特　集　記　事

パルスラジオリシス法を用いたレジスト材料の放射線化学初期過程の解明と応用

大阪大学 産業科学研究所　岡本 一将*, 古澤 孝弘

Extreme ultraviolet (EUV) lithography is being introduced for semiconductor mass production. The performance of resist materials is one of the most important factors to realize future pattern size miniaturization. We have carried out pulse radiolysis method to clarify radiation chemistry of resists after exposure to ionizing radiation such as EUV and electron beam. In this article, pulse radiolysis studies of models of chemically amplified EUV resist are reviewed. We also describe a method for improving resist performance by acid-generating promoter based on deprotonation from the radical cation of base polymer as predicted from the results of the pulse radiolysis results.

Keywords: resist, pulse radiolysis, polyhydroxystyrene, deprotonation, acid-generating promoter

1　はじめに

半導体製造の基幹技術の一つであるリソグラフィは，微細加工材料であるレジストが露光により感応し，マスクパターンが転写されることにより像形成が行われる．水銀ランプ，KrF，ArF エキシマレーザーによる露光を用いた光リソグラフィに続き，プラズマ光源からの波長 13.5 nm の極端紫外線（EUV）を用いた EUV リソグラフィ（EUVL）の 2019 年以降の導入が進められている[1,2]．EUVL の導入開始時では，現在量産ラインで広く用いられている化学増幅型レジスト（CAR）の使用が考えられている．CAR は，露光後に生じる酸による反応によってレジストの溶解を司る分子構造が変化し，この変化が更に酸を発生する化学反応を起こす設計がされている[3,4]．したがって，現像液に対して露光部・未露光部の溶解コントラストを，少ない露光量で生み出すことができる（高感度）．従来用いられている光リソグラフィ用 CAR では，露光源に対して感光性を持つ酸発生剤（PAG）と小さい吸収係数のベース樹脂が用いられ，PAG に選択的にエネルギーが付与されることで励起後の分解反応により最初の酸を生成する．一方，EUVL では，1 光子当たりのエネルギーが一般的な有機レジストのイオン化閾値（約 10 eV）を超え，レジストへのエネルギー付与が原子組成に影響されるようになる．そのため，CAR に対するエネルギー付与はほとんど非選択的になり，イオン化は最も大きい成分比率であるベース樹脂で起こる確率が高くなる．エネルギー付与後，イオン化後に生じた二次電子は PAG に解離性電子付着しアニオンを形成し，ベース樹脂のラジカルカチオンは脱プロトン反応を引き起こしアニオンとプロトンが結び付く結果，酸を形成する[5]．これらの機構の解明には，大型の電子線加速器からの電子線パルスを照射し，分析光の吸収や発光の測定を行うポンプ―プローブ法の一種であるパルスラジオリシス法が大きな役割を果たしてきた[6]．これまでにレジスト関連分子として，ベース樹脂であるポリスチレンやアクリレート系などの高分子，また PAG ならびにその他モデル化合物の放射線誘起反応ならびに短寿命種のダイナミクスが報告されている．

上記のように二次電子と PAG との反応は CAR 中の酸生成に重要な反応である．テトラヒドロフラン（THF）中に PAG を溶解させたサンプルのパルスラジオリシスにより二次電子と PAG の反応性が調べられた[7–9]．一方で，ラジカルカチオンの脱プロトン反応も酸収量に大きな影響を与える．これはポリスチレンのベンゼン環に OH 基が結合したポリヒドロキシスチレン（PHS）は PAG 存在下でポリスチレン中と比較し，電子線露光後に生成する酸の収量が大きいことから明らかとなっている[10]．ラジカルカチオンからの脱プロ

Elucidation of primary process of radiation chemistry of resist materials using pulseradiolysis method and its application
Kazumasa Okamoto* and Takahiro Kozawa (*The Scientific and Industrial Research, Osaka University*),
〒567–0047 大阪府茨木市美穂ケ丘 8–1
TEL: 06–6789–8413, FAX: 06–6789–4889,
E-mail: kazu@sanken.osaka-u.ac.jp

トン反応は，アクリレート系高分子のラジカルカチオンは自身明確な過渡吸収を示さないため，パルスラジオリシスによる直接的な観察が困難なことに対し[11]，ポリスチレン系高分子のラジカルカチオンは他の芳香族分子同様ダイマー（またはトリマー）ラジカルカチオンの電荷共鳴（CR）バンドを示すため，ラジカルカチオン経由の反応の解析が可能である[12]．ダイマーラジカルカチオンは，正電荷が芳香環間の非局在化により安定化し，近赤外波長領域（NIR）に特徴的な CR バンドを示すことが知られている[13]．NIR は他の短寿命活性種の吸収の重なりがほとんどなく，ラジカルカチオンのダイナミクスを明確にすることができる．

PHS 系高分子は従来 KrF 用レジスト（波長 248 nm）のベース樹脂として用いられているが，電離放射線で感応する EUV や電子線レジストにおいても適応可能である．この放射線誘起過程を調べるため，PHS 溶液のナノ秒パルスラジオリシスが阪大産研にて我々のグループで行われ，生成する活性種の同定，ダイマーラジカルカチオンの生成と脱プロトン反応が明らかとなってきた[14,15]．本稿では，PHS のパルスラジオリシス研究から続く，化学増幅型 EUV レジストを想定した系における最近の研究を概説し，そこで得られた知見に基づいた酸生成促進剤による新しいレジスト性能の向上法について述べる．

2　PHS 系高分子溶液のパルスラジオリシス

2.1　溶媒依存性

PHS のパルスラジオリシスは初めにベンゾニトリル溶媒中 SF_6 飽和下で測定を行い，PHS モノマーラジカルカチオンの過渡吸収を報告し[14]，その後 PHS が溶解する非極性溶媒として *p*-ジオキサンを用いて，モノマーとダイマーラジカルカチオンの脱プロトン反応に関する知見が得られた[15]．PHS ラジカルカチオンの脱プロトン反応はフェノール誘導体のラジカルカチオンダイナミクスと同様の傾向を示した．Brede らにより，フェノール誘導体はラジカルカチオン形成時の OH 基の角度に依存し，ベンゼン環に対して垂直な配向であるとピコ秒以内に非常に速く脱プロトン反応が起こるのに対し，OH 基が水平になるとラジカルカチオンが安定化し，緩やかな脱プロトン反応が起こると提案された[16]．似た構造である PHS の場合においても同様の傾向が考えられるが，非常に速い脱プロトン反応は電子線パルス照射直後に PHS のフェノキシラジカルの吸収が観測できたことからも支持され，遅い脱プロトン反応もナノ秒パルスラジオリシスで観察することができた．しかし，PHS はフェノールと異なり，パルスラジオリシスでよく使用する塩素系炭化水素やアルカンに不溶だったので，ラジカルカチオンのダイナミクスの詳細を明らかにするため，溶媒からのホール移動が可能と思われるイオン化ポテンシャルが PHS のモデル化合物である *p*-クレゾールより高い溶媒に対し，系統的に電子線パルスラジオリシスを行った[17]．Figure 1 に一例として PHS/シクロヘキサノン溶液で得られた過渡吸収スペクトルを示す．

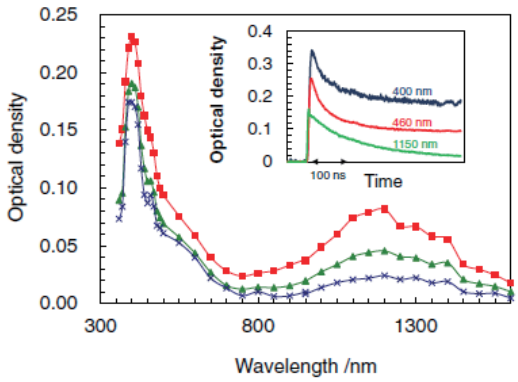

Figure 1.　Transient absorption spectra of PHS [200 mM (unit conc.)] in O_2 saturated cyclohexanone at 50 (■), 150 (▲), and 300 ns (×) after the 8 ns electron beam pulse obtained by nanosecond pulse radiolysis. Inset: the kinetic traces monitored at 400, 460, and 1150 nm. Reproduced from Ref. 17. Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

波長 400 nm にフェノキシラジカルの吸収ピークを，波長 460 nm にモノマーラジカルカチオンの吸収，近赤外波長領域に PHS 分子内ダイマーラジカルカチオンの CR バンド吸収を示した．しかし，フェノキシラジカルとラジカルカチオンの吸収波長域が近いことから吸収が重なり，ラジカルカチオンの脱プロトン反応によるフェノキシラジカルの生成はデータ上明確ではない．しかし，Fig. 2(a) に示すようにエチルアセテートを溶媒として用いると，CR バンドの吸収強度が小さくなり，可視域のラジカルカチオン吸収の影響も同様に小さくなったため，PHS のラジカルカチオンの脱プロトン化によるフェノキシラジカルの生成過程を直接観察することができた．そしてフェノール同様の脱プロトン反応機構が初めて明らかとなった．また，他に非プロトン性溶媒として知られるジメチルスルホキ

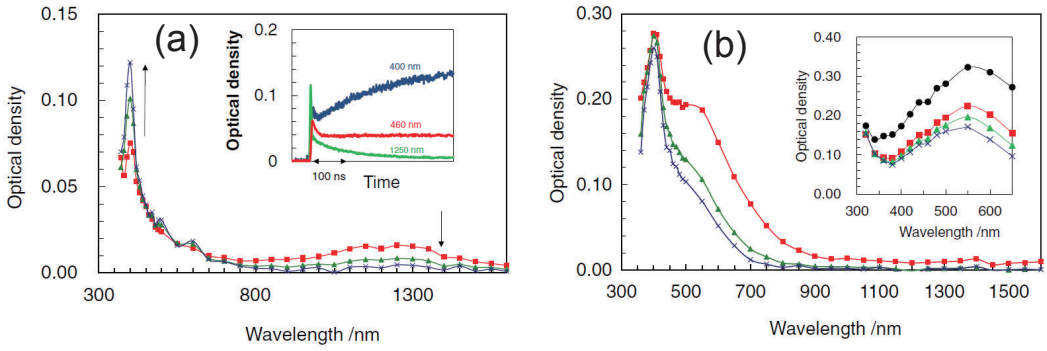

Figure 2. Transient absorption spectra of PHS[200 mM (unit conc.)] in O_2-saturated solvents at 50 (■), 150 (▲), and 300 ns (×) after the 8 ns electron beam pulse obtained by nanosecond pulse radiolysis (a) in ethyl acetate (Inset: the kinetic traces monitored at 400, 460, and 1250 nm) and (b) in DMSO. (Inset: Transient absorption spectra in O_2-saturated neat liquid DMSO immediately (●), 50 (■), 150 (▲), and 300 ns (×) after the 8 ns electron beam pulse). Reproduced from Ref. 17. Copyright (2013) The Japan Society of Applied Physics.

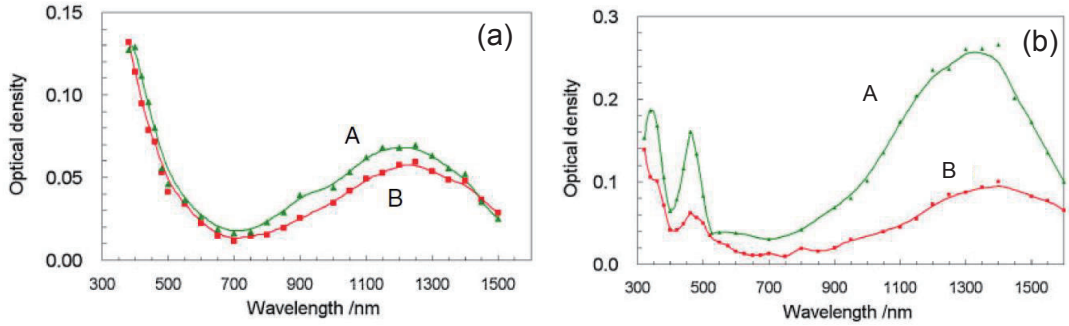

Figure 3. Transient absorption spectra in O_2-saturated solvents at 50 ns after electron beam pulse irradiation in in Ar-saturated solutions in *p*-dioxane with 25 mM triphenyl sulfonium triflate (TPS-tf) (A) and without TPS-tf (B). Polymers (solutes) are PHS (a) and poly(4-methoxystyrene) (b) [200 mM (unit conc.)]. Reproduced from Ref. 18. Copyright (2015) The Japan Society of Applied Physics.

シド（DMSO）を溶媒に用いた場合も，Fig. 2(b) に示すように非常に興味深い結果を示した．

DMSO 中では CR バンドが現れなかったのに対し，フェノキシラジカルの大きな吸収ピークと DMSO ラジカルカチオンの吸収が観察された．DMSO ラジカルカチオンの減衰速度は PHS 添加により速くなっているので，DMSO ラジカルカチオンから PHS へのホール移動が起こっているが，脱プロトン反応が非常に速く起こるため，PHS ラジカルカチオンは電子線照射直後に消失し，フェノキシラジカルが生成したことになる．この知見は，後で述べるレジスト樹脂からの脱プロトン反応の高効率化について発想する大きなきっかけとなった．

2.2 PAG を添加した系におけるパルスラジオリシス

CAR を対象としたパルスラジオリシスの研究は，ベース樹脂，PAG といった個々の成分の溶液について研究が行われてきた．そのため，次に PHS と OH 基が保護された状態であるポリ（4-メトキシスチレン）（PMOS）のラジカルカチオンのダイナミクスの PAG 添加による影響について調べた[18]．

Figure 3 にナノ秒パルスラジオリシスで得られた結果を示す．PAG を添加すると電子捕捉剤として働くた

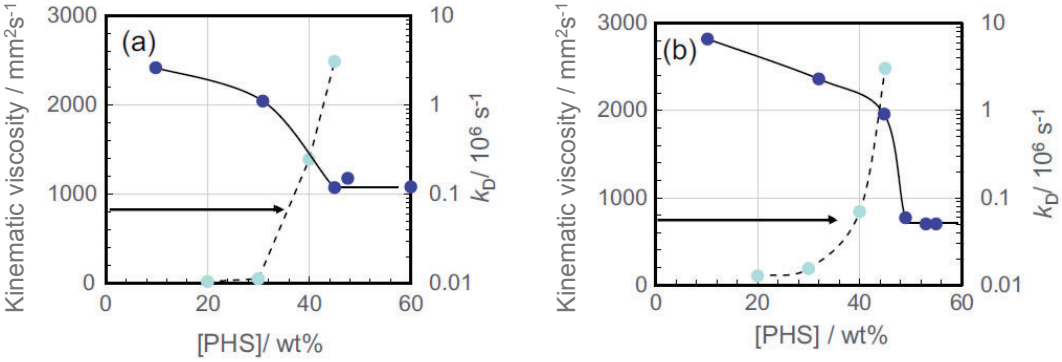

Figure 4. Dependence of PHS conc. in cyclohexanone (a) and *p*-dioxane (b) on the kinematic viscosity of the solution (dashed line) and kinetic constant of deprotonation (k_D) of the PHS radical cation (solid line). Reproduced form Ref. 21. Copyright (2016) Elsevier.

め，ジェミネート再結合反応が遅れ，わずかに PHS ダイマーラジカルカチオンの CR バンドの吸光度の増加が確認されたが，いずれも数 100 ns の寿命で減衰し，大きな変化は現れなかった．これは PHS からの脱プロトン反応に PAG や PAG の分解生成物がほとんど寄与していないことを示す．一方で PMOS は PAG の添加により，CR バンドの吸収強度の大きな増加ならびに短波長シフトが観察された．同様の傾向は PAG の代わりに塩化メチレンを添加剤として用いた場合でも見られたので[19]，PAG の分解で生成する芳香族であるジフェニルスルフィド[20] と PHS ダイマーラジカルカチオンの相互作用は考えにくい．そのため，PMOS の場合，ラジカルカチオンの脱プロトン反応効率が低いため，PMOS ラジカルカチオンと PAG の解離性電子付着で生成したアニオンが溶液中で PHS と比べ 30 μs 程度の寿命で安定に存在できると考えられる．

2.3 高濃度溶液系のパルスラジオリシス

上記までは，比較的希薄な高分子溶液系で研究を行った結果である．しかし，実際のレジスト反応は固体薄膜中で誘起されるため，個々の素反応としては同様に起こるとしても，反応ダイナミクスは大きく変わる可能性がある．しかし PHS はバルクで結晶性が高く，十分な光路長を持つ固体サンプルの準備が困難である．そこで，PHS がシクロヘキサノンや *p*-ジオキサン等の溶媒にできるだけ高濃度で溶解させたところ，60 wt% 程度の PHS 濃度まで高粘度のゾルを形成することが実験的にわかったので，これをサンプルとすることで PHS 希薄溶液系とのパルスラジオリシスとの比較を行った．Figure 4 にそれぞれシクロヘキサノンと *p*-ジオキサン中での，PHS 濃度増加にともなう動粘度と脱プロトン反応の速度 k_D の変化を示す．粘度増加にともない，k_D は 2 桁以上小さくなり，動粘度が 3000 mm^2s^{-1} 程度になると一定となった．そのため，希薄 PHS 系でのラジカルカチオンの脱プロトン反応は，溶液中の高分子または溶媒分子の大きな分子運動が寄与することで速く起こり，分子運動が制限されると遅いモードで脱プロトン反応することがわかった．

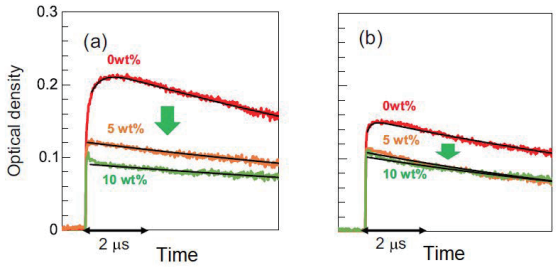

Figure 5. Kinetic traces of the PHS (50 wt%) solution in cyclohexanone (a) and *p*-dioxane (b) with (the conc. of TPS-tf is 5 and 10 wt% with respect to PHS) and without TPS-tf obtained at 1150 nm. Fit curves are also shown. Reproduced from Ref. 21. Copyright (2016) Elsevier.

次に PAG 添加効果についても調べた．ナノ秒パルスラジオリシスによって得られたダイマーラジカルカチオン吸収の電子線照射後の時間変化を Fig. 5 に示

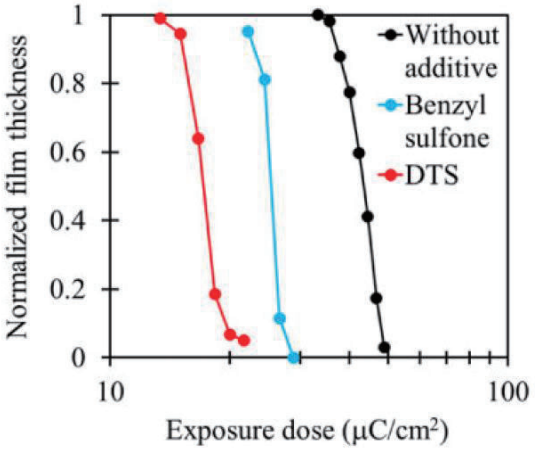

Figure 6. Sensitivity curves of the chemically amplified resist without additives, with 25 mM benzyl sulfone and DTS against the resist solution obtained by 100 kV electron beam irradiations. Reproduced from Ref. 25. Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

す．PHS 濃度は約 50 wt% である．結果として TPS-tf の添加により，CR バンド吸収が減少し，PHS 希薄系と逆の挙動を示した．これは TPS-tf を添加しない場合には，電子線照射後 1 μs にかけてダイマーラジカルカチオンの生成過程が見られるのに対して，TPS-tf 添加では見られないことから，TPS-tf の存在下では，高分子のユニット 1 つにホールが局在したモノマーラジカルカチオンからダイマーラジカルカチオン形成の緩和過程が阻害されると考えられる．すなわち，ダイマーとモノマーラジカルカチオン間の平衡がモノマー側に傾く．これは，電子が TPS-tf に捕捉され生成するアニオンがモノマーラジカルカチオンと対イオン形成するためと考えられる．

3　酸生成促進剤によるレジスト増感

EUV レジストは，将来的に 10 nm 以下の解像度で，より小さい解像誤差（line edge roughness（LER）または line width roughness（LWR））と高感度化を実現しなければならない．しかしながら，解像度，LER，感度性能は通常トレードオフの関係にあり，その解決は容易ではない．またパターンサイズ縮小にともない，レジスト膜厚は減少し，レジストに吸収される EUV 光子数の減少にともなうショットノイズの発生という確率的（stochastic）な問題もある．CAR の場合，レジスト性能向上の指針としては，よりレジストへのエネルギー付与の確率を向上させるか，酸生成反応・酸触媒反応の高量子収率化が考えらえる．前者はレジストに EUV に対する吸収係数が有機分子よりも高い F，Sn，Sb，Te，Hf，Bi 等のヘテロ原子をレジストに組み込むことや二次電子との反応性が高い PAG の使用が考えられる．また，後者としては，PAG 濃度の増加，酸増殖剤や PSCAR[22] を用いることが挙げられる．これらは基本的に添加した増感剤自身から追加の酸を発生させるコンセプトである．

我々はこれらと違う高収率化のアプローチとして，ラジカルカチオンからの脱プロトン性の向上を目指した．酸収量は先に述べたように，プロトンと PAG 分解によるアニオン収量の少ない方の量で決まるため，いくらアニオン収量を上げても，脱プロトン性の低いベース樹脂を用いると酸収量は低くなる[10]．実際のレジスト樹脂は数種の共重合体から成り，露光後生成したラジカルカチオンからの脱プロトン反応の効率が PHS のように高くない場合が想定される．そこで，高分子のラジカルカチオンからの脱プロトン反応を促進させることが可能ならば，酸収量の増加が期待できる．このようなラジカルカチオンからの脱プロトン反応の促進はこれまで重要視されず，ほとんど検討されていなかった．また，脱プロトン反応促進のため，受容側にプロトン親和力が高い化合物を用いると塩基性クエンチャーとして働き，プロトンが捕捉され逆に酸収量の減少が起こりうるため[23]，適切な化合物の選択が必要となる．

先に述べたようにパルスラジオリシスで幾つかの非プロトン溶媒中で脱プロトン反応の向上が見られたため，次に PHS/シクロヘキサノン溶液中に DMSO と類似する非プロトン性の化学構造の添加剤としてスルホキシド，アミド，スルホンを添加し，PHS ラジカルカチオンからの脱プロトン反応を同様に調べた．その結果，これらの添加剤は脱プロトン反応の促進効果を示した[24]．続いて実際にこれらを CAR に添加し，電子線露光に対する感度評価を行ったが，多くは不活性か感度を悪化させる効果しか得られなかった．しかしながら，スルホン化合物を添加した場合に感度向上を示すことがわかった[25]．中でも Fig. 6 に示すようにジ-*p*-トリルスルホン（DTS）を PHS–アクリレート共重合体，PAG，クエンチャーからなる CAR に添加すると，添加しない場合と比べ 2 倍以上の感度向上を示した．また微細なラインアンドスペースパターンを描画した結果を見ても（Fig. 7），最小解像度や LWR を維持したまま，感度が大きく向上したことがわかる．

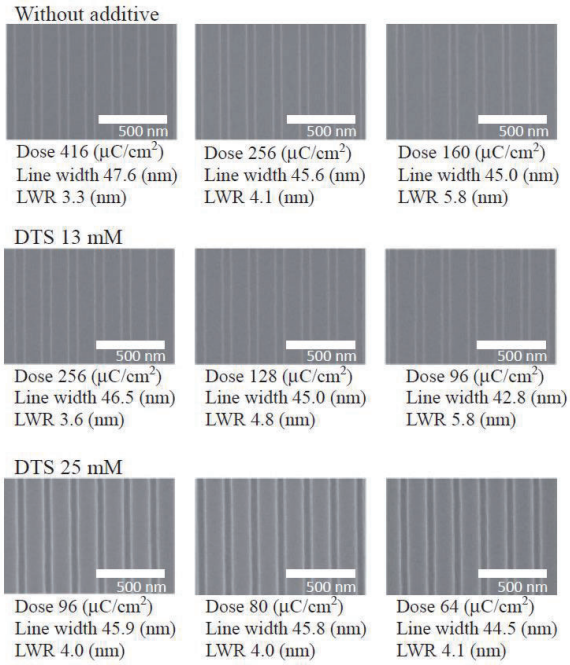

Figure 7. SEM images of line and space patterns fabricated by 100 kV electron beam lithography on the chemically amplified resist films without additives, with 13 and 25 mM DTS. The pattern pitches and electron beam writing widths are 200 and 20 nm, respectively. Reproduced from Ref. 25. Copyright (2017) The Japan Society of Applied Physics.

スルホンの分解反応はジフェニルスルホンで 0.005 程度と G 値の大きい反応ではないことから[26]，溶解促進効果やスルホンからスルフィン酸に転換されることによる感度向上ではなく，レジスト樹脂からの脱プロトン反応の促進が感度向上の要因と考えられる．また，パルスラジオリシスの結果より，電子は DTS に捕捉されラジカルアニオンを生成するが，そこから PAG への電子移動を起こすため，増感剤としても働いていることがわかった．以上のように DTS は「酸生成促進剤」として CAR の性能向上に有効であることを示した．本手法は既存の CAR モデルに酸生成促進剤を添加するだけでよく，非常にシンプルかつ安価な手法である．現在も引き続き酸生成促進剤の改良を行っている．

4 まとめ

レジスト樹脂として知られる PHS 溶液のパルスラジオリシスの溶媒依存性という基礎的な研究から，PAG 添加系，高濃度溶液系といったより複雑な系への展開について報告した．一連の PHS 溶液のパルスラジオリシスによって，PHS 系高分子のラジカルカチオンからの脱プロトン反応を評価する手法を確立することができた．また，DTS 添加による CAR の高感度化に成功し，これまであまり重要視されていなかったラジカルカチオンからの脱プロトン反応の促進が CAR の高性能化に有効であることを示した．半導体の需要の高まりによって，最先端の EUV レジストの高性能化のみならず，ArF や KrF レジストの需要も依然非常に大きい．そのため，引き続き CAR の高性能化のニーズは大きいと考えられる．一方で EUV レジストは，将来的には 10 nm 以下の解像度を生産性，加工精度を維持，向上した上で実現する必要があるため，既存の CAR や非 CAR をはじめとする新しいレジストの放射線化学初期過程の解明が今後も重要だと思われる．

〈謝　辞〉

本研究は JSPS 科研費（18H03895，15K06662），物質・デバイス領域共同研究拠点」における「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」の CORE ラボ共同研究プログラムの助成，北海道大学オープンファシリティの支援により実施されたものです．

〈参 考 文 献〉

1) H. Kinoshita, O. Wood, EUV Lithography: An Historical Perspective, in EUV Lithography, 2nd Edition, SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2018, pp. 1–55.
2) 渡邊健夫, 放射線化学, 106 (2018) 9.
3) H. Ito, Chemical Amplification Resists for Microlithography, in Microlithography/Molecular Imprinting, Advances in Polymer Science Series, 172, Springer, Berlin/Heidelberg, 2005, pp. 37–245.
4) 日本国際賞 2013 年「半導体製造に革新的なプロセスをもたらした化学増幅型レジスト高分子材料の開発」業績解説文, http://www.japanprize.jp/data/prize/2013/j_1_achievements.pdf.
5) T. Kozawa, Y. Yoshida, M. Uesaka, S. Tagawa, Jpn. J.

Appl. Phys., 31 (1992) 4301.
6) T. Kozawa, S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys., 49 (2010) 030001.
7) T. Kozawa, A. Saeki, A. Nakano, Y. Yoshida, S. Tagawa, J. Vac. Sci. Technol. B, 21 (2003) 3149.
8) A. Nakano, T. Kozawa, S. Tagawa, T. Azreder, J. F. Wishart, T. Kai, T. Shimokawa, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, 45 (2006) L197.
9) K. Natsuda, T. Kozawa, K. Okamoto, A. Saeki, S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 48 (2009) 06FC05.
10) H. Yamamoto, A. Nakano, K. Okamoto, T. Kozawa, S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004) 3971.
11) A. Nakano, K. Okamoto, T. Kozawa, S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004) 4363.
12) 岡本一将, 田川精一, 放射線化学, 88 (2009) 9.
13) K. Okamoto, S. Seki, S. Tagawa, J. Phys. Chem. A, 110 (2006) 8073.
14) A. Nakano, T. Kozawa, K. Okamoto, S. Tagawa, T. Kai, T. Shimokawa, Jpn. J. Appl. Phys., 45 (2006) 6866.
15) K. Okamoto, T. Kozawa, K. Natsuda, S. Seki, S. Tagawa, J. Phys. Chem. B, 112 (2008) 9275.
16) M. R. Ganapathi, R. Hermann, S. Naumov, O. Brede, Phys. Chem. Chem. Phys., 2 (2000) 4947.
17) K. Okamoto, R. Matsuda, H. Yamamoto, T. Kozawa, S. Tagawa, R. Fujiyoshi, T. Sumiyoshi, Jpn. J. Appl. Phys., 52 (2013) 06GC04.
18) K. Okamoto, H. Yamamoto, T. Kozawa, S. Tagawa, R. Fujiyoshi, K. Umegaki, Jpn. J. Appl. Phys., 54 (2015) 026501.
19) K. Okamoto, M. Tanaka, T. Kozawa, S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys., 49 (2010) 106501.
20) S. Tagawa, S. Nagahara, T. Iwamoto, M. Wakita, T. Kozawa, Y. Yamamoto, D. Werst, A. D. Trifunac, Proc. SPIE, 3999 (2000) 204.
21) K. Okamoto, T. Ishida, H. Yamamoto, T. Kozawa, R. Fujiyoshi, K. Umegaki, Chem. Phys. Lett., 657 (2016) 44.
22) 永原誠司, 放射線化学, 106 (2018) 3.
23) K. Natsuda, T. Kozawa, K. Okamoto, S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) 7285.
24) T. Susa, K. Okamoto, T. Ishida, H. Yamamoto, T. Kozawa, R. Fujiyoshi, K. Umegaki, Proc. SPIE, 9051 (2014) 90511O.
25) S. Fujii, K. Okamoto, H. Yamamoto, T. Kozawa, R. Fujiyoshi, K. Umegaki, Jpn. J. Appl. Phys., 56 (2017) 06GD01.
26) T. N. Bowmer, J. H. O'Donnell, Radiat. Phys. Chem., 17 (1981) 177.

〈著 者 略 歴〉

岡本 一将： 2003 年大阪大学大学院工学研究科退学，同年より大阪大学産業科学研究所産学（官）連携研究員，2004 年同研究所特任研究員．2007 年同研究所特任助教，2009 年北海道大学大学院工学研究院（研究科）助教，2018 年より大阪大学産業科学研究所助教（現職）．博士（工学）．専門：量子ビームプロセス，放射線化学．

古澤 孝弘： 1993 年東京大学工学系研究科中退．同年東京大学工学部助手．1996 年大阪大学産業科学研究所助手，2003 年同研究所助教授．2007 年同研究所准教授，2011 年より同研究所教授（現職）．博士（工学）．専門：応用ビーム工学．