博士論文（要約）

透明試料の絶対厚さ測定のための
波長走査縞解析に関する研究

金　亮鎭

半導体チップの微細化及びコストダウンのために，光リソグラフィーで用いるシリコンウエハー及びそのパターンの原版となるフォトマスクは大口径化し，細線化してきた．それに伴ってマスクガラスに要求される表面平坦度や光学的厚さ分布，屈折率の均一性も益々厳しくなってきている．近年注目を浴びている極端に短い波長を用いる EUV リソグラフィーでは用いられているマスクガラスが従来の透過型ではなく反射型となっているのでマスクガラスの表面平坦度や光学的厚さ分布への均一性は従来のマスクガラスよりももっと厳しくなっている．表面平坦度を測定する手段としては走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡等があり，縦分解能 0.1 nm 以上と高い分解能を有しているが，点計測であり，測定に 長い時間が必要となる．本研究では大面積・非接触での測定が可能な光干渉計測に注目し，その中でも多層試料の測定に適用出来る波長走査干渉法に注目した．さらに，半導体チップや LNB ウエハーのような高反射率試料の測定には縞コントラストが低下するという問題点があり，従来の光干渉計測を用いた測定技術では縞コントラストの低下の問題に対処出来ていない．また，マスクガラスのような透明試料の光学的厚さ分布の絶対値を高分解能・面計測で精密に測定する技術は未だに開発されていない．したがって，本論文では波長走査干渉法を用いた透明試料の絶対厚さを精密に測定する手法の開発を研究の目的とする．

第 1 章では半導体産業を支える露光装置の構成要素であるマスクガラスの産業界からの要求条件に関して述べる．その次に一般的な光干渉計測に原理について述べ，代表的な光干渉計である機械式位相シフト法，波長走査干渉法，白色光干渉法について叙述する．また，高反射率試料の測定において問題となる縞コントラストの低下と透明試料の絶対厚さに関して述べる．

第 2 章では測定に一般的に用いられている干渉計測での位相検出の原理に関して述べる．二光束干渉と多光束干渉の減少を述べ，波長走査を用いて位相を変化させ，位相を検出する具体的な位相検出アルゴリズム及びに位相検出アルゴリズムを視覚的に表した周波数表現に関して述べる．また，位相検出アルゴリズムの位相検出精度に大きな影響を与える，位相シフトの際に生じる位相シフト誤差に関して述べる．最後に高調波成分，位相シフト誤差と高調波と位相シフト誤差の間で発生するカップリング誤差への補正能力の観点より従来の位相検出アルゴリズムを分類し，透明試料の厚さ成分が測定可能な代表的な位相検出アルゴリズム（Larkin-Oreb ***N*** + ***1*** アルゴリズム，Surrel ***2N*** – ***1*** アルゴリズム，de Groot ***13*** アルゴリズム，日比野 ***19*** アルゴリズム，花山 ***2N*** – ***1*** アルゴリズム）を紹介する．

第 3 章では透明試料の光学的厚さの絶対値を測定するための提案手法に関して述べた．波長走査干渉法の周波数測定（DFT 解析）の前後において位相測定（位相シフト法）を行うことで中心波長での光学的厚さ分布の絶対値を求めることが出来る．しかし，求められた中心波長での光学的厚さ分布の絶対値は通常の位相屈折率ではなく群屈折率を用いた光学的厚さであり，

DFT 解析の前後において行われる位相シフト法で生じる誤差が合成波長によって増幅され縞模様の系統誤差が著しく観察される．ここで，測定試料となる合成石英の Sellmeier の分散式を用いると中心波長での光学的厚さ分布の絶対値を両端波長での光学的厚さ分布の絶対値に変換出来る．また，光学的厚さ分布の絶対値が位相シフト法によって得られる光学的厚さの変動成分と一様成分より構成されていると捉え，一様成分と変動成分の和と波長走査干渉法と Sellmeier の分散式より得られた光学的厚さ分布の絶対値との間での空間積分が最小となるように最小二乗法と相関的合致法を用いて一様成分を決定する．求められた一様成分に変動成分を足すことによって，系統誤差の低減された光学的厚さの絶対値を得ることが出来る．提案する測定手法によって得られる測定不確かさは光源波長の測定不確かさと位相シフト法で用いる位相検出アルゴリズムの位相検出能力に依存している．光源波長の測定不確かは実験で用いる波長計の不確かさであり，最終的に測定精度は位相検出アルゴリズムの測定不確かさに依存する．

第 4 章では波長走査時に縞コントラストを最大に維持するために位相検出アルゴリズムの満足すべき条件である縞コントラスト最大条件に関して述べる．まず，理想化された二面干渉ではなく反射率を考慮した多面干渉での干渉縞強度式と縞コントラストを定義し，試料の反射率の増加と共に縞コントラストが低下する現象を説明する．次に，波長走査時の縞コントラストが位相検出アルゴリズムのサンプリング振幅及びに位相シフト量で表現されることを示す．定義された縞コントラストより位相シフトの線形誤差がない時に縞コントラストが最大になるための縞コントラスト最大条件を導いた．縞コントラスト最大条件はサンプリング振幅と位相シフト量で表される 2 つの線形方程式の形となっている．また，実空間での縞コントラスト最大条件を周波数空間に拡張し，縞コントラスト最大条件の周波数表現を導いた．高調波信号，位相シフトの線形誤差，カップリング誤差の補正能力を持ち，また，縞コントラスト最大条件を満足する位相検出アルゴリズムを設計するのに必要な最小画像枚数は $2N-1$ 枚であり，この値は Surrel によって提案された特性単位円に二重根を配置した際に得られる $2N-1$ アルゴリズムであることを確認した．縞コントラスト最大条件に基づいて 11 アルゴリズム，15 アルゴリズムを導出し，最後に位相シフトの線形誤差のみならず 1 次非線形誤差を補正出来る $3N-2$ アルゴリズムを導出した．

第 5 章では位相シフトの 2 次非線形誤差まで補正出来る $4N-3$ アルゴリズムを導出した．$4N-3$ アルゴリズムは多項式の窓関数と 離散 Fourier 項で構成されている．$4N-3$ アルゴリズムは Surrel の特性単位円に四重根を配置することによって得られ，サイドローブレベル 0.289%であった．また，Surrel の特性単位円に配置する根の次数を上げると，窓関数の形がガウス関数に近づくことが確認された．多項式の窓関数と従来の窓関数（三角窓関数，von Hann 窓関数，Hamming 窓関数，Blackman 窓関数）との比較を行い，新しく開発した窓関数のサイドローブレベル，位相検出誤差の観点より有用性を示した．また，反射率を考慮した際の位相検出誤差も従来のアルゴリズムより優れていることが分かり，位相シフトの線形誤差が 30%の時でも誤差

2.5 nm 以下であり，球面度測定にも適用出来ることが確認された．検証実験として LNB ウエハー（反射率 16%）と合成石英支持基板より構成される測定試料の表面形状及び光学的厚さ変動成分の同時測定を行った．参照面まで合わせると計 4 面干渉となる 6 つの異なる周波数を持った干渉縞が互いに重ね合わされた状態で観察される．試料上面と参照面との間を 61.3 mm と設定することによって周波数空間で LNB ウエハー及び合成石英の表面形状，光学的厚さの変動成分を分離出来る．繰り返し測定の結果系統誤差が現れたが，これは位相シフトの残留誤差，試料内部の多重反射による影響及び干渉縞強度の変動に起因していると考えられる．

第 6 章では第 3 章で提案した透明試料の絶対厚さの測定手法と第 5 章で開発した ***4N – 3*** アルゴリズムを用いて合成石英（反射率 4%）の光学的厚さ分布の絶対値の測定実験を行った．幾何学的厚さの絶対値や屈折率分布の測定という将来への拡張性を見据えて参照面の入った三面干渉での実験である．DFT 解析の前後において位相シフト法を用いることで中心波長での光学的厚さ分布の絶対値及びに両端波長での光学的厚さの変動成分が得られた．変動成分には約 2 nm の差があったが，この差分は波長による屈折率の差に起因する．得られた中心波長での光学的厚さ分布の絶対値を Sellmeier の式を用いて始波長での光学的厚さ分布の絶対値に変換した．絶対値分布には位相シフトの残留誤差と干渉縞強度の変動より発生する誤差が合成波長によって増幅され，縞模様の系統誤差として現れた．この系統誤差を低減するために最小二乗法と相関的合致法を用いた改正手法を用いて厚さ分布の一様成分を求め，位相シフト法によって得られた変動成分を足すことによって系統誤差の低減された始波長での光学的厚さ分布の絶対値を求めた．また，相関的合致法を適用することで始波長での干渉縞次数が決定出来た．測定の不確かさは始波長で 4.16 nm，終波長で 5.13 nm であった．

第 7 章では本論文で提案した測定手法で測定可能な最大・最小光学的厚さの絶対値及び測定可能な最大斜度を述べた．今後の展望としては幾何学的厚さの絶対値と屈折率分布の測定に応用出来，ガラスの研磨中に測定を行う機上計測にも応用出来る．

第 8 章では本論文の各章の要点及び結論を述べた．