HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Optical Amplifying Aberration Measurement for Semiconductor Optical Aligner [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	諏訪, 恭一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第6955号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58987
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Kyoichi_Suwa_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　諏訪 恭一

学 位 論 文 題 名

Study on Optical Amplifying Aberration Measurement for Semiconductor Optical Aligner
(半導体露光装置に於ける光学増幅型収差計測の研究)

ガラス基板上の原画をシリコンウエファー上に投影レンズを介して露光全平面にわたり線幅均一性良く転写する機械を半導体露光装置という。微細化の進展に応じて投影レンズの解像力は急速に高まり、レンズを搭載した露光機本体でレンズ各種収差の計測が必要となる。また、重ね合わせに必要な露光装置の限界位置ずれ精度を測定する必要性もある。レンズの収差計測と露光した微細線幅均一性計測は、従来から、走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用して、レジスト像で凹凸を繰り返す周期構造線群の線幅変化量を計測し求めていた。しかし、処理時間の長さと電子線によるレジストのダメージが問題とされている。また露光装置本体の重ね合わせ限界精度計測は、計測に使用する光学センサーよりも一桁高精度であることが要望される。

このような研究背景の中、本研究は、レンズの分類 5 種収差計測、即ち、球面収差、コマ収差、非点収差、歪曲収差 (Distortion)、像面湾曲に関して大幅な計測精度向上を目的とした計測手法の研究をおこなった。さらに、露光装置本体の重ね合わせ限界精度計測向上を並行して研究し、その成果を上記 Distortion 計測へ並行採用した。研究の前提には、精度向上において計測機器の精度は従来と同等とした。したがって、計測対象の光学像を何らかの手段で増幅する研究を行った。研究内容は、光学像を強度増幅する手法と光学像を位置増幅する手法とに分かれる。

第 1 章では、本研究にいたる背景と問題点を叙述し、次いで光学増幅の概念、強度増幅と位置増幅の差を述べた後、本論文の構成について記す。

第 2 章では、光学強度増幅を用いるレンズコマ収差計測手法を報告する。筆者は、世界最初に開発した実験手法により、コマ収差原因の滲み像波形の左右に現れる物体像が、空間的コヒーレンスの良い光源にて明視野背景光で強度増幅される事象を発見した。次に、左右像強度の差をコマ収差量とするコマ収差計測を開発した。本章の最初に、これらの開発と強度増幅の原理を述べる。次に、フーリエ結像論を用いてマスク上の単一開口のコマ収差影響の像面結像を計算し、本計測の特徴である左右空間像端に現れる非対称なピーク像の強度最大値を導出する。そして、コマ収差量は左右当該ピーク強度の差分量であることを示す。コマ収差計測の実用に使われる 5 本線群の線幅比率の最適解は比率 0.5 であり、その感度は単一開口より高感度であることを示す。

第 3 章では、光学位置増幅を用いるレンズ最適焦点位置計測手法を報告する。楔物体の露光レンズによる結像は、楔先端位置がその幅よりも焦点変化で非線形に数十倍で位置変化する量となり、すでに実用化されているが、その最初の実例報告を行う。さらに、本論文で、周期構造楔からレンズに向かう空間周波数が、レンズの有限開口で限定されて再結像する楔の位置増幅を考究する。計測データ処理において、楔の予測される位置変化は、正確な最適焦点を求めるのに必要となる。コヒーレント照明下で楔先端位置の位置変化量は、余弦関数となることを解明した。また、経験的に露光に際して半導体回路線幅を最適に露光する露光量で楔位置の変化が最大になる現象があるが、その解明と増幅率計算をおこなった。本計測は像面湾曲計測を焦点位置計測で行うものとなる。

第 4 章では、光学位置増幅を用いる露光した微細線幅の計測手法の報告を行う。微細線幅は、Distortion を除くレンズ収差がすべて含まれているので最終計測に多用される。微小角度で同質の群線を 2 回露光した楔を作成して、線幅変化を数十倍増幅する手法の研究を行った。本方式は、幾何学交差角度により線幅が長さに増幅される拡大手法であり、線幅自動光計測の実例と結果について述べる。なお、本手法は光計測のみならず SEM 計測にも有効となる。

第 5 章では、光学位置増幅を用いて露光装置の位置ずれ計測手法について報告する。この手法をレンズ歪曲収差 (Distortion) 計測にも使用する。一般に、モアレ計測は対象物に投影した縞が物体の高低差で変形されて空間に作成され、その変形縞をデジタルセンサーにて計測する。この時に何らかの手段で、投影モアレ縞を左右に振動させて極性を求めている。然しながら、露光機の位置ずれ計測に繰り込むモアレ手法は、レジスト像として記録する為にレジスト像にモアレ効果を入れ込む必要があり、また位置の +-極性をモアレ像に繰り込む必要もあり、モアレ計測分野の難問であった。本論文では、問題解決のためにモアレ交差角度がグループごとに角度 +-符号を代えるモアレのグループ構成新考案 Alternative Directional Moire (ADM) を提示している。モアレ計測誤差の厳密解を求めると同時に、実験によりモアレ倍率と精度向上が比例することを確認した。

第 6 章では、4 分野で得られた研究成果のまとめを行った。

1) 光学像強度増幅のコマ収差計測に成功した。

可干渉性を有する照明条件において、コマ収差を有する光学系を通過した物体の収差像振幅を、明視野背景光振幅が干渉してコマ収差像を増幅する光学的強度増幅であることを示した。これは、光学計測の新原理である。奇関数収差のコマ収差は、左右像強度差が収差量に応じた線形量である現象であり、このことを理論解析と数値計算で確認した。本手法は計測手段が簡単であり、また計測範囲が線形な偏位計測ゆえ精度が従来比で 10 倍以上高いコマ収差計測手法である。本新原理は、レンズ収差計測における新しい高精度計測の可能性を示した。

2) 光学像位置増幅の最適焦点位置計測に成功した。

楔物体の露光レンズによる結像では楔先端位置が、その幅よりも焦点変化で非線形に数十倍位置変化する量となる。変化量に対して先端を回折格子とし、光学計測手法で最適焦点位置計測を達成できることを示した。コヒーレント照明下で、楔先端位置の位置変化量の関数を解明した。位置増幅結果と従来手法の増幅率計算をおこない、実測値の妥当性を示した。光学計測で焦点位置計測、像面湾曲計測が可能となり、半導体製造分野での計測時間短縮に大きく貢献している。

3) 光学像位置増幅の線幅計測に成功した。

交差角が小さな平行線を異なる時間で 2 重露光すると、幅が長さに数十倍で位置増幅される楔をレジスト上に形成できる。楔を回折格子形状につくり長さを光学計測し、線幅を数値変換から求めた。線幅 200nm 前後の報告であるが原理的に線幅縮小が可能であり、今後のたとえば、最先端半導体の線幅 20 ナノメータ計測等に応用できる。

4) 光学像位置増幅の位置ずれ計測に成功した。

モアレ計測に正負符号を繰り込む目的で、正方向と負方向とで角度の異なるモアレを最低 2 回交互に組み合わせる新手法を示した。露光機の位置ずれ計測や Distortion 計測に、上記モアレを 2 回露光で作成して位置を大幅に増幅でき、実験で少なくとも従来比 30 倍の再現性が得られた。本手法は歪曲収差計測、位置ずれ計測などに広く応用できる。本手法は、半導体の超微細化を対象とする応用物理計測の各分野への適応可能性がある。