



Title	テラヘルツ周波数コムを用いた精密テラヘルツ分光法に関する研究
Author(s)	謝, 宜達
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/34510">https://doi.org/10.18910/34510</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名 ( 謝宜達 )																					
論文題名	テラヘルツ周波数コムを用いた精密テラヘルツ分光法に関する研究																				
論文内容の要旨																					
研究目的																					
<p>テラヘルツ (THz)領域 (周波数: 0.1~10THz, 波長: 30~3000μm) は、気体分子の回転遷移に伴う吸収線スペクトルが現れる特徴的な周波数帯である。近年、揮発性有機化合物 (VOC) ガスを始めとした大気環境の重大問題を解明する上で、大気の化学組成を知りその生成消滅に関わる多様な化学反応を追跡可能なTHz分光法が注目されている。THz領域にひしめきあうように存在する気体分子の回転遷移スペクトルを詳細に識別し定量するためには、高スペクトル確度、高スペクトル分解能および広スペクトル帯域が望まれるが、従来法でこれらを同時に満たすことは困難であった。本研究では、VOSガス分析に利用可能な精密THz分光を実現するため、①非同期光サンプリング式THz時間領域分光法 (ASOPS-THz-TDS) 、②THzコム分光法、③ギャップレスTHzコム分光法という三種のTHz分光法に関する研究を行った。</p>																					
研究結果 :																					
<p>従来のTHz-TDSでは、機械式時間遅延走査に基づいて時間波形を取得していたため、スペクトル分解能向上と測定時間短縮はトレードオフの関係にあり、スペクトル確度も低い。そこで、繰り返し周波数のわずかに異なるように制御された2台のフェムト秒レーザーをTHzパルス発生及び検出に用いることにより、機械式時間遅延走査を用いずにTHzパルス電場時間波形の高速・高精度取得が可能なASOPS-THz-TDSを開発した。これにより、測定時間窓をパルス周期まで拡大し、そのフーリエ変換により、繰り返し周波数にはほぼ等しいスペクトル分解 (<math>=50.5\text{MHz}</math>) とスペクトル確度 (<math>=6.2 \times 10^{-6}</math>) を達成した。</p>																					
<p>次に、ASOPS-THz-TDSよりも更にスペクトル分解能を向上させるため、THzコムを基準としたTHz分光法を開発した。THzコムを取得するためには、THzパルス列の電場時間波形を取得し、フーリエ変換する必要があるが、従来の機械式時間遅延走査ではTHzパルス列の電場波形取得に必要な測定時間窓を確保するのが不可能である。そこで、ASOPS-THz-TDSの測定時間窓を従来の1周期から100周期まで拡大することにより、繰り返し周波数 (<math>=250\text{MHz}</math>) の1/100 (<math>=2.5\text{MHz}</math>) に等しい線幅を有するTHzコム・モードがTHz分光に利用可能となった。</p>																					
<p>THzコム分光法により、THzコム・モード線幅を利用した精密THz分光が可能になったが、これをこのまま広帯域THz分光に用いると、離散スペクトル分布のため、スペクトルのサンプリング間隔はコム間隔 (<math>=</math>繰り返し周波数=<math>250\text{MHz}</math>) と等しくなり、スペクトル確度が制限される。この制限を解消するため、THzコム間隔を逐次周波数走査することにより、コムモード間の間隙部を補完し、THzコムのギャップレス化を行った。その結果、THzコム分光におけるコム・ギャップという本質的問題を解消し、スペクトル分解能<math>2.5\text{MHz}</math>とスペクトル確度<math>8.5 \times 10^{-7}</math>を達成した。</p>																					
<p>まとめとして、VOCガス分析に求められるTHz分光性能と開発した精密THz分光法の性能の比較を表1に示す。本研究により、VOCガス分析にも利用可能な精密THz分光法が実現できたので、今後はより現実的なTHz分光応用に利用する予定である。</p>																					
表1 性能比較																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>分解能</th><th>確度</th><th>帯域</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>大気ガス分光</td><td>数MHz</td><td><math>10^{-6}</math></td><td>2~3THz</td></tr> <tr> <td>ASOPS-THz-TDS</td><td>52MHz</td><td><math>6.2 \times 10^{-6}</math></td><td>2THz</td></tr> <tr> <td>THzコム分光法</td><td>2.5MHz</td><td><math>10^{-4}</math></td><td>2THz</td></tr> <tr> <td>ギャップレスTHzコム分光法</td><td>2.5MHz</td><td><math>8.5 \times 10^{-7}</math></td><td>2THz</td></tr> </tbody> </table>			分解能	確度	帯域	大気ガス分光	数MHz	$10^{-6}$	2~3THz	ASOPS-THz-TDS	52MHz	$6.2 \times 10^{-6}$	2THz	THzコム分光法	2.5MHz	$10^{-4}$	2THz	ギャップレスTHzコム分光法	2.5MHz	$8.5 \times 10^{-7}$	2THz
	分解能	確度	帯域																		
大気ガス分光	数MHz	$10^{-6}$	2~3THz																		
ASOPS-THz-TDS	52MHz	$6.2 \times 10^{-6}$	2THz																		
THzコム分光法	2.5MHz	$10^{-4}$	2THz																		
ギャップレスTHzコム分光法	2.5MHz	$8.5 \times 10^{-7}$	2THz																		

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 謝宜達 )		
	(職)	氏名
論文審査担当者	主査 教授	荒木 勉
	副査 教授	大城 理
	副査 教授	芦田 昌明
	副査 教授	安井 武史

## 論文審査の結果の要旨

近年、揮発性有機化合物ガス(VOSガス)を始めとした大気環境の重大問題を解明する上で、大気の化学組成を知りその生成消滅に関わる多様な化学反応を追跡可能なTHz分光法が注目されている。テラヘルツ(THz)領域にひしめきあうように存在する気体分子回転遷移スペクトルを詳細に識別し定量するためには、高スペクトル確度、高スペクトル分解能および広スペクトル帯域が望まれるが、従来法でこれらを同時に満たすことは困難であった。そこで、VOSガス分析に利用可能な精密THz分光を実現するため、非同期光サンプリング式THz時間領域分光法(ASOPS-THz-TDS)、THzコム分光法、ギャップレスTHzコム分光法という3種のTHz分光法に着目し、これらに関する研究を行った。

従来のTHz-TDSでは、機械式時間遅延走査に基づいて時間波形を取得していたため、スペクトル分解能向上と測定時間短縮はトレードオフの関係にあり、スペクトル確度も低い。そこで、繰り返し周波数がわずかに異なるように制御された2台のフェムト秒レーザーをTHzパルス発生及び検出に用いでることで、機械式時間遅延走査を用いずにTHzパルス電場時間波形の高速・高精度取得が可能なASOPS-THz-TDSを開発した。その結果、測定時間窓をパルス周期まで拡大し、フーリエ変換により、繰り返し周波数にほぼ等しいスペクトル分解( $=52\text{MHz}$ )とスペクトル確度( $=6.2 \times 10^{-6}$ )を達成した。

次に、ASOPS-THz-TDSよりも更にスペクトル分解能を向上させるため、THzコムを基準としたTHz分光法を開発した。THzコムでは、広帯域選択性、高いスペクトル純度、周波数倍機能という特徴があるので、原子時計を基準としてモード同期周波数を安定化制御すれば、THzコムをTHz分光計測における超精密周波数目盛りとして利用できる。本研究では、ASOPS-THz-TDSの測定時間窓を従来の1周期から100周期まで拡大することにより、繰り返し周波数250MHzの1/100( $=2.5\text{MHz}$ )に等しい線幅を有するTHzコム・モードがTHz分光において利用可能となった。

THzコム分光法によってTHzコム・モード線幅を利用した精密THz分光が可能になったが、THzコム分光法ではスペクトルのサンプリング間隔であるモード同期周波数がスペクトル確度を制限する。この制限を解消するため、THzコム間隔を逐次周波数走査することにより、コムモード間の間隙部を補完し、THzコムのギャップレス化を行った。その結果、THzコム分光におけるコム・ギャップという本質的問題を解消し、スペクトル分解能 $2.5\text{MHz}$ とスペクトル確度 $8.5 \times 10^{-7}$ を達成した。

以上、本研究で得られた成果の工学的意義は大きく、また学術的にも高いレベルの内容を有しているため、博士(工学)の学位論文として価値のあるものと認める。