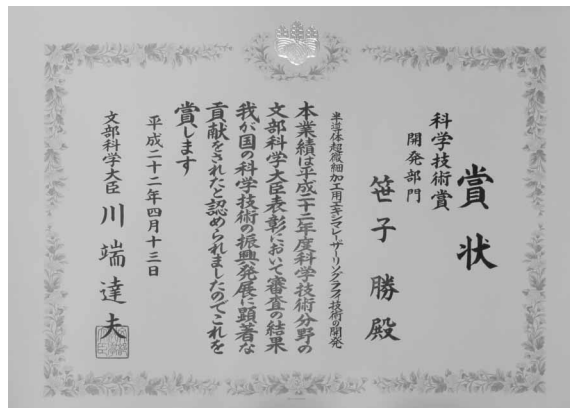


平成22年度科学技術分野「文部科学大臣表彰」



受賞テーマ：半導体超微細加工用エキシマレーザーリソグラフィ技術の開発

受賞者：パナソニック（株）セミコンダクター社 生産本部 プロセス開発センター

表彰機関：文部科学省

賞の紹介：科学技術に関する研究開発，理解増進等において顕著な成果を収めた者について，その功績を讃えることにより，科学技術に携わる者の意欲の向上を図り，もって我が国の科学技術水準の向上に寄与することを目的とする。

半導体超微細加工用エキシマレーザーリソグラフィ技術の開発

Development of excimer laser lithography technology for hyper miniaturized semiconductor LSIs

笹子 勝

Masaru Sasago, Ph.D.

要 旨

半導体産業は微細加工技術と言うテクノロジードライバーによって発展し続け、エレクトロニクス産業興隆の最大の牽引力となっている。その最大のキーテクノロジーは光リソグラフィ露光波長の短波長化であり、世界の多くの先端研究機関が研究開発に挑戦を行ってきた。本研究はその進展に最もインパクトを与えたエキシマレーザーリソグラフィ技術の先駆的開発に関するもので、キーテクノロジーであるエキシマレーザーの狭帯域化技術と高透明レジスト技術の詳細を述べたものである。

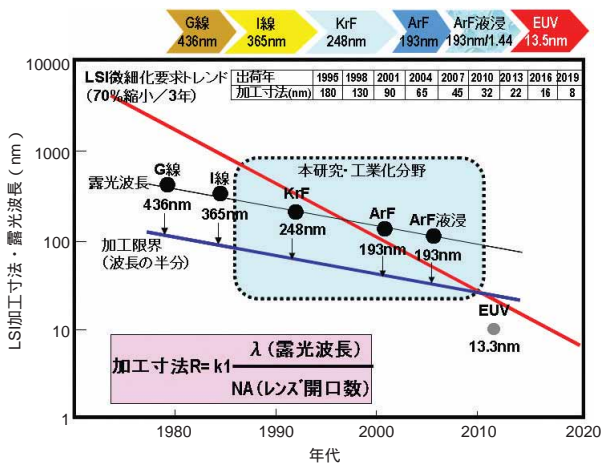
Abstract

The semiconductor industry continues to expand, driven by semiconductor microfabrication technology, and has come to exert the greatest pull on the electronics industry boom. The greatest technology involved is the shortening of the wavelength used in optical lithography exposure, and many institutes for advanced research throughout the world have taken on this challenge in their research and development.

This research constitutes groundbreaking development for excimer laser lithography technology, which has had the greatest impact on such progress. This paper describes the narrowing technology of excimer laser wavelength and the higher transparency resists technology which are our developed key technologies.

1. 緒言

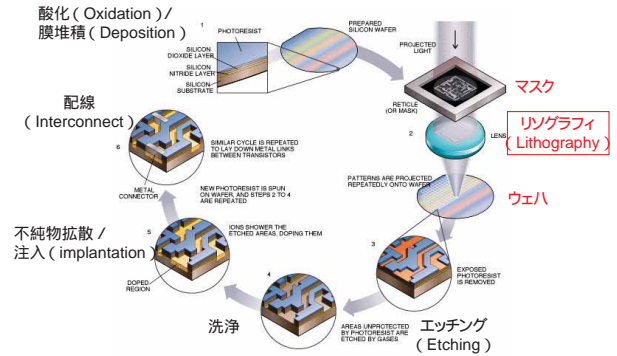
半導体産業は3年で70%縮小するトレンドのベースであるロードマップのトレンドを進めるべく、微細加工技術というテクノロジードライバーで発展しつづけ、結果として、エレクトロニクス産業興隆の最大の牽引力となった。その最大のキーテクノロジーは光リソグラフィである。リソグラフィ技術とは、高度に集積された原版であるLSI設計パターンをシリコンウェハに転写することである。本研究はその進展に最もインパクトを与えたエキシマレーザーリソグラフィ技術の先駆的開発である。1986年にベル研と同時期に世界に先駆け本格的なKrFエキシマレーザー(248 nm)を、1989年に同じく世界初のArFエキシマレーザー(193 nm)をそれぞれ開発し、更に1998年に100 nm世代の次々世代VUV(153 nm)リソグラフィの可能性を発表した。KrFエキシマは1996年より250 nm以細のLSI量産化を実現し、ArFエキシマでは90 nm以細の量産化技術の目処をたてた。その技術の流れは、現在の最先端の45 nmレベルのArFエキシマの液浸リソグラフィ技術工業化の源となっている(第1図)。



第1図 微細化を実現するリソグラフィ技術の進展
Fig. 1 Advances in lithography technology to achieve miniaturization.

2. 開発の動機と研究概要

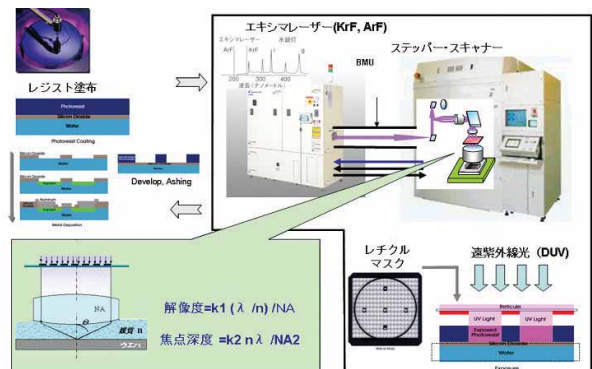
半導体LSIの製造プロセスについて第2図を用いて説明する。酸化膜や各種膜が堆積された、300 mm(30 cm)のシリコンウェハにLSI設計パターン原図がのったマスクを、レンズを介してウェハ上に感光性樹脂(レジスト)に露光・現像し、パターン形成を行なう。この工程がリソグラフィと言う技術である。その後、このパターン形成されたレジストを介してエッチングを行い、レジストを洗浄・除去する。エッチングされた酸化膜を介して、不純物を拡散あるいはイオン注入を施したり、配線を行う。LSIはこの



第2図 半導体LSI製造プロセス
Fig. 2 Semiconductor LSI Manufacturing Process.

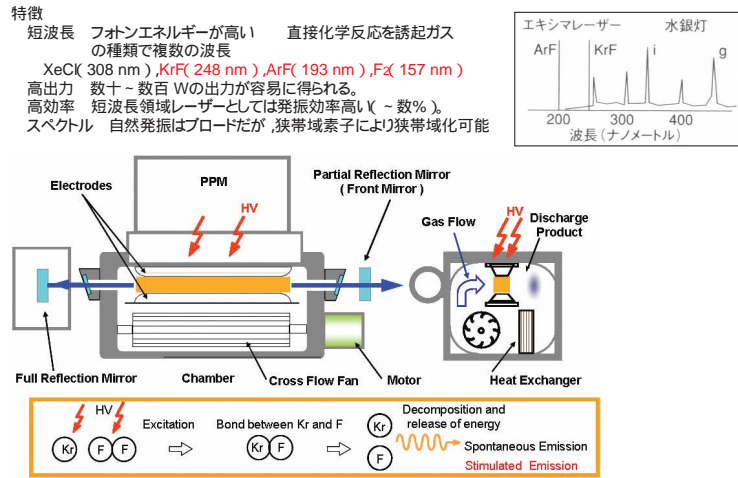
サイクルを40回から50回程度繰り返し、完成される。半導体LSIでは、このウェハに如何に素子を集積し、微細化してコストダウンするかが勝負となる。

光リソグラフィの微細化の進展には、第1図の加工寸法の式(Rayleighの法則)、すなわち露光波長の短波長化とレンズ開口数NAの増大が重要なファクターとなる。本研究は、1980年に世界で初めて豊田、難波らのグループが行なった簡易光学系でのエキシマレーザー露光技術の研究がコンセプトの基点となっている。筆者は工業化のため、縮小投影露光での短波長化に注目し、単色のエキシマレーザー光源の適用を基本に考えた。エキシマレーザー光源は、そのガス種により更なる短波長化が可能で、KrF(248 nm)、ArF(193 nm)への展開ができた。本研究内容は露光装置(ステッパー・スキャナー)からレジスト材料、プロセス(塗布、露光、現像)にいたるまでリソグラフィ技術全体(第3図参照)の広範囲に及んでいるのが特徴である。



第3図 エキシマレーザーリソグラフィ概要
Fig. 3 Outline of Excimer Laser Lithography.

第4図にエキシマレーザーの概要を示した。特徴は、フォトンエネルギーが高く、ガスの種類で色々な波長を発生することが可能なことである。Krとフッ素ガスで248 nm、Arとフッ素ガスで193 nmの波長を夫々発生することがで



第4図 エキシマレーザー光源

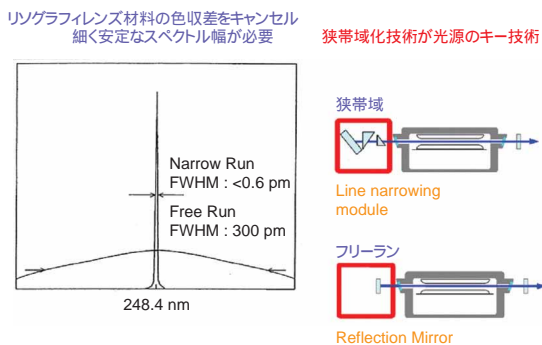
Fig. 4 Excimer Laser Light.

きる。またその光は数十から数百 Wの高出力で非常に効率が高く、一方自然発振ではブロードバンドとなり、レーザーらしくないレーザーと言える。従来の露光光源である超高圧水銀灯(365 nm以上)では難しい短波長化発光が最大の特徴である。

次に、本研究の2つのキーテクノロジーについて説明する。

キーテクノロジーの1番目はエキシマレーザーの狭帯域化について第5図を用いて示す。エキシマレーザーは発振光がブロードバンドになっているため、特にKrFの248 nm以下の波長を透過するレンズ材料は合成石英にのみに限られた。その結果、必然的に単色レンズになるため、この発振光を250 nm以下に狭帯域化する必要があった。エタロンやプリズムなどの光学素子の組合せで、色々な狭帯域化がある中で、ファブリーペロー干渉原理を用いたエタロン法を採用することでスペクトル幅1 pm以下の超狭帯域化の実験装置に先駆的に取り組んだ。この狭帯域化手法は、現在も基本的に使用されている。

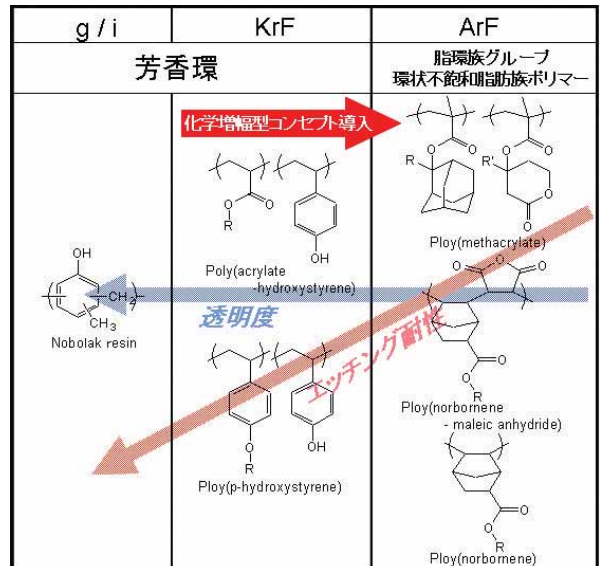
2番目のキーテクノロジーは248 nmや193 nmの露光光



第5図 狭帯域化技術コンセプト

Fig. 5 Concept of narrowing technology.

に透明でエッチングに強いレジストを実現することであった。特に、KrFの光248 nmは眼科治療に使用するほど、有機物の吸収が激しいものでいかに透明性をあげる、即ち二重結合を排除し、一方で強い化学構造を持たせるか、このトレードオフの関係を克服するため、KrFおよびArFに最適な化学増幅型レジストを開発した(第6図)。特にKrFレジストのステレン系ポリマーでは後述のように(第8図)基本特許を取得した。

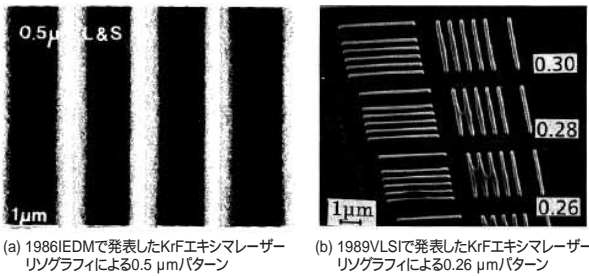


第6図 化学増幅型レジストコンセプト

Fig. 6 Concept of chemically Amplified resist.

3. 周囲状況と実施結果

その学術的功績は、KrFエキシマ縮小露光を1986年(IEDM¹⁾・⁸⁾で、ArFエキシマを1989年VLSIシンポジウム⁹⁾で、世界に先駆けて開発・論文発表したことである。第7図に当時発表したパターン形成したレジスト電子顕微鏡写真をそれぞれ示す。



第7図 世界に先駆けて、国際学会に発表したレジストパターン
Fig. 7 World's 1st resist patterns by KrF, ArF excimer laser lithography.

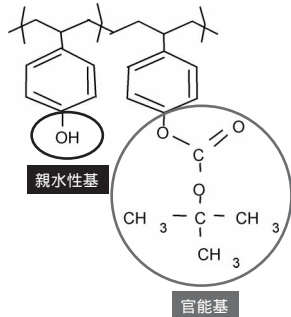
特に、学会、業界での先導的研究とともに、筆者の発明したエキシマレーザーリソグラフィ技術によるパターン形成方法の特許は、露光波長の短波長化に伴う、レジスト材料の光吸収のトレードオフを克服した基本発明であり、現在最先端である45 nm以細のArF液浸リソグラフィに対してまで長く効果を有するものである。以下に、エキシマレーザーリソグラフィ(KrF/ArF/ArF液浸全てに)用のレジストの基本特許である日本国特許第2621533号の説明を第8

化学増幅型レジスト
パターン形成

特許第2621533号
パターン形成方法

ヘキサメチルジシラン処理の施された基板上に、酸雰囲気下でアルカリ可溶性となる官能基と親水基を有する共重合体、露光により酸を発生する感光性化合物、前記共重合体及び前記感光性化合物を溶解可能な溶媒を含むパターン形成材料膜を形成する工程と、遠紫外線により前記パターン形成材料膜を選択的に露光する工程と、前記パターン形成材料膜を現像液により現像し前記パターン形成材料膜の露光された部分を除去して0.5 μm以下の幅を有するパターンを形成する工程とを備えたことを特徴とするパターン形成方法。

エキシマ(化学増幅型)レジストの密着性に対する早期課題認識による基本特許



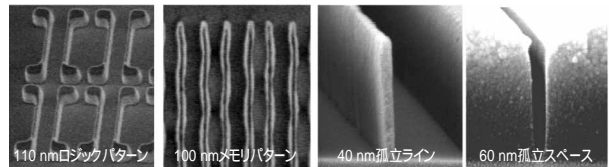
第8図 発明したKrFエキシマレジストの概要

Fig. 8 Outline of innovated KrF excimer laser resist.

図に示す。

4. 工業化の推進と業界先導

KrFエキシマ縮小露光の技術成果はその後、業界あげて1996年に量産化され、ArFエキシマに到っては国家プロジェクト化(旧通産省国家プロジェクト; ASET)され、日本半導体デバイスメーカー10社が結集して量産化に向けての技術加速の源と行なった。筆者はそこでこれまでの数々の実績をかわれてArFエキシマレーザーリソグラフィ研究室長として日本の頭脳やレジスト、マスクや装置メーカーをリードし、さらに欧米コンソーシアムからも高い評価を得て、国際専門学会の議長として国際技術加速し推進した¹⁰⁾・¹²⁾。第9図には得られたArFレジストパターンの電子顕微鏡写真を示す。その成果は世界で抜きん出たものであった。



第9図 ASETで得られた各種ArFエキシマレジストパターン
Fig. 9 Obtained ArF excimer laser resist patterns by ASET.

なお、他の有力技術候補を凌駕するエキシマレーザーリソグラフィ技術成果により、電子線、X線や軟X線リソグラフィは長年膨大な投資を続けているのにもかかわらず未だ半導体プロセスへの実用化の道が開けない状況が続いている。

半導体の微細加工技術の進展も光リソグラフィでは飽和すると危惧されたが、国際半導体業界の意欲的ともいえる微細化ロードマップを確実なものにしたのは、まさにこのエキシマレーザー技術の進展によると言っても過言ではない。最新のロードマップにおいても、2016年までエキシマレーザーリソグラフィ技術がまだ使用されると予測されている。筆者は今日にいたるまで200件以上にのぼる学会発表・論文掲載を行なうとともに、専門国際学会の設立や世界各国の研究者との技術交流を深め、国際半導体ロードマップ専門委員会等の国際会議での場では常に日本代表として指導的立場にあり、リソグラフィ技術分野で世界的権威の地位を得た。学会、業界での先導的立場とともに、筆者の発明したエキシマレーザーリソグラフィ技術によるパターン形成方法の特許は基本発明であり、現在の最先端である45 nm以細のArF液浸リソグラフィに対してまで効果を有するものである。以下に、筆者の主な学会、業界歴職を示した。

・193 nmリソグラフィ国際シンポジウム議長(1996~

1998)

- ・国際半導体リソグラフィロードマップ国際委員；日本代表主査(1997～2006)
- ・1998年国際VLSIシンポジウム基調講演
- ・2006年マイクロナノエレクトロニクス基調講演 其他招待講演多数
- ・日米欧コンソーシアムリソグラフィコミッティ委員

5. エレクトロニクス業界への貢献

エキシマレーザーリソグラフィ(KrF ArF ArF液浸)の開発により、世界の半導体産業の250 nmから32 nmルールまでの量産事業化計画が確立される状況である。すでに65 nmから45 nmレベルまでDRAM、フラッシュ等のメモリーやMPUおよびデジタル家電用システムLSIの最先端の半導体LSIの工業化に利用されており、今後も半導体産業の基盤プロセス技術として多大なる経済的な業界貢献が期待できる。

第10図には、パナソニック半導体でのデジタル家電と半導体の微細化のトレンドを示した。20世紀後半では250 nmの加工寸法のLSIで1000万トランジスタで初期のデジタルTVや携帯電話に採用された。その後の微細化で現在では、45 nmの加工が可能となっており、チップ面積は5%に縮小され、2億5千万のトランジスタが集積されるに至り、最新のBlue-rayレコーダやプラズマTVに搭載され、市場で販売されている。この全ての領域の半導体LSIはエキシマレーザーリソグラフィで製造されている。

6. 結 言

本技術開発の波及効果は大きく、KrFエキシマは、1996年より250 nm以細の量産化を実現し、ArFエキシマでは2003年から90 nm以細の量産化が先端半導体メーカーにより導入されるに至った。KrFエキシマにおいてはほとんど全ての半導体メーカーの工場に導入され、筆者の基本的なパターン形成方法の特許を使用しているものと推察される。半導体産業は世界GNPの25%に相当し、今後その比率はさらに増大する方向にあり、このエキシマレーザーリソグラフィの工業化への功績は予想を越えるものであった。

ASETでの業界貢献だけでなく、筆者は現在でもエキシマリソグラフィ技術発展に寄与しており、今までの経験を生かし、新しい位相シフトマスクであるマスクエンハンサ技術を開発し、世界に先駆けて弊社の65, 45 nm量産化に大きく寄与した¹³⁾⁻¹⁶⁾。

以上のように、筆者の開発した技術は、獨創性、技術水準と工業的インパクト、将来性などいずれの点でも高く評価され、日本が誇りうる優れた半導体プロセス要素技術となった。

今後も、あくなき追及で半導体ロードマップ技術完成のために努力し、半導体産業への貢献に寄与する所存である。



第10図 パナソニックデジタル家電と半導体微細化トレンド

Fig. 10 Trends of Panasonic consumer appliances and semiconductor miniaturization.

参考文献

- 1) M. Sasago, M. Endo, Y. Hirai, K. Ogawa and T. Ishihara, "Half-micron photolithography using a KrF excimer laser stepper", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.316 (1986)
- 2) M. Endo, H. Nakagawa, Y. Hirai, M. Sasago, K. Ogawa, and T. Ishihara, "Advanced excimer laser lithography", in IEEE 1987 VLSI Tech. Dig. Tech. Papers, p.5 (1987)
- 3) M. Sasago, M. Endo, Y. Tani, H. Nakagawa, Y. Hirai, and N. Nomura, "New high transparent resist and process technology", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.88 (1988)
- 4) Y. Tani, M. Sasago, H. Fujimoto, and N. Nomura, "An available KrF excimer laser lithography with high sensitivity positive resist and high power laser", in IEEE 1990 VLSI Symp. Tech. Dig. Papers, p.7 (1990)
- 5) M. Endo, K. Hashimoto, K. Yamashita, A. Katsuyama, T. Matsuo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura; "Quarter micron KrF excimer laser lithography", in IEEE 1992 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.45 (1992)
- 6) T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, K. Hashimoto, T. Koizumi, A. Katsuyama, M. Sasago, and N. Nomura; "New technologies of KrF excimer laser lithography system in 0.25 micron complex circuit patterns", in IEEE 1993 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.145 (1993)
- 7) T. Matsuo, K. Yamashita, M. Endo, M. Sasago, N. Nomura, M. Shirai, and M. Tsunooka, "Advanced Surface modification process for sub-quarter micron pattern fabrication", in IEEE 1994 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, B.2 (1994)
- 8) M. Endo, K. Kobayashi, K. Yamashita, A. Katsuyama, T. Matsuo, Y. Tani, M. Sasago, and N. Nomura, "Challenges in excimer laser lithography for 256Mb dRAM and beyond", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.45 (1992)
- 9) H. Nakagawa, M. Sasago, Y. Tani, M. Endo, K. Koga, Y. Hirai, and N. Nomura, "ArF excimer laser projection lithography", in IEEE 1989 VLSI Symp. Tech. Dig. Tech. Papers, p.9 (1989)
- 10) S. Mori et al, "ulti-Generation Device Fabrication by ArF Lithography", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet., p.578 (1997)
- 11) M. Sasago, "Lithography Solution for Sub 0.1u Generations (Plenary)", in IEEE 1998 VLSI Symp. Tech. Dig. Papers, p.2 (1998)
- 12) 笹子勝, "今後の半導体動向とリソグラフィ技術", 応用物理68, p.520 (1999)
- 13) M. Sasago, "Where are the limitations of 193 nm immersion lithography? PL1-1 (Plenary)", 32nd International Conference on Micro- and Nano-Engineering (2006)
- 14) 笹子勝, "リソグラフィの最近の話題", 応用物理73, p.199(2004)
- 15) 感光性樹脂が身近になる本 (共著), 赤松清監修, CMC出版 (2002)
- 16) 半導体技術の進化イノベーションから実用化まで, SEMI Japan 出版 (2008)