

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0152-03

SPIDER 光谱相位干涉仪的实现及相关理论分析

何铁英^{1,2}, 柴路¹, 王清月¹, 张志刚¹

(天津大学¹精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室 光电信息技术科学教育部重点实验室;²理学院, 天津 300072)

摘要 建立了光谱相位相干直接电场重建法(SPIDER)测量飞秒脉冲相位的实验装置,并对一台啁啾镜色散补偿的掺钛蓝宝石飞秒激光器输出脉冲的光谱相位进行了实际测量。基于 SPIDER 装置中 BBO 晶体的光谱滤波效应的理论模型,计算了不同厚度 BBO 晶体的和频效率带宽,确定了对应不同待测脉冲宽度, BBO 晶体应选择的厚度范围。

关键词 光谱相位相干; 光谱剪切; 超短脉冲测量; 光谱滤波

中图分类号 缺

文献标识码 A

Realization and Analysis for a SPIDER Apparatus

HE Tie-ying^{1,2}, CHAI Lu¹, WANG Qing-yue¹, ZHANG Zhi-gang¹

¹Ultrafast laser laboratory, School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information and Technical Science, Chinese Ministry of Education, ²School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract This paper demonstrated the experiment results for characterizing femtosecond pulses from a Ti:sapphire oscillator with a SPIDER apparatus. The model of spectral filter of the nonlinear crystal in a SPIDER apparatus has been constructed. The relationship between the bandwidth of the conversion efficiency of BBO crystal and the crystal thickness has been calculated. The choice range of the BBO thickness adapting to the different widths of pulses has been discussed.

Key words SPIDER; spectral filter; ultrashort pulse measuring; spectral shear

1 引言

最近十年来,随着飞秒激光技术的不断发展,大大促进了脉冲测量技术的提高。一些新的飞秒脉冲相位测量技术随之产生,其中具有代表性的是:频率分辨光开关法(FROG)及光谱相位干涉直接电场重建法(SPIDER)^[1]。两者相比较,SPIDER 有以下一些优点:1)其还原算法不需迭代,因此具有极短的测量时间,这一特点对于利用空间光调制器(SLM)进行啁啾补偿的实时反馈控制是极其有利的^[2-4];2)可以测量具有超过一个倍频程的超宽带的窄脉冲。本文报道我们自建的光谱相位相干直接电场重建法测量飞秒脉冲相位的实验装置,并用该装置对一台啁啾镜色散补偿的掺钛蓝宝石飞秒激光器输出脉冲的光谱相位进行了实际测量。基于 SPIDER 装置中 BBO 晶体的光谱滤波效应的理论模型,计算了不同厚度 BBO 晶体的和频效率带宽,确定了对应不同待测脉冲宽度的 BBO 晶体厚度的选择范围。

2 SPIDER 基本理论与装置的建立

在一台 SPIDER 干涉仪中,两个完全相同带有时间延迟 τ 的待测脉冲与一束带有强烈啁啾的展宽脉冲在 BBO 倍频晶体中进行频率上转换,从而在频域上产生一个大小为 Ω 的光谱剪切,由此得到的光谱剪切干涉谱包含了待测脉冲的全部光谱相位信息。对得到的光谱剪切干涉谱用相位还原算法进行处理,可以直接得到脉冲的光谱相位,再配合待测脉冲光谱的直接测量,可以快速还原出脉冲的时域电场。

BBO 晶体中的频率上转换是 SPIDER 设计过程中很重要的一部分,脉冲对与啁啾脉冲和频质量的好坏直接影响光谱想干的质量,从而影响 SPIDER 测量的精度,其作用过程如图 1 所示。

图 1 中,待测脉冲对与展宽脉冲在非线性晶体中进行频率上转换,非线性晶体的正确选择十分重要。非线性晶体的带宽必须足够大以保证被测脉冲的所有频率成分都参加了和频,即脉冲的相位成分

基金项目: 国家自然科学基金(60178007)、国防预研基金(03JW1401)、国家重点基础研究专项经费(G1999075201-2)、教育部高等学校骨干教师资助计划资助课题。

作者简介: 何铁英(1979-),男,天津大学硕士研究生,主要从事超快激光脉冲信号测量方面的研究。E-mail:hety2003@sohu.com

没有在和频过程中损失掉,也就是说要能够保证在不引入附加相位的情况下覆盖输入脉冲的所有频率成分。此外,和频信号与脉冲对及展宽脉冲自身的倍频信号的分离也是十分重要的。根据图 1 及以上原则,我们设计的 SPIDER 实验光路如图 2 所示;图 3 为实物照片。

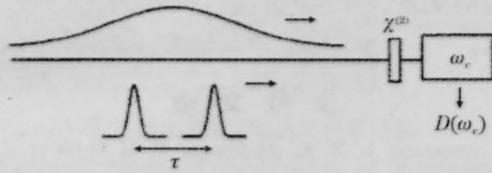


图 1 脉冲频率上转换示意图

Fig.1 Schematic of upconversion

3 实验结果与讨论

利用这台 SPIDER 装置,对从一台啁啾镜色散补偿掺钛蓝宝石振荡器输出的飞秒激光脉冲进行了测量,还原出的飞秒脉冲光谱相位,见图 4。由图可知在全光谱范围内光谱相位十分平坦,这说明该振荡器输出脉冲所含的啁啾较小。通过与干涉自相关

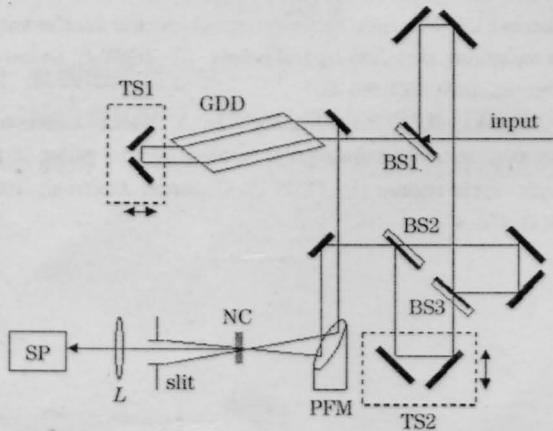


图 2 SPIDER 实验光路图

Fig.2 Schematic of the SPIDER

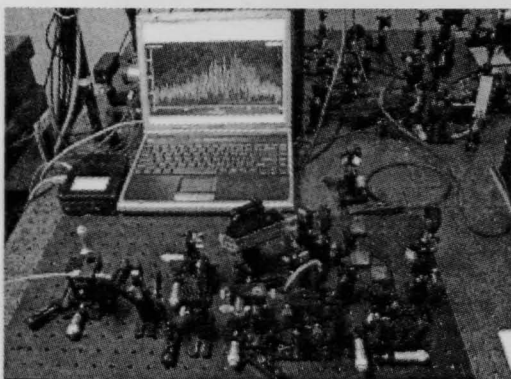


图 3 SPIDER 实验装置图

Fig.3 Experimental apparatus for SPIDER

曲线确定的脉冲宽度进行对比,可以验证该 SPIDER 装置的可靠性。

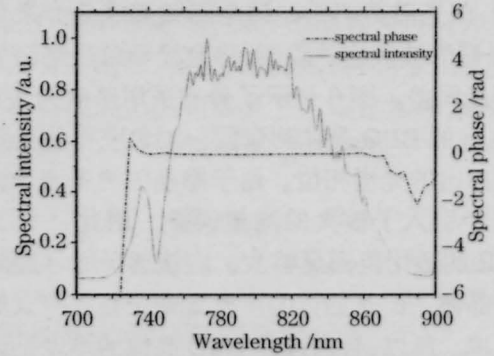


图 4 还原的光谱相位图

Fig.4 Spectral intensity and phase obtained with SPIDER

4 BBO 晶体光谱滤波的模型

经典的 SPIDER 光谱剪切干涉谱的信号^[6]具有如下的形式

$$D(\omega_c; \Omega, \tau) = \int d\omega |\tilde{S}^A(\omega - \omega_c) \cdot \{ [d\omega' \tilde{N}_i(\omega' - \omega) \tilde{E}(\omega')] + \tilde{S}_i(\omega) \tilde{E}(\omega) \}|^2, \quad (1)$$

考虑 I 类相位匹配,且令 $\omega = \omega_c/2$, 非线性晶体 BBO 作为光谱滤波器^[6]的基本表达式为

$$R(\omega_c, L) = Q(\omega_c) \frac{\omega_c^3}{n_c(\omega_c)} \left| \tilde{\chi}^{(2)} \left(\omega_c, \frac{\omega_c}{2}, \frac{\omega_c}{2} \right) \right|^2 \times \text{sinc}^2 \left[\Delta k \left(\omega_c, \frac{\omega_c}{2}, \frac{\omega_c}{2} \right) \frac{L}{2} \right] \quad (2)$$

则 SPIDER 实际测量信号可以表示为

$$S(\omega_c; L, \Omega, \tau) \propto R(\omega_c, L) D_{\text{SPIDER}}^{\text{SIG}}(\omega_c; \Omega, \tau) \quad (3)$$

根据公式(3),计算出不同厚度的 BBO 晶体带宽曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,随着晶体厚度 L 的增加, BBO 光谱滤波器的带宽向长波长漂移,呈明显变窄的趋势: $L=20 \mu\text{m}$ 时,其半高宽在 150 nm 以上,但当

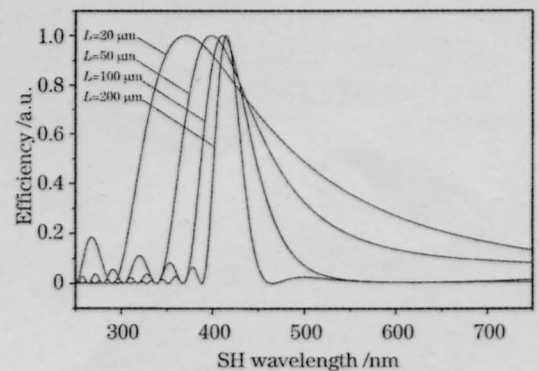


图 5 计算的不同厚度 BBO 晶体的带宽图

Fig.5 Calculated conversion efficiency vs SH wavelength for different thickness of BBO crystal

L 增大到 $200\ \mu\text{m}$ 时, 其半高宽下降到不足 $50\ \text{nm}$ 。SPIDER 测量技术以光谱仪测到的光谱剪切干涉谱为基础, 该光谱剪切干涉谱全部频谱成分如果受到 BBO 光谱滤波效应的限制, 将直接导致最终测量结果的明显误差。图 6 显示了分别采用厚度为 $1\ \text{mm}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的 BBO 晶体测量同一对象获得的光谱带宽和还原出的光谱相位。由于厚晶体的光谱滤波效应, 已经引入了极大的测量误差。因此, 为了使 SPIDER 的适用范围足够大, 应该选择尽可能薄的非线性晶体。但是晶体的厚度太薄又将导致太低的转换效率。所以, 合理选择 BBO 晶体的厚度是设计具有较宽适用范围的 SPIDER 装置的主要因素之一。根据可能测量的不同待测脉冲宽度以及能够测量飞秒激光振荡器输出脉冲能量水平的要求, 选择 $50\ \mu\text{m}$ 厚度的 BBO 晶体是合适的。

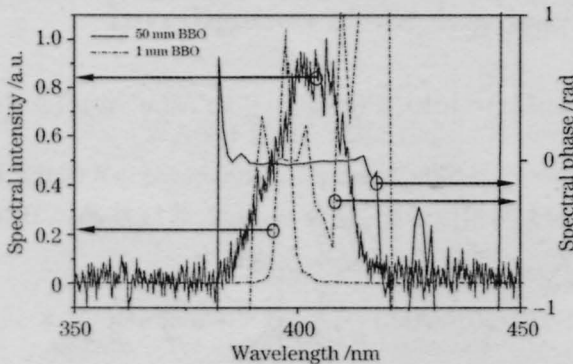


图 6 采用不同厚度的 BBO 晶体实测出的带宽和相应的光谱相位图

Fig.6 Actual bandwidth and spectral phase using BBO of different crystal thickness

5 结 论

研制出 SPIDER 光谱相位干涉仪, 并用该装置实际测量了由一台啁啾镜色散补偿的掺钛蓝宝石振荡器输出的脉冲光谱相位。建立了 SPIDER 测量装置中的非线性 BBO 晶体的光谱滤波效应模型, 从理论和实验上研究了 BBO 晶体的厚度与和频效率带宽的关系, 并由此确定出 BBO 晶体的最佳厚度取值。

参 考 文 献

- 1 M. E. Anderson, L. E. E. de Araujo, E. M Kosik *et al.*. The effects of noise on ultrashort -optical -pulse measurement using SPIDER[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**:S85-S93
- 2 N. Karasawa, L. Li, A. Suguro *et al.*. Optical pulse compression to 5.0 fs by use of only a spatial light modulator for phase compensation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**: 1742-1746
- 3 L. Xu, L. Li, N. Nakagawa *et al.*. Application of a spatial light modulator for programmable optical pulse compression to the sub-6-fs regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**: 1540-1542
- 4 L. Xu, N. Nakagawa, R. Morita *et al.*. Programmable chirp compensation for 6-fs pulse generation with a prism-pair-formed pulse shaper [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**: 893-899
- 5 C. Iaconis, I. A. Walmsley. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4):501-509
- 6 A. Baltuska, M. S. Pshenichnikov, D. A. Wiersma. Second-harmonic generation frequency-resolved optical gating in the single-cycle regime [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 459-478