

称号及び氏名 博士（工学） 山根 武

学位授与の日付 平成 17 年 11 月 20 日

論文名 「紫外顕微鏡による  
フォトマスク寸法測定に関する研究」

論文審査委員 主査 中山 喜萬  
副査 堀中 博道  
副査 平井 義彦

## 論文要旨

半導体デバイスの大容量化や高速化は、半導体高集積回路 (Large scale integration: LSI) パターンの微細化を加速させ、1980 年後半で  $1\mu\text{m}$  程度であった LSI パターンの幅は、現在では約  $100\text{nm}$  に達している。LSI パターンは、露光装置にてフォトマスクのパターンをウェハに転写することによって形成される。現在使用されている ArF エキシマレーザー露光装置の光源波長は  $193\text{nm}$  であり、露光波長の半分程度の大きさのパターンを作製するため、解像度不足を補う高感度レジストなどの「超解像技術」が利用されている。この超解像技術によりフォトマスクパターンの僅かな寸法変動が強調されてウェハ上に転写されてしまうため、フォトマスクパターンに対しては微細化のみならず高精度化がより厳しく求められるようになった。

フォトマスクを製造する際、形成されたパターンの寸法を測定し、寸法ばらつきや所望値とのずれ量を検査している。この寸法測定においても十分な測定精度が求められている。寸法測定における誤差としては、①測定装置自身による測定値のばらつき等による相対誤差、②基準とする寸法に対する絶対誤差の 2 点が挙げられる。①については概ね許容できるレベルまで改良されている。一方②については、基準とする寸法は本来ウェハへ転写される像(ウェハ上空間像)への影響を考慮して定義されるべきにも拘わらず、フォトマスク内で「閉じて」定義される場合が多かった。

現在、寸法測定に使われている装置の一つである紫外顕微鏡は露光装置に類似した光学系を持ち、ウェハ上空間像によって定義された寸法を再現するのに有利と考えられる。しかし、現在まで紫外顕微鏡による測定値とウェハ上空間像の値との一致性に関しては殆ど報告されていなかった。また紫外顕微鏡にて微細なパターン寸法を測定する場合、十分にパターンが解像されないため基準寸法と測定値の線形性が失われるという問題点があった。

本論文はフォトマスク寸法の測定技術を高精度化するため、ウェハ上空間像の上で基準寸法を定義し、これに一致した値を紫外顕微鏡で得る方法について研究した成果をまとめたものである。

本論文は7章より構成され、以下に各章の概要を述べる。

第1章では、フォトマスクパターンの微細化と高精度化に対する要請について整理し、本研究の位置づけを明確にし、次いで本論文の目的と概要について述べた。

第2章では、光リソグラフィ技術の概要、フォトマスクの構造と作製方法、フォトマスクパターンの寸法の測定方法および測定装置の概略について述べた。現状の寸法測定における問題点と課題として以下の3点を挙げた。

#### ① 寸法定義に関する問題点と課題

フォトマスクパターンの設計データは、これを基に計算されるウェハ上空間像が所望のものと一致するように決定される。しかし従来のフォトマスクパターンの寸法は、パターンの物理的な寸法を基準として定義しており、仮に測定値が設計データ上のパターン寸法と一致していても、実際のウェハ上空間像は所望のものと必ずしも一致しない問題があった。よって両者が一致するような基準寸法を定義する必要がある。

#### ② パターンの側壁形状に関する問題点と課題

パターンの側壁形状は、製造上の理由によりばらつきが生じる問題がある。パターンの側壁形状の変化は寸法測定値やウェハ上空間像にそれぞれ影響(側壁効果)を与える。両者の側壁効果が一致していない場合、測定値が同一のパターンであっても形成されるウェハ上空間像は必ずしも同一とは限らない。そこで現在使用されている寸法の測定装置である紫外顕微鏡と走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscope: SEM)の側壁効果を調査し、ウェハ上空間像の側壁効果と比較する必要がある。

#### ③ 微細パターンに関する問題点と課題

ウェハ転写時の焦点深度を向上させるなどを目的として、露光装置の波長程度の幅を持つ解像補助(Sub-resolution assist feature: SRAF)パターンを配置させる場合が多くなっている。このような微細パターンを紫外顕微鏡にて測定する場合、十分にパターンが解像されないため、寸法測定値と基準寸法の線形性が維持されない問題がある。そこで、この線形性を向上させる手法を検討する必要がある。

第3章では、従来のフォトマスクパターン寸法の定義法の問題点を明確にした。従来の寸法定義の例として、パターンの両側壁それぞれの中央位置間距離を寸法と定義することを想定した。この定義による寸法を原子間力顕微鏡にて測定し、得られた値から部分コヒーレント結像計算にてウェハ上空間像を求めた。この計算に必要な遮光膜の位相シフト量は、筆者らが開発した偏光顕微鏡に位相シフト干渉法を組み合わせた手法にて測定した。得られた計算像と実際のウェハ上空間像を比較し、両者に差があることを明らかにした。

次に、この問題点を解決する寸法定義を考案した。フォトマスクパターンの設計データから計算されるウェハ上空間像が実際のウェハ上空間像に一致するように設計データを決定し、この決定された設計データ上のパターン寸法を基準とする定義である。この定義による基準寸法を CDAD (Critical dimension through aerial image of design) とした。また CDAD は露光装置の光学条件に依存しないことを実験により検証し、CDAD は基準寸法として問題がないことを確認した。

第4章では、寸法測定用の装置として主に使用されている紫外顕微鏡と SEM による測定値の側壁効果を調査した。各測定値の側壁効果と、第3章で定義した CDAD の側壁効果を統計手法にて比較した。その結果、紫外顕微鏡による測定値と CDAD の側壁効果は同一とみなせること、SEM による測定値と CDAD は同一でないことを示した。

次に有限要素法による電場計算を行ってパターン全体を透過する光量を求め、透過光量から寸法を換算した。得られた換算寸法と CDAD の側壁効果を比較し、両者が同一とみなせることを示した。CDAD の側壁効果は透過光量に反映されている。従って紫外顕微鏡では透過光を用いているために両者の側壁効果が一致し、一方 SEM は透過光量に関する情報を持たないために CDAD と側壁効果が異なる。

また2つの光源を持つ走査型共焦点レーザー顕微鏡を用い、側壁効果の違いによって側壁幅を予測できる事をシミュレーションと実験により確認した。

第5章では、紫外顕微鏡による寸法測定値と CDAD の側壁効果が一致する理由について考察した。露光装置と紫外顕微鏡の最も大きな違いは対物レンズ開口 (Numerical aperture: NA) であり、紫外顕微鏡では露光装置に比べて多くの回折光が結像に寄与する。側壁形状が変化しても、通常側壁部の幅は波長に比べて十分に小さいため、パターン全体を透過する光量が同じであれば同一の回折光を出す物体として近似できることを回折理論にて説明した。これを基に、共に透過光量に支配されている紫外顕微鏡の寸法測定値と CDAD の側壁効果が、同一とみなせることを示した。また、側壁部の幅が大きくなると上記の近似精度が低下し、紫外顕微鏡の寸法測定値と CDAD の差に変動が生じることを示した。

次に、紫外顕微鏡による寸法値と CDAD の差の変動(オフセット変動)について、シミュレーションと実験を用いて検証した。電場計算と部分コヒーレント計算を用いてオフセット変動を求めた結果、現状の側壁幅の変動から見積もられるオフセット変動は 3nm 以下であり、測定誤差としては許容範囲内であることが確認できた。実験の結果、実際よりも大きい側壁幅変動レンジ(25nm)においてもオフセット変動は 2.6nm と許容範囲内であることが確認できた。従って紫外顕微鏡の寸法測定値にある一定値を加えて補正(オフセット補正)することにより、十分な精度にて CDAD が得られることが確認できた。

第 6 章では、微細パターンを紫外顕微鏡にて測定する際の問題点について述べた。紫外顕微鏡の寸法測定値は従来、像プロファイルのしきい値間の距離によって寸法を出力していた。この方法(従来法)では、紫外顕微鏡にてパターンが十分に解像されない場合、CDAD に対する測定値の線形性が失われることを示した。

次に、この問題点を解決する測定方法として、シミュレーションアシスト(Simulation assist: SA)法を考案した。この方法では、紫外顕微鏡にてパターンの像を取得し、一方で設計データから紫外顕微鏡像を計算し、顕微鏡像と計算像が同一になるまで設計データの修正と計算像の取得を繰り返し、最終的に得られた設計データ上のパターン寸法を寸法測定値として出力する。従来法では 0.4 $\mu\text{m}$  以下のパターンで線形性が失われたのに対し、SA法では 0.2~0.25 $\mu\text{m}$  まで線形性を維持でき、解像補助(SRAF)パターンの測定が可能となった。

更に、SA法の測定精度について調査した。透過率と位相差の不確かさや光量変動から生じる測定誤差は問題ないレベルであること、従来法とほぼ同等の繰り返し測定再現性が得られること、ArF-HT マスクの穴パターンでは繰り返し再現性に向上が見られることを示した。従って十分に実用化が可能であることを確認できた。

第 7 章では、本研究で得られた成果について総括し、今後の展望について述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、半導体高集積回路用のフォトマスクパターンの微細化と高精度化において要求される基準寸法に対する測定誤差の低減を目的として、基準寸法の取り方および紫外顕微鏡による結像について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 従来法のフォトマスクパターン寸法（パターンの両側壁それぞれの中央位置間距離）を原子間力顕微鏡にて測定し、これを基に部分コヒーレント結像計算にてウェハ上の像を求めた。これを実際のウェハ上の転写像と比較し両者に差があることを明らかにした。これを解決するため、フォトマスクパターンの設計データから計算されるウェハ上の空間像が実際のものに一致するように設計データを決定し、このパターン寸法（CDAD）を基準とした。
- (2) 紫外顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)による寸法測定値の側壁効果を調査し、紫外顕微鏡による測定値とCDADの側壁効果は同一とみなせること、SEMによる測定値とCDADは同一でないことを示した。有限要素法による電場計算はこのことを裏付けた。
- (3) 側壁形状の変化があっても、通常側壁部の幅が波長に比べて十分に小さいため、パターン全体を透過する光量が同じであれば、同一の回折光を出す物体として近似できることを回折理論によって明らかにし、紫外顕微鏡の寸法測定値とCDADの側壁効果が同一と見なせることを示した。
- (4) 紫外顕微鏡ではパターンが十分に解像されない場合、CDADに対する測定値の線形性が失われることを示した。この解決法として、紫外顕微鏡にてパターンの像を取得し、一方で設計データから紫外顕微鏡像を計算し、顕微鏡像と計算像が同一になるまで設計データの修正と計算像の取得を繰り返し、最終的に得られた設計データ上のパターン寸法を寸法測定値として出力する方法を考案した。従来法では $0.4\mu\text{m}$ 以下のパターンで線形性が維持できなかつたのに対し、この方法では $0.2\sim 0.25\mu\text{m}$ まで線形性を維持できることを示した。

以上の諸成果は、半導体高集積回路のフォトマスク検査の際に課題となっている基準寸法と測定値のずれを解消するために重要な知見を与えるとともに、波長より微細な寸法変動に対する光学的取り扱いについても有益な情報を提供したものであり、本分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。