

文章编号: 2095-4980(2021)05-0819-07

低温下手性糖类的太赫兹吸收光谱和手性光谱

张天锐, 张子扬, 范飞*, 常胜江

(南开大学 现代光学研究所, 天津 300350)

摘要: 糖类是典型的手性物质, 其在太赫兹波段的手性光谱尚未得到充分研究。本文研究了乳糖、半乳糖、葡萄糖 3 种糖类在低温和常温下的折射率和吸收谱, 并通过太赫兹时域偏振光谱检测, 获得了这些样品的手性光谱。实验结果显示, 糖类吸收会随着温度降低而减弱, 低温下有利于获得样品的手性特征; 在 80 K 温度下, 葡萄糖在 1.3~1.5 THz 频段表现出很强的圆二色性(CD), 在 1.39 THz 处 CD 谱峰值达到 44.97%; 在 1.6~1.8 THz 频段内, 3 种糖类都具有特定的手性特征峰, CD 值均超过 20%。研究结果对进一步认识手性生化样品在太赫兹波段的手性光谱及其内在机制具有重要参考价值。

关键词: 太赫兹光谱; 手性光谱; 糖类; 温度

中图分类号: TN851.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021240

Terahertz absorption spectra and chiral spectra of saccharides at low temperature

ZHANG Tianrui, ZHANG Ziyang, FAN Fei*, CHANG Shengjiang

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Saccharides are typical chiral substances, and their chiral spectra in the terahertz band have not been fully studied. The refractive index and absorption spectra of lactose, galactose, and glucose at low temperature and normal temperature are studied respectively, and the chiral spectra of these samples are obtained through terahertz time-domain polarization spectroscopy. The experimental results show that the absorption of saccharides will decrease as the temperature decreases, which is conducive to obtain the chiral characteristics of the sample at low temperature. At 80 K, glucose exhibits strong Circular Dichroism(CD) in 1.3–1.5 THz; the CD peak value reaches 44.97% at 1.39 THz. All three saccharides have specific chiral characteristic peaks, and the CD values all exceed 20% in 1.6–1.8 THz. The research results can provide important reference for further understanding of the chiral spectra of chiral biochemical samples in terahertz band and their internal mechanisms.

Keywords: terahertz spectroscopy; chiral spectra; saccharides; temperature

太赫兹波是电磁波谱中分布在 0.1~10 THz 的电磁波。近年来, 由于其无损、高灵敏探测及对大生物分子独特的光谱特征等优点, 在医学^[1]、生化检测^[2]、食品药品生产与安全^[3]等方面受到广泛关注。自然界中许多生物大分子及有机分子振动和旋转频率都在太赫兹频段, 利用这些分子在太赫兹波段具有指纹谱, 可对它们进行识别^[4-7]。在太赫兹光谱检测中, 大部分采用太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)技术, 它是利用超短脉冲激光进行相干泵浦和探测的一种高灵敏超快时间分辨光谱技术。不同于红外吸收光谱, 它能够直接获得太赫兹脉冲电场的时间信号而不是强度信息, 因此它不仅携带强度信息还携带了相位信息, 同时还具有极高的信噪比和动态范围。经过 20 余年发展, 已成为重要的光谱检测方法和工具^[8-9]。

已有很多有机分子的太赫兹光谱被报道, 如 Chen 等在 0.1~2.8 THz 频段内对 17 种炸药进行检测, 计算了

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61831012; 61971242); 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0701000); 天津市自然科学基金资助项目(19JCYBJC16600)

*通信作者: 范飞 email: fanfei@nankai.edu.cn

常温下吸收系数, 通过吸收特征峰分辨出 17 种炸药^[10]; Wilk 等对 CB 族 4 种热致液晶进行太赫兹光谱测量, 计算出 4 种 CB 族液晶在太赫兹波段折射率分布为 1.60~1.64, 7CB 分子在 35 °C 具有较大的双折射系数 0.1^[11]; Sommer 等对不同结晶度的高密度聚乙烯进行太赫兹光谱测量, 发现折射率变化可以区别出不同结晶度的聚乙烯^[12]。在生物分子检测上, Yi 等在 0.1~6 THz 宽带内测量了 20 种不同的氨基酸, 并用密度泛函理论模拟了 20 种氨基酸的太赫兹光谱^[13]; 谈宏莹等报道了采用模糊聚类的方法分辨出升温后牛血清蛋白固体变性与非变性太赫兹光谱^[14]。

糖类是广泛分布在自然界中的一种重要化合物, 在生命活动过程中起着重要的作用, 维持着各种生物的生命活动。Zheng 等报道了利用太赫兹时域光谱系统测量果糖和葡萄糖, 并把光谱特征归结为分子内和分子间模式混合^[15]; 王文爱等在 0.15~3 THz 范围内测量了常温下无水葡萄糖吸收谱和折射率谱, 并基于密度泛函理论模拟了无水葡萄糖吸收谱^[16]。溶液中太赫兹光谱研究近来也有一些报道, 张磊巍等测量了葡萄糖溶液的太赫兹光谱, 发现葡萄糖溶液具有吸收特征峰, 同时不同浓度葡萄糖溶液对太赫兹波吸收各不相同^[17]; 李政隆等在常温下测量了 4 种葡萄糖同分异构体固体太赫兹光谱, 并从氢键角度预测了溶液中太赫兹光谱, 预测与实验具有较强的相关性^[18]。

糖类是自然界中一种典型的手性分子, 手性是一种几何概念, 指的是物体的旋向性。根据定义, 手性物体是一个不能通过平移和旋转与其镜像一致的物体^[19-21]。手性材料的特征在于对左旋(Left Circularly Polarized, LCP)和右旋(Right Circularly Polarized, RCP)圆偏振入射光之间的吸收/透射率差。在研究光学手性问题上, 常用到圆二色性(CD)谱和光学活性(Optical Activity, OA)谱两种方法^[22], 并普遍用于研究生物大分子和有机分子的空间构象: 如 Kelly 等利用 CD 谱研究蛋白质结构^[23]; Kypr 等则综述了利用 CD 谱研究特定 DNA 分子构象性质^[24]; Ganesan 等在模拟与实验上利用 CD 和 OA 谱研究了脂肪族氨基酸, 在红外密集区揭示了烷基侧链的特征, 得出拉曼密集区则是氨基酸中官能团的信息结论^[25]。在糖类手性光谱检测方面, Gekko 综述了利用同步辐射的真空紫外 CD 光谱学的方法可以将短波长极限扩展到真空紫外区(低至约 160 nm), 结合理论分析和生物信息学, 提供关于生物分子结构的新信息^[26]。但就目前研究来看, 很少见到糖类乃至大部分有机生化分子的太赫兹手性光谱的报道, 这可能与过去太赫兹手性光谱检测技术不成熟, 样品所处的温度环境等检测条件有关。

因此, 本实验利用太赫兹时域光谱系统, 采用与人体生命活动最为相关的乳糖、半乳糖、葡萄糖作为实验样品, 分析测量了 3 种糖类随温度变化时的折射率、透射率、吸收系数变化趋势; 同时利用太赫兹时域偏振和手性检测方法, 获得样品圆偏振输入和输出分量, 从而得到了 CD 谱和 OA 谱, 在 1.0~1.8 THz 频段内分析了 3 种糖类的光学手性强弱。

1 实验步骤

1.1 样品准备过程

实验所用的 3 种糖类样品分别为 D-(+)-乳糖(D-(+)-lactose, $C_{12}H_{22}O_{11}$, 来自源叶生物公司, 纯度 $\geq 98\%$)、D-半乳糖(D-galactose, $C_6H_{12}O_6$, 来自旭硕生物公司, 纯度 $\geq 98\%$)、D-(+)-葡萄糖(D-(+)-glucose, $C_6H_{12}O_6$, 来自旭硕生物公司, 纯度 $\geq 99\%$), 其中半乳糖和葡萄糖为单糖, 乳糖为二糖。样品在正常状态下为白色粉末状, 用药匙各取 0.2 g 样品放于试纸中, 并置于干燥箱中, 在 120 °C 下烘干 2 h。待冷却后, 先用研钵和研杵研磨样品, 之后放入粉末压片机中(LabPress 15T), 使用 10 MPa 的压力将称量好的 3 种糖类粉末压成圆形薄片形状(如图 1(b)所示), 测量糖类固体压片厚度为 $2.07 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$, 最后将固体压片粘贴在真空杜瓦瓶中进行太赫兹实验。

1.2 太赫兹时域光谱系统

实验中使用本课题组自主搭建的 THz-TDS 系统, 如图 1(b)~(c)所示, 太赫兹脉冲由飞秒激光激发低温生长的 GaAs 光电导天线产生。飞秒激光由掺钛蓝宝石飞秒激光器产生, 脉宽 75 fs, 重复频率为 80 MHz, 工作波长为 800 nm^[10]。入射线偏振(Linearly Polarized, LP)太赫兹波的偏振方向总是沿着 y 轴, 飞秒激光极化方向为 x 轴, 因此需要旋转 ZnTe 晶体(001)轴以获得最佳探测效率。本系统测量的时间分辨力为 0.04 ps, 输出的频谱分辨力为 2.08 GHz, 光谱强度动态范围高于 50 dB。与传统 THz-TDS 系统相比, 如图 1(a)所示, 在样品前后各加一个可旋转的太赫兹偏振片, 用于不同偏振分量的检测, 从而重构出不同的输入和输出偏振态, 实现太赫兹时域偏振光谱检测。

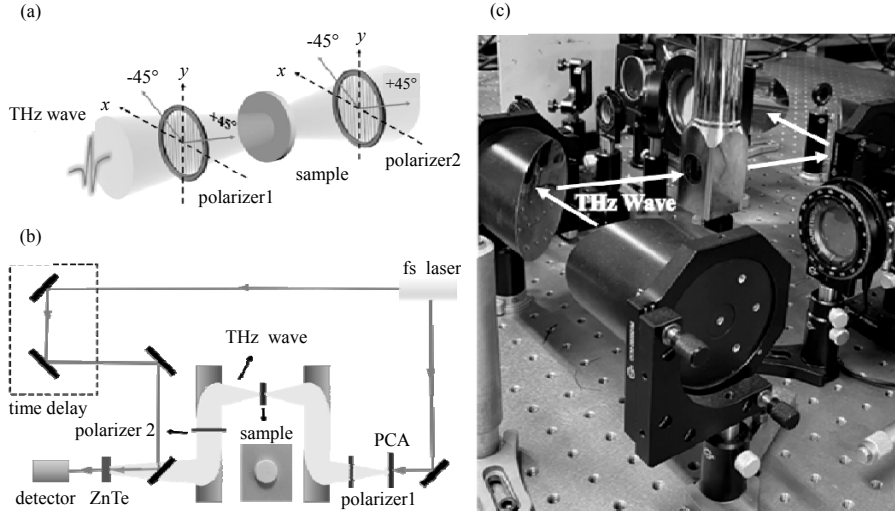


Fig.1 (a) Schematic diagram of saccharide sample solid shape and measured phase and polarization;

(b) Schematic diagram of system optical path of THz-TDS; (c) Picture of experimental device

图 1 (a) 糖类样品固体形状及实验测量相位和偏振示意图; (b) 太赫兹时域光谱系统光路示意图; (c) 实验装置图片

1.3 数据处理过程

在实验过程中首先采集放置糖类样品透射时域信号 $E_s(t)$ 和未放置糖类样品的空气参考时域信号 $E_r(t)$ (均包括真空杜瓦瓶), 经过傅里叶变换得到振幅 $E_s(\omega)$, $E_r(\omega)$ 和相位 $\phi_s(\omega)$, $\phi_r(\omega)$, 振幅透射率 $t(\omega)$ 和相位差 $\Delta\phi(\omega)$ 可以表示为^[27]:

$$t(\omega) = E_s(\omega) / E_r(\omega) \quad (1)$$

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_s(\omega) - \phi_r(\omega) \quad (2)$$

样品折射率 $n(\omega)$ 可由式(3)表示, 消光系数 $\kappa(\omega)$ 可由式(4)计算得出, 吸收系数由式(5)计算得出^[27]:

$$n(\omega) = \frac{\Delta\phi(\omega)c}{\omega d} + 1 \quad (3)$$

$$\kappa(\omega) = \frac{-\ln\left(t(\omega) \frac{[n(\omega)+1]^2}{4n(\omega)}\right)c}{\omega d} \quad (4)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\kappa(\omega)\omega}{c} \quad (5)$$

式中: c 为真空中的光速; ω 为光的角频率; d 为糖类固体压片的厚度。

如图 1(a)所示, 通过旋转偏振片 1 和偏振片 2 可以测量 $+45^\circ, 0^\circ$ 和 -45° 线偏振输入和输出分量。如果只关心样品的线偏振特性, 将 2 个偏振片都旋转 0° , 就可以获得其在 y -LP 波激发下, y -LP 出射的透射和相位信息, 由式(1)~式(5)进行数据处理即可, 温度变化过程中样品厚度将热膨胀考虑在内。如果要得到样品出射波完整的偏振信息以及样品所具有的完整的手性信息, 需分别将 2 个偏振片旋转至 $+45^\circ$ 和 -45° , 获得 2 对输入和输出的正交线偏振分量信号。利用获得的输入输出的正交线偏振的太赫兹波的 2 个共极化和 2 个交叉极化分量, 通过傅里叶变换提取出 4 个分量的复振幅, 表示为 $t_{++45^\circ}, t_{--45^\circ}, t_{+-45^\circ}, t_{-+45^\circ}$, 其中前一个下角标表示输出偏振角, 后一个下角标表示输入偏振角。把这 4 个测量的分量代入式(6)进行正交变换, 可以完全重构圆偏振输入、圆偏振输出的偏振态。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{rr} & T_{rl} \\ T_{lr} & T_{ll} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_{++45^\circ} + t_{--45^\circ} + i(t_{+-45^\circ} - t_{-+45^\circ}) & t_{++45^\circ} - t_{--45^\circ} - i(t_{+-45^\circ} + t_{-+45^\circ}) \\ t_{++45^\circ} - t_{--45^\circ} + i(t_{+-45^\circ} + t_{-+45^\circ}) & t_{++45^\circ} + t_{--45^\circ} - i(t_{+-45^\circ} - t_{-+45^\circ}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 T_{rr}, T_{ll}, T_{rl} 和 T_{lr} 为得到的 4 个圆偏振分量的复振幅, 下标 “r/l” 表示右旋/左旋圆偏振光, 前一个下角标表示输出波, 后一个下角标表示输入波。本文主要关注左、右旋光自身传输的不对称性, 即圆偏振的共极化分量, 而不关注左、右旋光在样品中相互转化的情况, 即不关注交叉极化分量。

利用式(7)~(8)可以计算得出 CD 谱及 OA 谱:

$$CD = \frac{(|T_r|^2 - |T_l|^2)}{(|T_r|^2 + |T_l|^2)} \times 100\% \quad (7)$$

$$OA = \frac{1}{2} \arg \frac{T_r}{T_l} \quad (8)$$

从式(7)可以看出, CD 反映了左旋光和右旋光在手性样品中传输强度透过率的差异, 而 OA 反映了它们在样品中传输相位角的差异。

2 结果与讨论

如图 2(a)所示, 在 80 K 下从时域信号的曲线形状上很难将半乳糖和葡萄糖两种单糖区分开, 而乳糖在时域信号具有明显类 M 型的信号色散延迟, 可以将它与另外两种单糖区分开。为了消除杜瓦瓶玻璃窗口界面的反射信号带来的法布里-珀罗效应的干扰, 选取 0~15 ps 内时间信号作为时间信号处理窗口, >15 ps 的信号进行补 0 处理并延伸至 480 ps, 时间间隔为 0.04 ps, 再进行傅里叶变换。经过傅里叶变换和 1.3 节的数据处理方法计算, 得到了 3 种不同糖类在不同温度变化下的折射率谱, 如图 2(b)~(d)所示, 插图分别为 0.6~0.8 THz 频段的折射率谱。从图中可以看出, 随着温度的升高, 折射率相应变大; 3 种糖类样品在 80~140 K 较低温情况下, 温度的改变对折射率几乎没有影响; 当温度增加到 200 K 以上时, 折射率开始有一个较大幅度的增加, 在葡萄糖样品中体现得最为明显。

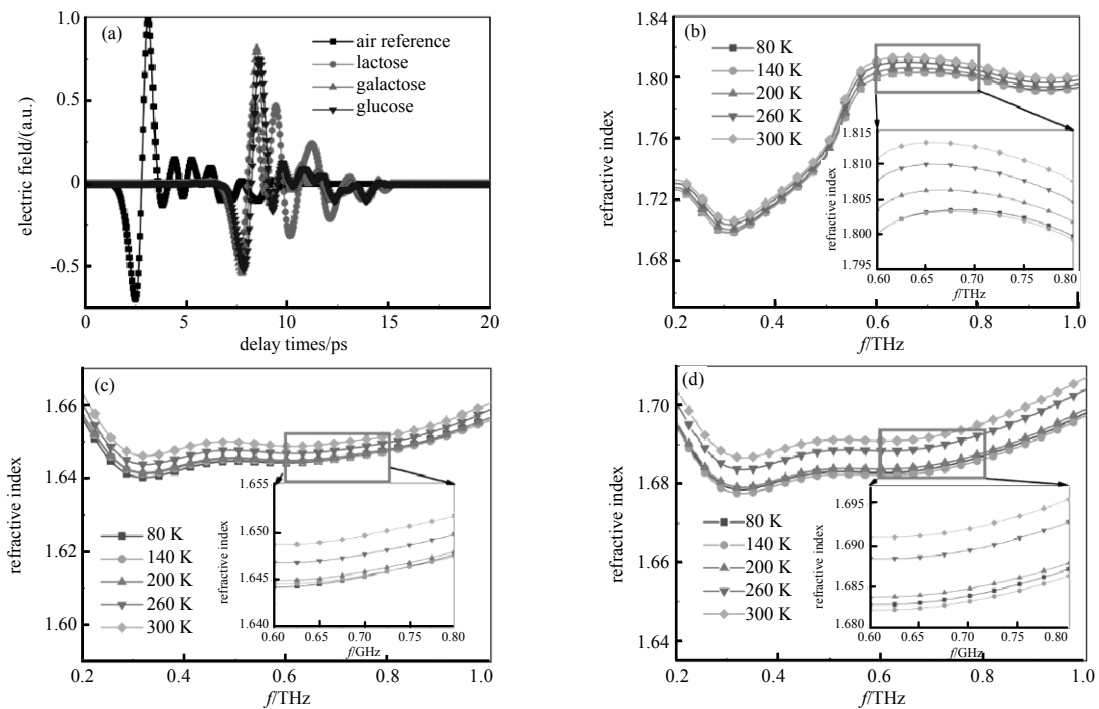


Fig.2 (a) Time domain signals of air reference and different saccharides at 80 K; The refractive index changes with temperature of (b) Lactose; (c) Galactose; (d) Glucose

图 2 (a) 80 K 温度下空气参考和 3 种糖类的时域信号; (b)~(d)分别为乳糖、半乳糖和葡萄糖的折射率随温度变化情况

图 3(a)~(c)为乳糖、半乳糖、葡萄糖在 0.2~1.8 THz 范围、不同温度下 0° LP 入射和出射波的振幅透过率, 插图为 0.4~0.8 THz 频段的振幅透过率; 图 4(a)~(c)为乳糖、半乳糖、葡萄糖在 0.2~1.8 THz 范围、不同温度下的吸收系数。随着温度的升高, 透射率呈现出均匀降低的现象, 在低温下糖类有着更高的透过率。由图 3(a)和 4(a)可以看出, 乳糖在 0.54 THz 处有一个明显的吸收特征峰; 对比半乳糖和葡萄糖, 由图 3(b)、图 4(b)和图 3(c)、图 4(c)可以看出, 半乳糖和葡萄糖在 1.41 THz 和 1.66 THz 处都存在一个吸收特征峰, 半乳糖在 1.41 THz 处吸收远弱于葡萄糖, 在 1.66 THz 处半乳糖吸收强于葡萄糖。

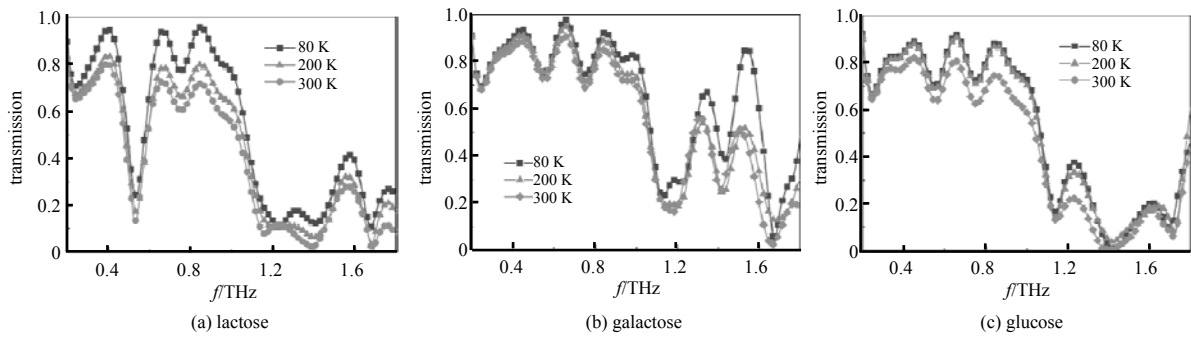


Fig.3 Amplitude transmittance of saccharides at different temperatures
图 3 不同温度的糖类振幅透射系数

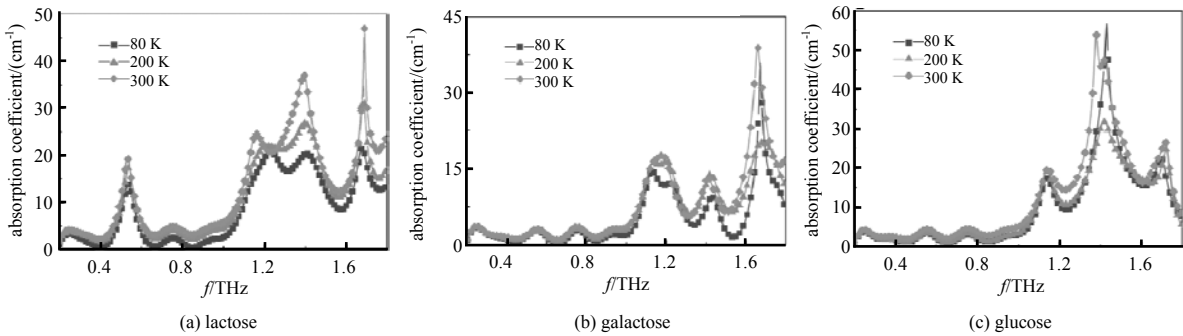


Fig.4 Absorption coefficient of saccharides at different temperatures
图 4 不同温度的糖类吸收系数

进一步分析糖类在低温下的手性响应，光学手性体现在对LCP光和RCP光的吸收和相位延迟上的差异。图5为CD效应示意图，当LCP和RCP光通过样品时，LCP光可以透过样品，RCP光不能。图6(a)~(c)为乳糖、半乳糖、葡萄糖的圆偏入射-圆偏出射的透射谱，乳糖和半乳糖在1.3~1.5 THz内LCP光和RCP光透过率存在较大的差异，3种糖类在1.6~1.8 THz波段内LCP光和RCP光透过率均存在较大的差异，体现出较强的光学手性。图7为3种糖类在80 K下CD谱，图8为3种糖类的OA谱。1.3~1.5 THz波段内，葡萄糖表现出很强的圆二色性，并显示出强烈的色散效应，在1.39 THz处CD峰值达到44.97%；而乳糖的光学手性相对于葡萄糖较弱一些，在1.41 THz处CD峰值达到16.1%；半乳糖在这一频段内没有光学手性。在1.6~1.8 THz频段内，3种糖类均表现出较强的光学手性，在1.67 THz处半乳糖LCP光占主导地位，CD峰值达到21%，而葡萄糖CD峰值为28.7%，乳糖在1.77 THz处CD峰值超过35%。OA谱变化趋势与CD谱基本一致，在1.3~1.5 THz和1.6~1.8 THz两个频段内体现出较强的光学活性，乳糖在1.43 THz、半乳糖在1.68 THz、葡萄糖在1.40 THz处，OA峰值分别达到10°、20°和39.7°，表明此频率下具有非常强的偏振转换特性和光学活性。

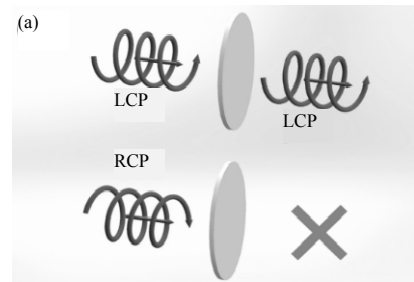


Fig.5 Schematic diagram of the CD effect of saccharides
图 5 糖类样品 CD 效应示意图

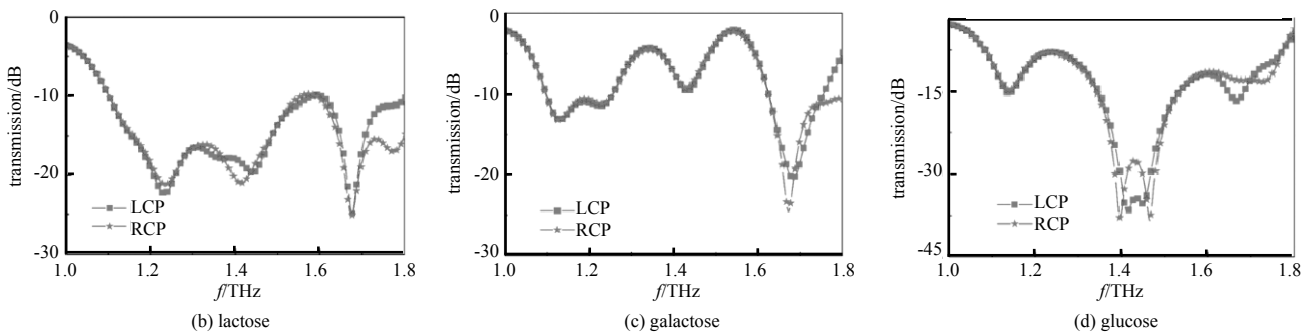


Fig.6 Transmission spectra of saccharides solids LCP and RCP
图 6 糖类固体 RCP 和 LCP 的透射谱

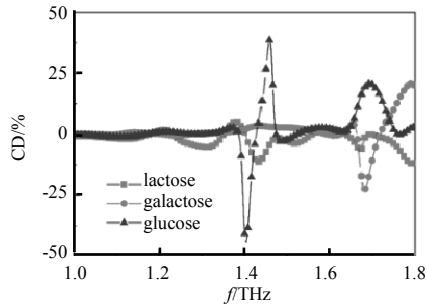


Fig.7 CD spectra of three saccharides
图 7 三种糖类的 CD 谱

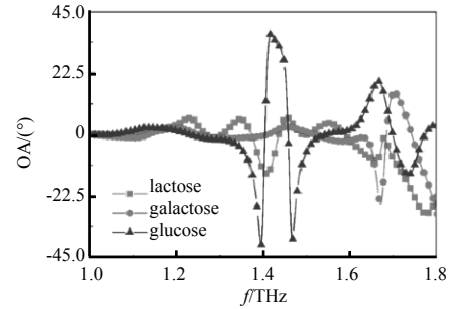


Fig.8 OA spectra of three saccharides
图 8 三种糖类 OA 谱

3 结论

在实验中比较了3种不同糖类(乳糖、半乳糖、葡萄糖)在不同温度的折射率、透射谱和吸收系数,并分析其在低温下的CD谱和OA谱。得到的主要结论如下:在80~140 K温度范围内,3种糖类的折射率基本无变化;当温度增加到140 K以上时,折射率随温度升高而增加。透射率随温度升高而均匀降低,乳糖在0.54 THz处有独特的吸收特征峰,半乳糖和葡萄糖在1.41 THz和1.66 THz处都存在吸收特征峰,但吸收强弱有所差别。在80 K下,葡萄糖在1.3~1.5 THz频段表现出很强的圆二色性,在1.39 THz处CD峰值达到44.97%,而半乳糖在这一频段内没有光学手性;在1.6~1.8 THz频段内,3种糖类都具有一定光学手性,CD值均超过20%。这一研究结果对进一步认识手性生化样品在太赫兹波段的手性光谱及其内在分子动力学机制具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] COOPER K B,DENGLER R J,LLOMBART N,et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):169-182.
- [2] LIU Y,WU Z,KOLLIPARA P S,et al. Label-free ultrasensitive detection of abnormal chiral metabolites in diabetes[J]. ACS Nano, 2021,15(4):6448-6456.
- [3] 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):S266.
- [4] MARKELZ A,ROITBERG A,HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA,bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz[J]. Chemical Physics Letters, 2000,320(1-2):42-48.
- [5] YAMAGUCHI M,MIYAMARU F,YAMAMOTO K,et al. Terahertz absorption spectra of L-,D-,and DL-alanine and their application to determination of enantiometric composition[J]. Applied Physics Letters, 2005,86(5):053903.
- [6] WANG W N,LI H Q,ZHANG Y,et al. Correlations between terahertz spectra and molecular structures of 20 standard α -amino acids[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2009,25(10):2074-2079.
- [7] OPPENHEIM K C,KORTER T M,MELINGER J S,et al. Solid-state density functional theory investigation of the terahertz spectra of the structural isomers 1,2-dicyanobenzene and 1,3-dicyanobenzene[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2010,114(47):12513-12521.
- [8] UENO Y,AJITO K. Analytical terahertz spectroscopy[J]. Analytical Sciences, 2008,24(2):185-192.
- [9] BAXTER J B,GUGLIETTA G W. Terahertz spectroscopy[J]. Analytical Chemistry, 2011,83(12):4342-4368.
- [10] CHEN J,CHEN Y,ZHAO H,et al. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1-2.8 THz[J]. Optics Express, 2007,15(19):12060-12067.
- [11] WILK R,VIEWEG N,KOPSCHEINSKI O,et al. THz spectroscopy of liquid crystals from the CB family[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009,30(11):1139-1147.
- [12] SOMMER S,RAIDT T,FISCHER B M,et al. THz-spectroscopy on high density polyethylene with different crystallinity[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016,37(2):189-197.
- [13] YI W,YU J,XU Y,et al. Broadband terahertz spectroscopy of amino acids[J]. Instrumentation Science & Technology, 2017, 45(4):423-439.
- [14] 谈宏莹. 不同温度的牛血清白蛋白的太赫兹光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018,38(11):3374-3378. (TAN Hongying. Investigation of bovine serum albumin at different temperatures by Terahertz Time-Domain Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018,38(11):3374-3378.)

- [15] ZHENG Z P, FAN W H, LIANG Y Q, et al. Application of terahertz spectroscopy and molecular modeling in isomers investigation: glucose and fructose[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7):1868–1871.
- [16] 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):241–248. (WANG Wenai, LIU Wei, YANG Xi, et al. Terahertz Time-Domain Spectroscopy of anhydrous glucose[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11):241–248.)
- [17] 张磊巍, 左剑, 张存林. 葡萄糖溶液的太赫兹光谱观察[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(5):707–711. (ZHANG Leiwei, ZUO Jian, ZHANG Cunlin. Observation of terahertz spectra of glucose solution[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(5):707–711.)
- [18] 李政隆, 张德海. 基于太赫兹技术的葡萄糖及其同分异构体研究[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021, 19(1):11–17. (LI Zhenglong, ZHANG Dehai. Discrimination of glucose and its isomers based on terahertz technology[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021, 19(1):11–17.)
- [19] ENGHETA N, JAGGARD D L. Electromagnetic chirality and its applications[J]. *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, 1988, 30(5):6–12.
- [20] LAPLANTE S R, FADER L D, FANDRICK K R, et al. Assessing atropisomer axial chirality in drug discovery and development[J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2011, 54(20):7005–7022.
- [21] FASEL R, PARSCHAU M, ERNST K H. Amplification of chirality in two-dimensional enantiomorphous lattices[J]. *Nature*, 2006, 439(7075):449–452.
- [22] MARTIN S R, SCHILSTRA M J. Circular dichroism and its application to the study of biomolecules[J]. *Methods in Cell Biology*, 2008(84):263–293.
- [23] KELLY S M, JESS T J, PRICE N C. How to study proteins by circular dichroism[J]. *Biochimica et Biophysica Acta(BBA)–Proteins and Proteomics*, 2005, 1751(2):119–139.
- [24] KYPR J, KEJNOVSKÁ I, RENČIUK D, et al. Circular dichroism and conformational polymorphism of DNA[J]. *Nucleic Acids Research*, 2009, 37(6):1713–1725.
- [25] GANESAN A, BRUNGER M J, WANG F. A study of aliphatic amino acids using simulated vibrational circular dichroism and Raman optical activity spectra[J]. *The European Physical Journal D*, 2013, 67(11):1–12.
- [26] GEKKO K. Synchrotron-radiation vacuum-ultraviolet circular dichroism spectroscopy in structural biology: an overview[J]. *Biophysics and Physicobiology*, 2019(1):41–58.
- [27] JI Y Y, FAN F, ZHANG X, et al. Terahertz birefringence anisotropy and relaxation effects in polymer-dispersed liquid crystal doped with gold nanoparticles[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12):17253–17265.

作者简介：

张天锐(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹手性功能器件与传感应用 .email: 2120200259@mail.nankai.edu.cn.

范 飞(1986–), 男, 副教授, 主要研究方向为太赫兹微结构功能器件与太赫兹光谱技术研究.

张子扬(1993–), 男, 在读博士研究生, 主要从事生化样品的太赫兹偏振光谱与传感研究.

常胜江(1966–), 男, 教授, 长期从事太赫兹功能器件、太赫兹时域光谱技术以及人工神经网络在模式识别中的应用工作.