

文章编号: 1672-8785(2024)11-0040-09

基于铌酸锂晶体的电光取样探测技术在近红外波段的频率响应和应用分析

王婧仪¹ 余健雄¹ 黄 彬¹ 刘 翔¹ 杜海伟^{1,2*}

(1. 南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063;

2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘 要: 电光取样探测(Electro-Optic Sampling, EOS)技术常用于探测宽带太赫兹辐射的电场时域波形, 随后也被用于探测近红外-中红外波段的少周期激光脉冲电场波形。该技术中电光晶体的性能直接影响其探测的性能和频率响应带宽。研究了基于铌酸锂晶体的 EOS 技术在近红外波段的频率响应特征和带宽, 并详细分析了该技术在探测近红外少周期激光脉冲中的应用, 特别是探测过程中引起的少周期激光脉冲的畸变规律(包括其中心频率和带宽的变化规律)。经研究发现, 在波长为 900~2500 nm 的近红外波段内, 该技术对含有 1.5 个振荡周期的少周期脉冲产生的测量误差依赖于晶体厚度和待测的激光波长。当晶体厚度为 10 μm 时, 产生的带宽和中心频率偏差在 1% 以内; 当晶体厚度为 100 μm 时, 产生的带宽最大偏差为 25%, 中心频率最大偏差为 10%。对于含有 2.5 个振荡周期的少周期脉冲, 产生的带宽和中心频率偏差明显减小。本文为实验中采用铌酸锂晶体 EOS 技术测量近红外波段少周期激光脉冲的电场波形提供了很好的理论参考。

关键词: 电光取样; 铌酸锂; 近红外; 少周期激光脉冲

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.11.006

The Frequency Response of Electro-Optic Sampling Detection Technique Based on the Lithium Niobate Crystal in Near-Infrared Band and Its Application Analyzation

WANG Jing-yi¹, YU Jian-xiong¹, HUANG Bin¹, LIU Xiang¹, DU Hai-wei^{1,2*}

(1. College of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang

Hangkong University, Nanchang 330063, China)

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(12064028); 江西省自然科学基金项目(20232BAB201045); 南昌航空大学研究生创新专项(YC2023-040)

作者简介: 王婧仪(2000-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹技术及其应用方面的研究。

***通讯作者:** E-mail: haiweidu@nchu.edu.cn

Abstract: Electro-optic sampling (EOS) is often used to detect electric field waveform in the time domain of wideband terahertz radiation, and then it is also used to detect few-cycle laser pulse electric field waveform in the near-infrared to mid-infrared band. In this technique, the performance of electro-optic crystal directly affects its detection performance and frequency response bandwidth. In this paper, the frequency response characteristics and bandwidth of EOS based on lithium niobate crystal in the near-infrared band are studied, and the application of this technology in detecting few-cycle laser pulses is analyzed in detail, especially the distortion of few-cycle laser pulses caused by the detection process (including the changes of its center frequency and bandwidth). It is found that in the near-infrared band of 900–2500 nm, the measurement error of the few-cycle pulse with 1.5 oscillation cycles depends on the crystal thickness and the laser wavelength to be measured. When the crystal thickness is 10 μm , the deviation between bandwidth and center frequency is less than 1%. When the crystal thickness is 100 μm , the resulting maximum deviation of bandwidth is 25% and the maximum deviation of center frequency is 10%. For the few-cycle pulse with 2.5 oscillation cycles, the deviation of bandwidth and center frequency is obviously reduced. This paper provides a good theoretical reference for measuring the electric field waveform of few-cycle laser pulses in near-infrared band by means of EOS crystal.

Key words: electro-optic sampling; lithium niobate; near-infrared; few-cycle laser pulse

0 引言

EOS 常用来探测宽带太赫兹脉冲电场时域波形。该技术以宽带频谱响应、较高的灵敏度以及简单的光路结构成为太赫兹领域一项重要的相干探测技术^[1-3]。EOS 基于线性泡克尔斯(Pockels)效应,即外加的电场使晶体产生双折射特性,通过测量入射的探测激光偏振态的改变来获得外加电场的大小^[4]。在实验中,通过用电动平移台改变探测光的光程来改变待测太赫兹脉冲与探测激光脉冲之间的时间延迟。对太赫兹脉冲的电场在时域逐点扫描,获得其电场时域波形,再通过傅里叶变换获得太赫兹脉冲频谱和相位信息^[5-6]。

EOS 中电光晶体的选择直接影响探测性能。太赫兹波段常用的电光晶体以碲化锌(ZnTe)晶体^[7]和磷化镓(GaP)晶体^[8]为代表。选用其他晶体(如硒化镓(GaSe)晶体和铌酸锂(LiNbO₃)晶体),则可能扩展 EOS 的探测带宽和灵敏度。铌酸锂晶体是一种性能优秀的非线性光学晶体,广泛应用于光通信、信息处理、集成光路、图像存储、谐波发生、倍频器件等方面^[9-11]。该晶体本身具有较大的电光系数^[12],因此可作为电光晶体应用于 EOS 技术。

随着激光技术的发展和 EOS 的逐步成熟,

有多个研究组将 EOS 用于探测近红外和中红外波段少周期激光脉冲电场波形。少周期激光脉冲就是含有几个光振荡周期的超短激光脉冲,其脉宽约为几飞秒,在原子分子物理、阿秒脉冲产生等强场物理领域有很重要的应用^[13-15]。据报道, Wu Q 等利用厚度为 30 μm 的 ZnTe 晶体作为电光晶体,将该技术的探测带宽从太赫兹波段扩展到 37 THz 的远红外波段^[16]。Kübler C 等利用 30 μm 厚的 GaSe 晶体作为电光晶体,将探测带宽扩展到邻近中红外波段的 120 THz (波长为 2.5 μm)^[17]。Li Q S 等人详细分析了不同厚度的该晶体在探测过程中引起的脉冲畸变规律^[18]。Keiber S 等采用基于 BBO 晶体的 EOS 技术将探测频率范围拓宽至 230 THz (波长为 1.3 μm)的近红外波段,并且发现探测波形的频谱分布与常用的光谱仪测量结果比较吻合^[19]。

改变电光晶体,则可能改变 EOS 技术的测量性能和响应带宽。本文研究了基于铌酸锂晶体的 EOS 技术在近红外波段的频率响应特征,分析了该技术探测近红外少周期激光脉冲的性能,然后详细讨论了晶体厚度对探测性能的影响以及引起的激光脉冲畸变,获得了脉冲带宽和中心频率的变化规律。

1 基于铌酸锂晶体的 EOS 技术在近红外波段的频率响应

由于晶体的色散特性, 其折射率和吸收系数与入射光频率密切相关。铌酸锂晶体在紫外到中红外(0.35~5.0 μm)波段有较宽的透明窗口, 其折射率与波长的关系可用 Sellmeier 方程表示^[20]:

$$n_o^2 = 1 + \frac{2.6734\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01764} + \frac{1.2290\lambda^2}{\lambda^2 - 0.05914} + \frac{12.614\lambda^2}{\lambda^2 - 474.6} \quad (1)$$

$$n_e^2 = 1 + \frac{2.9804\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02047} + \frac{0.5981\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0666} + \frac{8.9543\lambda^2}{\lambda^2 - 416.08} \quad (2)$$

式中, n_o 为寻常光折射率, n_e 为非常光折射率, λ 为入射光波长(单位为 μm)。该晶体在可见光-近红外波段的折射率与波长的关系如图 1 所示。可以看出, 折射率随着光波长的增加而减小, 寻常光与非常光折射率存在一定差异。

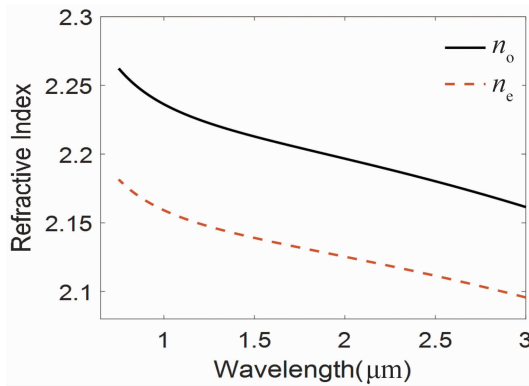


图 1 铌酸锂晶体在可见光-近红外波段的折射率随波长的变化关系

当待测的少周期激光脉冲与探测激光脉冲同时在电光晶体中传播时, 少周期脉冲的相速度和探测激光脉冲的群速度之间的不匹配决定了电光取样探测的频率响应特征, 从而确定了 EOS 技术在频域的探测带宽。其响应函数可表示为^[21]

$$G(f, d) = \frac{2}{1 + n(f) + i\kappa(f)} \frac{1}{d} \int_0^{d+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{[i(kz - 2\pi ft)]\} \delta(z - v_g f) \exp(-\alpha z) dz \quad (3)$$

式(3)是一个关于待测脉冲各频率分量 f 和晶体厚度 d 的积分关系, 用一个 δ 函数描述探测激光各分量在晶体中传播的瞬态过程; n 为晶体折射率, κ 为其消光系数, α 为电光晶体对入射的待测脉冲的吸收系数, 时域积分区间为整个脉冲电场(即 $-\infty$ 到 $+\infty$), 空间传播距离的积分范围为晶体厚度 0 到 d 。由 δ 函数含义, 可将式(3)化简为

$$G(f, d) = \frac{2}{1 + n(f) + i\kappa(f)} \frac{1}{d} \int_0^d \exp[i2\pi f z (\frac{1}{v_{ph}} - \frac{1}{v_g})] \exp(-\alpha z) dz \quad (4)$$

式中, 探测激光在电光晶体表面被部分反射, 其余部分折射进入电光晶体, 振幅透射系数为

$$A_{trans}(f) = \frac{2}{1 + n(f) + i\kappa(f)}, \quad v_{ph} \text{ 为待测少周期脉冲的相速度 } v_{ph}(f) = \frac{c}{n(f)}, \quad v_g \text{ 为探测激光在晶体中传播的群速度 } v_g = \frac{c}{n} (1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda}).$$

由于不同晶体的色散特性不同, 采用不同波长的探测激光、不同厚度的晶体时的频率响应不同。晶体厚度一般较薄, 且铌酸锂晶体对近红外光的吸收系数很小^[24], 因此忽略晶体对近红外少周期激光脉冲的吸收(取 $\alpha=0$)。

首先, 选用探测激光波长为 800 nm(如钛蓝宝石飞秒激光)时, 利用数值积分计算式(4)。选取四种不同的晶体厚度(d 为 50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm), 可得到图 2 所示的 EOS 技术在近红外波段的频率响应曲线。可以看出, 不同厚度晶体对各频率的响应是不同的, 电光响应曲线同时存在多个响应强度为 0 的频率。这对待测的宽带激光脉冲的响应是不利的, 在测量过程中会引起脉冲变化^[22]。

选择探测激光波长为 1030 nm(如掺镱光纤飞秒激光)时, 对应的频率响应曲线如图 3 所示。对比图 2 与图 3 后发现, 在相同晶体厚度下, 波长为 1030 nm 的探测激光的频率响应曲线中零点较少, 因此对近红外波段的宽带响应更好。在后续计算中, 采用 1030 nm 激光作为探

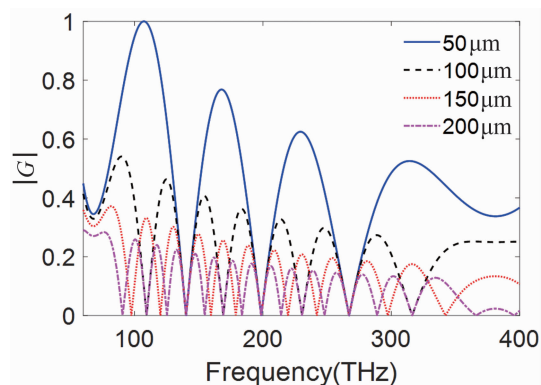


图 2 探测光波长为 800 nm 时基于四种不同厚度 (50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm) 铌酸锂晶体的电光探测技术在近红外波段的频率响应特征曲线

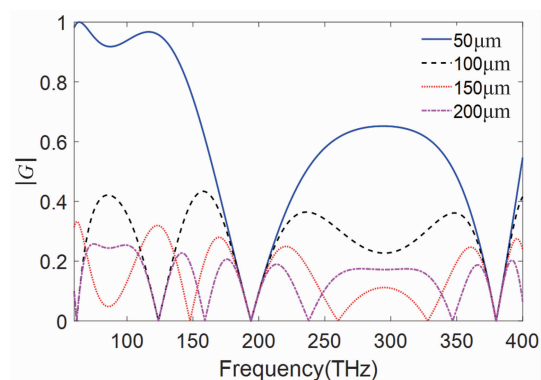


图 3 探测光波长为 1030 nm 时基于四种不同厚度 (50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm) 铌酸锂晶体的电光探测技术在近红外波段的频率响应特征曲线

测激光脉冲。上述探测激光波长 800 nm 和 1030 nm 是目前常用的超短激光和光纤激光系统所提供的激光参数。若用其他波长的探测激光, 则采用类似的计算方法即可获得对应的频率响应曲线。

2 EOS 测量近红外少周期激光脉冲波形的性能分析

对于少周期激光脉冲, 中心频率(或中心波长)和带宽是重要的基本特征。其电场可表示为

$$E(t) = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2}\right) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (5)$$

式中, A_0 表示振幅; T_0 是与脉冲半高全宽 τ 有关的时间参数, 满足 $T_0 = \frac{\tau}{2\sqrt{\ln 2}}$; f_0 为脉

冲的中心频率; φ_0 为脉冲的初始相位。

采用 EOS 技术探测少周期激光脉冲电场波形的过程可以看作是一个频域滤波器。待测的少周期激光脉冲经过这个滤波器后对频谱产生影响, 引起中心频率变化、带宽展宽或变窄等变化。因此可在频域上对该探测过程进行分析。经过傅里叶变换可获得待测少周期脉冲的频域分布:

$$E_{in}(f) = \mathcal{F}\{E_m(t)\} \quad (6)$$

式中, $\mathcal{F}$ 为傅里叶变换运算。在频域范围内, 探测到的信号为输入信号的频谱与电光取样探测响应函数的乘积, 即

$$E_{out}(f) = E_{in}(f) \cdot G(f) \quad (7)$$

最后通过傅里叶反变换获得探测后的脉冲时域波形:

$$E_{out}(t) = \mathcal{F}^{-1}\{E_{out}(f)\} \quad (8)$$

式(6)~式(8)给出了计算少周期激光脉冲经过电光取样探测后的时域和频域的具体方法。通过改变晶体厚度、激光脉冲宽度以及探测激光波长等参数, 利用傅里叶正、反变换即可得到探测前后的脉冲时域波形和频谱分布, 经过对比可分析铌酸锂晶体在该探测技术中的性能。

由图 2 和图 3 可知, 电光探测频率响应曲线受晶体厚度的影响十分明显。设脉宽为 3 fs、中心频率为 333 THz 的近红外少周期激光脉冲(波长为 900 nm)为待测信号, 利用式(6)~式(8)即可计算出探测后的激光脉冲波形和频谱分布。经过不同厚度 (50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm) 铌酸锂晶体探测到的脉冲时域波形和对应的频谱曲线分别如图 4(a)和图 4(b)所示。可以看出, 探测后激光脉冲受晶体厚度影响, 时域波形没有大的变化, 频谱的中心频率和带宽随晶体厚度的不同而不同。

保持其他参数不变, 设待测少周期激光脉冲中心频率分别为 200 THz(中心波长为 1500 nm)和 150 THz(中心波长为 2000 nm), 重复上述计算过程, 得到类似结果(见图 5 与图 6)。这三组数据显示, 当少周期激光脉冲波长不同时, 该技术造成的中心频率的偏移

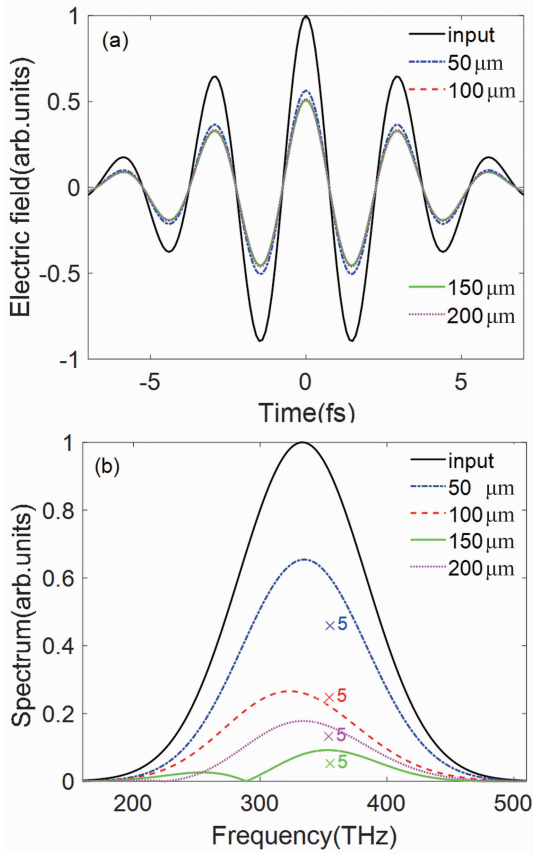


图4 探测激光波长为1030 nm,待测少周期激光脉冲中心波长为900 nm,脉宽含1.5个光学振荡周期且晶体厚度分别为50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm 时的激光脉冲:(a)时域波形变化;(b)频谱分布

变化有所不同(见图5(b)与图6(b))。当晶体具有不同的厚度时,激光脉冲会发生不同的畸变,即晶体的厚度直接影响探测后的脉冲中心频率和带宽;当输入少周期脉冲的中心频率相对较低时(如图6中的150 THz),检测后的脉冲失真较小,中心频率和带宽的变化不明显;在较厚的晶体中,由于厚度为200 μm 的铌酸锂晶体的EOS曲线在这一波长范围内的响应强度大于厚度为150 μm 的铌酸锂晶体,时域波形变化无明显差异。

当输入少周期脉冲的中心频率较高时(如图4中的333 THz),检测后的脉冲畸变较大且明显,因此需要系统地分析晶体厚度不同、待测激光脉冲波长不同时的脉冲变化规律,特别是中心频率和脉宽的变化规律。为了更好地表征该探测技术对探测结果的影响,将

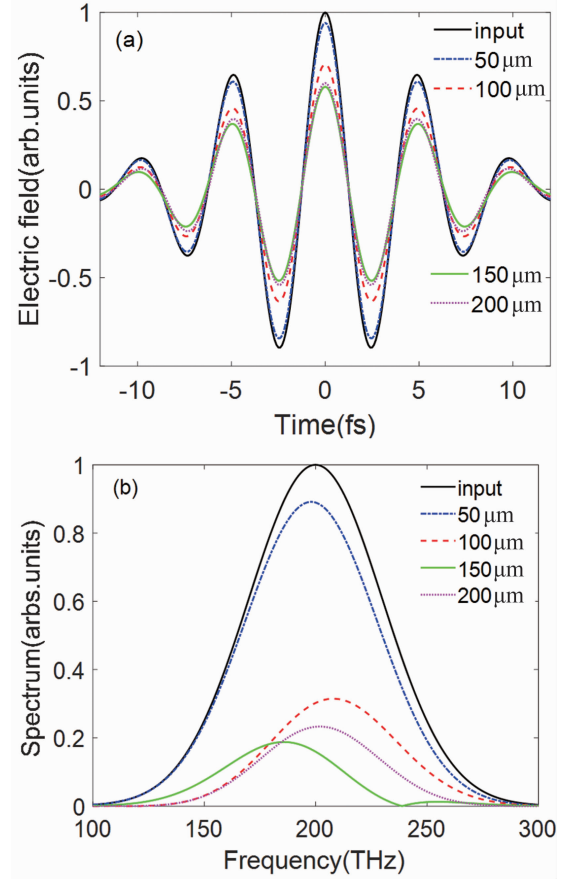


图5 探测激光波长为1030 nm,待测少周期激光脉冲中心波长为1500 nm,脉宽含1.5个光学振荡周期且晶体厚度分别为50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm 时的激光脉冲:(a)时域波形变化;(b)频谱分布

带宽改变量百分比函数 ΔD 定义为

$$\Delta D = \frac{D_{\text{after}} - D_{\text{before}}}{D_{\text{before}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, D_{after} 为探测后的带宽, D_{before} 为待测的少周期脉冲的带宽。将中心频率改变量百分比函数 Δf 定义为

$$\Delta f = \frac{f_{\text{after}} - f_{\text{before}}}{f_{\text{before}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, f_{after} 为探测后的中心频率, f_{before} 为待测少周期脉冲的中心频率。利用上述两个百分比函数定量表征经过EOS测量的少周期激光脉冲变化。

在近红外波段(900~2500 nm)改变待测的激光脉冲波长,重复上述计算过程,得到了不同待测激光脉冲波长与铌酸晶体厚度时脉冲带宽和中心频率的变化规律(见图7)。

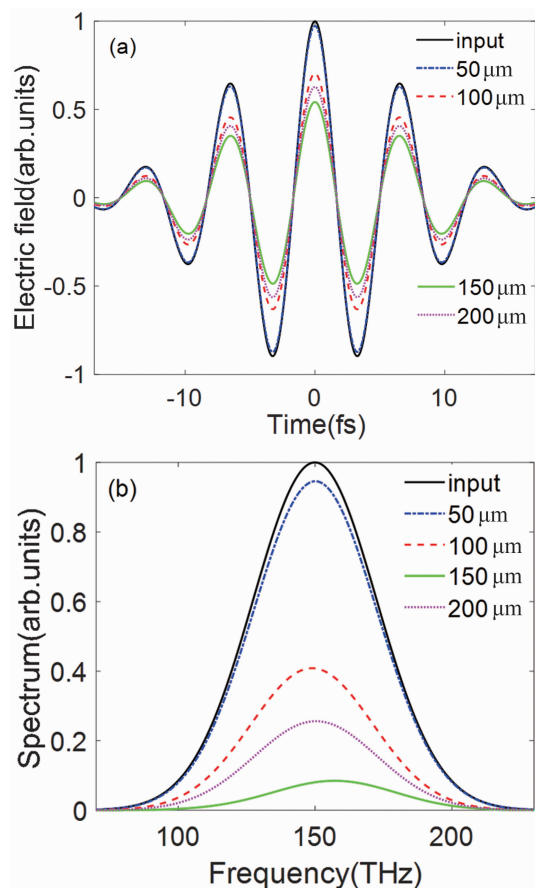


图 6 探测激光波长为 1030 nm, 待测少周期激光脉冲中心波长为 2000 nm, 脉宽含 1.5 个光学振荡周期且晶体厚度分别为 50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm 时的激光脉冲:(a)时域波形变化;(b)频谱分布

可以看出, 在分析的近红外范围内, 这种脉冲变化受晶体厚度影响明显。晶体越薄, 带宽和中心频率的变化越小, 即探测性能越好。使用厚度为 10 μm 的晶体时产生的带宽和中心频率的偏差小于 1%, 脉冲畸变基本可以忽略不计。随着晶体厚度的增加, 带宽和中心频率的偏差增大。当晶体厚度为 100 μm 时, 带宽偏差最大为 25%, 中心频率偏差在 10% 以内; 当厚度为 200 μm 时, 对少周期脉冲产生的带宽偏差最大为 38%, 中心频率的偏差为 13%。待测激光波长增加时, 偏差逐渐变小。因此, 采用基于较薄(厚度小于等于 100 μm) 铌酸锂晶体的 EOS 技术测量近红外波段少周期脉冲时, 探测性能表现良好。该方法对待探测脉冲产生的畸变主要表现为脉

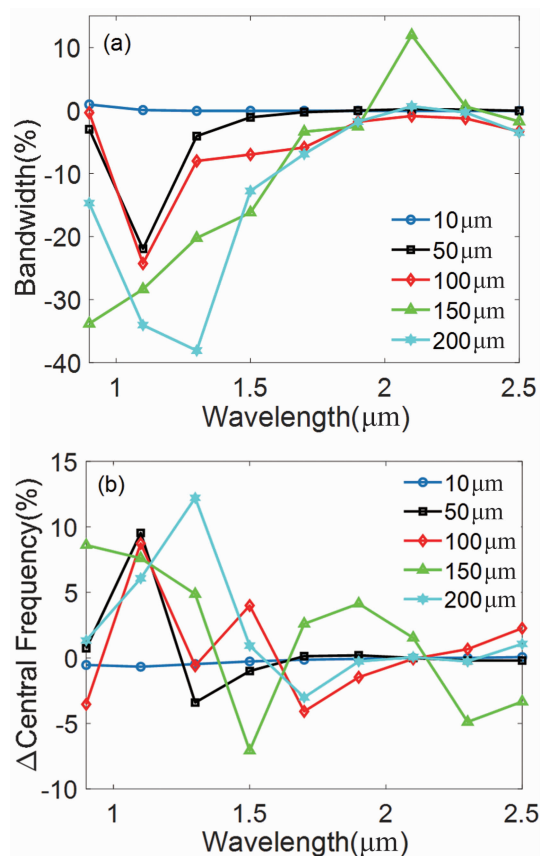


图 7 使用不同厚度的晶体并采用 EOS 技术探测近红外波段少周期激光脉冲:(a)脉冲带宽改变量的百分比函数;(b)中心频率改变量的百分比函数

冲变窄和中心频率偏移。

近红外波段的电光取样探测的频率响应受到晶体吸收和色散等影响, 频域响应曲线不均匀, 从而对不同波长的少周期激光脉冲产生不同影响。响应曲线越光滑, 带宽和中心频率产生的偏差越小。当改变激光波长时, 由于探测技术对各频率分量灵敏度不一样, 测量结果会产生不同程度的畸变。

在上述计算中, 分析的待测激光脉冲为含有 1.5 个光学振荡周期的近红外少周期激光脉冲。增加激光脉冲包含的光学振荡周期的数目, 令半高全宽 τ 为光学振荡周期的 2.5 倍, 即增加少周期激光脉冲宽度, 重新计算使用不同厚度晶体时待测的少周期激光脉冲波长与带宽变化、中心频率变化的百分比曲线(见图 8)。

对比图 7 与图 8 可知, 待测激光脉冲脉宽

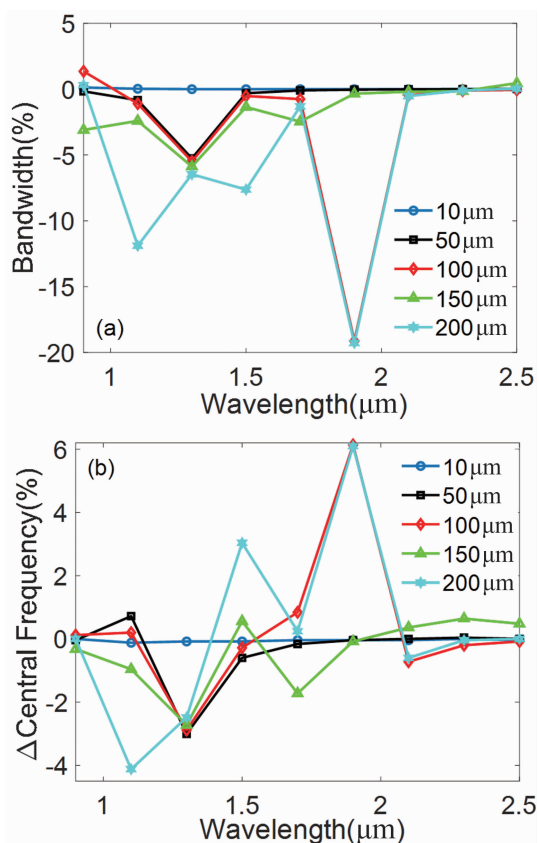


图 8 增加激光脉冲包络为 2.5 个光学振荡周期后的近红外波段少周期激光脉冲: (a) 带宽改变量的百分比函数; (b) 中心频率改变量的百分比函数

增加时, 受 EOS 的影响略有不同。对于含有 2.5 个光学振荡周期的激光脉冲, 除了 1900 nm 波长的探测结果外, 探测导致的带宽偏差缩小至 12% 以内, 中心频率偏差小于 6%。随着晶体厚度的变化, 对应的探测结果发生改变。当晶体厚度小于 50 μm 时, 中心频率和带宽的偏差均在 5% 以内。这是由于含有 2.5 个振荡周期的激光脉冲与包含 1.5 个振荡周期的激光脉冲相比, 脉冲变长、谱宽变窄, 因此探测技术对脉冲各频率分量的影响变小, 导致脉冲变化变小。

BBO 晶体同样可以作为电光晶体并用在近红外少周期激光脉冲的探测中^[23]。对于激光包络中含 1.5 个光学振荡周期的少周期脉冲, 薄 BBO 晶体在探测中具有良好的探测性能。与 BBO 晶体的探测性能相比, 铌酸锂晶体的性能在待探测波长大于 1700 nm 的少周期

脉冲中表现良好, 带宽和中心频率的畸变误差在 3% 以内, 同厚度的铌酸锂晶体的探测效果优于 BBO 晶体。两者对比, BBO 晶体在近红外短波段的探测效果更好, 铌酸锂晶体在近红外长波段的探测效果更好。

晶体的电光响应强度还受到晶体电光系数的影响。晶体的电光系数一般依赖于激光频率, 而铌酸锂和 BBO 晶体的电光系数 r_{22} 随频率变化不明显, 可认为是一个常数, 且在近红外范围内, $r_{22(\text{BBO})} < r_{22(\text{LN})}$ ^[24]。其中, 铌酸锂晶体的电光系数 $r_{22(\text{LN})} = 6.40 \text{ pm/V}$ ^[12], BBO 晶体的电光系数 $r_{22(\text{BBO})} = 2.34 \text{ pm/V}$ ^[25-26]。在 EOS 技术中, 作为电光晶体的铌酸锂的响应强度优于 BBO 晶体。通常铌酸锂晶体掺杂可提高该晶体的电光系数等光学特性^[27]。如果能够调节晶体中掺杂的物质和相关比例, 改变其电光取样频率响应性能, 则可能提高和拓宽探测准确度和带宽范围。

3 讨论与总结

本文研究了基于铌酸锂晶体的 EOS 技术在近红外波段的频率响应特征和带宽, 详细分析了该技术在探测近红外波段的少周期激光脉冲中的频谱性能以及产生的脉冲畸变规律, 包括使用不同厚度晶体导致的激光脉冲带宽和中心频率的变化规律。研究表明, 在近红外波段, 该技术在探测过程中产生的脉冲带宽和中心频率的测量偏差与晶体厚度密切相关。对于含有 1.5 个振荡周期的少周期激光脉冲, 当晶体厚度为 10 μm 时, 带宽和中心频率的变化均在 1% 以内, 测量误差可以忽略不计; 当晶体厚度为 100 μm 时, 带宽偏差约为 25%, 中心频率偏差为 10%; 当晶体厚度为 200 μm 时, 带宽和中心频率的偏差均较大。对于含有 2.5 个振荡周期的少周期激光脉冲, 这一探测偏差均明显减小。当晶体厚度为 200 μm 时, 带宽的探测偏差小于 20%, 中心频率的偏差小于 6%; 当晶体厚度小于 50 μm 时, 其探测偏差基本在 5% 以内。因此, 在近红外波段, 采用合适的厚度能够完成对少周期激光脉冲电场比

较精确的测量和时域波形的重建。与 BBO 晶体相比, 铌酸锂晶体对中心波长位于近红外波段长波部分的少周期脉冲探测性能更优。

综上所述, 通过基于铌酸锂晶体的 EOS 技术测量近红外少周期激光脉冲电场波形具有很好的可行性, 采用较薄的晶体可改善探测结果。该技术能够获得激光脉冲的电场时域波形, 进而获得其载波包络相位并通过傅里叶变换获得其频谱分布, 为少周期激光脉冲驱动的应用技术提供帮助。

参考文献

- [1] 董家蒙, 彭晓昱, 马晓辉, 等. 超宽带太赫兹时域光谱探测技术研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(5): 1277–1283.
- [2] Hebling J, Yeh K L, Hoffmann M C, et al. High-Power THz Generation, THz Nonlinear Optics, and THz Nonlinear Spectroscopy [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, **14**(2): 345–353.
- [3] 薛冰, 范文慧, 刘海亮, 等. 基于超快飞秒激光技术的太赫兹波产生与探测 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 1–5.
- [4] Valdmanis J A, Mourou G A, Gabel C W. Subpicosecond electrical sampling [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, **19**: 664–667.
- [5] Wu Q, Zhang X C. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams [J]. *Appl Phys Lett*, 1995, **67**(24): 3523–3525.
- [6] Keiber S, Shawn S, Alexander S, et al. Electro-optic sampling of mid-to-near-infrared waveforms [C]. San Jose: 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2015.
- [7] Khenata R, Bouhemadou A, Sahnoun M, et al. Electronic and optical properties of ZnS, ZnSe and ZnTe under 12 pressure [J]. *Comp Mater Sci*, 2006, **38**(2): 29–38.
- [8] Wu Q, Zhang X C. Terahertz broadband GaP electro-optic sensor [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **70**(14): 1784–1786.
- [9] 孙军, 郝永鑫, 张玲, 等. 铌酸锂晶体及其应用概述 [J]. *人工晶体学报*, 2020, **49**(6): 947–964.
- [10] 高博锋, 任梦昕, 郑大怀, 等. 铌酸锂的毫毫之路: 历史与若干进展 [J]. *人工晶体学报*, 2021, **50**(7): 1183–1199.
- [11] 吴晓君, 郭丰玮, 马景龙, 等. 基于倾斜波前技术的高能强场太赫兹辐射脉冲源 [J]. *中国激光*, 2019, **46**(6): 0614008.
- [12] Donald G J, William H C, Glenn L, et al. Some optical properties of KTP, LiIO₃, and LiNbO₃ [J]. *J Quantum Electron*, 1988, **24**(11): 2231–2237.
- [13] Hoffmann M C, Fulop J A. Intense ultrashort terahertz pulses: generation and applications [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2011, **44**: 083001.
- [14] Ghimire S, Ndabashimiye G, DiChiara A D, et al. Strong-field and attosecond physics in solids [J]. *J Phys B: At Mol Opt*, 2014, **47**: 204030.
- [15] Hohenleutner M, Langer F, Schubert O, et al. Real-time observation of interfering crystal electrons in high-harmonic generation [J]. *Nature*, 2015, **523**(7562): 572–575.
- [16] Wu Q, Zhang X C. Free-space electro-optics sampling of mid-infrared pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(10): 1285–1286.
- [17] Kübler C, Huber R, Tübel S, et al. Ultrabroadband detection of multi-terahertz field transients with GaSe electro-optic sensors: Approaching the near infrared [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(16): 3360–3362.
- [18] Li Q S, Wang J Y, Sun C M, et al. Frequency response of terahertz electro-optic sampling detection technology with thin GaSe crystal [J]. *Phys Scr*, 2023, **98**: 125942.
- [19] Keiber S, Sederberg S, Schwarz A, et al. Electro-optic sampling of near-infrared waveforms [J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(3): 159–162.
- [20] Zelmon D E, Small D L, Jundt D. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. % magnesium oxide-doped lithium niobate [J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, **14**(12): 3319–3322.
- [21] Casabuoni S, Schlarb H, Schmidt B, et al. Nu-

- merical studies on the electro-optic detection of femtosecond electron bunches [J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2008, **11**(7): 072802.
- [22] 杜海伟, 龙江. 太赫兹空气相干探测技术引起的太赫兹脉冲畸变 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(5): 844–849.
- [23] 王婧仪, 李强爽, 孙长明, 等. 基于 BBO 晶体的 EOS 在近红外少周期激光脉冲探测中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, **61**(17): 1714001.
- [24] Abarkan M, Salvestrini J P, Fontana M D, et al. Frequency and wavelength dependences of electro-optic coefficients in inorganic crystals [J]. *Appl Phys B*, 2003, **76**: 765–769.
- [25] 尹鑫, 刘耀岗, 程瑞平. β -BBO 晶体的电光性能 [J]. *应用激光*, 1995, **6**: 257–258.
- [26] Nakatani H, Bosenberg W, Cheng L K, et al. Linear electro-optic effect in barium metaborate [J]. *Appl Phys Lett*, 1988, **52**(16): 1288–1290.
- [27] 崔娇, 钟海涛, 李文灿, 等. 掺氮铌酸锂薄膜的制备及基本物性研究 [J]. *人工晶体学报*, 2016, **45**(5): 1266–1270.