

# Research Progress on Terahertz Excitation of Organic Nonlinear Crystals

Wenbo Li, Shuhong Sun, Yan Zhu\*

Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan  
Email: \*zhuyankmust@foxmail.com

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2018; published: May 4<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Organic nonlinear crystals have a great potential in generating terahertz waves. Organic nonlinear optical crystals require simpler collinear phase matching conditions and lower pump energy than inorganic nonlinear optical crystals. Their properties such as refractive index, dispersion, phonon mode and absorption properties are beneficial to the generation of terahertz and other nonlinear optical processes. The research progress of two organic nonlinear crystals exciting terahertz of pyridinium-based DAST [(4-(4-(dimethylamino)styryl)-1-methylpyridinium 4-methylbenzenesulfonate)] and quinoxaline-based HMQ-TMS [2-(4-hydroxy-3-methoxystyryl)-1-methylquinolinium 2,4,6-trimethylbenzenesulfonate] is mainly reviewed and other organic nonlinear crystals are briefly reviewed in this article.

## Keywords

Terahertz, DAST, HMQ-TMS, Organic Nonlinear Crystals

---

# 有机非线性晶体激发太赫兹的研究进展

李文博, 孙淑红, 朱 艳\*

昆明理工大学, 云南 昆明  
Email: \*zhuyankmust@foxmail.com

收稿日期: 2018年3月20日; 录用日期: 2018年4月27日; 发布日期: 2018年5月4日

---

## 摘 要

有机非线性晶体在产生太赫兹波方面具有非常大的潜力。与无机非线性光学晶体相比, 有机非线性光学晶体只需要更简单的共线相位匹配条件和较低的泵浦能, 并且有机非线性晶体的折射率、色散、声子模、

\*通讯作者。

吸收性质等有利于太赫兹的产生和其他非线性光学过程。本文主要对基于吡啶鎓的DAST [(4-(4-(二甲基氨基苯乙炔基)-1-甲基吡啶鎓4-甲基苯磺酸盐)]和基于喹啉鎓的HMQ-TMS [2-(4-羟基-3-甲氧基苯乙炔基)-1-甲基喹啉-2,4'-二胺-6-三甲基苯磺酸酯]两种有机非线性晶体激发太赫兹的研究进展进行了综述,并简要介绍了DAST晶体和HMQ-TMS晶体的衍生物及具有相似性能的有机非线性光学晶体激发太赫兹的研究进展。

## 关键词

太赫兹, DAST, HMQ-TMS, 有机非线性晶体

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

太赫兹(THz)通常指频率为 0.1 到 10 THz 的电磁波[1], 在电磁波谱中的位置如图 1 所示[2]。广义上的太赫兹包含从电磁辐射的毫米波波段的高频边缘(300 GHz)到低频率的远红外光谱带边缘(3000 GHz)之间的频率范围, 太赫兹波普遍存在于自然界, 物质的太赫兹光谱(包括透射谱和反射谱)包含着丰富的物理和化学信息, 研究物质在这一波段的光谱对于物质结构的探索具有重要意义[3]。太赫兹脉冲具有瞬态性、宽带性、相干性、低能性、指纹性、信噪比高等特性[4], 近年来, 太赫兹技术在安检、国防、材料、生物、医学等领域的应用与研究得到了很大的发展, 太赫兹的产生也得到了越来越多的关注。

目前用于产生太赫兹波辐射的方法主要有[5] [6]: 利用气体激光器激发太赫兹波; 利用半导体量子级联激光器激发太赫兹波; 利用飞秒激光照射半导体材料表面产生太赫兹波; 通过施加偏置电压, 用激光脉冲激发电导偶极天线产生太赫兹波; 利用自由电子激光器激发太赫兹波(目前获得太赫兹最高输出功率的方法); 利用光整流效应激发太赫兹波; 利用差频生成法激发太赫兹波等。

光学非线性材料是差频生成法和光整流效应激发太赫兹的关键材料。

当非线性光学材料与激光发生非线性光学效应时, 可以将一固定频率的激光通过倍频、和频、差频或光学参量放大等过程转变为不同频率的各种激光。从理论上来说, 利用非线性光学材料的非线性光学效应可以获得从红外到紫外、远红外乃至亚毫米波段的特定频率或可调频率的激光[7]。

差频生成(Differential frequency generation)法是在非线性晶体中让两束激光发生二阶非线性差频效应, 通过调整入射激光的频率就可以辐射出太赫兹波, 其原理如图 2 所示[8]。这种方法没有阈值, 实验设备简单紧凑, 能够实现太赫兹设备的便携式小型化。差频生成法输出的太赫兹辐射线宽较窄, 相干性好而且

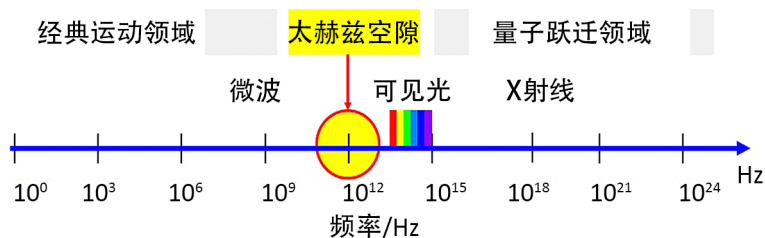


Figure 1. Schematic of terahertz gap in the electromagnetic spectrum [2]

图 1. 太赫兹空隙在电磁波谱中的位置示意图[2]

连续可调。但是这种方法的转化效率和输出功率偏低，要求极高的泵浦功率及光源功率。差频生成法产生太赫兹辐射的关键在于寻找高质量的泵浦激光源和高质量的非线性晶体，高质量的非线性晶体需要具有二阶非线性系数大、对太赫兹波吸收小的特性[8]。

光整流效应(Optical rectification effect)是一种特殊的非线性光学效应，在本质上属于差频过程[9]。其激发太赫兹波的原理为：脉冲激光入射到非线性光学晶体，激光脉冲中频率相近的部分就会由于非线性光学晶体的非线性效应而产生低频极化场并在晶体表面辐射出太赫兹波，如图3所示[10]。光整流效应产生的太赫兹辐射能量来自于入射激光脉冲的能量，其转换效率与非线性介质的光学系数以及相位匹配条件有关。与光电导天线产生太赫兹的方法相比，光整流效应产生太赫兹辐射虽然具有转化效率低、能量低的缺点，但是可以产生频带较宽的太赫兹波，其频谱通常可以达到 50 THz [11]。

因此，要想获得较高转换效率和能量的太赫兹波，非线性晶体应具备以下条件[12]：

- 1) 具有大的非线性系数；
- 2) 在太赫兹波段具有小的吸收系数；
- 3) 具有高的激光损伤阈值；
- 4) 相位匹配性能优良，具有宽的位相匹配范围。

与无机半导体(如 ZnTe, GaP 和 GaAs)相比，有机非线性光学晶体已经展示出相当高的太赫兹转换效率，而且只需要简单的共线相位匹配条件和较低的泵浦能。应用于太赫兹波产生的有机非线性光学晶体主要有两类：基于吡啶鎓的 DAST [(4-(4-(二甲基氨基)苯乙烯基)-1-甲基吡啶鎓 4-甲基苯磺酸盐)]和基于喹啉鎓的 HMQ-TMS [2-(4-羟基-3-甲氧基苯乙烯基)-1-甲基喹啉-2,4'-二胺-6-三甲基苯磺酸盐]。有机非线性光学晶体除了具有高非线性光学敏感性之外，材料的其他固有性质如折射率、色散、声子模及吸收性质等也显著影响 THz 的产生及其非线性光学过程。

## 2. 有机非线性晶体对太赫兹的激发

### 2.1. DAST 激发太赫兹

DAST [(4-(4-(二甲基氨基)苯乙烯基)-1-甲基吡啶鎓 4-甲基苯磺酸盐)]是由带正电荷的有机吡啶阳离子

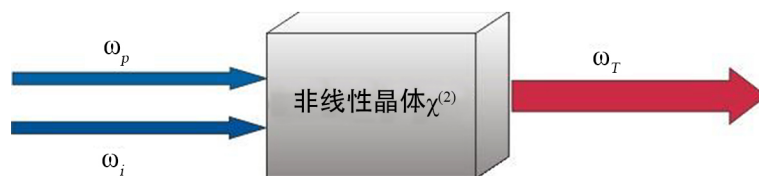


Figure 2. The schematic of terahertz generation by optical non-linear difference frequency [8]

图 2. 光学非线性差频产生太赫兹辐射示意图[8]

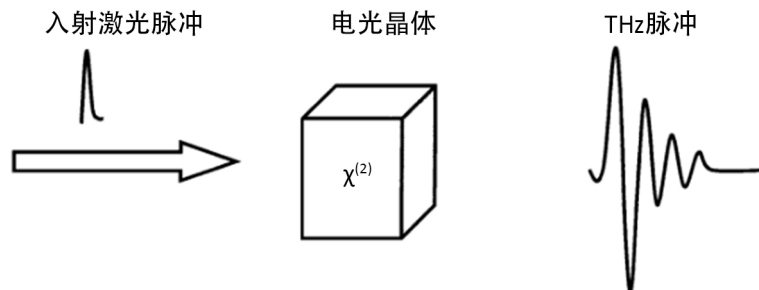


Figure 3. The schematic of terahertz generation by optical rectification effect [10]

图 3. 光整流效应产生太赫兹辐射示意图[10]

子和带负电荷的甲苯磺酸阴离子组成的有机盐。如图 4 所示[13]，对于 DAST 晶体中的每个分子而言，阳离子是非中心对称结构中最有效的非线性光学生色团，是非线性的主要来源，而阴离子通过库仑力调节阳离子生色团的排列，诱导阳离子在 DAST 晶体中按非中心对称结构堆积，从而使晶体的宏观二阶非线性系数增强[14] [15]。

在太赫兹波段，GaSe 晶体的吸收系数最低，其次是 ZnGeP<sub>2</sub>，GaAs 等，虽然 DAST 晶体的吸收系数并不特别优秀，如图 5 所示[12]，但是 DAST 晶体具有高的非线性光学系数和电光系数，介电常数较低，具有较长的相干长度，响应速度较快。因此，DAST 晶体可以通过差频生成法和光整流法来产生 THz 辐射。

1992 年，张希成等人[16]首次利用波长为 820 nm、脉冲持续时间为 150 fs 的光激发 DAST 晶体，辐射出了亚皮秒 - 亚毫米波，而且 DAST 晶体的整流场的量值比 GaAs 大 1 个数量级，比 LiTaO<sub>3</sub> 大 2 个数量级。2004 年，T. Taniuchi 等人[17]通过 1300~1450 nm 范围内的双波长共线混合，在 DAST 晶体中激发了从 2~20 THz 的频率可调的太赫兹波。2017 年，Sun Q 等人[18]通过 SNM 法(slope nucleation method)生长出了 DAST 晶体，并从 0.5 mm 厚的 DAST 晶体中产生了范围从 0.38 到 18.10 THz 的频率可调的太赫兹波，在 3.39 THz 处最大输出能量达到了 345.4 nJ/pulse，转换效率达到了  $8.44 \times 10^{-5}$ 。Uchida H 等人[19]首次报道了使用棱镜耦合切伦科夫相匹配法(the prism-coupled Cherenkov phasematching method)通过有机非线性光学晶体 DAST 生成宽频带(超过 6 THz)和高动态范围(超过 70 dB)的单周期太赫兹脉冲，棱

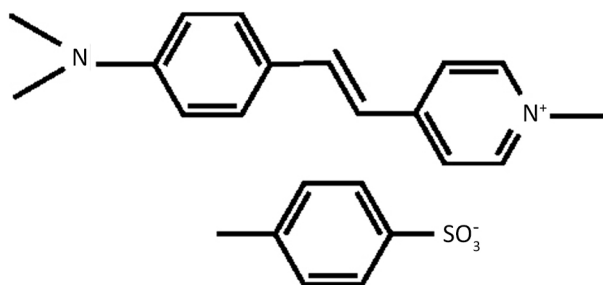


Figure 4. The molecular structure diagram of DAST [13]

图 4. DAST 的分子结构[13]

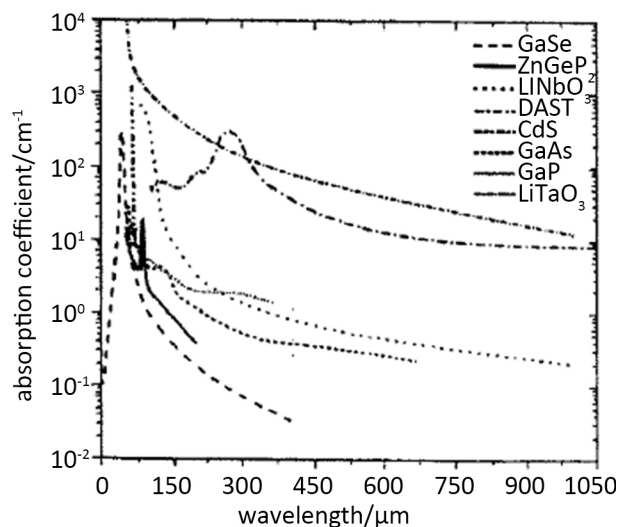


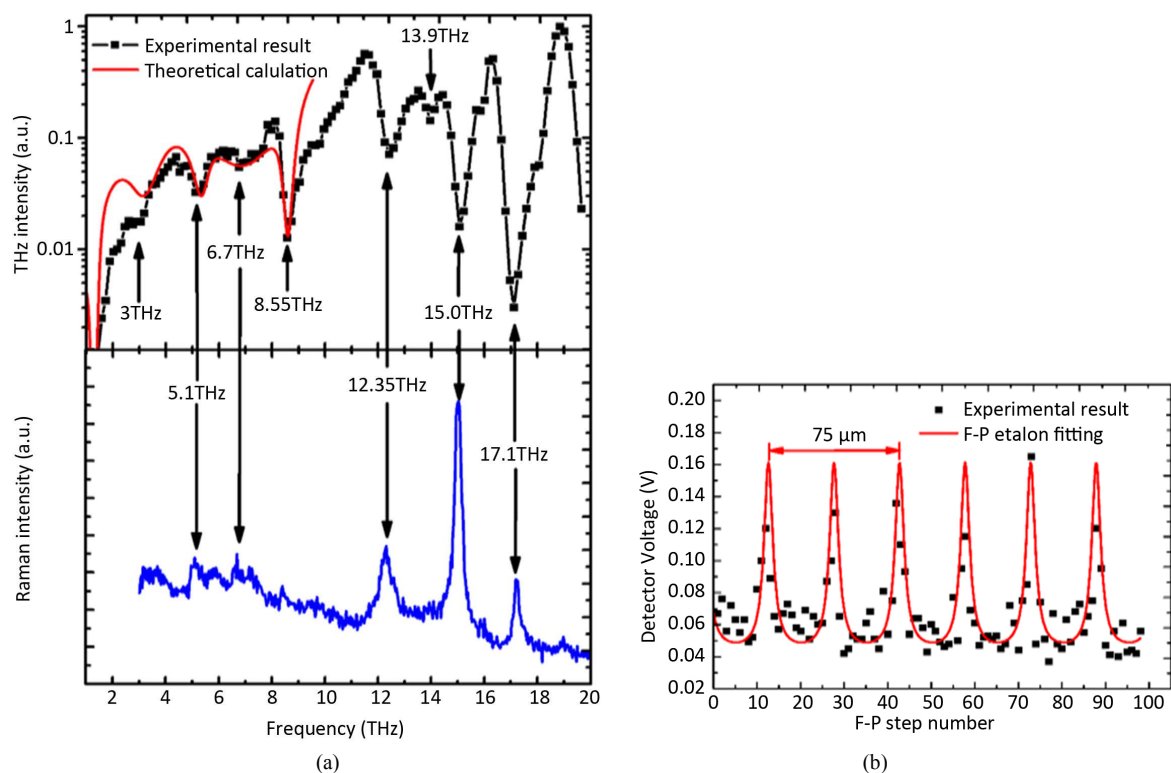
Figure 5. The absorption coefficient diagram of nonlinear crystals for terahertz generation [12]

图 5. 用于太赫兹电磁波产生的非线性晶体的吸收系数[12]

镜耦合方法允许使用 DAST 晶体作为切伦科夫型发射器以减少晶体的光吸收, 从而产生单周期和半周期的 THz 脉冲形状。Tokizane Y 等人[20]利用 DAST 晶体, 通过差频生成法产生了一个覆盖亚太赫兹频率的频率可调的太赫兹波源, 所产生的亚太赫兹波是单色的( $\Delta\nu < 33$  GHz), 在 0.65 THz 时最大能量为 80 pJ。Zhong K 等人[21]采用差频生成法通过 0.6 mm 厚的有机非线性晶体 DAST 产生太赫兹, 在 3.28 THz 时实现了太赫兹源的小型化, 预计掌上型太赫兹源将促进诸如成像等便携式太赫兹器件的发展。Rao K S 等人[22]使用光学精馏工艺生长出了有机非线性晶体 DAST, 用其激发 THz, 产生 THz 的转换效率为 0.0161%。2018 年 Yixin He 等[23]人利用差频生成法通过 DAST 晶体产生了高能量和频率可调的单色太赫兹源, 并对比分析了 DAST 晶体的拉曼光谱, 如图 6 所示; 还对 3 THz 以上的太赫兹能量下降现象进行了分析, 将下降现象归因于 DAST 晶体中晶格振动引起的共振吸收。

## 2.2. HMQ-TMS 激发太赫兹

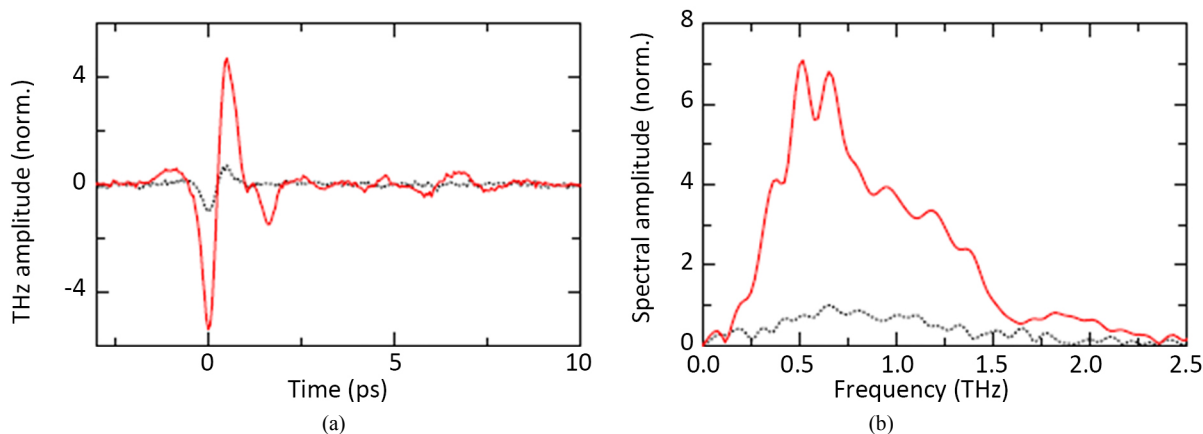
HMQ-TMS 晶体是由具有近乎完美地平行排列的阳离子 HMQ [2-(4-羟基-3-甲氧基苯乙烯基)-1-甲基咪唑鎓]和阴离子 TMS (2, 4, 6-三甲基苯磺酸盐)构成。HMQ-TMS 晶体的非线性系数( $\beta_{333}^{\text{eff}} = 185 \times 10^{-30}$  esu)比 DAST 晶体的非线性系数( $\beta_{111}^{\text{eff}} = 161 \times 10^{-30}$  esu)大。由于 HMQ-TMS 和 DAST 晶体具有相似的结构和微观非线性, 可以预期 HMQ-TMS 晶体的最大电光系数与 DAST 晶体的最大电光系数相当, 且大约比无机电光半导体 ZnTe、GaP 和 CdTe 大一个数量级。2014 年, Fabian D. J. Brunner 等人[24]在 0.2 mm 厚的 HMQ-TMS 晶体中对 1000 nm 的亚皮秒激光脉冲进行光学整流, 有效地产生了宽带 THz 脉冲。在该晶体中获得的能量转换效率比在 0.3 mm 厚的 GaP 晶体中获得的能量转换效率高 41 倍。如图 7 所示, 用



**Figure 6.** (a) THz tuning curve under the dual-wavelength energy of 8.4 mJ/pulse (top) and the Raman spectrum of DAST (bottom); (b) detected THz wavelength using the scanning Fabry-Perot etalon at 4 THz [23]

**图 6.** (a) 在 8.4 mJ/脉冲的双波长能量(顶部)和 DAST (底部)的拉曼光谱下的 THz 调谐曲线; (b) 使用 4 THz 的扫描法布里 - 珀罗标准具检测太赫兹波长[23]





**Figure 7.** THz pulse generated in a 0.2 mm thick HMQ-TMS crystal and detected in a 1 mm thick ZnTe crystal (red solid line). (a) Time-domain and (b) frequency-domain signal. THz pulse emitted from a 0.3 mm thick GaP crystal under identical conditions for comparison (black dotted line) [24]

**图 7.** 在 0.2 mm 厚的 HMQ-TMS 晶体中产生 THz 波(红色实线), 与 0.3 mm 厚 GaP 晶体在相同条件下发射的太赫兹脉冲进行比较(黑色虚线), 用 1 mm 厚的 ZnTe 晶体检测, (a)时域和(b)频域信号[24]

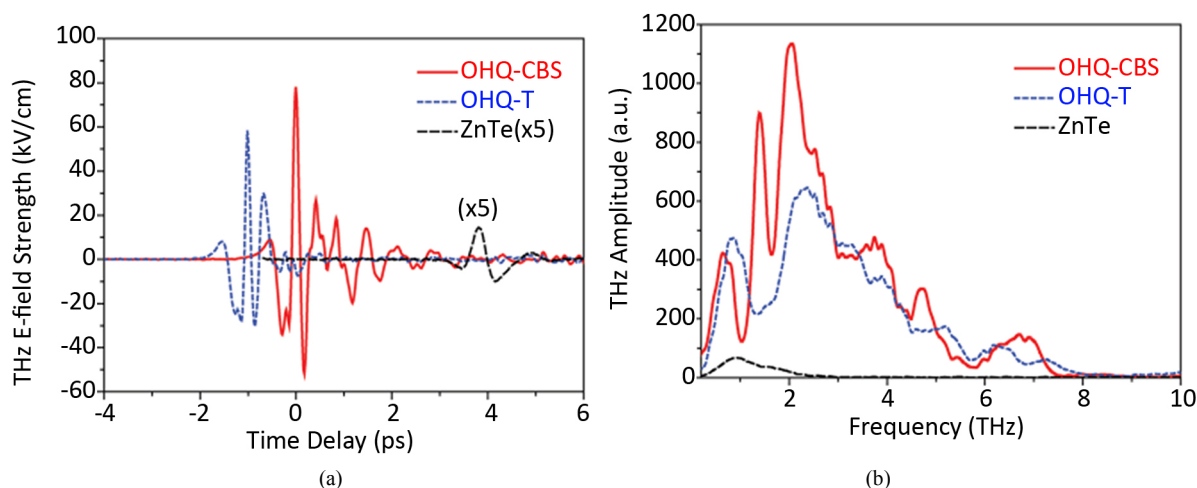
HMQ-TMS 晶体获得的 THz 信号的峰值振幅比用 GaP 晶体获得的峰值振幅在时域中大 5.4 倍, 在频域中大 7.1 倍。

2015 年, Jian Lu 等人[25]发现, 从 HMQ-TMS 晶体产生的 THz 脉冲的脉冲能量比相同条件下 ZnTe 产生的 THz 脉冲能量高 20 倍。2018 年 Andrea Rovere 等人[26]在 HMQ-TMS 有机晶体中通过共线光学整流产生了高电场太赫兹脉冲。HMQ-TMS 晶体由放大的镱激光系统(ytterbium laser system)发射的中心波长为 1030 nm 的 170 fs 长的脉冲泵浦。光泵浦能量为 420  $\mu\text{J}$  时, 可获得大于 200 kV/cm 的太赫兹峰值电场, 能量转换效率为 0.26%, 约比相同条件下常见无机晶体的能量转换效率高两个数量级。使用这样的太赫兹源测量 n 掺杂的 InGaAs 薄膜显示, 太赫兹透射的非线性增加约 2.2 倍。研究结果表明, 基于镱激光技术的这种太赫兹生成方案具有很大的潜力, 可作为台式强太赫兹光源的简单高效替代方案。特别地, 该方法还可以用于探索太赫兹频率下的非线性效应。

### 2.3. 其他有机非线性光学晶体激发太赫兹

由于 DAST 晶体和 HMQ-TMS 晶体在太赫兹激发领域展现了良好的性能, DAST 晶体和 HMQ-TMS 晶体的衍生物及具有相似性能的有机非线性光学晶体也得到了大量关注。

2017 年 Seung-Heon Lee 等人[27] [28]做了一系列关于新型偏心核 HMB 晶体的研究。由新型偏心核 HMB [(2-(4-hydroxy-3-methoxystyryl)-3-methylbenzo[d]thiazol-3-ium) (2-(4-羟基-3-甲氧基苯乙烯基)-3-甲基苯并[d]噻唑-3-鎓)]组成的苯并噻唑鎓晶体展示出非常大的宏观光学非线性效应和最佳分子排序, 可以达到最大化对角二阶非线性。在 0.26 mm 厚的 HMB 晶体中, 对 35 fs, 800 nm 波长处的激光脉冲进行光学整流, 得到比标准的 0.5 mm 厚的 ZnTe 晶体高一个数量级的太赫兹波产生效率和更宽的带宽。Seung-Heon Lee 等人又将作为强氢键受体的具有强负电性的三氟甲基基团引入到分子阴离子中, 得到了新的 4-(三氟甲基)苯磺酸 2-(4-羟基-3-甲氧基苯乙烯基)-1-甲基喹啉盐(HMQ-4TFS)晶体。由于三氟甲基基团降低了声子模强度, HMQ-4TFS 晶体在 0.5~4 THz 范围表现出相对较小的吸收系数。用 150 fs 的红外激光脉冲泵浦 0.37 mm 厚的 HMQ-4TFS 晶体, 得到比 1.0 mm 厚的 ZnTe 晶体高 23 倍的 THz 场强。2017 年, Seung-Chul Lee 等人[29]通过引入萘-2-磺酸盐和萘-1-磺酸盐得到了新的电光喹啉晶体。在 800 nm 的钛蓝宝石放大器中以 100 fs 的脉冲泵浦时, 喹啉晶体获得了比标准 ZnTe 晶体高 4.7 倍的振幅和更宽的带宽(截止频率为 6.0 THz)。



**Figure 8.** THz wave generation pumping at 1300 nm of 0.39 mm thick OHQ-CBS, 0.35 mm thick OHQ-T, and 1.0 mm thick ZnTe crystals: (a) time and (b) frequency domains [30]

**图 8.** 0.39 mm 厚的 OHQ-CBS, 0.35 mm 厚的 OHQ-T 和 1.0 mm 厚的 ZnTe 晶体在 1300 nm 处产生的 THz 波: (a) 时域谱和 (b) 频域谱 [30]

2017 年 Seung-Jun Lee 等人 [30] 发现, 0.39 mm 厚的 2-(4-羟基苯乙烯基)-1-甲基喹啉鎓 4-氯苯磺酸盐 (2-(4-hydroxystyryl)-1-methylquinolinium 4-chlorobenzenesulfonate, OHQ-CBS) 晶体表现出优异的光-太赫兹转换特性, 如图 8 所示, OHQ-CBS 晶体的带宽比 1.0 mm 厚的无机标准 ZnTe 晶体宽 3 倍。另外, 与现有的喹啉鎓晶体以及 4-甲基苯磺酸盐相比, OHQ-CBS 晶体产生的太赫兹场强高出 1.8 倍。2017 年 K. Thirupugalmani 等人 [31] 使用某些极性质子和非质子溶剂 (单一或混合) 的溶液生长出了 BNA (N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline, N-苄基-2-甲基-4-硝基苯胺) 晶体, 并首次发现高质量的 BNA 单晶可以从高极性非质子溶剂 DMSO 中生长得到。由于溶质-溶剂对之间的相互作用在晶体-溶液界面上起着至关重要的作用, 所以不同溶剂中生长的 BNA 晶体的形态表现出显著的变化。高质量的 BNA 晶体表现出相对较高的 THz 产生效率。2016 年 Kamada K 等人 [32] 通过  $\mu$ -PD 法 (micro-pulling down) 生长 BNA 纤维单晶, 成功生长出了直径约 1~2 mm 的 BNA 纤维单晶, 并可以产生频率从 4~14 THz 可调的太赫兹波。2018 年 Yuzhe Ma 等人 [33] 首次利用 SNM-SC 法 (slope nucleation method combined with slow cooling), 从甲醇中合成了高效的有机非线性光学材料 4-羟基苯甲醛-N-甲基 4-甲基苯磺酸甲苯磺酸盐 (4-hydroxy benzaldehyde-N-methyl 4-stilbazolium tosylate, HBST)。因为 HBST 晶体的苯乙烯基吡啶盐生色团和 a 轴之间的角度为  $33^\circ$ , DAST 为  $20^\circ$ , 所以 HBST 晶体的电光系数和非线性光学系数类似于 DAST, HBST 在太赫兹产生领域非常具有潜力。

### 3 结论与展望

随着超快激光技术的快速发展, 太赫兹技术在生物、医疗、探测、安检等领域得到了蓬勃发展。利用差频生成法产生的太赫兹波没有阈值, 线宽较窄, 相干性好而且连续可调; 利用光整流效应可以产生频带较宽的太赫兹波。但是这两种方法都极其依赖高质量的非线性晶体。有机非线性晶体的非线性系数普遍比无机非线性晶体高 1~2 个数量级, 具有很强的分子可操作性, 其基本性质如折射率、色散、声子模、吸收性质等有益于差频生成法与光整流效应产生太赫兹波, 高质量的有机非线性晶体可以极大的提高这两种方法的太赫兹转化效率。

本文介绍了 DAST、HMq-TMS 及其他有机非线性晶体在激发太赫兹领域的研究, 阐述了基于有机非线性晶体的差频生成法和光整流法产生太赫兹波的最新工作进展, 随着更高效有机非线性晶体的制备

及其相关技术的发展, 太赫兹技术将在科学乃至生活上发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 江舸, 杨陈, 周晓青, 等. 雷达信号处理技术在太赫兹成像中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1555-1560.
- [2] 王兴武. 基于非线性光学晶体差频产生太赫兹波的理论研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [3] 卜晓霞, 赵国忠. 氧化镁晶体的太赫兹时域光谱测量与分析[J]. 现代科学仪器, 2012(6): 37-39.
- [4] 孟坤. 太赫兹时域光谱技术研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011.
- [5] 曹俊诚. 太赫兹辐射源与探测器研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2003, 9(2): 111-117.
- [6] 姚建铨, 路洋, 张百钢, 等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 503-510.
- [7] 沈耀国. 深紫外透过的层状非线性光学物质[J]. 民营科技, 2017(6): 56-57.
- [8] 贾福阳. 基于非线性光学晶体差频产生太赫兹辐射的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [9] Yun-Shik, L., 著. 太赫兹科学与技术原理[M]. 崔万照, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [10] 王秀敏, 徐新龙, 李福利. THz 技术进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 17-25.
- [11] Bonvalet, A., Joffre, M., Martin, J.L., *et al.* (1995) Generation of Ultrabroadband Femtosecond Pulses in the Mid-Infrared by Optical Rectification of 15 fs Light Pulses at 100 MHz Repetition Rate. *Applied Physics Letters*, **67**, 2907-2909. <https://doi.org/10.1063/1.114838>
- [12] 段延敏, 朱海永, 张戈, 等. 基于差频产生太赫兹的中远红外非线性光学晶体[J]. 激光与红外, 2007, 37(12): 1241-1244.
- [13] 马玉哲, 钟德高, 曹丽凤, 等. 有机非线性光学晶体 DAST 及其在太赫兹领域的应用研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017(11).
- [14] Marder, S.R., Perry, J.W. and Schaefer, W.P. (1989) Synthesis of Organic Salts with Large Second-Order Optical Nonlinearities. *Science*, **245**, 626-628. <https://doi.org/10.1126/science.245.4918.626>
- [15] Marder, S.R., Perry, J.W. and Yakymyshyn, C.P. (1994) Organic Salts with Large Second-Order Optical Nonlinearities. *Chemistry of Materials*, **6**, 1137-1147. <https://doi.org/10.1021/cm00044a012>
- [16] Zhang, X.C., Ma, X.F., Jin, Y., *et al.* (1992) Terahertz Optical Rectification from a Nonlinear Organic Crystal. *Applied Physics Letters*, **61**, 3080-3082. <https://doi.org/10.1063/1.107968>
- [17] Taniuchi, T., Okada, S. and Nakanishi, H. (2004) Widely-Tunable THz-Wave Generation in 2-20 THz Range from DAST Crystal by Nonlinear Difference Frequency Mixing. *Electronics Letters*, **40**, 60-62. <https://doi.org/10.1049/el:20040036>
- [18] Sun, Q., Teng, B., Cao, L.F., *et al.* (2017) SEM, Chemical Etching and THz Wave Generation of 4-Dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium Tosylate (DAST) Single Crystals. *Crystallography Reports*, **62**, 1182-1186. <https://doi.org/10.1134/S1063774517070215>
- [19] Uchida, H., Oota, K., Minami, T., *et al.* (2017) Generation of Single-Cycle Terahertz Pulse using Cherenkov Phase Matching with 4-Dimethylamino-N<sup>+</sup>-methyl-4'-stilbazolium Tosylate Crystal. *Applied Physics Express*, **10**, Article ID: 062601. <https://doi.org/10.7567/APEX.10.062601>
- [20] Tokizane, Y., Nawata, K., Han, Z.L., *et al.* (2017) Tunable terahertz waves from 4-dimethylamino-N<sup>+</sup>-methyl-4'-stilbazolium Tosylate Pumped with Dual-Wavelength Injection-Seeded Optical Parametric Generation. *Applied Physics Express*, **10**, Article ID: 022101. <https://doi.org/10.7567/APEX.10.022101>
- [21] Zhong, K., Mei, J.L., Wang, M.R., *et al.* (2017) Compact High-Repetition-Rate Monochromatic Terahertz Source Based on Difference Frequency Generation from a Dual-Wavelength Nd: YAG Laser and DAST Crystal. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, **3**, 87-95. <https://doi.org/10.1007/s10762-016-0316-3>
- [22] Rao, K., Chaudhary, A.K., Venkatesh, M., *et al.* (2016) DAST Crystal Based Terahertz Generation and Recording of Time Resolved Photoacoustic Spectra of N<sub>2</sub>O Gas at 0.5 and 1.5 THz Bands. *Current Applied Physics*, **16**, 777-783. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2016.04.009>
- [23] He, Y., Wang, Y., Xu, D., Nie, M., Yan, C., Tang, L.H., Shi, J., *et al.* (2018) High-Energy and Ultra-Wideband Tunable Terahertz Source with DAST Crystal via Difference Frequency Generation. *Applied Physics B*, **124**, 16. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6887-4>
- [24] Brunner, F.D.J., Lee, S.H., Kwon, O.P. and Feurer, T. (2014) THz Generation by Optical Rectification of Near-Infrared Laser Pulses in the Organic Nonlinear Optical Crystal HMQ-TMS. *Optical Materials*, **4**, 1586-1592. <https://doi.org/10.1364/OME.4.001586>



- [25] Lu, J., Hwang, H.Y., Li, X., Lee, S.H., Kwon, O.P. and Nelson, K.A. (2015) Tunable Multi-Cycle THz Generation in Organic Crystal HMQ-TMS. *Optics Express*, **23**, 22723-22729. <https://doi.org/10.1364/OE.23.022723>
- [26] Rovere, Y., Jeong, G., Piccoli, R., Lee, S.H., *et al.* (2018) Generation of High-Field Terahertz Pulses in an HMQ-TMS Organic Crystal Pumped by an Ytterbium Laser at 1030 nm. *Optics Express*, **26**, 2509-2516. <https://doi.org/10.1364/OE.26.002509>
- [27] Lee, S.C., Kang, B.J., Koo, M.J., Lee, S.H., *et al.* (2017) New, Electro-Optic Salt Crystals for Efficient Terahertz Wave Generation by Direct Pumping at Ti: Sapphire Wavelength. *Advanced Optical Materials*, **5**, Article ID: 1600758.
- [28] Lee, S.H., Kang, B.J., Yoo, B.W., Lee, S.C., *et al.* (2017) Terahertz Phonon Mode Engineering of Highly Efficient Organic Terahertz Generators. *Advanced Functional Materials*, **27**, Article ID: 1605583. <https://doi.org/10.1002/adfm.201605583>
- [29] Lee, S.H., Lu, J., Lee, S.J., Han, J.H., Jeong, C.U., *et al.* (2017) Benzothiazolium Single Crystals: A New Class of Nonlinear Optical Crystals with Efficient THz Wave Generation. *Advanced Materials*, **29**. <https://doi.org/10.1002/adma.201701748>
- [30] Lee, J., Kang, B.J., Shin, M.H., Lee, S.C., Lee, S.H., *et al.* (2017) Efficient Optical-to-THz Conversion Organic Crystals with Simultaneous Electron Withdrawing and Donating Halogen Substituents. *Advanced Optical Materials*, **6**, Article ID: 1700930.
- [31] Thirupugalmani, K., Venkatesh, M., Karthick, S., Maurya, K.K., *et al.* (2017) Influence of Polar Solvents on Growth of Potentially NLO Active Organic Single Crystals of N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline and Their Efficiency in Terahertz Generation. *CrystEngComm*, **19**, 2623-2631. <https://doi.org/10.1039/C7CE00228A>
- [32] Kamada, K., Takida, Y., Minamide, H., *et al.* (2016) Growth of N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline (BNA) Single Crystal Fibers by Micro-Pulling down Method. *Journal of Crystal Growth*, **452**, 162-165. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.04.041>
- [33] Ma, Y.Z., Teng, B., Cao, L.F., Zhong, D.G., Ji, S.H., Teng, F., *et al.* (2018) Growth, Structural, Thermal, Dielectric and Optical Studies on HBST Crystal: A Potential THz Emitter. *Spectrochimica Acta Part A—Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **190**, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.08.035>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3512, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [cmp@hanspub.org](mailto:cmp@hanspub.org)