

パルス波による時間領域分光法、  
連続波発振器や検出器の開発、応用事例など

## テラヘルツ波技術開発のあらまし

寶迫 巖  
Iwao Hosako

### ■ テラヘルツ波とは

図1に電波の周波数と波長、おもな用途などを示します。

#### ● 波長による名称

現在、最も身近な電波といえば、携帯電話や電子レンジで使われている「マイクロ波」、すなわち周波数  $f \approx 3 \text{ GHz}$  (波長  $\lambda \approx 10 \text{ cm}$ ) 付近の電波でしょう。

マイクロ波帯では、携帯電話が1~2 GHz付近、電子レンジが2.4 GHz付近を利用しています。これより高い周波数で身近といえば、衛星放送で使われている12 GHz帯の電波でしょう。これらは「センチメートル波」と呼ばれ、 $f \approx 30 \text{ GHz}$  ( $\lambda \approx 1 \text{ cm}$ ) の電波です。さらに高周波になると自動車に搭載され始めた衝突防止レーダで使われている76 GHz帯の「ミリ波」、すなわち  $f \approx 300 \text{ GHz}$  ( $\lambda \approx 1 \text{ mm}$ ) までの電波があります。さらに、その先はどうなっているかといえば、「サブミリ波」と呼ばれる  $f \approx 3000 \text{ GHz}$  ( $\lambda \approx 0.1 \text{ mm}$ ) までの電波があります。

#### ● 電波法による電波の上限は3 THz

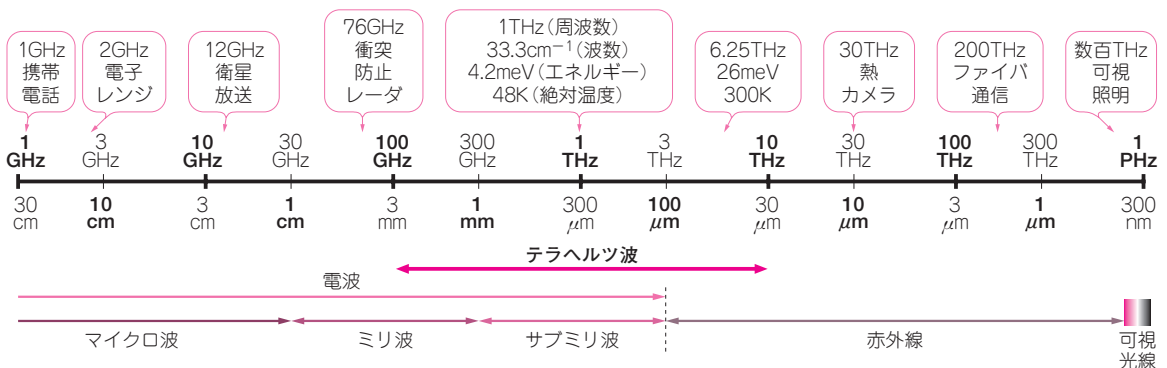
電波法では『電波』とは、三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。』と定義しており、電波の上限はサブミリ波の3000 GHz (= 3 THz;  $\lambda \approx 0.1 \text{ mm}$ ) にあります。これより高周波の電磁波は「光」と呼ばれています。

● テラヘルツ波はおよそ0.1 THz~10 THzの電波  
波長に基づく呼び方ではなく、周波数に応じた呼び方で、電波と光の両方に跨っている100GHz~10000 GHz ( $f = 0.1 \text{ THz} \sim 10 \text{ THz}$ ,  $\lambda = 3 \text{ mm} \sim 30 \mu\text{m}$ ) の2桁にわたる電磁波を近年になって「テラヘルツ波」と呼ぶようになりました。

### ■ 工学応用上で重要な分光分析技術や 科学として興味深い領域

● さまざまな物質や材料に特有のスペクトルがある  
図2を見てください。テラヘルツ波のフォトン・エネルギー (0.4 meV ~ 41 meV) は、水素結合やファンデルワールス結合のエネルギー、固体物質のさまざまな素励起、分子の回転モード、巨大分子の内部振動モード等のエネルギーに相当するため、さまざまな物質・材料がこの領域で特有のスペクトル (いわゆる指紋スペクトル) をもちます。さらに室温の熱エネルギー (26 meV @ 300 K) はテラヘルツ帯 ( $f = 6.25 \text{ THz}$  のフォトン・エネルギーに相当) にあります。生命体は、まさにテラヘルツ帯放射の中にあり、その影響を受けながら活動しています。

このような理由からテラヘルツ帯は、工学応用上、重要な分光分析技術として、また、科学として大変興味深い領域であり、古くから注目を集めていました。しかしながら技術的手段が未熟だったため、その利用は限定的であり、科学的研究や天文観測等での例があ



〈図1〉電波の波長や周波数と主な用途(テラヘルツ波は0.1~10 THz 付近の電波)

るにすぎませんでした。

## ● テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS)

近年、新しい分光手法としてテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) が開発され、非線形光学による単色チューナブルなテラヘルツ帯光源、さらに、高輝度な小型半導体光源 (テラヘルツ帯量子カスケード・レーザ) が実現したことにより、従来は科学研究だけに使われていたテラヘルツ帯電磁波を身近な分野でのさまざまな応用に利活用できる可能性が見えてきました。

これら新技術の開発に伴い、さまざまな分野 (材料分析、セキュリティ、医療、医薬、バイオ、農業、工業、通信、科学計測) での応用デモンストレーションも実施されてきています。以下では、テラヘルツ帯の光源技術、検出器技術、半導体デバイス技術、計測技術について代用的なものを示すとともに、実用化が見込まれる実施例を解説します。

## テラヘルツ帯時間領域分光法 “THz-TDS”

### ■ フェムト秒レーザを使ったテラヘルツ帯電磁波パルスの発生と計測を行う技術

超短パルス・レーザの発展は、常に最先端計測技術の発展に大きな寄与を与えてきました。発生できるパルス幅が短くなるにつれて、計測可能な最小時間単位は短くなり、1ピコ秒 ( $1\text{ ps} = 10^{-12}\text{ s}$ ) を切るようになってくると、その逆数として1 THz 程度の周波数の計測が可能となります。実際には、1 THz の波形を計測しようと思えば、その1周期の中で何点かの計測点が必要となるため、パルス幅が  $0.1\text{ ps} (= 100\text{ fs})$  程度以下のいわゆるフェムト秒レーザを使うことによって、ピコ秒の現象 (テラヘルツ帯) を計測できるようになります。

THz-TDS (Terahertz Time Domain Spectroscopy)<sup>(1)</sup> は、フェムト秒レーザを使ったテラヘルツ帯電磁波パルスの発生と計測を行う技術です。

### ■ テラヘルツ波による分光測定のおしくみ

パルス発生には、フェムト秒レーザ・パルスを半導体表面 (フォト・デンバー効果)、非線形光学結晶 (光整流効果)、半導体基板表面に形成された光伝導スイッチなどに照射して、サブピコ秒のモノサイクル・パルス電磁波を発生させます。

#### ● モノサイクル・パルス電磁波の発生器と検出器

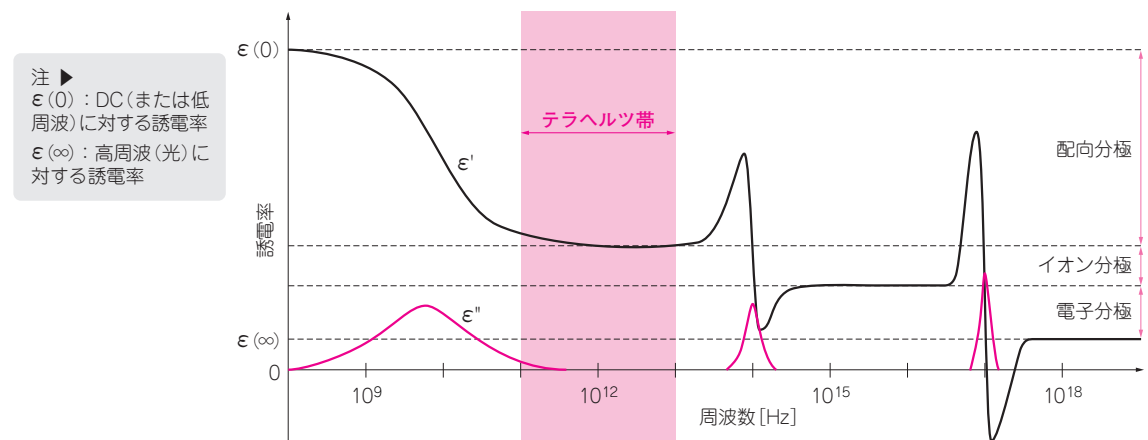
光伝導スイッチは、低温成長した砒化ガリウム (LT-GaAs) 上に、アンテナを兼ねた電極 (Au) を図3 (a) のように形成します。ギャップは  $5\text{ }\mu\text{m}$  程度です。外部電源から直流電界をギャップに加えておきます。このギャップに近赤外 (中心波長  $780\text{ nm}$  の光で GaAs のバンド・ギャップよりも大きなエネルギーを持つ) の超短パルス・レーザを照射します。照射によってキャリアが発生し、外部から加えられた電界によって加速され、電流が流れ始めます。

LT-GaAs は、キャリアの移動度が高く、寿命が短いという性質を持っているため、超短パルス・レーザが照射されている間だけ電流が流れます。電流の増減の時間微分に比例する電磁波パルスが外部空間に放射されます。

また、図3 (b) において、THz 波が入射しているときに短パルス・レーザが照射されると、その瞬間だけ電流が流れるため、THz 検出器として動作します。

#### ● 時間波形を計測しフーリエ変換して周波数成分を得る

このモノサイクル電磁波パルスには、広帯域の電磁波成分が含まれます。超短パルス・レーザの繰り返し周波数でやってくるモノサイクル電磁波パルスは、超



注 ▶  
 $\epsilon(0)$ : DC (または低周波) に対する誘電率  
 $\epsilon(\infty)$ : 高周波 (光) に対する誘電率

〈図2〉誘電率の周波数依存性

テラヘルツ帯には振動現象と緩和現象、プラズマ周波数など、さまざまな誘電現象があるため、その特徴を活かした分光分析などへの応用が期待できる。