

# 小型化に向けて進行する 周波数領域のテラヘルツシステム

ビョルン・グロービッシュ、ラーズ・リーバーマイスター、アンドレアス・ソス

新しいファイバベースのシステムは、サブミクロン精度の高速測定が可能である。次のステップは、すべての構成部品をチップサイズに集積することである。

テラヘルツ放射は非常に有益なツールである。X線とは対照的にイオン化しないが、人間の目には不透明に見える多くの物質が、電磁波スペクトルのテラヘルツ領域では透明になる。この効果が利用できる明白な用途として広く議論されてきたのが、空港セキュリティだった。しかし、最終的にボディチェック用の装置として選ばれたのは、ミリ波スキャナだった。

テラヘルツスキャンは初期段階にあるものの、薄い誘電層の正確な厚みの測定など、産業計測に対して多大な可能性を秘めている。テラヘルツスキャナは現在、自動車業界における塗料層の厚みの測定、パッケージにおける膜厚測定、不透明なブリスターパックの中のタブレットの確認に使われている。通信技術や周波数領域分光法に基づく新しいデバイスによって、この技術は高速になっており、イメージングセンサなど、さらに多くの応用分野において関心を生み出している。

産業分野にはシンプルで、多くの場合はポータブルなソリューションが必要である。例えば、防衛分野向けに開発されたレーダーは、時が経つにつれて適用機会が増加し、システムサイズは大幅に縮小された。現在、レーダーの光学版ともいえるライダー(LIDAR)は、自動運転車分野の要件の高まりにけん引されて、チップサイズの固体デバイスにまでシステムサイズが縮小さ



テラヘルツ放射を利用して膜厚測定を行うマルチセンサヘッド。(画像提供: 独ヘルムート・フィッシャー社 [Helmut Fischer GmbH])

れている。

テラヘルツ技術も、似たような経路をたどっている。小型で高速で安価でなければならず、可動部品をなくす必要があることから、レーダーやライダーで学んだ教訓が、テラヘルツ技術の開発に役立つ可能性があると考えられる。

これまで、テラヘルツ放射の生成と検出が、より幅広い分野での利用を阻む主な障害だった。ジャイロトロンやシンクロトロンなどのシステムは大きすぎる。その他のソリューションには、繊細な可動要素を備えた複雑な光学システムが必要になる。この問題は40年前から議論されているが、これまでのところ、ほとんどのソリューションが産業分野には適していない。

この20年間で、コンパクトなフェム

ト秒ファイバレーザの発明によって、超高速フォトスイッチを利用した、ファイバ結合のパルステラヘルツシステムの開発が促進された。ポリマー、塗料やコーティング、医薬品、電子部品、石油化学製品、ガス、紙、木材など、さまざまな材料の測定に対するそのメリットが、科学文献で論じられている<sup>(1)</sup>。そうしたシステムにおいてフェムト秒レーザパルスは、バイアスを印加した感光性半導体に非常に短い電流を生成するために使用される。これによって、帯域幅が6THz以上という広帯域のテラヘルツパルスの生成が可能になるのである。

テラヘルツ検出は、その逆のプロセスで行われるため、元の超短レーザパルスを複製したものがもう1つ必要にな

る。そこで、複雑なレーザシステムと可動光学素子を使用して、2つのフェムト秒パルスに必要な時間遅延を加える(図1)。この方法で、数ミクロンの分解能の多層膜厚測定が可能である。

## 通信用部品に基づくコンパクトなレーザ源

独フラウンホーファー・ハインリッヒ・ヘルツ通信技術研究所(Fraunhofer Heinrich Hertz Institute)の科学者らによって開発された、新しいテラヘルツシステムは、複雑なフェムト秒パルス源の代わりに、シンプルな連続波(Continuous Wave: CW)レーザを使用する。2つの既製品の通信用レーザを使用し、一方は固定周波数のもの、もう一方は掃引レーザ源である。後者は変調格子Y分岐レーザで、2つのマルチピークのリフレクタによってバーニア(Vernier)効果を利用し、1530~1565nmというCバンドの通信帯域全体にわたって、広い周波数チューニングを達成する。固定周波数レーザでミキシングすることにより、可動部品なしで、約0.1~3THz以上までの周波数範囲をカバーすることができる。

図2は、システムアーキテクチャと測定構成を示した図である。最初の要素は、固定周波数レーザと掃引レーザである。両方のレーザ信号がファイバ結合器で重畳され、標準的なエルビウム添加ファイバ増幅器(Erbium Doped Fiber Amplifier: EDFA)で増幅される。混合信号には、2つの入力信号のビート周波数(差周波数)が含まれる。この光学ビートノートが、フォトダイオードによってテラヘルツ放射に変換される。フォトダイオードは、もともとは高速光ファイバ通信リンク用に開発されて、商用利用されているものである。放射されるテラヘルツ信

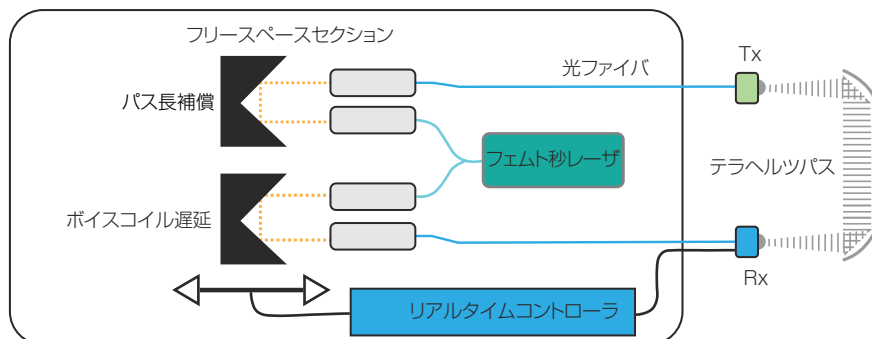


図1 テラヘルツ時間領域(TDS)測定の代表的な構成。Txはテラヘルツエミッタ、Rxはテラヘルツレシーバーを表す。

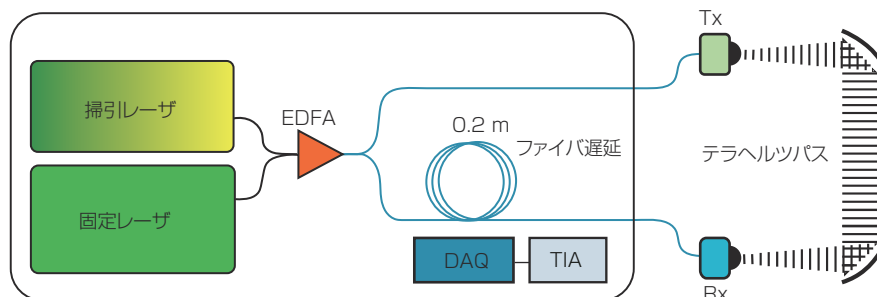


図2 シンプルなCWテラヘルツシステムの光/電気信号パス(Txは生成、Rxは検出)。高速周波数掃引を、レーザーアームの0.2mのファイバ遅延と組み合わせることにより、中間周波数(IF)のレーザー信号が得られ、これがTIAによって電氣的に増幅され、DAQによってデジタル変換される。IF信号には、測定されたテラヘルツ波の振幅と位相の両方の情報が含まれる(左)。テラヘルツ源と分光計(灰色のラック)の構成の写真も示されており、反射測定用のセンサヘッドが前に示されている(右)。被検物は、ベルリンの代表的なお土産である小さな緑色のアンペルマン(ドイツの信号機キャラクター)である。

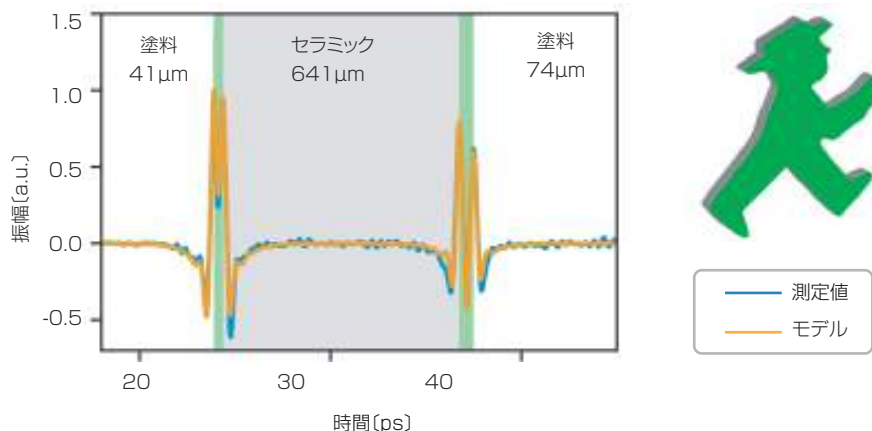


図3 時間領域測定に基づく、3層構造のToF測定(右上は緑色のアンペルマン)。

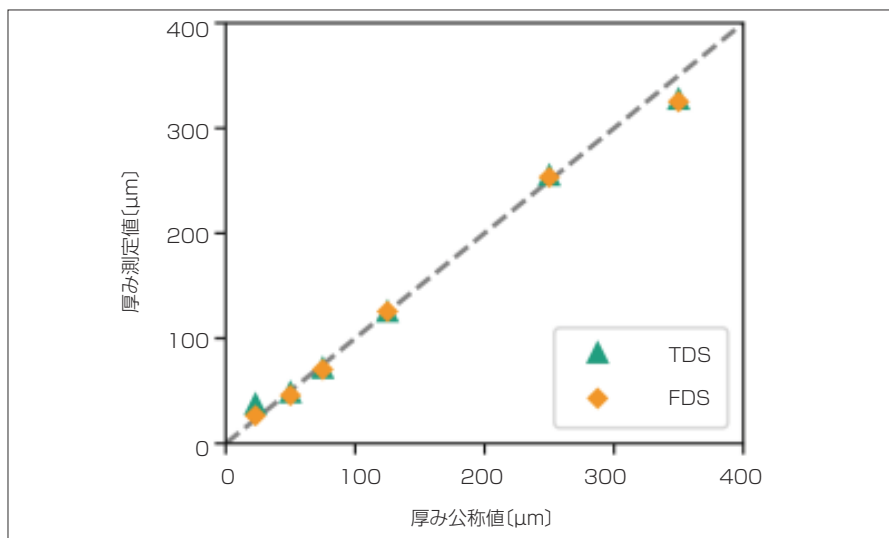


図4 カプトン膜とPET膜のTDS及びFDSテラヘルツ測定と比較。

号は、2つのパラボリックミラーによってエミッタからレシーバーへと導かれる。レシーバーは、入力されたテラヘルツ信号と、2つめの光学アームのビートノートを、ミキシングして中間周波数に変換する。

測定信号は(トランスインピーダンスアンプ[TIA]によって)増幅され、データアキュイジションユニット(DAQ)によって、掃引レーザのサンプルとサイクリングトリガとともにデジタル変換される。この方法により、この構成では2つの入力レーザのうちの1つの周

波数を掃引するだけで、広いテラヘルツ周波数範囲を記録することができる。分光計はUSBを介してPCに接続される。このシステムは完全にファイバに結合されており、可動部品を一切含まない。唯一のフリースペース光学部品は、非接触型のセンサヘッドである。この構成と測定の詳細については、科学文献を参照してほしい<sup>(2)</sup>。

このシステムは、オプトエレクトロニクスの周波数変調連続波(Frequency Modulated Continuous Wave : FMCW)のテラヘルツ分光法に基づい

ていることに言及しておかなければならない。レーダーでは一般的に採用されているこの方法だが、テラヘルツ分光法に適用されたのはこれが初めてである。掃引して遅延させたレーザ信号が、位相検波用の自己ヘテロダイン機構において使用されている。この方法により、テラヘルツ信号の振幅と位相をソフトウェアベースのロックイン検出によって復元することができる。これまでの概念とは対照的に、この機構に位相変調器は不要である。従って、アーキテクチャは簡素化され、速度は高まり、CWテラヘルツ分光計によってノイズ源が追加されることはない。FMCW分光計の詳細に関する論文は、Nature Communications誌に最近掲載されている<sup>(3)</sup>。

### 周波数領域と時間領域の測定の比較

テラヘルツ膜厚測定を行うための最も明白な方法は、時間領域のものである(TDS)。ピコ秒未満のテラヘルツパルスが被検面に送信すると、反射信号のピークのシーケンスによって厚み情報が示される(図3)。これは、超短レーザパルス(フェムト秒からピコ秒)に基づく測定の一般的な方法である。図1は、テラヘルツの生成と検出の両方にレーザパルスを必要とする、実際の構成を示している。可変の光学遅延ラインと関連手法を使用して、ポイント単位でグラフが記録されることに注意してほしい。当然ながら、測定ごとに複数の部品を正確に動かすことが必要になる。

周波数領域分光法(Frequency Domain Spectroscopy : FDS)に基づくテラヘルツ測定では、反射スペクトルの位相と振幅が記録される。フーリエ変換によって時間領域信号が計算され、

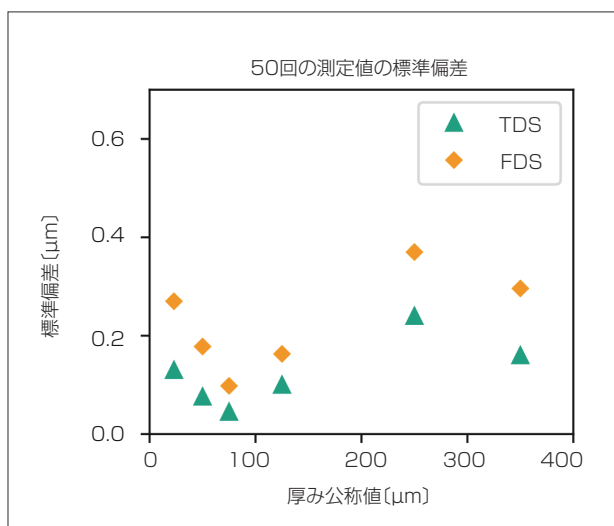


図5 TDSとFDSによる測定の精度を、同じサンプルを50回連続で測定した結果の標準偏差で表した様子。

図3に示すようにToF (Time of Flight) に似たアプローチで、データから膜厚を再構築することができる。システムの分解能は、分光計の周波数分解能と帯域幅という2つのパラメータによって決まる。帯域幅が広いほど、時間分解能が高くなるため、膜厚測定の精度は高くなる。

### サブミクロン精度を達成する テラヘルツFDS測定

TDSとFDSの手法を直接比較するために、同じ測定ヘッドを使用し、テラヘルツ源だけを入れ替えた構成を採用した。厚さ50~75 $\mu\text{m}$ の単層のカプトン (Kapton) 膜と、厚さ23~350 $\mu\text{m}$ のPET膜を使用して、実験を行った。どちらの方法でも、技術的限界までの膜厚が測定可能であることを示す結果が得られた(図4)。

実測値に差異が出るのは、膜厚の実際のばらつきと、FDSとTDSで測定位置が異なっていることに起因している。各サンプルを50回測定した結果の標準偏差は、TDSとFDSで0.5 $\mu\text{m}$ 未満であることに注意してほしい(図5)。ポータブルなFDSシステムでこのレベルの精度が得られたのは、これが初めてである。

テラヘルツ測定の実際のメリットの1つは、多層構造の個々の層の厚みが判定できることである。表は、そのような試験の結果を示したものである。被検物は、図3に示したアンベルマンで、表面と裏面がスプレーで色付けされたセラミックコアでできている。FDSとTDSの分光法による実測値は、互いに少し異なる。サンプルのまったく同じ位置で測定を行うことができなかつたためである。しかし、表面では1 $\mu\text{m}$ 未満の精度が得られ、裏面ではFDSの場合でそれよりも少し大きな誤

表 TDSとFDSのテラヘルツ手法を用いた、3層サンプルの膜厚測定結果

3層サンプル	TDS	FDS
40 $\mu\text{m}$ のスプレー塗料(表面)	44.4 $\pm$ 0.2 $\mu\text{m}$	42.5 $\pm$ 0.8 $\mu\text{m}$
600 $\mu\text{m}$ のセラミック基板	617.5 $\pm$ 0.1 $\mu\text{m}$	641.3 $\pm$ 0.6 $\mu\text{m}$
75 $\mu\text{m}$ のスプレー塗料(裏面)	73.1 $\pm$ 0.6 $\mu\text{m}$	74.4 $\pm$ 1.3 $\mu\text{m}$

差が出た。それでもその誤差は、物質の技術的偏差よりもはるかに小さい。

### 3Dテラヘルツ測定に向けた 取り組み

今回の測定に使ったシステムは、個別の部品を組み合わせて構成されている。通信分野で行われているように、それらの部品のすべて、すなわちシステム全体を、集積光学部品として実装することができる。このような小型化は、システムサイズを10分の1未満に縮小するだけでなく、測定システムの生産規模の大幅な拡大を可能にする。

新しいFDSテラヘルツ測定システムの小型化と集積化は、欧州連合(Euro-

pean Union : EU) の助成を受けて継続中のプロジェクト「TeraWay」(ict-teraway.eu) で進められている。レーザ源と増幅器の両方を、単一の光集積回路 (Photonic Integrated Circuit : PIC) に完全に統合することが、その目的である。システム全体がチップサイズに縮小されれば、自動生産と大幅なコスト削減が可能になる可能性がある。また、イメージングなどの分野において、並列化が可能になる可能性もある。これは、3D測定の可能性を示しているといえる。すべての光学的な位相情報が記録され、それもレーザやライダ技術でこれまでに達成された状況と似ているためである。

#### 参考文献

- (1) M. Naftaly, N. Vieweg, and A. Deninger, *Sensors*, 19, 4203 (2019); <https://doi.org/10.3390/s19194203>.
- (2) L. Liebermeister et al., *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 40, 288-296 (2019); <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0563-6>.
- (3) L. Liebermeister et al., *Nat. Commun.* (2021); <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21260-x>.

#### 著者紹介

ビヨルン・グロービッシュ (Björn Globisch) は、ベルリン工科大 (Technical University Berlin) の物理学教授であり、独フラウンホーファー通信研究所 (Fraunhofer Institute for Telecommunications : Fraunhofer HHI) のテラヘルツセンサ及びシステム研究グループの責任者である。ラーズ・リーパーマイスター (Lars Liebermeister) は、フラウンホーファー HHI のテラヘルツシステム開発担当プロジェクトマネージャー兼主席サイエンティスト。アンドレアス・ソス (Andreas Thoss) は、独ソスメディア (THOSS Media) 社社長で、*Laser Focus World* 誌寄稿編集者。e-mail: th@thoss-media.de URL: hhi.fraunhofer.de