

文章编号: 2095-4980(2025)02-0084-12

从气体到液体的宽带太赫兹源的研究进展

高宇泽, 吴若曦, 张亮亮*

(首都师范大学 物理系, 北京 100048)

摘要: 近些年, 气体(空气等离子体)的太赫兹光子学蓬勃发展, 但关于液体在太赫兹波段产生的研究报道相对较少, 尤其是液态水, 在太赫兹频段表现出显著的吸收性能。因此, 长期以来学界普遍认为液体不可能是太赫兹波的来源。最近, 通过飞秒激光激发液体产生宽带太赫兹波实验得到了证实, 液体作为太赫兹波辐射源具有独特的特性。液体的密度近似固体, 在与激光脉冲的相互作用中表现优异, 效果远超气体源。气体和液体的流动性保证每次激光脉冲都能与新的靶材区域接触, 极大地避免了介质的损伤或退化, 这是固体材料所难以实现的功能。正是这些独特的特性, 使气体和液体在高能量密度等离子体的研究及作为下一代太赫兹波源的开发中展现出巨大的潜力。本文回顾了气体和液体作为宽带太赫兹源方面的研究进展, 并对比了使用气体和液体生成太赫兹波的多种方法。太赫兹波气体和液体光子学揭示了开发新型太赫兹波源的潜力, 并为研究激光与液体间的相互作用开辟了新的研究方向。

关键词: 宽带太赫兹源; 飞秒激光; 空气等离子体; 液态水

中图分类号: TN012

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024353

Research progress on broadband terahertz sources:from gas to liquid

GAO Yuze, WU Ruoxi, ZHANG Liangliang*

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: In recent years, terahertz photonics of gases (such as air plasma) has developed rapidly, but there are relatively few research reports on the generation of terahertz waves by liquids, especially liquid water, which exhibits significant absorption performance in the terahertz frequency range, leading researchers to believe that liquids cannot be sources of terahertz waves. Recently, experiments have confirmed that broadband terahertz waves can be generated by exciting liquids with femtosecond lasers, and liquids have unique characteristics as terahertz wave radiation sources. The density of liquids is close to that of solids, and they perform excellently in interactions with laser pulses, with effects far exceeding those of gas sources. The fluidity of gases and liquids ensures that each laser pulse can interact with a new target area, greatly avoiding damage or degradation of the medium, a function that is difficult to achieve with solid materials. It is these unique characteristics that make gases and liquids show great potential in the research of high-energy-density plasmas and the development of next-generation terahertz wave sources. This article reviews the research progress of gases and liquids as broadband terahertz sources and compares various methods of generating terahertz waves using gases and liquids. Terahertz gas and liquid photonics reveal the potential for developing new types of terahertz wave sources and open up new research directions for studying the interactions between lasers and liquids.

Keywords: broadband terahertz source; femtosecond laser; air plasma; liquid water

随着激光技术的巨大进步, 光致电离现象在气体^[1-6]、团簇^[7-9]、液体^[10-16]以及固体^[7-20]中引起广泛关注, 这一过程通过非线性过程产生相干、高强度、宽带太赫兹波。当激光强度超过电离阈值时, 会产生大量的电子和

收稿日期: 2024-07-14; 修回日期: 2024-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12074272)

*通信作者: 张亮亮 email:liangliang_zhang@cnu.edu.cn

离子^[21-23]，这些带电粒子能产生瞬态电流，辐射从微波到 X 射线^[2,24-25]的电磁波。激光诱导空气等离子体已成为最受欢迎的太赫兹源之一，在双色(基波和二次谐波)激发下，能够产生电场强度超过 MV/cm 的太赫兹波^[26-27]，为极端太赫兹科学开辟了新路径^[28]。但进一步的研究揭示了电子密度饱和和激光强度箝位效应^[29-30]会限制太赫兹波的产生效率。固体材料在生成高强度太赫兹波方面具有显著优势，2008 年，Sagisaka 等^[31]首次报道了电子在固体靶表面运动的太赫兹波生成。自那时起，太赫兹脉冲能量的记录不断在固体靶中被刷新^[17]。最近，LIAO 等^[18]观察到，由皮秒激光照射金属箔产生的太赫兹脉冲能量超过了毫焦耳(mJ)。但对于固体靶，实现每个脉冲的连续补充是困难的，通常需要为每个脉冲更换靶材，因此，只能通过单次测量检测信号。相比之下，液体由于具有流动性，很容易循环。近年来，因为液体的优越性，利用液体产生太赫兹波的研究引起了广泛关注。

1 气体产生太赫兹波

1.1 单色飞秒激光聚焦空气的太赫兹辐射

第一次关于飞秒激光激发空气等离子体产生太赫兹波的报道来源于 1993 年 Hamster 等的工作^[1-2]。图 1 所示的实验装置中，一束具有 500 mJ 能量、120 fs 脉冲宽度的激光被聚焦在气体介质之上产生等离子体。值得注意的是，实验利用了太赫兹波段干涉仪负责捕捉并记录辐射的光谱信息，或直接测定辐射能量。实验中，一束峰值功率高达 10^{12} W、持续时间为 100 fs 的飞秒激光脉冲，聚焦到气体目标之上。结果观测到，在太赫兹频率下等离子体产生了强烈的脉冲辐射。研究认为，空气等离子体中的光激发态电子由于密度梯度分布而受到制动势作用，向电子密度较低的区域运动。由于电子的运动速度不能超过激光束，等离子体密度在激光传播方向上保持不变，导致电子在反向加速，从而在沿着激光传播方向上产生偶极子^[1-2]。在此基础上，研究者试图进一步解释太赫兹的产生机理。2003 年，Leemans 等^[32]证明：基于激光尾波产生的电子束可在其真空-等离子体边界处产生 0.3~3 THz 范围内的相干辐射。他们认为太赫兹辐射的产生是由于等离子体流场加速了等离子体中电子的运动。

2007 年，为对单色飞秒激光激发空气的这种方式做进一步研究，Amico 等^[33]将飞秒激光光丝在空气中产生的强正向往太赫兹辐射归因于以光速在电离前沿后面移动的等离子体空间电荷的 Cherenkov 辐射。太赫兹辐射的偏振特性如图 2 所示，为针对不同激光聚焦距离测得的太赫兹辐射方向图。可以得出：焦距越小，得到的太赫兹辐射的锥角开口越大。当等离子体通道的长度保持在几十 cm 时，可获得窄的向前准直的太赫兹光束，其焦距大于 1 m。

为提高太赫兹波的产生效率，研究者在电离惰性气体中做了一些努力。2007 年，美国张希成教授团队^[34]使用不同惰性气体(氦、氖、氩、氪、氙)生成太赫兹脉冲。研究结果显示，太赫兹波的生成效率与气体的电离势成反比。具体说，电离势较低的气体在相同的激光激发功率下能产生更多的电离分子，从而产生更强的太赫兹波。2018 年，首都师范大学张亮亮教授团队^[35]研究了不同的惰性气体在波长可调的飞秒激光诱导下生成太赫兹波的效率。研究发现，在较重的气体中，使用较长波长的激光可生成更高能量的太赫兹波。

1.2 双色激光聚焦空气的太赫兹辐射

与单色激光激发空气产生的太赫兹源相比，采用双色激光可显著增强太赫兹波的强度。这种提升使空气等离子体成为宽带太赫兹源在时域光谱探测等实际应用场景中得到了广泛应用。

2000 年，Cook 和 Hochstrasser^[3]报道了在双色激发下，由激光诱导的气体等离子体产生太赫兹波的效率得到了显著提升。图 3 是一个典型的太赫兹双色空气等离子体系统，通过聚焦泵浦光束到空气中产生空气等离子体，插

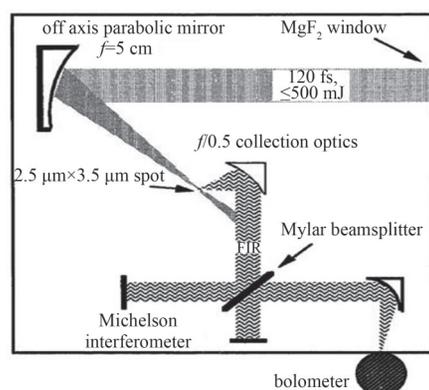


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup and detection system for generating terahertz radiation by the action of a monochromatic femtosecond laser on a gas target
图 1 单色飞秒激光作用于气体靶产生太赫兹辐射的实验和探测装置示意图

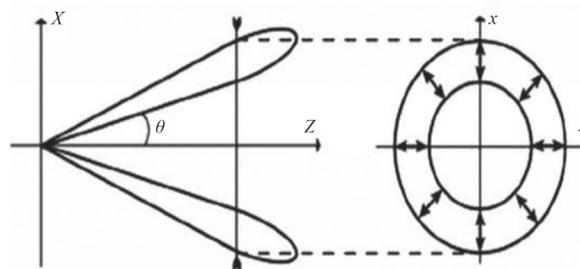


Fig.2 A schematic diagram summarizing the polarization of terahertz emission

图 2 太赫兹辐射的偏振示意图

入一个钡硼氧化物(Barium Boron Oxide, BBO)晶体产生二次谐波,通过电光取样(Electro-Optical Sampling, EOS)检测太赫兹信号。这项技术因其能够产生超过MV/cm峰值电场及极宽带宽的强太赫兹脉冲,在太赫兹领域被视为一个里程碑。他们利用BBO偏硼酸钡(β -BaB₂O₄)晶体对基频波进行倍频,进而产生二次谐波。当基频波与二次谐波结合后,其峰值强度可达到 5×10^{14} W/cm²,此时测得的太赫兹场的峰值强度可达到2 kV/cm^[3]。研究表明,该过程呈现出高度相干性,而基频波与二次谐波之间的相对相位对太赫兹场的幅度影响极其敏感。进一步地,2004年,Kress等^[36]对BBO晶体在太赫兹波生成中的效率进行了更为系统的研究。他们发现,太赫兹辐射的强度与双色光场的相对相位紧密相关。实验方案非常简便,通过在泵浦光路径上置入一块BBO晶体以产生倍频,再使用透镜将基频光和倍频光在空气中聚焦,生成的太赫兹波辐射强度可达100 kV/cm,且带宽更宽。相较于单色激光聚焦方法,显著提高了太赫兹波的辐射效率。

传统的双色方案频率比通常采用1:2,2017年,首都师范大学张亮亮等^[37]首次验证了使用1:4和2:3的频率比可有效产生太赫兹波。研究发现,通过调节较长波长激光的偏振,可调整太赫兹波的偏振;而较短波长激光的偏振调节效果不明显,如图4所示,图中,L(Lens)为透镜;DM(Dichroic Mirror)为二色镜;PM(Parabolic Mirrors)为抛物镜。图5为不同激光波长下,通过旋转偏振角度(θ)对太赫兹波的水平与垂直分量的能量变化的影响。

目前已报道的双色方案中,太赫兹辐射最强的方案是2020年Koulouklidis等^[38]提出的。使用3.9 μ m的飞秒中红外激光脉冲实现了亚毫焦级别的超短单周期太赫兹脉冲生成,并达到了2.36%的太赫兹转换效率,太赫兹辐射场强最高能够达到100 MV/cm。

对于双色空气等离子体,可通过单独调整每个光束的偏振和相位对太赫兹波进行相干控制^[5,39-40]。这一生成过程和相干控制能力可通过四波混频模型^[3,5]、瞬态电流模型^[41-43]以及通过数值解时间依赖的薛定谔方程的全量子力学模型^[44]解释。在相应的过程中,具有高三阶非线性易感性的电离气体被用于通过太赫兹场诱导的二次谐波生成过程中探测超宽带太赫兹脉冲^[45-46]。太赫兹空气偏置相干检测(THz Air Bias Coherent Detection, THz-ABCD)能够检测整个太赫兹频谱,不受晶体探测器中存在的声子吸收的限制^[47]。

1.3 预制等离子体产生太赫兹波

在研究飞秒激光与空气分子相互作用产生太赫兹辐射的过程中,研究人员一直在努力优化和扩展泵浦光源。预制等离子体产生太赫兹波是通过一个与泵浦脉冲正交的激光脉冲形成预制等离子体,如图6所示,并通

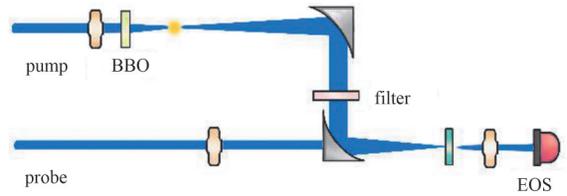


Fig.3 Typical THz two-color air plasma system
图3 典型的太赫兹双色空气等离子体系统

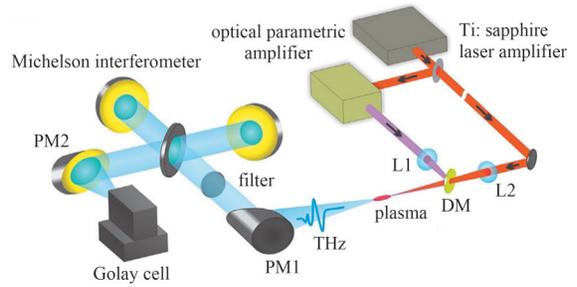


Fig.4 Experimental setup
图4 实验装置

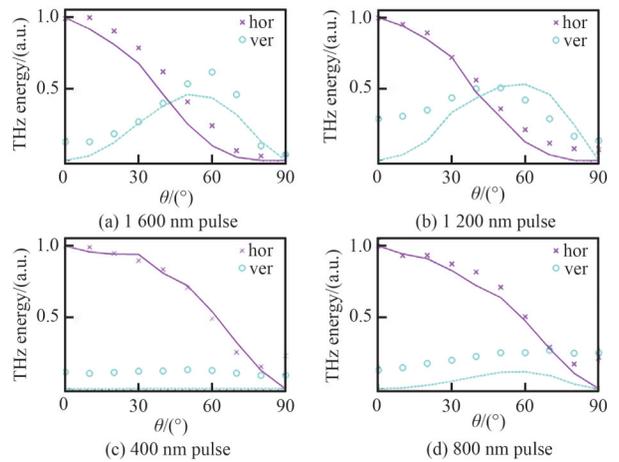


Fig.5 Influence of θ on the horizontal and vertical energies of different terahertz waves at different laser wavelengths
图5 不同激光波长下,场偏振角 θ 对不同太赫兹波水平与垂直能量的影响

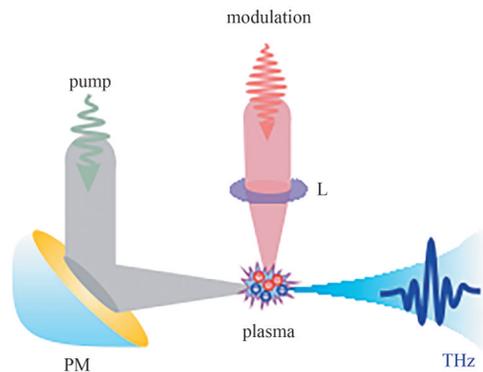


Fig.6 Schematic diagram of the preformed air plasma experimental setup
图6 预制等离子体实验装置示意图

过与泵浦脉冲相互作用调制太赫兹波的产生。

2018年, WU等^[48]利用800 nm激光在垂直于双色场的方向上产生等离子体, 发现太赫兹波的调制深度和极化变化随着激发波长的增加而增加, 图7为测量和拟合太赫兹波调制深度与泵浦激光波长的关系。2022年, 同团队的MA等^[49]利用800 nm激光产生水平方向的预制等离子体, 实现了太赫兹频谱中高频成分的增强与低频部分的抑制。图8为泵浦光束能量为150 μJ, 调制光束能量为1 000 μJ时, 3种情况下的太赫兹幅值^[48]。

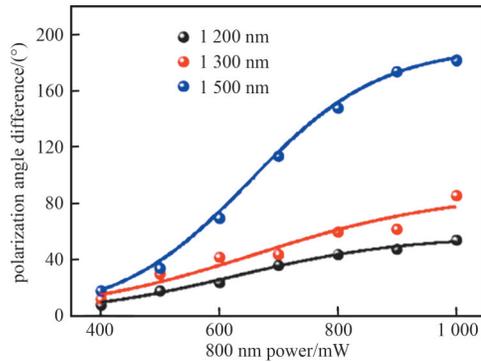


Fig.7 Measured(points) and fitted(red solid line) terahertz wave modulation depth as a function of the pump laser wavelength
图7 测量和拟合太赫兹波调制深度与泵浦激光波长的关系

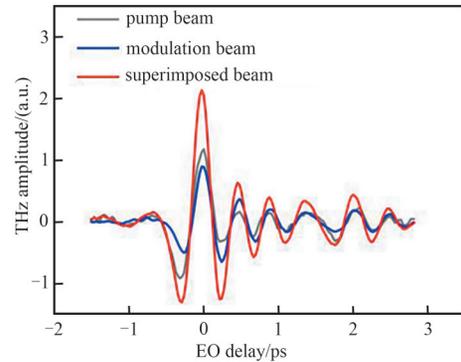


Fig.8 THz amplitude in three conditions
图8 3种情况下的太赫兹幅值

1.4 多色激光聚焦空气产生太赫兹波

在研究气体的太赫兹辐射时, 飞秒激光场的时域不对称性被认为是驱动电子移动和产生太赫兹辐射的关键因素。引入更多波段的泵浦光源并优化激光参数, 可显著提高太赫兹辐射的强度。这一策略已成为该领域研究的重要方向, 特别是相比于传统的双色方案。

在多色光场的实验研究中, 研究者通常首先使用光学参量放大器(Optical Parametric Amplifier, OPA)生成近红外激光。2017年, Bagley等^[50]将800 nm的飞秒激光输入到OPA中, 成功产生了下转换的近红外波长的信频光和闲频光。实验装置中构建了一个三色激光场, 包含800 nm激光、信频光及闲频光, 利用OPA将这3种光聚焦至空气中, 最终产生了覆盖0~6 THz频段、强度高达200 kV/cm的太赫兹辐射, 三色场显著提升了太赫兹波的强度。2019年, Vaičaitis等^[51]设计了一个基于OPA谐波三色激光场装置。他们将激光分为2路, 1路通过OPA生成信频光和闲频光。这3束光线随后共线聚焦并在空气中形成了长约1 cm的光丝, 同时产生了向外辐射的太赫兹辐射。通过调整信频光和闲频光的波长, 可不断增强太赫兹辐射强度。根据实验结果, 三色场的太赫兹辐射强度相比传统的双色场提升了1个数量级。2020年, 首都师范大学张亮亮教授团队的MA等^[52]使用附加的800 nm激光, 增强了双色激光场诱导的空气等离子体中的太赫兹波辐射。通过实验和理论分析, 发现添加800 nm激光可将太赫兹能量提高达22倍。图9(a)为实验装置示意图, 图中EO(Electro-Optical) sampling为电光采样, 图9(b)为有、无附加800 nm脉冲(100 uJ)时的太赫兹时域波形, 近红外双色场能量为60 μJ。

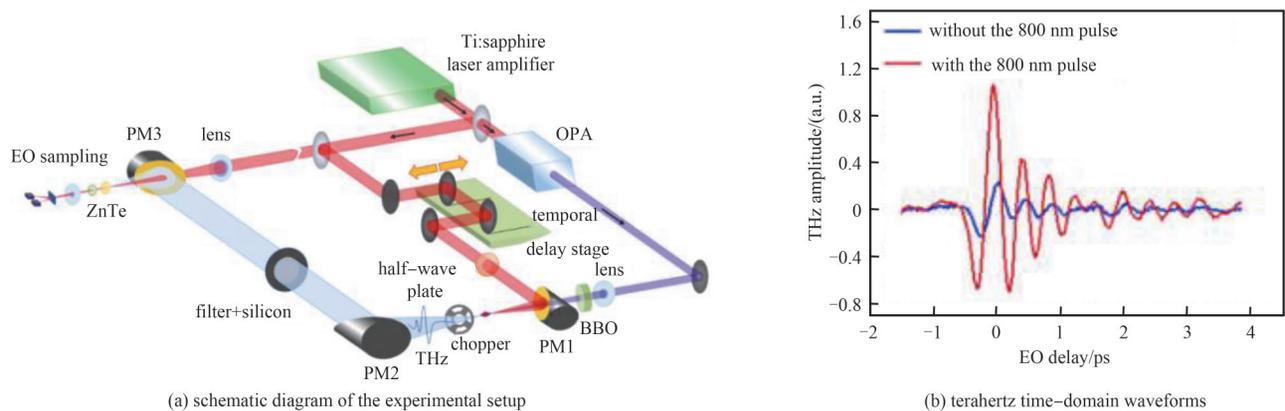


Fig.9 Experimental setup and time-domain waveforms showing enhancement of terahertz radiation in air plasma induced by two-color laser fields with the addition of an 800 nm laser

图9 附加800 nm激光对双色激光场诱导的空气等离子体中太赫兹辐射的增强实验装置及时域波形

泵浦光在 OPA 中转化为近红外波长激光的效率较低, 导致用于电离空气的光强不足, 使三色场的增强效果不如双色场; 其次, 信频光、闲频光和泵浦光的相对相位难以精确控制和维持, 易受实验室振动影响, 这对多色场太赫兹辐射的物理机制研究产生了不利影响, 并限制了太赫兹辐射强度的进一步提升和优化。2020 年, LIU 等^[53]提出一种实验方案, 通过共线谐波生成机制构建三色场, 实验装置如图 10 所示^[53]。利用飞秒激光器产生 800 nm 泵浦光, 并通过倍频和 BBO 晶体生成二倍频光和三倍频光。三色激光在同一条光路中传播, 通过调整光楔厚度和第 2 块 BBO 晶体到焦点的距离, 实现对三色光相对相位的精确控制, 控制精确度达阿秒(as)级别。团队深入研究了光路中各种元件对相位的影响, 发现生成最佳太赫兹辐射时, 三色激光场的电场强度表现为锯齿状波动。利用这种共线相位可调节的三色激光场, 当激光功率较高时, 与没有三倍频光的情况相比, 整体的太赫兹辐射强度提高了 3.24 倍。这一突破性的研究成果, 激发了更多的研究者对这一领域的兴趣。

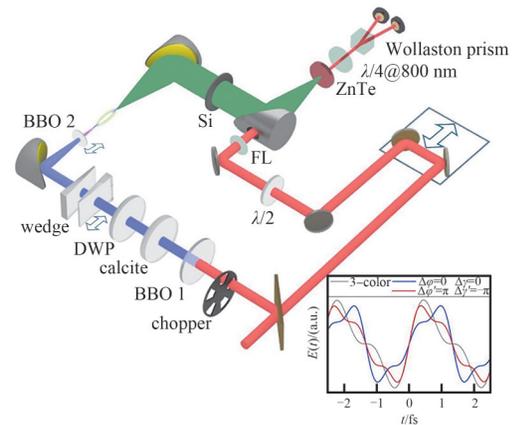


Fig.10 Phase-locked three-color field experimental setup and schematic of three-color field temporal waveform

图 10 相位锁定三色场实验装置示意图以及三色光场时域波形示意图

$$E(t) = \exp\left[\frac{-2\ln(2t^2)}{\tau^2}\right] E_{800} \sin(\omega_0 t) + E_{400} \sin(2\omega_0 t + \pi + \Delta\varphi) + E_{266} \sin(3\omega_0 t + \Delta\varphi + \Delta\gamma) \quad (1)$$

式中: E_{800} 、 E_{400} 和 E_{266} 分别表示 3 种光场的电场强度; $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\gamma$ 分别为 400 nm 和 266 nm 光场的相对相位变化; τ 为激光场的脉宽; ω_0 为基频光的中心频率。

2022 年, WANG 等^[54]利用该实验装置研究了强激光与空气相互作用中的电离率调控方法, 实验装置如图 11 所示, 测量了三色场生成的等离子体光丝不同位置的荧光信号及其与三色场相对强度和相位的变化, 监控气体分子的电离速率。研究表明, 通过调节三色场的相对相位, 可有效控制电离率。如图 12 所示, 不同等离子体光丝位置通过精确控制 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\gamma$ 相对相位, 荧光图谱呈现不同形状。通过二维傅里叶变换分析荧光图谱, 研究人员发现电离现象是由不同通道的相互竞争引起的, 该竞争关系受相位调控, 从而影响气体电离产生的自由电子密度。

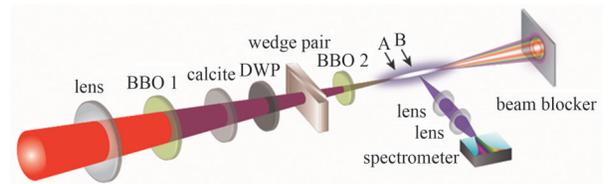


Fig.11 Three-color field ionization control experimental setup

图 11 三色场电离控制实验装置示意图

为更有效地提升气体产生太赫兹波的效率, 研究人员积极探索并实践了多种创新方法, 如: 加入外部直流偏置电场^[55]、使用接连拉丝的等离子体串^[56-59]或级联的等离子体点^[60]、不断优化泵浦脉冲参数(光斑形状^[61-62]、啁啾度^[63-65]等)。这些方法不仅丰富了对气体太赫兹辐射的理解, 也为未来的实际应用提供了更多可能性。

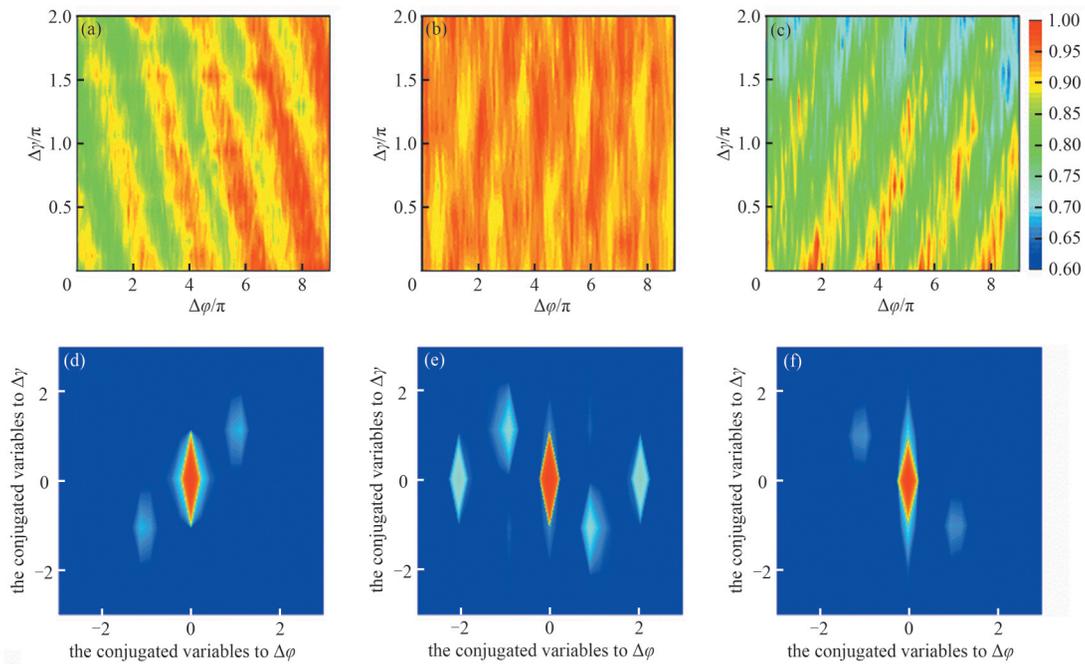
2 从液体中产生太赫兹波

进一步的研究表明, 电子密度饱和和激光强度箝位效应^[66-67]影响气体等离子体产生太赫兹波的效率。液体介质中通常具有更高的电子密度, 激光作用下电子密度饱和的极限更高, 从而可能产生更强的太赫兹波。此外, 液体中的高电子密度有助于减少激光强度的箝位, 因为电子能够更有效地吸收和转化激光能量。与气体相比, 液体由于临界电位相对较低, 因此更容易电离^[68-70]。水作为地球上最常见的液体, 具有较强的凝聚力、附着力和表面张力, 这些特性有利于形成一个表面光滑、独立的液体靶, 使水成为研究界理想的对象之一。

2.1 液体靶产生装置

对于太赫兹波, 大多数液体显示出非常强的吸收特性, 如常见的液态水在 1 THz 时的吸收系数约为 220 cm^{-1} ^[28-29]。为减少水中太赫兹信号的吸收, 需使用厚度小于 500 μm 的液体靶产生太赫兹波。液体靶可由两种方式产生: 图 13(a)为一个由重力驱动的水膜, 厚度为 210 μm , 水膜由 2 根平行的金属丝引导, 通过改变平行丝

之间的间隙，可调节水膜的厚度，较高的流速会产生较厚的膜；液体射流是制造流动靶的另一种方式，从喷嘴流出的液体进入储液器并通过蠕动泵继续泵送到喷嘴中，形成一个循环系统。图 13(b)为蠕动泵压力驱动下的水柱，直径 260 μm 的水泵驱动水线，由注射器针头引导；图 13(c)为自制的液体柱产生装置循环系统，利用各种尺寸的针头，可以产生直径介于 90~510 μm 的水柱，且只需很少的液体就能让水柱保持数小时的循环。



(a)~(c):the correlation between the intensity of the fluorescence signal and the relative phase of the three-color field at various points in the plasma filament; (d)~(f):results from the 2D Fourier transformation of the experimental fluorescence signal

Fig.12 The influence of the three-color field's relative phase on fluorescence signals

图 12 三色场相对相位对荧光信号的影响

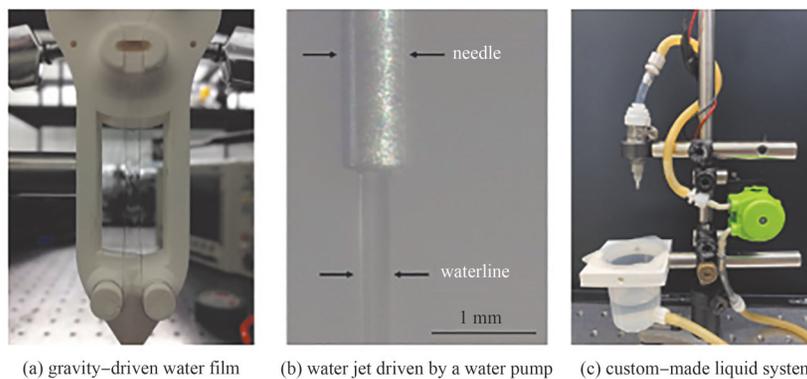


Fig.13 Liquid target and liquid circulation system

图 13 液体靶和液体循环系统

2.2 单色激光激发液态水产生太赫兹波

激光束聚焦在水膜上，在空气与水的交界处折射后，由于多光子吸收和级联电离，在焦点处形成水等离子体^[71]。在该电离区域，准自由电子朝电子密度更低的地方迁移，而质量较大的电离粒子则较为稳定。由于电子移动速度慢于激光脉冲，电子向相反方向加速并产生一个顺激光传播方向的偶极子，进而发射太赫兹波^[72-73]。2017年，美国罗彻斯特大学张希成教授团队^[10]首次报道了使用 800 nm 飞秒激光激发水膜诱导等离子体产生宽带太赫兹波。当激光焦点精确对准水膜时，太赫兹波的强度达到顶峰，如图 14(a)所示，这种现象在图 14(b)的曲线 B 中得到了直观体现。当没有液体膜，仅通过激发空气等离子体产生太赫兹波时，其强度则明显较低，如图 14 (b)中的曲线 D 所示。图 14(b)中曲线 A~C 分别表示水膜在激光焦点前、焦点处和焦点后产生的太赫兹波形，曲线 D 为没有水膜的太赫兹波信号^[10]。图 14(c)为水和空气等离子体产生的太赫兹波信号频谱^[10]的比较，与空气中的

太赫兹波相比，液态水膜产生的太赫兹波频谱明显更窄。这一现象主要归因于液态水对太赫兹波的高频成分具有强大的吸收作用^[74]。这一发现不仅证实了水膜在产生太赫兹波方面的优越性，也为未来对太赫兹波的研究和应用提供了新的视角和启示。

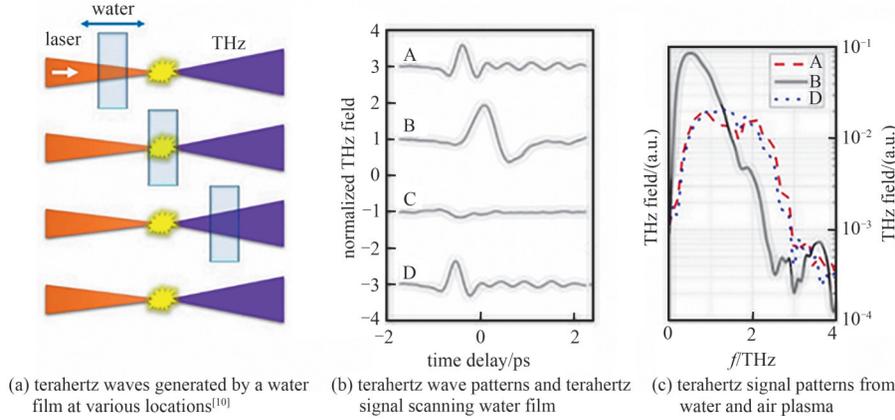
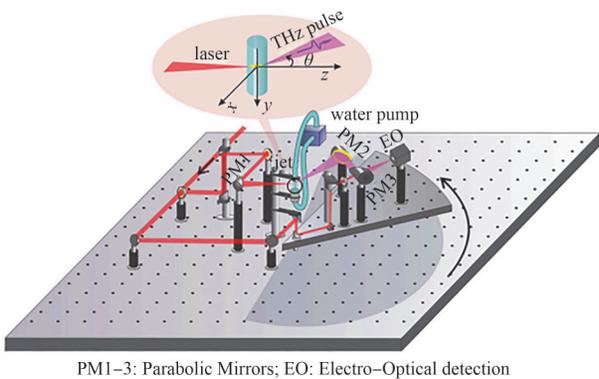


Fig.14 Experimental schematic, time-domain waveforms, and spectral comparison of terahertz waves generated by a water film at different locations
图 14 水膜在不同位置产生太赫兹波的实验示意图、时域波形及频谱比较

2019年，首都师范大学张亮亮教授和研究团队，取得了开创性的研究成果，他们成功通过激光激发水柱生成太赫兹波^[15]。水柱的圆截面避免了空气与水界面的全内反射，增加了有质动力导致的电流非对称性，显著提高了太赫兹波的生成效率。实验过程中，研究团队将水柱喷头安装在一个能精确控制其在 x 和 z 方向移动的二维平移台上，以便更好地调整激光与水柱的相互作用。激光光束沿 z 方向入射，能量设定为2 mJ，并使用水平偏振(沿 x 方向)，在距水柱中心60 μm 处聚焦，以优化太赫兹波的产生效果。同时，为全面捕捉太赫兹波，收集装置围绕水柱旋转，测量从激光入射方向 θ 角度发射的太赫兹波。实验装置如图15所示，插图为激光与水柱相互作用的示意图。

图16(a)为激光激发水柱所产生的太赫兹波形，图16(b)、图16(c)分别为相同激光条件下水膜和空气等离子体所生成的太赫兹波形。仔细观察可以发现，水柱激发的太赫兹波场强高达0.15 MV/cm，已接近于双色场激发空气等离子体的水平^[3,15]，这一数值显著超过了水膜与空气等离子体，前者只有其1/20，而后者更是低至其1/100。进一步探究这些波形的频谱特性，从图16(d)可以看出，水柱激发的太赫兹波对应的频谱^[15]范围最窄，而空气等离子体产生的频谱则最宽。这种明显的差异实质上源于等离子体在不同介质中的特性。在空气中，等离子体形成得较为广泛，其密度分布较为复杂，均匀性也相对较差；相对之下，水柱中生成的等离子体更紧凑，其密度均匀性更优越。综上所述，激光与水柱的互动呈现了一个强大的太赫兹波生成途径，其强度和频谱特性均显著优于其他介质。这为未来的太赫兹波研究和应用提供了新的方向和可能性。



PM1-3: Parabolic Mirrors; EO: Electro-Optical detection

Fig.15 Schematic diagram of the experimental setup
图 15 实验装置示意图

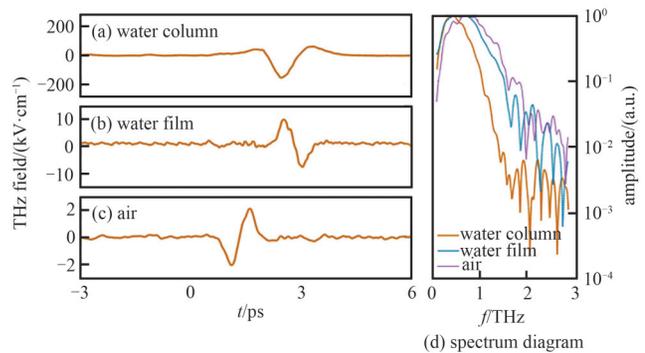


Fig.16 Terahertz time-domain waveforms and spectrum diagram generated by water jet, water film, and air plasma

图 16 水柱、水膜和空气等离子体产生太赫兹波的时域波形以及频谱图

2.3 双色激光驱动液态水的太赫兹波辐射

通过对基频光与其二次谐波进行融合并聚焦于液态介质中，大幅提升了太赫兹波的生成效率，双色场激发被证实为一种极具潜力的技术。相关研究显示，与单色光激发相比，双色场激发液态水所产生的太赫兹波场强增强了约一个数量级^[75]。学者们推测，这一现象的出现可能与水分子中电离电子的准自由态特性有关。这些电

子在水中的平均自由程相对较短，因此对于非对称场并不十分敏感。为深入理解双色场激发过程中的物理机制，研究人员进一步探讨了基频光与二次谐波之间的相对相位对太赫兹波生成的影响。研究表明，调控两束光之间的相对相位可影响太赫兹波场的相干性。当相位差改变 π 时，太赫兹波的波形会反转，图 17(a)展示了这一现象，图中插图展示了太赫兹波电场强度与相对相位之间的依赖关系。图 17(b)则通过 Golay 探测器揭示了太赫兹波能量与相位延迟之间的关系，底部曲线为遮挡太赫兹波时的噪声信号。分析表明，调制能量占比较高，达 70%。这对理解双色场激发下的太赫兹波生成机制至关重要。进一步地，图 17(c)揭示了调制与未调制的太赫兹波生成机制之间的差异。研究发现，未调制部分与激光能量呈线性关系，而调制部分则更符合二次拟合。这一发现与电光取样(Electro-Optical Sampling, EOS)的结果相一致。Golay 探测器相较于 EOS，其独特之处在于能够同时捕捉到相干信号和非相干信号。调制部分的来源，主要归因于电子在高速运动过程中与原子发生碰撞，由此产生的轫致辐射是形成相干信号的关键因素。但对于非调制部分的产生机制，则更为复杂，不仅涉及相干信号和非相干信号的生成，还可能涵盖一系列其他的物理过程，如由质动力导致的空间电荷分布的变化，也可能是一种非调制部分产生太赫兹波辐射的途径。此外，尚未在非调制部分中观察到阈值，这一现象进一步显示，太赫兹波辐射的来源或许并不仅限于电子的轫致辐射，可能还涉及电子-离子复合所产生的宽带辐射等多种机制。综上所述，双色场激发作为一种新型的太赫兹波生成技术，其独特的激发机制和高效的生成效率为太赫兹波的应用提供了新的可能。通过深入研究和理解双色场激发过程中的物理机制，有望为太赫兹波技术的发展和推广应用开辟更广阔的道路。

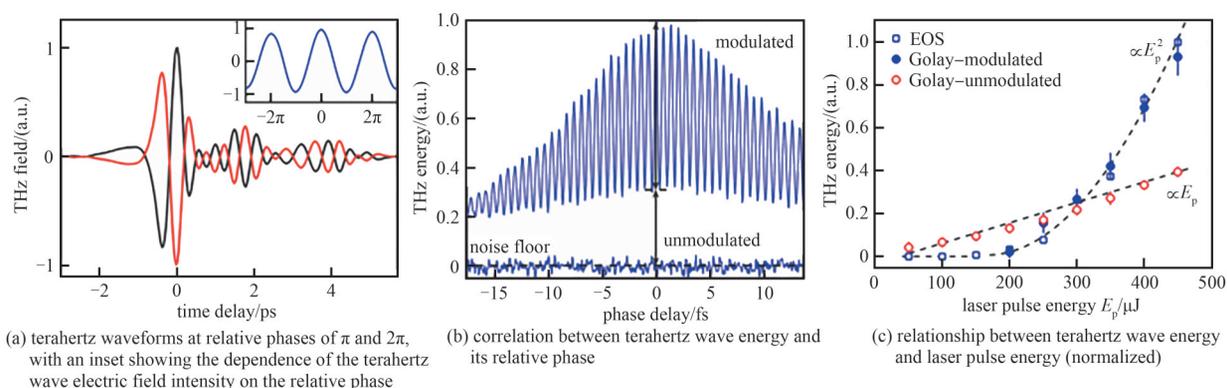


Fig.17 Terahertz wave generation by liquid water under bichromatic field excitation

图 17 液态水在双色场激发下产生太赫兹波

双光泵浦利用两束在特定时间延迟下同步的泵浦光激发液体，进而实现太赫兹波辐射效率的显著提高。通过精确控制光束的时间延迟和共线传播路径，可在水柱上实现聚焦，从而实现高效的太赫兹波生成。图 18(a)为这一过程的俯视图，清晰地展现了双光泵浦激发水柱生成太赫兹波的过程，具有时间延迟 $\Delta\tau$ 的共线传输泵浦光聚焦在水柱上，水柱的位置由二维平移台精确控制，保证了光束与液体的准确相互作用。图 18(b)则详细展示了当液体穿过激光焦点时，分别使用单独的两束泵浦光以及双泵浦光激发液体柱所产生的太赫兹波结果。值得注意的是，实验中观察到的时间延迟 $\Delta\tau$ 约为 3.9 ps，这个值超过了激光脉冲持续时间，但短于光激发电子的生命期(通常在纳秒级别)。在深入研究这一特定时间延迟对能量较大的第二束泵浦光产生的影响时，发现了其产生的太赫兹波信号具有显著增强的现象。这一现象并非随意发生，而是具有深刻的物理机制：在预先存在的第一束泵浦光的电离作用下，环境介质中的电子状态发生了显著改变，这为随后的第二束泵浦光激发更强的太赫兹波信号提供了必要的物理环境。从图 18(c)中观察到，随着时间延迟 $\Delta\tau$ 的变化，太赫兹波场的峰值呈现出显著的增强趋势。本文中 τ 的零点由两束泵浦光的自相关信号(即黑色实线)所确定。实验结果显示，太赫兹波场的增强(红色实线)可能是由于两束泵浦光产生的等离子体间的相互作用，或是第一束泵浦光触发的预等离子体效应所造成的。值得关注的是，这种增强效应主要在皮秒的时间范围内出现，这比 2 个脉冲之间的直接作用时间要长得多，后者的时间仅为 100 fs。因此，有理由认为直接的相互作用并不是导致其增强的因素。当 τ 低于零时，第二束泵浦脉冲比第一束更早到达，并形成太赫兹波。在这种情况下，第一束泵浦光的延迟并不会对最终结果造成任何影响，因此，经过归一化处理后，太赫兹波的信号峰值依然维持在一个稳定的水平。但当两束泵浦脉冲在时间轴上重叠时，太赫兹波的信号会逐渐增强，最终达到 1.8 倍的峰值增强。这样的增强效果会持续超过 10 ps，但由于第一个等离子体的吸收，太赫兹波场强最终强度会有所下降^[76]。在双泵浦光激发的过程中，太赫兹波的增强可能是由于预等离子体的存在，这为级联电离过程提供了更多的初始电子，从而加速了太赫兹波的生成。可以

通过调节两束泵浦光的能量比和偏振状态优化增强效果。目前,双光泵浦技术使能量转换效率达到了 10^{-5} ,这一数值相较于单色激发的情况提高了一个数量级。这一显著提升不仅证明了双光泵浦技术的有效性,也为进一步探索太赫兹波的高效生成和应用提供了新的方向和思路。

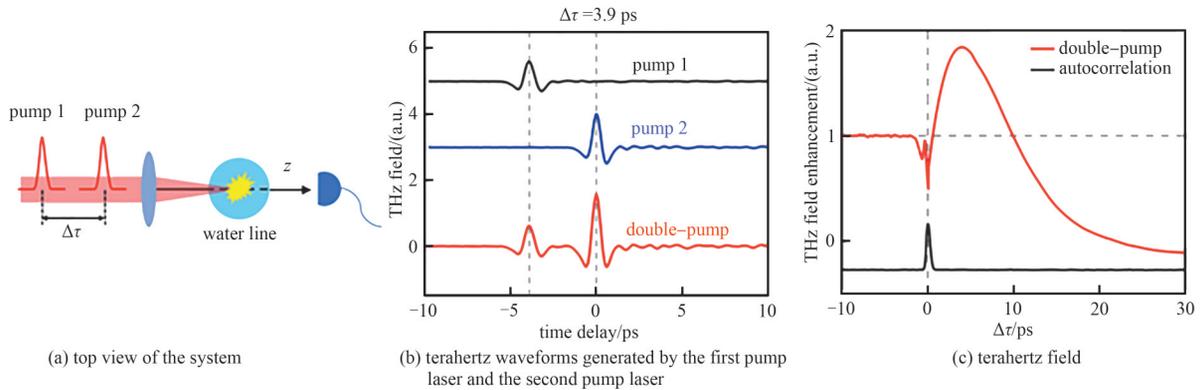


Fig.18 Terahertz wave generation by a water column excited by dual pump lasers

图 18 双泵浦光激发水柱产生太赫兹波

2.4 其他液体产生太赫兹辐射

液体在产生太赫兹波方面展示了多样化的物理特性和潜在应用。除了常见的水之外,液氮和液态镓等液体已被广泛研究^[77],它们展示了不同的太赫兹波辐射特性和优势。液氮作为一种非极性液体,具有极低的吸收率和较高的流动性,适合用于宽带太赫兹波的产生,尤其在低温条件下表现出色;液态镓则因其高表面张力和特殊的光电性质,能够比水产生更强的太赫兹波,并具有更宽的频谱带宽,尽管其穿透深度较小。对具有不同极性的液体,如 α -萘烯、对二甲苯和乙醇等的研究表明,液体的极性对其在太赫兹波辐射过程中起着关键作用^[78]。这些液体展示了多样化的太赫兹波特性,如不同的电场强度和频谱带宽,这些特性直接受到液体分子结构和极性影响。此外,盐溶液在太赫兹波辐射方面也展示了多样化的物理特性^[79-80],不同离子种类和浓度对其光学性质和传播特性有显著影响。研究表明,盐溶液的各向异性 and 局部电场效应增强了太赫兹波的吸收和折射率变化。

3 结论

本文综述了气体与液体产生太赫兹波的研究领域的最新进展,并特别对比了利用空气等离子体与液体两种介质产生太赫兹波的各种方法。与固体相比,气体和液体在产生太赫兹波方向呈现出独有的属性和优势。为全面掌握激光诱导气体和液体电离的复杂过程,需进行更深入的研究。太赫兹气体和液体光子学不仅显示了开发新型太赫兹波源的巨大潜力,而且为探索激光与介质间的相互作用机制提供了新的研究视角。本领域的所有研究成果均旨在为高效液体太赫兹源的开发提供科学基础,为太赫兹科学与技术提供一个创新的研究平台,推动太赫兹源的开发并促进对激光与物质相互作用机理的深入理解。

参考文献:

- [1] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, et al. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(17): 2725-2728. doi:10.1103/PhysRevLett.71.2725.
- [2] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, et al. Short-pulse terahertz radiation from high-intensity-laser-produced plasmas[J]. *Physical Review E*, 1994, 49(1): 671-677. doi:10.1103/PhysRevE.49.671.
- [3] COOK D J, HOCHSTRASSER R M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(16): 1210-1212. doi:10.1364/OL.25.001210.
- [4] CLERICI M, PECCIANI M, SCHMIDT B E, et al. Wavelength scaling of terahertz generation by gas ionization[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(25): 253901. doi:10.1103/PhysRevLett.110.253901.
- [5] XIE Xu, DAI Jianming, ZHANG Xicheng. Coherent control of THz wave generation in ambient air[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(7): 075005. doi:10.1103/PhysRevLett.96.075005.
- [6] DAI Jianming, LIU Jingle, ZHANG Xicheng. Terahertz wave air photonics: terahertz wave generation and detection with laser-induced gas plasma[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 183-190. doi:10.1109/JSTQE.2010.2047007.

- [7] JAHANGIRI F,HASHIDA M,NAGASHIMA T,et al. Intense terahertz emission from atomic cluster plasma produced by intense femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2011,99(26):261503-1-3. doi:10.1063/1.3672814.
- [8] NAGASHIMA T,HIRAYAMA H,SHIBUYA K,et al. Terahertz pulse radiation from Argon clusters irradiated with intense femtosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2009,17(11):8907-8912. doi:10.1364/OE.17.008907.
- [9] MORI K,HASHIDA M,NAGASHIMA T,et al. Directional linearly polarized terahertz emission from argon clusters irradiated by noncollinear double-pulse beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2017,111(24):241107. doi:10.1063/1.4991736.
- [10] JIN Q,WILLIAMS K,DAI J,et al. Observation of broadband terahertz wave generation from liquid water[J]. *Applied Physics Letters*, 2017,111(7):071103-1-4. doi:10.1063/1.4990824.
- [11] DEY I,JANA K,FEDOROV V Y,et al. Highly efficient broadband terahertz generation from ultrashort laser filamentation in liquids[J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):1184. doi:10.1038/s41467-017-01382-x.
- [12] YIWEN E,JIN Q,TCYPKIN A,et al. Terahertz wave generation from liquid water films via laser-induced breakdown[J]. *Applied Physics Letters*, 2018,113(18):181103. doi:10.1063/1.5054599.
- [13] JIN Q,DAI J M,ZHANG X C. Terahertz wave emission from a liquid water film under the excitation of asymmetric optical fields[J]. *Applied Physics Letters*, 2018,113(26):261101. doi:10.1063/1.5064644.
- [14] TCYPKIN A N,PONOMAREVA E A,PUTILIN S E,et al. Flat liquid jet as a highly efficient source of terahertz radiation[J]. *Optics Express*, 2019,27(11):15485-15494. doi:10.1364/OE.27.015485.
- [15] ZHANG Liangliang,WANG Weimin,WU Tong,et al. Strong terahertz radiation from a liquid-water line[J]. *Physical Review Applied*, 2019,12(1):014005. doi:10.1103/PhysRevApplied.12.014005.
- [16] BALAKIN A V,COUTAZ J L,MAKAROV V A,et al. Terahertz wave generation from liquid nitrogen[J]. *Photonics Research*, 2019,7(6):678-686. doi:10.1364/PRJ.7.000678.
- [17] GOPAL A,SINGH P,HERZER S,et al. Characterization of 700 μJ T rays generated during high-power laser solid interaction[J]. *Optics Letters*, 2013,38(22):4705-4707. doi:10.1364/OL.38.004705.
- [18] LIAO Guoqian,LI Yutong,LIU Hao,et al. Multimillijoule coherent terahertz bursts from picosecond laser-irradiated metal foils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019,116(10):3994-3999. doi:10.1073/pnas.1815256116.
- [19] WOLDEGEORGIS A,KURIHARA T,ALMASSARANI M,et al. Multi-MV/cm longitudinally polarized terahertz pulses from laser-thin foil interaction[J]. *Optica*, 2018,5(11):1474-1477. doi:10.1364/OPTICA.5.001474.
- [20] LIAO Guoqian,LI Yutong,ZHANG Yihang,et al. Demonstration of coherent terahertz transition radiation from relativistic laser-solid interactions[J]. *Physical Review Letters*, 2016,116(20):205003. doi:10.1103/PhysRevLett.116.205003.
- [21] MIZIOLEK A W,PALLESCHI V,SCHECHTER I. *Laser induced breakdown spectroscopy*[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2006.
- [22] ANABITARTE F,COBO A,LOPEZ-HIGUERA J M. Laser-induced breakdown spectroscopy: fundamentals, applications, and challenges[J]. *International Scholarly Research Notices*, 2012,2021(1):285240. doi:10.5402/2012/285240.
- [23] KEARTON B,MATTLEY Y. Sparking new applications[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(9): 537-540. doi: 10.1038/nphoton.2008.173.
- [24] CORDE S,TA-PHUOC K,LAMBERT G,et al. Femtosecond X rays from laser-plasma accelerators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013,85(1):1-48. doi:10.1103/RevModPhys.85.1.
- [25] YOSHII J,LAI C,KATSOULEAS T,et al. Radiation from Cerenkov wakes in a magnetized plasma[J]. *Physical Review Letters*, 1997,79(21):4194-4197. doi:10.1103/PhysRevLett.79.4194.
- [26] KUK D,YOO Y,ROSENTHAL E,et al. Generation of scalable terahertz radiation from cylindrically focused two-color laser pulses in air[J]. *Applied Physics Letters*, 2016,108(12):121106. doi:10.1063/1.4944843.
- [27] OH T,YOO Y J,YOU Y S,et al. Generation of strong terahertz fields exceeding 8 MV/cm at 1 kHz and real-time beam profiling[J]. *Applied Physics Letters*, 2014,105(4):041103-1-4. doi:10.1063/1.4891678.
- [28] ZHANG X C,SHKURINOV A,ZHANG Y. Extreme terahertz science[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 16-18. doi: 10.1038/nphoton.2016.249.
- [29] RODRIGUEZ G,DAKOVSKI G L. Scaling behavior of ultrafast two-color terahertz generation in plasma gas targets:energy and pressure dependence[J]. *Optics Express*, 2010,18(14):15130-15143. doi:10.1364/OE.18.015130.
- [30] CHIN S L,WANG T J,MARCEAU C,et al. Advances in intense femtosecond laser filamentation in air[J]. *Laser Physics*, 2012,22(1):1-53. doi:10.1134/S1054660X11190054.
- [31] SAGISAKA A,DAIDO H,NASHIMA S,et al. Simultaneous generation of a proton beam and terahertz radiation in high-intensity laser and thin-foil interaction[J]. *Applied Physics B*, 2008,90(3):373-377. doi:10.1007/s00340-008-2931-8.

- [32] LEEMANS W P, GEDDES C G P, FAURE J, et al. Observation of terahertz emission from a laser-plasma accelerated electron bunch crossing a plasma-vacuum boundary[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(7): 074802. doi:10.1103/PhysRevLett.91.074802.
- [33] D'AMICO C, HOUARD A, FRANCO M, et al. Conical forward THz emission from femtosecond-laser-beam filamentation in air[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(23): 235002. doi:10.1103/PhysRevLett.98.235002.
- [34] CHEN Yunqing, YAMAGUCHI M, WANG Mingfeng, et al. Terahertz pulse generation from noble gases[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(25): 251116. doi:10.1063/1.2826544.
- [35] ZHAO Hang, ZHANG Liangliang, HUANG Suxia, et al. Terahertz wave generation from noble gas plasmas induced by a wavelength-tunable femtosecond laser[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(3): 299-304. doi:10.1109/TTHZ.2018.2820425.
- [36] KRESS M, LÖFFLER T, EDEN S, et al. Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1120-1122. doi:10.1364/OL.29.001120.
- [37] ZHANG Liangliang, WANG Weimin, WU Tong, et al. Observation of terahertz radiation via the two-color laser scheme with uncommon frequency ratios[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(23): 235001. doi:10.1103/PhysRevLett.119.235001.
- [38] KOULOUKLIDIS A D, GOLLNER C, SHUMAKOVA V, et al. Observation of extremely efficient terahertz generation from mid-infrared two-color laser filaments[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 292. doi:10.1038/s41467-019-14206-x.
- [39] DAI J M, KARPOWICZ N, ZHANG X C. Coherent polarization control of terahertz waves generated from two-color laser-induced gas plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(2): 023001. doi:10.1103/PhysRevLett.103.023001.
- [40] WEN H D, LINDENBERG A M. Coherent terahertz polarization control through manipulation of electron trajectories[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(2): 023902. doi:10.1103/PhysRevLett.103.023902.
- [41] KIM K Y, TAYLOR A J, RODRIGUEZ G. Generation of coherent terahertz radiation in ultrafast laser-gas interactions[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16(5): 56706. doi:10.1063/1.3134422.
- [42] KIM K Y, GLOWNIA J H, TAYLOR A J, et al. Terahertz emission from ultrafast ionizing air in symmetry-broken laser fields[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4577-4584. doi:10.1364/OE.15.004577.
- [43] KIM K Y, TAYLOR A J, GLOWNIA J, et al. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 605-609. doi:10.1038/nphoton.2008.153.
- [44] KARPOWICZ N, ZHANG X C. Coherent terahertz echo of tunnel ionization in gases[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(9): 093001. doi:10.1103/PhysRevLett.102.093001.
- [45] DAI Jianming, XIE Xu, ZHANG X C. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(10): 103903. doi:10.1103/PhysRevLett.97.103903.
- [46] KARPOWICZ N, DAI J M, LU X F, et al. Coherent heterodyne time-domain spectrometry covering the entire "terahertz gap"[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(1): 011131-1-3. doi:10.1063/1.2828709.
- [47] WU Q, ZHANG X C. 7 terahertz broadband GaP electro-optic sensor[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(14): 1784-1786. doi:10.1063/1.118691.
- [48] WU Tong, DONG Liquan, HUANG Suxia, et al. Excitation-wavelength-dependent terahertz wave modulation via preformed air plasma[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(17): 171106. doi:10.1063/1.5022448.
- [49] MA Danni, DONG Liquan, ZHANG Minghao, et al. Terahertz wave generation from two-color laser-excited air plasma modulated by bichromatic laser fields[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, 12(3): 267-273. doi:10.1109/TTHZ.2022.3149975.
- [50] BAGLEY J D, MOSS C D, SORENSON S A, et al. Laser-induced plasma generation of terahertz radiation using three incommensurate wavelengths[J]. *Journal of Physics B: Atomic Molecular and Optical Physics*, 2018, 51(14): 144004. doi:10.1088/1361-6455/aac6ef.
- [51] VAIČAITIS V, BALACHNINAITĖ O, MORGNER U, et al. Terahertz radiation generation by three-color laser pulses in air filament[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(17): 173103. doi:10.1063/1.5078683.
- [52] MA Danni, DONG Liquan, ZHANG Minghao, et al. Enhancement of terahertz waves from two-color laser-field induced air plasma excited using a third-color femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20598-20608. doi:10.1364/OE.395130.
- [53] LIU Shaojie, FAN Zhengquan, LU Chenhui, et al. Coherent control of boosted terahertz radiation from air plasma pumped by a femtosecond three-color sawtooth field[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(6): 063522. doi:10.1103/PhysRevA.102.063522.
- [54] WANG Shixiang, LU Chenhui, FAN Zhengquan, et al. Coherently controlled ionization of gases by three-color femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review A*, 2022, 105(2): 023529. doi:10.1103/PhysRevA.105.023529.

- [55] FENG Shijia, DONG Liquan, TAN Yong, et al. Observation on the competition mechanism of terahertz wave generation from filament in bias electric field[J]. *Optics Communications*, 2020(473):125917. doi:10.1016/j.optcom.2020.125917.
- [56] MANCEAU J M, MASSAOUTI M, TZORTZAKIS S. Strong terahertz emission enhancement via femtosecond laser filament concatenation in air[J]. *Optics Letters*, 2010,35(14):2424–2426. doi:10.1364/OL.35.002424.
- [57] ZHANG Zhelin, CHEN Yanping, CHEN Min, et al. Controllable terahertz radiation from a linear-dipole array formed by a two-color laser filament in air[J]. *Physical Review Letters*, 2016,117(24):243901. doi:10.1103/PhysRevLett.117.243901.
- [58] HE Boqu, NAN Junyi, LI Min, et al. Terahertz modulation induced by filament interaction[J]. *Optics Letters*, 2017,42(5):967–970. doi:10.1364/OL.42.000967.
- [59] ZHANG Zhelin, CHEN Yanping, LIU Yang, et al. Dual-frequency terahertz emission from splitting filaments induced by lens tilting in air[J]. *Applied Physics Letters*, 2014,105(10):101110. doi:10.1063/1.4895720.
- [60] ZHANG Yizhu, JIAO Zhihong, HE Tao, et al. Intensity-surged and bandwidth-extended terahertz radiation in two-foci cascading plasmas[J]. *Optics Letters*, 2022,47(15):3816–3819. doi:10.1364/OL.465496.
- [61] VAIČAITIS V, TAMULIENĖ V. Beam-distortion enhanced terahertz radiation generation in air[J]. *Results in Physics*, 2022(42):105985. doi:10.1016/j.rinp.2022.105985.
- [62] KUK D, YOO Y, ROSENTHAL E, et al. Generation of scalable terahertz radiation from cylindrically focused two-color laser pulses in air[J]. *Applied Physics Letters*, 2016,108(12):121106. doi:10.1063/1.4944843.
- [63] MORADI S, GANJOVI A, SHOJAEI F, et al. Parametric study of broadband terahertz radiation generation based on interaction of two-color ultra-short laser pulses[J]. *Physics of Plasmas*, 2015,22(4):043108. doi:10.1063/1.4916123.
- [64] NGUYEN A, DE ALAIZA-MARTÍNEZ P G, THIELE I, et al. THz field engineering in two-color femtosecond filaments using chirped and delayed laser pulses[J]. *New Journal of Physics*, 2018,20(3):033026. doi:10.1088/1367-2630/aaa470.
- [65] ZHANG Z, PANOV N, ANDREEVA V, et al. Optimum chirp for efficient terahertz generation from two-color femtosecond pulses in air[J]. *Applied Physics Letters*, 2018,113(24):241103. doi:10.1063/1.5053893.
- [66] RODRIGUEZ G, DAKOVSKI G L. Scaling behavior of ultrafast two-color terahertz generation in plasma gas targets: energy and pressure dependence[J]. *Optics Express*, 2010,18(14):15130–15143. doi:10.1364/OE.18.015130.
- [67] CHIN S L, WANG T J, MARCEAU C, et al. Advances in intense femtosecond laser filamentation in air[J]. *Laser Physics*, 2012,22(1):1–53. doi:10.1134/S1054660X11190054.
- [68] WILLIAMS F, VARMA S, HILLENUS S. Liquid water as a lone-pair amorphous semiconductor[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1976,64(4):1549–1554. doi:10.1063/1.432377.
- [69] NIKOGOSYAN D N, ORAEVSKY A A, RUPASOV V I. Two-photon ionization and dissociation of liquid water by powerful laser UV radiation[J]. *Chemical Physics*, 1983,77(1):131–143. doi:10.1016/0301-0104(83)85070-8.
- [70] CROWELL R A, BARTELS D M. Multiphoton ionization of liquid water with 3.0~5.0 eV photons[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996,100(45):17940–17949. doi:10.1021/jp9610978.
- [71] KENNEDY P K, HAMMER D X, ROCKWELL B A. Laser-induced breakdown in aqueous media[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1997,21(3):155–248. doi:10.1016/S0079-6727(97)00002-5.
- [72] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, et al. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction[J]. *Physical Review Letters*, 1993,71(17):2725–2728. doi:10.1103/PhysRevLett.71.2725.
- [73] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, et al. Short-pulse terahertz radiation from high-intensity-laser-produced plasmas[J]. *Physical Review E*, 1994,49(1):671–677. doi:10.1103/PhysRevE.49.671.
- [74] HALE G M, QUERRY M R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3):555–563. doi:10.1364/AO.12.000555.
- [75] JIN Qi, YIWEN E, GAO Shenghan, et al. Preference of subpicosecond laser pulses for terahertz wave generation from liquids[J]. *Advanced Photonics*, 2020,2(1):015001. doi:10.1117/1.AP.2.1.015001.
- [76] JIN Q, YIWEN E, ZHANG X C. Enhancement of terahertz emission by a preformed plasma in liquid water[J]. *Applied Physics Letters*, 2019,115(10):101101. doi:10.1063/1.5119812.
- [77] CAO Yuqi, HUANG Pingjie, ZHANG Xicheng. Broadband terahertz wave emission from liquid metal[J]. *Applied Physics Letters*, 2020,117(4):041107. doi:10.1063/5.0015507.
- [78] SNYDER L R. Classification of the solvent properties of common liquids[J]. *Journal of Chromatography A*, 1974,92(2):223–230. doi:10.1016/S0021-9673(00)85732-5.