

リソグラフィ将来技術の動向

リソグラフィ将来技術調査専門委員会編

目次	
1. まえがき	3
2. 光リソグラフィ技術	6
2.1 次世代マルチパターンニング露光用 ArF エキシマレーザの開発	6
2.2 新 low-k 材料を用いたマスクのリソグラフィ性能評価	7
2.3 SEM 画像を用いたリソグラフィ装置のフォーカス・ドーズ計測	8
2.4 フォトレジスト開発推移と課題	9
2.5 光リソグラフィに関する私見	15
2.6 光露光装置開発の流れ	19
3. EUV リソグラフィ技術	22
3.1 高速 AFM によるレジスト現像過程の解析	22
3.2 極端紫外線用レジスト材料の開発	22
3.3 Dry Development Rinse Process (DDRP) and Materials (DDRM) for EUVL	23
3.4 極端紫外線リソグラフィ技術の動向	24
3.5 EUVL 用マスク検査技術開発の進展	28
4. ナノインプリント技術	32
4.1 Nanoimprint Systems for High Volume Semiconductor Manufacturing (SPIE2015)	32
4.2 ナノインプリントリソグラフィにおける Sub-20 nm での課題	32
4.3 高規則性ポーラスアルミナを用いたナノインプリントによるナノ規則表面の形成と応用	33
4.4 Nanoimprint system for high volume semiconductor manufacturing	34
4.5 ナノインプリント技術の進展	35
4.6 ナノインプリントリソグラフィ	37
5. DSA 技術	41
5.1 DPD 法を用いた DSA シミュレーションとダイナミクス解析	41
5.2 SPIE Advanced Lithography 2015、DSA Session	41
6. EB リソグラフィ技術	42
6.1 電子ビームリソグラフィを用いた 3 次元ナノ構造形成	42
6.2 電子ビーム描画装置の現状と最新アプリケーション	43
7. 陽子線、検査、MEMS 技術	45
7.1 陽子線描画技術のリソグラフィ応用に関する研究	45
7.2 マルチビーム SEM 等の検査装置技術	45
7.3 凹曲面レジストパターンへのエポキシ樹脂注入によるマイクロレンズアレイの製作	46
8. 国際会議	47
8.1 EUVL Symposium 2014 報告	47
8.2 SPIE Photomask Technology (BACUS) 報告	48
8.3 EUVL Symposium 2015 報告	49
8.4 1st DSA Symposium 2015 報告	50
8.5 2nd DSA Symposium 2016 報告	52
8.6 PMJ にみるマスク技術と業界の動向	53
9. むすび	57

リソグラフィ将来技術調査専門委員会委員

委員長 堀内 敏行(東京電機大学)
幹事 東 司(東 芝)
委員 鴨志田 洋一(神奈川大学)
中瀬 真(東京電機大学)
木下 博雄(兵庫県立大学)
古室 昌徳(K E K)
廣島 洋(産業技術総合研究所)
法元 盛久(大日本印刷)
大久保 至晴(ニ コ ン)
酒井 啓太(キ ヤ ノ ン)

協力者 山崎 謙治(N T T)
(敬称略) 森田 裕史(産業技術総合研究所)
藤森 亨(富士フィルム)
西川 宏之(芝浦工業大学)
酒井 啓太(キ ヤ ノ ン)
東 司(E I D E C)
小檜山 勇次(カール ツァイス)
ジュリスサンティリヤン(E I D E C)
原田 哲男(兵庫県立大学)
塩原 英志(E I D E C)
白石 雅之(ニ コ ン)
中川 勝(東北大学)
柳下 崇(首都大学東京大学院)
太田 毅(ギガフォトン)
早野 勝也(大日本印刷)
伊藤 俊樹(キ ヤ ノ ン)
篠田 伸一(日立製作所)
笠原 祐介(E I D E C)
杉原 達記(エリオニクス)
小林 野歩(東京電機大学)
工藤 宏人(関西大学)
坂本 力丸(日産化学工業)

1. まえがき

高度情報化社会という言葉が使われるようになって 20～30 年経つと思うが、最近行き過ぎとを感じるぐらいに情報がやり取りされ、利用される時代となった。通勤電車に乗ると、座席に座っている人の半分以上がスマートフォンやパッドを手に画面を見ており、パソコンを使用している人もいる。嘗ては多かった新聞や書籍を手に行っている人は今や少数となった。オフィスでの仕事の連絡もメールのやり取りが中心となり、意見の交換や相談も実際の会話ではなくメールで済ませる傾向になってきている。さらに、昨今は単なる情報のやり取りだけでなく、IoT (Internet of Things) や AI (Artificial Intelligence) などの技術が時の話題として大きく取り上げられている。

こうした技術はいずれも非常に小型で高性能なマイクロプロセッサや大容量メモリが安価に量産されるようになったという技術的な基盤の上に成り立っている。スマートフォンでパソコンと同じようなことが数多くできるのは、あの小さな筐体の中にほぼ同じような機能を持つ集積回路デバイスが組み込まれているからである。そして、その技術基盤をさらに遡れば、パソコンやスマートフォンなどの情報機器を製作する技術が現在の情報化社会を支えているのである。情報機器の心臓部は半導体集積回路であり、それをいかに小さく作り、高性能とするかが長年追求され、現在も追求され続けている。その結果として上記のような情報技術に依存した現代社会がつくられている。

半導体集積回路は、成膜、リソグラフィ、エッチング、リフトオフ、イオン注入などを組み合わせて製作する。緻密に配置した微細形状の回路素子の各部を層状に重ねて立体配置することにより、高性能な半導体集積回路やそれを利用した半導体デバイスが作られる。

リソグラフィは半導体集積回路製造の要となる重要技術であり、成膜した材料を所定の微細形状に加工する基となる微細パターンを、レジスト(エッチング耐性を持つ感光性樹脂)を用いて形成する技術である。形状を決めることが必要な工程はすべて最初にリソグラフィでレジストパターンを作ることから始まる。そして、半導体デバイスを作るには、数回～20 数回のリソグラフィが行われる。

これまでの技術の発展を振り返ると、集積回路が世に出た 1960 年前後から、国内に半導体製造メーカーが多数存在した 2005 年頃までは、技術向上を牽引するデバイス(テクノロジードライバ)が Dynamic Random Access Memory (DRAM) であり、素子密度と動作速度を上げるため、ゲートや配線ラインを如何に細く高密度に形成するか、コンタクトホールを如何に小さく高密度に形成するかなどに多大な研究パワーが注ぎ込まれた。そのため、リソグラフィ技術の研究は極めて活発に行われ、急速に顕著な進歩、発展を遂げた。また、1998 年からは世界中の半導体産業の関係者が集まって国際的なロードマップである International Technology

Roadmap for Semiconductors (ITRS)が作成され、目標を共通化したり技術に対する将来の方向性を一緒に考えたりしながら研究開発が行われた。

このような情勢に呼応して、電気学会にはリソグラフィの技術動向を探り、更なる進歩の方向性を議論するため、3 年を区切りに幾多の調査専門委員会が設けられた。すなわち、1983 年 10 月～1986 年 9 月の間に微細加工用光源・装置調査専門委員会、1987 年 4 月～1990 年 3 月の間に超微細加工光応用技術調査専門委員会、1991 年 6 月～1994 年 5 月の間に光・X 線応用超微細加工技術調査専門委員会、1996 年 1 月～1998 年 12 月の間に光応用先端リソグラフィ技術調査専門委員会、1999 年 4 月～2002 年 3 月の間に次世代リソグラフィ技術調査専門委員会、2002 年 4 月～2005 年 3 月の間に超微細リソグラフィ技術調査専門委員会、2005 年 4 月～2008 年 3 月の間にリソグラフィ先端技術調査専門委員会、2008 年 4 月～2011 年 3 月の間にリソグラフィ極限技術調査専門委員会、2011 年 4 月～2014 年 3 月の間にリソグラフィ次世代技術調査専門委員会が設けられた。本リソグラフィ将来技術調査専門委員会は、これらの調査専門委員会の活動を踏まえ、2014 年 6 月～2017 年 5 月の期間に設置された調査専門委員会である。各調査専門委員会の間に、調査報告書となる技術資料の作成と設置申請のため、半年前後の隙間があるものの、34 年間にちょうど 10 回もの調査専門委員会が継続して設けられていたことになる。この間、技術が切れ間なく進歩して来たわけであり、こういう進歩を辿った技術はあまり前例がないかもしれない。

しかし、次第にトレンドが多様化し、従来のトレンドに乗らない3次元NAND型フラッシュメモリなどが出現した。また、半導体製造メーカーが絞られ、それぞれのメーカーの得意とする製品が異なって来て、共通の目標を掲げて技術情報を共有する時代ではなくなってきた。そのため、ロードマップの存在意義が問われ直し、従来の組織による ITRS ロードマップの作成は 2015 年に中止となった。とくに、国内の半導体デバイス製造メーカーが非常に少なくなるという事態になり、本調査専門委員会は従前の 9 回の調査専門委員会とはだいぶ異なる環境下での調査活動となった。

リソグラフィ技術の長期的な変遷を振り返ると、微細化が図れる新技術が提案されても、それが採用されるには、量産に適用できること、すなわちコスト、スループット、信頼性、既存技術との整合が取れることが条件となり、中々取り入れられなかった。そして、原版であるマスクやレチクル上のパターンをレジスト上に転写する投影光学系の開口数(NA: Numerical Aperture)の増大と露光波長の短波長化という、転写解像度を左右する装置パラメータの改善だけが何度も繰り返され、従来からのいわゆる光リソグラフィが延々使われ続けて来た。電子ビーム直接描画、電子線投影露光、X 線近接露光など、様々な技術も精力的に検討されたが、それらが量産に活用されるには至らず、光リソグラフィを利用するの工夫が様々に行われて現在に至った。

光リソグラフィで一度の投影露光で形成できるパターン