

# シリコンフォトニクスに対処する 自動ウエハレベル・プロービング

ジョー・フランケル、カズキ・ネギシ、マイク・シモンズ、  
ダン・リシャビィ、エリック・クリステンソン

**完全集積、自動化・プロービングシステムによりシリコンフォトニックチップの設計者は、かつてないほど迅速に設計の評価と品質認定ができるようになる。**

チップ設計者は、増え続けるデータレートに圧迫されており、データ伝送手段として赤外光信号による波長分割多重(WDM)の利用は、CMOSシリコンベースのデバイスにますます解決を見いだそうとしている。「シリコンフォトニクス」(SiPh)と呼ばれるこの技術は、従来の電気インタコネクトを置き換えるためだけでなく、ライダ、量子コンピューティング、バイオセンシングを含む幅広い範囲のアプリケーションにも利用されつつある。

チップ上に光コンポーネントを集積することは、SiPhデバイスのウエハレベル・プロービングに多くの新たな課題と要求を生み出す。設計をコンセプトから品質認定、製造まで進めるには、

膨大な量のデバイス性能データが必要になるからである。研究室で初期のプロトタイプに取り組んでいる間は、計測のために1個のデバイスのセットアップやアライメントに数分、場合によっては数時間を費やしても問題ない。しかし、そのような労力と時間を集中する方法は、SiPh量産サイクルタイム要求にはふさわしくない。

素早いプロセスフィードバックを得てこれらの設計を次のレベルに進めるには、スループットの大きな前進が求められている。加えて、入出力(I/O)計測は、ナノメートルオーダーの精密アライメントで行われなければならない。シリコンに作製される光回折格子や光導波路の効果的な開口寸法は、従

来のプロービングシステムでは、前例がない精度だからある。

デバイス技術は、単純な伝送線からO/Eコンバータ、光変調器、さらにそれを超えて進化するので、製造メーカーは遅滞なく、プローバプラットフォームを作らなければならない。それによってチップ設計者は、急速に成熟していくSiPh設計をテストし改善することができる。2017年にスタートした、米フォームファクター社(FormFactor)は、多彩なSiPhアプリケーションをサポートするウエハレベル・プロービングソリューションを開発した。同社は、急速に進化するSiPh産業をサポートするロードマップを展開している。

## プロービング・アプリケーション

シリコンフォトニクス・プロービング・アプリケーションは、一般に次のように分類されている。モデリングと特性評価、ウエハ受入試験、または製造工程モニタリングのいずれかである。これらのアプリケーションカテゴリのおおのほは、正確さ、スループット、試験の柔軟性に、それ固有の相対的重要度が示されている。

モデリングと特性評価アプリケーションは、デバイス、あるいはその一部の設計とシミュレーションに使用するモデルパラメータを抽出しようとする。この場合、精度が重要であるが、スループットは、それほど重要でない。モデリングは、デザインエンジニアリング活動だからである。

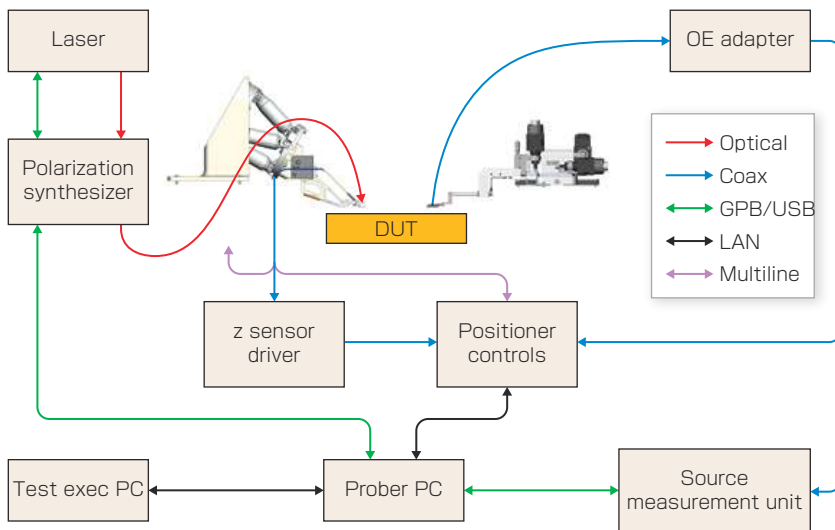


図1 この図は、シリコンフォトニクスプロービングシステムの基礎的構成要素を示している。

表 シリコンフォトニクスプロービングパラメータ

試験パラメータ	可能な値
ウエハ径	300mm、200mm、個片化ダイ
フォトニックI/O	垂直カプリング/グレーティングカプラ エッジカプリング/トレンチ(溝)/導波路
I/O設定	光-光(O-O)
	光-電気(O-E)
	電気-光(E-O)
	光-電気-光(O-E-O)
垂直結合角	6°-20°(グレーティングカプラ)
エッジ結合角	0°、70°、80°、90°(導波路)
デバイスレイアウト	シングルレイアウト/ダイ マルチレイアウト/サブダイステッピング
波長	1260 - 1625 nm
周波数	DC、10 Gbit/s、40 Gbit/s
位置決め装置	デュアルサイド(両面)ヘキサポッド(スルー)
	シングルサイド(片面)ヘキサポッド(ループバック)
	RF位置決め装置、DC位置決め(電動または手動)
光プローブタイプ	シングルファイバ、ファイバアレイ、レンズファイバ、ファセットファイバ
電気プローブタイプ	RF、DC(変調とバイアシング用)
試験温度	25°C(管理環境)、-40°C~+150°C(サーマル)
精度	<300 nm
スループット	<3秒 デバイスあたりの調芯時間
再現性	<0.3 dB

ウエハ受入アプリケーションは、チップデザインのパフォーマンスを評価し、基板全体でデバイスの機能、再現性、パフォーマンスを調べる。この場合、精度とスループットのバランスが重要である。製造プロセスが、多くのデバイスのサンプルで実証できるようにするためである。

インラインプロセス・モニタリングアプリケーションは、ウエハ製造工程を連続的に評価し、製造フローでどんな欠陥でも見つけようとする。プロセスモニタリングは、量産アプリケーションであるので、計測は、スピードに最適化される傾向がある。一方、検査は最小数の測定基準である。

## プローバ利用例

業界が広範なアプリケーションを求めるので、アプリケーションニーズを素早く最適化できる柔軟なプロービングプラットフォームが必要になる。前述したアプリケーションの1つにプローバを

設定するとき、精度、スループット、パワー結合再現性(表参照)に関して一般的なアライメント性能要件とともに、多くのパラメータを考慮する必要がある。

各プローバ設定は、アプリケーションの特定要件によって決定される。光-電気(O-E)プロービングシステム構成セットアップの一例は、フォトダイオードの応答性、挿入損失、パワー結合効率をレーザ波長および入力偏光の関数として計測する(図1)。

別の構成では、O-E-O位置決め設定は高指向性である。光I/Oは光学位置決めイースト・ウエスト、バイアシングはDCサウス、変調器はRFノース(図2)。すべてのプローブは、電動位置決めマウントされており、これは異なるプロービングレイアウトでサブダイ位置間を自動的に動かすようになっている。

## アライメント法

エンジニアリング・プローブシステムは、プログラマーのインタフェース



図2 シリコンフォトニクスコンポーネントは、リアルタイムで位置決めされ、プローブされる。

をエンドユーザーのテスト実行(Test Executive)プログラムに顕在化させる。それが、計測のマスターコントロールロジックを実行する。プローバのプログラミングインタフェースにより、マスターワークフローは、アプリケーションの特殊ニーズに対して調芯される。一般に、SiPh計測アプリケーションのワークフローは、次のロジックで構成されている。

### 各ウエハで

FOUPからチャックにウエハのロード/交換

ビジョンシステムでウエハを調芯各ダイで

各サブダイ構造では、

ウエハチャックをサブダイに進め位置決め装置をサブダイI/Oへ動かし

チャックを電気プローブに接触させ

光プローブをデバイスに調芯しデバイス計測を行う

次のサブダイ

次のダイ

次のウエハ

上の一連の全ステップは、プロービング業界では一般的かつ標準的であるが、デバイスに光プローブを調芯する新しいキーステップは除外される。光

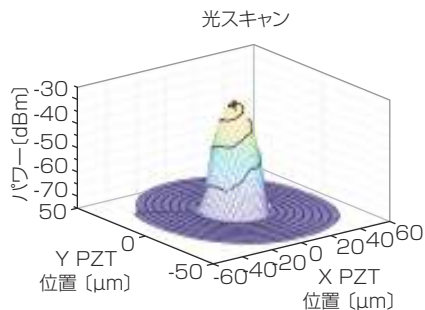


図3 プロービング要件の中で、パワー結合 vs. ファイバのxyまたはyz位置を計測するために光スキャンが利用される。

アライメントステップでは、所定のデバイスと光パワー結合を最適化するには、6自由度（移動と回転の両方）の高精度アライメントが必要になる。

アライメント誤差から挿入損失が生ずるので、非接触光結合最適化は、挿入損失を最小化するために極めて重要である。挿入損失へのこのような寄与は、テストされているデバイスの特性だけでなく、むしろ全計測セットアップの特性に関わる。これには、プローブステーションや位置決めハードウェアも含まれる。損失を最小化し、思い通りの高再現性のある計測実行の決め手は、一連のキャリブレーション機能の実装である。これにより光位置決めの移動軸とプローブステーションの座標との調芯が補正される。

性能目標内で光アライメントを達成するために、特殊3D圧電アクチュエータと独自の制御アルゴリズムを使用する。垂直グレーティングカプラアプリケーション向けには、これらのアルゴリズムは、自動移動、計測制御シーケンスを含む。zでファイバ高さ制御、xyで高速光スキャン、qzでは回転スキャン、qyで入射角アライメント、xyで勾配サーチ、さらにファーストライトサーチ。同様のアルゴリズムが、エッジ結合アプリケーションでも利用可能である。ここで

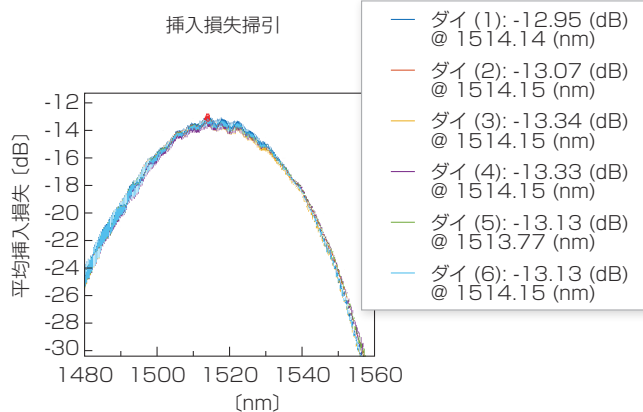


図4 波長掃引は、波長の関数としてパワー結合効率を計測する。

は、標準的には光信号はx方向に伝搬し、アライメントスキャンはyz面で行われる。

光学スキャンアライメントアルゴリズムを使うと、ピエゾアクチュエータは、デバイスの正常な結合位置の周りでスパイラルスキャン動作を行い、併せて、デバイスを通してリアルタイムで伝達されたパワーを同期してとらえる(図3)。スキャン動作が完了すると、パワー vs. 位置データは、ファームウェアで分析され、ファイバは特定ピークに動かされる。この動作は、標準値<300nm精度および<3sアライメント時間性能目標内で、2面光-光(O-O)セットアップで達成可能である。

アライメントが完了すると、プロービングシステムは、デバイス計測状態になる。多くの多様なアプリケーションニーズがあるので、一般にテスト実行ソフトウェアは、測定器で計測ルーティーンを始動させる。例えば、波長スイープ、偏光スイープ、s偏光パラメータ計測、他のユーザー特定テストなどである。データは、サブダイバースで取得され、アプリケーションに適切に

利用される。

パワー結合は、いくつかのパスで、挿入損失(IL)波長掃引計測により、可変レーザ波長の関数として計測できる(図4)。システムレベルキャリブレーションが安定した計測再現性を保証するが、各デバイスで光学的最適化を行い、最大パワー伝達を確実にすることへの留意が重要である。

## 全体のまとめ

フォームファクター社のウエハプロービングシステム、Cascade CM300xi-SiPhは、ウエハレベルSiPhプロービング向け完全統合ターンキーソリューションとして設計されている。多様なオプションのハードウェアは、業界唯一の自動化されたシステムレベル・キャリブレーションとアライメントルーティーンとともに、高精度でアプリケーションの柔軟性を持つ、フォトニックデバイスへの光入出力という課題を処理し、除去する。

前述のプロービングパラメータのほとんどは、急成長を遂げている業界に対応しながら長期的なロードマップとソリューションに支えられている。

## 著者紹介

ジョー・フランケル、カズキ・ネギシ、マイク・シモンズは、プローブシステム部門のシステムエンジニア。ダン・リシャビはシリコンフォトニクスのマーケットセグメントディレクター。エリック・クリステンソンは、プローブシステム部門のハードウェアエンジニアリングマネージャー。全員、フォームファクター社所属。e-mail: eric.christenson@formfactor.com www.formfactor.com