

基于光电流模型的液体介质太赫兹辐射的理论研究

沈琦, 许虎, 王九江, 徐煜, 陈曦, 卢晨晖

上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201600

摘要:目的 超快激光作用液体介质相较于与气态、固态介质可产生更高能量的太赫兹波, 相关研究工作在实验方面已相对完善, 而理论方面缺少完整解释过程, 运用逐步建立瞬态光电流模型的进程详尽论述其物理机制, 并通过此模型研究水、丙酮等4种溶液在不同参数条件下对太赫兹的转化效率。方法 以水分子为例, 在传统光电流模型的基础上, 基于其电离原理构建三能级系统, 通过水分子电离势确定电离弛豫时间, 并联合分子弛豫时间与三阶非线性极化率来确定水分子电离率及电流强度, 进而构建完整的液态溶液瞬态光电流模型, 并运用该模型在两束800 nm高斯光场下, 研究了在水与丙酮等4种液体中不同激光参数对太赫兹辐射能量的影响。结果 电场强度越强, 导致的分子电离率越高, 对应的太赫兹转换效率也越高, 并且在特定的激光强度下, 最强太赫兹辐射能量对应一个最佳脉宽及脉冲延迟, 处于亚皮秒量级, 此外, 进一步对比了水和丙酮溶液中, 太赫兹辐射的能量差异和时频谱特征, 结果表明丙酮辐射产率始终最高。结论 在液体介质中, 太赫兹辐射的能量受介质电离势、吸收系数、分子密度等多方面影响, 这也同样说明和验证了丙酮综合性能参数优于水、重水和乙醇。利用光电流模型研究不同液态中太赫兹辐射的强度, 为理解相关更多液态介质的辐射情况以及实验提供了参考。

关键词: 太赫兹; 液体介质; 三能级体系; 光电流模型

中图分类号: O437 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0003.013

Theoretical Study of Terahertz Radiation in Liquid Medium Based on Photocurrent Model

SHEN Qi, XU Hu, WANG Jiuqiang, XU Yu, CHEN Xi, LU Chenhui

School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China

Abstract: Objective Ultrafast lasers acting on liquid media can generate higher energy terahertz waves compared with gaseous and solid media, and the related research work has been relatively perfect in experiments, while the theoretical aspect lacks a complete explanation process. The physical mechanism of the transient photocurrent model was discussed in detail through the process of step-by-step establishment of the model, and the conversion efficiencies of four solutions, such as water and acetone, to terahertz under different parameter conditions were investigated through this model. **Methods** Taking water molecules as an example, a three-level system was constructed based on the ionization principle on the basis of the traditional photocurrent model. The ionization relaxation time was determined by the ionization potential of water molecules, and the ionization rate and current intensity of water molecules were determined by associating the ionization time with the third-order nonlinear polarization rate. A complete transient photocurrent model of liquid solution was then constructed and applied to study the effect of different laser parameters on the terahertz radiation energy in four liquids, including water and acetone, under two 800 nm Gaussian light fields. **Results** The stronger the electric field intensity, the higher the resulting molecular ionization rate, and the higher the corresponding terahertz conversion efficiency. At a given laser intensity, the strongest terahertz radiation energy corresponded to an optimal pulse width and

收稿日期: 2023-02-27 修回日期: 2023-05-18 文章编号: 1672-058X(2024)03-0098-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(11604205).

作者简介: 沈琦(1996—), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 从事液态介质辐射太赫兹波研究.

通讯作者: 卢晨晖(1988—), 男, 安徽阜阳人, 副教授, 博士, 从事超快激光、光学成像等研究. Email: lchhui@163.com.

引用格式: 沈琦, 许虎, 王九江, 等. 基于光电流模型的液体介质太赫兹辐射的理论研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 98—103.

SHEN Qi, XU Hu, WANG Jiuqiang, et al. Theoretical study of terahertz radiation in liquid medium based on photocurrent model [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 98—103.

pulse delay in the sub-picosecond order. In addition, the energy difference and time-frequency spectrum characteristics of terahertz radiation in water and acetone solutions were further compared, and the results showed that the radiation yield of acetone was always the highest. **Conclusion** In liquid media, the energy of terahertz radiation is affected by various aspects such as the ionization potential of the medium, absorption coefficient, molecular density, etc., which likewise illustrates and validates the superiority of acetone over water, heavy water, and ethanol in terms of the combined performance parameters. In this paper, the intensity of terahertz radiation in different liquid states is investigated using photocurrent model, which provides a reference for understanding the radiation in other liquid media as well as for experiments.

Keywords: terahertz; liquid medium; three-level system; photocurrent model

1 引言

太赫兹是指一类特定的电磁波,指频率范围在0.1~10太赫兹区域内,高频段和低波段则分别和毫米波、近红外光重叠,从电子学领域过渡到光子科学的电磁领域,由于自然界的许多物质能量信息均处于太赫兹波段,包括半导体、有机物、等离子体等,所以太赫兹波在通讯传播^[1-2]、无损检测^[3-4]和安全检查^[5-6]等方面都受到了人们的普遍重视。近15年来,由于探测元件和飞秒激光技术的蓬勃发展,太赫兹技术得到了蓬勃发展,并在随着对该领域的深入研究,研究人员已经能够利用多种介质向外辐射研究人员已经能够利用多种介质向外辐射产生稳定的太赫兹波^[7-8],然而制约太赫兹技术发展的关键因素仍然是缺少高强度和高转化效率的太赫兹源。因此,寻找更优的太赫兹辐射源仍是太赫兹研究领域的热点问题。而此前科研人员采用了固体辐射源,用光电导天线技术和用光整流晶体技术来产生太赫兹,光电导天线原理就是通过外加的偏置电场技术驱动超快激光所形成的光生自由载流子,来向外界传播太赫兹信号;光整流原理是通过激光脉冲,对含有二阶以上非线性介质的物体形成交变电场,从而向外传播电磁波,但由于固体放射源本身易被高场强的激光破坏,因此很难进行对脉冲的连续补充,但检测信号只可以进行单次检测。而后研究人员认为即使在普通空气中,也能够利用飞秒激光聚焦到空气中形成的等离子体向外传播太赫兹信号^[9],并且获得的太赫兹能量更高。Hamster等^[10]通过功率为 10^{12} W,脉宽为 10^{-13} s的单色激光脉冲作用空气等离子体,这是实验上首次在空气等离子体中产生太赫兹波。Cook等^[11]发现在利用800 nm组合其倍频产生的400 nm激光,气体等离子体产生的太赫兹波强度显著提高,可产生强度超过MV/cm的超宽带太赫兹辐射,意味着双色激光转换效率强于单色激光,为了进一步提高太赫兹的能量,研究人员又继续用惰性气体研究了自由电子密度和激光强度之间的关联^[12-13],但气体介质存在转换效率低和分子密度低等问题,双色激光场的转换效率通常在0.01%左右^[14],仍达不到实际应用的条件;液态介质由于在太赫兹波段的吸收系数比较高,通常不认为是有效的太赫兹辐射源,但是液体介质密度与固

体密度相当,意味着同样条件下液体将比固体多三阶分子间作用力,并且液体辐射源可以通过循环系统连续补充,不存在损伤阈值问题,这些因素使得研究人员近年来一直致力于液态太赫兹源的研究。Dey等^[15]通过将强激光聚焦到比色皿中,从电离的液体中获得了太赫兹波,同年,张希成等^[16]将超短激光脉冲聚焦在液体水膜中,产生了优于气体介质的太赫兹辐射,但如何改变实验条件获得更强的太赫兹波,仍是太赫兹领域研究重点。

目前,利用液体介质激发太赫兹波在实验方面已相对完善,得到的太赫兹强度也越来越高,但是在理论解释方面,相关的研究因工作比较分散,缺少整个液态辐射物理模型的构建过程。因此,本文在实验结果基础上,以水分子电离为基础确定水分子电离势和电离弛豫时间,并联立分子弛豫时间与三阶非线性极化率来确定水分子电离率及电流强度,构建完整的液态溶液中瞬态光电流模型,并通过此模型研究了超快激光作用水、重水、乙醇及丙酮中时,改变脉冲强度、脉冲宽度及两束激光间时间延迟对太赫兹产率的影响,分析了4种介质性能参数对太赫兹转化效率的影响,结果显示随着激光功率的增强,太赫兹辐射强度也随之增强,在单色激光的作用下,太赫兹的辐射强度最大值对应一个特定的激光脉宽点,而在延迟的双脉冲的作用下,太赫兹辐射的强度和脉冲延间隔迟密切相关。在水与丙酮对比时,双色光场的时间间隔会极大地影响太赫兹强度,最后计算了水与丙酮的时频域强度,这些研究结果将进一步加深激光参数对液态介质太赫兹辐射的影响的认识。

2 模型构建

2.1 水分子电离原理

液态介质分子相较于气态介质分子有更高的密度与更强的分子间作用力,因而电离过程比气态介质更加复杂。 $(\text{H}_2\text{O})_2$ 作为最常见的氢键系统模型,其结构性质使得它可以避免水中的静电作用干扰测量结果,因此 $(\text{H}_2\text{O})_2$ 常被用来研究质子转移,常见的静态电离模拟即能精确的说明液态分子的电离率, $(\text{H}_2\text{O})_2$ 分子由两种元素构成:氢和氧,两个氢原子加两个氧原子构成“V”型结构。氧原子的孤对电子使得分子结构

呈“V”型,图 1 表示的水分子能级轨道示意图^[17],图中左侧前 6 列为氧原子的特征标,右侧 5 列为氢原子的特征标,共同构成水分子轨道基,假设表示为 Γ 。假设用 Γ_0 表示氧原子轨道,氢原子轨道则用 Γ_1 表示,即氧原子轨道 Γ_0 的对称性表示为 $\Gamma_0 = 3a_1 + b_1 + b_2$,氢原子轨道 Γ_1 的对称性表示为 $\Gamma_1 = a_1 + b_2$,从而水分子轨道可表示 $\Gamma = 4a_1 + b_1 + 2b_2$,水分子基态为 $(1a_1)^2(2a_1)^2(1b_2)^2(3a_1)^2(1b_1)^2$ 。其中水分子的 HOMO $1b_1$ 轨道具有非键性质,而水分子的成键轨道则为 $2a_1, 1a_2$ 和 $3a_1$,在受到强光作用时, $1b_1$ 轨道电子会大幅度电离, $1b_1$ 和轨道 $3a_1$ 的电离能分别为 12.6 eV 和 14.8 eV,也就是水的一阶、二阶电离能。

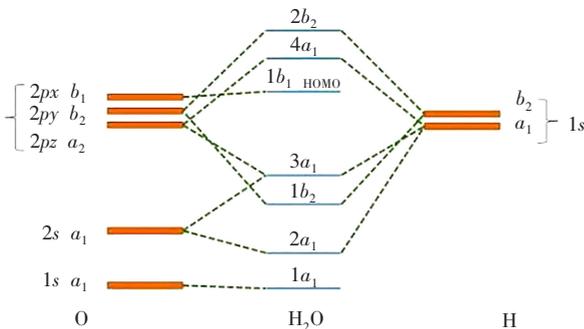
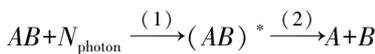


图 1 水分子轨道能级示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the orbital energy levels of the water molecules

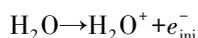
2.2 水分子光解过程

当在激光脉冲作用水溶液,分子吸收光子发生解离的过程,被称为光解,这种过程可以用关系式表示:

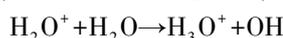


这个过程包括了 2 个步骤,第一个阶段是由 AB 分子的能量跃迁运动至受激态的 $(AB)^*$,第二个阶段则是由激发态的 $(AB)^*$ 解离产生 A 和 B ^[25]。在物理化学过程中,光解离过程充当着非常关键的作用,其中在光解离过程中水分子所形成的 OH 自由基就是整个光化学反应过程的主要成分。而当非均匀分布的吸收能变成不同的光水分时转移到了不同的受激态,而不同的受激态本身所能形成的物质和产物的组和形态也并不相同,水的光分解过程一般有 3 个主要步骤:

(1) 水分子电离的初级过程时间尺度约为 10^{-15} s,对应水的一阶电离势能 12.6 eV,当水受到强光作用时,水分子的 $1b_1$ 轨道电离使分子进入离子基态,水分子跃迁至激发态 $H_2O \rightarrow H_2O^*$,以及初始光电子最终跃迁至连续态 $e_{\text{ini}}^- \rightarrow e^-$,表达式如下:

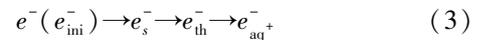


(2) 离子分子反应过程时间尺度约为 10^{-14} s, $3a_1$ 轨道电离使离子从离子基态跃迁至激发态,产生质子化产物 H_3O^+ 和 OH^+ ,对应水的二阶电势能,表达式如下:



(3) 激发态到排斥态的水分子的解离反应如

式(1)所示以及次联电子水合反应如式(2)、式(3)所示,过程均约为 10^{-12} s,对应水的三阶电势能 18.5 eV。



激光作用水分子时,等离子体通过吸收光子能量来获得高动能以形成等离子体。

2.3 理论模型

强场激光与水分子之间的相互作用是理解液体介质产生太赫兹波的重要基础,虽然液体辐射源与气体辐射源电离过程大致相同,但激光与水之间的作用还存在一些空气介质不具备的非线性效应(如自聚焦,自陡峭及光谱展宽^[18-20])。采用局部瞬态光电流模型,该模型用双色激光激励液体介质产生太赫兹辐射的物理过程为:激光场首先使液态分子离化,在激光脉冲强度 $I \geq 10^{14}$ W/cm² 时会进行隧穿电离效应,随着分子离化率增大,离化得到的电子在双色激光场作用下加速形成漂移电流,随着时间变化,漂移电流会辐射一定程度的电磁波信号,其中就包括部分的太赫兹成分。该模型由 K. Y. Kim 等^[28] 在 2007 年首次提出。另外,在此光场的作用下,离化出的电子在加速过程中将会碰撞到周围的离子或分子,研究中也考察了这种撞击过程,具体如式(4)所示,目前已成功运用到液态水溶液的太赫兹辐射研究,式(4)中均采用了传统的光电流模拟方法,并在此基础上进一步考察了对各种液体材料产生非线性效应的光传导过程。但是模型仍缺乏部分细节,因此如前文所述,重点建立水溶液的三能级体系并运用到光电流模型部分,通过三能级体系中的跃迁极化率,最终推导出水分子电离弛豫时间,将电离问题转化为动力学问题,使得光电流模型部分能够真正地运用于液态分子的计算。

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E}{\partial \tau^3} + gE^2 \frac{\partial E}{\partial \tau} + \frac{2\pi}{cn_0} j = 0 \\ \frac{\partial j}{\partial \tau} + \frac{j}{\tau_c} = \beta \rho E^3 \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\tau_p} = \alpha E^2 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, E 是电场强度, Z 是一个与脉冲传播方向共线的空间坐标, ρ 表示激发态的电子密度, $\tau = t - \frac{n_0}{c}z$, j 是自由电子的电流密度, α, β 分别代表分子电离弛豫时间^[21],如式(5)所示:

$$\alpha = \frac{e^2}{m_e c} \times \frac{n_0^2 - 1}{hw_{21}} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{1}{2n_0} \times \frac{|p_{23}|^2}{T_{21}(hw_{32}^2)}$$

数值模拟光电流模型的重点是求出电离的弛豫时

间,通过构造三能级体系的跃迁偶极矩来求得,其中 m_e 为电子质量, c 表示光速, n_0 代表水的线性折射率, h 为普朗克常数, w_{21} 、 w_{32} 分别代表水的第一、第二电离能, p_{23} 为分子跃迁偶极矩标量值, T_{21} 为驰豫时间,约为 110 fs, 液态介质的偶极矩方程^[22]如式(6)所示:

$$P = \chi_1 E + \chi_3 E^3 \quad (6)$$

其中,线性极化率式(7)为

$$\chi_1 = 2 \frac{P_{12}^2}{hw_{21}} N_1^0 \quad (7)$$

当激光强度很高时,光场在周围介质的传播过程中就会出现非线性作用,而其中一种最主要的非线性作用就是光克尔效应。光克尔是一种三阶非线性光学效应,因为随着光克尔的产生,介质的较高光强点的频率不仅和光的频率相关,而且还与光场的强度也相关如式(8)所示,研究中,考察了液体的三阶离化作用,在较高功率激光作用下,三阶离化作用所生成的离子数量将相当巨大,三阶离化作用大约是前二阶离化作用的二倍。

$$n = n_0 + n_2 I \quad (8)$$

n_0 为介质线性折射率, n_2 为非线性克尔系数, I 为脉冲强度,三阶的非线性极化率表达式如下:

$$\chi_3 = 4 \frac{P_{12}^2}{hw_{21}} N_1^0 \left(\frac{P_{23}^2}{hw_{21}hw_{32}} - \frac{P_{12}^2}{(hw_{21})^2} \right)$$

其中, $N_1^0 = 6.7 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 为初始的分子密度, $\chi_3 = 2.5 \times 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 为水分子的非线性三阶极化率的数值,通过联立上述公式可知分子跃迁偶极矩 P_{23} 的值,最终求解出 α 、 β 的数值。此处忽略式(4)中激光在液体介质中传播方程的计算部分,主要因为其影响的是太赫兹辐射的远场强度,需要庞大的计算资源,但本质上太赫兹辐射的远场强度可以近似的通过光电流模型中的点源辐射的强度叠加得到,因此在其后的数值模拟中,主要考虑光电流模型点源辐射的作用。

为了进行理论模拟采用高斯双色激光组合(两束同为 800 nm)的激光脉冲,改变激光脉冲能量、两束光之间时间延迟及脉冲时间等变量,总激光电场表达式如下:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(\tilde{\tau}) = & \exp \left[- \left[\frac{\tilde{\tau}_{\text{pulse1}}}{\tilde{\tau}} \right]^2 \right] \sin(\tilde{\tau} + A_1 \tilde{\tau}^2) + \\ & \exp \left[- \left[\frac{\tilde{\tau} - \Delta\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}_{\text{pulse1}}} \right]^2 \right] \sin((\tilde{\tau} - \Delta\tilde{\tau}) + A_2 (\tilde{\tau} - \Delta\tilde{\tau})^2) \end{aligned}$$

$\tilde{\tau}_{\text{pulse1},2} = \tau_{\text{pulse1},2} \langle w \rangle$ 是信号脉冲的持续时间, A_1 、 A_2 分别表示基波和二次谐波的脉冲展宽^[23],对基本脉冲进行傅里叶变换可得如下表达式:

$$|A| \approx 4 \ln 2 / (\tau_{\text{FTL}} \tau_p)$$

E_{FTL} 为原始脉宽(设置原始脉宽为 40 fs), τ_p 为基频波最大处的全脉宽,例如: $\tau_p = 150 \text{ fs}$, $\tau_{\text{FTL}} = 10 \text{ fs}$,

$|A| = 1.8 \times 10^{-3} \text{ fs}$, $\Delta\tilde{\tau} = \Delta\tau \langle w \rangle$ 为基波与二次谐波之间

的时间延迟。

3 不同液体介质间对比

为了研究脉冲强度对不同介质辐射太赫兹波的影响,取水、重水、丙酮和乙醇通过数值模拟对它们的性能进行全面比较,如图2所示,采用两束 800 nm 的高斯光场,脉宽设置为 150 fs,两束光之间时间延迟为 0 ps,控制脉冲能量从 60 TW/cm² 增加到 200 TW/cm²,4种介质产生太赫兹的强度均在不断增加,增幅也越来越明显。并且可以看出,4种介质能够产生的太赫兹能量从水、重水、乙醇到丙酮依次增加。从式(4)中可以看出,太赫兹能量的转换效率取决于系数 $(\alpha\beta)_{\text{liq}}$,该系数由介质电离势、分子密度和太赫兹范围内的介质吸收所决定。尽管重水与液态水原子结构一致,但是重水的介质电离能较高,电离时间相对较短,并且对太赫兹吸收较少,因此重水产生的太赫兹辐射要强于液态水。乙醇与丙酮的分子密度虽然几乎相等^[24],对水的吸收系数也均为 60/cm^[25-26],但丙酮电离势能要高于乙醇电离势能,所以综合下来,丙酮关于太赫兹产率最高。

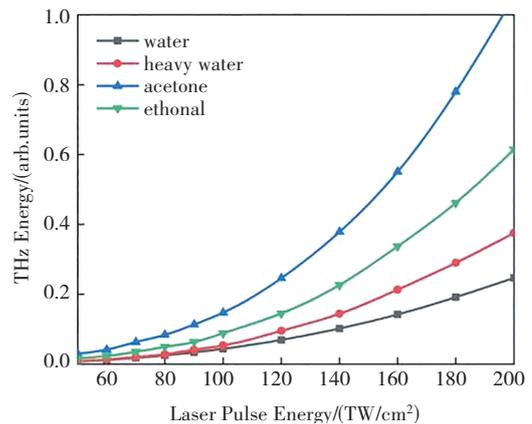


图2 4种溶液转换效率随脉冲强度的变化趋势

Fig. 2 Variation trends of the four solution conversion efficiencies with the pulse intensities

为了探究激光脉宽对太赫兹辐射的影响,利用上述4种溶液,在波长为 800 nm,激光脉冲能量 120 TW/cm²,调节激光脉宽从 50~450 fs 的条件下进行数值模拟。结果如图3所示,4种溶液产生的太赫兹强度仍旧从水、重水、乙醇到丙酮依次递增,并随激光脉冲时间的增加呈现先上升后下降的趋势,对应的最佳脉宽均在 350 fs 附近,这与前面结论相似,尽管4种溶液分子密度接近,但是由于丙酮电离势高,吸收系数低,使得丙酮溶液产生的太赫兹辐射最强。但是发现液体与气体电离过程虽大致相似,但对于最佳脉宽时间却截然相反,气体介质通常在短脉宽条件下产生强场太赫兹^[27],而液体介质则更偏好长脉冲,这种现象主要是因为液体的分子密度高,会导致粒子间碰撞更加频繁,当脉冲持续时间较长时,水分子会重复式(2)、式(4)的电离过程,整个电离过程会发生近数百次碰撞,理论模型很好地说明了这一问题。

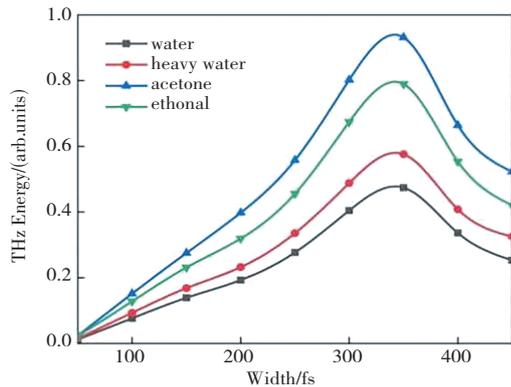


图 3 4 种溶液转换效率随脉冲时间的变化趋势

Fig. 3 Variation trends of the conversion efficiencies of the four solutions with pulse time

液体介质中双脉冲激发太赫兹辐射的效果要强于空气,而两束脉冲之间的时间间隔也会对太赫兹能量产生影响,为了研究变化趋势,依旧选择水跟丙酮,固定脉冲强度和脉冲宽度,仅改变两束光之间的时间延迟,模拟了两束 800 nm 激光在脉冲间隔为 0~10 ps 范围内对太赫兹辐射能量的影响,从图 4 中可以看出,两条曲线均呈现先上升后下降的趋势,丙酮产生的太赫兹强度总体仍然高于水,原因如上述内容所示,主要由于丙酮参数性能更佳,两者对应最佳延迟也均在 3 ps 附近,0~6 ps 时间内丙酮辐射的太赫兹强度要远高于水,而在 6 ps 以后,丙酮降幅却更大,主要原因是由于水溶液中等离子体寿命更长,会延长整个电离过程,使得水中降幅更平缓。通过研究,基本找到了双脉冲的情况下,在液体介质中可用于产生强太赫兹辐射的最优的激光参数。

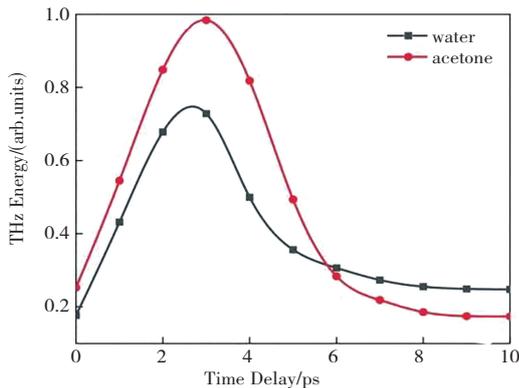
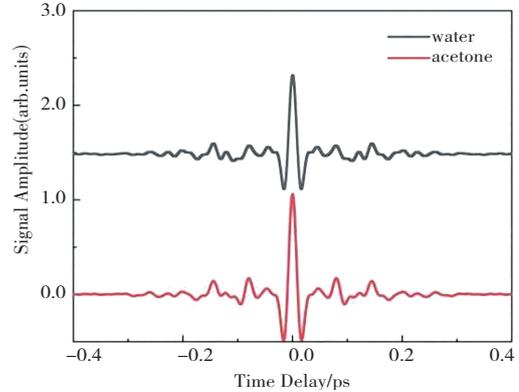


图 4 水、丙酮随双脉冲时间延迟的变化规律(0~10 ps)

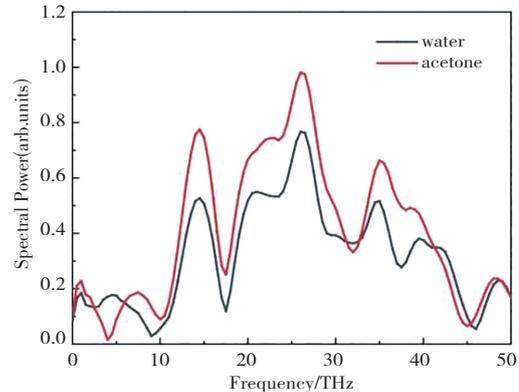
Fig. 4 Changes of water and acetone with double pulse time delay (0~10 ps)

为了更清晰地说明强场激光和液体介质相互作用后产生太赫兹辐射的性能,选择水跟丙酮做对象,理论模拟了太赫兹辐射的时频域特性。从图 5(a)中可以看出,在时域波形方面,丙酮产生的太赫兹波强度更强。并且通过傅里叶变换进一步展示了太赫兹辐射的频域特征。从图 5(b)可见丙酮的频谱主要分布在 10~45 THz 之间,而水主要集中在 10~35 THz 范围内,频谱展

现了多峰的结构,这和实验的结果基本一致^[15],且丙酮频率几乎完全大于水的频率,对应的太赫兹能量也更强,与之前的结果相一致,使用丙酮作为辐射源得到的太赫兹辐射的强度明显高于水。



(a) 时域



(b) 频域

图 5 水、丙酮参考图

Fig. 5 THz radiation generated from acetone and water in time domain (a) and frequency domain (b)

4 结论

通过构造水分子的三能级体系建立了基于液体溶液的太赫兹辐射的瞬态光电流模型,在液体溶液中模拟了水、重水、乙醇和丙酮 4 种溶液在改变脉冲强度、脉冲宽度,脉冲延迟等参数条件下辐射太赫兹能量的变化。模拟结果表明,太赫兹能量都是随着激光强度的增加而增加,且增幅越来越明显,光场强度越大,介质电离率越大,产生等离子体也越多。同时由于液体介质分子密度远大于气体介质,因而液体电离过程中离子碰撞更加频繁,使得在液体介质中产生太赫兹辐射的双脉冲的最佳脉冲脉宽以及延迟时间远大于气体介质,表明液体介质是比气体介质更佳的太赫兹辐射源。进一步分析了其中的物理机制,是因为在液体介质中,太赫兹辐射的能量受介质电离势、吸收系数、分子密度等多方面影响,这也同样说明和验证了丙酮综合性参数优于水、重水和乙醇,因此丙酮辐射产率始终最高。论文利用光电流模型研究不同液态中太赫兹辐射的强度,为理解相关更多液态介质的辐射情况以及实验提供了参考。

参考文献(References):

- [1] XIE S, LI H, LI L, et al. Survey of terahertz communication technology [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41 (5): 168—186.
- [2] YAO J, CHI N, YANG P, et al. Study and outlook of terahertz communication technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2213—2233.
- [3] IEA A, AR C, SH B, et al. Non-invasive detection technologies of solid foreign matter and their applications to lyophilized pharmaceutical products: A review [J]. *Talanta: The International Journal of Pure and Applied Analytical Chemistry*, 2020, 224—233.
- [4] LI B, ZHANG X, WAN R, et al. Leaf water status monitoring by scattering effects at terahertz frequencies [J]. *Spectrochimica Acta, Part A. Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 245(1): 13—25.
- [5] FEDERICI J F, SCHULKIN B, HUANG F, et al. THz imaging and sensing for security applications explosives, weapons and drugs [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): 266—280.
- [6] SHEN Y C, LO T, TADAY P F, et al. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24): 1116—1119.
- [7] ZHANG X C, SHKURINOV A, ZHANG Y. Extreme terahertz science [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 16—18.
- [8] DHILLON S S, VITIELLO M S, LINFIELD E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap [J]. *Journal of Physics, D. Applied Physics: A Europhysics Journal*, 2017, 50(4): 14—21.
- [9] 戴厚梅. 飞秒激光激励气体产生太赫兹波的理论研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
DAI Hou-mei. Theoretical study of THz wave generation by femtosecond laser excitation gas [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [10] HAMSTER H, SULLIVAN A, GORDON S, et al. Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2008, 71 (17): 2725—2728.
- [11] COOK D J, et al. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(16): 1210—1212.
- [12] CHEN Y, YAMAGUCHI M, WANG M, et al. Terahertz pulse generation from noble gases [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(25): 125—178.
- [13] GEORGE, RODRIGUEZ, GEORGI, et al. Scaling behavior of ultrafast two-color terahertz generation in plasma gas targets: energy and pressure dependence [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14—28.
- [14] OH T I, 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—041107.
- [15] 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—1193.
- [16] JIN Q, WILLIAMS K, YIWEN E, et al. Observation of broadband terahertz wave generation from liquid water [C]// *International Conference on Infrared*, 2017.
- [17] 张冲. 氙二聚物、水团簇和水云系统的强光电离 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
ZHANG Chong. Strong photoionization of xenon dimers, water clusters, and water cloud systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [18] LIU W, PETIT S, BECKER A, et al. Intensity clamping of a femtosecond laser pulse in condensed matter [J]. *Optics Communications*. 2002, 202(1~3): 189—197.
- [19] KANDIDOV P K, OSAREVA O G, GOLUBTSOV I S, et al. Self-transformation of a powerful femtosecond laser pulse into a white-light laser pulse in bulk optical media or supercontinuum generation [J]. *Applied Physics B*. 2003, 77 (2 - 3): 149—165.
- [20] 王浩若, 张冲, 张宏超, 等. 超短脉冲激光与微小水滴相互作用中电子密度和光场的时空分布 [J]. *物理学报*, 2017, 66(12): 336—344.
WANG Hao-ruo, ZHANG Chong, ZHANG Hong-chao, et al. Spatiotemporal distributions of plasma and optical field during the interaction between ultra-short laser pulse and water nanodroplets [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66 (12): 336—344.
- [21] STUMPF S A, KOROLEV A A, KOZLOV S A. Spatial evolution of a strong field of few-cycle light beam in dielectric media with induced plasma nonlinearity [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2013, 461(1): 012045—012051.
- [22] STUMPF S A, KOROLEV A A, KOZLOV S A. Few-cycle strong light field dynamics in dielectric media [C]// *Laser Optics 2006: Superintense Light Fields and Ultrafast Processes*. SPIE, 2007, 6614: 59—70.
- [23] SILAEV A A, ROMANOV A A, VVEDENSKII N V. Generation of tunable mid-and far-infrared pulses during gas ionization by a chirped two-color laser field [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(16): 4527—4530.
- [24] WEBER M J. *Handbook of optical materials* [M]. Taylor and Francis; CRC Press: 2010-12-12.
- [25] VENABLES D S, CHIU A, SCHMUTTENMAER C A. Structure and dynamics of nonaqueous mixtures of dipolar liquids. i. infrared and far-infrared spectroscopy [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2000, 113(8): 3243—3248.
- [26] MOLONEY J V, NEWELL A C. *Nonlinear optics* [J]. *Physica D Nonlinear Phenomena*, 1990, 44(1): 1—37.
- [27] STUMPF S, PONOMAREVA E, TCYPKIN A, et al. Temporal field and frequency spectrum of intense femtosecond radiation dynamics in the process of plasma formation in a dielectric medium [J]. *Laser Physics: An International Journal devoted to Theoretical and Experimental Laser Research and Application*, 2019, 29(12): 11—12.
- [28] 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.