
Sub-40 nmパターン向けダブルパターニング材料

Double Patterning Materials for Sub-40 nm Application

柿澤友洋 庵野祐亮 堀 雅史 若松剛史 中村 敦 藤原考一 杉浦 誠
Tomohiro Kakizawa Yusuke Anno Masafumi Hori Gouji Wakamatsu Atsushi Nakamura Koichi Fujiwara Makoto Sugiura

In this paper authors will cover the fundamentals of litho freeze litho etch (LFLE). This novel double patterning process requires a freeze step that is applied to the first immersion lithography step. This freeze step cross-links the first photoresist, allowing subsequent lithography to take place with no intermixing. It is critical that the freeze step ensures efficient cross-linking to precisely retain the profiles of the first pattern. By doing so, authors have been able to demonstrated high performance and good reliability, both which are necessary for sub-40 nm half-pitch design rules. Results indicate that this freeze process has met many of the necessary criteria in terms of depth of focus, process latitude, critical dimension uniformity, along with etch transfer needed for next generation lithography. Additionally, through the unique use of LFLE and cross line patterning, authors will demonstrate that this process can enable lithographers to resolve narrow contacts holes using 44 nm L/S patterns.

1 はじめに

近年、半導体集積回路の更なる微細化要求を受け、ArF液浸リソグラフィ技術による45 nmハーフピッチ (hp) デバイスの量産が既に始まっている。この液浸リソグラフィとは投影レンズとウエハの間の空間を空気より屈折率の高い純水で満たすことで、レンズ開口数(NA)をドライリソグラフィ対比で飛躍的に向上させることができ、高い解像性能を得る技術である。しかしながら、次の32 nm hp世代ではこの水液浸リソグラフィ技術でも解像力は十分ではなく、更に高解像能を達成する技術開発が求められている。

国際半導体技術ロードマップでは、32 nm hp世代以降向けの高い解像性能に適用できる技術候補として、極紫外リソグラフィ(EUVL, Extreme Ultra Violet Lithography)、高屈折率液浸リソグラフィ(HIL, High Refractive Index Lithography)、ArF液浸リソグラフィを用いたダブルパターニング(DP, Double Patterning)の3つを

挙げている。一つ目のEUVLは13.5 nmの短波長の光を用いることで22 nm hpのパターン形成を可能とする技術であるが、光源の出力不足や集光ミラーの汚染による寿命低下などの設備面での課題がある。同様にHILにおいても高屈折率($n > 1.6 @ 193 \text{ nm}$)を有するレンズの開発が課題として残っており、両技術も量産化までにはまだ数年が必要とされる。これに対し、DPプロセスは既存の液浸リソグラフィ技術をそのまま利用できる為、32 nm hp世代以降の技術として有力なプロセスと見なされている。

DPプロセスにはすでにいくつかのパターニング方法が報告されており^{1)~3)}、代表的なプロセスを図1に示す。図1上段のDual-trenchプロセス(litho-etch-litho-etch)は、1stリソグラフィ後、エッチング工程により無機基板上へパターンを転写し、その後2回目のリソグラフィとエッチング処理を行うプロセスであり、工程数が多く、低スループットという欠点をもつ。これに対し、図1下段に示すDual-lineプロセ

ス (litho-litho-etch)⁶⁾は無機基板上へパターン転写する前にすべてのリソグラフィを完結させる為、エッチング工程は1回のみとなり、その結果、Dual-trenchプロセスに比べ高いスループットが期待される。しかしながら、Dual-lineプロセスでは1stリソ基板上に2ndリソパターンを形成する為、2ndリソグラフィ工程中に1stリソパターンがダメージを受けやすく、1stリソパターンの形状を維持させる新しい技術開発が課題とされていた。

著者らはDual Lineプロセスにおける上記の課題を解決するため、フリージングプロセスと呼ぶ新しい技術を開発した。この新規Dual Lineプロセスは、(i) ArFリソグラフィによって1stリソパターンを形成後、(ii) 1stリソパターンをフリージングプロセスにより硬化、(iii) 1stリソパターン上に2ndリソパターンを形成するものである。

フリージングプロセスで用いるフリージング剤は、樹脂、架橋剤、及び溶剤から構成される薬液であり、1stリソパターンを同薬液で固めることにより、2ndリソグラフィ処理によるパターンダメージから1stリソパターンを保護する役割を果たす。図2にフリージングプロセスを用いたDPの工程スキームを示す。本プロセスは(a)反射防止膜(ARC, Bot-

tom Anti Reflection Coating)上に1stリソパターンを形成、(b)フリージング剤を1stリソパターン上に塗布、ベークする。ベーク中に1stリソパターン成分とフリージング剤との間で架橋反応が進行する。(c)未反応のフリージング剤を現像により除去し、再度ベークを行なうことでフリージングプロセスが完了する。引き続き、(d-g)からなる2ndリソグラフィ工程を行なうことでDPが完結する。

本論文では、新規に開発したフリージングプロセスを含むDual-Lineプロセスの詳細を説明するとともに実際に本プロセスを用いて加工したsub-40 nm hp以下のパターンの形成結果をもとに高解像能パターンニング材料としての特徴及び半導体製造材料としての応用性を論じる。

2 実験

2.1 試料

フリージング剤にはJSR NFC FZX F103を使用した。1stおよび2ndリソグラフィにはアクリル骨格を有するArF用フォトレジスト、BARCは日産化学社製のARC91、ArFレジストの現像には水酸化テトラメチルアンモニウム水溶液(2.38 wt%)を使用した。

2.2 装置

東京エレクトロン社製「CREAN TRACK LITHIUS i」を用いてBARC、ArF用フォトレジスト、フリージング剤の塗布及びベーク、現像を行なった。露光にはASML社製「XT1700i(NA=1.0)」を使用した。またパターン線幅(CD, Critical Dimension)の評価は日立ハイテクノロジーズ社製「CD-SEM S9380」を用いて行なった。

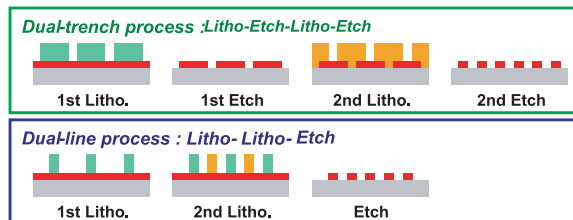


Figure 1 Process schemes of various double patterning.

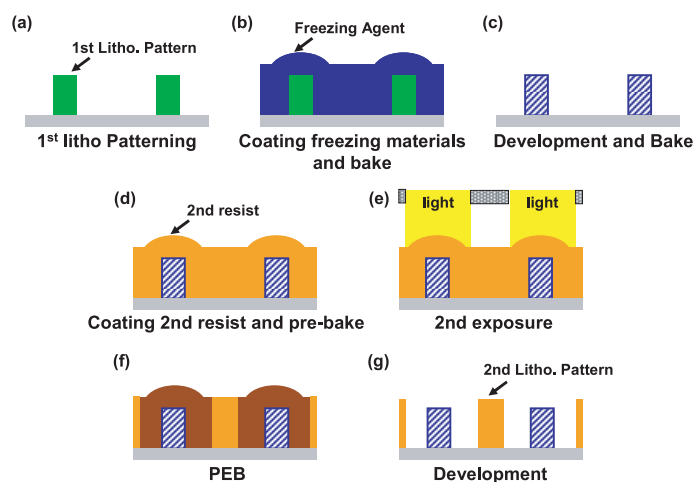


Figure 2 Process schemes of double patterning with a freezing process.

3 結果と考察

3.1 32 nm Line/64 nm Pitchリソパターン形成

フリージングプロセスを用いたDPの有用性を確認するため32 nm hpのパターン形成を行なった。図3には32 nm Line/64 nm Pitchリソパターンを形成した際の各プロセスにおけるCDとパターン形状を示す。

各プロセスでの処理とパターンプロファイルを順に説明する。まず、初めにポジ型ArFレジストを用いたリソグラフィにより図3左写真に示すように、29 nm Line/128 nm Pitch (Line:Space=1:3)の1stリソパターンを得た。次に、このリソパターンにフリージングプロセスを適用したところ、図3中央写真に示すように、1stリソパターンにダメージを与えることなく、形状を維持することができた。フリージングプロセス完了後、1stリソパターンに対し64 nmオフセットをかけた2ndリソ処理を実施することで、最終的に図3右写真に示すように32 nm Line/128 nm Pitchのパターンを形成した。一連の実験より、フリージングプロセスを用いたDPにより32 nm Line/64 nm Pitchのリソパターンを形成できることを検証した。

図3の加工例に示すようにフリージングプロセスは1stリソ

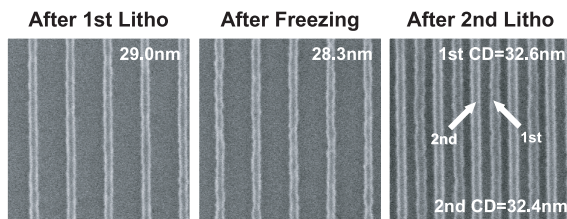


Figure 3 Top-down SEM images measured in each double patterning step of 32 nm Line/64 nm pitch pattern.

パターンのダメージ防止に極めて有効であるだけでなく、得られたパターンプロファイルは1stリソパターン及び2ndリソパターン共に良好であり、32 nm Line/64 nm Pitchリソパターン形成技術として極めて優れたプロセスであることを示す。

3.2 フリージングプロセス適用時の焦点深度マージンとプロセスウィンドウ

開発プロセスを実際のデバイス製造工程に適用する場合重要な項目である焦点深度マージン(DOF, Depth of Focus)とプロセスウィンドウ(PW, Process Window)の評価を行った。図4の一連のSEM写真に示すように最適焦点位置から0.03~0.15 μm の範囲で前後にずらして露光することで得たパターン形状の比較より、1stと2nd両リソグラフィに対しての共通DOFマージンは0.24 μm であった。

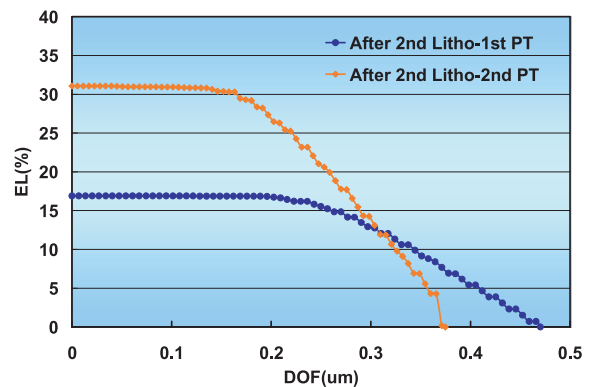


Figure 5 Process window of 32 nmL/64 nmP litho patterns after double patterning processes. KLA Tencor Klarity Pro DATA v. 1. 4. 1.

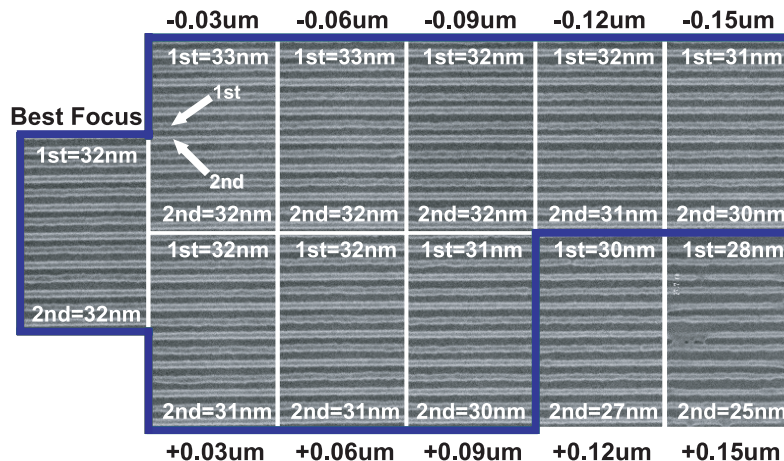


Figure 4 Top-down SEM images of 32 nmL/64 nmP litho patterns after double patterning processes at through focus.

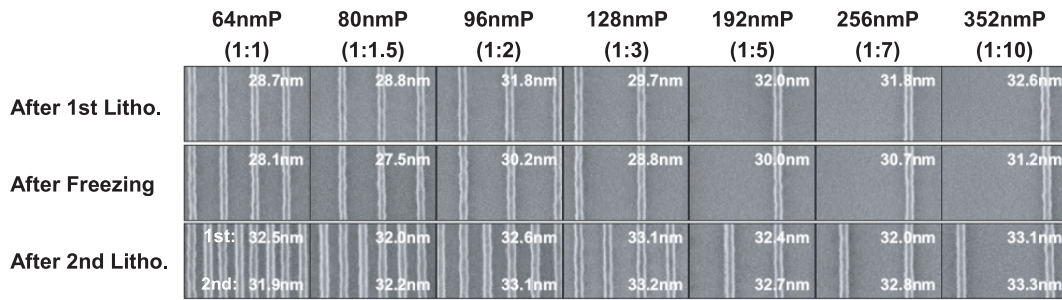


Figure 6 Top-down SEM images measured in each step of double patterning of 32 nm line and various pitch patterns.

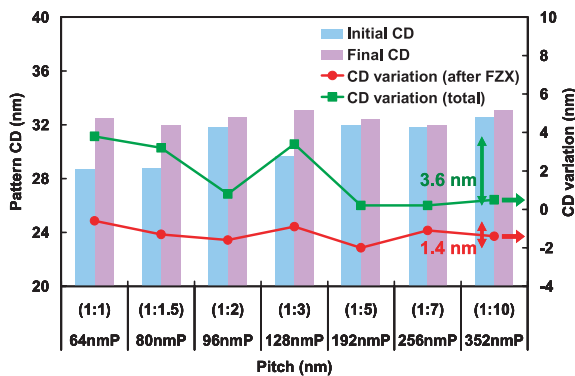


Figure 7 CD variations of first litho pattern through each process step of double patterning.

さらに焦点深度と露光余裕度を組み合わせたマージンであるPWは、1st, 2ndリソグラフィの工程それぞれに対し10%露光余裕度(EL)におけるDOFマージン=0.3 μm であることを確認、フリージングプロセスを用いたDPは32 nm hpの量産化にも適用可能なポテンシャルを持っていることを明らかにした(図5)。

3.3 各プロセスにおける1stリソパターンのCD変動

前述のようにフリージングプロセスを用いたDPは、2ndリソグラフィ時のダメージ防止に効果的であることを示した。この効果はフリージング剤と1stリソパターン成分が架橋反応する材料設計を行った結果得られたものであるが、より微細なパターン形成には架橋反応を精密に制御しCD変動を抑制する事が求められる。特に、実際のデバイスに適用する為には、様々なパターンにおいてもCD変動が小さくかつ一定である事が望ましい。今回開発した材料と工程条件を用いて、様々なピッチサイズにおける32 nmラインパターンのフリージングプロセス後と2ndリソグラフィ後の1stリソパターンのCD変動幅を測定した結果を図6と図7に示す。

32 nm Lineで64 nmから352 nm Pitch範囲でのCD変

動はフリージングプロセス直後ではほぼ見られず安定しており、また、ピッチ間でのばらつきは1.4 nmに抑えられ良好であった。一方、2ndリソ後のピッチ間のばらつきも3.6 nmであり、DPプロセス全体を通してCD変動を4 nm以下に制御できている事を示した。これらの結果より、フリージングプロセスを用いたDPでのCD変動は極めて小さく、かつ様々なピッチサイズにおいても安定しており、実際のデバイス製造に十分適用できることを示した。

3.4 各プロセスにおけるCritical Dimension Uniformity(CDU)

デバイス製造においてウエハ面内でCDのばらつきを抑制することは非常に重要なことであり、CDばらつき発生の低減に向け、フリージングプロセス因子を切り分けることを目的に、DPを用いた32 nm hpリソパターン形成時の各プロセスでのCDU(Critical Dimension Uniformity)を測定した。

図8に300 nmウエハ上で各プロセスにおける32 nm Line/64 nm Pitchの1stリソパターンのCDUの測定結果を示した。1stリソパターンの3 σ の値は1stリソグラフィ後で1.36 nm、フリージングプロセス後で1.96 nm、2ndリソグラフィ後で1.86 nmであった。プロセス進行につれCDUはわずかに悪化するものの、各プロセス後のCDUは2 nm以下と低い値を保っており、フリージングプロセスを用いたDPにおけるCDUは実際のデバイス製造に使用可能なレベルである。

3.5 エッチング特性

フリージングプロセスで作製したリソパターンのエッチング特性への影響を評価した。図9左に示す層構成(BARC/SiOC/APF/Poly-Silicon/Oxide)の積層基板上にDPにより32 nm Line/64 nm Pitchパターンを形成、Poly-Siliconまでのエッチング処理を行なった後、SEMによるパターン観察を行った。図9右写真に示すエッチング後のパターン形状の比較より、1stリソパターンと2ndリソパター

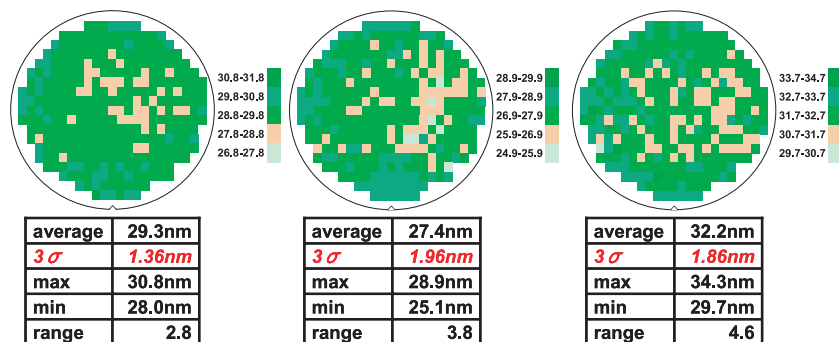


Figure 8 CD uniformity data of the first litho pattern after first litho, after freezing step, and after second litho on 300 mm wafer. Center of color bar corresponds to the average CD in each process step of double patterning.

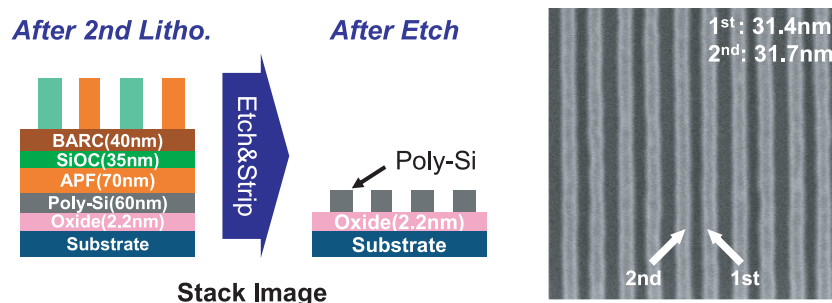


Figure 9 Top-down SEM images of poly silicone etching 32 nL/64 nM² pattern formed by double patterning with freezing agent.

のの違いによるエッチングへの影響は見られず、エッチング特性に関しては問題なく良好であることを確認した。

3.6 コンタクトホール形成

フリージングプロセスを用いたDPはラインアンドスペース (LS) パターン形成だけでなく、様々な微細パターン形成への適用が期待される。たとえば、水液浸を用いたシングルパターンニングでは50 nm以下のコンタクトホールパターンの形成は難しいとされているが、図10(a)に示すフリージングプロセスにより微細コンタクトホールパターンの形成が可能となる。工程は、(i) 1stのLSパターンを形成、(ii) 1stリソパターンをフリージングプロセスにより硬化、(iii) 1stリソパターンに直交するように2ndのLSパターンを形成、以上3段階の工程でコンタクトホールパターンを形成することができる⁴⁾。

図10(b)に実際にフリージングプロセスを用いたDPを用いて形成したコンタクトホールパターンを示す。形成条件は、NA=1.2/Dipoleの光学条件にて44 nmLSパターンを直交させてパターンニングするものであり、この条件で44 nmのコンタクトホールパターンの形成に成功した。形成したホールパターンはエッチング後も良好な形状を維持してお

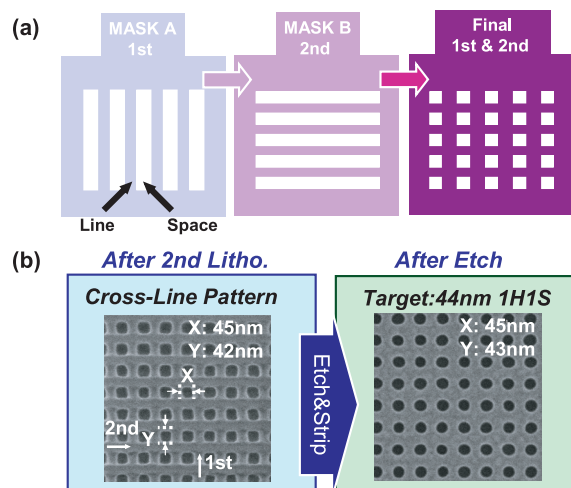


Figure 10 (a) Process schemes of double patterning for hole-patterns formation. (b) Top-down SEM images of hole patterns formed by double patterning with resist freezing (left) and after etch pattern (right).

り、LSパターンのみならず微細コンタクトホールパターン形成においてもフリージングプロセスが有効である事を明らかにした。

4 まとめ

32 nm hp世代以降に向けた微細加工技術として、フリージングプロセスを導入した新規Dual-Lineプロセスを開発し、32 nm Line/64 nm Pitchパターン形成を検証した。本プロセスの特徴は、DPの課題である1stリソパターンのダメージをフリージング剤で抑制する工程を導入することであり、これにより、1stリソパターンのプロファイルを忠実に再現することを実現するとともに従来プロセスの簡略化やスループット向上を達成した。本プロセスを用いて作製したパターンを用い、半導体製造工程への実用適性指標を評価した結果、1st及び2ndリソパターンの共通DOFマージンは0.24 μm と広く、プロセスを通して1stリソパターンのCD変動は4 nm以下と小さく、かつ、ピッチ依存性もほぼないという優れた特性を持つことを示した。また、ウエハ面内のCDU測定結果は2 nm以下と小さく、このフリージング技術が量産に適用できるレベルであることを確認した。本技術は32 nmLSパターンでのエッチング実験においても良好な形状を確保できることに加え、1stと2ndラインパターンを直交させたDP形成により、シングル露光では困難な44 nmのコンタクトホールパターン形成を実現できるなど応用面での広い可能性を有しており、32 nm hp世代以降に向けた微細加工技術として極めて有用である。

謝辞

おわりに、本研究を行うにあたり貴重な議論と液浸露光機の提供、及びエッチング実験などのサポートを賜ったIMEC(Interuniversity Microelectronics Center)に深く感謝致します。

発表紙

- 1) M. Hori, T. Nagai, A. Nakamura, T. Abe, G. Wakamatsu, T. Kakizawa, Y. Anno, M. Sugiura, S. Kusumoto, Y. Yamaguchi, T. Shimokawa: *Proc. of SPIE*, **6923**, 69230H (2008).
- 2) Y. Anno, T. Kakizawa, M. Hori, A. Soyano, K. Fujiwara, A. Nakamura, M. Sugiura, Y. Yamaguchi, T. Shimokawa: *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **21**, 691 (2008).

引用文献

- 1) S. M. Kim, S. Y. Koo, J. S. Choi, Y. S. Hwang, J. W. Park, E. K. Kang, C. M. Lim, S. C. Moon, J. W. Kim: *Proc. SPIE.*, **6520**, 65200H-1 (2007).
- 2) M. O. Beeck, J. Versluijs, V. Wiaux, T. Vandeweyer, I. Ciofi, H. Struyf, D. Hendrckx, J. V. Olmen: *Proc. SPIE.*, **6520**, 65200I-1 (2007).
- 3) W. Y. Jung, S. M. Kim, C. D. Kim, G. H. Sim, S. M. Jeon, S. W. Park, B. S. Lee, S. K. Park, J. S. Kim, L. S. Heon: *Proc. SPIE.*, **6520**, 65201C-1 (2007).
- 4) H. Nakamura, M. Omura, S. Yamashita, Y. Taniguchi, J. Abe, S. Tanaka, S. Inoue: *Proc. SPIE.*, **6520**, 65201E-1 (2007).
- 5) H. J. Liu, W. H. Hsieh, C. H. Yeh, J. S. Wu, H. W. Chan, W. B. Wu, F. Y. Chen, T. Y. Huang, C. L. Shin, J. P. Lin: *Proc. SPIE.*, **6520**, 65202J-1 (2007).
- 6) A. Vanleenhove, D. V. Steenwinckel: *Proc. SPIE.*, **6520**, 65202F-1 (2007).