

# THz 辐射在 DNA 光谱研究中的应用

王晓红, 张亮亮, 胡颖\*, 张存林

首都师范大学物理系, 北京 100037

**摘要** 太赫兹(THz)辐射是一种新型的远红外相干辐射源, 近年来在不同的研究领域得到了广泛的应用, 许多研究表明 THz 脉冲光谱学在生物和医学方面具有潜在的应用前景。文章简要介绍了 THz 辐射产生和探测的基本原理和方法; 阐述了 THz 辐射在生物学和 DNA 分子光谱学研究的物理基础; 讨论应用 THz 辐射研究 DNA 取得的成果及最新进展, 展望应用 THz 辐射研究 DNA 分子的前景。

**主题词** THz 辐射; DNA; 光谱; 折射率; 吸收系数

**中图分类号:** O434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)03-0385-07

## 引言

THz 辐射指的是频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁辐射, 其波段介于远红外和微波之间。一直以来, 生物分子的光谱研究都是在高于 10 THz 的频率范围内进行的, 分子结构和性质的详细信息是从其他波段如拉曼和红外光谱中得到。随着傅里叶变换红外分光计(FTIR)的发展, 使用合适的发射源, 光谱波段能够延伸到远红外(FIR)波段<sup>[1]</sup>。但是 FTIR 技术的发射源的光流量很低, 在 THz 频段的灵敏度很差, 因此, 对生物大分子在 THz 波段的振动模式研究非常少。近 10 年来, 飞秒(fs)激光技术的发展使得 THz 光谱技术有了突破性的进展, THz 辐射的产生<sup>[2-6]</sup>、探测<sup>[7-9]</sup>和应用方面的研究<sup>[10-15]</sup>引起了越来越多的关注。理论证明许多极性大分子在振动能级间的跃迁和转动能级间的跃迁正好处于 THz 频率范围, 在 THz 频段存在大量的 DNA 分子主链间的受激本征共振。因此, 生物分子的 THz 光谱可以反映由分子内或分子间集体振动和晶格振动引起的低频振动模的本征特性。吸收光谱中观察的集体振动模式由整个分子的构形和构象决定, 并且可反映出分子与环境之间的相互作用。THz 时域光谱(THz-TDS)为分子的构形和构象提供了直接的特征谱。THz 相干电磁辐射具有较低的光子能量, 在进行样品探测时, 不会产生有害的光致电离, 是一种有效的无损探测方法。近 10 年来的研究表明 THz 波段的实验测量是可行的, 并且取得了一些成果。理论模型方面, 利用简正模分析, 洛伦兹模型, 以及薄膜矩阵模型和蒙特卡洛模型能够解释生物

分子在较长波段的吸收特点<sup>[16-18]</sup>; 实验方面, THz 光谱广泛地应用于分子构象研究、基因鉴定和同质异构体鉴别等方面。这些实验结果证明了 THz 时域光谱技术是很有发展前途的, 如果把这个技术和理论分析相结合, 那么在基础生物科学、医学和军事防御方面都会有很重要的应用。因此, THz 光谱技术在分析和研究大分子尤其是 DNA 聚合物内部低频振动方面有非常广阔的应用前景。

## 1 THz 时域光谱技术

### 1.1 脉冲 THz 辐射的产生和探测

目前主要有两种产生 THz 辐射的方法, 光导天线作为瞬变电流源辐射 THz 波<sup>[19-21]</sup>和晶体中光学脉冲整流辐射 THz 波<sup>[22]</sup>。THz 脉冲的探测, 主要有三种探测方法: 热辐射探测<sup>[23, 24]</sup>, 时控天线探测<sup>[25]</sup>和时控光电探测<sup>[26-29]</sup>。在 0.1~3 THz 的频率范围内, 频率在 3 THz 以下时, 天线探测的信噪比和灵敏度较高<sup>[30, 31]</sup>; 自由空间光电取样技术能够实现高达 37 THz 的高探测带宽<sup>[32]</sup>; 时控探测相对于热辐射探测, 可以压缩本征热背景噪声。就信噪比而言, 在高于 5 THz 时, 热探测的信噪比更高。THz 产生和探测的实验装置示意图如图 1 所示。

### 1.2 THz 时域光谱技术提取光学参数的方法

首先认为实验中 THz 时域光谱系统的响应函数是不随时间改变的, 所测样品的结构均匀, 前后表面被抛光并且保持相互平行。分别探测没有样品时的参考信号和有样品信息的样品信号。

收稿日期: 2005-05-20, 修订日期: 2005-08-21

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(10390160), 北京市教育委员会科技发展计划(KM200310028115)和北京市自然科学基金(6032006)资助

作者简介: 王晓红, 女, 1982 年生, 首都师范大学物理系硕士研究生 \* 通讯联系人

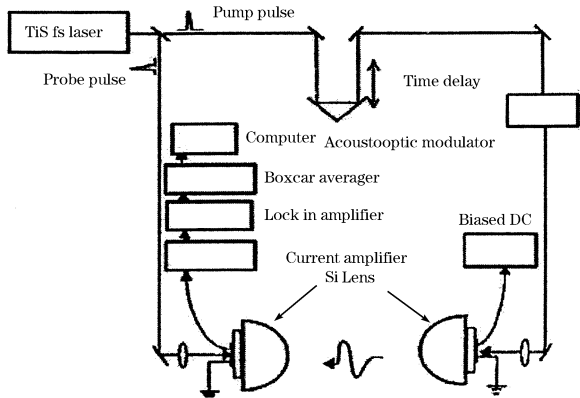


Fig. 1 Schematic diagram of THz generation and detector

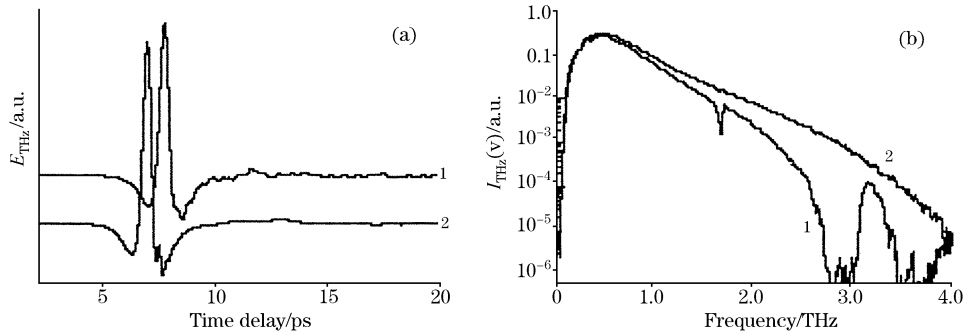


Fig. 2 (a) THz pulses before and after propagation through a sample; (b) Corresponding intensity spectra

1, Sample pulse; 2, Reference pulse

测量 DNA 分子的 THz 时域谱时可应用透射型和反射型两种样品测试方法。对应光学参数有不同的表示方法。

### 1.2.1 透射型系统

对于透射型实验装置

$$E_s(\omega)/E_r(\omega) =$$

$$T(n) \exp\{-\alpha(\omega)d + jn(\omega)\omega d/c\} = \rho(\omega) \cdot e^{-j\phi(\omega)}$$

$T(n)$  表示 THz 波在样品表面反射的损失,  $d$  为样品的厚度。在已知  $E_s(\omega)/E_r(\omega)$  的相位  $\Phi$  和振幅  $\rho$  的情况下, 理论上是可以解出  $n$  和  $k$  值的, 但这是一个超越方程组, 准确求解比较困难。一般情况下, 应结合实验光路图及具体样品考虑, 作相应的近似, 简化计算。

#### (1) 厚样品

使用厚样品时, 可以忽略回波, 如果只考虑垂直入射的情况, 且在弱吸收的情况下

$$n_s(\omega) = \phi(\omega) \cdot \frac{c}{\omega d} + 1$$

$$k_s(\omega) = \ln\left(\frac{4n_s(\omega)}{\rho(\omega) \cdot (n_s(\omega) + 1)^2}\right) \cdot \frac{c}{\omega d}$$

#### (2) 薄样品

样品较薄的情况下, 可能有很多的回波, 但可以看成许多回波迭加的结果, 如果从取样窗口中不能分辨出其中的回波个数, 理论上可以看出无穷多个回波的叠加, 可以利用迭代的方法解出最后结果。

设入射的 THz 信号为  $E_{\text{THz}}(\omega)$ , 若经过样品, 在线性介质中传播距离  $L$  后, 即为参考信号, 记为  $E_r(\omega)$ , 有

$$E_r(\omega) = E_{\text{THz}}(\omega) e^{-j\tilde{n}(\omega)\omega L/c}$$

若经过样品, 则为带有样品信息的样品信号, 记为  $E_s(\omega)$ 。

通过把样品信号和参考信号比值  $E_s(\omega)/E_r(\omega)$ , 就可以消除实验的系统响应误差, 并且得到由样品引起 THz 波振幅  $\rho$  和相位  $\Phi$  的改变。从而确定材料吸收系数  $\alpha$  的曲线, 折射率  $n$  的曲线, 以及消光系数  $\kappa$ 。得到材料的折射率  $n$  和消光系数  $k$  后, 其他表征材料宏观性质的物理量例如吸收系数  $\alpha$ 、复介电常数  $\epsilon(\epsilon_r, \epsilon_i)$ 、复电导率  $\sigma(\sigma_r, \sigma_i)$ 、掺杂半导体材料中电子迁移率  $\mu$ 、超导材料的表面电阻  $Z_s = R_s + jX_s$  等都可以通过相应的关系式求得。可见, 利用 THz 时域光谱技术可以很方便地提取生物大分子材料的光学常数, 进而得到生物材料的构象信息。图 2 给出了典型参考信号和样品信号的时域谱(a)及对应的傅里叶变换得到的频域谱(b)。

### 1.2.2 反射型系统

许多情况下, 是不能进行透射谱测量的, 例如, 对于不透射的样品, 超薄的样品等。而改用 TDS 反射谱测量往往可以弥补这样的缺陷。反射型 THz 时域光谱系统在实验技术上要求比较高。一般反射谱用于测量高吸收的样品, 例如一些高掺杂的半导体样品等。在正入射的情况下, 其中的折射率  $n$  和消光系数  $\kappa$  的值可以有如下的比较简洁关系式

$$n(\omega) = \frac{1 - \rho^2(\omega)}{\rho^2(\omega) - 2\rho(\omega)\cos\Phi(\omega) + 1}$$

$$\kappa(\omega) = \frac{2\rho(\omega)\sin\Phi(\omega)}{\rho^2(\omega) - 2\rho(\omega)\cos\Phi(\omega) + 1}$$

## 2 脉冲 THz 辐射应用于 DNA 分子光谱学研究的物理基础

DNA 是由脱氧核酸、磷酸和碱基结合在一起形成的承载生物遗传特性的一类生物大分子。其分子量一般比较大, 并且随细胞的不同而不同。DNA 分子都是双螺旋结构的。碱基中显弱碱性的化合物有腺嘌呤(A)、胞嘧啶(C)、鸟嘌呤(G)和胸腺嘧啶(T)。两个 DNA 链就是靠 A 与 T 及 C 与 G 之间的偶极-偶极相互作用形成的氢键连接, 进而形成一个双螺旋的 DNA 大分子。

DNA 分子对 THz 辐射的响应主要来自于由其分子的构

形和构象决定的集体振动模,这种集体振动模主要反映分子的整体结构信息,而不是通常测量的相对定域的电子结构,或与单个化学键相关的振动模。同时,由于大分子的结构对环境非常敏感,集体振动模的强度和分布也包含了环境的影响。因此,THz 光谱对于研究 DNA 分子的内部结构,分子之间的反应,分子与环境之间的相互作用都具有独特的优势。此外,利用泵浦-探测技术,可以通过时间分辨的 THz 光谱分析,对 DNA 等易于变形的大分子在特定的生理过程或其他的相互作用过程中发生的构象变化进行动态分析。生物分子的整体结构与它们在 THz 波段的光谱性质的高度相关性,是这种新兴技术应用于生物体系研究的最重要的理论基础。

### 3 THz 辐射在 DNA 光谱分析方面的研究成果和最新进展

通过散射和吸收光谱研究分子动力学是分析分子构象行之有效的方法。过去的 20 多年,拉曼光谱广泛地应用于观测生物分子的三维结构和显微过程。但是它的理论和测量非常复杂。这期间还有其他的实验在远红外频段研究生物大分子,比如拉曼散射,布里渊散射,中子散射等。但大多数的研究都是在高于 10 THz 甚至更高的频率范围进行的。低于 10 THz 的报道非常有限。主要是由于实验方面存在很大的困难,可利用的发射源的功率很低,生物材料的吸收也相对很弱,并且生物材料溶液中水对 THz 波的吸收率很高,掩盖了真正的实验结果。这些困难使得研究生物材料的声子模式受到很大的限制。

随着傅里叶变换红外光谱仪的发展,人们利用适当的发射源首次得到了 DNA 等生物大分子在 THz 频段的吸收光谱、DNA 声子模式,并成功地运用动力学模型解释了低频振动模式<sup>[33]</sup>。Saxena 等研究预测,DNA 在 THz 波段的声子模

象是由碱基对间的局部振动引起的,因此,THz 波段的声子模式反映了 DNA 码的特性。另外 Saxena 等<sup>[34]</sup>的理论研究预测,在 THz 频率范围的 DNA 声子模式包含有一个  $3\text{ cm}^{-1}$  低频率的共振模式。这些理论预测成为进一步研究生物大分子光谱的科学动力。随着世界基因工程的建立和 THz-TDS 技术的发展,人们试图通过这种新的方法来获得生物功能性质的基本序列信息,并得到了一些成果。

在 THz 光谱分析研究方面,首先需要解决的是分子结构与所观察的 THz 光谱之间的对应关系。虽然目前此波段缺少光谱数据的积累,并且有关集体振动模的理论也有待进一步发展,但是也得到了一些 DNA 分子的 THz 吸收光谱,发现了分子在发生构象变化时,THz 吸收谱也有相应的变化。这些进展必将鼓励对更多生物体系开展研究,并进一步刺激有关集体振动模理论的改进和完善。

#### 3.1 分子构象研究

Markelz 等<sup>[35]</sup>第一次使用脉冲 THz 光谱技术研究生物分子的低频共振模,得到了小牛胸腺 DNA、血清蛋白和胶原蛋白的冷冻粉末压片样品在  $0.06\sim 2.00\text{ THz}$  ( $2\sim 67\text{ cm}^{-1}$ ) 频段的低频吸收谱、复折射率与相对湿度之间的关系,观察到样品的吸收曲线随着频率的增加而增加,从而证明这些物质大量的低频共振模式在远红外波段。

Fischer 等<sup>[36]</sup>利用 THz-TDS 测量了腺嘌呤(A),鸟嘌呤(G),胞嘧啶(C)和胸腺嘧啶(T)在 0.5 到 4.0 THz 频段的折射率和吸收系数(如图 3)以及相应的核苷 dA, dG, dC 和 dT 在 0.5 到 3.5 THz 频段的复折射率信息(如图 4)。图 3、图 4 中为了将曲线更好的区分开,将曲线进行了适当的平移。由于大分子的低频振动模式由分子的多维势能函数的整体特性决定,对原子几何排列非常敏感,对分子内和分子间的构形变化响应灵敏,并且这种集体振动模与分子构象有关,因此为确定分子的构象态和环境影响提供了指纹特征。

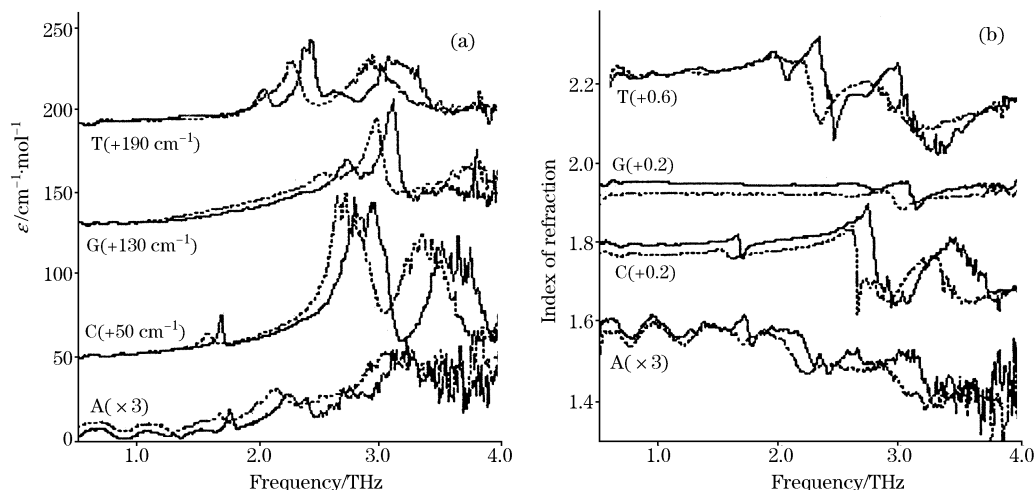


Fig. 3 (a) Absorption coefficient and (b) index of refraction of the nucleobases A, C, G and T, recorded at 10 K (solid curves) and 300 K (dashed curves)

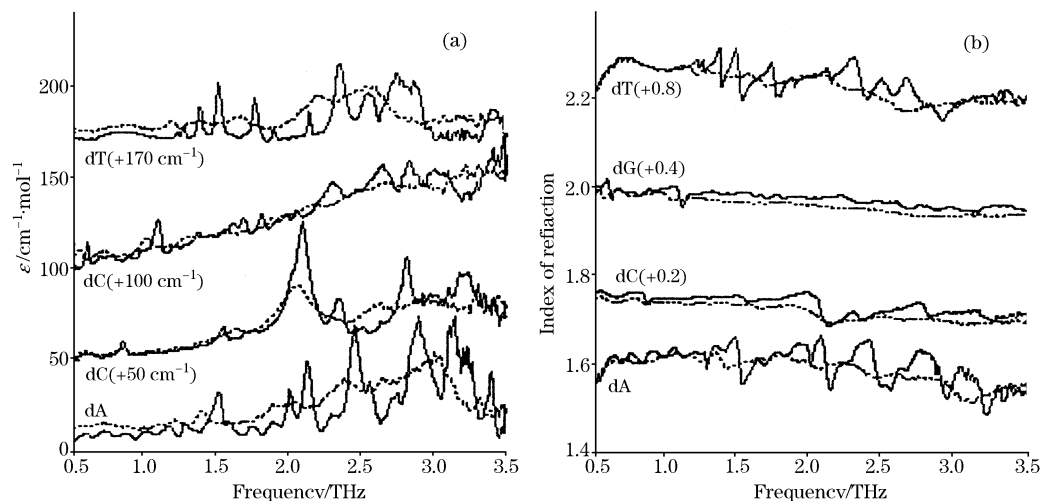


Fig. 4 (a) Absorption coefficient and (b) index of refraction of the nucleosides dA, dC, dG and dT, recorded at 10 K (solid curves) and 300 K (dashed curves)

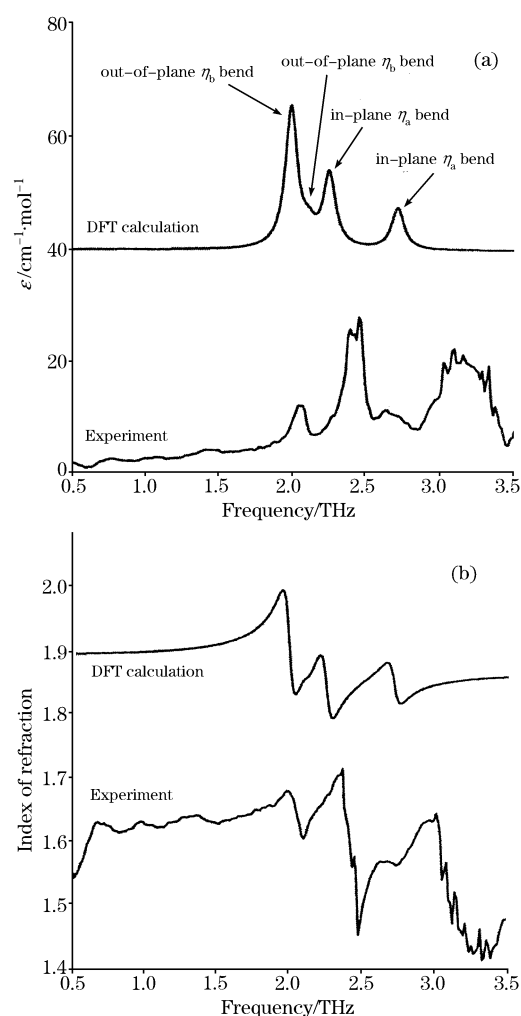


Fig. 5 Comparison between a DFT calculation and experimental determination of (a) absorption spectra and (b) index of refraction of thymine

图 5 是通过密度泛函理论(DFT)计算的胸腺嘧啶共振峰与实验观察的吸收峰之间的比较,可以看出预期的共振频率与实际得到的位置有一定的一致性。计算假设各共振是阻尼振荡,四个低频的远红外振动来自于标记的  $\eta_a$  和  $\eta_b$  氢键系统(见图 6)的分子间共面和非共面振动。拟合结果与实验结果的差距主要是由于除了单个氢键系统的弯曲作用外,还存在不同氢键系统间的拉伸和扭曲,如果将不同氢键系统间的相互作用考虑在内,会有助于得到与实验结果高度吻合的低频振动模式。因此,共振吸收峰是分子间氢键的振动引起的<sup>[36]</sup>。

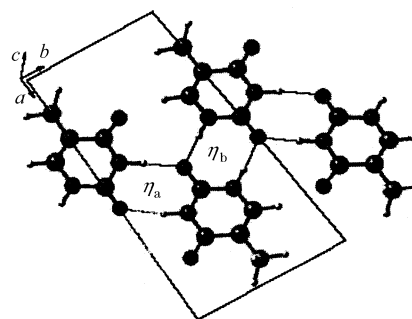


Fig. 6 Arrangement of thymine molecules in the crystalline unit cell

Dashed lines indicate the two hydrogen bond systems  $\eta_a$  and  $\eta_b$ .

图 7 是 Woolard 等<sup>[37]</sup>测得的 DNA 大分子在亚毫米波段的声子模式。证明了 DNA 大分子在亚毫米波段的长波部分(1~30  $\text{cm}^{-1}$ )存在多次介电共振。这些共振取决于生物聚合物的集体介电特性和原子间作用。吸收特性显示了所研究的特定 DNA 序列的内部特征,对照不同 DNA 样品吸收光谱可以看出单一序列存在大量模式和能级。

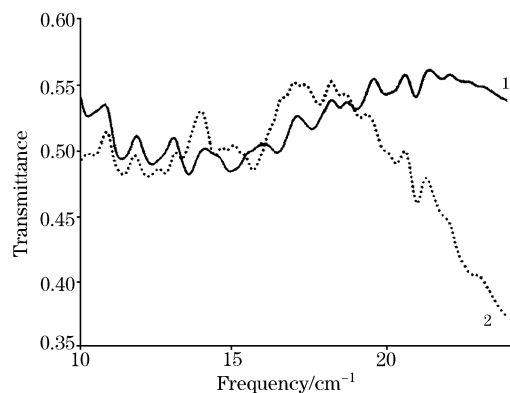


Fig. 7 Transmission spectra of herring and salmon DNA film in THz band

1, H DNA; 2, S DNA

Shen 等<sup>[38]</sup>在 4~290 K 之间研究了多晶的嘌呤和腺嘌呤的振动谱。在 0.2~3 THz 频段发现了很多吸收峰。这是由于分子间氢键的振动造成的,由此看出分子间的氢键能反映整个分子的构象。低温时,吸收峰变窄,且向高频方向移动。

Kutteruf 等<sup>[39]</sup>使用 THz 时域光谱和中子谱研究了二肽和三肽,并对结果做了比较。发现在 298 K 温度下对 THz 波有明显的吸收,在 77 K 时吸收增强,但吸收峰的个数并没有增加。证明 THz 光谱可以用来探测短肽的固态结构及其顺序信息。

### 3.2 无标记基因识别

利用 THz 辐射进行基因监测也是一项具有深刻意义的研究工作。常规的基因检测需要事先用荧光标记一条 DNA 链来检测与之配对的核苷酸序列以识别基因。加入荧光标记分子不仅使基因分析变得复杂,而且使 DNA 链的结构产生变化,从而降低了基因检测的效率。理论计算得出在 THz 频段存在大量的 DNA 分子主链间激发的本征共振(例如,螺旋式扭曲,氢键振动,碱基漂移振动模等)。利用 THz 时域光谱技术进行 DNA 束缚态的基因识别无需作荧光标记,表现出了奇特的潜能。

在利用 THz 时域谱技术进行 DNA 无标记探测方面,Brucherseife 等<sup>[40]</sup>对多聚核苷酸进行了时间分辨的 THz 吸收光谱分析,证实复数折射率取决于 DNA 分子的结合态(单链或双链 DNA),这一发现的重要性在于通过对 THz 瞬态谱的分析推断寡核苷酸和多聚核苷酸的结合态,从而为基因分析提供了一种新的手段。通过研究 DNA 束缚态与其在 THz 频段的复折射率之间的相互影响,提出了新的无标记基因探测方法。THz 时域光谱探测结果表明杂化(双链)DNA 薄膜和变性的(单链)DNA 分子对应物的 THz 透射光谱有明显不同,杂化 DNA 具有较高的折射率和吸收。为了减少实验中所需要的 DNA 分子的数目,得到可靠的信号响应,他

们提出了引导 THz 波的方法来控制 DNA 分子的束缚态。利用薄膜微带线引导平面的 THz 信号通过 DNA 薄膜,大大增加了 DNA 与 THz 波相互作用的长度,与自由空间时域光谱的办法相比减少 DNA 材料需求量,提高了探测灵敏度,并为集成 THz 基因芯片开辟了道路。进一步提高测量精度的方法是将无源 THz 共振结构与波导相结合,放大被测 DNA 束缚态在某一共振频率的 THz 透射信号,这样能够探测  $10^{-15}$  mol 量级的微量样品,分辨单个碱基对的变异。图 8 ( $|S_{21}|$  表示传输系数)是采用波导结构的无标记 DNA 分析结果<sup>[41-43]</sup>。

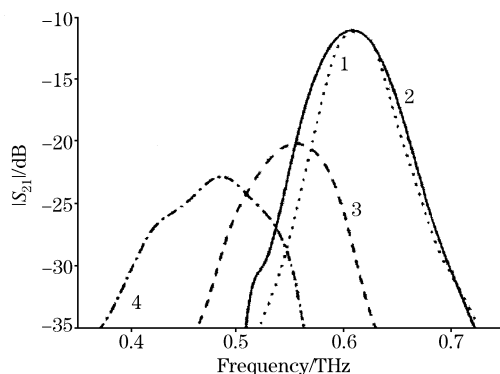


Fig. 8 A label-free approach for the analysis of genetic material with THz waves through waveguide

1, Unloaded filter (simulation); 2, Unloaded filter;  
3, with denatured DNA; 4, with hybridized DNA

## 4 发展前景及展望

与已经成熟的光谱技术相比,研究生物分子体系在 THz 波段的光谱刚刚起步,在蛋白质等大分子指纹谱的获得,生物实现其生理功能时可能产生的构形和构象变化的探测,生物芯片的无标记读出,分子反应的无标记测量等研究中已经取得了初步成果。在测量 DNA 螺旋运动和碱基对之间氢键的动力学方面,THz 时域光谱技术是很有发展前途的。研究短链 DNA 低聚物固体样品和获得生物低聚物构型改变时的 THz 吸收光谱都是很好的发展方向。但就目前该领域的发展,特别是 THz 辐射与生物样品的相互作用来看,从光谱分析到实验数据的理解和相关理论模型的建立及模拟计算,均有大量工作要做。这一领域的研究和应用前景,取决于物理学和生物学及生命科学等交叉研究所达到的广度和深度。可以预见,随着高分辨 THz 光谱的发展,生物大分子的行为将会得到全面的阐述。因此,如果我想要得到生物分子的更精确、更丰富的信息,必须要做大量的实验工作。THz 辐射将如同可见光学和微波波段的辐射一样,会给人类社会的许多方面带来巨大的影响。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Griffiths P R, de Haseth J A. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. New York: Jone Wiley, 1986.
- [ 2 ] Auston D H, Cheung K P, Smith P R. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, 45(3): 284.
- [ 3 ] Côté D, Fraser J M, DeCamp M, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(25): 3959.
- [ 4 ] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(11): 1011.
- [ 5 ] Hu B B, Darrow J T, Zhang X C, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(10): 886.
- [ 6 ] Xu L, Zhang X C, Auston D H. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 61(15): 1784.
- [ 7 ] Wu Q, Zhang X C. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(24): 3523.
- [ 8 ] Nahata A, Auston D H, Heinz T F, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(2): 150.
- [ 9 ] Winnewisser C, Jepsen P Uhd, Schall M, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(23): 3069.
- [ 10 ] Mittleman D M, Neelamani R, Jacobsen R H, et al. *Appl. Phys. B.*, 1998, 67: 379.
- [ 11 ] Kindt J T, Schmuttenmaer C A. *J. Phys. Chem.*, 1996, 100(24): 10373.
- [ 12 ] Cecilie Ronne, Soren Rud Keiding. *Journal of Molecular Liquids*, 2002, 101(1-3): 199.
- [ 13 ] Thrane L, Jacobsen R H, Jepsen P Uhd, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 1995, 240(4): 330.
- [ 14 ] Cook D J, Decker B K, Dadusc G, et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2004, 5268: 36.
- [ 15 ] Turchinovich D, Knobloch P, Luessem G, et al. *Proc. SPIE. Int. Soc. Opt. Eng.*, 2001, 4463: 65.
- [ 16 ] Wittlin A, Genzel L, Kremer F, et al. *Phys. Rev. A.*, 1986, 34: 493.
- [ 17 ] Genzel L, Powell J W, Wittlin A, et al. *Ferroelectrics*, 1988, 86: 301.
- [ 18 ] Zhuang W, Feng Y, Prohofsky E W. *Phys. Rev. A.*, 1990, 41: 7033.
- [ 19 ] DeFonzo A P, Lutz C R. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(4): 212.
- [ 20 ] Fattering Ch, Grischkowsky D. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(6): 490.
- [ 21 ] Weling A S, Hu B B, Froberg N M, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(2): 137.
- [ 22 ] Hu B B, Zhang X C, Auston D H, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(6): 506.
- [ 23 ] You D, Jones R R, Bucksbaum P H, et al. *Opt. Lett.*, 1993, 18(4): 290.
- [ 24 ] Joffre M, Bonvalet A, Migus A, et al. *Opt. Lett.*, 1996, 21(13): 964.
- [ 25 ] Van Exter M, Grischkowsky D R. *IEEE Trans., Microwave Theory and Tech.*, 1990, 38(11): 1684.
- [ 26 ] Wu Q, Zhang X C. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(12): 1604.
- [ 27 ] Wu Q, Litz M, Zhang X C. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(21): 2924.
- [ 28 ] Wu Q, Zhang X C. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(14): 1784.
- [ 29 ] Jepsen P Uhd, Winnewisser C, Schall M, et al. *Phys. Rev. E*, 1996, 53: R3052.
- [ 30 ] Cai Y, Brener I, J Lopata, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(4): 444.
- [ 31 ] Wu Q, Zhang X C. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(10): 1285.
- [ 32 ] Leitensdorfer A, Hunsche S, Shah J, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82: 5140.
- [ 33 ] Wittlin A, Genzel L, Kremer F, et al. *Phys. Rev. A*, 1986, 34(1): 493.
- [ 34 ] Saxena V K, Van Zandt L L, Schroll W K. *Phys. Rev. A*, 1989, 39(3-1): 1474.
- [ 35 ] Markelz A G, Roitberg A, Heilweil E J. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, 320(2-1): 42.
- [ 36 ] Fischer B M, Walther M, Jepsen P Uhd. *Phys. Med. Biol.*, 2002, 47: 3807.
- [ 37 ] Woolard D L, Globus T R, Gelmont B L, et al. *Phys. Rev. E.*, 2002, 65: 051903.
- [ 38 ] Shen Y C, Upadhyya P C, Linfield E H, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(14): 2350.
- [ 39 ] Kutteruf M R, Brown C M, Iwaki L K, et al. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, 375(3-4): 337.
- [ 40 ] Brucherseifer M, Nagel M, Bolivar P H, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(24): 4049.
- [ 41 ] Nagel M, Bolivar P H, Brucherseifer M, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(1): 154.
- [ 42 ] Michael Nagel, Bolivar P Haring, Brucherseifer M, et al. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 2074.
- [ 43 ] Bolivar Haring P, Brucherseifer M, Nagel M, et al. *Phys. Med. Biol.*, 2002, 47: 3815.

# Applications of Terahertz Pulse in the DNA Molecule

WANG Xiao-hong, ZHANG Liang-liang, HU Ying\*, ZHANG Cun-lin  
Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China

**Abstract** Terahertz (THz) radiation is a newly developed coherent far infrared source, which has been applied in many research fields, especially medical application and biological application. In the present paper, the mechanism and methods of its generation and detection are introduced. The properties and its uniqueness in applications to biological researches and DNA molecular spectroscopy are discussed. A brief review is given to the latest progress in THz spectroscopy of DNA samples, and the prospect of the research in this cross-discipline is presented.

**Keywords** THz radiation; DNA; Spectroscopy; Refractive index; Absorption coefficient

(Received May 20, 2005; accepted Aug. 21, 2005)

\* Corresponding author

## 中国光学学会 2006 年学术大会 2006 General Congress of Chinese Optical Society

会议时间: 2006 年 9 月 3~5 日

会议地点: 中国·广州

主办单位: 中国光学学会

承办单位: 华南师范大学, 广东省光学学会

展馆地点: 中国·深圳 (2006 年 9 月 6~9 日)

协办单位: 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 广州光学学会, 深圳光学学会, 中国光学学会国际会议展览工作委员会, 中国国际光电博览会(深圳), 广州光学光电子行业协会, 深圳光学光电子行业协会

会议宗旨:

两年一次的中国光学学会年会, 将于 2006 年 9 月 3~5 日在广州举行。由华南师范大学和广东省光学学会具体承办。本次会议将总结交流我国光学、光子学和工程光学领域的最新成果, 展望 21 世纪的发展方向, 为新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台, 促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议将与光学、光电子新技术和新产品大型国际展览会——中国国际光电博览会及中国光电产业高级论坛同期举行。

会议名誉主席: 王大珩(中国科学院)

会议主席: 母国光(南开大学)

节目委员会主席: 金国藩(清华大学)

组织委员会主席: 刘颂豪(华南师范大学)

大会秘书长: 邢 达(华南师范大学)

大会安排 15 个专题会议(分会场):

1. 量子光学与非线性光学, 2. 生物与医学光学, 3. 激光物理与技术, 4. 光学功能材料, 5. 集成光子学与光纤光学, 6. 光通信与光传感, 7. 光学存储与光全息, 8. 工程光学与光学制造, 9. 光电技术与系统, 10. 光学薄膜技术, 11. 超快光学, 12. 光学微系统与微纳米技术, 13. 颜色光学、眼(科)光学和仪器, 14. 激光加工技术, 15. 光学教学研究, 会议论文提交截至时间: 2006 年 6 月 15 日(论文提交请见会议网站及第二轮通知)

承办单位地址: 广州市华南师范大学信息光电子科技学院

邮政编码: 510631

电话: +86-020-39310309, +86-020-85216848 传真: +86-020-39310311

联系人: 崔红丽, 罗爱平

电子邮箱: guangd@scnu.edu.cn (崔红丽), luoaiping2003@126.com (罗爱平)

本会议建立了会议网页, 网址为: <http://laser.scnu.edu.cn/final/index2.htm>。敬请大家访问浏览, 了解会议细节和相关的最新信息。