

キロヘルツレベルの測定レートを備える、産業グレードのテラヘルツ時間領域分光システム

ニコ・フィーヴェーグ、カーチャ・ダズィ

インライン厚み測定を対象とした、ECOPS (電子制御の光サンプリング) に基づく産業用テラヘルツ時間領域分光システムは、過酷な環境において、テラヘルツパルスをキロヘルツレベルの速度で測定する。

インライン厚み測定は現在、テラヘルツ光学技術の最も有望な産業用途の1つである。このニーズに応えるべく、独トプティカフォトンクス社 (TOP TICA Photonics) は、電子制御の光サンプリング (electronically controlled optical sampling: ECOPS) に基づくテラヘルツ時間領域システムを開発した。過酷な産業環境においてもインライン測定を可能にするため、テラヘルツパルスをキロヘルツレベルの速度で測定するように設計されている。

テラヘルツ時間領域分光 (Time-Domain Spectroscopy: TDS) システムを用いた非破壊的な厚み測定は、産業品質管理、コスト管理、プロセス監視において、ますます重要な役割を担っている。有望な応用分野としては、ポリマー部品の押出成形時のインライン制

御や、多層スタック内の塗料層やコーティング層の分析などがある⁽¹⁾。

この技術の基礎が築かれたのは1990年代だが、テラヘルツシステムの有用性が発揮される場合は、長年にわたって研究施設のみに限られてきた。最大の理由は単純に、産業用途に耐える成熟度に欠けていたためである。例えば、コストは法外に高く、装置サイズは大きく、堅牢性に欠け、信号品質に制約があり、一部のプラットフォームからの測定速度は不十分だった。加えて、超音波センサやX線装置など、安価で確立された代替手段が存在し、非破壊検査の市場を占有していた。産業品質管理の分野では、測定システムに高い要件が課される。例えば、15~45°Cの温度範囲と強い振動といった過酷な環境的条件に耐えつつ、マイクロメー

トルかそれ未満の分解能と、キロヘルツレベルの高いスキャンレートでの厚み測定が可能でなければならない。

テラヘルツ TDS システムは、この20年間で進歩を遂げて成熟し、今では複数の技術的アプローチが市場に提供されている。標準的な商用システムでは、フェムト秒ファイバレーザと光伝導スイッチが、テラヘルツ生成と検出に用いられる。テラヘルツパルスの時間分解検出に用いられるポンププローブ法では、レーザパルスの時間シフトコピーによってテラヘルツ波形をサンプリングするために、可変の時間遅延が必要である。この遅延の品質が、システム性能を左右する重要因子となる。従来の TDS 分光計では、機械的な遅延ラインが用いられる場合が多い。それによって非常に正確な測定が可能だが、機械的な動きが必要であるために、取得レート (1秒あたりの波形数) は、数 Hz からせいぜい 100 Hz 程度までに制限される。キロヘルツレベルの速度を達成できる特定の機械的スキャナも存在するが、遅延時間幅に制約があり、柔軟性に欠ける。また、機械的な遅延は、高精度な光学素子によって構成されており、アSEMBリのコストが高くなるだけでなく、振動や位置ずれの影響を受けやすい。

産業グレードのテラヘルツ TDS システム

上述の産業要件を満たすために、

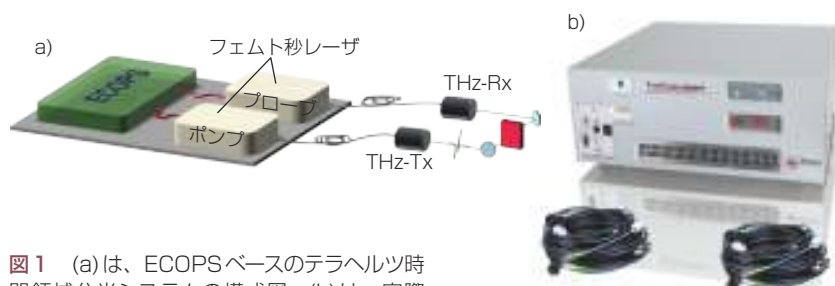


図1 (a)は、ECOPSベースのテラヘルツ時間領域分光システムの模式図。(b)は、実際の装置(トプティカフォトンクス社の「TeraFlash smart」システム)の写真。

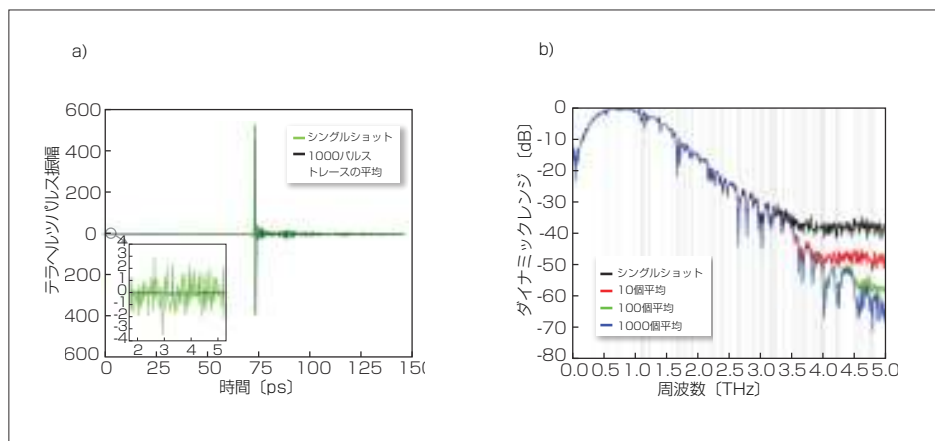


図2 (a)は、1600トレース/秒の測定速度で取得したシングルショットのテラヘルツパルストレース(緑色)と、1000個の連続パルストレースの平均値(黒色)。挿入グラフは、パルス前のノイズフロアを拡大したもの。(b)は、シングルショット測定でのテラヘルツパワーのダイナミックレンジスペクトル(黒色)と、テラヘルツパルス10個、100個、1000個の平均値(それぞれ赤色、緑色、青色)。スペクトルは、ECOPSシステムによって1600トレース/秒で取得した。灰色の縦線は、HITRANデータベースに基づく水蒸気吸収周波数を示している。

ECOPSに基づくテラヘルツTDSシステムが開発された。信号取得レートがキロヘルツレベルにまで押し上げられている⁽²⁾。このようなTDSシステムは、2つの同期されたフェムト秒レーザーを使用する(図1a)。1つのレーザーの繰り返し周波数を変調して、2つのレーザー間の可変時間遅延を精密に生成することにより、コストのかかる機械的な遅延を、位置合わせの影響を受けやすいフリービーム部品や可動部品とともに不要としている。

ECOPSにより、最大で1万波形/秒という測定レートまでもが実証されている⁽³⁾。また、ECOPSベースのシステムには、通信波長での動作による大きなメリットがある。これには信頼性の高い24時間/7日間連続の押しボタン操作に対応する、1550nmのファイバレーザーの使用と、さらに高い出力を供給する、ファイバ結合のInGaAsベースのテラヘルツアンテナの進歩が含まれる。フリースペース光学部品をファイバ光学部品に置き換え、前述のように、機械的な可動部品をフェーズロックループ電子部品(ECOPS)に置き換えることにより、過酷な条件下でも高速で信頼性の高い測定が可能になる。これにより、このシステムは現在、19インチラックにそのまま搭載

できるほどコンパクトで(図1b)、ユーザーは標準化された通信コンポーネントの低い価格と高い信頼性という両方のメリットを最大限に活用することができる。メインユニットとセンサヘッドの間の長いファイバデリバリーにより、産業品質管理設備に柔軟に組み込むことができる。また、システムは業界試験規格の他、無線とレーザー安全性に関する規制に準拠する。

このシステムの性能を示すために、図2aに、ECOPSシステムによって625 μ s以内に取得したシングルショット測定値の時間領域トレース(緑色)を、1000パルストレースの平均値(黒色)とともに示す。メインパルスはほぼ区別不可能だが、平均トレースには、ノイズフロアが著しく低減していることが示されている。これは、パルス前のバックグラウンド信号で特に顕著である(挿入グラフ参照)。シングルショット測定に対するシステムの時間領域ダイナミックレンジは50dB以上で、キロヘルツレベルの測定レートでは記録的な値となっている。

テラヘルツTDSシステムのもう1つの重要なパラメータは、スペクトル帯域幅である。図2bに示したのは、時間トレースの高速フーリエ変換によって計算された、テラヘルツパワースペ

クトルである。時間トレースは、TOPTICA ECOPSセットアップによって1600Hzで取得した。シングルショット測定において、このシステムは、38dBのピークダイナミックレンジ(PDR)を達成し、信号は3.4THzでノイズフロアに達する。スペクトルに観測されたディップ(低下している箇所)はすべて、HITRANデータベースの文献に記載されている水蒸気吸収線の値に対応している⁽⁴⁾。1000個の平均で、PDRは68dBに増加し、検出可能信号は約4.8THzにまで拡大するが、測定時間はわずか0.6s以内のみである。

具体的な用途の要件に応じて、測定レートは200~1600テラヘルツパルス/秒の間で柔軟に選択でき、スキャン範囲は700ps~150psとなる。スキャン範囲が長い場合で(700ps)、最大約7cmまでの厚み測定が可能である(反射については、屈折率1.5のサンプルを往復すると仮定する)。この柔軟性と、卓越したダイナミックレンジとSNRにより、ECOPSシステムは厚み測定の用途に非常に適している。

インライン厚み測定

テラヘルツTDSシステムは、コーティングの品質管理を含む、複数の産業用途に導入されている⁽¹⁾。厚み測定は、

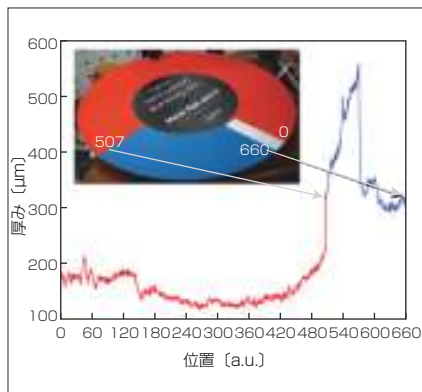


図3 ECOPSシステムが高速インライン測定に適していることを実証するために、レコードプレーヤーを使って、塗装したアルミニウム板を生産ラインに似た速度で回転させた。グラフは、その厚み測定の結果を示している。

非接触の反射測定に基づいており、片側アクセスによって生産ラインに簡単に統合することができる。厚み評価の基本原則は、サンプルの各インタフェースから部分反射したテラヘルツパルスのToF (Time of Flight)分析で、超音波のアプローチに似ている。伝達関数の逆畳み込みや数学的モデリングなどの高度なデータ分析手法によって、任意の基板上の複数層のコーティングを分析し、個々の層を区別することができる。商用システムでは、最小で5~10 μm までのコーティング厚さが測定可能で、精度は1 μm 未満、再現性は1%未満である⁽¹⁾。ただし、その測定をキロヘルツレベルの測定レートで行うには、さらに高速なスキャン手法が必要である。

ここで、高速なECOPSベースのシステムが、生産ラインにおける直接インライン厚み測定に適していることが実証されている。レコードプレーヤーを使用して、実際のベルトコンベアや押出成形ラインに似たサンプル速度を模倣した。サンプルは、アルミニウム板に手作業で塗料層を施したものである(図3の挿入図参照)。レコードプレ

ーヤーによって、1秒あたり45回転でサンプル(円周約0.86m)を回転させた。これは、板の端の横速度で約1.15m/sに相当する。ECOPSシステムの高い測定レートにより、サンプルの厚みを約0.7mmの空間分解能で評価することができる(実際の焦点サイズは考慮していない)。データ分析については、高速アルゴリズムを使用して、反射テラヘルツパルスのToF測定値から直接厚み情報を計算することで、データのリアルタイム分析を可能にした。

図3のグラフに示されているように、測定は位置0で開始し、位置660で終了する。塗料層の厚みは、マイクロメートル精度で測定され、値はおよそ130 μm ~550 μm となっている。赤い層は青い層よりも薄く、位置507における2層の間の境界で、厚みは急増加する。この測定結果は、このシステムの卓越した性能を実証している。高速なECOPSベースのシステムと、信頼性の高いインラインデータ分析の組み合わせにより、商用テラヘルツTDSシステムとして、現時点で最高速の厚み測定が達成されている⁽⁵⁾。

テラヘルツ時間領域システムは、非破壊検査市場に導入されている。最も有望な品質管理用途は、塗料やコーティングの厚み測定と、プラスチック部品の押出成形時のインライン制御である。高速テラヘルツシステムのその他の産業及び科学用途としては、イメージング、欠陥検出、分光法などがある。高速移動するサンプルの検査や、さまざまな環境的条件下での測定に、特に有効である。

テラヘルツシステム市場で成功するためのカギとなるのは、通信コンポーネントに完全に基づく、柔軟で費用対効果が高く、堅牢でコンパクトなデザインと、ECOPSという高速スキャン

手法である。システムは業界試験規格に準拠し、過酷な環境においても直ちに動作することができる。キロヘルツレベルの記録的な測定レートにおける高い信号品質により、信頼性の高い、マイクロメートル精度でのインライン厚み測定が可能である。

テラヘルツ用途では、より高速なスキャン手法とより高精度な測定システムによって、より大きな領域のサンプルをイメージングしたり、マイクロメートルレベルの厚さの層を検出したりすることが求められる傾向にある。活発に研究が行われている分野としては、テラヘルツ発振器や検出器の改良や、シングルレーザ偏光制御光サンプリング(single-laser polarization-controlled optical sampling: SLAPCOPS)⁽⁶⁾、共鳴電子制御光サンプリング(resonant electronically controlled optical sampling: RECOPS)⁽⁷⁾、時間非同期光サンプリング(timed asynchronous optical sampling: TASOPS)⁽⁸⁾といった光サンプリング手法などがある。

参考文献

- (1) M. Naftaly et al., *Sensors*, 19, 4203 (2019).
- (2) R. J. B. Dietz et al., *Opt. Lett.*, 39, 6482-6485 (2014).
- (3) M. Yahyapour et al., "Non-contact thickness measurements with terahertz pulses," Proc. 19th World Conference on Non-Destructive Testing (2016).
- (4) L. S. Rothman et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 130, 4-50 (2013).
- (5) M. Yahyapour et al., *Appl. Sci.*, 9, 1283, (2019).
- (6) M. Kolano et al., *Opt. Lett.*, 43, 1351-1354 (2018).
- (7) German Patent DE102015113355B4.
- (8) U.S. Patent US9685754B2.

著者紹介

ニコ・フィーヴェーグ(Nico Vieweg)は、独トプティカフォトニクス社(TOPTICA Photonics)のテラヘルツR&D部門ディレクター。カーチャ・ダッツィ(Katja Dutzi)は、同テラヘルツアプリケーションエンジニア。e-mail: katja.dutzi@toptica.com URL: toptica.com