

シリコンチップの欠陥を画像化する テラヘルツ反射率測定

マイケル・ナーゲル、ハインリッヒ・クルツ

テラヘルツ顕微撮像法はシリコンチップの反射率測定による欠陥位置の測定精度がサブミクロンレベルに向上する。

集積回路 (IC) 技術の複雑性の着実な増加、例えば3Dスルービア (3D-TSV) 技術の登場は、利用可能な検査や欠陥分析装置の性能を限界にまで追い詰めている⁽¹⁾。非破壊試験法のなかで、時間領域反射率測定 (TDR) は、電子パッケージの故障を例外的な高速度で検出できると考えられている。今日の「閉ループレーダ」とも呼ばれる TDR システムの多くは、全電子式を採用し、ステップまたはパルス発生器と広帯域オシロスコープを主要な部品として使用している⁽²⁾。電磁信号は高周波ケーブルとプローブチップを通して試験デバイス (DUT) に伝送される。DUT 内の

伝送経路の不連続性は注入されて反射する信号の一部になる。これらの反射を時間領域で監視すると、構造欠陥の検出と欠陥構造の識別が可能になる。

TDR システムの空間分解能 d_{min} には注入信号の立ち上がり時間と次式の関係がある。

$$d_{min} = \tau_{rise} \times c / 4\sqrt{\epsilon_{r,dff}}$$

ここで、 c は光速、 $\epsilon_{r,dff}$ は伝送線の相対有効誘電率を示している。 $\tau_{rise} = 11.1\text{ps}$ の速い値を測定したときの全電子システムは約 $d_{min} = 365\mu\text{m}$ ($\epsilon_{r,dff} = 5$) の分解能しか得られない。この限界を突破して小スケールのチップレベル構造や先

進型パッケージの検査を可能にするには、全電子式から超高速オプトエレクトロニクス技術への切替えが必要になる。

最近、欠陥検査用の高速フェムト秒レーザー駆動オプトエレクトロニック TDR システムが米インテル社から商品化された⁽⁴⁾。このシステムを使うと、全電子システムを上回る $\tau_{rise} = 5.7\text{ps}$ という大きな改善が可能になる。しかしながら、このシステムの主要なボトルネックはオプトエレクトロニックサブピコ秒領域のスイッチング速度の利点を十分に利用できないことであり、オプトエレクトロニックパルス発生器/検出器デバイスと DUT との間の信号伝送には導波

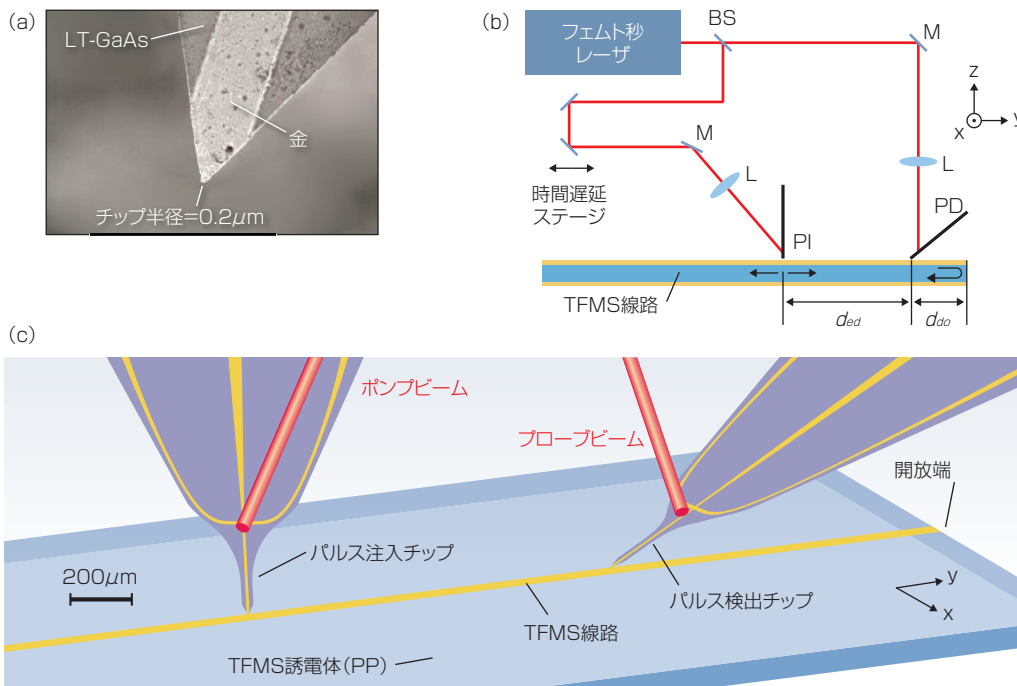
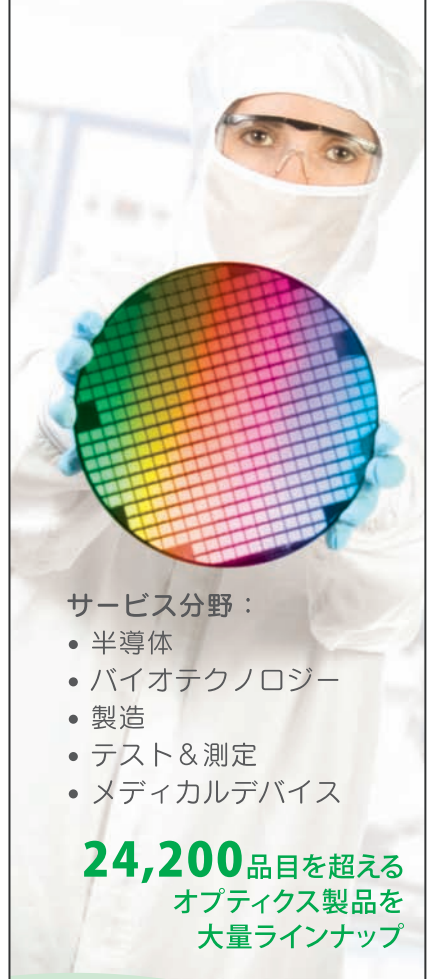


図1 (a)はプローブチップの走査型電子顕微鏡写真、(b)はテラヘルツ時間領域測定に使用する光ポンププローブ装置の概念図、(c)は測定に使用するプローブの構成と配置の拡大図を示している。

next day OPTICS TO INDUSTRY



サービス分野：

- 半導体
- バイオテクノロジー
- 製造
- テスト & 測定
- メディカルデバイス

24,200品目を超える
オプティクス製品を
大量ラインナップ

赤外用オプティクス



RefIX™ 反射型対物レンズ



数量見積りはご必要でしょうか？

当社カスタマーサービスまでご連絡下さい。
総合カタログも 無料 でお届け致します！

more optics | more technology | more service

EO Edmund
optics | japan

エドモンド・オプティクス・ジャパン株式会社
〒112-0001 東京都文京区白山5-36-9 白山麻の実ビル
TEL: 03-5800-4751 FAX: 03-5800-4733 | www.edmundoptics.jp

路とプローブ部品の使用が必要になる。これらの部品は110GHz以上の周波数を伝送できないため、解像力の大部分はTDRシステムの内部で失われる。

われわれが最近実証したように、現在、このボトルネックは新しい微細加工プローブチップを適用し、DUTの直前で広帯域光伝導(PC)パルス発生と検出を行なうことで、効果的に排除されている⁽⁵⁾。この先進型オプトエレクトロニックシステムを使用して、 $\tau_{rise} = 1.1\text{ps}$ の前例のない信号の立ち上がり時間が達成された。初期の配置とは違って、このプローブはプローブ/導波路容量結合による無接触モードでも使用できる。このモードは単一時間領域の解析とは異なり、疑わしい領域の空間時間分解場マッピングにより強化された欠陥局在化にも適用できるため、標準のTDRシステムの重要な拡張になると考えることができる。

測定システム

TDRによる欠陥孤立化のシステム能力を実証するために、テラヘルツ領域において既知の透過特性をもつ薄膜マイクロストリップ線路(TFMS)がDUTとして使用された⁽⁶⁾。このオプトエレクトロニック実証システムは時間領域測定用の伝統的なポンプ/プローブ装置にもとづいている(図1)。主要部品は780nmの波長、150fsの半値全幅(FWHM)パルス幅および78MHzの繰返し速度をもつTi:サファイアフェムト秒レーザと二つの微細加工した同じPCプローブチップからなる。レーザの出力ビームはビームスプリッター(BS)を使用して、それぞれが4mWの平均パワーをもつポンプビームとプローブビームに分割される。ポンプビームは第一のプローブに集積された一対のバイアスPCスイッチ上に集光される。こ

のプローブはDUTへのパルス注入(PI)に使用される。これらのバイアスされたPCスイッチは二つのチタン/金ストリップ線路の間にある二つの5 μm 幅の間隙とチップの先端を走る連続中心ストリップ線路を用いて形成された。これらの平面電極構造は、低温での分子ビームエピタキシー成長を用いてPCヒ化ガリウム材料の1.3 μm 厚のカンチレバー上に集積され、光学的に発生する電荷キャリアは超短寿命($\tau_c = 250\text{fs}$)が得られる⁽⁷⁾。

測定に使用するプローブチップとDUTの空間配置は二つのチップがTFMS線路上に10 μm の距離に保持される。すべての測定において、横方向のプローブ間距離は1mmに固定される。一対のPCスイッチ(中心線路に対して対称的にバイアスされる)から発生したパルスはプローブの中心線路に沿って伝達される。信号はプローブチップからTFMS線路へ容量結合し、パルスは結合位置からTSMS線路に沿って、二つの反平行方向に伝搬する。パルス検出(PD)用の第二のプローブチップは、開放端への距離が短いTFMS線路の部分上に配置される。このプローブチップを使用して、注入信号と反射信号は同じ時間領域でサンプリングされる。プローブビームの光路長を制御する直線移動機械ステージを使用して、このプローブのPCに集光された光プローブパルスの時間遅れが掃引される。信号対雑音比を増強するために、方形変調したバイアス電圧(700Hzの周波数において3Vのピーク間電圧)とロックイン増幅器による検出が使用される。

実験結果

通常的全電子式TDR測定は時間領域に限定される。複雑なDUT構造の場合、時間領域のデータだけによる欠

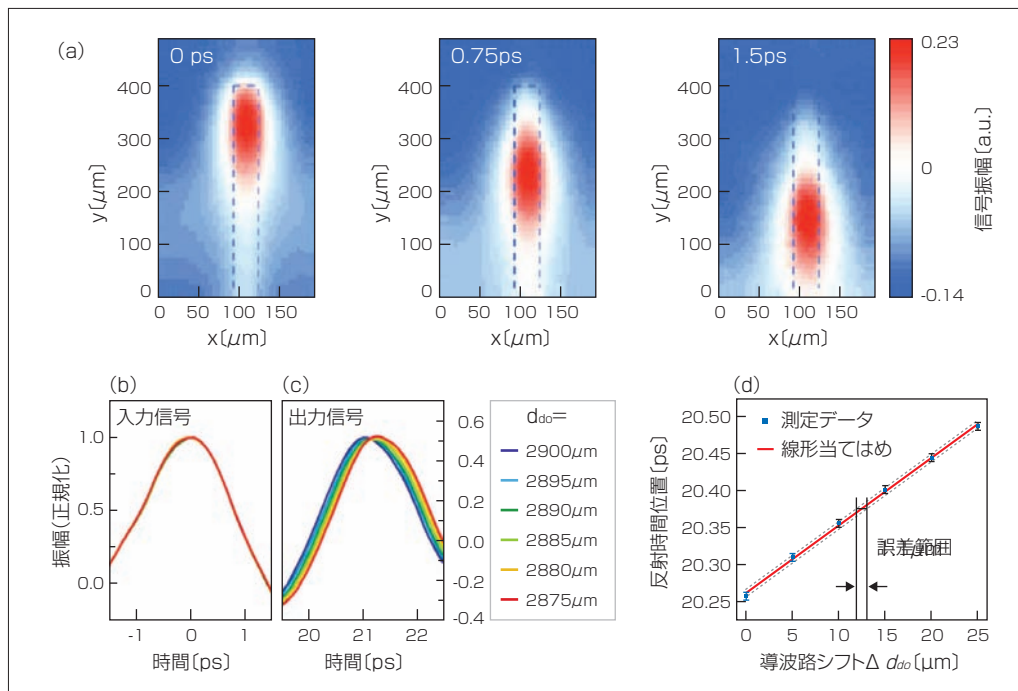


図2 (a)の時間遅延の異なる空間分解マッピングはTFMS線路(図1に示したx/y軸配置)の開放端からの反射パルスの伝搬を示している。(b)の入射パルスと(c)の反射パルスの時間領域データはプローブと不連続部(開放端)の距離 d_{do} を変えて測定された。(d)の反射信号の測定されて時間位置は不連続部(開放端)からの導波路シフトに対してプロットされた。線形当てはめによる位置精度は $\pm 0.55 \mu\text{m}$ 。

陥の位置決めは、分布した不連続体からの反射が同時に発生するため、非常に難しい作業になる。しかしながら、ここで述べたプローブのラスト走査の能力は、欠陥の位置決め非常に役立つ付加的機能になる。この動作の実証がTFMS線路の開放端領域から反射したパルス電場の空間分割測定により行われ、場のマッピングが三つの異なる時間遅延で行われた(図2)。プローブと装置の全体は二次元の横方向走査を行うDUTを除いて固定された。

図2(a)の左側の図は0psにおける開放端(点線はTFMS線路の横方向境界)の最初の反射の完全な広がりを示している。図2(a)の3つのデータは反射の発生場所、伝搬のダイナミクスおよび信号の閉じ込めが明瞭に可視化されている。図2(b)の注入信号と2(c)の反射信号の時間領域データから明らかのように、TFMS線路における1.1psの超短立ち上がり時間(立ち上がり信号端の10%~90%レベルから決まる)は最新の全電子式システムに比べると1

桁も短い。DUTの固有結合条件を考慮し、プローブ設計を注意深く設計すると、この立ち上がり時間はさらなる短縮が可能となり、キャリア寿命に近付けることができる。

位置精度はプローブから端部までの2875から2900nmの距離(d_{do})を5μmステップで変えてTDR走査を行うことで定量化できる。図2(b)から明らかのように、入射する信号の時間に依存した位置と傾斜は予想通り一定に維持された。入射信号の測定された残留時間の基本誤差は約 $\pm 5\text{fs}$ であった。図2(c)が示すように、反射信号(出力信号)は d_{do} の減少とともに最初の時間に移行する

非常に均一な傾斜が観測された。図2(d)の信号端の位置と d_{do} の変化との関係が示すように、理想的な線形デボルーションからの標準偏差は2.6fs、最大偏差は $\pm 5.1\text{fs}$ であった。これは、 $\pm 0.55\mu\text{m}$ の空間位置精度に相当する。

われわれは原理証明実験を行い、超高速光伝導スイッチを装備した微細加工プローブを使用すると、TDRを用いる故障解析用のオプトエレクトロニクスシステムの解像限界が大きく突破できることを実証した。テラヘルツ近接場顕微鏡法の分野では、その他の応用、例えば半導体材料の検査や生体分子センシングなども期待される。

参考文献

- (1) J.H. Lau, "Evolution, Challenge, and Outlook of TSV (Through-Silicon Via) and 3D IC/Si Integration," IEEE Intl. Conf. on Electron. Packaging--ICEP, Nara, Japan (April 13-15, 2011).
- (2) Application Note 1304-1, Agilent Technologies, www.agilent.com.
- (3) K. Schoen, Picosecond Pulse Labs, www.picosecond.com (2004).
- (4) Y. Cai et al., Proc. 60th ECTC 2010, Las Vegas, NV, USA, 1309-1315 (2010).
- (5) M. Nagel et al., Opt. Expr., 19, 12509-12514 (2011).
- (6) M. Nagel et al., Microwave Opt. Technol. Lett., 29, 97 (2001).
- (7) M. Wächter et al., Appl. Phys. Lett., 95, 041112 (2009).

著者紹介

マイケル・ナゲル(Michael Nagel)は独AMO社の研究者兼製品開発者、ハインリッヒ・クルツ(Heinrich Kurz)は同社の代表取締役。e-mail: nagel@amo.de; www.amo.de.