

L-, D-和 DL-阿拉伯糖的太赫兹时域光谱研究

陈涛, 蔡治华

桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

摘要 利用太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术和密度泛函理论(DFT)模拟相结合的方法,研究了阿拉伯糖手性异构体在太赫兹波段的光谱特性。THz-TDS测试发现 *L-, D-*和 *DL-*阿拉伯糖在 0.4~1.8 THz 有效频谱范围内表现出各自的特征吸收峰,且三者的吸收谱有明显差异。运用 Gaussian09 软件中密度泛函理论计算了 *L-, D-*和 *DL-*阿拉伯糖的吸收谱,并对其特征吸收峰进行了指认。研究表明:理论与实验得到的特征吸收峰的一些峰位有一定程度的吻合,太赫兹时域光谱能够鉴别阿拉伯糖手性异构体和它们的外消旋化合物,即利用太赫兹时域光谱能够揭示手性异构体结构差异与其太赫兹光谱之间的相关性,这为研究手性异构体和它们的外消旋体的检测和分析提供了新方法。

关键词 光谱学; 太赫兹时域光谱; 密度泛函理论; 手性异构体

中图分类号 O433.4; O641

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.063001

Terahertz Time-Domain Spectroscopy of *L-, D-* and *DL-*Arabinose

Chen Tao, Cai Zhihua

*School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) and density functional theory (DFT) simulation are adopted to study the spectral properties of arabinose chiral isomers in the terahertz band. It is found that *L-, D-* and *DL-*arabinose show their characteristic absorption peaks in the effective spectrum range of 0.4-1.8 THz, and the absorption spectra of the three arabinoses are obviously different. The absorption spectra of *L-, D-* and *DL-*arabinose are calculated with the use of density functional theory in Gaussian09 software, and the characteristic absorption peaks are identified. The results show that the theoretical simulation is consistent with the experimental result and terahertz time-domain spectra can be used to identify the arabinose chiral isomers and their racemic compounds. This indicates that the correlation between chiral isomers and their terahertz spectra can be revealed by terahertz time-domain spectra. So terahertz time-domain spectra provide a new method for studying the detection and analysis of chiral isomers and their racemic compounds.

Key words spectroscopy; terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS); density functional theory (DFT); chiral isomer

OCIS codes 300.1030; 300.6170; 300.6390; 300.6495

1 引言

太赫兹 (THz) 波通常是指波长在 30 μm ~ 3 mm (0.1~10 THz) 区间的电磁波,其波段位于电

磁波谱中的微波和红外线之间^[1]。物质的太赫兹光谱包含有丰富的物理信息和化学信息^[2];与其他波段的电磁波相比,太赫兹波具有独特的特点,如透视性、安全性、光谱分辨能力等,因此太赫兹技术在

收稿日期: 2017-09-27; **收到修改稿日期:** 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11574059)、广西自然科学基金 (2015GXNSFBA139252)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金 (YQ17102)

作者简介: 陈涛(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事太赫兹科学技术及应用方面的研究。

E-mail: tchen@guet.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: banneycai@126.com

安全检查、无损检测^[3]和质量控制等领域具有重要的科学研究价值和广阔的应用前景。研究表明^[4],许多有机分子间的弱相互作用(如氢键)和生物分子的骨架振动能级差位于太赫兹波段。太赫兹时域光谱(THz-TDS)是一种新兴的、有效的基于飞秒激光器的相干探测技术,利用该技术可以获得样品在太赫兹波段的色散信息和吸收信息,该技术具有高信噪比^[5]、高灵敏度^[6]的特点。利用 THz-TDS 技术还可以获得样品在太赫兹波段的光学常数,有利于研究样品的结构和动力学特性。利用太赫兹时域光谱技术对 *D*-、*L*-和 *DL*-青霉素进行研究后发现,它们在 0.2~1.8 THz波段的吸收光谱存在显著差异^[7]。近年来,一些文献报道了 *L*-福多司坦和 *DL*-福多司坦、萘普生手性对映体与其消旋体在有效光谱范围内均可显现出各自的特征吸收峰。这些研究表明,利用 THz-TDS 技术可以鉴别手性异构体及其外消旋体^[8]。

手性分子是在化学结构上呈镜像对称而又不能完全重合的分子^[9]。手性是生物体的本质属性,作为生命活动重要基础的生物大分子和许多作用于受体的活性物质均具有手性特征,如酶、载体、受体、血浆蛋白和多糖等。阿拉伯糖是一种手性药物,其作为一种五碳醛糖,是重要的医药中间体,可用来合成抗癌、抗病毒和治疗心血管疾病的药物,常见的有 *L*-阿拉伯糖、*D*-阿拉伯糖和 *DL*-阿拉伯糖。文献^[10]报道,阿拉伯糖的手性构型差异决定了它的反应活性。可见,手性异构体在生物活性、生理活性和药理活性等方面存在较大差异,甚至可能起到完全相反的作用,因此鉴别手性异构体对其在生理学和

药理学中的应用具有非常重要的意义。

本文采用 THz-TDS 实验测试和理论模拟相结合的方法研究了 3 种阿拉伯糖(*L*-阿拉伯糖、*D*-阿拉伯糖和 *DL*-阿拉伯糖)在 0.4~1.8 THz 波段的光谱特性。理论模拟采用 Gaussian09 软件^[11]中的密度泛函理论(DFT)^[12]来获得阿拉伯糖的光谱特性,并分析其在太赫兹波段吸收峰的形成机理。将太赫兹波段的计算结果与实验测试结果进行对比,验证了采用 THz-TDS 技术鉴别手性异构体及其外消旋体的可行性。

2 实验和数据处理

2.1 实验装置

本实验使用的 Z-3 透射式太赫兹光谱系统主要由超快飞秒光纤激光器、太赫兹辐射产生装置、太赫兹辐射探测装置和时间延迟控制系统组成^[13]。其中,激光器中心波长为 780 nm,平均功率大于 140 mW,脉冲宽度小于 100 fs,重复频率为 80 MHz。系统工作原理如下:激光脉冲被分为两路,一路作为抽运光,激发大孔径 LT-GaAs 光导天线产生太赫兹脉冲;另一路作为探测光,利用电光采样原理探测太赫兹波的电场强度,探测元件为 ZnTe 电光晶体。通过扫描探测激光脉冲和太赫兹脉冲的相对时间延迟可获得太赫兹脉冲随时间变化的电场波形,然后通过快速傅里叶变换获得太赫兹脉冲的频谱,并从中提取吸收系数等物理量。整个系统信噪比大于 70 dB,频谱分辨率优于 5 GHz。

系统平台示意图如图 1 所示。

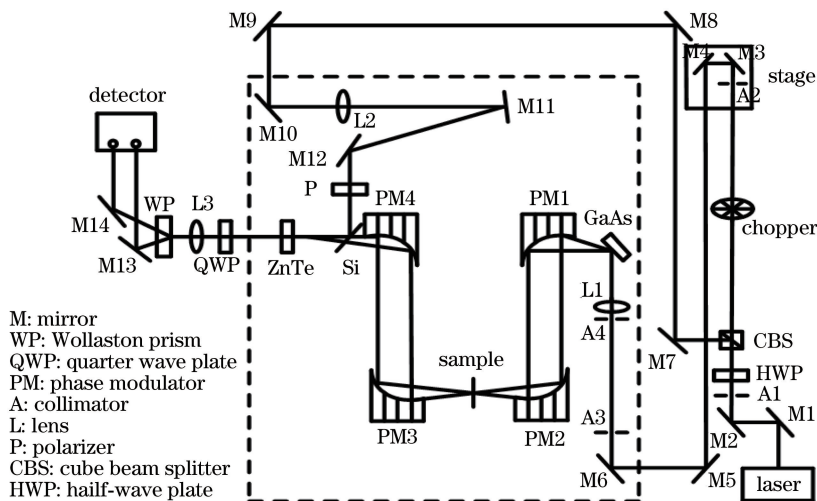


图 1 太赫兹时域光谱系统示意图

Fig. 1 Schematic of terahertz time-domain spectroscopy system

2.2 样品制备

L-, *D*-和 *DL*-阿拉伯糖购于百灵威公司,其纯度均大于 98%,使用时未进一步纯化。在样品制备前需进行干燥处理,放入真空恒温干燥箱中,设定恒温为 55 °C,干燥 2 h 左右,以减少样品中水分对太赫兹波的干扰。

纯阿拉伯糖不够牢固,无法压成完整的无裂痕样品片,所以掺杂等量的聚乙烯粉末进行压片。用精度为 0.1 mg 的电子分析天平称取质量各 100 mg 的阿拉伯糖和聚乙烯,放入研钵中研磨至细小颗粒,并保证两者充分混合均匀,以减少颗粒引起的散射效应,然后用 10 MPa 的压力将其压成直径为 13 mm、厚约 1.2 mm 的样品片。每种阿拉伯糖的样品各制作 3 个,共 9 个样品片。

2.3 数据处理

采用美国 Rice 大学的 Dorney 和法国的 Duvillaret 等提出的基于 Fresnel 公式的 THz-TDS 技术提取材料光学参数的基本模型和原理^[14-15]处理本实验获得的数据,得到样品的吸光率、吸收系数、折射率、介电常数和表面电导等光学参数,并应用快速傅里叶变换处理实验测得的时域参考信号和样品信号,得到相应的频率谱,再对样品的折射率谱和频域谱等进行分析和研究。通过数据处理得到样品的折射率 $n(\omega)$ 、消光系数 $k(\omega)$ 和吸收系数 $\alpha(\omega)$ 的计算公式分别为

$$n(\omega) = \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d} + 1, \quad (1)$$

$$k(\omega) = \frac{c}{\omega d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega) [n(\omega) + 1]^2} \right\}, \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega k(\omega)}{c} = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega) [n(\omega) + 1]^2} \right\}, \quad (3)$$

式中: ω 为太赫兹振动频率; c 为真空光速; d 为样品厚度; $\varphi(\omega)$ 和 $\rho(\omega)$ 分别为样品信号与参考信号的相位差和振幅比值。

3 结果与讨论

3.1 阿拉伯糖的太赫兹光谱特性

图 2 为 *L*-, *D*-和 *DL*-阿拉伯糖实验样品在 0.4~1.8 THz 区间的吸收谱。图 2 表明 *L*-阿拉伯糖在 1.14, 1.49, 1.61, 1.72 THz 处出现明显的吸收峰,其中 1.14, 1.49 THz 处出现的吸收峰与文献[16]报道的相符。*D*-阿拉伯糖在 1.14, 1.49, 1.62, 1.71 THz 处有明显的吸收峰,其中 1.14, 1.49 THz 处的吸收峰与文献[16]报道的相符。*DL*-阿拉伯糖

在 1.63, 1.77 THz 处有明显的吸收峰,1.77 THz 处的吸收峰与文献[16]报道的相符。其中 *L*-阿拉伯糖在 1.61, 1.72 THz 处,*D*-阿拉伯糖在 1.62, 1.71 THz 处和 *DL*-阿拉伯糖在 1.63 THz 处的吸收峰未见报道。3 种阿拉伯糖在 0.4~1.8 THz 波段内显现出各自的吸收峰,*L*-阿拉伯糖和 *D*-阿拉伯糖为手性异构体,它们的分子构造相同且构型互为镜像关系,实验结果显示阿拉伯糖手性异构体的光谱图没有明显区别,但可以看出阿拉伯糖手性异构体和它们的外消旋化合物吸收峰的位置和吸收强度都存在明显差别。这一结果表明可以利用 THz-TDS 技术对阿拉伯糖手性异构体和它们的外消旋化合物进行有效鉴别。这为利用太赫兹技术分辨化合物结构上的微小差异来检测与分析物质提供了新方法。

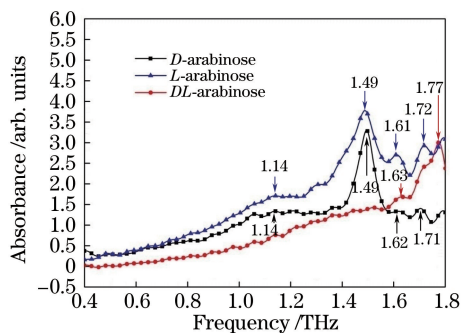


图 2 *L*-, *D*-和 *DL*-阿拉伯糖的太赫兹吸收谱

Fig. 2 Terahertz absorption spectra of *L*-, *D*- and *DL*-arabinose

3.2 阿拉伯糖的量子化学模拟计算和 THz-TDS 测量的对比分析

为了从理论上理解这些物质的光谱特性,本研究对阿拉伯糖分子进行了理论计算,基于密度泛函理论,选取适当算法(B3LYP-D3)和基组[6-311G(d , p)]^[17]对其进行几何优化和振动频率的计算。模式指认方面的文献[18]表明,对于晶体物质,如果采用单分子或二聚体构型和密度泛函理论,无论采用何种程序,理论谱和实验谱在低频段均有一定的差异。单分子或二聚体的模拟光谱虽然能很好地解释一些太赫兹光谱的形成机理,但未能充分考虑到分子间集体振动,即忽略了分子间氢键和范德瓦尔斯的影响,所以只能体现目标物质的分子内作用所引起的振动。因此,对于晶体物质,需要考虑晶胞构型^[19]才能进行理论模拟。1 个阿拉伯糖晶胞含有 4 个分子。来自英国剑桥大学晶体结构数据库(CCDC)的阿拉伯糖的晶胞构型如图 3 所示。计算结果中没有出现虚频,表明本实验得到的结构具有稳定的构象^[20]。

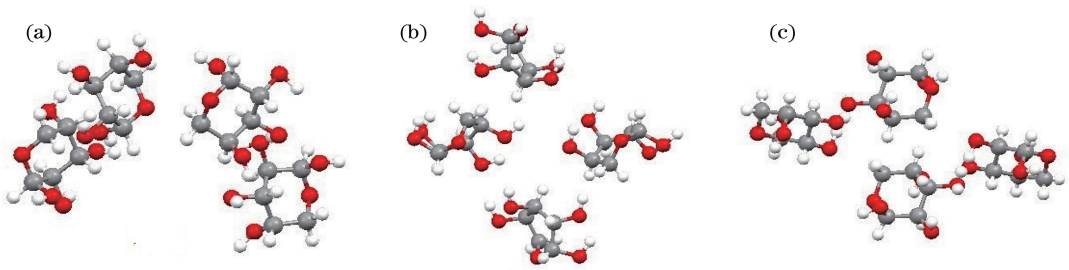


图3 阿拉伯糖的晶胞构型。(a) *L*-阿拉伯糖;(b) *D*-阿拉伯糖;(c) *DL*-阿拉伯糖

Fig. 3 Crystal unit cell structure of arabinoses. (a) *L*-arabinose; (b) *D*-arabinose; (c) *DL*-arabinose

图4是实验光谱和理论计算结果的对比,据此可以分析这些吸收峰所反映的分子运动特性,进而为太赫兹光谱技术对阿拉伯糖的鉴别奠定基础。图4(a)是*L*-阿拉伯糖的吸收峰位图,可以看出实验测得的1.14,1.49,1.61 THz与计算的1.12,1.28,1.61 THz对应,但1.72 THz处却没有找到对应的吸收峰。图4(b)是*D*-阿拉伯糖的吸收峰位图,实验测得的1.14,1.62 THz与计算的0.95,1.62 THz对应,但1.49,1.71 THz处却没有对应的吸收峰。图4(c)是*DL*-阿拉伯糖的吸收峰位图,实验测得的1.63 THz与计算的1.55 THz对应,1.77 THz处没有对应的吸收峰。模拟和实验之间出现了少许偏差,这是因为实验是在常温下进行的,而理论模拟在绝对零度下进行,没有考虑热效应的影响。*D*-阿拉伯糖有2个,*L*-阿拉

伯糖和*DL*-阿拉伯糖各有1个吸收峰没有找到对应的理论计算吸收峰,可能是分子间相互作用,或是Gaussian模拟无法算出晶格振动对太赫兹吸收的影响。对于实验未得到的吸收峰而理论模拟中出现的吸收峰,如*DL*-阿拉伯糖在理论模拟中于0.77,1.34 THz处的吸收峰,可能是由于分子构型变成晶胞之后,分子中的基团与分子环境发生耦合,各种振动模式相互混在一起导致原有振动频率和振动模式发生了变化;*D*-阿拉伯糖在0.68 THz处模拟出现的吸收峰可能是吸收强度太弱致使其在实验中未被测得^[21]。

借助于Gaussian-View 3.0的视频功能,通过动态观察,可以对手性异构体及其外消旋体的振动模式进行指认^[22],结果见表1。

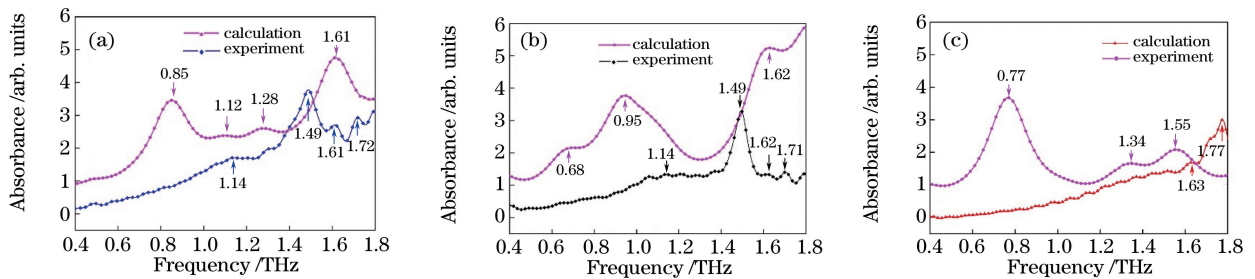


图4 THz-TDS测量结果和量子化学模拟计算结果的比较。(a) *L*-阿拉伯糖;(b) *D*-阿拉伯糖;(c) *DL*-阿拉伯糖

Fig. 4 THz-TDS measurements compared with quantum chemical calculations.

(a) *L*-arabinose; (b) *D*-arabinose; (c) *DL*-arabinose

表1 实验和计算得到的阿拉伯糖的吸收峰位和振动模式

Table 1 Experimental and calculated absorption peak positions and vibration mode of arabinose

Sample	Experimental value /THz	Calculated value /THz	Approximate vibration mode assignment
<i>L</i> -arabinose		0.85	Butterfly
	1.14	1.12	Wiggle
	1.49	1.28	Torsion
	1.61	1.61	Wiggle
	1.72		
<i>D</i> -arabinose		0.68	Butterfly
	1.14	0.95	Wiggle
	1.49		
	1.62	1.62	Wiggle
	1.71		

Sample	Experimental value /THz	Calculated value /THz	Approximate vibration mode assignment
<i>DL</i> -arabinose		0.77	Torsion
		1.34	Torsion
	1.63	1.55	Wiggle
	1.77		

图 5~7 分别为不同频率处 *L*-、*D*-和 *DL*-阿拉伯糖的振动模式。由图 5 可知：*L*-阿拉伯糖在 0.85 THz 处主要对应的是 C1 所在的分子和 C21 所在的分子进行面对面的蝴蝶式运动，其余 2 个分子进行扭转振动；在 1.12 THz 处主要对应的是 C41 所在的分子因摆动模式而引起的强变形振动，其余 3 个分子为较强的扭转振动；在 1.28 THz 处主要对应的是 C41 所在的分子因扭动模式而引起的强扭转振动，其余 3 个分子为弱扭转振动；在 1.61 THz 处主要对应的是 C1 所在的分子因摆动模式而引起的强变形振动，其余 3 个分子为较弱的扭转振动。由图 6 可知，*D*-阿拉伯糖在 0.68 THz 处主要对应的是 C17 所在的分子和 C33 所在的分子进行面对面的蝴蝶式运动，其余 2 个分子进行较弱的扭转振

动；在 0.95 THz 处主要对应的是 C33 所在的分子因摆动模式而引起的强变形振动，其余 3 个分子进行较强的扭转振动；在 1.62 THz 处主要对应的是 C1 所在分子由摆动模式而引起的强变形振动，其余 3 个分子进行较弱的扭转振动。由图 7 可知：*DL*-阿拉伯糖在 0.77 THz 处主要对应的是 C31 所在的 1 个分子因扭动模式而进行强扭转振动，C21 所在的分子因摆动模式而进行弱变形振动，其余 2 个分子进行较弱的扭转振动；在 1.34 THz 处主要对应的是 C21 所在的分子因扭动模式而引起的强扭转振动，其余 3 个分子进行较强的扭转振动；在 1.55 THz 处主要对应的是 C31 所在的分子因摆动模式而引起的强变形振动，C21 所在的分子进行较强的扭转振动，其余 2 个分子进行较弱的扭转振动。

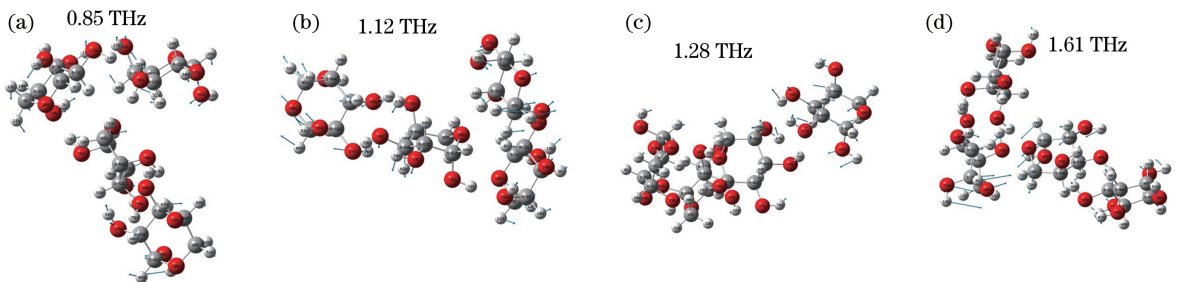


图 5 不同频率处 *L*-阿拉伯糖的振动模式

Fig. 5 Vibration modes of *L*-arabinose at different frequencies

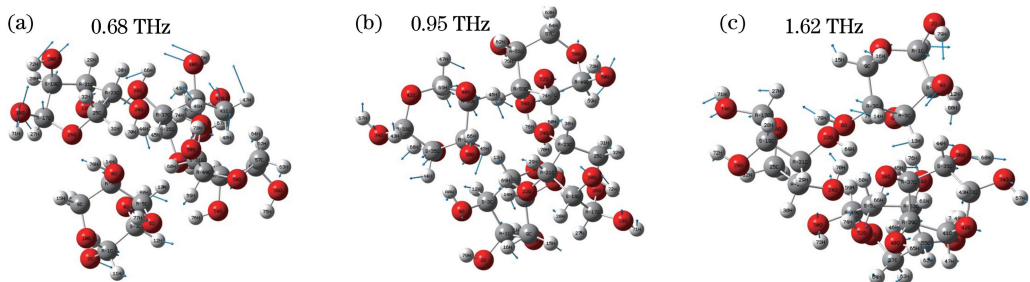


图 6 不同频率处 *D*-阿拉伯糖的振动模式

Fig. 6 Vibration modes of *D*-arabinose at different frequencies

4 结 论

通过实验测量和量子化学数值计算，具体给出了利用 THz-TDS 得到的 *L*-、*D*-和 *DL*-阿拉伯糖在

0.4~1.8 THz 频率范围内的吸收谱，进而利用量子化学晶胞构型模拟计算，分析了阿拉伯糖在太赫兹波段的光谱特性。结果表明，*L*-、*D*-和 *DL*-阿拉伯糖在太赫兹频段均有各自的吸收峰。通过比较量子

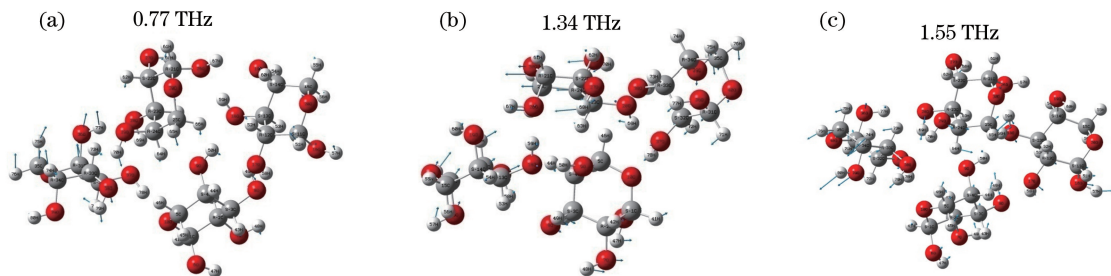


图 7 不同频率处 DL-阿拉伯糖的振动模式

Fig. 7 Vibration modes of DL-arabinose at different frequencies

化学数值计算得到的光谱和实验结果发现,吸收峰主要来源于分子内的振动和分子间氢键的振动,不同峰位的扭转模式和振动幅度均有所不同,阿拉伯糖的晶胞构型理论模拟结果和实验预测还有一些差别,但还是可以利用 THz-TDS 技术结合 DFT 模拟有效鉴别阿拉伯糖手性异构体和它们的外消旋化合物。这为探讨分子对太赫兹波的响应机制提供了帮助,也为分子鉴别提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] Xu J Z, Zhang X C. Technology and applications of terahertz wave [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 1-3.
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1-3.
- [2] Li J R, Li J S. Research on plant oil by using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25 (3): 112.
李建蕊, 李九生. 植物油的太赫兹光谱 [J]. 中国粮油学报, 2010, 25 (3): 112.
- [3] Li W J, Wang T Y, Zhou Y, *et al.* Terahertz non-destructive inspection of air defect within adhesive layers of multi-layer bonded structure [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0111002.
李文军, 王天一, 周宇, 等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测 [J]. 光学学报, 2017, 37 (1): 0111002.
- [4] Zhao R J, He J L, Li J, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of L- and DL-fudosteine [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(12): 2743-2748.
赵容娇, 何金龙, 李璟, 等. L-和 DL-福多司坦的太赫兹光谱分析 [J]. 物理化学学报, 2011, 27(12): 2743-2748.
- [5] Yang Y, Sun Q, Deng Y Q, *et al.* Study on beat signal with high signal-to-noise ratio in terahertz frequency measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0604006.
杨奕, 孙青, 邓玉强, 等. 太赫兹频率测量中高信噪比拍频信号的研究 [J]. 中国激光, 2017, 44 (6): 0604006.
- [6] Zhang J Q, Dai J M, Grischkowsky D R. Waveguide THz-TDS observation of thin water layers [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004: 8281536.
- [7] Gi T, Zhao H W, Zhang Z Y, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of D-, L-, and DL-penicillamines [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2006, 22(9): 1159-1163.
吉特, 赵红卫, 张增艳, 等. D-、L-和 DL-青霉胺的太赫兹时域光谱 [J]. 物理化学学报, 2006, 22(9): 1159-1163.
- [8] Zhao R J. The application of terahertz spectroscopy technique in medicine analysis [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013: 17-21.
赵容娇. 太赫兹技术在药物分析中的应用 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2013: 17-21.
- [9] Liu W B. Determination of chiral molecules and R/S configuration of chiral carbon atoms [J]. Education in Chemistry, 2011(4): 54-56.
刘文兵. 手性分子及 R、S 构型手性碳原子的判断 [J]. 化学教学, 2011(4): 54-56.
- [10] Luo C R, Hou Y L, Chen Z X. Effects of chirality of arabinose on formation of volatile flavor compounds in arabinose/cysteine model systems [J]. Food and Machinery, 2012, 28(1): 8-18.
罗昌荣, 侯亚龙, 陈正行. 手性对阿拉伯糖/半胱氨酸模型体系挥发性产物形成的影响 [J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 8-18.
- [11] Liu J Y, Wu S B. Chemical graphic design and molecular calculations [M]. Guangzhou: South China Science and Technology University Press, 2009: 204-345.
刘江燕, 武书彬. 化学图文设计与分子模拟计算

- [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2009: 204-345.
- [12] Yu B, Zeng F, Yang Y, *et al.* Torsional vibrational modes of tryptophan studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Biophysical Journal*, 2004, 86(3): 1649-1654.
- [13] Qi N, Zhang Z Y, Xiang Y H, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy combined with fuzzy rule-building expert system and fuzzy optimal associative memory applied to diagnosis of cervical carcinoma [J]. *Medical Oncology*, 2015, 32(1): 383.
- [14] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [15] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 2(3): 739-746.
- [16] Ge M, Zhao H W, Gi T, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of common pentasaccharides [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 2005, 35(6): 441-445.
葛敏, 赵红卫, 吉特, 等. 常见五元糖的太赫兹时域光谱[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2005, 35(6): 441-445.
- [17] Becke A D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1993, 98(7): 5648-5652.
- [18] Zhang T Y, Zhang C H, Zhao X Y, *et al.* Terahertz absorption spectra simulation of glutamine based on quantum-chemical calculation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2073-2077.
张天尧, 张朝晖, 赵小燕, 等. 基于量子化学计算的谷氨酰胺太赫兹吸收谱模拟 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2073-2077.
- [19] Chen T, Zhang C J, Xu C P. Study on terahertz time-domain spectroscopy of tartaric acid isomers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081202.
陈涛, 张超杰, 许川佩. 酒石酸异构体的太赫兹光谱研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081202.
- [20] Fang H X, Zhang Q, Zhang H L, *et al.* Terahertz spectroscopic and density functional theoretical analysis of cocrystal between olmesartan and benzoic acid [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2015, 36(12): 2504-2510.
方虹霞, 张琪, 张慧丽, 等. 奥美沙坦与苯甲酸共晶的太赫兹光谱与密度泛函理论分析 [J]. *高等学校化学学报*, 2015, 36(12): 2504-2510.
- [21] Wang W A, Liu W, Yang Q, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of anhydrous glucose [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1111001.
王文爱, 刘维, 杨茜, 等. 无水葡萄糖的太赫兹时域光谱特性 [J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1111001.
- [22] Gi T. Experimental method investigation and its application base on THz-TDS [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007: 54-59.
吉特. THz-TDS 实验方法研究及其应用 [D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2007: 54-59.