅和相位,其中位相  $\phi_{ASE}(\omega) \in (-\pi, \pi]$ , 为随机函数.

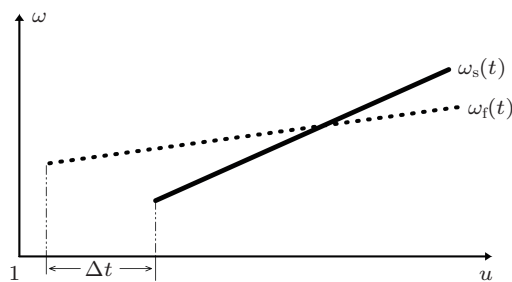


图2 信号光和扫描滤波器的频率轨迹和扫描路径示意图

采用短时傅里叶变换来分析 ASE 的时频分布.

$$E_{ASE}(\omega, t') = \int_R E_{ASE}(t) g_a(t-t') e^{-j\omega t} dt, \quad (5)$$

短时傅里叶变换的反演公式

$$E_{ASE}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_R \int_R g_a(t-t') \times E_{ASE}(\omega, t') e^{j\omega t} dt' d\omega. \quad (6)$$

本文选高斯型窗口函数  $g_a(t)$  为

$$g_a(t-t') = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} \exp \left\{ -\frac{(t-t')^2}{4a} \right\}, \quad (7)$$

式中  $a$  表征窗口函数的宽度.

图 2 给出了在时间-频率坐标系中信号光频率轨迹和扫描滤波器扫描路径, 其中虚线为啁啾信号光的频率轨迹, 实线为扫描滤波器的扫描路径, 考虑到在实际的扫描滤波过程中, 扫描滤波器与信

号光之间在时间上的不同步, 用  $\Delta t$  表示两者之间的“起始时间”不同, 即时间抖动.

采用法布里-珀罗干涉仪作为光谱扫描滤波器, 其透过率中心波长  $\lambda_f$  与施加的电压有关. 根据文献 [24,25], 其传输函数可表示为

$$\text{filter}(\omega, t) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2 \sin^2 \left[\pi \frac{\omega - \omega_f(t)}{\Delta\omega_{\text{FSR}}}\right]\right)^{1/2}} \exp\{-j\phi_f(\omega)\}, \quad (8a)$$

$$\phi_f(\omega) = [\omega - \omega_f(t)] \frac{\Delta}{c} + a \tan \left\{ \frac{R \sin(2[\omega - \omega_f(t)]\Delta/c)}{1 - R \cos(2[\omega - \omega_f(t)]\Delta/c)} \right\}, \quad (8b)$$

式中  $F$  为精细度,  $\Delta\omega_{\text{FSR}}$  为自由光谱范围,  $\Delta$  为 F-P 腔的光程,  $c$  为真空中的光速. 透过中心角频率  $\omega_f(t)$  可表示为

$$\omega_f(t) = \omega_s(t) + \delta\omega(\Delta t) + \frac{pC}{T^2}t, \quad (9)$$

式中,  $\delta\omega$  来源于时间抖动  $\Delta t$ , 故有  $\Delta t = T^2\delta\omega/C$ ; 参量  $p$  表示扫描滤波器与啁啾信号光的啁啾率之差. 从该式可见, 扫描滤波器的扫描率为  $(1+p)C/T^2$ .

啁啾信号光线性分布在时间-光谱域内, 因此, 经过扫描滤波器后, 啁啾信号光可表示为

$$E_s(t) = E_{s0}(t)\text{filter}(\omega, t), \quad (10)$$

相应啁啾信号光为

$$|E_s(t)| = A_{s0} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{t}{T} \right)^2 \right] \times \frac{1}{\left\{ 1 + \left( \frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left[ \pi \frac{\omega - \omega_f(t)}{\Delta\omega_{\text{FSR}}} \right] \right\}^{1/2}}, \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \phi(\omega) &= \phi_s(\omega) + \phi_f(\omega) \\ &= -\frac{C}{2} \left( \frac{t}{T} \right)^2 - [\omega - \omega_f(t)] \frac{\Delta}{c} \\ &\quad - a \tan \left\{ \frac{R \sin(2[\omega - \omega_f(t)]\Delta/c)}{1 - R \cos(2[\omega - \omega_f(t)]\Delta/c)} \right\}. \end{aligned} \quad (11b)$$

从 (11b) 式可知, 在  $\omega - \omega_f(t) \neq 0$  时, 即输入 F-P 腔的信号光的角频率与其共振角频率相异时, 将会带来一个附加的位相延迟, 该附加的位相变化可能会

对信号光的压缩造成影响, 如何将附加位相尽量减小, 还需要进一步研究.

相应啁啾信号光的强度为

$$I_s(t) = A_{s0}^2 \exp \left[ -\left( \frac{t}{T} \right)^2 \right] \times \frac{1}{1 + \left( \frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left[ \pi \frac{\omega - \omega_f(t)}{\Delta\omega_{\text{FSR}}} \right]}. \quad (12)$$

故经过扫描滤波器的透过率为

$$\eta = \frac{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} |E_s(t)|^2 dt}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} |E_{s0}(t)|^2 dt}, \quad (13)$$

式中,  $\tau$  为啁啾信号光的持续时间.

而对 ASE 而言, 需要得到其时频信息, 从而得到其滤波效果, 分析扫描滤波对信噪比的提升能力, 而采用傅里叶变化只能得到频域或时域信息, 对该问题的处理存在一定的困难, 我们将采用短时傅里叶变换对 ASE 进行处理, 得到其时频谱图, 在时间-频率域内对其进行扫描滤波, 分析扫描滤波对 ASE 的滤波效果, 分析其提升信噪比的效果.

### 3 光谱扫描滤波信噪比提升效果的数值分析

在数值分析部分, 相关参数如下: 啁啾信号光  $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 、钛宝石带宽  $\Delta\lambda = 200 \text{ nm}$ 、啁啾信号光的光谱范围  $\Delta\lambda_c = 40 \text{ nm}$ , 脉冲持续时间  $\tau = 1 \text{ ns}$ , 扫描滤波器的啁啾率  $C_f = \Delta\lambda_c/\tau = 0.4 \text{ nm}/10 \text{ ps}$ .

下面,分析光谱扫描滤波对 ASE 的扫描滤波效果,噪声 ASE 光谱范围为 780 nm 到 820 nm,时间区间在主脉冲到主脉冲前 12 ns 之间,分析系统的信噪比的提升率和啁啾信号光的透光率.

### 3.1 光谱扫描滤波对 ASE 的滤波效果分析

在讨论扫描滤波提升信噪比的过程中,假定输入的 ASE 强度为 1,根据 (2), (3) 和 (4) 式,中心波长为 800 nm,  $\Delta\lambda = 200$  nm,  $\phi_{\text{ASE}}(\omega) \in (-\pi, \pi]$  的均匀分布的随机函数,得到 ASE 的归一化的光谱和波形图,如图 3 所示.从图 3 可见,ASE 的光谱强度分布在中心波长 800 nm,强度分布在其存续的时间内是随机出现的,在以下数值分析过程中,若无特别提及,输入 ASE 将不再显示.

图 4 给出的是时间抖动  $\Delta t$  对扫描滤波效果的影响,其中 F-P 的自由光谱范围  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 10$  nm,精细度  $F = 25$ ,相应的扫描滤波器的通带宽度为 0.4 nm( $= \Delta\lambda_{\text{FSR}}/F$ );时间抖动量  $\Delta t$  分别为 -100 ps, 0 和 100 ps.从图中可见,ASE 经扫描滤波后,其分布有两个明显的特点.其一,在不同时间抖动量  $\Delta t$  情况下,ASE 强度由 0 dB 降低到 -20 dB,ASE 的强度下降约两个量级,信噪比经扫描滤波后提升量约为两个量级;其二,信噪比的变化与时间抖动量变化关系不大,即扫描滤波后的 ASE 强度相似.可见,在一次扫描滤波的情况下,

对抑制系统的 ASE 而言,时间在一定范围内的抖动对信噪比的提升的影响.

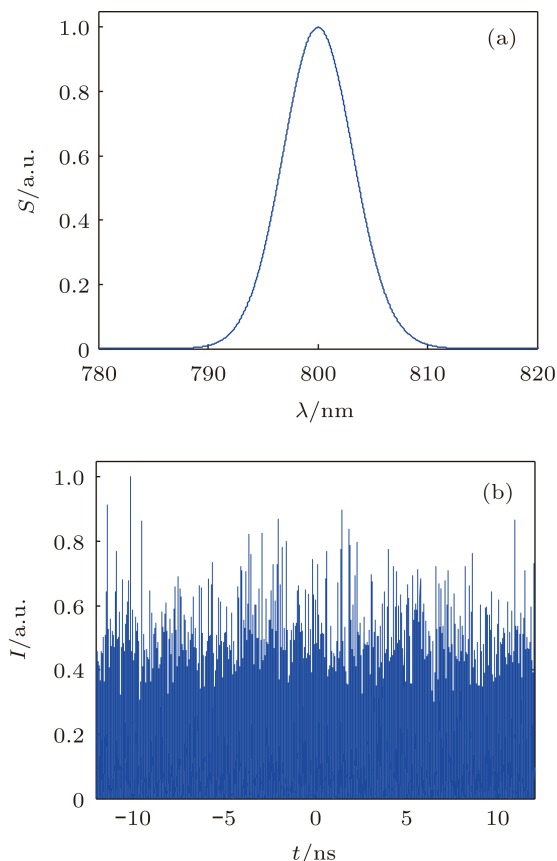


图 3 ASE 在频域和时域中的分布 (a) ASE 光谱分布; (b) ASE 强度分布

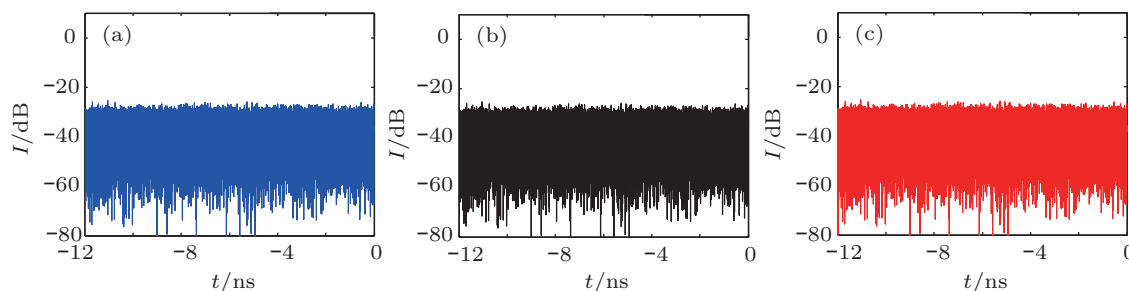


图 4 时间抖动  $\Delta t$  对 ASE 强度分布的影响 (a)  $\Delta t = -100$  ps; (b)  $\Delta t = 0$ ; (c)  $\Delta t = 100$  ps

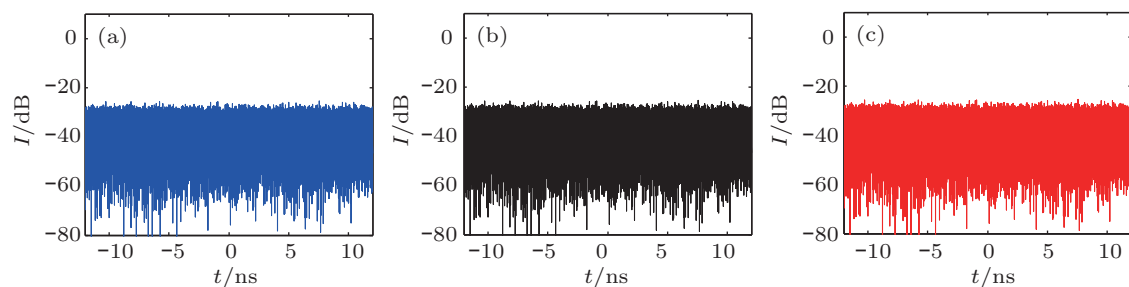


图 5 扫描路径  $p$  对 ASE 强度分布的影响 (a)  $p = -0.1$ ; (b)  $p = 0$ ; (c)  $p = 0.1$

图 5 给出的是扫描滤波器带宽为  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 10 \text{ nm}$ , 自由光谱范围  $F = 25$ , 时间抖动  $\Delta t$  为 0, 扫描路径参量  $p$  分别为  $-0.1, 0$  和  $0.1$  条件下的扫描滤波效果. 从图 5 中可以看到, 扫描滤波能将 ASE 强度由  $0 \text{ dB}$  下降到  $-20 \text{ dB}$ , 即在该种情况下, 扫描滤波能将信噪比提升两个量级. 另外, 扫描路径与信号光斜率相差不大情况下, 它们几乎有相同的信噪比提升率.

在扫描滤波过程中, 时间同步精度为 0, 即  $\Delta t = 0$ , 图 6 给出的是 F-P 的精细度  $F$  对扫描滤波的影响, 自由光谱范围  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 1 \text{ nm}$ , 精细度  $F = 10$ , 即扫描带宽为  $0.1 \text{ nm}$ , 其信噪比提升率为两个量级 (见图 4). 当精细度进一步提高到 100 与 1000, 相应的扫描带宽分别为  $0.01 \text{ nm}$  和  $0.001 \text{ nm}$ , 其信噪比提升率分别为  $40 \text{ dB}$  和  $60 \text{ dB}$ , 即扫描带宽越窄, 则 ASE 降低得越低, 信噪比提升率越高.

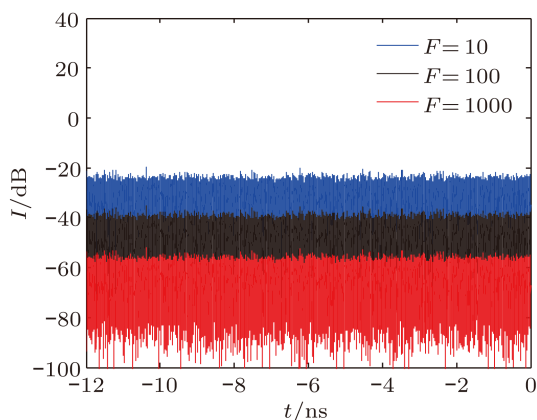


图 6 精细度  $F$  对 ASE 分布的影响

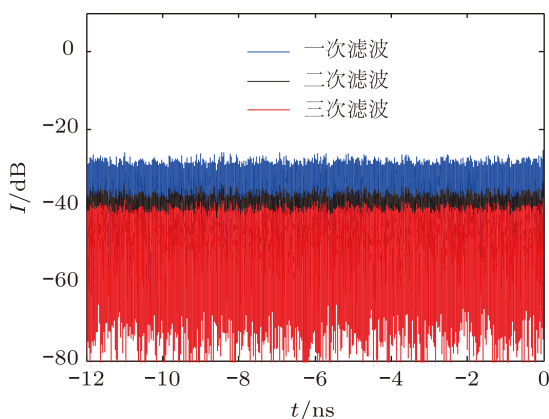


图 7 级联扫描滤波法提升信噪比的效果

级联滤波是信号与系统中常用来提升信噪比的有效办法, 本节对级联扫描滤波提升信噪比进

行分析. 图 7 给出了不同条件下级联滤波的效果图, 其中,  $\omega_f(t) = \omega_s(t)$ , 扫描滤波器的自由光谱范围  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 5 \text{ nm}$ 、精细度  $F = 25$ . 从图中可见, 一次扫描能将系统信噪比提升 2 个量级, 而对二次级联和三次级联扫描效果, 信噪比提升率分别为  $10 \text{ dB}$  与  $5 \text{ dB}$ , 由于第二次和第三次滤波的部分相同, 因此扫描滤波的效果越来越低.

### 3.2 扫描滤波的效率分析

对扫描滤波器而言, 信号光能透过扫描滤波器的效率是很重要的指标, 从 (11) 式和 (12) 式可对其进行计算. 图 8 给出的是时间抖动  $\Delta t$  对扫描滤波透过率的影响, 时间抖动越小和自由光谱范围越宽, 则透过率越高; 在  $\omega_f = \omega_s$  的条件下, 其透过率可达 100%.

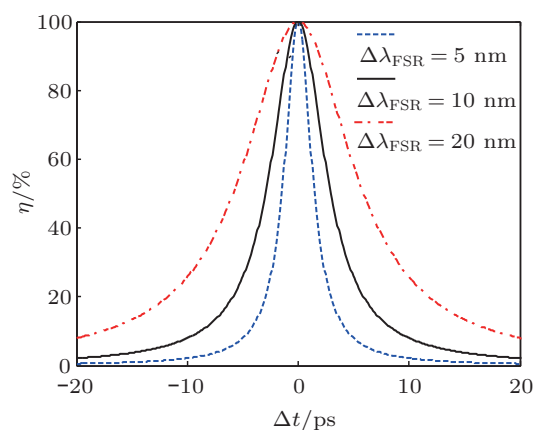


图 8 不同光谱自由范围条件下, 时间抖动对透过率的影响

## 4 结论与讨论

根据啁啾信号光与 ASE 在时间 - 频率域中的分布特点, 我们提出采用光谱扫描滤波法来提升飞秒激光信噪比, 并以法布里 - 珀罗干涉仪作为光谱扫描滤波器, 进行了理论分析和数值模拟. 采用短时傅里叶变换方法在时间 - 频率域内分析了非线性扫描滤波对 ASE 和啁啾信号光进行了理论分析. 在时间抖动  $\Delta t \in [-2\text{ps}, 2\text{ps}]$ , 扫描滤波斜率  $p \in [-0.1, 0.1]$ , 扫描滤波器的通带宽度为  $0.4 \text{ nm}$ , 即  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}/F = C_f \times 10 \text{ ps}$ , 光谱扫描滤波法能将信噪比提升两个量级, 保持透过率超过 90%. 若采用级联扫描滤波方式进行信噪比提升, 可进一步将提升飞秒激光的信噪比. 如何将满足扫描波长的电压快速的施加在电光晶体上、以及有效降低

时间抖动  $\Delta t$ 、进一步抑制附加在信号光场的位相,是采用光谱扫描滤波法提升飞秒激光信噪比在实验上面临的主要挑战.

其他信噪比提升技术通常是在脉冲处于压缩阶段进行的,而光谱扫描滤波法提升信噪比的方法在脉冲处于啁啾状态,即可被视为一种时域内的“近场”提升技术方法.在输入激光与 F-P 腔共振频率匹配的条件下,将不带来附加相位,对后续阶段的脉冲压缩影响很小,另外,光谱扫描滤波法还具有两个巨大的优势:其一,大口径电光晶体加工技术比较成熟,因而该技术可以适用于大口径高能量、高峰值功率系统;其二,扫描滤波技术可以级联使用,且保持较高的效率,因此可以提高扫描滤波系统的灵活性.

本文最后还给出一种实现扫描滤波信噪比提升的方案,它能很好地体现光谱扫描滤波法的基本优势,如图 9 所示.

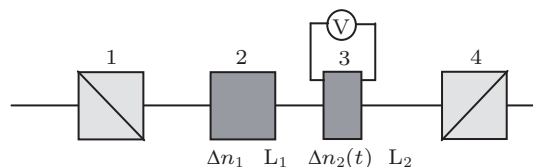


图 9 双折射晶体扫描滤波法示意图

图 9 给出的是电光双折射滤波器扫描滤波的构成示意图,该滤波器由正交的偏振器 (1 和 4) 和置于其间的按波片切割的较厚的高双折射晶体 (2) 及电光晶体 (3) 构成.其工作原理是:高双折射晶体 2 和电光晶体 3 构成的组合波片在静态时只能使某一个波长(啁啾脉冲的最长波长)的噪声光通过偏振器 4,从而抑制绝大部分噪声.当啁啾脉冲到来时,给电光晶体 3 加线性斜波电压使组合波片的等效厚度发生线性变化,其半波波长随之线性改变,若其改变速率与啁啾脉冲的啁啾率一致,则啁啾脉冲可全部透过偏振器 4,完成扫描滤波.

- [1] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, Chvykov V, Kalintchenko G, Maksimchuk A, Mourou G A, Yanovsky V 2004 *Opt. Lett.* **29** 2837
- [2] Perry M D, Pennington D M, Stuart B C, Tietbohl G, Britten J A, Brown C, Herman S, Golick B, Kartz M, Miller J, Powell H T, Vergino M, Yanovsky V 1999 *Opt. Lett.* **24** 160
- [3] Bonlie J D, Patterson F, Price D, White B, White, Springer P 2000 *Appl. Phys. B* **70** S155
- [4] Huang X J, Peng H S, Wei X F, Wang X D, Zeng X M, Zhou K N, Guo Y, Liu L Q, Wang X, Zhu Q H, Lin D H, Tang X D, Zhang X M, Chu X L, Wang Q Y 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1685 (in Chinese)[黄小军, 彭翰生, 魏晓峰, 王晓东, 曾小明, 周凯南, 郭仪, 刘兰琴, 王道, 朱启华, 林东晖, 唐晓东, 张小民, 楚晓亮, 王清月 2005 强激光与粒子束 **17** 1685]
- [5] Umstadter D 2001 *Physics Plasmas* **8** 177
- [6] Wharton K B, Boley C D, Komashko A M, Rubenchik A M, Zweiback J, Crane J, Hays G, Cowan T E, Ditmire T 2001 *Phys. Rev. E* **64** 02540121
- [7] Peng H S 2006 *Chinese Journal of Lasers* **33** 721 (in Chinese) [彭翰生 2006 中国激光 **33** 721]
- [8] Li W C, Wang Z H, Liu C, Teng H, Wei Z Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124210 (in Chinese) [李伟昌, 王兆华, 刘成, 滕浩, 魏志义 2011 物理学报 **60** 124210]
- [9] Chvykov V, Rousseau P, Reed S, Kalinchenko G, and Yanovsky V 2006 *Opt. Lett.* **31** 1456
- [10] Liu C, Wang Z H, Li W C, Liu F, Wei Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7036 (in Chinese) [刘成, 王兆华, 李伟昌, 刘峰, 魏志义 2010 物理学报 **59** 7036]
- [11] Lévy A, Ceccotti T, Oliveira P D, Réau F, Perdrix M, Quéré F, Monot P, Bougeard M, Lagadec H, Martin P 2007 *Opt. Lett.* **32** 310
- [12] Yanovsky Y, Felix C, Mourou G 2002 *Appl. Phys. B* **74** S181
- [13] Homoeille D, Gaeta A L, Yanovsky V, Mourou G 2002 *Opt. Lett.* **27** 1646
- [14] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, Zhang Q, Teng H, Wei Z Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 3194
- [15] Kiriya H, Mori M, Nakai Y, Yamamoto Y, Tanoue M, Akutsu A, Shimomura T, Kondo S, Kanazawa S, Daido H, Kimura T, Miyanaga N 2007 *Opt. Lett.* **32** 2315
- [16] Ross I N, Matousek P, Towrie M, Langley A J, Collier J L 1997 *Opt. Commun.* **114** 125
- [17] Yoshida H, Ishii E, Kodama R, Fujita H, Kitagawa Y, Izawa Y, Yamanaka T 2003 *Opt. Lett.* **28** 257
- [18] Zeng S G, Zhang B, Dan Y Q, Sui Z, Sun N C 2010 *Opt. Commun.* **283** 4054
- [19] Wang Z H, Liu C, Shen Z W, Wei Z Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 319
- [20] Ren H Y, Qian L J, Zhu H Y 2010 *Opt. Exp.* **218** 12948
- [21] Hiromitsu K, Mori M, Yoshiki N 2010 *Appl. Opt.* **49** 2105
- [22] Bagnoud V, Zuegel J D, Forget N, Blanc C L 2007 *Opt. Exp.* **15** 5504
- [23] Xu Y, Leng Y X, Lin L H, Wang W Y, Huang Y S, Li R X 2010 *Chinese Optics Letters* **8** 123
- [24] Xiao Y Z, Maywar D N, Agrawal G P 2011 *JOSAB* **28** 1685
- [25] Yu J, Yuan S, Gao J Y, Sun L Z 2001 *JOSA A* **18** 2153

# Theoretical analysis on scanning spectral filter method for signal-noise-ratio improvement in femtosecond laser system\*

Ma Aai-Ru<sup>1)2)4)‡</sup> Sui Zhan<sup>3)†</sup> Feng Guo-Ying<sup>2)</sup> Sun Nian-Chun<sup>2)</sup>  
Wang Yi-Shan<sup>4)</sup> Zhang Bin<sup>2)</sup> Chen Jian-Guo<sup>2)</sup>

1) ( College of Physics and Chemistry, Xihua University, Chengdu 610064, China )

2) ( College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China )

3) ( Research Center of Laser Fusion CAEP, Mianyang 621900, China )

4) ( Xi'an Institute of Optics and precision Mechanics, state Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian 710119, China )

( Received 27 August 2011; revised manuscript received 2 December 2011 )

## Abstract

A scanning spectral filter method to improve the signal-noise-ratio in the femtosecond chains is proposed by using the characteristic that the instantaneous frequency varies with the time approximately linearly for the chirped pulse in the time-frequency domain. The scanning spectral filtering for reducing the amplification of spontaneous emission (ASE) intensity is analyzed in the time-frequency domain by using the Short-Time Fourier Transform method. The results show that the pulse contrast can be improved by two orders, and the transmission efficiency of the chirped pulse can exceed 90% when the synchronizing time jitter ranges from  $-2\text{ps}$  to  $2\text{ps}$  and the chirp rate  $p$  from  $0.9C/T^2$  to  $1.10C/T^2$ . Adopting the cascaded scanning filter to improve the pulse contrast is investigated too, which can improve the pulse contrast effectively. The great advantage of this novel nonlinear spectral filter technology is high energy and high peak intensity femtosecond chains for it filters out the ASE in the near field in temporal domain.

**Keywords:** ultrafast optics, ultrafast technology, spectral scanning filtering, short time fourier transform

**PACS:** 42.60.Rm, 42.65.Re

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. SKLST201007).

† E-mail: suizhan2011@yahoo.cn

‡ E-mail: zairu-sima@163.com