feature

位置決め

シリコンフォトニクス製造 アライメントプロセス並行処理の必要性

スコット・ジョーダン、ステファン・ヴォーンドラン

シリコンフォトニクスデバイスを利益が出るように量産するには、自動サブシステムは、ウエハレベルのデバイス評価から最終アセンブリおよびパッケージングまでのステップをサポートするアライメントプロセスを必要とする。

1997~2002年のテレコム主導のフ ォトニクスブームが突然終わるよりも かなり前の2000年に「フォトノミクス |(photonomics)という用語が作られ、 業界の経済的安泰のために工程自動化 の重要性が強調された。そこで提示さ れた経済的な例、ワークステーション あたり1時間に60パーツは、今日では 古くさいようである。今日のシリコン フォトニクス製造プロセスとそれとを 比較する。シリコンフォトニクス製造 では、ウエハあたり数千のデバイスが 造られる。1時間に60パーツのペースは、 20年前なら非常に速かったかもしれな いが、今では、現在そして今後の競争 的状況では持続不可能を意味する。

テレコムブームの終焉以来、業界は 復活した。その原動力となったのは、 ストリーミングビデオ、オンラインミ ュージック、スマートフォンやクラウドコンピューティングである。フォトニクス産業とその新たなパートナー、半導体製造にとって好材料は、潜在性が無限であるように見えることだ。悪材料は、これらの新しいデバイスは、前例のない数量で効率的に製造されなければならないこと、歴史的に短い時間枠でコストカーブ急降下に追随しなければならないことである。

この新しい環境で成功する決め手は、2000年からの古い教訓、自動化、特に結合最適化ステップは、ウエハから最終アセンブリまで、非常に多くの試験とパッケージング動作にとって基本であるということだ。とはいえ、今日では、2000年と比べて違った種類の自動化が必要とされている。今日のデバイスはもっと小さく、一段と複雑

であるので、その挙動はもっと難しく なっており、試験とパッケージングを 必要とするものが多くなっている。

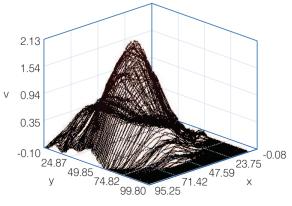
斬新なデバイス、新たな課題

まず、以前のシングルモード結合の 明確で予測可能なガウシアンは、もは や既定事実ではない。それどころか、 シリコンフォトニクス結合は、中央周 囲多数の局所最適と鞍点により複雑な プロファイルとなり、疑似ガウシアン ピークにすぎない。これは、デバイス がウエハ上にある時のデバイスのプロ ービングから分離されたチップや補助 デバイスのパッケージングやテストス テップまでのことである。1990年代に 登場した比較的単純なアライメントエ ンジンと比べて、明らかに、異なる最 適化戦略が必要である(図1)。

もっと複雑な結合以外に、デバイス あたりの結合がもっと多くなる傾向が ある。シリコンフォトニクスデバイス は、入出力だけでなく、多くのチャネ ルを実装できる。こうしたデバイスの 短尺導波路では入出力が相互作用する ことがよくあり、広範囲のアライメン トは動く標的になる。

以前のアライメント自動化技術であれば、これは決定に時間がかかる連続アライメントループである。これの次はあれをアライメントし、元に戻ってデバイス全体で繰り返し、個々の連続

図1 シリコンフォトニクス結合 は、明確な予測可能ガウシアン 結合横断面から外れることがよ くある。この種のプロファイルは、 従来のアライメントアルゴリズム で確実に最適化することはでき ない。さもなければ、その最適 化は、広範囲の最適点ではなく、v 局所最適点の一つにロックする 危険を冒すことになる。これは、 標的領域のエリアスキャンを行 うことで効率よく達成可能であ り、それによってその全体にわ たる結合横断面をマッピングで きる。ピエゾベースのスキャナは、 1秒の小数点以下の時間でこれ を達成できる。(提供:PI社)



多軸移動システムの並行処理設計アプローチ

多軸移動アプリケーションに直面する時、従来の方法は多数 の一軸動作ステージをスタックすることである。アプリケーショ ンが複雑になると、それに対応するステージのスタックも複雑 になる。また、そのような単純さの利点は、性能という点では 不利になる。

並行運動デザインは、多軸動作にはより効果的なアプローチであり、利点は複数ある(図1)。

動力学剛性:従来の多軸システムでは、スタックの下段ステージが、全スタックの質量、最上段のステージまでの質量を支えるが、最上段が支えるのはアプリケーション荷重だけになる。力動の悪化は移動質量全体とチューニングが困難になるためである。これは、軸ごとのプロセスが、軸ごとに設定が違い、その結果、応答性に差が出るからである。ヘクサボッドは、6支柱すべてが、一つの共通軽量モーションプラットフォームで並行動作するので、剛性が極めて高い。その結果、動力学は高く、チューニング設定は、全軸で類似している。

回転中心点の柔軟性:スタックされたステージは、そのチップ チルトと回転動作の中心を各回転ステージとゴニオメータベアリングの幾何学的中心に置く。時として、特注プレートや固定具を介してそれらが望ましい空間点(たとえばレンズの焦点)で一致することがあるが、これには時間と労力を要する。また、アプリケーション要件が変化するなら、これは柔軟ではなくなる。ヘクサボッドシステムでは、回転の中心は、一つのソフトウエアコマンドで即座に変えられる。

可動ケーブルの排除:操作ケーブルは、よくあることだが、それ以上に注意が必要である。ケーブルは、アプリケーション全体に影響を与える振動のパイプである。ステージが動くと、引きずられるどんなケーブルでも寄生モーションや他の誤差の一因になる。こうした問題は、ユーザーがスタックしたシステムでは、軸の数とともに拡大する。並行運動は、ケーブルの動きと他の問題もいっしょに回避する。

寄生誤差:スタックした軸は、複雑に相互作用する。たとえば×軸の振れはy軸やz軸の不要な動きの原因になりうる。軸の角度ズレは、同じように、他の軸の移動方向で動きに影響を与え、これは移動軸の距離に比例して増加する。また、スタックでは、その逓倍レバーアームが大きくなる。

長い移動度の位置決め装置に大きく役立つものも、サブナノメートル分解能およびサブミリメートル移動範囲の移動に用いることができるる。ピエゾフレクシャ位置決めは、圧電効果に基づいた動きに依存する。組み込まれた圧電セラミック変換器

が、印加電圧に対応する寸法を変える、またワイヤEDMカットフレクシャ配置が、同時に摩擦なしで誘導しながら、動きを増幅する(図2)。

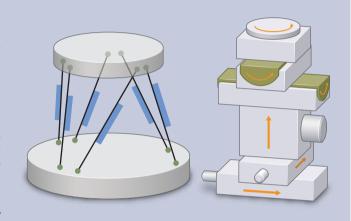


図1 ヘクサボッドのような並行運動は、従来の一軸ステージのスタックに対して利点は多数である。高剛性、低慣性、高速応答の優位性は、精密アライメントアプリケーションには重要である。(提供:PI 社)



図2 NanoCubeは、並行運動XYZピエゾスキャナを実装しており、100μm動作、サブナノメートル分解能である(Model P-616)。それは、ヘクサボッドの6支柱配置と同じである。モーション出力プラットフォーム(シルバー)に影響を与える並行アレンジメントで3つの内部アクチュエータ使う点が同じである。組み込まれた位置センサは、絶対位置情報のための広帯域クローズドループコントローラにリアルタイムでフィードバックを返す。(提供:PI社)



図2 高速18軸並行フォトニクスアライメントシステムは、2つの6自由度ナノマニピュレータと2つの高速ピエゾXYZスキャナをベースにしており、これは導波路デバイスの両面ウエハプロービング向けである。これは完全デジタルのクローズドループであり、実装されているのは、排他ゾーン機能、内部データ記録、ナノスケール安定位置保持、およびファームウエアベースの高速スキャニング、モデリングとマルチチャネルN×M傾斜サーチ機能である。アプリケーションビデオは、https://youtu.be/X7zkUWo-II8で見ることができる。(提供:PI社)

アライメントの先行のものへの影響を 取り消す、さらにもしドリフトが発生 するとその操作を何度も何度も行うこ とになる。これらのアライメントの多く は、その上、角度の影響を受けるので、 自由度の至る所で、また入出力とチャ ネル全体で多重最適化が必要になる。

2015年、こうした課題に応えるために、PI社は、マルチ入力、マルチ出力、マルチ自由度にわたって1度に、並行的にアライメントできることを実証した。これにより、デバイスとそのチャネル全体で行きつ戻りつする一連の連続アライメントループがなくなった。それどころか、グローバルコンセンサスアライメント(必要なら、トラッキングも含めて)は、高速ワンステップで完了する。

このアライメントステップだけで、 少なくともアライメントステップに関 しては、スループットは1時間に60デ バイスから2ケタ増やすことができる。 連続アライメントの繰り返しループを なくすことによる、数ケタのプロセス スループット改善は、ただちに達成可 能である。このことは、アライメント がデバイス製造全体の調整項目でなく なることを意味する。

並行処理: プロセス経済の決め手

フォトノミクスにとってのこのことの重要性は理解しがたいが、この並行処理は、生産チェーンにおける多重ノードでプロセス経済学を実現するものである。つまり、まだウエハ上にある時にデバイスの機能確認から、各アセンブリステップを実施する、そのすべてのステップでデバイスの健全性を検証するまでである。これによって不良な製品、つまり破損品が確実に、さらにコストのかかるパッケージングステップを通過しないようになる(図2)。

パラレル最適化機能は、古典的デジ タル傾斜サーチの新しい改良に基づい ているが、パラレル最適化のほかに、 まずファーストライト (所望の性能達成を確認する観測) を実現する必要があり、次に各結合の主モードを局所化して疑似的ロックオンから守る必要がある。そうでなければ、最適化は、グローバル最適化ではなく局所最適化の一つにロックオンするリスクがある。

この最適化は、ターゲット領域のエリアスキャンを行うことで効率よく達成できる。これによって、全域にわたり結合横断面をマッピングできる。これは、以前はソフトウエアで行われ、完了までにかなりの時間がかかった。理由は、従来のラスタスキャンや蛇行スキャンでは、通信待ち時間と各スキャンラインの端で決定に時間がかかること、この両方である。悪いことに、ほとんどのアプローチはポイントごとに動いて取得するシーケンスに基づいており、スキャンの各データポイントで時間のかかる決定と通信待ち時間が増える。

ソフトウエア最適化プロセスはすべて、2つのイノベーションによって古くなった。まず、完全ファームウエアベースのコマンドは、内的な位置、つまり波形と同期データ取得を利用する。次に、単一周波数正弦波、つまりスパイラルスキャンである。これは、ファイバやピンセットのような機械的要素における刺激的な構造共鳴を回避しながら、滑らかに連続的に進む。結果は、プロセススループットにおけるけた違いの改善である(図3)。

アライメント高速化追求に役立つのは、並行運動デザインコンセプトに基づいた移動エンジンである(本稿内「多軸移動システムのデザインアプローチにおける並行処理」参照)。長い移動動作系と高速スキャナを分離することにより(多段宇宙ロケットと類似、すなわち全行程ですべての質量を加速す

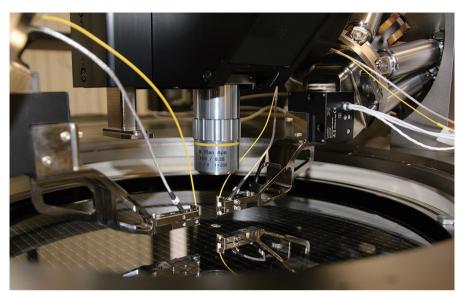


図3 Cascade MicrotechのCM300xiフォトニクス対応エンジニアリングウエハプローブステーションには、PI社のFast Multichannel Photonics Alignment (FMPA)システムが組み込まれている。目的は、オンウエハシリコンフォトニクスデバイスの高スループット、ウエハの安全、ナノ精度光プロービングである。6軸へクサボッド(6支柱)位置決め(上段左)とピエゾXYZスキャナ(ヘクサボッドにマウントされた黒いキューブ)の両方とも、並行運動をベースにしており、狙いは動力学と精度の改善である。(提供: Cascade Microtech、FormFactor子会社)

る必要はないということである)、性 能向上が可能になる。

全体をまとめて考えるのは、このまったく新しいアーキテクチュアの利点が明らかになるところである。単一周波数正弦波、あるいはスパイラル・ラスタスキャンにより結合領域全体のマッピングが約250~300msに高分解能で可能になり、観察された結合に対するファームウエアベースのフィッティングが完了する。これにより特別に高速のスキャンが行え、それでもなお主モードを正確に局所化する。

各結合と個々の自由度で局所化された主モードで、全入出力にわたるグローバルコンセンサスアライメントが数百mm秒で達成でき、すべての最適化は並行して行われる。必要なら(たとえば、ドリフトが起これば、それを収容する。おそらくドリフトは、アクティブ要素、接着剤の適用、あるいは他の擾乱によって起こる)、素早いグローバル再アライメント、あるいはリア

ルタイムトラッキングさえも行うこと ができる。

こうして、シリコンフォトニクスデバイスを有益にするために、設計工学のプロセスで自動化が重要な要素になる。この要件を満たすことで、ファブクラスのプロセス自動化サブシステムの最近の進歩には、フォトニクス製造の基盤オペレーションの1つ、アライメントプロセスにイノベーションが含まれている。これは、ウエハレベルでのデバイス評価から最終のアセンブリとパッケージングまでのプロセスステップに共通である。

参考文献

 S. Jordan, "Alignment: A Challenge for Test & Measurement," https://goo.gl/ pfiJgm.

著者紹介

スコット・ジョーダンはPI社のフォトニクス グローバルヘッド、ナノオートメーションテク ノロジー、シニアディレクター。ステファン・ ヴォーンドランは、PI社のマーケティング担 当副社長。e-mail: stefanv@pi-usa.us

URL: www.pi-usa.us



東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル

TEL. 03 (3226) 6321 FAX. 03 (3226) 6290

〒530-0004 大阪市北区学島浜2-1-29

TEL 06 (6344) 6328 FAX 06 (6344) 6342

〒162-0067

大阪支社