

太赫兹脉冲整形技术研究进展

马建军 李德华 周 薇 姚香君 李乾坤 屈 操 鞠志鹏

(山东科技大学太赫兹研究中心 青岛市太赫兹技术重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要 太赫兹(THz)脉冲整形技术在量子理论、生物医学成像、安全检查、亚毫米波通信等领域都具有重要的学术价值和前景。概述了基于飞秒脉冲的整形技术和新型太赫兹辐射材料整形技术,分析了太赫兹脉冲整形器件整形技术目前的研究状况,并对各种整形方法的发展进行了展望。

关键词 非线性光学;太赫兹脉冲整形;飞秒脉冲整形器;太赫兹辐射

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.090004

Progress of Terahertz Pulse Shaping Techniques

Ma Jianjun Li Dehua Zhou Wei Yao Xiangjun Li Qiankun Qu Cao Ju Zhipeng

(Qingdao Key Laboratory of Terahertz Technology, Terahertz Science and Technology Research Center,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590, China)

Abstract Terahertz pulse shaping has attracted much attention from a variety of applications in fundamental and applied research fields, such as quantum theory, bio-medical imaging, security-checking, sub-millimeter wave communication and so on. A brief review is presented on the latest progress of terahertz pulse shaping based on femtosecond pulse shaping, new terahertz materials and device, and terahertz pulse shaper. The perspective of the terahertz pulse shaping techniques is also presented.

Key words nonlinear optics, terahertz pulse shaping, femtosecond pulse shaper, terahertz radiation

OCIS codes 190.4360; 120.4820; 120.4640; 320.5540

1 引言

太赫兹(THz)脉冲整形技术在量子系统激子跃迁^[1~8]、生物医学成像^[9~11]、分子振动和转动动力学^[12~14]、高速光信号处理^[15,16]和超快无线数字通信^[17]等领域显示出重要的学术价值和广阔的应用前景。目前,太赫兹脉冲整形技术的研究主要沿着3条途径进行:1)先对抽运飞秒脉冲进行整形,用整形后的飞秒脉冲来激发电导天线、碲化锌(ZnTe)、砷化镓(GaAs)等晶体产生太赫兹脉冲;2)通过设计制作新型的太赫兹辐射器件进行太赫兹脉冲整形,这些器件包括GaAs/AlGaAs量子阱器件、铌酸锂晶体(LiNbO₃)、掺镁铌酸锂晶体(Mg:LiNbO₃)、周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)、扇形周期性极化铌酸锂晶体(FO-PPLN)、准相位匹配(QPM) GaAs晶体和周期性极化掺镁铌酸锂(PP-Mg:LiNbO₃)晶体等;3)用太赫兹脉冲整形器件直接进行整形,这些整形器件主要有线栅偏振片-反射镜器件、金属狭缝、双折射铌酸锂晶体等。本文对这方面研究进行较全面的总结和分析,以为太赫兹脉冲整形技术未来的研究提供参考。

2 基于飞秒脉冲整形的太赫兹脉冲整形技术

飞秒激光脉冲整形技术的发展与成熟为太赫兹脉冲整形的研究提供了许多技术方法和研究思路^[18~24]。

收稿日期: 2012-02-28; **收到修改稿日期**: 2012-04-15; **网络出版日期**: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61071016/F010608)和青岛市科技计划(10-3-4-2-5-jch)资助课题。

作者简介: 马建军(1986—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹脉冲整形方面的研究。

E-mail: majianjunchina@hotmail.com

导师简介: 李德华(1963—),男,博士,教授,主要从事太赫兹辐射源、脉冲整形以及调制器等方面的研究。

E-mail: jcbwl@sdust.edu.cn(通信联系人)

最常用的太赫兹脉冲整形方法是先对飞秒激光脉冲进行整形,然后再通过光电导天线或利用光整流效应、非线性光学差频产生太赫兹脉冲。飞秒激光脉冲整形方案如图 1 所示,右侧的光栅-透镜通过傅里叶变换将入射脉冲转换到频域,左侧的光栅-透镜通过傅里叶逆变换将脉冲转换到时域波形,中间的调制器则对飞秒脉冲频谱进行振幅和相位的调制。这样,用调制后的抽运脉冲照射光电导天线或非线性晶体,可产生与入射光脉冲波形相似的太赫兹脉冲。

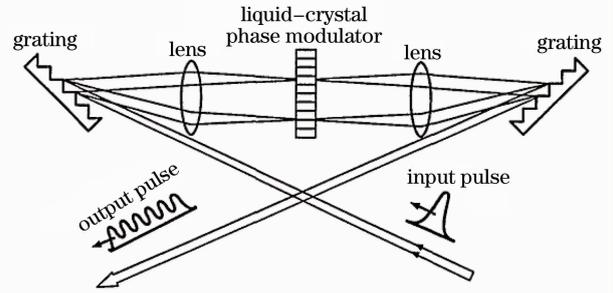


图 1 飞秒光脉冲整形系统

Fig. 1 Schematic of femtosecond pulse shaping system

低温生长砷化镓(LT-GaAs)光电导天线是最常用的太赫兹辐射器件,其主要机理是通过抽运光照射半导体材料产生瞬时载流子辐射太赫兹脉冲^[25~28]。1996年,Liu等^[29]利用LT-GaAs光电导天线进行了太赫兹脉冲整形实验,实验装置如图 2 所示,液晶调制器由两只液晶掩模板组成,并可通过计算机编程控制每一只掩模板上的驱动电压实现对脉冲振幅和相位的控制。实验选择一束脉冲序列(6周期,周期长度 0.8 ps)作为抽运光,当其中两脉冲间的时间间隔扩大为 1.2 ps 时,辐射出的太赫兹波两对应脉冲之间有 π 的相位差。如果对飞秒脉冲序列进行编码,可以辐射出不同比特频率的太赫兹信号。该方案的优点在于使用脉冲序列进行抽运,可以避免太赫兹辐射过程中的饱和效应,提高了辐射效率,但是这也造成了系统响应速度的降低和太赫兹频谱宽度的减小。

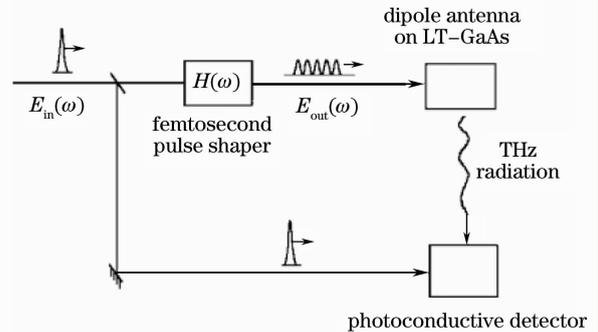


图 2 GaAs 光电导天线太赫兹脉冲整形实验系统

Fig. 2 THz pulse shaping system based on GaAs photoconductive antenna

与光电导天线方法相比,基于光整流效应的太赫兹脉冲整形技术在频谱宽度和系统多样性方面更具优势,实验中多采用 ZnTe 晶体作为辐射晶体^[30]。2003年,美国阿拉莫斯国家实验室 J. Ahn 等^[31]提出了利用啁啾脉冲激发(110)切向 ZnTe 晶体进行太赫兹脉冲整形的研究。如图 3 所示,他们使用脉冲宽度递减的啁啾脉冲序列作为抽运光,激发产生了 2 THz 带宽的太赫兹脉冲,从而克服了用脉冲序列抽运时造成太赫兹频谱宽度减小的缺点。

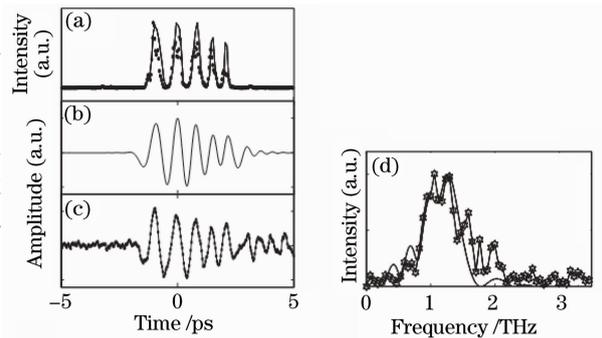


图 3 ZnTe 晶体太赫兹脉冲整形实验结果

Fig. 3 Results of the shaped THz pulse in ZnTe crystal

2005年,美国 Oregon 州立大学的 Amer 等^[32]将两列垂直偏振的抽运脉冲垂直入射到(110)切面 ZnTe 晶体,两脉冲分别通过光整流效应产生太赫兹辐射并相干叠加,通过改变脉冲之间的时间间隔可以控制太赫兹脉冲的偏振特性。当两入射脉冲间隔为 0 时,可以得到中心频率为 1.2 THz 的线偏振太赫兹脉冲;而当脉冲间隔为 ± 0.2 ps(相位间隔 $\pm \pi/2$) 时,太赫兹脉冲变为椭圆偏振。随后,他们将实验方案进行改进,通过两束啁啾脉冲光学差频过程产生太赫兹辐射^[33],产生的连续可调的窄带太赫兹脉冲中心频率 0.3~2.5 THz,频宽 0.3~0.5 THz。

基于光学差频太赫兹脉冲整形的方案由韩国首尔国立大学的 Sohn 等^[34]于 2002 年首次提出,并在 LT-GaAs 光电导天线中得到了中心频率 0.5~3 THz 的可调太赫兹脉冲。但是方案中电场强度的急速降低会降低太赫兹脉冲的输出功率。2011年,德国 Philipps 大学的 Kapil 等^[35]提出了另外一种脉冲整形方案,他们采用一种既可以对脉冲进行分束,又可以对脉冲的振幅和相位进行分离控制的飞秒脉冲整形器。实验中将两束脉冲入射到 GaAs 晶体,当两脉冲之间的相位间隔由 0 变化到 π 时,会辐射出极化方向相反的太赫兹脉冲。该方案最大的优点是在调节抽运脉冲之间的相位间隔时,脉冲波包始终是完全叠加,这就提高了太赫

兹波的输出功率。

3 基于新型太赫兹辐射材料和器件的太赫兹脉冲整形技术

1991年,美国 Columbia 大学 Froberg 等^[36,37]利用 GaAs 光电导天线阵列进行太赫兹脉冲整形。他们将 64 个由 AuGe/Ni/Au 层组成的平行电极排列在半绝缘 GaAs 基底上组成天线阵列。通过在不同电极上施加不同电压来产生不同比特率的太赫兹脉冲序列,从而对太赫兹脉冲进行编码。该整形方案的优点在于能实现对太赫兹波形的高速控制并能产生任意波形的太赫兹脉冲,但是由于抽运脉冲对于光电导天线阵列上不同光电导天线之间的入射角不同,所以产生太赫兹辐射的效率受到很大影响。

1993年,美国 AT&T Bell 实验室的 Planken 等^[38~40]利用整形后的抽运脉冲激发 GaAs/AlGaAs 量子阱来产生相干太赫兹辐射,所用器件是由两个 GaAs 量子阱(中间由 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子势垒隔开)以 10 周期堆叠而成的半导体双耦合量子阱(DCQW)。实验中利用迈克耳孙干涉仪产生一对具有时间间隔的锁模脉冲,并将其入射到 DCQW 结构中,通过激子能级的量子拍频激发电荷振荡并辐射出太赫兹波。实验发现,如果脉冲之间的时间间隔为 2 倍量子拍频周期($2T_{12}$)且脉冲间相位差为 0,太赫兹辐射的强度是抽运脉冲强度的 3 倍。而如果脉冲间的时间间隔为 2.5 倍量子拍频周期($2.5T_{12}$)且脉冲间相位差为 π ,则太赫兹辐射电场的相位会移动 $\pi/2$,振幅相对不变。所以,利用 DCQW 器件可以对太赫兹脉冲的振幅和相位进行控制。但该方案需要在低温环境下运行,从而限制了其实际应用。

2004年,Feurer 等^[41]证实,将飞秒脉冲入射到 x 切面 LiNbO_3 晶体时,通过声子-激子激发辐射出的太赫兹脉冲也具有与入射脉冲相同的波形。实验结果如图 4 所示,使用脉宽相同的正啁啾、负啁啾和无啁啾 3 种脉冲作为抽运光时,辐射出的太赫兹脉冲具有与之相同的波形。而且当对入射脉冲进行编码时,可以辐射出不同比特频率(中心频率 1.1 THz,频宽 1 THz)的太赫兹脉冲序列。但是为了降低激子损耗,提高太赫兹波的输出功率,辐射晶体同样也需要在 77 K 的低温下工作。

同年,由德国和匈牙利专家组成的研究小组发现^[42],将由同一脉冲分裂成的两列脉冲分别以 0.35° 、 1.3° 、 1.9° 的夹角入射到室温下掺 2% Mg(物质的量分数)的 $\text{Mg}:\text{LiNbO}_3$ 晶体中时,辐射出频谱宽度为 0.1 THz 且振荡周期减小的太赫兹脉冲序列,峰值频谱分别位于 0.6、1.9、2.7 THz 处。如果降低晶体的温度,可以实现更高频率和强度的太赫兹辐射。

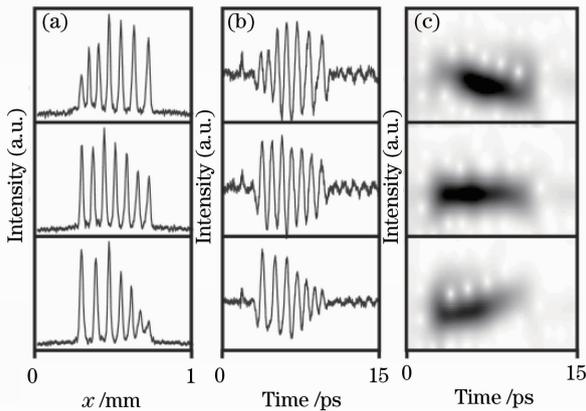


图 4 非啁啾和啁啾太赫兹脉冲。(a)入射抽运脉冲;
(b)辐射太赫兹脉冲波形;(c)傅里叶变换图
Fig. 4 Unchirped and chirped THz waveforms. (a)
Excitation pattern; (b) measured THz waveform;
(c) windowed Fourier transform

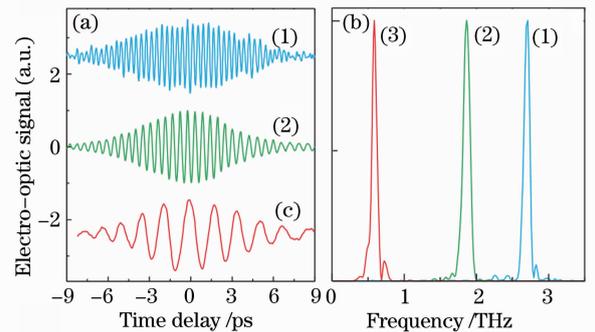


图 5 两脉冲夹角为 0.35° (1)、 1.3° (2)和
 1.9° (3)时的(a)太赫兹波形及其(b)频谱
Fig. 5 (a) THz waveforms and (b) corresponding power
spectra measured for 3 different angles [0.35° (1),
 1.3° (2), 1.9° (3)] between the two excitation
beams

抽运飞秒脉冲与太赫兹波在 PPLN 晶体中具有准相位匹配的特性,所以当晶体长度近似为走离长度时,晶体的每一周期都会实现半周期的太赫兹脉冲辐射。2003年, Lee 等^[43]最早使用 z 切面 PPLN 晶体作为太赫兹辐射源,并利用晶体厚度的变化对太赫兹脉冲进行整形。实验和理论模拟中选用了图 6 所示的 π

相移结构、啁啾结构和周期性交替结构的三种 PPLN 晶体。 π 相移结构的 PPLN 晶体辐射出零面积太赫兹脉冲,且其频谱中有双峰结构。啁啾结构晶体中辐射出宽频啁啾太赫兹脉冲,而周期交替晶体中辐射出中心频率为 1.2 THz 的窄带太赫兹脉冲。2005 年,该课题组又提出将两列垂直偏振抽运脉冲入射到 z 切面 PPLN 晶体中,产生高功率椭圆偏振太赫兹脉冲^[32]。但是 PPLN 晶体的最大缺点是太赫兹脉冲的波形仅由晶体的结构决定,所以其在整形方面缺乏灵活性。

2006 年,该课题组提出将 FO-PPLN 晶体作为辐射源以产生任意波形的太赫兹脉冲^[44]。该方案使用马赫-曾德尔干涉仪将一束抽运脉冲分为两束平行偏振且具有一定时间间隔的脉冲,并聚焦到 FO-PPLN 晶体上。当两脉冲之间的相位延迟由 0 变化到 π 时,辐射出的太赫兹脉冲的振幅会逐渐变小,而其中心频率也会由 0.93 THz 往低频方向移动。另外,此方案产生的太赫兹脉冲的频谱分辨率很高(约为 0.1 THz),使其在极性分子转动跃迁控制方面有着很好的应用价值。

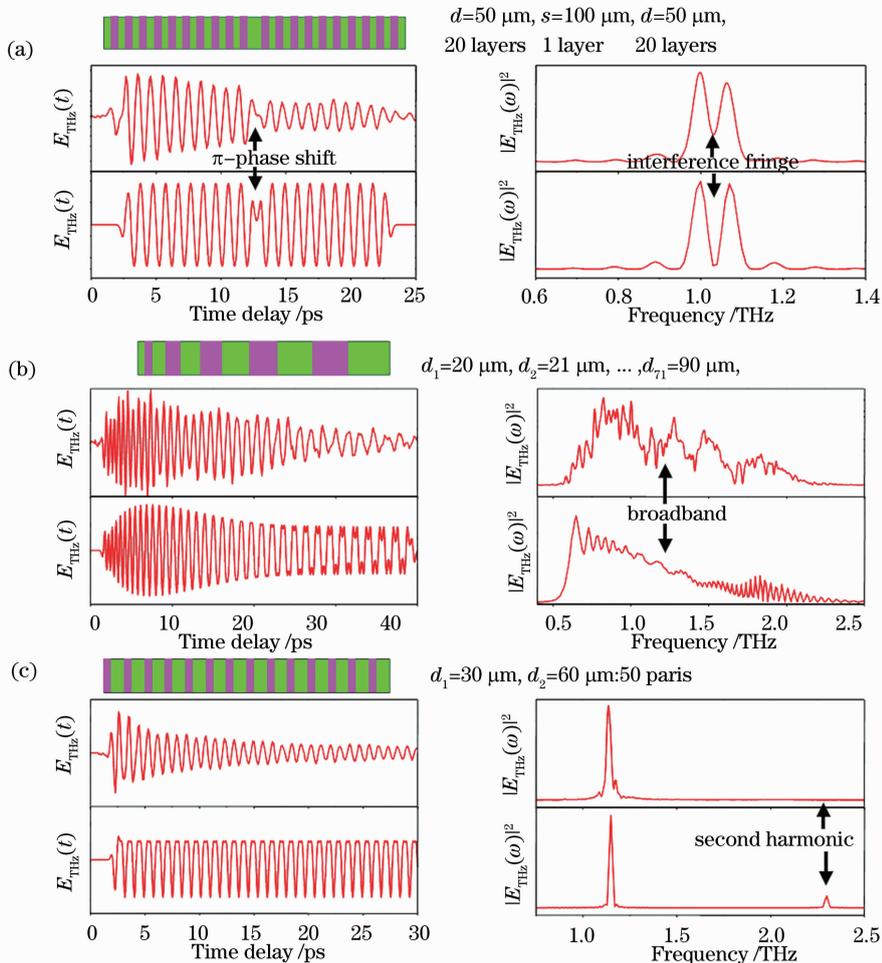


图 6 PPLN 晶体太赫兹脉冲整形实验与模拟结果

Fig. 6 Experimental results and numerical simulation of THz waveforms from PPLN structures

2006 年,该研究小组又提出可以在 FO-PPLN 晶体的前面添加一个空间掩模板充当滤波器以调制抽运脉冲的频谱强度,同时在晶体的后面添加一个球面反射镜将产生的太赫兹波会聚。实验装置如图 7 所示^[45]。实验中使用了 3 只不同类型的空间掩模板,其中第 1 只掩模覆盖 FO-PPLN 晶体中 QPM 周期小于 $160 \mu\text{m}$ 的区域(相当于低通滤波器),第 2 只覆盖晶体上 QPM 周期大于 $160 \mu\text{m}$ 的区域(相当于高通滤波器),第 3 只掩模覆盖 QPM 周期在 $146 \mu\text{m}$ 的区域(相当于带阻滤波器)。当抽运脉冲入射时,可以产生中心频率分别为 0.67 THz(频宽 0.2 THz)、0.7 THz(频宽 0.4 THz)以及在 0.7 THz 处存在频谱缺失的太赫兹波。这种方案很有实际应用价值,但是多层 PPLN 晶体之间的折射作用会降低太赫兹波的透过性,从而减小了太赫兹波的输出功率。

同年他们还又提出了基于 QPM-GaAs 晶体的太赫兹脉冲整形方案^[46]。QPM-GaAs 是将 GaAs 周期型反转而成,在太赫兹频段具有比 PPLN 晶体更好的透过性(吸收系数小于 1 cm^{-1})^[47],而且对于抽运脉冲与太赫兹脉冲的折射率之差较小,有利于减小晶体中的相位失配量,并增加走离长度。实验中使用的延生长模式定向 GaAs 晶体有 A10(QPM 周期 $\Lambda = 1277 \mu\text{m}$, 晶体长度 $L = 10 \text{ mm}$)、B10($\Lambda = 759 \mu\text{m}$, $L = 10 \text{ mm}$)和 B6($\Lambda = 759 \mu\text{m}$, $L = 3 \text{ mm}$)3 种。结果显示,从 3 种晶体中辐射出的太赫兹脉冲的脉宽分别为 5.0, 3.6, 6.0 ps,且其中心频率分别为 1.5, 2.1, 2.1 THz。这说明晶体长度越长,太赫兹频谱越窄;QPM 周期越长,太赫兹辐射中心频率越小。

4 太赫兹脉冲整形器

使用线栅偏振片-反射镜器件组合和金属狭缝-双折射 LiNbO_3 晶体组合的太赫兹脉冲整形器件具有结构简单,操作方便等优点。2005 年, Amer 等^[32]提出了一种新的太赫兹脉冲调制器,结构如图 8 所示。该器件由线栅偏振片和平面反射镜组成,可以将入射的线偏振太赫兹脉冲分解为两束垂直偏振的脉冲。调整偏振片和反射镜之间的距离可以改变两列叠加的太赫兹脉冲的时间间隔,从而输出偏振特性可控的椭圆偏振太赫兹脉冲。当两脉冲之间的时间间隔为 0.02 ps 或 0.42 ps 时,输出线偏振太赫兹脉冲;当时间间隔为 0.16 ps 或 0.23 ps 时,太赫兹脉冲为椭圆偏振,从而实现了太赫兹脉冲的偏振特性的控制。此种方案适用于整个太赫兹波段的波形控制。

1997 年,美国 Rochester 大学的研究小组在太赫兹波的传输路径中放置一块电导缝,通过设置狭缝的厚度、宽度实现了太赫兹脉冲整形^[48,49],其实验装置如图 9 所示。实验中选取厚度为 1.7 mm 的铜板作为调制器,并且狭缝宽度分别为 300、500、700 μm 三种。调节狭缝使其沿着太赫兹脉冲的偏振方向放置,结果发现,透过铜板狭缝的太赫兹脉冲表现出啁啾的特性。而且,随着狭缝宽度的增加,辐射太赫兹脉冲的强度会增加,振荡周期会减小。但是,由于该狭缝起到了平板波导的作用,所以会存在 0.30 THz 的截止频率,因此无法实现低频太赫兹波输出。

2009 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的研究小组提出了利用 LiNbO_3 晶体的双折射效应进行太赫兹脉冲整形的方法^[50]。 LiNbO_3 晶体在可见光和太赫兹波段为单轴晶体,且对于频率为 1 THz 的太赫兹脉冲,o 光和 e 光的折射率之差为 1.61。实验中选用厚度为 0.23、0.52、1.0 mm 的 3 种 LiNbO_3 晶体,发现透过的太赫兹脉冲变为双峰脉冲,而且双峰间隔随着晶体厚度的增加而减小。另外,该小组还提出通过外加电场来改变晶体的厚度,从而实现对太赫兹波波形的电控。而且,通过增加晶体的数目可以得到更加复杂的太赫兹波形,只是这种方案还需要进一步的实验验证。

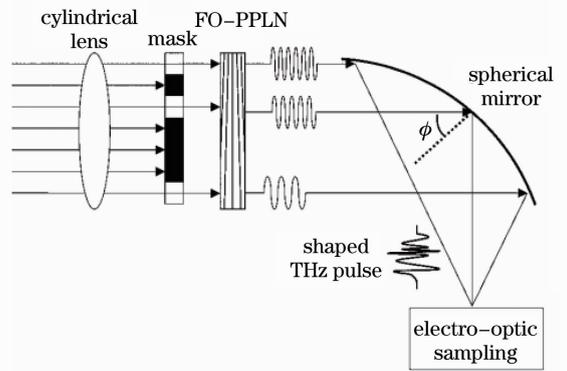


图 7 FO-PPLN 晶体太赫兹脉冲整形实验系统
Fig. 7 Experimental setup for arbitrary pulse shaping in a FO-PPLN crystal

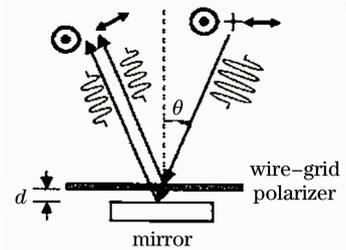


图 8 线栅偏振片-反射镜太赫兹脉冲整形器
Fig. 8 Scheme of the wire-grid-polarizer-mirror THz pulse shaper

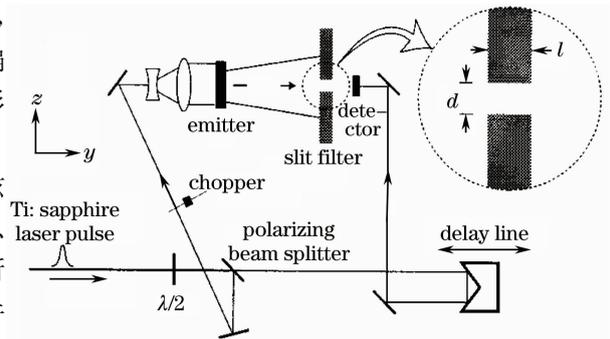


图 9 金属狭缝太赫兹脉冲整形实验系统
Fig. 9 Experimental system of THz pulse shaping system based on metal slit

5 太赫兹脉冲整形方案的比较

上面所述 3 类太赫兹脉冲整形方法对太赫兹脉冲波形控制的原理、方案各不相同,整形的效果也各有所长,各种脉冲整形方案的比较如表 1 所示。

表 1 赫兹脉冲整形方案的比较

Table 1 Comparison of THz pulse shaping methods

Shaping method	THz waveform	Advantages	Disadvantages
Photoconductive antenna	Phase shift: π ; amplitude reduction: 100%	High output power	Loss of speed and absolute field amplitude
Optical rectification	Phase shift: π ; amplitude reduction: 100%; spectral bandwidth tuning: 1.5~0.2 THz, elliptical polarization	Spectral bandwidth controllable	Low power
Difference frequency generation	Frequency: 0.3~2.5 THz Inverse polarization polarity; amplitude reduction: 40%	Energy transmission: 90% Low energy loss	Complex
Photoconductive antenna array	Amplitude reduction: 100%	Electrical controlling	Large power depletion
GaAs/AlGaAs quantum well	Phase shift: $-\pi/2\sim\pi/2$, slight increase in amplitude	Time-resolved phase shift	Low temperature
LiNbO ₃	Amplitude reduction: 100%; frequency: 0.5~3 THz	Low price	Low temperature, low power
PPLN	Phase shift: $0\sim\pi$; frequency: 0.6~1.4 THz	High spectral resolution; 0.1 THz	Large power depletion, predetermined THz waveform by the crystal structure
PPLN+ spatial mask	Spectral bandwidth: 0.5~0.9 THz	Controlling flexibility	Large power depletion
QPM-GaAs	Frequency: 0.84, 1.5, 1.7, 2.1, 2.2, 2.9 THz	High output power, high conversion efficiency	Predetermined THz waveform by the crystal structure
Wire-grid THz polarizer and a mirror	Elliptical polarization	Applicable to the entire THz spectral range, simple and flexible	Large power depletion
Conductive slit	Cutoff frequency: 0.2~0.8 THz	Simple	Large power depletion, predetermined THz waveform by the slit
Birefringence	With sub pulses	Electrical controlling	Applicable to continuous-wave THz wave

基于飞秒脉冲整形的太赫兹脉冲整形技术是最早使用的整形方案,这种方案主要依赖于飞秒脉冲整形技术,使得整形的多样性受到限制。而基于新型太赫兹辐射材料和器件的太赫兹脉冲整形技术近年来发展较为迅速,并且可以产生任何需要的太赫兹波形。但是由于其波形主要由发射晶体的结构和形状所决定,所以缺少操作的灵活性。而且,一些半导体材料需要在低温下才能充分发挥其优良特性,这也限制了其实际应用。直接对太赫兹脉冲进行整形的器件近几年刚刚起步,相关的报道也相对较少,这种方案有着很大的可控灵活性。而且,太赫兹波的脉宽一般在亚皮秒量级,因此,在器件制作方面也相对容易。但其最大的缺点在于直接对太赫兹整形的时候会造成太赫兹输出功率的严重损耗。

6 结束语

伴随着晶体材料学和半导体工艺的发展与成熟,新型的更具灵活性的太赫兹整形器件与材料是太赫兹脉冲整形技术发展的趋势。研究新型太赫兹脉冲整形器件,将使得太赫兹脉冲整形技术向高效率、高功率、可室温操作、连续可调等方向发展。

参 考 文 献

- 1 M. S. C. Luo, S. L. Chuang, P. C. M. Planken *et al.*. Coherent double-pulse control of quantum beats in a coupled quantum well [J]. *Phys. Rev. B*, 1993, **48**(15): 11043~11050
- 2 Lü Liang, Zhang Yinchao, Lin Yandong. Research on absolute calibration of photodetector quantum-efficiency using entangled photons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112004
吕 亮, 张寅超, 林延东. 纠缠光子法绝对定标光电探测器量子效率的研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112004
- 3 J. J. Baumberg, A. P. Heberle, K. Köhler. Ultrafast coherent carrier control in quantum wells [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(6): 1246~1250
- 4 N. H. Bonadeo, J. Erland, D. Gammon *et al.*. Coherent optical control of the quantum state of a single quantum dot [J]. *Optics and Photonics News*, 1998, **9**(12): 40~41
- 5 X. Marie, P. Le Jeune, T. Amand *et al.*. Coherent control of the optical orientation of excitons in quantum wells [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(17): 3222~3224
- 6 Peng Kunchi, Jia Xiaojun, Su Xiaolong *et al.*. Optical manipulations of quantum states with continuous variables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900107
彭 堃 堃, 贾晓军, 苏晓龙 等. 连续变量量子态的光学操控[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900107
- 7 J. Ahn, D. N. Hutchinson, C. Rangan *et al.*. Quantum phase retrieval of a Rydberg wave packet using a half-cycle pulse [J]. *Phys. Rev. Lett.*, **86**(7): 1179~1182
- 8 Y.-S. Lee, T. Meade, V. Perlin *et al.*. Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(18): 2505~2507
- 9 P. Y. Han, G. C. Cho, X.-C. Zhang. Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 242~244
- 10 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao *et al.*. Study on the image reconstruction algorithm for passive human terahertz imaging system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111009
张 馨, 赵源萌, 邓 朝 等. 被动式人体太赫兹成像系统的图像重构算法研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s111009
- 11 J. L. Johnson, T. D. Dorney, D. M. Mittleman. Enhanced depth resolution in terahertz imaging using phase-shift interferometry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(6): 835~837
- 12 Yang Yuping, Zou Bin, Chen Xiao *et al.*. Terahertz spectroscopy of biochanin A [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100502
杨玉平, 邹 斌, 陈 笑 等. 鹰嘴豆芽素 A 的太赫兹光谱研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(s1): s100502
- 13 Zhu Dehong, Zhang Liangliang, ZhaoYaqin *et al.*. Terahertz broadband spectroscopic investigations of amino acid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111008
祝德充, 张亮亮, 赵亚芹 等. 氨基酸的超宽带太赫兹光谱[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s111008
- 14 E. Knoesel, M. Bonn, J. Shan *et al.*. Charge transport and carrier dynamics in liquids probed by THz time-domain spectroscopy [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(2): 340~343
- 15 D. S. Citrin. Picosecond dynamics of terahertz-sideband generation in far-infrared illuminated quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(22): 3176~3178
- 16 M. Y. Su, S. G. Carter, M. S. Sherwin *et al.*. Voltage-controlled wavelength conversion by terahertz electro-optic modulation in double quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(9): 1564~1566
- 17 J. J. Simpson, A. Taflove, J. A. Mix *et al.*. Computational and experimental study of a microwave electromagnetic bandgap structure for potential use as a bandpass wireless interconnect [J]. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2004, **14**(7): 343~345
- 18 A. M. Weiner, J. P. Heritage, E. M. Kirschner. High-resolution femtosecond pulse shaping [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(8): 1563~1572
- 19 A. M. Weiner, D. E. Leaird, J. S. Patel *et al.*. Programmable shaping of femtosecond optical pulses by use of a 128-element liquid crystal phase modulator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 908~920
- 20 M. M. Wefers, K. A. Nelson. Generation of high-fidelity programmable ultrafast optical waveforms [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1047~1049
- 21 A. M. Weiner, D. E. Leaird, G. P. Wiederrecht *et al.*. Femtosecond pulse sequences used for optical manipulation of molecular motion [J]. *Science*, 1990, **247**(4948): 1317~1319
- 22 A. M. Weiner. Femtosecond optical pulse shaping and processing [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 1995, **19**(3): 161~238
- 23 A. M. Weiner, D. E. Leaird. Generation of terahertz-rate trains of femtosecond pulses by phase only filtering [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(1): 51~53

- 24 A. M. Weiner, D. E. Leaird, G. P. Wiederrecht *et al.*. Femtosecond multiple-pulse impulsive stimulated Raman scattering spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(6): 1264~1275
- 25 G. A. Mourou, C. V. Stancampiano, A. Antonetti *et al.*. Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser driven semiconductor switch [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**(4): 295~296
- 26 X.-C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow *et al.*. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(11): 1011~1013
- 27 B. B. Hu, X.-C. Zhang, D. H. Auston. Terahertz radiation induced by subband-gap femtosecond optical excitation of GaAs [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(19): 2709~2712
- 28 M. B. Johnston, D. M. Whittaker, A. Corchia *et al.*. Simulation of terahertz generation at semiconductor surfaces [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(16): 165301
- 29 Y. Q. Liu, S.-G. Park, A. M. Weiner. Terahertz waveform synthesis via optical pulse shaping [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(3): 709~719
- 30 B. Ferguson, X.-C. Zhang. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Mater*, 2002, **1**(1): 26~33
- 31 J. Ahn, A. V. Efimov, R. D. Averitt *et al.*. Terahertz waveform synthesis via optical rectification of shaped ultrafast laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2486~2496
- 32 N. Amer, W. C. Hurlbut, B. J. Norton *et al.*. Generation of terahertz pulses with arbitrary elliptical polarization [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(22): 221111
- 33 J. R. Danielson, A. D. Jameson, J. L. Tomaino *et al.*. Intense narrow band terahertz generation via type-II difference-frequency generation in ZnTe using chirped optical pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(3): 033111
- 34 J. Y. Sohn, Y. H. Ahn, D. J. Park *et al.*. Tunable terahertz generation using femtosecond pulse shaping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(1): 13~15
- 35 K. K. Kapil, M. Jan, B. Mark *et al.*. Pulse-shaper-assisted coherent control of shift currents [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(3): 470~474
- 36 N. Froberg, M. Mack, B. B. Hu *et al.*. 500 GHz electrically steerable photoconducting antenna array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(5): 446~448
- 37 N. M. Froberg, B. B. Hu, X.-C. Zhang *et al.*. Time-division multiplexing by a photoconducting antenna array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(25): 3207~3209
- 38 P. C. Planken, I. I. Brener, M. C. Nuss *et al.*. Coherent control of terahertz charge oscillations in a coupled quantum well using phase-locked optical pulses [J]. *Phys. Rev. B*, 1993, **48**(7): 4903~4906
- 39 I. Brener, P. C. M. Planken, M. C. Nuss. Repetitive excitation of charge oscillations in semiconductor heterostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(16): 2213~2215
- 40 I. Brener, P. C. M. Planken, M. C. Nuss *et al.*. Coherent control of terahertz emission and carrier populations in semiconductor heterostructures [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12): 2457~2469
- 41 T. Feurer, J. C. Vaughan, T. Hornung *et al.*. Typesetting of terahertz waveforms [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1802~1804
- 42 A. Stepanov, J. Hebling, J. Kuhl. Generation, tuning, and shaping of narrowband, picosecond THz pulses by two-beam excitation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4650~4658
- 43 Y.-S. Lee, N. Amer, W. C. Hurlbut. Terahertz pulse shaping via optical rectification in poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(2): 170~172
- 44 W. C. Hurlbut, B. J. Norton, N. Amer *et al.*. Manipulation of terahertz waveforms in nonlinear optical crystals by shaped optical pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(1): 90~93
- 45 J. R. Danielson, N. Amer, Yun-Shik Lee. Generation of arbitrary terahertz wave forms in fanned-out periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(21): 211118
- 46 Y.-S. Lee, W. C. Hurlbut, K. L. Vodopyanov *et al.*. Generation of multicycle terahertz pulses via optical rectification in periodically inverted GaAs structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(18): 181104
- 47 D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter *et al.*. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(10): 2006~2015
- 48 J. Bromage, S. Radic, G. P. Agrawal *et al.*. Spatiotemporal shaping of terahertz pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 627~629
- 49 J. Bromage, G. P. Agrawal, C. R. Stroud *et al.*. Spatiotemporal shaping of half-cycle terahertz pulses by diffraction through conductive apertures of finite thickness [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**(4): 1399~1405
- 50 D. Li, G. Ma, J. Ge *et al.*. Terahertz pulse shaping via birefringence in lithium niobate crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(4): 623~628