

| | |
|---------|--|
| 氏名（本籍） | 三 ^み 好 ^{よし} 秀 ^{ひで} 龍 ^{たつ} （千葉県） |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 甲第951号 |
| 学位授与の日付 | 平成29年3月18日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 学位論文題目 | 電子線リソグラフィを用いた半導体フォトマスクの超解像技術に関する研究 |

| | |
|--------|------------------------|
| 論文審査委員 | （主査）教授 谷口 淳 |
| | 教授 相川 直幸 教授 佐竹 信一 |
| | 教授 原田 哲也 教授 向後 保雄 |

論文内容の要旨

現在、半導体デバイスのパターンニング形成には、リソグラフィと呼ばれる複雑な光学系ユニットを搭載した装置によりパターンを転写する技術が用いられている。リソグラフィ技術とは型を使って同じ物を複製する印刷技術の一つであり、このリソグラフィに用いられるパターンの原版がマスクと呼ばれるものである。リソグラフィ技術は、現在の電子工業界において、平面基板上にパターンを形成する製造技術として、印刷技術と共に広く用いられていて、今日もとどまることなく進歩、発展し続けている重要な要素技術の一つである。本研究ではこのリソグラフィ技術に使われるマスクの製造技術に関して注目している。

2015年度版国際半導体技術ロードマップ（ITRS）に次世代フォトマスク製造における技術目標値が掲げられている。この中でも特に重要と考えているのが、補助パターンの形成に求められる解像性能である。ITRSでは2016年以降は40nmの解像性という表記でしか記載されていないが、昨今のマスク産業会主体で行っている学会SPIE, PMJ, BACUSなどでは、高解像性能を重視した報告が頻繁に見受けられる。今後間違いなく、30nm, 20nmといった高解像性能が求められる。現在、一般的なpCAR（ポジ型化学増幅型レジスト）半導体用フォトマスクレジストを用いた30nmレベルでの解像性能は報告されているが20nmオーダーでの解像性能は未だ確立されているわけではない。また、既存のフォトマスク製造では酸発生材であるPAGを含んだレジスト感度の高い、化学増幅型レ

ジストを使用するのが一般的である。しかしながら、この酸の発生材があるがゆえに様々な問題を抱えているのも事実である。その一つが、材料起因の問題として挙げられるレジスト塗布後の安定性や露光後の安定性である。レジスト塗布後の放置時間によってかなりの CD のばらつきが存在する事、露光後の安定性に関しても同様に規定 CD 寸法値からのずれが確認されている。もう一つの CAR レジストにおける問題として有名なのは、高ラインエッジラフネス (LER) である。電子ビーム露光によって少量の酸が発生して高分子を切断すると、その反応により酸発生材から新たな酸が発生する。露光後のベークを行うと、この反応が加速されて次々に酸の発生反応が起こり、露光の際、酸の発生反応が少なくてもパターンニングが出来てしまう。そのため現像後のフォトリソの形状は、表面反応不足になったり、すそ引きの状態になったりする。これが LER を悪くしてしまう原因の一つである。

そこで本研究では、酸の発生材が含んでいない非化学増幅型レジストに露光後ベークを適用する事で高解像を狙う事を試みている。もう一つのユニークな点として、本研究で使用する電子線描画の手法を取り上げたい。電子線描画の基本は細く絞った円形ビームをマスク基板上に縮小転写する方法である。円形ビーム方式は比較的簡単に精度良くビームを絞り込み、電子線の強度がガウス分布をしていることからガウシアンビームとも呼ばれる (ポイントビーム方式とも呼ばれる)。一方で、矩形ビーム方式では図形の大きさを可変する方式が主流であり、現在のマスク製造における主流装置である。最大で $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度までビームサイズを可変できるので、サイズの小さい円形ビームに比べ一度に露光される面積が広い生産性に優れた方式である。円形ビーム方式・ポイントビームの手法を用いた上記非化学増幅型レジストを使った露光後ベークの研究は、いくつかの論文が紹介されているが、可変成形型 (VSB) 方式での描画手法では主だった研究成果が報告されていない。従って、本研究では、非化学増幅型レジストに露光後ベークを適用し、実際のフォトマスク製造でも使用されている可変成形型の描画機を利用する事で 20 nm オーダーの高解像を狙う事を目標とし、既存 CAR レジストプロセスの代替案として、次世代フォトマスク製造の新たなプロセス構築を行う事を目的とした。

使用した非化学増幅型レジストには日本ゼオン (株) の ZEP520A を使い、マスクブランクスに関しても実際の製造ラインで使用されている 6 インチマスクブランクスを使用している。描画手法に関しては、日本電子 (株) の VSB 型描画機でパターンニングを行い、露光後ベークによる温度依存性を調べている。その他、レジストサンプル自体の再現性も十分確認しており、本実験の信頼性を高めている。

初めに露光後ベーク手法の優位性の検証と題して、露光後ベークの効果と解像性能に関して説明している。ここでは、デザイン CD 100 nm における LS, IS, IL パターンで

の温度依存性を検証して、ライン間隔の縮小効果やライン幅の増大の傾向を確認している。その後、Top Down による SEM 像、断面 SEM 像などから、より詳細な解像性能を議論している。続いて、露光後ベーク温度の最適化と題して、レジストの感度評価や LER の評価を行っている。ここでは露光後ベーク温度ごとの LS, IS, IL パターンによる規定寸法値からのずれ量をプロットし、感度カーブを描いている。ここから露光後ベーク温度によるレジスト感度の違いを説明している。その他、デザイン CD 100 nm, 50 nm における LER の温度依存性も示して、高解像を得るヒントとして露光後ベーク温度の最適値に関する説明を行っている。そして、露光後ベークによる LER の改善と高解像度のメカニズムと題して、レジストの表面の平滑性データや硬化測定の結果などから高解像が得られる根拠を説明している。LER の改善手法や高解像手法を検証する方法として、近年、レジストのポリマー表面の平滑性から LER を考察する研究がいくつか確認されており、このような他の文献からも本手法のメカニズムに関する説明の裏付けを行っている。

露光後ベーク手法の優位性の検証実験から、ライン幅の増大、ライン間隔の縮小効果が得られ、最終的に 1:1 LS で 28 nm、IS で 22 nm、IL で 31 nm、と 20 nm オーダーでの解像性能を達成する事が確認された。続いて、露光後ベーク温度の最適化に関しては、レジスト感度カーブから露光後ベーク温度が低すぎるとレジスト感度が高すぎ、露光後ベーク温度が高すぎるとレジスト感度が低くなる事から、解像性能が最も高くなる最適温度値が存在する事が明らかになり、またその値も検証する事ができた。そして露光後ベークによる LER の改善と高解像度のメカニズムに関しては、レジスト自体は、粒子状形状を持っており、レジスト塗布後にベークを加える事で、レジスト中の有機溶媒を蒸発させ、粒子状形状が抑えられる。結果、表面の平滑性が一時的に良くなる。その後、電子ビーム露光を加える事で、レジストの主鎖切断が起こり、分子量が小さくなっていく。従って、粒子状形状が再び現れ、表面の平滑性が悪くなる。そこで、露光後にベークを加える事で、粒子状構造を抑制し、平滑性を良くする事で LER の改善につながり、結果、高解像性を示す事が可能となった。

最後に本手法への期待と題して、研究の総括を行うと、非化学増幅型レジストに露光後ベークを加える事で、既存プロセスの解像性能と比較にしても、解像性能、LER 共に約 20% ~ 30%の改善が見込めるというのが研究の大きな成果であったと思われる。今回、20 nm オーダーの高解像性能が得られる事が実証されたわけだが、レジスト自体の感度に関しては、改善の必要性を感じている。本非化学増幅型レジストに露光後ベークを加える手法が、次世代フォトマスクの製造プロセスへ応用されるためにも、他の高感度な非化学増幅型レジストによる検証が、スループットという製造観点からの期待値としても非常に

有益な研究対象になるであろうと考えている。

以上

論文審査の結果の要旨

現在、半導体集積回路の微細パターンは、複雑な光学系を有する縮小投影露光装置によるリソグラフィ技術により量産されている。この技術は、光源から出た光をフォトマスクと呼ばれる回路パターンが形成されている原版を通過させ、回路パターンが形成できるように光のコントラストを生成し、さらにこの光のコントラストを縮小投影光学系により4分の1に縮小して、シリコンウエハ上のフォトレジストに露光するものである。フォトレジストに光が当たると、照射された部分が現像後に除去されるか残るかの状態でシリコンウエハ上に形成される。集積回路を作製するには、フォトレジストによりマスクされているところとシリコン表面が露出しているところを作り、様々なプロセスを用いて回路を形成する。一例として、半導体の活性層を作製するイオン注入プロセスでの使用方法を説明する。イオン注入は、ボロンなどをイオン化して加速し、シリコンに打ち込むことにより、この部分がP型半導体領域になる。今、フォトレジストによりマスクされたところとシリコン表面が出ている箇所があると、イオン注入後は、シリコン表面がでていたところだけ活性層になる。フォトレジストにもイオン注入されるが、この部分は溶媒などで溶かして除去し、フォトレジストの下のシリコン表面には、活性層が形成されないようになる。このようにフォトレジストは、犠牲層として働き、微細な集積回路を作製するうえで重要な役割を果たす。フォトレジストをパターニングする上で、フォトマスクと縮小投影露光装置が必要であるが、フォトマスクは、回路の線幅を決め、単位面積当たりのトランジスタ素子数（集積度）を向上させるために極めて重要である。

フォトマスクを作製するには、通常、スルー putt 向上のため可変成型型電子線リソグラフィ装置と化学増幅型（Chemical-amplified resist: CAR）レジストを用いる。しかし、現状では、解像度が 34 nm 程度と悪く、また、粗いラインエッジラフネス（Line edge roughness: LER）が問題となっている。LER の値は 50nm の孤立線パターンで、5.6 nm である。

そこで本研究では、これらの問題点を解決するために、非化学増幅型（Non-CAR）レジストを用いて LER を改善するとともに、電子線露光後にベーク（Post exposure bake: PEB）を加えることにより解像度の向上を試みた。

実験方法は、マスクブランクスと呼ばれる石英の上にクロム膜が蒸着されているフォトマスクの原盤となるものに、Non-CAR レジストを 40 nm 塗布して、溶媒を飛ばすために 180 °C で 10 分ベークを行った。このレジストに可変成型型電子線リソグラフィ装置により、微細パターンを描画した。パターンを描画する際、電子線の加速エネルギーは、50 keV 一定で行い、電子線のドーズ量（単位面積あたりの電荷量）は、電子線照射時間を変化させて条件を変化させた。続く PEB 工程では、時間は 10 分で一定で、温度を、90、120、

135、および 150 °C と変化させた。また、比較のために PEB 無しでも実験を行った。この後、現像液で現像し、現像後の微細パターンを電子顕微鏡で測長した。その結果、PEB 温度が高いと、描画に必要なドーズ量が増え、PEB 温度が低いもしくは PEB 無しだと解像度が向上しないことがわかり、PEB 温度には最適値があることがわかった。最適な PEB 条件は、120 °C で 10 分であり、ラインアンドスペースパターンで 28 nm の解像度が得られた。また、LER においても同じ温度で最適条件となり、50 nm の孤立線パターンで 3.6 nm となった。これら得られた値は、次世代フォトマスクを作製するのに十分な値であり、非化学増幅型レジストを用いて電子線露光後にベークを加えるという単純な工程で、解像度と LER を改善することが可能となった。

また、解像度と LER が改善するメカニズムに関して、表面の平滑性とレジスト表面の硬さを調べた結果、次のように考えられる。レジスト自体は、粒子状形状を持っており、レジスト塗布後にベークを加えることで、レジスト中の有機溶媒を蒸発させ、粒子状形状が抑えられる。その結果、表面の平滑性が一時的に良くなる。その後、電子線露光を加えることで、レジストの主鎖切断が起こり、分子量が小さくなっていく。これにより、粒子状形状が再び現れ、表面の平滑性が悪くなる。この状態で、露光後にベークを加えることで、粒子状構造を抑制し、平滑性を良くすることで LER の改善につながり、その結果、高解像性を示すことがわかった。

これらの研究成果によって、露光後ベークの最適化とそのメカニズムを検証し、次世代フォトマスクの製造プロセスに必要な超解像技術を確立した。

これらの知見は、超微細加工の分野において顕著な業績であり、審査の結果、学位論文として認められる。