特　集　記　事

# EUV リソグラフィ用レジストの増感とラフネス改善へのアプローチ

東京エレクトロン株式会社　永原 誠司*

As a radiation chemistry application, EUV resist materials for EUV lithography are to be used for mass production of semiconductor devices. The remaining important challenges of EUV resists for mass production are the cost reduction of EUV lithography by using high sensitivity (high throughput) resist and the reduction of roughness caused by the effect of photon and chemical shot noise in EUV lithography. As one of the approaches to sensitize the resist with keeping lithography performance including roughness performance, *Photosensitized Chemically Amplified Resist*™ (PSCAR™)** technologies are reviewed in this article.

**Keywords:** EUV resist, *Photosensitized Chemically Amplified Resist*, PSCAR, sensitivity, shot noise

## 1　はじめに

イオン化エネルギーを超える放射線である 13.5 nm の極紫外線（EUV）を用いたリソグラフィの実用化へ向けた準備が着々と進んでいる[1–3]．EUV リソグラフィの課題のひとつであるコストを下げるため，レジストの高感度化による EUV 露光のスループット向上が望まれている．一方，従来の化学増幅型レジストでは，解像度（Resolution）とラフネス（LWR）と感度（Sensitivity）の間にトレードオフの関係（RLS トレードオフ）があり，すべてを同時に改善することが難しい[4–8]．そのため，今までにない新しい技術で，従来の RLS トレードオフの関係を打破し，ラフネスや解像度の劣化を抑えつつ，EUV 光に対する感度を上げ，EUV リソグラフィの生産性を上げる方法が切望されている．高いエネルギーの光子を用いる EUV リソグラフィでは，エネルギーの低い波長の光を露光する場合と比較して，同じ露光量をウェーハ上に照射しても，光子数が少なくなる．たとえば，ひとつのホールパターンを形成するために，数百個から数千個をいう少ない光子数で像を形成するようになる．その場合，光子の個数の統計的なばらつき（光子のショットノイズ）が引き起こすレジスト寸法のばらつきが無視できなくなる[4–8]．これらの統計的ばらつき因子の存在下で，より忠実にパターンを形成できる方法も望まれている．本稿では，PSCAR™ [9–18] を例に，ばらつき因子の影響を低減しつつ感度を上げるアプローチを紹介する．

## 2　光増感化学増幅型レジスト (PSCAR™) 技術

### 2.1　EUV レジストの高感度化の技術：PSCAR™

レジストを高感度化する手法として光増感化学増幅型レジスト PSCAR™（*Photosensitized Chemically Amplified Resist*™）が 2013 年に大阪大学田川教授らから発表され[9]，その後，産業界での実用化へ向けて研究開発が進んでいる．PSCAR™ は，化学増幅型レジストの組成として，ベース樹脂に加え，光増感剤前駆体（PP），増感性の光酸発生剤（PS-PAG），クエンチャを使用したレジストである[10,11,13]．Figure 1 に PSCAR™ のプロセスフローを示す．PSCAR™ のプロセスでは，EUV 露光後，現像をする前に，UV による一括露光を行う点が，従来のレジストプロセスとは異なっている．本プロセスでは，まず，EUV 露光機によるパターン露光で PS-PAG から生成した酸が，PP を酸触媒反応で分解する．その反応により，パターン露光部だけに光増感剤（PS）が生成する．次に，PS だけが光を吸収する比較的長波長の UV 波長で，レジストを一括露光する．この工程で，パターン露光部で PS が選択的に一括露光の UV 光を吸収し，その結果，光増感反応によりパターン露光部だけで PS-PAG が分解し，酸が追加で発生する．一括露光の波長は，PS-PAG が直接の光

Approaches toward EUV resist sensitization and roughness reduction

Seiji Nagahara* (*Tokyo Electron Limited*),
〒107–6325 東京都港区赤坂 5–3–1 赤坂 Biz タワー
TEL: 03–5561–7473, FAX: 03–5561–7395,
E-mail: seiji.nagahara@tel.com

吸収により分解しないが，光増感反応を経れば酸を発生できる波長を用いる．この概念により，EUV 露光で発生する酸の発生を低減しても，UV 一括露光による増感反応で，パターン露光部にレジストの極性変化反応に必要な量の酸を発生できる．そのため，EUV リソグラフィの高感度化が実現できる．

### 2.2　PSCAR™ 2.0 技術

PSCAR™ の発展型のレジストとして，2017 年に PSCAR™ 2.0 の概念が発表された[16]．化学増幅型レジストの組成として，ベース樹脂，PP，PS-PAG に加え，増感性の光分解型クエンチャ (PS-PDB) を使用したレジストである．Figure 2 に示すように，PSCAR™ 2.0 のプロセスフローは，従来の PSCAR™ と同様で，EUV 露光後に UV 一括露光を行うことで，レジストの増感を行う[16,17]．Figure 3 に PSCAR™ 2.0 の反応ステップを示す[17]．EUV リソグラフィにより，露光部で PS-PAG と PS-PDB が分解し，酸の潜像ができる．その酸による触媒反応で，PP から PS が生成する．その後，UV 光による一括露光で PS が生成している部分だけで増感反応を引き起こす．その結果，PS が生成している EUV 露光部で，PS-PAG だけでなく PS-PDB が増

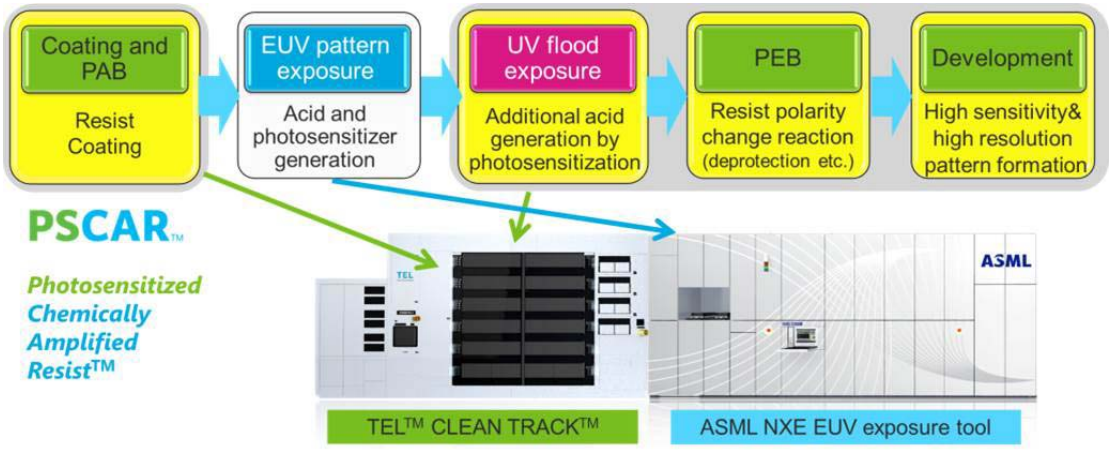



Figure 1.　PSCAR™ process flow.

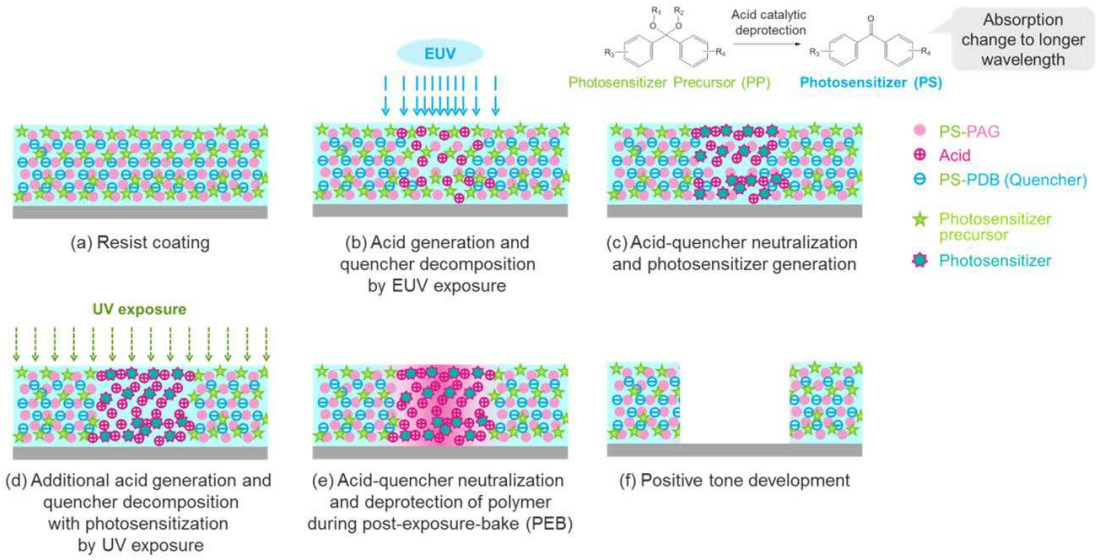



Figure 2.　PSCAR™ 2.0 reaction flow[16,17].

感により分解し，より鮮明な酸の潜像が形成される．それにより，ベース樹脂の加熱で起こる脱保護反応で形成される像質が改善する．また，PS-PDB も分解することで UV 一括露光の露光量を大幅に減らすことができる．ベース樹脂のベークによる脱保護後，アルカリ現像液で現像すると露光部が現像され（ポジトーン現像：PTD），有機現像液で現像すると未露光部が現像され（ネガトーン現像：NTD），レジストパターンが形成される．Figure 4 は，通常の化学増幅型レジスト（CAR）と PSCAR™ 2.0 のシミュレーションによる潜像を示している[16,17]．PSCAR™ 2.0 の概念を用いることで潜像の像質が大きく改善することが示唆されている．これは，クエンチャの光増感分解を組み合わせることで，クエンチャ量をコントラストが最大になるように調整できるためである．このことから，高コントラスト（低ラフネス，高解像度）と高感度を両立できる可能性がある．

Figure 5 は，PSCAR™ 2.0 が，UV 一括露光で感度が増感されている様子を示している．16.5 nm ラインのレジストパターンにおいて，10 J/cm$^2$ の UV 一括露光で感度が 1.19 倍となっており，ラフネスを劣化させずにレジストの増感ができることを示している[17]．

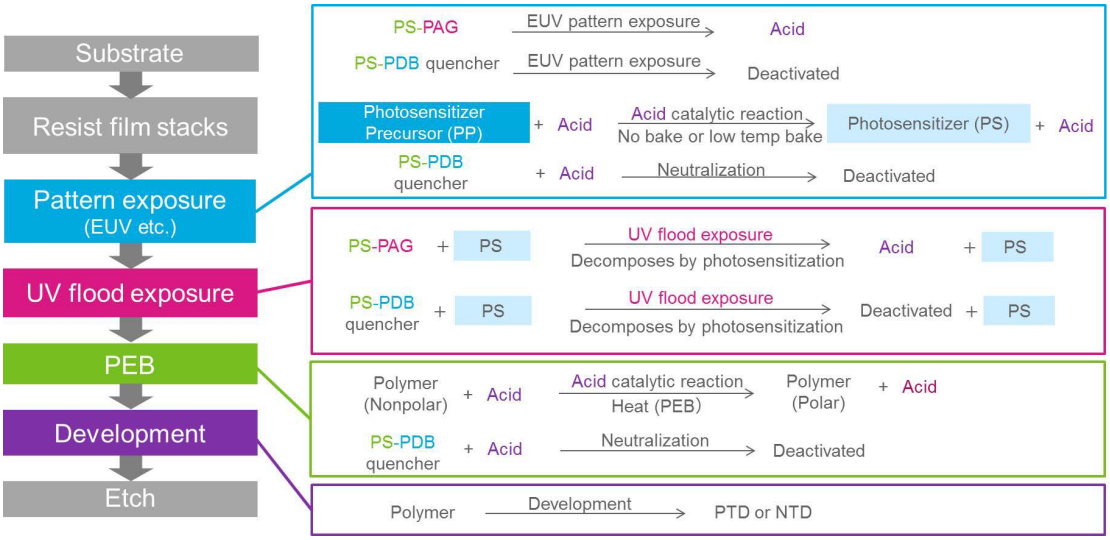



Figure 3.　PSCAR™ 2.0 reaction steps.[16,17]

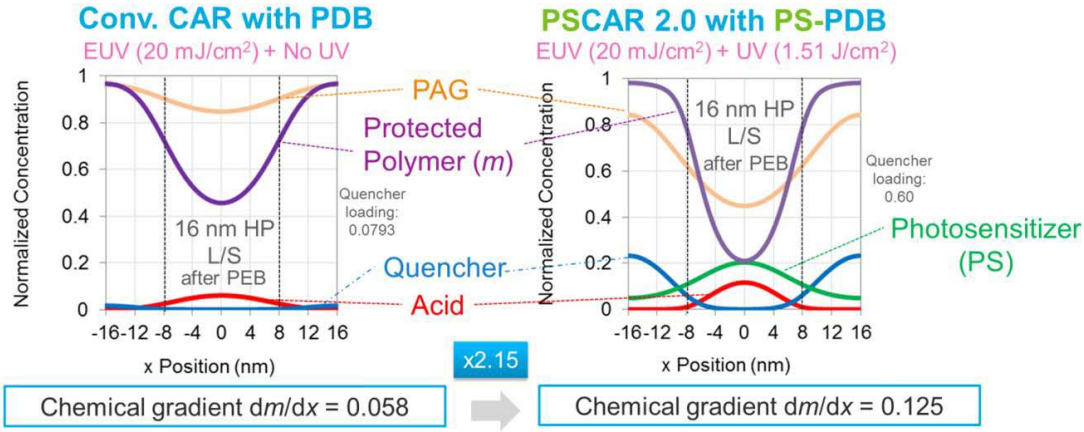



Figure 4.　Comparison of simulated chemical gradients after PEB between conventional CAR (left) and PSCAR™ 2.0 (right)[16,17]

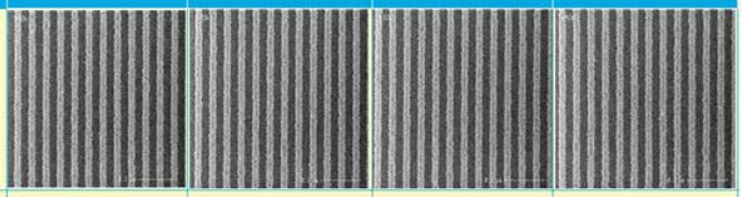
| UV flood exposure dose | 0 J/cm$^2$ | 5 J/cm$^2$ | 10 J/cm$^2$ | 15 J/cm$^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 16.5 nm line at 36 nm pitch SEM-image (Mag X 300k, Y 52.7k) |  | | | |
| EUV dose to size (mJ/cm$^2$) | 50.5 | 47.0 | 42.5 | 37.5 |
| Relative resist sensitivity | 1 | x 1.07 | x 1.19 | x 1.35 |
| EUV EL (CD±10%) (%) * | 15.3 | 14.6 | 15.1 | 15.9 |
| Unbiased LWR (nm) | 2.33 ± 0.11 | 2.24 ± 0.09 | 1.99 ± 0.08 | 2.48 ± 0.10 |
| Unbiased LER (nm) | 1.99 ± 0.04 | 1.75 ± 0.04 | 1.73 ± 0.03 | 1.94 ± 0.04 |

Figure 5. PSCAR$^{TM}$ 2.0 exposure results at imec. Relative resist sensitivity = (UV 0 J/cm$^2$ dose-to-size) / (Sample dose-to-size).

この PSCAR$^{TM}$ 2.0 技術は，統計的な効果を考慮したレジストシミュレーションでも，レジストのラフネスを下げることができると期待されている[16]．PSCAR$^{TM}$ の実用化へ向けて，高感度化の効率向上と高感度化時の像質の改善のため，さらなる材料と UV 一括露光装置の開発活動が続いている．

## 3 まとめ

EUV リソグラフィの実用化に向けて，EUV レジストの更なる改善が望まれている．EUV リソグラフィによる 20 nm 以下のきわめて微細なパターンを高感度（高スループット）レジストで形成するためには，レジストのコントラストをできるだけあげて，光子や化学物質のばらつきの影響を抑えるアプローチが必須になる．本稿では，有望なアプローチの例として PSCAR$^{TM}$ 技術を紹介した．放射線化学の基礎的理解と応用に基づいて，本新技術が進展していくことに期待している．

〈謝　辞〉

PSCAR$^{TM}$ の研究開発にあたって，共同研究でご協力くださり，ご指導いただいた皆様に感謝いたします．

**PSCAR$^{TM}$ は，東京エレクトロン株式会社と大阪大学の登録商標です．

〈参 考 文 献〉

1) A. Lio, Proc. SPIE, 9776 (2016) 97760V.
2) S-S. Kim, R. Chalykh, H. Kim, S. Lee, C. Park, M. Hwang, J-O. Park, J. Park, H. Kim, J. Jeon, I. Kim, D. Lee, J. Na, J. Kim, S. Lee, H. Kim, S-W. Nam, Proc. SPIE, 10143 (2017) 1014306.
3) A. Yen, Proc. SPIE, 9776 (2016) 977632.
4) C. A. Mack, Proc. SPIE, 9189 (2014) 91890D.
5) Y. Ma, H. J. Levenson, T. Wallow, Proc. SPIE, 6518 (2007) 651824.
6) G. M. Gallatin, Proc. SPIE, 5754 (2005) 38.
7) G. M. Gallatin, P. Naulleau, R. Brainard, Proc. SPIE, 6519 (2007) 651911.
8) C. A. Mack, Proc. SPIE, 10583 (2018) 1058315.
9) S. Tagawa, A. Oshima, S. Enomoto, J. Photopolym. Sci. Technol., 26 (2013) 825.
10) S. Tagawa, A. Oshima, S. Enomoto, C. Q. Dinh, Proc. SPIE, 9048 (2014) 90481S.
11) S. Nagahara, M. Carcasi, H. Nakagawa, E. Buitrago, O. Yildirim, G. Shiraishi, Y. Terashita, Y. Minekawa, K. Yoshihara, M. Tomono, H. Mizoguchi, J. Estrella, T. Nagai, T. Naruoka, S. Dei, M. Hori, A. Oshima, M. Vockenhuber, Y. Ekinci, M. Meeuwissen, C. Verspaget, R. Hoefnagels, G. Rispens, R. Maas, H. Nakashima, S. Tagawa, Proc. SPIE, 9776 (2016) 977607.
12) E. Buitrago, S. Nagahara, O. Yildirim, H. Nakagawa, S. Tagawa, M. Meeuwissen, T. Nagai, T. Naruoka, C. Verspaget, R. Hoefnagels, G. Rispens, G. Shiraishi,

Y. Terashita, Y. Minekawa, K. Yoshihara, A. Oshima, M. Vockenhuber, Y. Ekinci, Proc. SPIE, 9776 (2016) 97760Z.

13) T. Nagai, H. Nakagawa, T. Naruoka, S. Tagawa, A. Oshima, S. Nagahara, G. Shiraishi, K. Yoshihara, Y. Terashita, Y. Minekawa, E. Buitrago, Y. Ekinci, O. Yildirim, M. Meeuwissen, R. Hoefnagels, G. Rispens, C. Verspaget, R. Maas, Proc. SPIE, 9779 (2016) 977908.

14) E. Buitrago, S. Nagahara, O. Yildirim, H. Nakagawa, S. Tagawa, M. Meeuwissen, T. Nagai, T. Naruoka, C. Verspaget, R. Hoefnagels, G. Rispens, G. Shiraishi, Y. Terashita, Y. Minekawa, K. Yoshihara, A. Oshima, M. Vockenhuber, Y. Ekinci, J. Micro-Nanolithogr. MEMS MOEMS, 15 (2016) 033502.

15) M. Carcasi, M. Carcasi, S. Nagahara, G. Shiraishi, T. Iseki, Y. Minekawa, K. Yoshihara , H. Nakagawa, T. Naruoka, T. Nagai, A. Oshima, S. Tagawa, Proc. SPIE, 10143 (2017) 1014329.

16) S. Nagahara, M. Carcasi, G. Shiraishi, H. Nakagawa, S. Dei, T. Shiozawa, K. Nafus, D. De Simone, G. Vandenberghe, H-J. Stock, B. Küchler, M. Hori, T. Naruoka, T. Nagai, Y. Minekawa, T. Iseki, Y. Kondo, K. Yoshihara, Y. Kamei, M. Tomono, R. Shimada, S. Biesemans, H. Nakashima, P. Foubert, E. Buitrago, M. Vockenhuber, Y. Ekinci, A. Oshima, S. Tagawa, Proc. SPIE, 10146 (2017) 101460G.

17) S. Nagahara, M. C. G. Shiraishi, Y. Kamei, K. Nafus, Y. Minekawa, H. Ide, Y. Kondo, T. Shiozawa, K. Yoshida, M. Enomoto, K. Yoshihara, H. Nakashima, S. Biesemans, R. Shimada, M. Tomono, K. Takeshita, T. Moriya, H. Makoto, R. Aizawa, Y. Konishi, M. Hori, K. Maruyama, H. Nakagawa, M. Miyake, T. Nagai, S. Dei, T. Naruoka, M. Shima, T. Kimura, G. Vandenberghe, J. S. Petersen, D. De Simone, F. Philippe, H-J. Stock, B. Meliorisz, A. Oshima, S. Tagawa, Proc. SPIE, 10586 (2018) 1058606.

18) M. Carcasi, S. Nagahara, G. Shiraishi, Y. Minekawa, H. Ide, Y. Kondo, K. Yoshihara, M. Tomono, R. Shimada, K. Takeshita, T. Moriya, Y. Kamei, K. Nafus, S. Biesemans, H. Nakashima, M. Hori, K. Maruyama, H. Nakagawa, T. Nagai, S. Dei, M. Miyake, T. Naruoka, M. Shima, G. Vandenberghe, D. De Simone, P. Foubert, J. Petersen, A. Oshima, S. Tagawa, Proc. SPIE, 10583 (2018) 105831M.

〈著 者 略 歴〉

永原 誠司： 大阪大学大学院工学研究科博士課程修了，博士（工学）．現在，東京エレクトロン株式会社にて最先端リソグラフィ向け塗布現像装置の技術開発，マーケティングに携わる（プリンシパル/チーフサイエンティスト）．東京エレクトロン株式会社入社以前は，半導体メーカー（NEC，NEC エレクトロニクス，ルネサスエレクトロニクス），研究機関（米国アルゴンヌ国立研究所，米国カリフォルニア大学バークレー校，ベルギー imec 等）でも最先端半導体のリソグラフィプロセス技術の研究開発に携わった．