

光子学太赫兹源研究进展

叶全意, 杨 春*

(东南大学 电子科学与工程学院 太赫兹研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了进一步开发、利用高功率、高效率、可调谐且在室温下稳定运转的太赫兹 (THz) 源, 介绍、分析了国内外利用光子技术产生 THz 波的研究进展, 包括 THz 气体激光器、空气等离子体 THz 源、光电导天线以及基于非线性光学效应的光学整流、光学差频、参量振荡等 THz 源, 并指出了光子学 THz 源未来发展所面临的困难和需要解决的关键技术。

关键词: THz 源; THz 气体激光器; 空气等离子体 THz 源; 光电导天线; 光学整流; 光学差频; 光学参量振荡器
中图分类号: O43; O441.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20120501.0001

Recent progress in THz sources based on photonics methods

YE Quan-yi, YANG Chun*

(*Terahertz Research Institute, School of Electronic Science and Engineering,
Southeast University, Nanjing 210096, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yangchun@seu.edu.cn*

Abstract: To develop and make use of tunable Terahertz (THz) sources with high power, high efficiency and operating in room temperature, this paper researches and analyzes the progress in THz sources by photonics methods, including optically pumped THz lasers, air plasma THz sources, photoconductive antennas and the optical rectification, difference frequency generation, THz parametric generation based on nonlinear optical process. The numerous challenges and key technologies of this THz generation method are also proposed.

Key words: THz source; THz gas laser; air plasma THz source; photoconductive antenna; optical rectification; optical difference frequency; optical parametric oscillator

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率从 0.1 ~ 10 THz 的电磁波, 介于远红外与毫米波之间 (30 μm ~ 3 mm)。早在 20 世纪 20 年代, 人们就对 THz 辐射产生了浓厚的兴趣, 但由于当时缺乏稳定可靠的 THz 波源和检测技术, 在 20 世纪 80 年代中期以前, 人们对这个频段的特性知之甚少, 形成了所谓的“太赫兹空隙” (THz Gap)^[1-2]。

THz 波具有良好的介质穿透性、低电离能和相干性等优异特性, 并且许多大分子化合物的特征谱也在 THz 频段, 因此 THz 技术在物理、化学、生物、天文和医药科学等基础研究领域, 以及医学成像、环境监测、安全检查等应用研究领域均具有巨大的科研价值和广阔的应用前景。近年来, THz 波技术逐渐成为国际研究的热点, 美国、西欧和日本等发达国家都对 THz 波技术的研究给予高度的重视^[3]。近 20 年来, 随着 THz 技术的发展, 高功率、稳定可靠的 THz 源已经能够实现^[4-5]。因此, 研制出高功率、高效率且能在室温下稳定运转的 THz 源, 并将其运用于实际生活和科研工作中, 已经成为 21 世纪的重要科研目标之一。

根据 THz 波产生的机理及它所处电磁波谱中的位置, THz 波可以利用光子学和电子学两种方法产生^[6]。与电真空 THz 源相比, 光子学 THz 源的功率虽然不高, 但具有相干性好、结构简单、室温工作等优点, 应用前景广阔。目前, 光子学 THz 源主要包括 THz 气体激光器、空气等离子体 THz 源、光电导天线以及基于非线性光学效应的光学整流、光学差频、参量振荡等。本文概述了这几种光子学 THz 源的研究进展, 并对光子学 THz 源未来发展所面临的困难和需要解决的关键技术进行分析。

2 基于光子学方法的 THz 源

2.1 THz 气体激光器

THz 气体激光器于 1970 年问世, 其泵浦光源

是连续可调谐的 CO₂ 激光器, 工作气体为甲基氟 (CH₃F)^[7]。THz 气体激光器结构如图 1 所示, 通过 CO₂ 激光器泵浦跃迁频率处于 THz 波段的气体腔, 受激辐射出 THz 波。

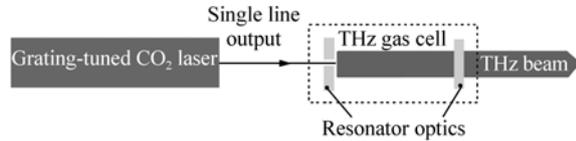


图 1 THz 气体激光器原理图^[7]

Fig. 1 Schematic diagram of THz gas laser

大功率脉冲横向激励气体 TEA-CO₂ 激光器为光泵 THz 激光器提供了大功率泵浦源, 但其重复频率低于 10 s, 使其应用受到了限制。为了提高光泵 THz 源的重复频率, Bae 等人在 1989 年研制出电源加机械调 Q 开关的 CO₂ 激光器, 重复频率达到 1 kHz, 由此激光器泵浦 CH₃F, 在 500 Hz 重复脉冲时可以获得 496 μm 激光峰值功率 6.5 W, 脉冲宽度 10 ns^[8]。20 世纪 90 年代后期, 中山大学研究人员对 THz 气体激光器进行了初步研究^[9-10]。近年来, 华中科技大学对 TEA-CO₂ 激光器泵浦的甲醇气体和氨气 THz 源进行了研究, 在 10.7 μm 波长处得到了最大输出能量为 300 mJ 的脉冲 THz 波^[11]。天津大学何志红等人对 TEA-CO₂ 激光泵浦重水气体的 THz 源进行了理论与实验研究, 得到了中心频率为 0.78 THz、脉冲宽度为 100 ns、峰值功率达百瓦量级的脉冲 THz 波^[12-13]。2010 年, 哈尔滨工业大学信息光电子研究所田兆硕、王静等人报导了结构简单、体积小的太赫兹气体激光器, 其结构如图 2 所示, 利用全金属射频波导 CO₂ 激光器输出的激光在腔内多次反射泵浦 CH₃OH 气体, 实现了最高重复频率为 1 kHz 的 THz 输出, 但未对 THz 波的功率进行测量^[14]。

美国 Coherent-DEOS 公司的 SIFIR-50 THz 气体激光器, 频率为 0.3 ~ 7 THz, 平均输出功率为 50 mW, 如图 3 所示。该 THz 源被美国国家航天局 (NASA) 应用于 AURA 卫星上执行大气监测任务^[15]。英国 Edinburgh Instruments 公司的 FIRL100 一体化 THz 气体激光器可输出 0.25 ~

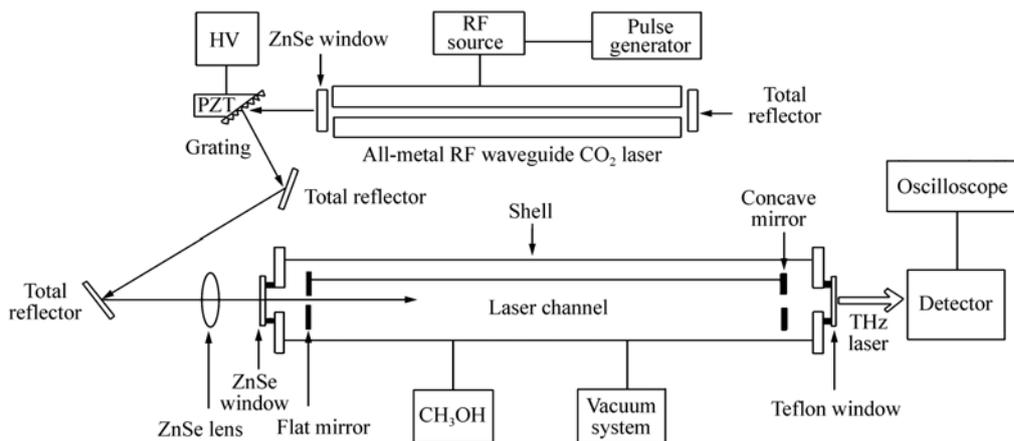


图 2 射频波导 CO₂激光泵浦全金属 THz 激光器结构^[14]

Fig. 2 Structure of all metal terahertz laser pumped by Radio Frequency(RF) waveguide CO₂ laser



图 3 SIFIR-50 型 THz 气体激光器^[15]

Fig. 3 SIFIR-50 THz gas laser

7.5 THz 的相干 THz 波,最大输出功率可达 150 mW^[16],如图 4 所示。



图 4 FIRL-100 一体化 THz 气体激光器^[16]

Fig. 4 FIRL-100 THz gas laser

THz 气体激光器是常用的 THz 源,其输出稳定、光束质量较好,输出功率较高,可以在连续或脉冲方式下工作,并且频率范围较宽。缺点是:(1)能量转换效率低,总效率的理论值不超过 1%;(2)不能连续调谐;(3)光泵 THz 波激光器体积庞大且笨重,使用不便。这些缺点在一定程度上

上限制了 THz 气体激光器的实际应用,需要在光泵浦效率、可靠性、运行寿命、频率稳定性等方面进行改进。

2.2 空气等离子体 THz 源

1993 年 Hamster H 等人报导了在空气中直接产生 THz 波的实验研究,其产生机制主要有两种,原理分别如图 5(a)、(b)所示^[17]。图 5(a)是基于有质动力产生 THz 波的方法,将激光脉冲在空气中聚焦,使空气在焦点处发生电离形成等离子体,电荷分离导致的电磁瞬变从而辐射出 THz 波。图 5(b)是基于等离子体的四波混频产生 THz 波的方法,将超短激光在空气中聚焦,使空气电离成等离子体,该激光同时通过 BBO 晶体倍频产生二次谐波,而后基波和二次谐波通过四波混频产生 THz 波。

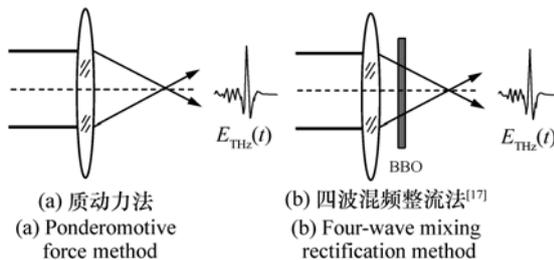


图 5 空气等离子体产生 THz 波

Fig. 5 THz generated by air plasma

2005 年,张希成等人的研究指出影响空气中等离子体四波混频产生 THz 波强度的主要因素是倍频和基波的相对相位^[18]。2008 年, K. Y.

Kim 等人报道了利用钛-蓝宝石飞秒激光和 BBO 晶体倍频的二次谐波,并基于等离子四波混频方法产生 THz 波的实验结果,脉冲功率 $> 5 \mu\text{J}$, THz

波的频率最高达 75 THz,图 6 是其实验系统的结构框图^[19]。

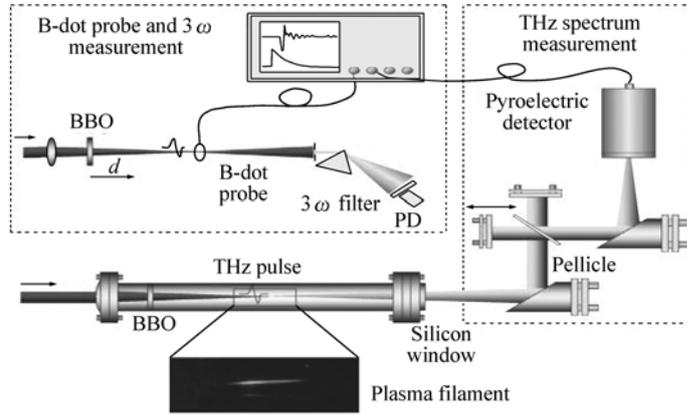


图 6 等离子四波混频产生 THz 的结构^[19]

Fig. 6 Schematic diagram of THz generated by plasma four-wave mixing rectification

2010 年, T. J. Wang 等人研究了全光学全空气 THz 波产生和探测方法,飞秒激光器的双色输出激光通过反射式聚焦镜在 10 m 以外聚焦产生

THz 波,在低于 5.5 THz 内产生脉冲能量超过 250 μJ 的 THz 波^[20-21],如图 7 所示。

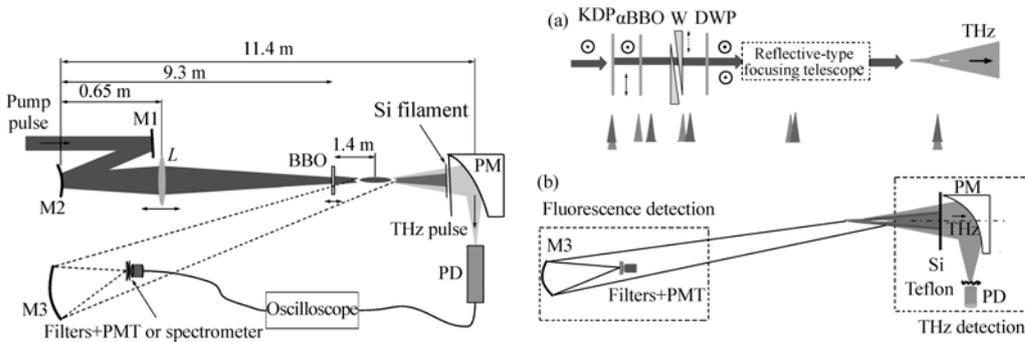


图 7 双色飞秒激光器的产生和探测 THz 波结构示意图^[20-21]

Fig. 7 Schematic experimental setup for THz generation by two-color laser and their detections

由于水蒸气对 THz 波的强吸收,人们一直认为远距离宽带 THz 波的遥感探测和光谱分析是不可能实现的。不过利用可见光在空气中的低衰减,可在空气中产生 THz 波,实现空气中远距离 THz 的观测。这种高宽带和高脉冲功率的 THz 波还可以应用于 THz 光谱分析、成像、遥感以及远距离、高能量 THz 波的精确控制,因此它越来越得到重视。

2.3 光电导天线

光电导天线是利用超短脉冲激光照射光电导

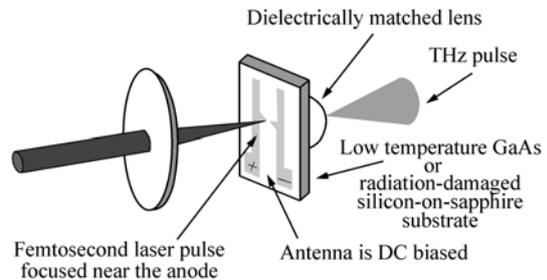


图 8 光电导产生 THz 原理图^[22]

Fig. 8 Schematic diagram of photoconductive antenna

材料产生电子-空穴对,在外加偏置电场中产生载流子的瞬态输运,从而辐射 THz 波,其原理示意图如图 8。

20 世纪 70 年代, Auston 和 Lee 等人通过锁模激光器的皮秒脉冲照射光电导开关,产生纳瓦到微瓦量级能量的 THz 波,开创了光电导 THz 天线的研究^[22]。之后, Justin T Darrow 等人建立了光电导天线产生 THz 波理论模型^[23]。

光电导天线的性能由 3 个因素决定:光电导体、天线几何结构和激光脉冲宽度。激光超短脉冲技术和半导体材料技术的发展,使得光电导天线得到更广泛的关注。2004 年,施卫等人采用图 9 的实验系统,利用飞秒激光脉冲触发 540 V 直流偏置的 GaAs 光电导,产生中心频率为 0.5 THz、频谱宽度 >2 THz、脉宽约为 1 ps 的 THz 波。他们的实验还表明,THz 波的强度与偏置电场、触发脉冲上升时间、脉冲宽度及功率有关^[24]。

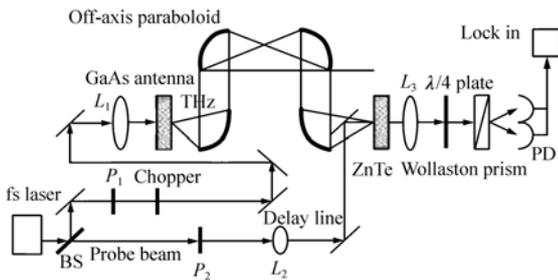


图 9 GaAs 光电导偶极天线产生 THz 电磁波实验测试系统^[24]

Fig. 9 Test system of THz electromagnetic waves generated by GaAs photoconductive antenna

2011 年,尚丽平等人对小孔径光电导天线的结构与增益的关系进行了研究,仿真结果表明:相同尺寸的蝴蝶型天线比双极型偶极子天线具有更高的增益^[25]。2010 年, J. Made 等人研究通过减少电极间距来实现 0.73 ~ 1.33 THz 可调谐 Thz 光电导天线^[26],如图 10 所示。THz 光电导天线在国外已有众多商业化产品,如 Greyhawk Optics 公司的 PCA 系列产品,如图 11 所示,尺寸约为 2 mm × 2 mm,能产生 1 ~ 1.5 THz 输出^[27]。

光电导天线也是目前常用的 THz 源之一,产生的超短脉冲、超宽带的 THz 波可以应用在成像分辨率高、目标定位特性好的远程地表遥感以及

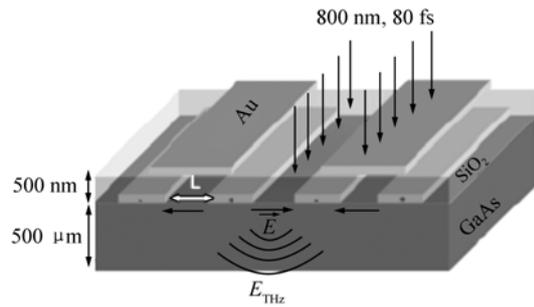


图 10 可调谐光电导^[26]

Fig. 10 Diagram of tunable photoconductive antenna

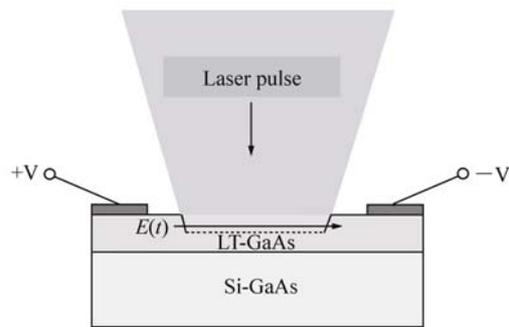


图 11 光电导天线^[27]

Fig. 11 Photoconductive antenna

材料的 THz 频谱分析等方面。它的主要缺点是产生的 THz 波的能量和频率均较低。光电导天线的发展需要寻求转换效率高的光电导材料和天线结构。

2.4 光整流 THz 源

光整流的物理机制是光学差频,用宽带的超短激光脉冲泵浦二阶非线性光学介质,不同频率的泵浦光基于光学差频产生 THz 波,图 12 是其原理示意图。激光脉冲能量直接影响着 THz 波光

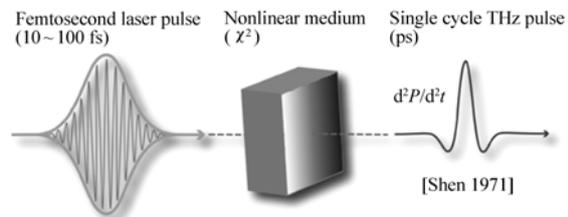


图 12 光整流原理^[28]

Fig. 12 Principle diagram of optical rectification

束能量,其转换效率主要依赖于材料的非线性系数和相位匹配条件^[28]。

1992年,S. L. Chuang等人提出光整流THz源的模型^[29]。2007年,K. L. Yeh等人用重复频率为10 Hz的掺钛蓝宝石近红外飞秒激光器泵浦MgO-LiNbO₃晶体,基于光整流效应产生中心频率为0.5 THz的THz波,脉冲能量为10 μJ,平均功率为100 μW^[30]。2008年,Andrei G. Stepanov等人利用重复频率为100 Hz、脉宽为50 fs、脉冲能量为35 mJ的800 nm激光器泵浦MgO-LiNbO₃晶体,获得能量为30 μJ的THz波^[31],如图13所示。

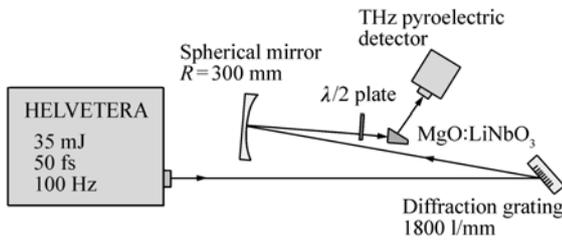


图13 毫瓦脉冲产生THz结构图^[31]

Fig. 13 THz generation structure by mW pulse

2011年,J. P. Negel等人研究了结构紧凑、低成本的光整流THz源。使用低成本、大功率的981 nm半导体激光器泵浦1030 nm飞秒激光器,再用飞秒激光脉冲泵浦GaP晶体,获得中心频率为1 THz、带宽为0.5 THz、功率为1 μW、重复频率为44 MHz的THz波^[32]。

光整流方法产生的THz波具有较高的时间分辨率和较宽的波谱范围,与光电导天线相比,光整流方法不需要外加直流偏置电场,结构简单。主要缺点是:(1)很难获得相位匹配;(2)输出功率低,不利于进行探测和应用;(3)需要使用价格昂贵的飞秒激光器。提高输出功率和降低成本是

光整流THz源需要解决的问题。

2.5 差频产生THz波

光学差频THz源是用两束频率间隔处于THz频段的近红外光 ω_{p1} 和 ω_{p2} ,在非线性晶体中差频产生THz波 $\omega_{THz} = \omega_{p1} - \omega_{p2}$,其原理如图14所示。



图14 差频原理

Fig. 14 Principle of difference frequency

早在20世纪60年代,Zernike和Berman等人利用谱宽为1.059 ~ 1.073 μm的钕激光器泵浦石英晶体进行非线性差频实验,得到频率约为3 THz的THz波^[33]。不久之后,D. W. Faries等人利用两台调谐的红宝石激光器在LiNbO₃晶体和石英晶体中差频产生可调谐THz波^[34]。

合适的差频材料是获得较高THz波输出功率的关键,因此差频材料的研究一直倍受关注。1999年,K. Kawase等人用双波长钛蓝宝石激光器在有机晶体DAST中实现了1.4 THz输出,峰值功率为2.5 μW^[35]。2001年,Kawase等人用MgO-LiNbO₃实现了频率为0.7 ~ 3 THz、峰值功率为100 mW的THz输出^[36]。2005年,加州大学S. Ya. Tochitsky等人用脉宽为250 ps的CO₂激光脉冲,在GaAs晶体中产生0.1 ~ 3 THz的可调谐输出,0.897 THz峰值功率达到2 MW^[37]。2006年,美国Yujie J. Ding等人比较了几种常见非线性晶体进行光学差频获得THz波的调谐范围和峰值功率,如表1所示^[38]。近年来,Yujie J. Ding等人还利用准相位匹配的GaP晶体差频得到了最大峰值功率为1.36 kW的1 ~ 3.5 THz波^[39]。

表1 不同晶体差频产生THz的调谐范围和峰值功率^[38]

Tab. 1 Tunable range and peak power of THz waves generated by different crystal difference frequencies

Output parameter	Crystals		
	GaSe	ZnGeP ₂	GaP
Tuning range/μm	66.5 ~ 5 664	83.1 ~ 1 632; 80.2 ~ 1 416	71.1 ~ 2 830
Peak power/W	389	134	15.6

自 20 世纪 90 年代,许多实验室开始把波长可调谐的光学参量振荡器(OPO)用于差频的泵浦源。2003 年, Tanabe 等人利用这种方法,研制出一套紧凑可调谐的 THz 源,其调谐范围为 0.5 ~ 3 THz,脉冲宽度为 10 ns,脉冲能量为 30 nJ,重复频率为 400 Hz,平均功率为 10 μ W^[40]。H. Ito 带领的研究小组利用电控制 KTP-OPO 泵浦 DAST 和 ZnGeP₂差频产生 1.5 ~ 60 THz 可调谐相干 THz 波^[41]。2008 年,美国斯坦福大学研究人员在 GaAs 晶体差频的基础上进行改进,采用 PPLN-OPO 腔内差频结构,如图 15 所示,建立了一个在 0.5 ~ 3.5 THz 可调谐、结构紧凑且室温工

作的 THz 源,其平均功率为 1 mW,且将望提升 10 ~ 100 mW 的输出功率^[42-43]。

天津大学激光与光电子研究所姚建铨等人对光学差频 THz 源进行了大量的研究。2006 年,他们利用 1 318.8 和 1 338.2 nm 双波长激光在 DAST 晶体中差频输出峰值功率为 3.6 W 的 3.297 8 THz 波,并分析了各种因素对输出功率的影响^[44]。2009 年,利用 KTP-OPO 得到的 1 064 和 2 128 nm 附近的双波长激光在 GaSe 晶体中差频得到 0.41 ~ 3.3 THz 和 0.147 ~ 3.65 THz 宽调谐相干 THz 输出,最大峰值功率为 10 ~ 17 mW^[45-46]。

相比光电导和光整流,光学差频 THz 源最大的优点是输出功率高,峰值功率可达数千瓦,甚至兆瓦量级。它的最大缺点是转换效率低,而且需要两个泵浦光源,所以结构相对比较复杂、不易于调谐。

2.6 THz 参量振荡器

THz 参量振荡器(TPO)是利用光学参量振荡来产生 THz 波。当一束强激光通过非线性晶体时,光子与声子横波场相互耦合产生电磁偶子,由电磁偶子有效受激喇曼散射产生 THz 波,该过程包括二阶和三阶非线性过程,其原理如图 16 所示。

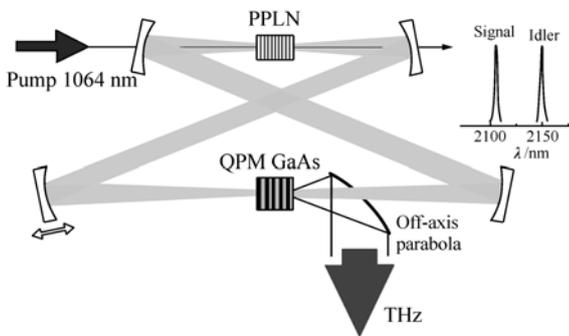
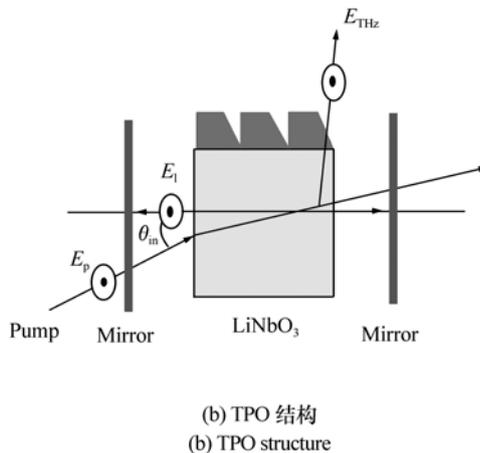
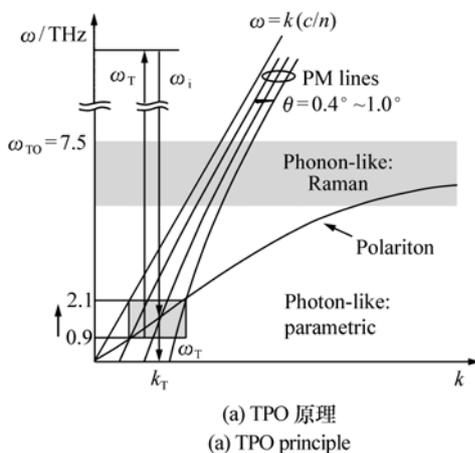


图 15 PPLN-OPO 结构图^[43]
Fig. 15 PPLN-OPO structure



(a) TPO 原理
(a) TPO principle
(b) TPO 结构
(b) TPO structure

图 16 THz 参量振荡器原理和结构图

Fig. 16 Principle and structure diagram of THz parametric oscillator

2002 年, H. Ito 等人用 1 064 nm 的 Nd: YAG 激光器获得峰值功率为 20 mW 的 0.3 ~ 7 THz 宽调谐相干 THz 输出。以此为基础还实现了高精

度、波长扫描、快速数据采集的 THz 光谱仪^[47],如图 17 所示。图 17(a)为 THz 源结构,图 17(b)为 THz 波光谱仪实物图,其中(I)为单色种子光束

产生部分; (II) 为产生 THz 波的 MgO:LiNbO₃ 晶体; (III) 为被测气体样品室。

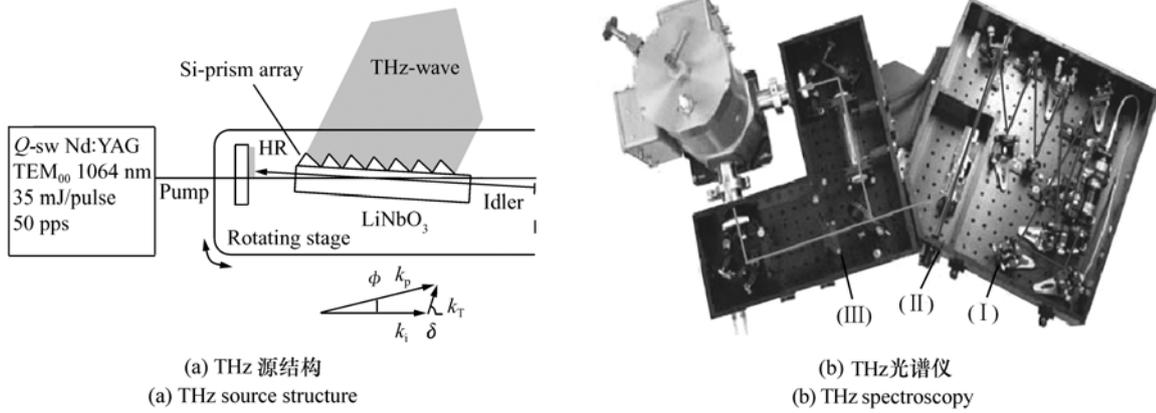


图 17 THz 源结构和太赫兹光谱仪

Fig. 17 THz source structure and THz spectroscopy

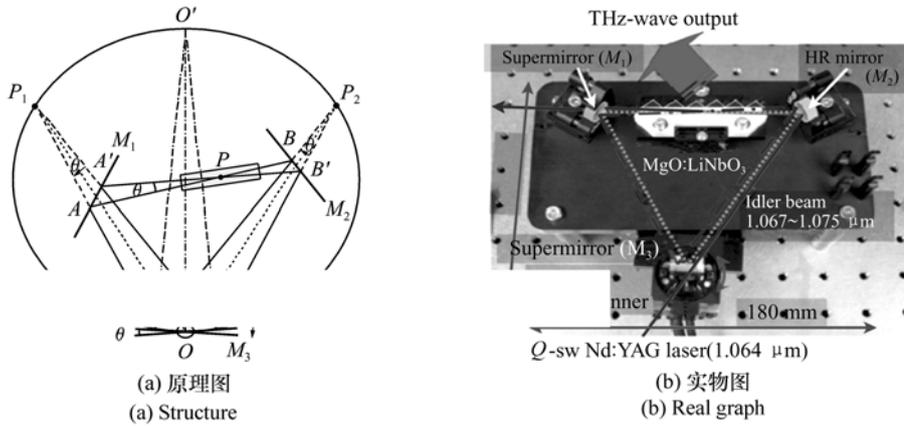
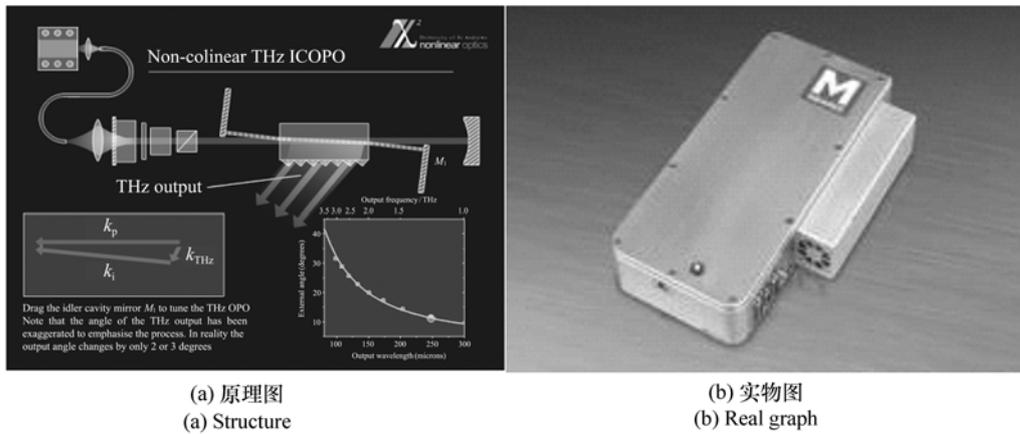


图 18 环形腔结构原理图和实物图^[48]

Fig. 18 Ring cavity structure and real graph



(a) 原理图
(a) Structure

(b) 实物图
(b) Real graph

图 19 Firefly-THz 的原理图和实物图^[50]

Fig. 19 Firefly-THz structure and real graph

2009年,H. Ito 等人又设计出一种圆形腔的 THz 参量振荡器,如图 18 所示,整个腔体由3片反射镜组成,通过调整底部腔镜角度,在0.93 ~ 2.7 THz 快速调整输出功率为40 mW的 THz 波。环形腔对输出波长的调节更加灵活、简单,同时,由于不直接改变晶体在腔内的位置,使设备的稳定性、精确度都得到有效的提高^[48]。

英国 M Squared 公司的 Firefly-THz^[49] THz 源,如图 19 所示,采用非共线相位匹配的 THz 参量振荡技术研制而成,调谐频率在 1.2 ~ 3 THz,峰值功率为 1 W、平均功率为 10 μ W,具有宽调谐、窄线宽、高亮度、室温工作等优点,在光谱技术及相关领域应用较多。

光学参量振荡器只需一个泵浦源和一块非线性晶体,调谐较为简单,转换效率比差频方法高几个数量级,同时还具有全固态设计、高效率和高输出功率等诸多优点,近 10 年来倍受人们的瞩目。

3 结束语

本文介绍了几种光子学 THz 源各自的优点和局限性,其中光泵气体 THz 激光器发展成熟,能获得较大的输出功率(平均功率可达数百 mW),但转换效率较低、体积庞大且成本高昂,使

其只能在少量实验室中应用。基于超短脉冲激光的光整流法、光电导天线和空气等离子体 THz 源具有超宽带、结构简单等特点,其平均功率较低(数百 μ W),但峰值能量可观(数十 μ J),其缺点是转换效率低、不能连续调谐,并且需要使用昂贵的飞秒激光器。光学差频 THz 源和 THz 参量振荡器是实现可调谐、结构紧凑、室温工作的 THz 源的主要途径,其中 THz 参量振荡源的结构简单,易于调谐,峰值功率可达数瓦。而光学差频 THz 源的特点是峰值功率高,最高可达兆瓦量级,但结构较为复杂。

光子学 THz 源的未来发展在技术上还需要解决下列关键问题:(1)进一步改善系统整体结构,提高能量转换效率;(2)采用最高性能的泵浦激光器;(3)寻找并采用具有更好品质因素和更低 THz 波段吸收系数的新型晶体;(4)目前,THz 光子器件的设计依赖于大量繁琐的建模与仿真工作,迫切需要专门的设计软件加快开发进程;(5)在理论上也有必要加强对新型太赫兹器件机理的理解;(6)继续研究提高 THz 源功率的方法;(7)考虑到 THz 源的实际应用,还应考虑稳定、高效、环保等技术要求。总之,实用的光子学太赫兹源正在向结构简单、可调谐、高度相干、室温工作等方向发展,在这一领域还有很多工作要做。

参考文献:

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE T. Microw. Theory*,2002,50(3):910-928.
- [2] ZHANG X CH. Materials for Terahertz science and technology[J]. *Physics*,2003,32(5):287-293.
- [3] SHERWIN M S,SCHMUTTENMAER C A,BUCKSBAUM P H. Opportunities in Terahertz(THz) Science[C]//Report of a DOE-NSF-NIH Workshop on Opportunities in THz Science, Feb. 12-14 2004, Arlington, USA, 2004.
- [4] 刘盛刚. THz 科学技术的新发展[J]. *中国基础科学*,2006,1:7-12.
LIU SH G. Recent development of terahertz science and technology[J]. *China Basic Sci.*,2006,1:7-12. (in Chinese)
- [5] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*,2010,22(6):703-707.
YAO J Q. Introduction of THz-wave and its applications[J]. *J. Chongqing University Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*,22(6):703-707. (in Chinese)
- [6] SHUMYATSKY P,ROBERT R. Terahertz sources[J]. *J. Biomed. Opt.*,2011,16(3):033001.
- [7] MUELLER E R. Terahertz radiation sources for imaging and sensing applications[J]. *Photonics Spectra*,2006,40:60-69.
- [8] BAE J,NOZOKIDO T,SHIRAI H, et al. . An EMQ-switched CO₂ laser as a pump source for a far-infrared laser with a high peak power and a high repetition[J]. *IEEE J. Quantum Elect.*,1989,25(7):1591-1594.
- [9] 冉勇,秦家银. 小型光泵腔式 NH₃ 分子亚毫米波激光器的实验研究[J]. *光电子·激光*,1999,12:495-497.
RAN Y,QIN J Y. Experimental study of miniature optically pumped cavity NH₃ submillimeter wave laser[J]. *J. Optoelectronic·Laser*,1999,12:495-497. (in Chinese)
- [10] 冉勇,秦家银,李太全,等. 光泵腔式远红外激光器的工作参数研究[J]. *激光与红外*,2002,32:245-247.

- RAN Y, QIN J Y, LI T Q, *et al.*. Study on operating parameter of optically pumped cavity NH_3 far-infrared laser[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32: 245-247. (in Chinese)
- [11] 刁智先. 可调谐 TEA- CO_2 激光泵浦的脉冲 THz 激光器性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- JIU ZH X. Performance studies on pulsed THz laser pumped by tunable TEA CO_2 laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 何志红. 光泵重水气体分子产生 THz 激光辐射技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- HE ZH H. Study of THz radiation generated by optically-pumped D_2O gas molecules[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [13] HE ZH H, YAO J Q, REN X, *et al.*. Experimental and theoretical research on a compact superradiant optically pumped D_2O gas Terahertz laser[J]. *J. Optoelectronics. Laser*, 2008, 19(1): 35-37.
- [14] 田兆硕, 王静, 费非, 等. 光抽运全金属太赫兹激光器研究[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2323-2327.
- TIAN ZH SH, WANG J, FEI F, *et al.*. Study of optically pumped all-metal terahertz laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(9): 2323-2327. (in Chinese)
- [15] 张怀武. 我国太赫兹基础研究[J]. 中国基础科学, 2008, 1: 15-20.
- ZHANG H W. Terahertz basic research in China[J]. *China Basic Science*, 2008, 1: 15-20.
- [16] MUELLER E R, HENSCHKE R, ROBOTHAM W E Jr, *et al.*. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aura satellite[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46: 4907-4915.
- [17] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, *et al.*. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 71: 2725-2728.
- [18] XIE X, DAI J M, ZHANG X C. Coherent control of THz wave generation in ambient air[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96: 075005.
- [19] KIM K Y, TAYLOR A J, GLOWNIA J H, *et al.*. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser gas interactions[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 605-609.
- [20] WANG T J, DAIGLE J F, CHEN Y, *et al.*. High energy THz generation from meter-long two-color filaments in air[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, 7(7): 517-521.
- [21] WANG T J, YUAN S, CHEN Y P, *et al.*. Toward remote high energy terahertz generation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97: 111108.
- [22] AUSTON D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 6(3): 101-103.
- [23] LEE CH H. Picosecond optoelectronic switching in GaAs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 30(2): 84-86.
- [24] 赵尚弘, 陈国夫, 赵卫, 等. THz 射线产生技术及应用最新进展[J]. 激光技术, 2000, 24(6): 352-353.
- ZHAO SH H, CHEN G F, ZHAO W, *et al.*. Generation and recent advances in applications of terahertz ray[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(6): 352-353. (in Chinese)
- [25] 施卫, 张显斌, 贾婉丽, 等. 用飞秒激光触发 GaAs 光电导体产生 THz 电磁波的研究[J]. 半导体学报, 2004, 25(12): 1735-1738.
- SHI W, ZHANG X B, JIA W L, *et al.*. Investigation on terahertz generation with GaAs photoconductor triggered by femto-second laser pulse[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2004, 25(12): 1735-1738. (in Chinese)
- [26] MADEO J, JUKAM N, OUSTINOV D, *et al.*. Frequency tunable terahertz interdigitated photoconductive antennas[J]. *Electronics Lett.*, 2010, 46(9): 611-613.
- [27] Photoconductive antenna for THz applications [EB/OL]. (2010-06-07) [2011-07-11] http://greyhawkoptics.com/images/PCA_web.pdf?osCsid=89abc4616d9f05846db27440ac48e44c.
- [28] FULOP J A, PALFALV I L, ALMASI G, *et al.*. Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification[J]. *Opt. Express*, 2010, 18: 12311-12327.
- [29] AHN J, EFIMOV A V, AVERITT R D, *et al.*. Terahertz waveform synthesis via optical Rectification of shaped ultra-fast laser pulses[J]. *Opt. Express*, 2003, 11(20): 2486-2496.
- [30] YE H K L, HOFFMANN M C, HEBLING J, *et al.*. Generation of 10 μJ ultrashort terahertz pulses by optical rectification [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(17): 171-121.
- [31] STEPANOV A G, BONACINA L, CHEKALIN S V, *et al.*. Generation of 30 μJ single-cycle terahertz pulses at 100 Hz

- repetition rate by optical rectification[J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(21):2497-2499.
- [32] NEGEL J P, HEGENBARTH R, STEINMANN A, *et al.*. Compact and cost-effective scheme for THz generation via optical rectification in GaP and GaAs using novel fs laser oscillators[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 103:45-50.
- [33] ZERNIKE Jr F, BERMAN P R. Generation of far-infrared as a difference frequency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, 15(26):999-1002.
- [34] FARIES D W, RICHARDS P L, SHEN Y R. Tunable far-infrared radiation generated from the difference frequency between two ruby lasers[J]. *Phys. Rev.*, 1969, 180(2):363-365.
- [35] KAWASE K, MIZUNO M, SOHMA S, *et al.*. Difference-frequency terahertz-wave generation from 4-dimethylaminolium-tosylate by use of an electronically tuned Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24:1065-1067.
- [36] KAWASE K, SHIKATA J I, ITO H. Terahertz wave parametric source[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 34:1-14.
- [37] TOCHITSKY S Y, RALPH J E, SUNG C, *et al.*. Generation of megawatt-power terahertz pulses by noncollinear difference-frequency mixing in GaAs[J]. *Appl. Phys.*, 2005, 98:026101.
- [38] DING Y J, MU X D. Power scaling of widely-tunable monochromatic and quasi-single-cycle THz sources[C]//Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronic, 2006 IRMMW, Sept 28-22 2006, Shanghai, China, 2006.
- [39] JIANG Y, DING Y J, ZoTOVA I B. Power scaling of widely-tunable monochromatic THz pulses based on difference-frequency generation in a pair of stacked GaP plates[C]//Laser and Electro-optics(CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference(QELS), 2010 Conference on, May 16-21 2010, San Jose, USA, 2010.
- [40] TANABE T, SUTO K, NISHIZAWA J, *et al.*. Tunable terahertz wave generation in the 3- to 7-THz region from GaP[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83:237-239.
- [41] MIYAMOTO K, YAMASHITA T, NAWAHARAL A, *et al.*. Frequency-agile coherent tunable THz-wave generation from 1.5 to 60 THz using Galvano controlled KTP-OPO[C]//Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronic, 2006 IRMMW, Sept 28-22 2006, Shanghai, China, 2006.
- [42] VODOPYANOV K L, FEJER M M, YU X, *et al.*. Terahertz wave generation in quasi-phase-matched GaAs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89:141119.
- [43] VODOPYANOV K L. Optical THz-wave generation with periodically-inverted GaAs[J]. *Laser & Phot. Rev.*, 2008, 2:11-25.
- [44] 路洋. 基于非线性晶体利用光学差频产生 THz 波辐射的研究[D]. 天津:天津大学, 2006.
LU Y. Study of THz radiation generated via optical difference frequency generation based on nonlinear crystal[D]. Tianjin:Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [45] 孙博. 基于差频技术及光学参量方法产生可调谐 THz 波的研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
SUN B. Study of tunable THz-wave generation via difference frequency generation and optical parametric process[D]. Tianjin:Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [46] 耿优福. 太赫兹波的差频产生及低损耗传输波导的研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
GENG Y F. Study on difference-frequency generation of terahertz waves and low loss waveguides for terahertz transmission [D]. Tianjin:Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [47] KAWASE K, SHIKATA J-I, ITO H. Terahertz wave parametric source[J]. *Phys. D, Appl. Phys.*, 2002, 35:R1-R14.
- [48] MINAMIDE H, IKARI T, ITO H. Frequency agile terahertz wave parametric oscillator in a ring cavity configuration[J]. *Rev. Scientific Instruments*, 2009, 80(12):123104.
- [49] MALCOLM G. New laser sources benefit terahertz and mid-infrared remote sensing[J]. *SPIE Newsroom*, 2007, 10:842.

作者简介:叶全意(1982—),女,江苏南京人,博士研究生,主要从事光子学太赫兹源方面的研究。

E-mail:yequanyi@seu.edu.cn

杨春(1970—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事非线性光学方面的研究。

E-mail:yangchun@seu.edu.cn