回折モアレ光を用いた超精密位置決め技法とその精度

正員 劉 京南 (愛知工業大学) 正員 古橋秀夫 (愛知工業大学)
 正員 植田明照 (愛知工業大学) 正員 山田 諄 (愛知工業大学)
 正員 内田悦行 (愛知工業大学)

Precision Position Control Techniques
 Using Moire Signals

Jingnan Liu, Member Hideo Furuhashi, Member Akiteru Ueda, Member
 Jun Yamada, Member Yoshiyuki Uchida, Member (Aichi Institute of Technology)

Precision position control techniques using moire signals have been investigated. First, the calculated results of the moire signals are compared with the experimental results. Good agreements were obtained between these results. Secondly, two position control techniques using moire signals have been investigated under the same experimental conditions. One is a differential moire technique using two grating pairs. The signals obtained by the grating pairs are out of phase 180° each other. In this technique, a differential moire signal between the two moire signals is used as the control signal. In-phase noises in the moire signals are cancelled and the S/N ratio of the signal is improved. Therefore, high positioning accuracy is obtained by this technique. The other is a modified moire technique. In this technique, only one grating pair is used. An inverted moire signal is calculated by a computer from the experimentally obtained moire signal. The positioning accuracies and S/N ratios are compared between these two techniques. The accuracy and the S/N ratio for the differential moire technique were better than those of the modified moire technique. However, the system using later technique is simpler in construction.

キーワード：回折モアレ，精密位置決め，レーザセンシング，リソグラフィ，アライナー

1. はじめに

集積回路の高密度化に伴って回路パターンの微細化が進められている。16Mbit DRAM が量産化され，大規模半導体集積回路は 1Gbit 以上の容量をもつ DRAM に向けて研究開発が進められている。集積回路は，通常十数枚のマスクに描かれた微細な回路パターンを，マスクの数だけ順次ウエハ上に転写して得られる。パターンを転写する際のマスク・ウエハ間の位置決め精度には，パターン最小線幅の $1/5 \sim 1/10$ が要求される。線幅 $0.2 \mu\text{m}$ 以下となる 1Gbit 以上の製造には，十数 nm の位置決め精度が必要となる。

この高精度位置決めを実現するために，光の干渉や回折現象を利用した，回折モアレ法，光ヘテロダイン法，フレネルレンズ法，など種々の方法が提案され，装置化の研究が進められている¹⁾。また，マスクパターンの転写に現在使われている光縮小投影露光装置では，パターン線幅に光の回折限界があり，X 線を用いた等倍露光方式へと研究が進められている。

モアレ技術を応用した位置決め技術は，位置決めマーク

作成の容易な点と，装置が簡素である点から広く研究されてきた。しかし，当初の方法は，回折モアレ光強度が最小となる点で位置決めを行うために，位置決め感度が低い。などの問題点をもっていた。

そこで著者らは，1) 回折モアレ光の強度変化が最大となる点を位置決め点に選べるので，高い位置決め感度が得られる。2) 自動位置決めの制御信号として，2 組の回折格子対から得られる 180° の位相差をもつ 0 次回折モアレ光の差信号を用いるため，マスク・ウエハ間隙の微小変化に影響されず高精度が望める。3) X 線等倍近接露光と光縮小投影露光とにウエハマークが共用できる混成リソグラフィに適している。などの特長をもつ位置決め法を提案してきた²⁻¹⁸⁾。

そして，ベンチテストでの実現可能性実験^{2, 4-6, 10, 12-15)}だけでなく，X 線等倍近接露光用に試作したプロトタイプマスク位置決め装置での基礎実験^{9, 16, 18)}，さらに実際の光縮小投影露光装置に組み込み実験^{7, 8, 11)}を行ってきた。

本論文では，著者らが提案してきたモアレ技術を用いた

位置決めの方法とその制御技法について議論する。まず回折モアレ光の特性を理論計算と実験で詳細に示す。次に、差動モアレ法と修正モアレ法という回折モアレ光を用いた位置決め方法について、同一実験条件での実験結果を示し、精度について議論する。そして本技術の装置化に向けて、最適設計を行うための検討結果を示す。

2. 回折モアレ光の特性

同一ピッチの2枚の回折格子を、縞方向を揃えて所定の間隔で平行に近接配置し、この格子面にレーザー光を垂直に照射すると、その透過光ならびに反射光は各次数に分かれた回折モアレ縞となって現れる。回折次数をN、回折角度を θ_N 、光の波長を λ 、回折格子のピッチをpとすると、 $p \sin \theta_N = N \lambda$ の関係にある。2枚の回折格子の間隔Gを適当に選ぶことにより、各回折光はピッチ方向の相対変位に対してピッチpまたはp/2の周期で周期的に変化する。

回折モアレ光はキルヒホッフの回折理論を用いて計算される³⁾。図1に透過と反射の回折モアレ光の計算モデルを示す。

まず、図1aに示す透過形回折モアレ光の計算方法について説明する。第1回折格子で回折された光の、第2回折格子上的複素振幅 $\Psi_1(x_1, G)$ はフレネル回折積分により、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Psi_1(x_1, G) &= \sum_{m=-M}^M \int_{-W_1/2}^{W_1/2} r^{1/2} (1 + G/r) \exp(-i k r) dx_0 \quad (1) \\ r &= [G^2 + (x_0 + m p - x_1)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

ここで、pは回折格子のピッチ、Gは2枚の回折格子の間隔、kは波数、2M+1はビーム径に対応して回折に寄与するスリット数、W₁は第1回折格子のスリット幅を示す。

さらに、第2回折格子を透過した0次回折光のフラウンホッフ領域の複素振幅 $\Psi_1(\Delta x, G)_0$ は、次式で計算される。

図1 回折モアレ光の計算モデル
(a)透過形 (b)反射形
Fig.1 Calculation model of diffraction moiré.
(a)transmission type, (b)reflection type.

$$\Psi_1(\Delta x, G)_0 = \int_{-W_2/2}^{W_2/2} \Psi_1(x_1, G) dx_1 \quad (2)$$

ここで、 Δx は2枚の回折格子の相対変位、W₂は第2回折格子のスリット幅を示す。

次に、図1bに示す第2回折格子が反射形格子である場合の計算方法について説明する。第1回折格子で回折された光の第2回折格子上的複素振幅 $\Psi_1(x_1, G)$ は、式(1)で求められている。第2回折格子からの反射光の第1回折格子背面上での複素振幅 $\Psi_2(x_0, G)$ は、フレネル回折積分により回折光の重ね合わせとして計算され、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Psi_2(x_0, G) &= \sum_{m=-M}^M \int_{-p/2+\Delta x}^{p/2+\Delta x} \Psi_1(x_1, G) R(x_1 - \Delta x) \\ &\quad \times r^{-1/2} (1 + G/r) \exp(-i k r) dx_1 \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、反射率分布R(x)は次式のように設定した。

図2 0次回折モアレ信号の数値計算結果
(a)透過形 (b)反射形
Fig.2 Calculated results of zeroth order diffraction moiré signals.
(a)transmission type, (b)reflection type.

図3 0次回折モアレ信号の測定結果
(a)透過形 (b)反射形
Fig.3 Experimental results of zeroth order diffraction moiré signals.
(a)transmission type, (b)reflection type.

$$R(x) = \begin{cases} 1 & (|x| < W_2/2) \\ \alpha & (W_2/2 < |x| < p/2) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

再度第1回折格子を透過，回折する0次回折光のフラウンホッフ領域の複素振幅 $\Psi_r(\Delta x, G)_0$ は，次式で与えられる。

$$\Psi_r(\Delta x, G)_0 = \int_{-W_1/2}^{W_1/2} \Psi_2(x_0, G) dx_0 \dots\dots\dots (5)$$

光強度は，複素振幅の2乗として求められる。

図2は，透過と反射の0次回折モアレ信号の，2枚の回折格子の間隔 G を変数とした変位特性の数値計算結果を示す。ここで，実験条件に合わせて透過形では $W_1/p = W_2/p = 0.44$ ，反射形では $W_1/p = 0.44$ ， $W_2/p = 0.56$ ， $\alpha = 0.2$ とした。

0次回折モアレ信号のコントラストは，2枚の回折格子の間隔が狭いフレネル領域内では周期的に変化し，間隔が $G = mp^2/\lambda$ で最大となる。ここで， m は整数である。

これらの特性は，He-Ne レーザを光源とした実験で確認している^{5, 6)}。透過と反射の0次回折モアレ信号の変位に対する測定結果の一例を，2枚の回折格子の間隔 G を変数として図3に示す。回折格子のピッチ $p = 200 \mu\text{m}$ ，使用したHe-Ne レーザの波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ である。測定結果は，図2の数値計算結果とよい一致を示している。

透過形と反射形どちらのシステムも2枚の回折格子の間隔が $G = mp^2/\lambda$ の近傍では，回折モアレ信号が正弦波類似の信号となり位置センシングに適している。

3. 位置決めの方法

位置決めの方法として，差動モアレ法と修正モアレ法と名付けた方法を提案している。

まず差動モアレ法^{2, 4)}と呼ぶ0次回折モアレ光を用いた位置決めの方法を図4を用いて説明する。図4 aに2組の回折格子の配置を示す。第1の格子A，Bに対して第2の格子C，Dはそれぞれ相対変位が $\pm p/4$ 変位している。すなわち $\pm 90^\circ$ の空間的位相差をもつ。ここで，第1の格子A，Bを第2の格子C，Dに対して移動させれば，2枚の回折格子の間隔が mp^2/λ において，図4 bに示すような 180° の位相差をもつ回折モアレ信号 I_1, I_2 が得られる。図4 cに示すこれらの回折モアレ信号の差信号 S_D を制御信号として位置決めを行う。

$$S_D = I_1 - I_2 \dots\dots\dots (6)$$

この方法では，回折モアレ信号の強度が等しく，その差信号が0となる点に位置決めされる。したがって，回折モアレ信号が位置決め点付近で変位に対して急傾斜であるので，高い位置決め感度が得られる。また2枚の回折格子の間隔が mp^2/λ からわずかに変化しても位置決め点は変化しないなどの特長がある。位置決め領域は，位置決め点の両側 $\pm p/2$ である。

次に，修正モアレ法^{14, 15)}と呼ぶ位置決めの方法を説明

図4 差動モアレ法による位置決めの方法
(a) 2組の回折格子の配置 (b) 回折モアレ信号 I_1, I_2 (c) 回折モアレ信号の差信号 S_D
Fig.4 Principle of the differential moire method.
(a) arrangement of two grating pairs,
(b) diffraction moire signals I_1, I_2 ,
(c) difference signal S_D .

する。1組の回折格子対を用いる。まず，回折モアレ信号の最大値 $I_{\max}$ と最小値 $I_{\min}$ を測定する。そして，回折モアレ信号 I からコンピュータで反転信号 I_R を作成する。

$$I_R = (I_{\max} + I_{\min}) - I \dots\dots\dots (7)$$

そして，回折モアレ信号 I とこの反転信号 I_R との差信号 S_M を制御信号として位置決めを行う。

$$S_M = 2I - (I_{\max} + I_{\min}) \dots\dots\dots (8)$$

この修正モアレ法でも，差動モアレ法と同じく回折モアレ信号が位置決め点付近で変位に対して急傾斜であるので，高い位置決め感度が得られる。またこの方法は，システム設計においてハードウェアとソフトウェアの最適化が図られている。

4. 位置決め実験と検討

実際の半導体リソグラフィプロセスでは，第2格子は反射率の高いウエハ上に描かれることになる。しかし回折モアレ特性は反射と透過ではほぼ同じ特性を示すので，ここでは実験の容易な透過形で議論する。

透過形回折格子を用いる差動モアレ法による位置決め実

図5 位置決め実験システム
Fig.5 Schematic diagram of the experimental system.

験の基本実験システムを図5に示す。He-Ne レーザ光を、半透鏡により2光束に分け、2組の回折格子A、CおよびB、Dに入射する。格子A、Bは一体の格子であり、格子C、Dは分離した格子である。格子C、D間の空間的位相差 $\pm p/4$ は、格子Dを載せたXY補助ステージのX軸方向の調整で行う。格子A、Bと格子C、Dの間隙は、移動用XYステージのY軸方向の調整によって設定した。2組の回折格子対からの0次回折モアレ光は2組のフォトダイオードで受光し、それぞれ前置増幅器によって増幅する。両検出出力の最大値と最小値が等しくなるように、片方の光路に入れてある減光器と2組の前置増幅器の利得とオフセットを調節する^{12, 13)}。またノイズは、時定数可変のRCフィルタで低減する。

出力信号はAD変換後マイクロコンピュータに取り込まれる。そして一定の設定待ち時間後に両信号の差がサンプリング処理され、正と負の設定値と比較される。差が正か負かの符号によりステージの移動方向が決められる。また差が正の時には正の設定値と比較され、その大きさが設定値以上であればステージ駆動パルスが出力され、設定値以内であればステージ駆動パルスは出力されない。逆に差が負の時には負の設定値と比較され、その絶対値が設定値以上であればステージ駆動パルスが出力され、設定値以内であればステージ駆動パルスは出力されない。この設定値は、システムの不感帯幅すなわち位置決め精度を決める。

第1格子と第2格子を平行に配置した場合、2枚の格子が干渉計として動作する⁶⁾ので、ここでは、第1格子をわずかに傾けることにより、レーザ光の干渉を防いで実験を行った。

この位置決め制御実験では、回折格子のピッチ $p = 25 \mu\text{m}$ 、He-Neレーザ光の波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ 、2枚の回折格子の間隙 $G = 1\text{mm}$ 、移動用ステージの1パルス当りの最小変位は16nm、ノイズ低減用RCフィルタの時定数は0.3sである。また、AD変換器の分解能は12bit、コンピュータの設定待ち時間は0.3s、システムの不感帯幅を決める設定値は $\pm 16\text{nm}$ である。

図6 回折モアレ信号のノイズ位相特性
(a)差動モアレ法 (b)修正モアレ法

Fig.6 Noise phase characteristics of diffraction moire signals.
(a)differential moire method,
(b)modified moire method.

図7 位置決め実験結果
(a)差動モアレ法 (b)修正モアレ法
Fig.7 Experimental results of positioning.
(a)differential moire method,
(b)modified moire method.

システムの発振を回避し、位置決め精度を高めるためには、回折モアレ信号の差信号に含まれるノイズを小さくし、さらに移動ステージの1パルス当りの変位を小さくすることにより、不感帯幅を狭く設定できればよい。その際ノイズはシステムの時定数に反比例する。また高速化のためには、システムの時定数を小さくし、コンピュータの待ち時間を短くするとよい。

差動モアレ法と修正モアレ法のノイズの位相を調べる。図6は、レーザ光遮光パルス挿入による回折モアレ信号のノイズ位相特性の一例を示す。この遮光パルスは、図5に示す位置決め実験システムにおいて、レーザと半透鏡間の光路中に遮光板を瞬時だけ挿入する方法で作られた。信号強度はAD変換器の出力をdigits表示している。ステージの位置は任意の位置である。図6aの差動モアレ法では、光源ノイズやシステム共通ノイズなどは、両回折モアレ信号 I_1 , I_2 に同相で表われるので、差信号のS/N比は向上する。またランダムノイズも差を取ることでS/N比が向上する。これに対して修正モアレ法では、図6bに示すように回折モアレ信号 I とコンピュータで作成した反転信号 I_R には逆相ノイズが多く見られる。逆相ノイズは式(7)から基本的に現われる。したがって、差信号のS/N比は向上しない。位置決め精度は、差動モアレ法の方が修正モアレ法に比べて良いといえる。

図7に、差動モアレ法と修正モアレ法の位置決め実験結果の一例をそれぞれ示す。位置決めされた時刻からの制御信号の位置決め記録である。2本の破線は、正と負の設定値を示し、この不感帯幅は $\pm 16\text{nm}$ に相当する。位置決め点近傍では変位と差信号が比例しているので、差信号の大きさを変位で校正している。実験結果から、差動モアレ法のノイズの方が修正モアレ法のノイズに比べて小さい。差動モアレ法ではさらに精度の向上が期待される。

5. おわりに

得られた結果をまとめる。

- (1) 回折モアレ光の数値計算結果と実験結果は、透過形と反射形どちらもよい一致を示している。2枚の回折格子の間隙を適当に設定すれば、正弦波に類似したセンシング信号が得られるので、制御信号に利用できるといえる。
- (2) 2組の回折格子対を用い、 180° の位相差をもつ0次の回折モアレ信号を用いる差動モアレ法は、同相ノイズが減算され、差信号のS/N比の向上が可能な、精度の高い位置決め技法であるといえる。
- (3) 1組の回折格子対を用い、コンピュータで反転信号を作成する修正モアレ法は、シンプルな機構の位置決め技法であるといえる。

謝辞 本研究の一部に、文部省科学研究費補助金、中部電力基礎技術研究所研究助成ならびに堀情報科学振興財団研究助成を受けている。インド国立物理学研究所 Dr. V. T. Chitnis, Dr. Rina Sharma, Mr. A. K. Kanjilal, 名古屋大学

Dr. B. P. Singh 各氏から有意義な討論を得た。

(平成7年4月28日受付, 平成7年8月4日再受付)

文 献

- (1) 内田悦行・原憲司: 「いま注目される超精密位置決め用センサー回折モアレ法, 光ヘテロダイン法, フレネル・レンズ法」, M & E, 15, 108~115 (1988)
- (2) 服部秀三・内田悦行・V. T. Chitnis: 「モアレ干渉法を用いた超精密自動位置決め技術」, 精密機械, 51, 135~140 (1985)
- (3) V. T. Chitnis, Y. Uchida, K. Hane and S. Hattori: "Moire Signals in Reflection", Opt. Commun., 54, 207~211 (1985)
- (4) S. Hattori, Y. Uchida and V. T. Chitnis: "An Automatic Super-Accurate Positioning Technique Using Moire Interference", Bull. Jpn. Soc. Prec. Eng., 20, 73~78 (1986)
- (5) Y. Uchida, M. Furukawa, K. Hane and S. Hattori: "Automatic Alignment Technique for X-ray Lithography Using Moire Signals in Reflection", SPIE, 661, 95~101 (1986)
- (6) Y. Uchida, S. Hattori and T. Nomura: "An Automatic Mask Alignment Technique Using Moire Interference", J. Vac. Sci. Technol., B5, 244~247 (1987)
- (7) T. Nomura, S. Kimura, Y. Uchida and S. Hattori: "Moire Alignment Technique for the Mix and Match Lithographic System", J. Vac. Sci. Technol., B6, 394~398 (1988)
- (8) D. Sugimoto, S. Kimura, T. Nomura, Y. Uchida and S. Hattori: "Moire Alignment Technique for Projection Photolithographic System", SPIE, 1088, 258~267 (1989)
- (9) H. Miyake, T. Iida, K. Miwa, T. Shibata, A. Yoshida, Y. Uchida and S. Hattori: "Automatic Mask Inspection System Using X-ray As a Source", SPIE, 1089, 193~201 (1989)
- (10) K. Hara, Y. Uchida, T. Nomura, S. Kimura, D. Sugimoto, A. Yoshida, H. Miyake, T. Iida and S. Hattori: "An Alignment Technique Using Diffracted Moire Signals", J. Vac. Sci. Technol., B7, 1977~1979 (1989)
- (11) D. Sugimoto, M. Eishima, S. Kimura, T. Nomura, Y. Uchida and S. Hattori: "Projection Moire Alignment Technique for Mix-and-Match Lithographic System", SPIE, 1263, 306~311 (1990)
- (12) Y. Takada, Y. Uchida, Y. Akao, J. Yamada and S. Hattori: "Super Accurate Positioning Technique Using Diffracted Moire Signals", SPIE, 1332, 571

～576 (1990)

- (13) Y. Takada, Y. Seike, Y. Uchida, Y. Akao and J. Yamada : "A Microcomputer Controlled Alignment System Using Moire Sensors", Proc. of KACC, 2, 1961～1965 (1991)
- (14) V. T. Chitnis, R. Sharma, A. K. Kanjilal, R. Narain and Y. Uchida: "Computer Controlled Mask Aligner Using Modified Moire Technique", Int. Progress in Prec. Eng., 980～991 (1993)
- (15) R. Sharma, G. A. Bhat, A. K. Kanjilal, R. Narain, Rashmi, V. T. Chitnis and Y. Uchida: "Mask Alignment Technique Using Phase Shifted Moire Signals", SPIE, 1927, 555～565 (1993)
- (16) H. Furuhashi, Y. Uchida, A. Ohashi, S. Watanabe and J. Yamada: "An Automatic Mask Alignment System Using Moire Sensors", Proc. of KACC, 2, 545～549 (1993)
- (17) A. K. Kanjilal, R. Narain, R. Sharma, V. T. Chitnis, B. P. Singh and Y. Uchida: "Automatic Mask Alignment without a Microscope", Advanced Technol. in I & M, 2, 849～852 (1994)
- (18) R. Sharma, N. D. Kataria, V. N. Ojha, A. K. Kanjilal, R. Narain, V. T. Chitnis and Y. Uchida: "Photolithographic Mask Aligner Based On Modified Moire Technique", SPIE, 2440 (1995)

劉 京南 (正員) 1955年2月10日生。1977年中国南京工学院(現東南大学)自動制御工学科卒業。同年南京工学院自動制御工学科助手, 講師を経て, 現在, 東南大学自動制御工学科助教授。1993年から愛知工業大学訪問研究員として, 光技術応用システムに関する研究に従事。

古橋 秀夫 (正員) 昭和37年4月4日生。平成2年名古屋大学大学院工学研究科博士課程終了。

同年4月名古屋大学工学部電子工学科助手平成4年4月愛知工業大学情報通信工学科講師。工学博士。主としてレーザ応用及び気体レーザの基礎に関する研究に従事。応用物理学会, レーザー学会, IEEE会員。

植田 明照 (正員) 1943年2月6日生。1965年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年4月日立製作所入社。1994年4月愛知工業大学

教授。工学博士。IEEE会員。主として, 電力系統用, 産業用, 車両用の電力変換装置の研究開発に従事。1983年IEEE-IAS論文賞1990年電気学会論文賞受賞。

山田 諄 (正員) 昭和19年4月25日生。昭和42年名古屋大学工学部電子工学科卒業。昭和47年

同大学大学院博士課程終了。同年4月名古屋大学工学部助手。昭和49年愛知工業大学電子工学科講師, 助教授を経て, 現在, 教授。工学博士。主としてレーザプラズマ及びレーザ計測に関する研究に従事。日本物理学会, レーザー学会会員。

内田 悦行 (正員) 昭和15年12月21日生。昭和41年早

稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了名古屋大学工学部電子工学科助手。愛知工業大学電子工学科助教授。現在, 同大学情報通信工学科教授。工学博士。主として光技術応用システムに関する研究と教育に従事。電子情報通信学会, 精密工学会, レーザー学会, 応用物理学会, SPIE会員。