

啁啾脉冲互相关法探测 THz 辐射^{*}

沈京玲^{1)†} 张存林¹⁾ 胡 颖¹⁾ S. P. Jamison²⁾

¹⁾ 首都师范大学物理系, 北京 100037)

²⁾ Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow G4 0NG, United Kingdom)

(2003 年 7 月 8 日收到 2003 年 11 月 21 日收到修改稿)

通过理论分析指出啁啾脉冲光谱仪探测法探测 THz 辐射存在时间分辨率极限, 实验也得到了与理论分析相一致的结果. 提出使用啁啾脉冲互相关法探测 THz 辐射, 给予了一定的理论分析, 实验结果证明此方法探测 THz 辐射的时间分辨率与传统的时间扫描延迟方法的时间分辨率相当.

关键词: 啁啾脉冲, THz 辐射, 互相关

PACC: 4280W, 4265, 4255T

1. 引 言

由于超快激光技术的发展, 对 THz (10^{12} Hz) 频段的电磁辐射的产生和探测近 10 年来有了飞跃发展. 先后出现了基于光整流机理和天线机理的晶体 THz 辐射发射器、能够辐射连续的或脉冲的 THz 波半导体、气体和自由电子激光器. 在探测方面, 则使用 ZnTe 等电光晶体作为 THz 辐射探测器, 利用探测激光脉冲通过时电光效应测量 THz 电场的时域波形. 通常的方法是由探测脉冲对抽运脉冲的时间延迟来逐点测量, 最终获得 THz 辐射的整体时间波形. 此方法被称为 THz 时间扫描技术, 它的时间分辨率高、信噪比高, 被广泛应用. 但是, THz 时间扫描技术需要由平移台的移动逐点进行测量, 因此测量速度慢, 无法满足有些场合快速、甚至实时测量的要求. 啁啾脉冲(chirped pulse)THz 辐射探测技术弥补了传统 THz 时间扫描技术的测量速度缺陷^[1]. 该技术将探测脉冲的脉宽由几十飞秒展宽至几十皮秒, 通过探测晶体及偏振器后, 各啁啾分量的光强均被 THz 脉冲的电场所调制, 由光谱仪将啁啾脉冲在空间展开, 用 CCD 即可一次记录下 THz 辐射的时间波形. 这种探测技术原则上可以记录单脉冲 THz 波形, 而并非多个脉冲的取样波形, 在许多场合极其必要^[2].

然而, 理论和实验都表明, 这种啁啾脉冲加光谱仪的探测方法存在时间分辨率极限^[3], 所得到的 THz 波形或多或少已经发生畸变^[4,5], 从而限制了某些应用. 本文将提出一种新的 THz 探测方法——啁啾脉冲互相关法(以下简称互相关法)探测 THz 辐射. 此方法既具有单脉冲法一次测量 THz 波形的优点, 又具有 THz 时间扫描技术的高分辨率. 本文将首先分析啁啾脉冲光谱仪探测法(光谱仪法)的时间分辨率问题, 然后介绍互相关法测量 THz 辐射时域谱技术.

2. 光谱仪法及其时间分辨率极限

光谱仪法的基本原理如图 1 所示^[1]. 一对光栅将 60fs 的短脉冲展宽为 30ps 的长脉冲(啁啾脉冲), 经过 ZnTe 晶体和偏振元件后, 啁啾脉冲便携带了 THz 的时间波形信息. 光谱仪将啁啾脉冲在空间展开, 用 CCD 可一次记录下 THz 辐射的时间波形. 这种方法原则上可以记录单脉冲 THz 波形, 实际中非常有用. 例如在激光等离子体加速器中, 高能激光使等离子体中电子获得高能量, 这些具有极高速度的电子将辐射电磁波, 其频率恰在 THz 范围. 因此, 通过探测 THz 辐射可以得到这些高能电子束的信息. 由于这种辐射在时间上是变化的, 多个 THz 辐射平

^{*} 北京市自然科学基金(批准号: 6032006)和北京市教育委员会科技发展计划项目(批准号: KM200310028115)资助的课题.

[†] E-mail: sjl-phy@mail.cnu.edu.cn

均后将不反映电子束的任何信息,瞬时信息才能反映电子束的真实情况.另一方面,此方法可以快速获得 THz 信号,此特点应用到 THz 成像技术^[6]中可以大大缩短成像时间,它对于 THz 成像技术无疑是革命性的.

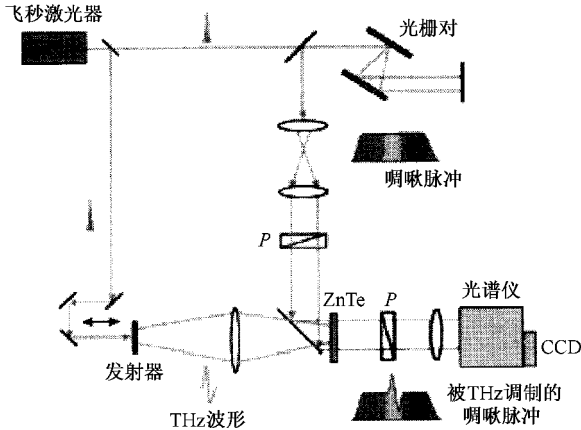


图 1 啁啾脉冲光谱仪探测法实验装置

然而,从理论上和实验上都证明,光谱仪法存在时间分辨率极限,即用此方法得到的 THz 时间波形将发生畸变.以下对此作一简要分析. THz 脉冲通过电光晶体时对啁啾脉冲探测光进行的调制可表示为

$$E_M(t) = E_{opt}(t) \chi [1 + \beta E_{THz}(t)], \quad (1)$$

式中 $E_M(t)$, $E_{opt}(t)$ 和 $E_{THz}(t)$ 分别表示被 THz 波调制的信号、啁啾脉冲探测光电场和 THz 电场. THz 波的时间波形被镶嵌在啁啾脉冲的光谱分布中.通过光谱仪的探测光是(1)式的傅里叶变换

$$\tilde{E}_M(\omega) = \tilde{E}_{opt}(\omega) + \beta \tilde{E}_{opt}(\omega) * \tilde{E}_{THz}(\omega). \quad (2)$$

通常获取 THz 信号的方法是分别测量有 THz 信号和无 THz 信号时的探测光强度,二者之差就是 THz 信号,即

$$S(\omega) = |\tilde{E}_M(\omega)|^2 - |\tilde{E}_{opt}(\omega)|^2.$$

假设探测光是高斯型脉冲且被线性加长,用 Γ 和 α 分别表征其带宽和脉冲展宽程度,经过一定的数学推导,最终可得

$$S(\omega) = 2\beta |\tilde{E}_{opt}(\omega)|^2 E_{THz}(t - \tau) * \text{Re}[\alpha(t, \omega - \omega_0)],$$

式中

$$\alpha(t) \equiv FT \left\{ \exp \left[\left(i\alpha - \frac{1}{\Gamma^2} \right) \Omega^2 \right] \times \exp \left[-\frac{2}{\Gamma^2} (\omega - \omega_0) \Omega \right] \right\}.$$

上式表明,用光谱仪法获取的信号是 THz 时域电场

和另一个与探测光脉冲特性有关的函数的卷积,并非 THz 时域电场本身.实验结果也证实,用光谱仪法测量出的 THz 信号出现边缘的振荡,实际已经携带了 G 函数的痕迹,其时间分辨率受到限制.图 2 曲线 c 是用光谱仪法得到的 THz 时域波形.

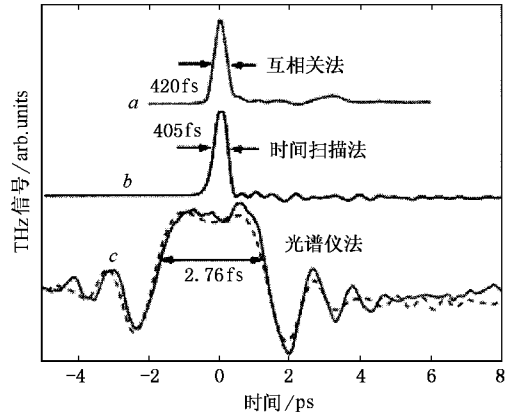


图 2 三种方法测量结果的比较 —— 为实验测量结果, - - - 为理论计算结果

3. 互相关法

互相关法的提出是为了解决上述时间分辨率问题.将 THz 的时间波形镶嵌在探测啁啾脉冲的不同波长中是啁啾脉冲 THz 辐射探测法的关键,而在光谱仪法中存在时间分辨率问题的来源是光谱仪的使用引入了傅里叶变换,从而导致在所需 THz 信号中出现 G 函数.互相关法利用单脉冲非共线互相关获得二次谐波信号,在二次谐波信号中镶嵌了 THz 时间波形,不需要借助于频域分析.

非共线的二次谐波互相关技术最初应用于单脉冲互相关仪,以测量超快激光脉冲的脉宽^[7].其基本原理如图 3,设进入倍频晶体 BBO 的两束基波光束直径为 d ,夹角为 2φ ,则倍频光的两边缘之间对应的时间差为 $2\tau = 2nd \tan \varphi / c$,其中 c 是真空中光速, n 是倍频晶体折射率.二次谐波的空间横向分布宽度 x 与时间延迟的关系为 $\tau = nx \sin \varphi / c$.设两基波的光强分别为 $I_1(t), I_2(t)$,其中 $I_1(t)$ 是短脉冲光强, $I_2(t)$ 是含 THz 时间波形的啁啾脉冲光强.二次谐波信号正比于 $I_1(t - \tau) \times I_2(t + \tau)$,由于 CCD 记录二次谐波的时间远大于光脉冲的宽度,所以得到的二次谐波信号可表示为

$$S(x) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(t - \tau) I_2(t + \tau) dt$$

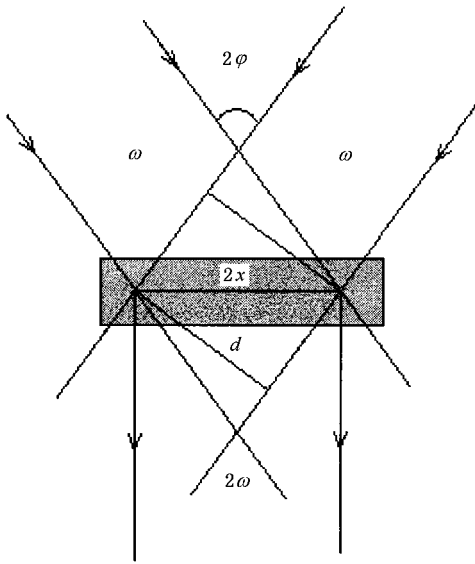


图 3 互相关法原理

$$= G_2(2\tau) \propto I_2(\tau).$$

可见,二次谐波的空间分布可以反映基波的时间分布,所对应的时间窗口由两基波的光束宽度 d 和夹角 2φ 决定.本实验中 $d = 5\text{mm}$, $2\varphi = 30^\circ$, $n = 1.66$ (800nm , o 光),则时间窗口为 $2\tau = 2nd \tan \varphi / c = 14.8\text{ps}$.实验中实际可使用的时间窗口约为 7.6ps ,这是由于两基波的边缘在空间重叠时的光强减弱,致使二次谐波产生效率降低,即使这样,这个数值基本可以满足一般 THz 脉冲的时域谱测量要求.提高测量时间窗口的途径,一是扩束增加光束直径,二是增加两基波间的夹角.扩束后引起的光强下降可以通过增加激光功率或加柱透镜解决,改变基波夹角后必须相应变化倍频晶体取向,以满足位相匹配条件.

图 4 是互相关法实验装置图.使波长 800nm 、有一定夹角的两束激光入射到倍频晶体 BBO,这两束光分别是经光栅展宽为 30ps 、并含 THz 信号的啁啾脉冲激光束和 60fs 的短脉冲激光束.由于 BBO 晶体中的倍频效应,在两束光的角分线上产生波长为 400nm 的蓝光,于是二次谐波信号利用光束的倾斜入射把脉冲的时间分布信息表现为空间分布信息,从而将 THz 波的时间波形展示在空间.最后用 CCD 记录.实验中所使用的柱透镜,是为了使入射到 BBO 晶体上的啁啾脉冲能量更集中,进而获得较强的二次谐波信号.

在互相关法实验中,二次谐波效应的位相匹配条件是关键问题.首先,BBO 晶体是正单轴晶体,因

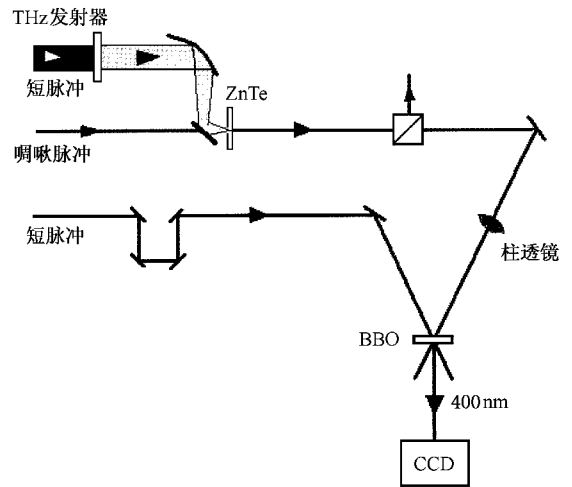


图 4 互相关法实验装置

此,基波为 o 光,二次谐波为 e 光,即采用 $o + o \rightarrow e$ 类的倍频效应.第二,在非共线二次谐波效应中,基波与倍频波波矢的大小有关: $2k_\omega \cos \varphi = k_{2\omega}$,因此,折射率的关系为 $n_{o,800} \cos \varphi = n_{e,400}(\theta)$.第三,位相匹配角 θ 由下式决定:

$$\cos^2 \theta = \left[\frac{n_{e,400}^2 n_{o,400}^2}{n_{o,800}^2 \cos^2 \varphi} - n_{o,400}^2 \right] \frac{1}{n_{e,400}^2 - n_{o,400}^2}.$$

当然,采用 $o + e \rightarrow e$ 类的倍频效应实现位相匹配也是可行的.在实验中究竟采用哪一类偏振态组合应视倍频晶体的晶轴取向而定.本实验中 BBO 晶体厚度为 $300\mu\text{m}$,晶轴与法线夹角为 47° ,为了满足 56° 的位相匹配角,以横向水平轴为轴适当转动了晶体.

用互相关法测量的 THz 时间信号如图 $\chi(a)$.图 $\chi(b)$ 是使用 THz 的时间扫描技术对同一个 THz 波源进行测量的结果.比较三个测量结果,可以肯定,互相关法测量的 THz 时间波形具有与时间扫描技术相同的时间分辨率.

4. 结 论

本文分析了光谱仪法探测 THz 辐射存在时间分辨率极限,实验结果也证实了这种时间分辨率极限的存在.提出了一种新的 THz 探测方法——啁啾脉冲互相关 THz 辐射探测法.此方法既具有单脉冲法一次测量 THz 波形的优点,又具有 THz 时间扫描技术的高时间分辨率.因此,此方法是对已有 THz 辐射探测技术的补充.

- [1] Jiang Z and Zhang X C 1998 *Opt. Lett.* **23** 1114
- [2] Wilke I , MacCleod A M , Gillespie W A , Berden G , Knippels G M H , Oepts D and van der Meer A F G 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 124801
- [3] Sun F G , Jiang Z P and Zhang X C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2233
- [4] Fletcher J R 2002 *Opt. Express* **10** 1425
- [5] Jamison S P , Shen J L , MacLeod A M and Gillespie W A 2003 *Opt. Lett.* **28** 1710
- [6] Wang S H , Ferguson B , Zhang C L and Zhang X C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 120 [in Chinese] 王少宏、B. Ferguson、张存林、张希成 2003 *物理学报* **52** 120]
- [7] Salin F , Georges P , Roger G and Brun A 1987 *Appl. Opt.* **26** 4528

Chirped pulse cross-correlation for THz wave measurement^{*}

Shen Jing-Ling¹⁾ Zhang Cun-Lin¹⁾ Hu Ying¹⁾ S. P. Jamison²⁾

¹⁾(Department of Physics , Capital Normal University , Beijing 100037 , China)

²⁾(Department of Physics , University of Strathclyde , Glasgow G4 0NG , United Kingdom)

(Received 8 July 2003 ; revised manuscript received 21 November 2003)

Abstract

We introduce a technique , chirped pulse cross-correlation , for single shot THz detection. The time-resolution limitation of previously demonstrated single-shot amplitude modulation spectral encoding is analyzed. The new technique is free from the limitation.

Keywords : chirped pulse , THz wave , cross-correlation

PACC : 4280W , 4265 , 4255T

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Beijing , China(Grant No. 6032006) , and the Natural Science Foundation from the Education Commission of Beijing , China(Grant No. KM200310028115).