

## 学位論文題名

## 高反射X線ミラーの研究

## 学位論文内容の要旨

現代社会においてLSI(大規模集積回路)の果たす役割はますます重要になっている。特に1980年代後半から、集積化が一段と進んだ超LSIを搭載したパーソナルコンピュータが普及することで、情報通信さらには社会をも変革しつつある。このような超LSIの進歩を支えているのが、電子回路の極微細なパターンを複製する露光技術の進歩である。露光とは、マスクと呼ばれる基板の上に形成された極微細なパターンを、ウエハと呼ばれるシリコン基板の上に転写複製する技術である。転写はマスク上のパターンに光を照射し、ウエハ上のレジストと呼ばれる感光剤に投影して感光・現像させることで行われる。集積化の進展に伴いより微細なパターンを形成する露光技術が開発され、超LSIの進歩を支えてきた。ところが近年、超LSIのより一層の高速化と低消費電力を実現するために転写を必要とするパターンの大きさも、0.2ミクロン以下と可視光の波長より短くなってきた。しかし光の投影露光では波長より短いパターンは解像しにくいいため、使用する光も可視光から、紫外光、より短い波長の紫外光と推移してきたが、光投影露光の限界が近づいている。そこで、超LSIの一層の進展のためには、より微細なパターンを転写することができる光露光に代わる露光技術の実現が求められている。

0.2ミクロン以下のパターンを転写する有力な露光法の1つがX線リソグラフィである。X線リソグラフィは、1972年にMITのSmithが提唱した露光法で、波長の短いX線を使用することで光露光で問題となる解像性の課題を解決するものである。X線リソグラフィシステムは、強力なX線源、高精度にパターンを転写するステッパと呼ばれる露光装置、両者を結びX線を集光し露光装置に導くビームラインおよび極微細なパターンを形成したX線マスクと呼ばれる要素から構成される。X線源としては安定に強力なX線を放射するSR(シンクロトロン放射光)装置が使用できる。この光源は光速に近い速度まで加速した電子を磁界で曲げる時に進行方向に電磁波が放射される現象を利用したもので、X線リソグラフィに利用可能な波長のX線を多量に放射する。ところが、SRではX線は発光点から離れるに従って発散するため、露光装置に強力なX線を導くためには発散するX線を集光する光学系が不可欠である。この役割を担うのがビームラインであり、X線を反射するX線ミラーと、吸収によって可視光や極端紫外光等X線リソグラフィに不要な光を除くフィルターから構成される。露光装置位置で強力なX線照射を可能とするためには、発散するX線をできる限り多く取り込み、かつ高い反射率で反射して集光する必要がある。通常、X線リソグラフィ用のビームラインでは2枚のX線ミラーが使用されるため、露光装置に到達するX線量は、反射率の2乗に比例して減衰する。従って、X線ミラーの反射率が、取り込んだX線を露光装置に伝達する効率を支配する。

近年、X線リソグラフィが次世代の露光技術として期待を集めるに従って、一回の露光時間を短縮する要請が高まってきた。ところが、露光時間を短縮するためには露光装置に到達するX線量を増加させなければならないが、実際のX線ミラーの反射率が理論的に期待される値よりずっと低く、露光時間が長くなる問題が生じていた。反射率が低下する原因はミラーの表面に微小な凹凸が存在し、これによってX線が散乱するためである。X線領域ではミラー表面に数nmの高さの凹凸があっても反射率は急激に低下する。従って、表面の凹凸が1nm以下の非常に平坦な表面を有するX線ミラーの開発が不可欠であった。

本研究は、X線ミラー表面の凹凸を減少させて高反射率を有するX線ミラーを実現し、実用的なX線リソグラフィシステム構築に資することを目的として行った。通常、表面の凹凸を減少させるためには、研磨等に代表されるように表面の凸部を除去することによって実現する方法がとられる。しかしX線を反射するためにはミラー表面に金属の反射膜を付着させる必要があるが、金属は柔らかいため研磨等によって平坦化することは困難であった。そこで本研究では、ミラー表面に凹凸が小さな薄膜を付着形成する膜形成方法の開発を進めた。

本研究では低エネルギーイオン照射が膜形成のメカニズムを変更する効果を有する点に着目し、低エネルギーのイオンを照射しつつ膜を形成することで表面凹凸の小さな膜を付着させる膜形成法と実現するための装置開発を含めて検討した。低エネルギーイオン生成の手段としてECR（電子サイクロトロン共鳴吸収）現象を利用したイオン源を製作し、これを搭載したECRスパッタ膜形成装置を開発した。ECRイオン源は低エネルギーのイオンを多量に生成することができる。しかしその構造上、金属膜形成に使用すると時間と共に性能が劣化するという問題があったが、新しい構造のイオン源を考案して、これを搭載した膜形成装置を開発し、連続的に金属膜形成が可能であることを確認した。

開発した装置を使用して形成した薄膜表面を種々の方法で評価した。STM（走査型トンネル電子顕微鏡）で直接形状を測定し、凹凸の大きさや周期を数値的に解析した。さらに軟X線の反射率測定装置を作製し反射率を測定し解析した。これらの解析は同じ結果を示し、ECRスパッタ法によれば従来の膜形成法では実現できなかった小さなrms表面粗さ0.3nmを有する膜が形成できることを明らかにした。従来使用されていた真空蒸着法で形成した膜では、膜厚を最適化しても0.9nmの粗さが限界であることも合わせて明らかにした。さらに、真空蒸着装置にカウフマン型イオン源を組み合わせて膜形成する（イオンアシスト法）だけでも、真空蒸着法より小さな粗さ0.7nmの膜が形成されることも明らかにした。イオンアシスト法で作製したX線ミラーを実際にビームラインに搭載し、レジストを露光することでX線強度の評価を行った。その結果、粗さ0.7nmから計算で期待されるX線強度が実現されていることを確認した。これによって、イオン照射効果を利用したX線ミラー反射膜形成法によって、小さな表面粗さを有するX線ミラーが実現可能であり、実用化できることを示すことができた。

さらに、膜付着によって小さな表面粗さを有する膜が形成できる点に着目し、表面が荒れた基板の上に開発したECRスパッタ法で膜を形成することで表面粗さを改善する検討を行った。その結果、膜形成によって表面粗さが低減化できることを明らかにした。この現象を利用することで、研磨等の平坦化の過程を経ない基板でもX線ミラー基板として使用できる可能性がある。この結果は、今後X線リソグラフィを産業的に使用する際に必要とされるX線の強度を確保するために今後実現が望まれる、球面とは異なった自由な曲面形状を有し、広い角度のX線を取込んで集光できる非球面X線ミラー作製の布石となるものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 正 幸  
副 査 教 授 岡 田 亜 紀 良  
副 査 教 授 武 笠 幸 一  
副 査 教 授 雨 宮 好 仁

学 位 論 文 題 名

## 高反射X線ミラーの研究

情報の高速・大容量通信と高速処理によって成り立っている現代社会において、通信と情報処理を担うLSI（大規模集積回路）の果たす役割はますます重要になっている。特に1980年代後半から、高速・高集積化が一段と進んだ超LSIを搭載したパーソナルコンピュータに代表される高機能端末が普及することによって、情報通信の高速・大容量化は加速され、生活様式をも変えつつある。超LSIはマスクと呼ばれる基板の上に形成された極微細なパターンをシリコン基板の上に塗布されたレジストと呼ばれる感光剤に投影して露光・現像し、そのパターンについて各種加工を行って製造される。集積化の進展に伴い、より微細なパターンを形成する露光技術が開発され、超LSIの進歩を支えてきた。ところが近年、超LSIのより一層の高速化と低消費電力を実現するために、転写するパターンの最小サイズは可視光の波長より短い0.2ミクロン以下が求められている。光の投影露光では波長より短い寸法のパターンを解像することが困難なため、使用する光も可視光からより短い波長の真空紫外光へと推移してきたが、光投影露光の解像度限界が近づいている。そこで、超LSIを一層進展させるためには、より微細なパターンを転写することができる光に代わる露光技術の実現が求められている。

0.2ミクロン以下のパターンを転写する有力な露光法の1つがX線リソグラフィである。X線リソグラフィは、光源に波長の短いX線を使用することで解像度の課題を解決できる。X線リソグラフィシステムは、強力なX線源、高精度なパターンを転写する露光装置、X線を集光し露光装置に導くビームライン、および極微細なパターンを形成したX線マスクの各要素から構成される。X線源としては強力なX線を放射するSR（シンクロトロン放射光）装置が使用される。この装置は光速に近くまで加速した電子を磁界で曲げる際に、接線方向に電磁波が放射される現象を利用している。SRは点光源であり、X線は発光点から離れるに伴って発散する。このため、露光装置に強力なX線を導くためには発散するX線を集光する光学系が不可欠である。このX線導光系がビームラインであり、X線を反射・集光するX線ミラーと、吸収によって可視光や極短紫外光等のX線リソグラフィに不要な光を除去する薄膜フィルターから構成される。露光位置で強力なX線照射を可能とするためには、発散するX線をできる限り多く取り込み、かつ高い反射率で反射して集光する必要がある。通常、X線リソグラフィ用のビームラインでは2枚のX線ミラーが使用されるため、露光装置に到達するX線量は、反射率の2乗に比例して減衰する。それゆえ、X線ミラーの反射率が、X線を露光装置に伝達する効率を支配する重要因子である。

X線リソグラフィが次世代の露光技術として期待され、超LSIの生産効率を高めるため、1997

年までに一回の露光時間を3秒に短縮する要請が提出された。露光時間を短縮するためには、露光装置に到達するX線量を増加させることが重要である。しかし、市販のX線ミラーの反射率は理論的期待値よりはるかに低く、露光時間が長くなり生産効率が低下する問題が生じた。反射率が低下する原因はミラーの表面に微小な凹凸が存在し、これによって反射X線が減衰するためである。X線領域ではミラー表面に数nmの高さの凹凸があっても反射率は急激に低下する。従って超LSIの生産効率を高めるためには、表面の凹凸が1nm以下の非常に平坦な表面を有するX線ミラーの開発が必須であった。

本研究は、表面凹凸が小さく高反射率を有するX線ミラーを実現し、露光時間が短い実用的なX線リソグラフィシステム構築に資することを目的として行ったものである。通常、表面凹凸が小さな表面を実現するためには、研磨に代表されるように、表面の凸部を機械的に除去する方法がとられる。しかし、X線ミラー表面には反射膜として、研磨によって傷が生じやすい金属膜の形成が必要であり、X線ミラー表面の凹凸を小さくするために研磨加工を採用することはできない。そこで本研究では、X線ミラー表面に凹凸が小さな薄膜を形成する膜形成装置および膜形成技術の開発を行った。

膜形成中に低エネルギーイオンを照射することによって膜形成のメカニズムが変化する効果があることに着目し、低エネルギーイオンを照射しつつ膜を形成することによって、表面凹凸の小さな膜を付着させる膜形成装置の開発を行った。低エネルギーイオン生成の手段としてECR（電子サイクロトロン共鳴吸収）現象を利用したイオン源を試作し、これを搭載したECRスパッタ膜形成装置を開発した。ECRイオン源は数十eVの低エネルギーのイオンを多量に生成することができる。しかしその構造上、金属膜形成に使用した場合、時間と共に性能が劣化するという問題があったが、新しい構造のイオン源を考案・試作して、これを搭載した連続的な金属膜形成が可能な装置を開発した。

開発した膜形成装置によって形成した薄膜の表面形状をSTM等で測定し、凹凸の大きさや周期を評価した。さらに軟X線の反射率測定装置を作製し、薄膜表面のX線反射率を測定して表面粗さを評価した。これらの評価は同じ結果を示し、ECRスパッタ法によれば、従来実現できなかった平均表面粗さ約0.3nmの膜が形成できることを明らかにした。さらに、真空蒸着装置にカウフマン型イオン源を組み合わせて膜形成するイオンアシスト法によって、真空蒸着法より小さな粗さ0.7nmの膜が形成可能であることも明らかにした。イオンアシスト法によって反射膜を形成したX線ミラーを試作し、実際にビームラインに搭載してレジストを露光することでX線強度の評価を行った。その結果、表面粗さ0.7nmのX線ミラーについては計算で期待されるX線強度が実現され、露光時間3秒を達成することができた。この結果から、表面粗さ0.3nmのECRスパッタ膜を形成したX線ミラーを試作した場合、さらに短い露光時間2.5秒の達成が期待される。

さらに、基板表面に膜を形成することによって小さな表面粗さを有する膜が形成できる点に着目し、表面に粗さ1.6nmの凹凸がある切削加工を行った基板の上に、開発したECRスパッタ法で膜を形成することによって、切削痕の凹凸を小さくする検討を行った。その結果、ECRスパッタ膜形成によって基板表面の粗さを0.7nmにまで小さくできることを明らかにした。この結果は、切削加工をした軟質金属基板でもECRスパッタ膜を採用することでX線ミラーとして使用可能であることを示している。また、より高いX線強度を実現するX線光学系とX線ミラー形状を設計し、非球面形状X線ミラーの実現によって、2003年に実用レベルのX線リソグラフィに必要なとされる性能を満たすシステムの構築が可能である。

これを要するに、著者は高反射率X線ミラーの開発と実用性評価に関して新知見を得たものであり、半導体プロセス工学、X線光学機器技術に貢献するところ大なるものがある

よって本論文は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。