

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360150

研究課題名(和文) 15nmゲートパターンのラインエッジラフネス(L E R) 抑制技術の開発

研究課題名(英文) Study of line edge roughness (LER) reduction in 15nm scale gate pattern

研究代表者

河合 晃 (Kawai, Akira)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：00251851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,500,000円、(間接経費) 4,650,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では15nm以下のクラスのレジストパターンのLER凝集性の抑制について、原子間力顕微鏡(AFM)を中心に実験的実証を行った。パターン内のLER制御には、パターンを構成する高分子集合体の凝集制御が必要となる。DPAT法によるはパターン剥離実験から、パターン底部の高分子集合体の凝集モードが大きく影響すること確認した。これらは、基板界面への溶液の浸透実験からも確認している。さらに、溶液中のゼータ電位に起因する帯電性も、高分子集合体の凝集性に影響することを示している。以上のように、レジストパターンのLER制御において、高分子集合体のサイズおよび凝集分布の設計への寄与が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, the condensation control of polymer aggregate in resist micro pattern is carried out in order to clarify the LER(line edge roughness) mechanism by using an atomic force microscope (AFM). The condensation of polymer aggregate affects strongly to the decrease of LER in resist pattern side-wall. From the DPAT (direct peeling by using AFM tip) results of resist pattern adhesion, the polymer aggregate condensation at the pattern bottom is one important control factor. The intrusion experiments indicate similar tendency of resist-substrate interface stability. In this regard, Zeta-potential of polymer aggregate surface should affect to LER control of resist pattern during pattern development. In conclusion, in this study, the important design rules in LER decrease of resist pattern of 15nm size are indicated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：レジストパターン 付着力 原子間力顕微鏡 半導体集積回路 高分子集合体 リソグラフィ ナノパ
ブル

1. 研究開始当初の背景

近年、フォトレジスト材料に代表されるように、ナノスケールでの高分子パターン形状の制御技術の重要性が増している。フォトレジスト材料は、化学増幅型としてのスチレン系、および汎用型のノボラック系樹脂をベースポリマーとして、超LSIやディスプレイデバイス等のリソグラフィエッチング用加工材料として実用化されている。

(H. Ito and C.G. Willson, *Polym. Eng. Sci.* **23**, 1012 (1983)). 現在、国内外において、15nm サイズのレジストパターンの実用化が必須課題となり、その研究開発が盛んである。しかしながら、図1および図2にあるように、高分子集合体の凝集挙動により、パターン形状全域に凹凸が生じている。これは、ラインエッジラフネス (LER) と呼ばれ、電子デバイスのゲートおよび配線パターンの加工精度の低下を招く。(A. Kawai, *Micro-electronic Engineering*, **83**, 659-662 (2006)) しかし、レジストパターンには様々な熱処理が施されるため、高分子集合体の凝集制御によって、ナノ制御システム創発への期待が高まってきている。申請者は、レジストパターン内に高分子集合体の欠落したナノ空間 (vacancy) が存在することを実験的に見出した。(A. Kawai, *J. Photopolymer Science and Technology*, **18**(6), 729-736 (2005)). また、図3のように、微小粒子モデルとして仮定した集合体間の相互作用は、それぞれ微小球サイズの幾何平均で表わせる。申請者は、以上の視点に基づき、微細レジストパターンの凝集・付着性改善に対して、以下のように戦略的に研究を進めてきた。

(H10~12年度 基盤研究(C) 100nm サイズ、付着評価法の確立、H13~15年度 基盤研究(C) sub-100nm サイズ、物理要因の確定、H16~18年度 基盤研究(B) 35nm サイズ、高分子構造の設計、H19~20年度 基盤研究(B) 25nm サイズ、最適パターンの実現)

本研究課題では、15nm 以下のレジストパターンの LER を低減し、電子デバイス用の高精度なパターン形状を構築するレジストデザイン手法の確立を目的とする。

2. 研究の目的

現在、テラビットクラスの高集積電子デバイス研究の基盤となるリソグラフィ技術において、微細ゲート電極作製のために、15nm 幅の高精度なレジストパターン作製が必須の開発課題となっている。しかし、レジストパターン側面にはラインエッジラフネス (LER) と呼ばれる 5nm 程度の凹凸が存在し、これがデバイス精度を低下させている。本研究では、LER の原因となるナノ高分子集合体の凝集メカニズムを明確にし、周期的な配列技術を実験的に構築する。また、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、レジストパターン内に存在する微細空孔 (vacancy) の制御技

術を構築し、高分子集合体の人工的な 3 次元構造の配列技術を確立する。本研究は、LER が 1 nm 以下となる高精度な微細レジストパターンの実現に貢献し、次世代電子デバイスの実用化に寄与する。

3. 研究の方法

15nm 線幅の微細レジストパターンのラインエッジラフネス (LER) 低減を目的として、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、次の点を重点的に実施する。(1) AFM を用いて、レジストパターンの高分子集合体の凝集力をナノスケールで解析する。(2) 溶液中での nanopattern の浸透性および表面硬化層の解析、(3) パターン内の高分子集合体の帯電相互作用を解析する。(4) 凝集構造の制御に基づくレジストパターン設計指針を確立する。以上の知見に基づき、パターン表面の高分子集合体の配列制御をスムーズにすることで、LER の低いスムーズなパターン構築を行うとともに、今後の高集積デバイスに対応できるレジスト材料の設計基準を確定する。

4. 研究成果

研究機関において、実験的検証および解析をすすめ、現実的なモデル構築を実施した。以下にその内容をまとめる。

(1) レジストパターンの高分子集合体の凝集力解析

線幅が 15nm 以下のサイズの微細パターンを解析するには、原子間力顕微鏡を用いることが有効な手段となる。これまでに、様々なサイズでのレジストパターンの凝集性解析を実施し、その定量評価の実績を蓄積している。本研究では、図1にあるように、LER に強く影響を及ぼすパターン側面に対して、垂直荷重を加えることにより、その凝集挙動の解析を試みた。

この技術は DPAT (direct peeling by using AFM tip) として研究代表者が開発した解析手法であり、数々の実績を有している。図1にあるように、微細レジストパターンの側面へマイクロカンチレバー先端の探針を接触させて、徐々に荷重を加えていく。これにより、リアルタイムでパターン変形と外部荷重を実測しながら、パターン内部および基板界面との付着挙動を解析できる。特に、15nm 以下のサイズの高分子集合体の凝集挙動が顕著に表れる。特に、従来のナノインデント方式では、球体による押し込み試験となるため、対象とする凝集体の内部構造に依存した解析は困難である。しかし、この DPAT 法によれば、ナノスケールで制御された局所エリアからの荷重制御による変形剥離挙動解析が可能となる。

本研究では、図1にあるように、荷重位置をパターン底部からトップへと連続的に変化させて、レジストパターンの凝集性を解析している。

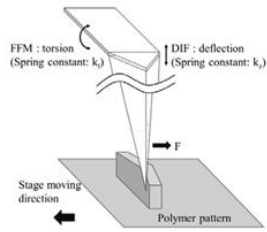


図1 DPAT法によるナノスケールパターンの凝集性解析（荷重高さ依存性）

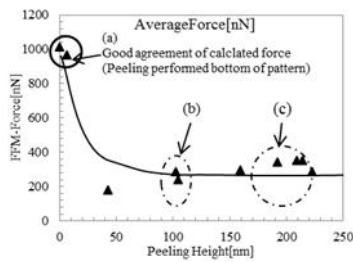


Fig.8 Peeling force at different peeling height.

図2 パターン側面からの荷重によるナノスケールパターンの剥離挙動（横方向モード）

図2によれば、パターン底面近傍では剥離荷重は高いが、上部へ移動するにつれて急速に低下することが分かる。高分子材料の特徴の一つとして、この粘弾性の低下が如実に表れていると考えられる。レジストパターン底部では、有限の高分子集合体が基板との相互作用に参与しており、パターン上部付近の集合体との凝集挙動の有意差が明確である。

(2) 溶液中でのナノパターンの浸透性および表面硬化層の解析

レジストパターンの凝集挙動は、溶液やガスなどのパターン内部浸透性に対しても大きく影響する。ここでは、同様の DPAT 技術を用いて、溶液中での微細レジストパターンの凝集剥離挙動を解析している。溶液中での挙動解析のためには、簡易溶液チャンバーを用いる。これは、探針と試料間に液体メニスカスを形成させ、これにより、液中測定を可能にする方式である。

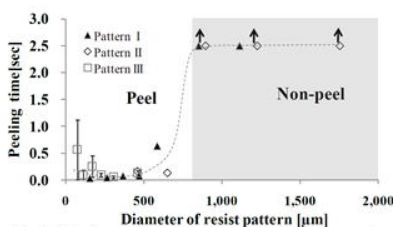


図3 純水中でのレジストパターンの剥離挙動

この手法によれば、簡易で正確なデータを取得することが可能である。

図3によれば、微細レジストパターン直径の増加に伴い、純水中での剥離力も増加していることが確認できる。特に、特定の閾値を有しており、この時点で、レジストパターンと基板界面へ液体の浸入が生じていると考えられる。これらは、界面付近でのパターン底部の高分子集合体の二次元ネットワークと、基板表面とのナノラフネスとの相関により決定されると考察できる。

(3) パターン内の高分子集合体の帯電相互作用の解析

溶液中では固体表面にゼータ電位に依存した固有の帯電が生じる。ナノスケールの高分子集合体では、この表面帯電量がLERなどの凝集挙動へ影響する可能性がある。ここでは、原子間力顕微鏡の電界印加モードを利用して、レジスト膜表面の高分子集合体に見立てたポリスチレンラテックス (PSL) 表面に電荷を堆積し、その凝集挙動を解析している。図4はナノ粒子表面での帯電挙動の解析手法を示している。まず、帯電時は探針は接地し、基板を正電位とし、電荷注入を行う。その後、探針を外し、相互作用の範囲の非接触領域で逆電位を印加する。これにより、感度良く帯電領域をクーロン相互作用により検出できる。ナノ粒子表面の帯電電位の極性により、ナニュートンクラスの引力および斥力の検出が可能である。

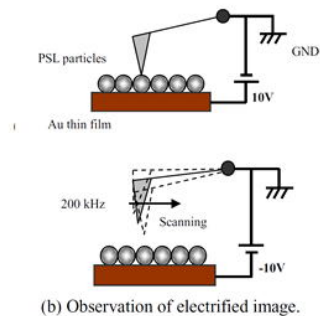


図4 ナノ粒子表面での局所帯電実験および検出方法

(a) Circular position

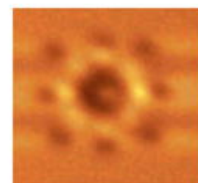


図5 ナノ粒子表面の帯電像（明部は正電荷、暗部は負電荷を表す）

(4) 凝集構造の制御に基づくレジストパターン設計指針

本研究では、以上の(1)～(3)の実験的な研究成果に基づき、15nm以下のクラスのレジストパターンの凝集性の設計指針について、以下のように考察している。

15nmクラスのレジストパターンのLERを制御するには、パターンを構成する高分子集合体の凝集分布を制御する必要がある。DPAT法によるはパターン剥離実験から、パターン底部の高分子集合体の凝集モードが、パターン剥離には大きく影響することが示された。これは、基板界面への溶液の浸透実験からも示されている。溶液中においては、ゼータ電位などの帯電性も、高分子集合体の凝集性へ影響することが考察できる。以上のように、レジストパターンのLER制御において、支配的な因子が明確になったことで、高分子集合体のサイズおよび凝集分布の設計へ考慮することが可能となる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

1. Akira Kawai, “Electrification on Condensation Surface of Micro Particles with Atomic Force Microscope (AFM)”, J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 705-706 (2013).
2. Yuta Noguchi, Akira Kawai, “Local Heating System Integrated with Platinum Micro Heater and Photopolymer Microfluidic Channel”, J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 713-716 (2013).
3. Kazutoshi Otsuka, Kenta Takahashi, Akira Kawai, “Fabrication of Micro Tube Array by Combining Positive with Negative Type Photoresists due to Solubility Difference in Developer”, J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 717-720 (2013).
4. Yosuke Sakurai, Kenta Takahashi, Akira Kawai, “Liquid Penetration Control of Photoresist/Perfluorosulfonic Acid (PFSA) Double Layer Structure by Hydrophobic Treatment”, J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 727-732 (2013).
5. Yuta Noguchi, Kenta Takahashi, Akira Kawai, “Micro Pinhole Formation in Photoresist Multilayer Structure controlled with Hydrophilic Treatment”, J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 739-744 (2013).
6. Yosuke Sakurai, Daisuke Tanaka, Shunsuke Ohata, Akira Kawai, “Fabrication and Durability of Single Chip Micro Direct Methanol Fuel Cell (SC- μ DMFC) by Photolithography Process” J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 751-756 (2013).

7. Kenta Takahashi, Akira Kawai, “Effect of Low Surface Tension Developer on Micro Bubble Removal from Resist Square Window Pattern”, J. Photopolymer Science and Technology, 26(6), 765-768 (2013).
8. Yuta Noguchi, Akira Kawai, “Surface Stability of SU-8 film for Accurate Biopotential Detection”, J. Photopolymer Science and Technology, 25(6), 719-722 (2012).
9. Yosuke Sakurai, Akira Kawai, “Mechanical Stress Effect on Ionic Conductivity of Perfluorosulfonic Acid (PFSA) Film by Photolithography”, J. Photopolymer Science and Technology, 25(6), 723-727 (2012).
10. Takashi Aiba, Akira Kawai, “Micro Cantilever Motion in Micro Pattern Peeling by DPAT Method”, J. Photopolymer Science and Technology, 25(6), 729-733 (2012).
11. Satoru Mori, Akira Kawai, “Interfacial Microstructure of a Double-layer Cu Film Consisting of an Under-layer Deposited on SiO₂ Substrate in Ar-10 vol% O₂ and an Upper-layer Deposited in Pure Ar”, J. Adhesion Soc. Japan, 48(1), 10-16 (2012).
12. Akira Kawai, “Fluid Control MEMS constructed with Polymer Materials”, J. Photopolymer Science and Technology, 24(5), 587-593 (2011).
13. Masayoshi Yamada, Akira Kawai, “Micro Polymer Capsule Constructed with Micro Pillars Formed by Multi Laminating Method”, J. Photopolymer Science and Technology, 24(6), 647-650 (2011).

[学会発表] (計 33 件)

1. Yosuke Sakurai, Akira Kawai, Effect of Mechanical Stress on Electrolyte Film for Flexible Sheet Type Direct Methanol Fuel Cell, The 2nd International GIGAKU Conference in Nagaoka (2nd IGCN), Abstract P151, (2013)
2. Yosuke Sakurai, Kenta Takahashi, Akira Kawai, Micro Pattern Fabrication of Perfluorosulfonic Acid (PFSA) Film by CF₄ RIE Process, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2013), Abstract #8P-11-127L, (2013).
3. Yosuke Sakurai, Daisuke Tanaka, Shunsuke Ohata, Akira Kawai, Photoresist/Pt Electrode/Perfluorosulfonic Acid (PFSA) Multilayer Structure for Single Chip Micro Direct Methanol Fuel Cell (SC- μ DMFC), 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2013), Abstract #8P-11-128L, (2013).
4. Yosuke Sakurai, Daisuke Tanaka, Shunsuke Ohata, Akira Kawai, Single chip micro direct methanol fuel cell (SC- μ DMFC) fabricated by MEMS Process, IEEE ポスターセッション平

- 成 25 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会, Abstract P72, (2013).
5. Yuta Noguchi, Akira Kawai, A SU-8 Photoresist Film as Electrical Stable Layer in Liquid Environment, MP-11, The 2nd International GIGAKU Conference in Nagaoka (2013).
6. Shun Kamada, Akira Kawai, Surface energy analysis of Indium Tin Oxide (ITO) thin films on annealing treatment, 平成 25 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会, IEEE-07, 予稿集 P73, 2013.
7. Yuta Noguchi, Akira Kawai, Monitoring and Modeling for Response Time of Biopotential in Plant Cells, The Electrochemical Society, Abstract #69, Honolulu PRiME 2012.
8. Takashi Aiba, Akira Kawai, Peeling Force of Polymer Micro Pattern by Direct Peeling by using AFM Tip (DPAT), The Electrochemical Society, Abstract #68, Honolulu PRiME 2012.
9. Yosuke Sakurai, Akira Kawai, Stress Durability of Electrolyte Structure in Flexible Sheet type Direct Methanol Fuel Cell (FS-DMFC), The Electrochemical Society, Abstract #59, Honolulu PRiME 2012.
10. Akira Kawai, "Condensation control of Nanoscale Polymer Aggregates by using atomic force microscope tip, 1st International GIGAKU Conference in Nagaoka (IGCN2012), Feb. 3-5, 2012, Nagaoka, Japan, Transaction on GIGAKU,1, (2012) 01018/1-6.
11. Akira Kawai, "Nano- Porous Structure in Polymer Micro Pattern Analyzed by Atomic Force Microscopy(AFM) Nano S&T 2011, Oct. 23-26, 2011,Dalian, China. Invited
12. Akira Kawai, "Fluid Control MEMS constructed with Polymer Materials, International symposium on materials & processes for advanced giga-bit-scale lithography 2011, June. 24, 2011, Chiba, Japan. invited.
13. Akira Kawai, "Nanoscale Topography of Polymer Film Surface in Dry/Wet Conditions" Nano S&T 2011, Oct. 23-26, 2011, Dalian, China.
14. 桜井、河合、リソグラフィプロセスを用いた燃料電池用電解質のマイクロパターン形成、I-13, 平成 25 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会、予稿集 P15, (2013).
15. Yuta Noguchi, Akira Kawai, Micro local heating system integrated with surround microfluidic channel, 電気学会センサ・マイクロマシン部門 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 6PM3-PSS-128 (2013).
16. Yosuke Sakurai, Daisuke Tanaka, Shunsuke Ohata, Akira Kawai, Single Chip Micro Direct Methanol Fuel Cell (SC- μ DMFC) composed with Multilayer Structure, 電気学会センサ・マイクロマシン部門 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 5PM3-PSS-119 (2013).
17. 野口、河合、マイクロヒータ/チャンネルデバイスの局所加熱特性、平成 25 年度 (第 23 回) 電気学会東京支部新潟支所研究発表会 予稿集, IV-09 (2013) p. 59.
18. 大塚、高橋、河合、ポジ型およびネガ型フォトリソグラフィーの溶解度の差を用いたマイクロチューブの作製、I-14, 平成 25 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会、予稿集 P16, (2013).
19. Kazutoshi Otsuka, Kenta Takahashi, Akira Kawai, Fabrication of Micro Tube Array by Combining Positive with Negative Photoresist due to Solubility Difference in Developer, 6PM3-PSS-116, 電気学会センサ・マイクロマシン部門, 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(2013)
20. 大谷翔吾、河合 晃、Bio-plant power collecting system by functional electrode, 5PM3-PSS-133, 電気学会センサ・マイクロマシン部門大会 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、(2013).
21. 鎌田 隼、河合 晃、紫外線照射により活性化された二酸化チタン膜における表面エネルギーの解析, 電気学会センサ・マイクロマシン部門大会 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 5PM3-PSS-115, 2013.
22. 鎌田 隼、河合 晃、紫外線照射による酸化チタン膜表面の活性化, 平成 25 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会, I-15, 予稿集 P17, 2013.
23. 篠崎雅也、河合 晃、C-V 測定を用いた誘電膜の特性評価、平成 25 年度 (第 23 回) 電気学会東京支部新潟支所研究発表会 予稿集, I-16 (2013) p. 18.
24. 大塚和俊、河合 晃、SU-8 フォトリソグラフィーの人工皮膚材料としての検討、I-02, 平成 24 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会、予稿集 P4, (2012).
25. 大谷翔梧、河合 晃、植物電位と表面温度の多点測定による緑葉植物の育成観察、II-13, 平成 24 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会、予稿集 P30, (2012).
26. 大谷翔吾、河合 晃、植物電位・電流シグナルにおける測定部位の検討、IV-11, 平成 25 年度電気学会東京支部新潟支所発表会、予稿集 p61, (2012).
27. 窪田直也、河合 晃、摩擦蓄電エネルギーの民生機器の実用化の検討、P-14, 平成 24 年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会、予稿集 P78, (2012).
28. 野口悠太、河合 晃、植物の細胞間電位の測定とモニタリング、電気学会 C 部門大会講演、2011.9.7-9, PS2-1, (富山大) 2011
29. 相場 崇、河合 晃、X 線光電子分光法 (XPS) による Si 基板上のシランカップリング処理層の再生評価と制御、電気学会 C 部門大会講演、2011.9.7-9, GS10-3, (富山大) 2011

30. 森永和也、河合 晃、メタノール水溶液中でのワイヤー電極の電位検出、電気学会 C 部門大会講演、2011. 9. 7-9、GS10-5、富山大学
31. 桜井 洋輔、河合 晃、シート型直接メタノール燃料電池 (DMFC) の外部荷重による発電基礎特性、電気学会 A 部門大会講演、2011. 9. 21-22、東京工業大学
32. 大谷 翔吾、河合 晃、緑葉植物の 0～700mV の局所電位測定と解析、電気学会 A 部門大会講演、P28、2011. 9. 21-22 (東工大) 2011
33. 森田 直也、河合 晃、メタノール水溶液中での高分子膜内の微小電流解析、電気学会 A 部門大会講演、2011. 9. 21-22、P27、東京工業大学

〔図書〕(計 10 件)

1. 河合 晃、「欠陥を出さない！良い塗布膜を得るためのコントロール技術」、単著、サイエンス&テクノロジー、2012 年、(総ページ P197)
2. 河合 晃、現場で応用できるコーティングの理論と現象—トラブルをメカニズムから考える—、加工技術研究会、単著、総ページ p184、2012 年。
3. 河合 晃、塗膜・レジスト膜の乾燥・付着技術とトラブル対策、単著、情報機構、2011 年、(総ページ p196)
4. 河合、高分子における劣化・破壊現象の写真・データ事例集、第 14 章第 6 節 塗膜の乾燥不良事例 ～クラック、密着不良～、技術情報協会、分担執筆、p499～p516、総ページ p729、2014 年。
5. 河合、気泡・ボイドの発生メカニズムと未然防止・除去技術、第 1 章第 2 節 塗るときなぜ気泡が発生するのか？p7～p17、技術情報協会、分担執筆、総ページ p544、2014 年。
6. 河合、薄膜塗布技術と乾燥トラブル対策、第 8 章第 5 節 超臨界乾燥 p528～p533、第 10 章第 6 節 レベリング性と乾燥速度の両立 p641～p647、第 10 章 11 節 さらに高品位な膜を作るためのテクニック p670～p676、技術情報協会、分担執筆、総ページ p825、2013 年。
7. 河合、シランカップリング剤の効果と使用方法、S&T 出版、分担執筆、第 7 章第 6 節 レジストにおけるシランカップリング剤の効果と使用方法および処理装置、p256-258、2012 年 (総ページ 395)
8. 河合、粒子分散系塗布膜を中心とした高粘度スラリーの調液・塗布・乾燥技術、第 5 節 各種乾燥プロセスにおける装置選定技術、技術情報協会、分担執筆、P79～89、P134～P161、2011 年、(総ページ P336)
9. 河合、バインダー (結着剤) の失敗しない選び方・使い方事例集、第 6 節 乾燥時のバインダー使用の留意点と条件設定、第 7 節 バインダー乾燥・焼成装置の機構と条件設定、第 8 節 バインダー乾燥・焼成後のトラブル事例および対策、技術情報協会、分担執筆、

p149～182、2011 年 (総ページ P262)

10. 河合、レジストプロセスの最適化テクニック、～微細化・トラブル解消のための工程別対策および材料技術～、情報機構、分担執筆、第 1 節第 4-8 項、P294～333、第 2 節第 1 項 P334～P351、2011 年、(総ページ P557)

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 2 件)

名称：振動測定装置及び振動測定方法
 発明者：河合 晃
 権利者：長岡技術科学大学
 種類：公開特許公報
 番号：特許5004223号
 取得年月日：2007年6月27日
 国内外の別：国内

名称：ナノ気泡の判別方法及びその装置
 発明者：鈴木健太、河合 晃
 権利者：長岡技術科学大学
 種類：公開特許公報
 番号：特許5013320号
 取得年月日：2007年11月19日
 国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://kawai.nagaokaut.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河合 晃 (KAWAI AKIRA)
 長岡技術科学大学 教授
 研究者番号：00251851