

太陽電池と半導体プロセス検査に取り組む テラヘルツイメージング

マイケル・ネイジェル、サイモン・サワリック、ビョルン・グロービッシュ

フリースペースオプティクスをファイバ結合された集積コンポーネントに置き換えると、モジュラーテラヘルツ・タイムドメインイメージングシステムが実現し優れたソーラおよび半導体ウエハ解析ができるようになる。

テラヘルツ分光測定およびイメージング向けのオプトエレクトロニクスシステムは、過去10年で著しく成熟した。このトレンドの重要な原動力は、通信分野からの集積光技術利用が増えたことである。これによりコンパクトで高性能のタイムドメイン分光 (TDS) システムの構築が可能になった。

新しいテラヘルツ TDS システムでは、ファイバ結合された集積コンポーネントが分散型のフリースペースビームオプティクスを完全に置き換えた。これは、空間要件に関して優位性があることを示しているだけでなく、科学や産業アプリケーション向けに、多くの種類のシステム環境へテラヘルツ計測機能を統合しやすくしている。特に、ウエハ解析システムは、高分解能近接場イメージング向けにテラヘルツマイ

クロプローブを利用することができる。

独トプティカ・フォトニクス社 (Toptica Photonics) の TeraFlash システムは、ファイバベースのテラヘルツ TDS モジュールで、光学的・電気的集積のレベルが高い^{(1)、(2)}。ほとんどすべてのコンポーネントは、フェムト秒パルスレーザー、光時間遅延コンポーネント、データ取得と制御ユニットを含め、19 インチのラックマウント可能な筐体に収められている。唯一の外部コンポーネントは、2つのファイバ結合光伝導アンテナで、これらは TDS モジュールからの光励起によるテラヘルツ放射の生成と検出に利用されている。

商用統合

外部のテラヘルツアンテナコンポーネントと時間領域分光測定 (TDS) シス

テムとの光ファイバ/ケーブル接続によりテラヘルツテストは新たなアプリケーション環境に入っている。これは省スペースと RF 信号干渉からかなり自由になったためである。

1550nm 動作により、独プロテミクス社 (Protemics) のテラヘルツシステムはトプティカ社の TDS モジュールと PC 近接場プローブを統合している。これにより、光ファイバの信号分散を最小化し、適用する光サンプリングパルス時間幅を 100fs 以下に保っている。結果として得られたテラヘルツシステムは、わずか 20ms でフルテラヘルツタイムドメイン過渡信号を記録できる。これは多くの連続テラヘルツ計測を必要とするアプリケーションにとっては大きな利点になる。たとえばインライン品質検査、非破壊試験、ラスタスキャニングベーステラヘルツ (近接場) イメージングである。

標準的な構成は、自由空間サンプルの透過計測であり、ここではエミッタアンテナで生成されるテラヘルツ照射はコリメートされ、ファーフィールドディテクタアンテナに集光されるが、これとは対照的にプロテミクス社のファイバベーステラヘルツ TDS システムは TeraFlash 光源モジュールと Proteomics TeraCube ニアフィールドスキャニングシステムを統合している。同システムには、テラヘルツ検出とイメージング用に、PC ニアフィールドプローブ (Protemics TeraSpike TD-800-X-HR-WT) が含まれている (図 1)⁽³⁾。

コンピュータユニットが、ニアフィ

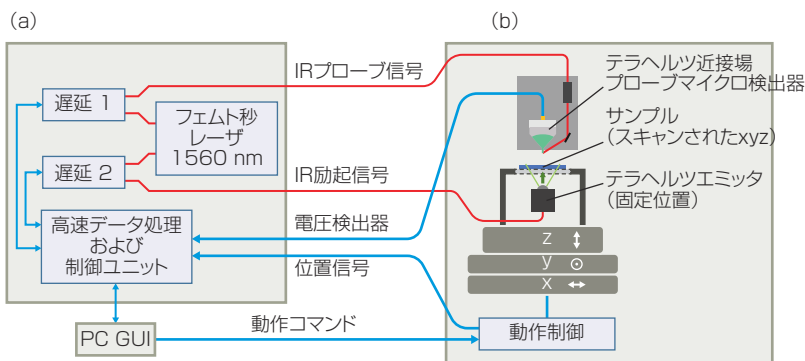


図 1 光タイムドメイン分光計測ユニット (a) は、超高速ポンプ/プローブ信号を生成し、一方ニアフィールドスキャナユニット (b) はテラヘルツエミッタとニアフィールドディテクタコンポーネントを含み、同様に高分解能フィールドマッピング用に移動ステージも含まれる。サンプル、つまりテストされるデバイス (DUT) はニアフィールドスキャナユニットにセットされている。

ールドイメージングシステムとTDSモジュールを制御する。計測中、ラスカスキャンシステム動作制御ユニットがサンプルの現在位置をデータ取得ユニットに絶えず送り、そこで各位置で記録されたテラヘルツデータと統合される。TDSモジュールの高サンプリングレートにより、連続(ストップ&ゴー中断なし)表面スキャン動作で、フルテラヘルツ過渡検出が可能になる。

PCニアフィールド(近接場)プローブは、1 μ m厚低温成長ガリウムヒ素(GaAs)カンチレバーで構成されている。カンチレバーは、一對のテーパー状電極を特徴としており、これがプローブ先端で光伝道(PC)スイッチを形成する。プローブは、サンプル表面近傍で放射テラヘルツ場を記録する。ニアフィールドプローブとしての電気光学結晶と違い、プローブはより低い侵襲性と高感度が特徴となっている。

スキャタリングチップベースプローブは、z領域しか記録できず、開口ベースのプローブは水平(x、y)領域のみを記録する。対照的に、プロテミクス社のPCニアフィールドディテクタは、x、y、あるいはz方向で選択的に、場のベクトル成分に感度を持つように設計されている。

科学応用

試料上にわずか数 μ m浮いているときでも、3~10 μ mの最大空間分解能があるので、産業や科学の新しいアプリケーションが、Protomicsテラヘルツイメージャで可能になる。

たとえば、科学分野では、オランダ基本エネルギー研究所(DIFFER)の研究者は遠距離で観察されたメタマテリアルの共振周波数がニアフィールド域でモニタされたものと著しく違うことを確認した⁽⁴⁾。研究では、1 μ mの距

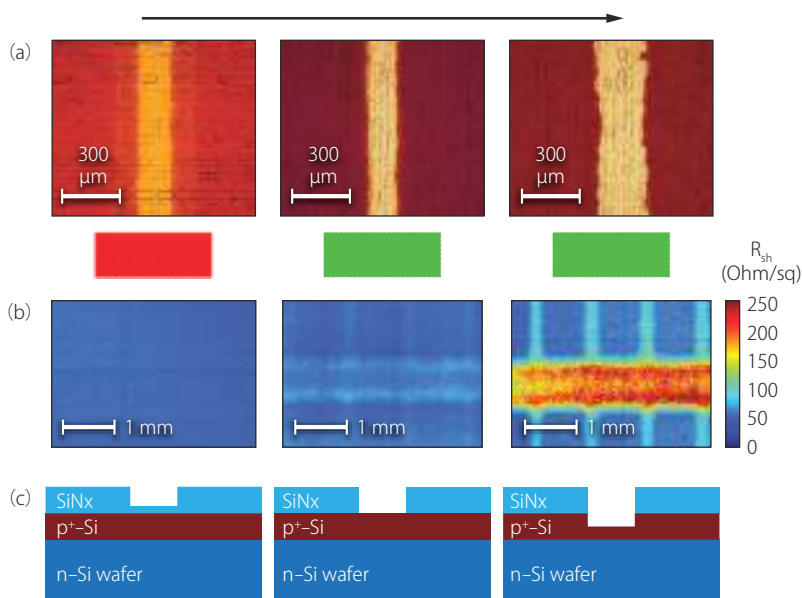


図2 3つの異なる硬化温度(220°、250°、375°C)で、エッチペーストにより局部的にSiNx除去したあとのサンプルの光学顕微鏡画像(a)とテラヘルツマップ(b)を示している。概略図は、エッチングクロスセクション(c)を対応する硬化温度で示している。

離で0.62THzであるのに対してファーフールド(24cm付近)では0.85THzであった。

そのような構造の今後のセンシングアプリケーションには、従ってニアフィールド特性に直接アクセスすることが極めて重要になる。これは、センサと被検体との相互作用特性が決まるからである。また、近接した共鳴構造間の結合メカニズムは、電磁誘導透過を生じ、相互作用構造で直接モニタ可能である⁽⁵⁾。一例をあげれば、メタマテリアルにおける電磁誘導透過は、絶対値>80%に強化できることが実証された。これは、周期的メタマテリアルのロングレンジ結合状態に関連するメタモジュールの個々の共振周波数に調整することによる。

産業ウエハ解析

科学的アプリケーションのほかに、産業解析がますますテラヘルツイメージングシステムに関わるようになっていく。たとえば、シート抵抗値(R_{sh})な

ど材料特性の非接触測定、あるいはほかでは、半導体ウエハや太陽電池の電荷キャリアに関わる特性は、解析モデル記述適用によって透過テラヘルツ信号から読みだせる。たとえば、ティンカム(Tinkham)式は、半絶縁基板上の薄い(<10 μ m)伝導層で得られたテラヘルツ透過データからのシート抵抗抽出に一般に用いられている⁽⁶⁾。

これまでの、最高マイクロスケール分解能で、シート抵抗分布の非接触計測は、フルウエハスケール領域では不可能である。しかし、そのような機能は太陽電池の微小構造の製造工程を効果的に最適化するために必要とされている。完全加工の電池列をあとで厄介な検査をするのではなく、製造の早い段階で直接検査するためにそうした機能が必要とされている。

一例をあげれば、エッチングペースト誘発シリコンナイトライド(SiNx)層除去による高効率セルコンタクトの形成は、特別な関心事である⁽⁷⁾。ここでは、エッチペーストを使ってSiNxを

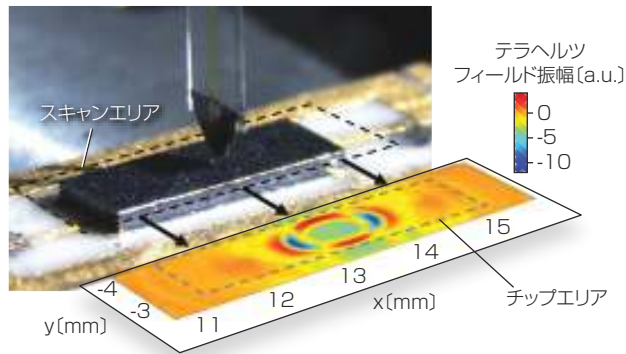


図3 写真は、スキャンングニアフィールドマイクロプローブ下のDUTを示している。同時に、サイズ $1.5 \times 4.0 \text{mm}^2$ のテラヘルツエミッタチップ表面上を伝搬するテラヘルツパルスの典型的なスナップショット画像を示している。チップのエッジは、点線で目立たせている。テラヘルツパルスは、チップ中央の起源からエッジ方向に伝搬する球面波としてはっきりと分解されている。デバイスの障害すなわち欠陥があれば、散乱の中心として現れる。この画像に示された計測の横方向分解能/ステップサイズは $20 \mu\text{m}$ であり、チップとデバイスとの距離は約 $40 \mu\text{m}$ 。全体で、超高速ニアフィールド放射の高解像度映画を録画する20分に、25000テラヘルツパルスストリークが記録された。

開く。適切なエッチング終点を見つけるために、 SiN_x の開口がテラヘルツ近接場透過イメージングによってモニタされる。これは、ペーストの硬化温度に依存している。目標は、 SiN_x 層を完全除去し、シート抵抗に関してほぼ影響を受けていないコンタクト下に拡散層を残すことである。視覚的コントロールは SiN_x 除去プロセスの完全性について情報を提供できるが、拡散層のままの品質についての情報提供はできない。

しかしテラヘルツ透過像は、 SiN_x の開口がいつ完了し、拡散層のエッチングがいつスタートしたかをはっきりと見せることができる。オーバーエッチングによって起こるp+拡散の小さな損傷でさえも検出可能である。これは目視管理、あるいは他の非接触 R_{sh} イメージング法では認識できない。後者は、分解能の制約によるものである(図2)。より重要な点は、テラヘルツスキャンング法は、誘電体層の表面形状の影響を受けない、影響するのはその下の拡散である。ここでは、エッチングプロセスの最適終点が、Pro-

metrics モジュラーテラヘルツイメージングシステムを使うことで非常に早い段階で確実に見つけることができる。

産業関連でもう1つ重要なアプリケーションは、ミリメートルおよびサブミリメートルデバイスのニアフィールド評価と品質コントロールである。これにはオシレータ、フェーズドアレイ送信器、フォトニック集積回路(PIC)が含まれる。DUTとしてフォトニックテラヘルツエミッタチップの評価は、非接触、ピコ秒時間分解能で達成された。これは、パッケージされたDUT内で生成された強いテラヘルツパルスをモニタす

ることによって達成した(図3)。

ニアフィールド計測データは、DUT表面に沿ってテラヘルツ波の放射と伝搬を明らかにしている。これによって、数ミクロンの横方向分解能で、伝搬するテラヘルツパルスの散乱センターのようなデバイスの障害を特定し見つけることができる(<https://goo.gl/aajUyv>)。

こうした散乱センターを特定するためにテラヘルツ波がチップの中央でフェムト秒レーザーパルスから生成され、球面波としてエッジの方向に伝搬するに従い、モニタされている。伝搬パルスの一部がチップ端に当たるとき、波は反射され、はっきりと分解された干渉縞になる(図3)。プロセス全体は40ps以内に起こり、画像の横方向分解能が $20 \mu\text{m}$ である点に留意すべきである。

テラヘルツ時間領域分光法モジュールの新たな誕生は、ニアフィールドイメージングシステムなど、さまざまなシステム環境における最良の必須条件となる。ミクロンスケールの分解能プローブなどアプリケーションに特化したテラヘルツデバイスとともに、またタスク指向のデータ解析とともに、テラヘルツイメージングセンサは、ソーラおよび半導体ウエハコンポーネントの非接触の品質検査や非破壊テストで、ますます重要になる。

参考文献

- (1) See <https://goo.gl/6FvPCW>.
- (2) N. Vieweg et al., J. Infrared Millim. THz Waves, 35, 10, 823-832 (Oct. 2014).
- (3) See <https://goo.gl/pgj4gN>.
- (4) A. Bhattacharya et al., Phys. Rev. B, 93, 035438 (2016).
- (5) A. Halpin et al., Phys. Rev. B, 96, 085110 (2017).
- (6) P. Spinelli et al., Energy Procedia, 92, 218-224 (2016).
- (7) P. Spinelli et al., "High resolution THz scanning for optimization of dielectric layer opening process on doped Si surfaces," IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Washington, DC (2017).

著者紹介

マイケル・ネイジェルはCEO、サイモン・サワリックはチーフリサーチオフィサー、両者とも独プロテミクス社に属する。email: nagel@prometrics.com URL: www.prometrics.com ビョルン・グロービッシュは、独フラウンホーファー通信研究所のテラヘルツセンサシステムグループ長。URL: www.hhi.fraunhofer.de