



半導体製造向け超高精度偏光計測

Optikos社は、半導体リソグラフィ装置向けの超高精度なオーダーメイド偏光計を開発しました。当初は単発のプロジェクトでしたが、これを機に先端半導体製造において12年以上にわたる長期的な生産パートナーシップへと発展しています。

主な成果:

1. 超高消光比

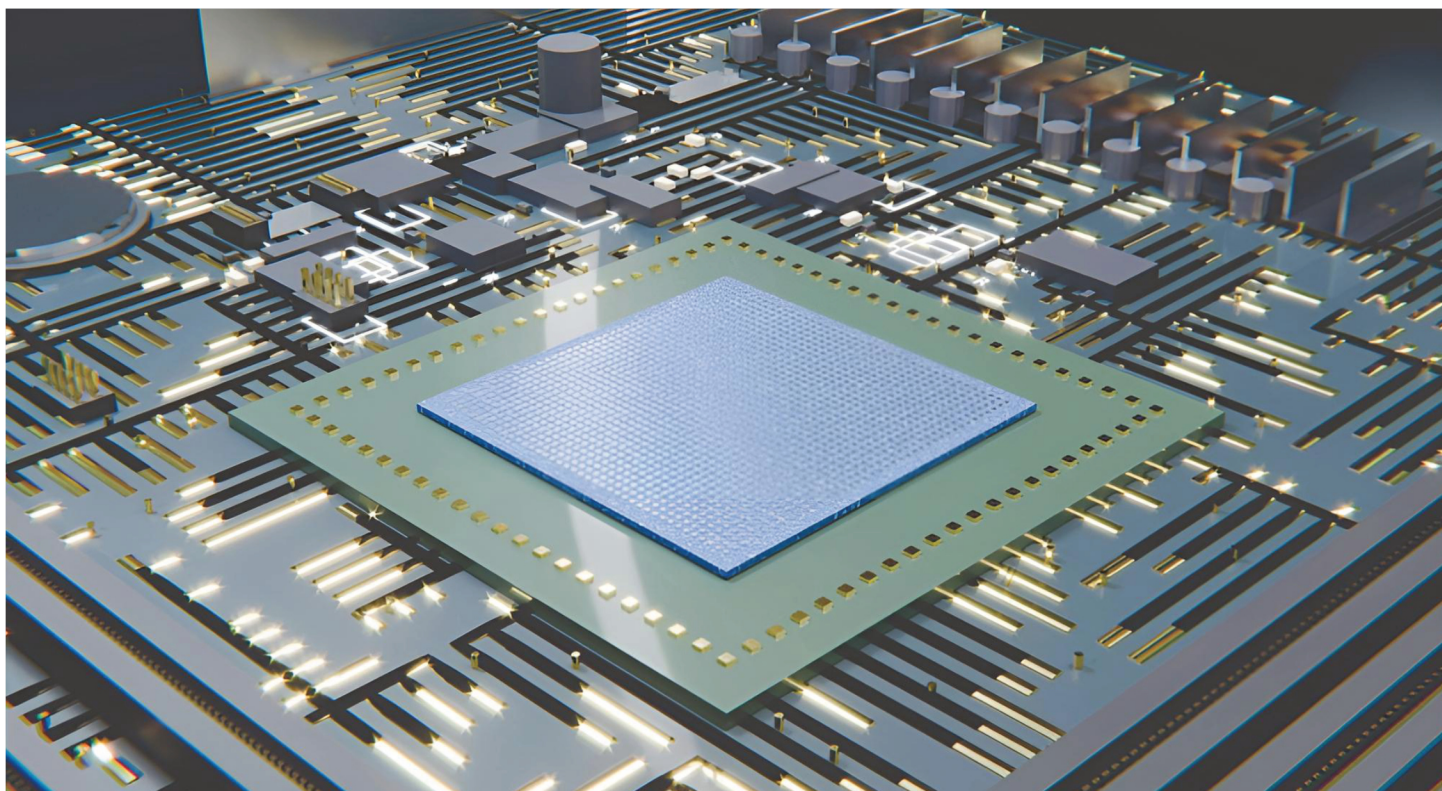
不可能と思われる仕様を満たしながら、一般的なPBSキューブ(1,000 ~ 2,000:1)をはるかに上回る 50,000:1 を超える消光比を実現しました。

2. マイクロラジアン角度校正

機器の寿命全体にわたって持続する独自のアライメント手法を使用して、1,000分の1度以内に校正された目的の偏光軸を確立します。

3. 12年以上の生産パートナーシップ

この1回限りのプロジェクトは、継続的な供給関係(～2システム/年)に変わり、新しいツールの世代を通じて展開が継続され、元の設計の寿命が長いことが実証されました。



概要

問題

ある世界的な半導体製造装置メーカーは、次世代リソグラフィシステムの認定を目的として、消光比50,000:1以上かつマイクロラジアン単位の精度を備えた特注の偏光計測ツールを必要としていました。しかし、この極めて厳しい仕様やコンパクトな筐体サイズという制約を満たす市販のソリューションは存在しませんでした。

解決策

Optikosは、高性能光学系と独自の校正手法を使用してカスタム偏光計を設計し、前例のない測定の安定性を実現しました。この特注システムは、ナノワットレベルの分解能で機械基準に対して偏光軸を正確に確立しました。多面的な課題には次のものが含まれます。

成果

このツールはすべての性能仕様を上回る結果を達成し、単発のプロジェクトから、12年にわたる継続的な供給パートナーシップへと発展しました。現在も、複数の世代にわたる最先端のチップ製造装置について、信頼性の高い認定(クオリフィケーション)を可能にしています。

顧客について

最先端のマイクロプロセッサ製造に不可欠な、高度な半導体露光装置を製造するグローバル企業が、極めて高度な計測ニーズを抱えてOptikos社に相談を持ちかけました。同社は、主要な半導体製造工場で使用される極端紫外線(EUV)露光装置のサプライヤーであり、サブナノメートル単位の精度が歩留まりや収益性を左右する、技術の最先端領域で事業を展開しています。

業界： 半導体、光学計測、先端製造

挑戦

顧客のリソグラフィー認定システムでは、次の 2 つの重要な点で偏光状態を測定する必要がありました。

- 1. Z 面波面 – フィゾー干渉計が光波面の品質を確立します。
- 2. 瞳孔カメラ – 測定システムからの反射ビームは、正確なセンシングのために既知の偏光特性を備えている必要があります。

この感度は、単一のスナップショットで複雑なサブ波長の 3D 半導体特徴を測定するために必要です。偏光ツール用に提示された仕様は、当時の業界にとって破壊的なものでした。

仕様	要件	典型的な業界ベンチマーク
消光比	≥50,000:1	1,000 ~ 2,000:1 (PBS キューブ)
角度精度	1000分の1度	通常は指定されません
電力解像度	~1ナノワット	1 ~ 100 マイクロワット (標準フォトダイオード範囲)
フォームファクター	コンパクトで瞳孔カメラにフィット	既存の光学系による制約
校正の安定性	複数年の保持	定期的な再校正が一般的

なぜこれが重要なのか

OptikosのエンジニアリングサービスディレクターであるNathan Wallace氏は次のように説明しています。「偏光度の高いレーザーシステムを扱う場合、偏光は光路の分岐や反射において高い効率を得るための非常に有効な手法です。したがって、偏光軸を把握し、それを正確に調整できていれば、下流の光学系はすべて効率的に機能するはずです。」

半導体リソグラフィ計測では、偏光が制御されていないと、オーバーレイのアライメント、限界寸法の測定、焦点検出にエラーが発生し、これらすべてが先進的なノード（10nm未満の機能を備えたノードなど）での歩留まりの低下と製造コストの上昇につながります。

解決策

本プロジェクトにおいて、Optikosのチームは、目新しい光学系を追い求めるのではなく、十分に確立された校正手法を極限まで活用する道を選びました。回転式のグラン・トンプソン偏光子と、ナノワット単位の分解能を持つパワー検出器を組み合わせ、180度の回転を通じて信号のバランスをとることでアライメントを確認する——。Optikosの専門家チームは、この手法により、多くの光学エンジニアがこれまで試みたことのない規模での計測技術を確立しました。この偏光計をより大規模な計測装置の設計に組み込むにあたり、適用された主な原理は以下の通りです。

1. グラン・トンプソン偏光子アーキテクチャ

システムの中核には、特殊な光学接着剤で接着された2つの方解石結晶から構成されるグラン・トンプソン偏光子が利用されていました。方解石の自然複屈折により、全反射による常光線と異常光線の分離が可能になります。

- 1つの偏光状態は最小限の損失で通過します。
- 直交状態は内部反射によって拒否されます。

このアーキテクチャは本質的に、従来のPBSキューブ(1,000 ~ 2,000:1)と比較して優れた消光比を実現します。

2. カメラ検出器を備えた回転ステージ

電動回転ステージにグラン・トンプソン偏光子を設置し、光路を中心として段階的に回転させた。各角度位置において、カメラを用いた検出器により透過光強度を測定しました。向きを順次変化させて各段階での強度を記録することで、透過率が角度に応じてどのように変化するかをマッピングし、入射光の完全な偏光状態を明らかにしました。透過率が最大となる角度は偏光軸との一致を示し、最小となる角度は偏光軸に対して垂直であることを示す。これら最大値と最小値のコントラストから、消光比が定義されます。

3. 独自の「180度反転」校正手法

偏光軸の絶対的な基準を確立するため、Optikos社は差分パワーバランス手法を導入しました。

「最善の方法は、実際に直線偏光子を挿入してその値を測定し、次にそれを180度反転させることです。この2つの状態間におけるパワーを均衡させれば、それが当該ビームの偏光軸となります。」— ネイサン・ウォレス(Nathan Wallace)

偏光子を反対の向きに回転させ、ナノワット単位の精度でパワー測定値を均衡させることで、本システムは機械的基準に対する正確な偏光軸を、マイクロラジアン精度で特定しました。

4. ブリュースター窓の組み込み

校正時に純粋な偏光状態を保証するため、Optikos社はブリュースター角に配置した窓を採用しました。この窓はp偏光を透過させ、s偏光成分を反射する特性を持ちます。これにより、意図しない偏光状態の混入を防ぎ、測定の完全性を確保しました。

結果

Optikos は、クライアントが指定した要件をすべて上回りました。

性能指標	目標	結果	注意事項
消光比	50,000:1	~50,000:1 (システム)	カメラ/センサーが制限されています。 100,000:1 が可能な偏光子
角度精度	1000分の1度	1000分の1度以内	機械基準に合わせて校正済み
パワー分解能	ナノワット・レベル	1 ~ 2 ナノワット以内	180°バランス調整時に使用
最小しきい値	25,000~30,000:1	一貫して満たされている	顧客の絶対的な最小要件

商業的成功の達成

1 回限りの開発作業として始まったものが、継続的な生産へと発展しました。

- 初回注文: 1 系統
- 後続注文: 2 つの追加システム
- 継続率: 12 年間、年間最大 2 システム
- 継続的な関連性: このツールは新しいプラットフォームでも変更されず、堅牢な設計が長寿命であることを示しています。

「最終的に、完全に校正され、軸の偏光を高度に維持する非常に高感度のカスタム偏光計を作成することができました。」 - ネイサン・ウォレス

Optikosが提供する顧客価値:

単発の開発プロジェクトとして始まった取り組みが、継続的な生産へと発展しました。

- 代替的な校正手法を不要にしました。
- 再設計を行うことなく、次世代リソグラフィ装置の認定(クオリフィケーション)を可能にしました。
- 後工程における光学性能に対する確信をもたらしました。
- 実績ある堅牢な設計により、トータル・コスト・オブ・オーナーシップ(TCO)を低減しました。

結論

Optikos は、次の3つの重要な能力によって差別化を図りました。

1. 深い偏光物理学の知識

多くの光学エンジニアは偏光を扱っていますが、サブナノワットのパワーバランシング技術や絶対校正のためのブリュースター角最適化の実装に必要な深い理解を持っている人はほとんどいません。

2. システムレベルの統合

このソリューションは、最終的に、回転機構、カメラ検出、校正方法論、長期的な再現性を保証する機械的基準調整などの機能を含む、完全な計測サブシステムとなりました。

3. すぐに生産可能な設計

通常のプロトタイプとは異なり、Optikosチームは、カスタム計測ソリューションとしては珍しい、数年間にわたる動作安定性と、進化する製品世代間での互換性を実現するツール設計を設計しました。

半導体製造においてこれが重要な理由

半導体デバイスの微細化が進むにつれ、リソグラフィ計測における精度の重要性はますます高まっています。システム内の偏光状態を正確に把握できていないと、偏光ビームスプリッタ(PBS)キューブのような偏光依存性を持つ光学素子が予測不能な挙動を示すほか、散乱や迷光といった要因が計測ノイズを発生させ、プロセス全体を通じて系統誤差が蓄積されてしまいます。これらすべてが、最終的な歩留まりに直接的な悪影響を及ぼします。

「こうしたプロジェクトは、私たちが偏光を扱う術を心得ていることを示すものです。私たちは、すでに非常にコンパクトな瞳孔カメラが設置されている場所に組み込むための、特注の偏光計を設計するという課題を任されました。そして、その厳しい仕様をすべて満たす装置を納品することができました。」

—ネイサン・ウォレス

プロジェクトについて話し合ってみませんか？

この偏光計は、一般的な市販製品の性能の枠を超えるような仕様にも対応できる、Optikosのエンジニアリング専門家たちの力量を如実に物語っています。この偏光計測ツールは、高度な半導体製造エコシステムにおいて信頼されるコンポーネントとなり、世代を超えて様々な装置に採用され、クライアントからの継続的な発注という形でその価値が証明されています。

半導体製造、航空宇宙、量子システム、あるいは先端光学の分野において、同様の厳しい計測課題に直面している組織の皆様には、貴社のチームが抱える課題について話し合うため、ぜひご相談ください。

お問い合わせは<https://kyokko.com/contact/>までお願いいたします。

