

## 統計干渉計測法の実用化による次世代型レーザ直描装置に関する研究

小俣公夫\*\* 井口 敏\*\* 門野博史\*\*\* 豊岡 了\*\*\* 新井尚機\*

### Study on Laser Direct Imaging System for Next Generation to Use Statistical Interferometry

KOMATA Kimio\*\*, IGUCHI Satoshi\*\*, KADONO Hiroshi\*\*\*,  
TOYOOKA Satoru\*\*\*, ARAI Naoki \*

#### 抄録

本研究は、MEMSやウエハのレジスト露光等における微細パターン露光から、モジュール基板等のドライフィルムレジスト露光等の業界にも対応できるように、 $5\mu\text{m}$ レベルの高精細Line and Space(L/S)から数十 $\mu\text{m}$ 以上のパターン露光にもフレキシブルな線幅パターンに対応したレーザ直描装置の研究である。特に高精細露光においては基板傾斜等を制御するオートフォーカス(A F)部とレーザ光源部の熱変形による微細変化を検出する高精度A F部を組み合わせて制御する必要がある。この高精度A F検出部には光波の完全なランダムさを基準とする新原理の統計干渉計測法を用いた研究を実施した。

キーワード：統計干渉計測法，高精度オートフォーカス，マルチレーザ直描装置  
高精細パターン露光，フレキシブル線幅パターン

#### 1 はじめに

近年、携帯電話やデジタルカメラさらにモバイルタイプのノートパソコン等においてはコンパクトサイズ化、高機能化が急速に進んでいる。これらの進展を可能としてきた技術が、CPU、マイコンチップ等のICパッケージを搭載するモジュール基板の高密度実装技術や液晶などのフラットパネルディスプレイ製造技術であり、さらにはMEMS関連での微細パターン形成技術である。

本開発「統計干渉計測法の実用化による次世代型レーザ直描装置の開発」は、これらの業界に向けて、 $5\mu\text{m}$ レベルの超高精細Line and Space(L/S)を達成できるレーザ直描装置(マス

クレス露光機)をReasonableなコストで、コンパクトなサイズにて装置開発する事を目的としている。これを達成するためには、高精度露光光学系・ステージ制御系・データ処理系の確立と併せて高精度変位検出アルゴリズムによる高精度A F機構部の開発が必須である。このA F部は基板の“うねり”やセット時の傾斜も合わせた機械的変位検出部と、レーザ光源部の熱変形による経時微小変化量を検出する高精度A F部を組み合わせることで初めて精密なTotal制御が可能となる。

このようにマイクロエレクトロニクスなどの分野に代表される超精密加工技術の発達にともない、物体の形状や変形などに対する高精度な計測技術の要求はますます増大している。光学的干渉計測法はこのような要求に答えられる現実的な手段である。光の波長を基準とするため、物体の形状、変形、移動などを高精度に計測することが可

\*\* (株) オプセル

\*\*\* 埼玉大学大学院理工学研究科

\* 電子情報技術部

能である。干渉計測法の進歩は著しく、現在では光の波長の数百分の1から数千分の1の精度での計測が可能である<sup>1)</sup>。しかし、現実的には動作環境や、光学素子に要求される面精度やそれを実現するのに要するコストの面から干渉計測精度の原理的限界を達成するのは容易ではない。一般的に光学的干渉法では確定的な基準面を設定し、基準面からの光波の波面を参照波として物体からの光の波面の相対的な変化を読みとることにより物体の情報を得ている。したがって、スペックルの発生や用いられる光学素子の加工誤差による波面の歪みはただちに計測精度の低下につながる。このため、光学素子を精密に作成することに多くの努力が払われるが、実用環境下で長期に渡り精度を維持することは現実的には難しい。このことが技術的、コスト的な障害となる。

このような従来の確定的手法による光学的干渉法に対して、豊岡、門野らは発想を逆転し、ランダマイズされた参照波面の干渉計測への影響を研究した。その結果、完全にランダムな参照波面は統計的な意味において位相の基準としての役割を果たし得ることを見いだした<sup>2)</sup>。この考えに基づいて統計的干渉法を提案し発展させ、位相シフトスペックル干渉法における位相シフト量の較正<sup>3,4)</sup>、粗面物体の面外・面内変位計測<sup>5)</sup>およびひずみ計測に応用してきた。また、本方法は非接触な計測法であるので他の接触型の方式では計測が困難となるような柔らかい物体に対しても有効である。最近では植物の生長計測を試み、秒単位での生長の様子が観測されている。

## 2 実験方法

### 2.1 統計干渉法の原理

図1に示すマイケルソンタイプの干渉光学系を例として取り上げ統計的干渉法の原理図を説明する。はじめに述べたように、統計的干渉法ではランダムな波面の干渉を扱いその統計的特性を積極的に利用するものである。

図1に示すように、レーザー（波長 $\lambda$ ）からの光はハーフミラーHMにより2つに分けられそれ

ぞれ粗面物体G1, G2を照明する。粗面物体G2は入射光方向（面外）に変位可能であり、ここではその変位を計測するものとする。2つの粗面物

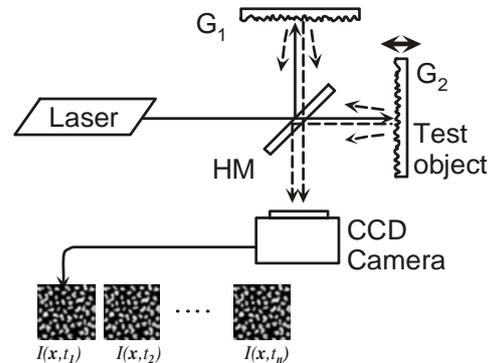


図1 マイケルソンタイプの干渉光学系

体は光学的に十分粗いとする。すなわち表面粗さが光の波長に比べて大きいとすると十分発達した2つのスペックル場がそれぞれ独立に生じる。これらのスペックル場はハーフミラーHMにより再び重ね合わせられランダムな干渉パターンを生じる。観測面（座標 $x$ ）にはCCDカメラが配置されており、粗面物体の変位に伴うランダムな干渉パターンの変化が逐次 ( $t=t_0, t_1, \dots, t_n$ ) 計算機に取り込まれ、フレームメモリに記録される。

### 2.2 全体構成および基本仕様

平成16年度の機能検証成果を踏まえて、平成17年度には「統計干渉計測法検出部の汎用化高速処理と計測範囲拡大」、「露光データの高速露光処理における新規機能追加」、「装置のコンパクト化と品質安定性に向けてのステージ制御面の改良・評価」を目的に開発した。図2に、その全体構成図を示す。開発においては埼玉大学（再委託先）で平成16年度と同様に統計干渉計測アルゴリズムのソフト改良・開発進め、弊社の光学センサ検出系と統合し、その他のハード・ソフト面は全てオプセルにて開発を実施した。

#### ① マルチレーザ露光ユニットの開発 [オプセル]

昨年度は露光ユニットを横一列に配置するレイアウトであったが、本年度は、面付け露光を可能とするようにマトリックス的な基本配置に変更し

た。また、昨年度以上に露光ユニットのコンパクトサイズ化に向けた光学系・機械系および露光制御系の開発を実施した。

さらに、本年度の最も重要な技術課題として、露光データの高速露光処理を可能とする線幅混在パターン描画方式の為に光学系、制御系およびソフトウェアの開発を実施した。

② 統計干渉計測法における処理機能向上

[埼玉大学]

埼玉大学においては、まず統計干渉計測法における高速処理化対応として“間引き処理”“並列プロセッサ処理”による2倍以上の性能向上を検討した。さらに測定可能な計測範囲を拡大するアルゴリズムを開発した。

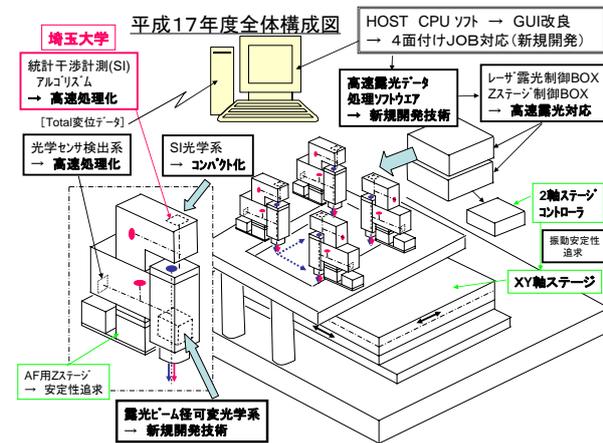


図2. 全体構成図

システム全体の初期基本仕様を以下のように設定して、開発を実施した。

[露光系仕様]

- ・被露光物 : ドライフィルム(38 μm)
- ・レジスト感度 : 約 15~20mJ/cm<sup>2</sup>
- ・基材 : 紙フェノール銅張り基板
- ・露光ビーム径 : 約 φ3~φ120 μm 程度までレンズ交換/絞り自動変更等で切り替え可能
- ・ライン露光速度 : 0.5~5mm/sec

[統計干渉計測部+回折方式 AF 検出系]

- ・検出範囲 : 40mm ライン
- ・統計干渉計測部 : コンパクト化
- ・AF方式 : 回折方式レーザー AF 検出系

[XY ステージ]

- ・吸着テーブル : 200×200mm
- ・有効サイズ : 160×160mm
- ・有効ストローク : ±20mm
- ・ステージ分解能 : 1 μm (full step)
- ・ドライバ分解能 : 50nm (1/20 マルチステップドライブ)
- ・描画原点センサ : X 軸/Y 軸とも両エンドセンサ [オートフォーカス : AF 用 Z ステージ]
- ・ユニット幅 : 30mm
- ・ユニット高さ : 44mm (センター)
- ・ストローク : ±2mm
- ・分解能 : 1 μm (full step)
- ・マルチステップドライバ分割数 : 1~1/256

3 結果及び考察

3.1 統計干渉計測部

サンプリング点のデータ間引きを水平方向に 1/2, 同様に垂直方向に 1/2 行い、トータルでデータ点数を全面素に対して 1/4 の低減化を行った。すなわち 255,800 点から 64,000 点へとデータの削減を行うことにより画像間演算に関する実行時間を 1/4 に高速化した。さらに、CPUとしてデュアルコアCPU (Opteron 280) を使い、画像間演算に関する部分をマルチスレッドプログラムを開発して並列化することにより画像間演算処理にかかる時間をほぼ 1/2 に短縮した。これにより、全体での演算時間は当初の約 30% に高速化された。

図3に描画ユニットの上部に取り付けられた、描画用LDユニットの熱による変形を計測した結果を示す。t=30sec で冷却過程にある描画用LDを off から on へと変化させたときの描画用LD部の熱変動による変位を示す。

図4は t=30sec で描画用LDを小電流駆動から大電流駆動へと変化させた際の描画用LD部の熱変動による変位を示す。これらの実験結果が示すように、統計干渉法による変位計測ユニットは極めて単純な光学系であるにもかかわらず

サブナノメートルオーダーの計測精度を達成していることが確認できた。

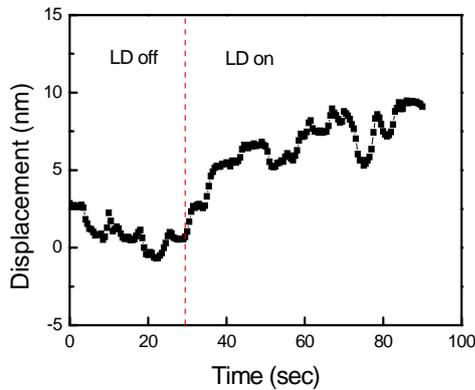


図3 描画LDユニットの熱変形

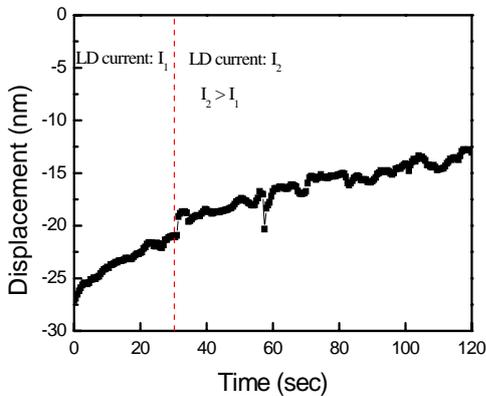


図4 描画LDユニットの熱変形

### 3.2 回折方式 AF 検出系

回折方式によるレーザオートフォーカス制御の効果を以下に示す。図5左は“オートフォーカス制御なし”の状態、露光面に置いた基板の表面形状および傾きを移動幅 40mm のラインで測定した測定値である。図5右は、同じラインを“オートフォーカス制御有り”の状態、Z ステージにフィードバック制御をかけて、変位を測定したものである。

4  $\mu\text{m}$  程度あった基板のソリ、傾きが、AF 制御により 0.5  $\mu\text{m}$  以内に制御されている。この値は対物レンズにより  $\phi 3\text{mm}$  程度に集光した場合でも充分焦点深度内に制御されている。

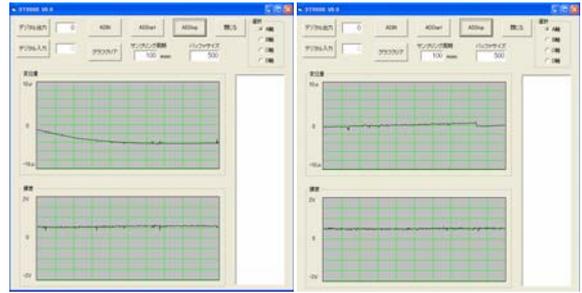


図5. 回折方式 A F

### 3.3 ステージ制御

高精細露光においては、高精度AF制御に加えて、XYステージの振動、速度制御も重要なファクターである。本システムでは、初年度のハーフステップドライバから17年度にはマルチステップドライバに変更してステージ制御の最適化を図った。その評価測定をSAITECにて実施した。振動レベルにおいては、X軸のみ、Y軸のみ、XY同時の測定パラメータ (24種) において測定した。

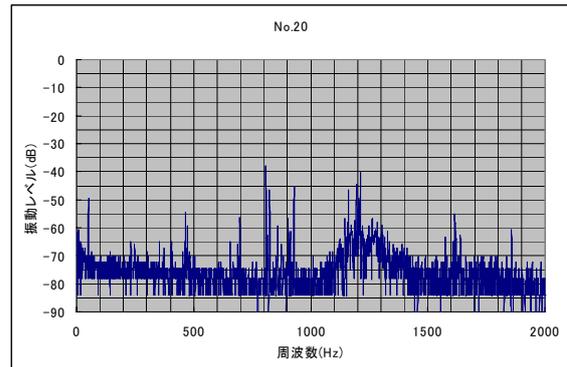


図6. XY 軸 45° 方向移動 : 振動レベル

ハーフステップドライバでの振動レベルから 20dB 以上のレベル低減を達成した。

また速度変動測定においては、レーザ干渉測長機にて速度変動を評価した結果を図7に示す。

今回のボールネジにおけるリード誤差はあるが、図7に示すように速度全体の変動においては“ゆがみ”や“ガタツキ”がなく、ステージ制御については全く問題ないレベルであると判断できる。

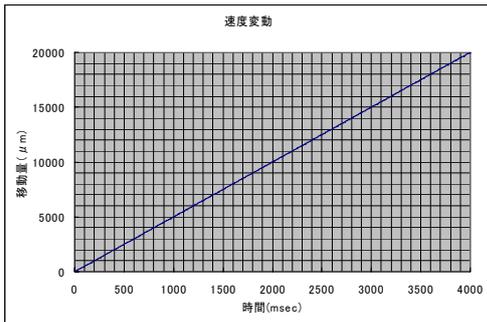
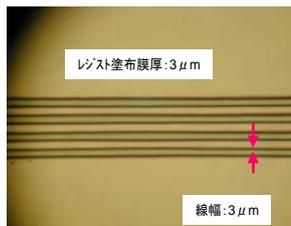


図7. XY軸45°方向移動：速度変動

## 4 まとめ

### (1) 露光サンプル

結果および考察に記載したように微小レーザービーム形成光学系の構築と高精度オートフォーカス機構に加え、ステージ制御の最適化を施すことによって、図8に示すような $3\mu\text{m}$ のL/Sパターン露光をも可能とした。



【オートフォーカス制御有り】

図8.  $3\mu\text{m}$ のL/Sパターン

さらに、平成17年度では図9に示すような連続パターン描画に加え、光学系の対応により線幅が混在するパターンに対しても、“一筆書き”を可能とするデータ制御系も確立した。

このことにより、ウエハ等の微細パターン描画からプリント基板配線板等に至るまでの、幅広いレーザー直描用途に適用が可能となった。

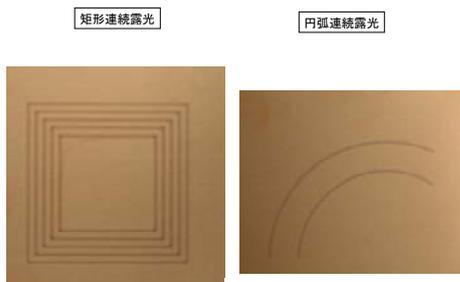


図9. 連続パターン露光サンプル

## (2) 装置外観

レーザー直描装置全体写真

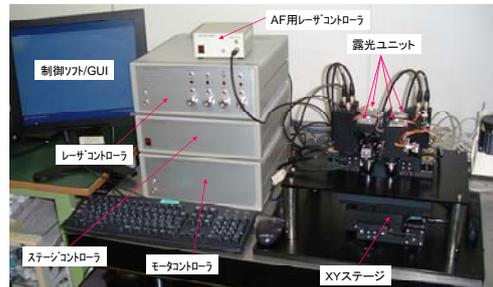


図10. 装置外観写真

装置全体は写真のようにコンパクトな設計・構築をし、要求仕様・用途に合わせて露光ユニットのマルチヘッド化が可能となっている。このため、研究所レベルから試作生産ラインに至るまで幅広い分野での利用が期待できる。

## 謝辞

本研究の、特にステージ制御評価におきまして、SAITEC電子情報技術部の部員の皆様方には2年間ともに測定を含めた御指導、御協力をいただきましたことに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Hariharan, P.: Optical Interferometry, Academic press, Inc. (1985).
- 2) Kadono, H. and Toyooka, S.: Statistical interferometry based on a statistics of speckle phase, Opt. Lett., 16-12 (1991), 883-885.
- 3) 門野博史：スペckル干渉計における液晶位相ソフタ-の較正法, 光学, 20-5 (1991), 273-274.
- 4) Kadono, H., Toyooka, S. and Iwasaki, Y.: Speckle shearing interferometry using a liquid crystal cell as a phase modulator, J. Opt. Soc. Am, A8(1991), 2001-2008.
- 5) 門野博史, 豊岡了：統計的干渉計測法による高精度変位計測, 光技術コンタクト, 32-5(1994), 17-23.1) Keer, L. M., Lin, W. and Achenbach, J. D. : Resonance Effects for a Crack Near a Free Surface, Trans. ASME, J. Appl. Mech., 51, 1 (1986), 65