The Magnetics Society of Japan

ウェットプロセスによる機能ナノ構造薄膜形成

Fabrication of Nanostructured Functional Thin Films through Wet Processes

本間敬之　T. Homma
早稲田大学理工学部，東京都新宿区大久保 3-4-1 (〒169-8555)
Department of Applied Chemistry, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

Wet fabrication processes for functional nanostructures, such as electrolytic and electroless deposition, are reviewed. Compared with dry processes such as sputtering and vacuum evaporation, the deposition mechanisms of these processes are complicated and not easy to control, while deep understanding of the mechanisms will enable precise control of the process at an atomistic level. Some examples of fabrication processes for functional nanostructures are overviewed, such as defect free "super-filling" of high-aspect-ratio trenches less than 100 nm in width using the Cu electrodeposition process, deposition of multi-layered thin films using the pulse deposition process, and formation of arrayed pores and nanowires using electrochemical etching and deposition. The features and possible applications of the electroless deposition processes are also explained, and a maskless and electroless fabrication process of metallic nanodot array on a Si wafer surface is also described.

Key words: wet process, nanofabrication, functional nanostructure, electrodeposition, electroless deposition, nanodot, nanowire, multilayered thin films

1. はじめに

めっき法を中心としたウェットプロセスは，従来より種々の機能薄膜の形成に適用されてきた．磁性薄膜分野においても，1898 年の Paulsen による磁気記録の発明のわずか数年後の 1906 年には電析強磁性膜の記録（録音）媒体への応用が提案されており[1]，以降，1950 年代のワイヤメモリ用薄膜，薄膜型記録媒体や薄膜磁気ヘッドなど[2)~4)]の研究開発および実用化が進められた．さらに最近では磁気 MEMS や種々のナノマテリアル・機能ナノ構造の形成においても本プロセスは重要な役割を演じており[5)~7)]，今後もいっそうの進展が望まれている．ウェットプロセスはスパッタ・蒸着などのドライプロセスとは大きく異なる手法であり，析出機構自体も複雑であるため，プロセス制御は試行錯誤的なアプローチに依存する面が多かった．しかしながら，析出形成のメカニズムを十分に理解し，制御することができれば，ドライプロセスでは困難な種々の精密な薄膜 / ナノ構造の形成が可能である．このような観点から，本稿では，機能ナノ構造形成手法としてのウェットプロセスの特徴や，それを活かした応用例を紹介するとともに，今後の展望について述べる．

2. 機能ナノ構造形成プロセスとしてのウェットプロセスの特徴

ウェットプロセスは固液界面において進行するが，析出/溶解に反応（電荷移動反応）を伴う点がドライプロセスとは大きく異なる．すなわち，析出の素地となる基板の表面に析出種（金属イオン種など）が到達するだけでなく，そこで電子を得る還元反応が起こらなければ決して析出は起こらない．このようないわば余計なステップの存在はプロセスを複雑化させるものであり，これまではどちらかといえばデメリットとして考えられてきた．しかしながら，見方を変えれば，このような電子供給を局所的に行うことにより，所望の箇所への選択析出が可能となるわけであり，これはナノ構造形成を考える場合に有効な制御因子となりうる[8]．さらに，印加電位の正負により，析出（還元：負方向への電位印加）あるいは溶解（酸化：正方向への電位印加）の切り替えを容易に行うことができる．通常の電気化学反応に用いられる電位は絶対値としてはたかだか 1～2 V 程度のレベルであるが，印加された電位は基板（電極）表面近傍に集中し，10^7 V/cm レベルの極めて高い電位勾配をもつ高エネルギーの反応場が形成される．このため，通常は高温や急速冷却が必要な非晶質薄膜などの形成が大気圧下，数十℃の環境で可能である．また，金属種の析出/溶解の起こる電位は個々の種に固有の値（標準電極電位）に依存するため，複数イオン種の共存する溶液から特定の金属を析出させることもでき（例えば Cu の電解精錬などはこの原理を利用している），さらにこの析出電位は金属イオンを配位子で錯体化（キレート）することによりシフトさせることもできる．これに加えて，印加電位や通電電流の値は μV, pA オーダーで定量的にコントロールできることから，極めて精密な制御，例えば 1 原子層単位での析出/溶解なども原理的に可能であり，液相中でも動作可能な走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた析出/溶解プロセスの原子レベルでの *in situ* 観察も進められている[9]．

また，上記のように析出（反応）が固液界面のみで進行

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

するため，溶液バルクから反応に関与する種が反応場まで到達する「拡散」も重要な制御因子となる．さらに表面における反応を促進あるいは抑制する分子種やイオン種（いわゆる「添加剤」）を加えることによる反応制御も可能である．

このように，本プロセスは種々の特徴を有しているが，次に，これらの特徴を活かした機能ナノ構造形成の例についていくつか紹介する．

3. ウェットプロセスの特徴を活かした機能ナノ構造の形成例

3.1 高アスペクト比微細溝への金属埋め込み形成

ULSI チップ内部の微細配線（インターコネクション）は，従来，スパッタ Al 系薄膜の上にリソグラフィーによりマスクを形成し，不要部をハロゲン化して揮発除去するドライエッチングにより形成されてきたが，チップ性能のいっそうの向上のため，配線材として，Al より低抵抗であり，かつマイグレーション耐性も高い Cu の適用が求められるようになった．しかしながら，Cu のハロゲン化物は揮発性が低いためドライエッチングを用いる既存プロセスの適用が困難であった．その解決策として提案されたのが，電気めっきと化学機械研磨 (CMP) を組み合わせた，いわゆる Cu ダマシンプロセス[10] である．この手法では絶縁薄膜表面に配線部に相当する微細溝を形成し，表面に拡散バリア層および通電層を形成した後 Cu を電解析出させ，表面の余剰析出部を CMP により除去するものである．なお「ダマシン」はシリアのダマスカス地方特産の，素地表面に掘り込まれた絵柄に宝飾部を埋め込み表面を研磨した工芸品の名称であり，欧米では一般的に知られているものである．日本の「象嵌」にあたるものであるが，（スケールはともかく）手法が類似であることからつけられた名前である．ULSI チップ集積度の高度化に伴いインターコネクションには微細化が求められ続けているが，これは，電気配線路としての断面積を確保するという面からは，幅が狭くなる分を深さ方向で補う，すなわちアスペクト比の向上が要求されることになる．このような微細な溝部に無欠陥で Cu 析出を行うためには，溝部底面での析出促進および上部での析出抑制が必要となるが，添加剤を組み合わせて用いる「スーパーフィリング」により，高アスペクト比の微細溝への無欠陥埋め込みが実現している．その例を Fig. 1 に模式的に示す．この系では，析出抑制作用のある高分子添加剤（ポリエチレングリコールなど）と析出促進作用のある低分子添加剤（ジスルフィド系など）を組み合わせ，前者が微細溝内部に侵入しにくいのに対し後者は侵入可能である結果，溝底部での析出速度が相対的に増加する，というのが基本的な考え方である．さらに電解槽の形状やかくはん方式にも工夫を加えることにより，Fig. 2 に示したように，50 nm 幅，1.4 μm 深さ（アスペクト比 28）の微細溝への Cu 無欠陥埋め込みが実現している[11]．このような微細領域への無欠陥析出は，いっそうの微細化が要求される薄膜ヘッドや，後述のパターン媒体形成をはじめとした種々の機能ナノ構造体形成のための重要な要素技術である．

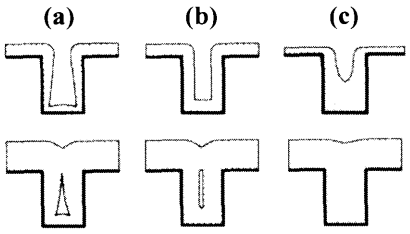


Fig. 1 Schematic model for Cu filling conditions at trenches: (a) sub-conformal, (b) conformal, and (c) super-conformal ("super filling").

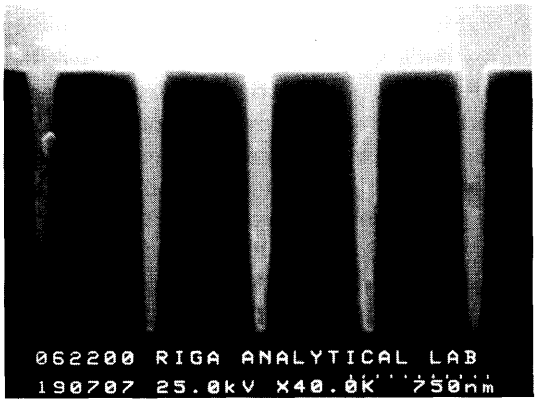


Fig. 2 Cross-sectional SEM image of void-free electrodeposition of Cu in a 50 nm wide and 1.4 μm deep trench.[11]

3.2 電解法による多層膜の形成

人工格子薄膜を含めた多層膜の形成は，ナノ構造制御による薄膜機能高度化の基幹プロセスの一つである．電気化学系においては，上述のように，印加電位の制御により複数イオン種の共存した溶液から異なる種を析出させることができるため，電位を周期的に変化させることにより，単一溶液から厚さ方向に組成が変調した薄膜を形成可能である．このような手法を利用し，例えば軟磁気特性を向上させた NiFeMo 膜の形成などが報告されている[12]．さらに，周期を極めて短くしたパルス電析法を用いると，人工格子構造の形成も可能となる．このような系については主に 1980 年代より多くの研究がなされてきたが[13),14)]，磁性薄膜についても，Ni–Cu/Cu 系[15),16)]，Co–Cu/Cu 系[17),18)]，Co/Pt 系[19),20)] などの多層膜の形成と，MR, GMR 特性などの評価が行われている．

Fig. 3 にパルス電析法により形成された Co–Cu/Cu 系多層薄膜の断面 TEM 像の例を示す[17]．これは 1.0 mol/L の $CoSO_4$ および 25 mmol/L の $CuSO_4$ を含む溶液を用い，パルス制御により形成されたものである．Cu^{2+}/Cu 系

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

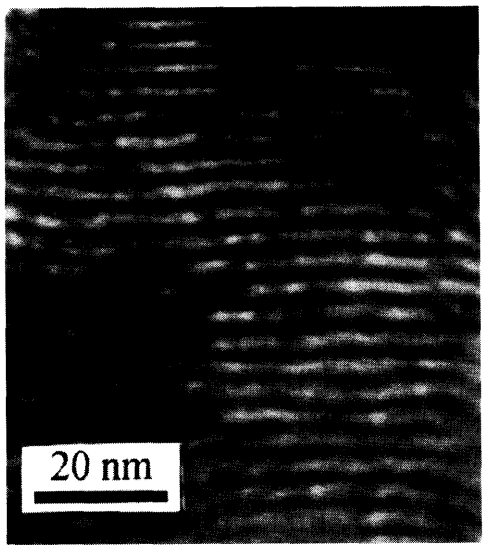


Fig. 3 Cross-sectional TEM bright field image of an electrodeposited Co–Cu/Cu multilayered thin film.[17]

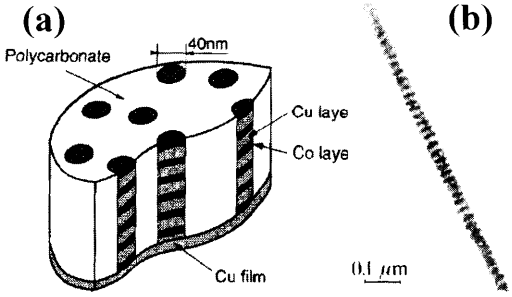


Fig. 4 (a) Schematic model of an array of multilayered-nanowires electrodeposited into a porous polymer template, and (b) cross-sectional TEM bright field image of a single Co/Cu multilayered-nanowire.[29]

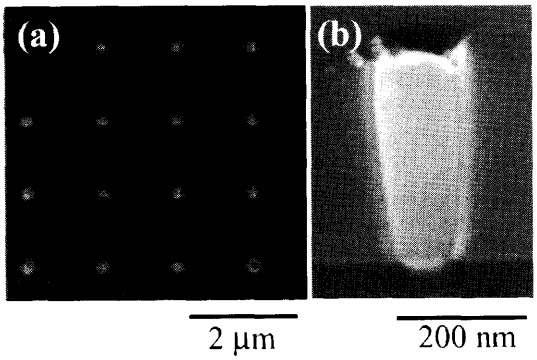


Fig. 5 Plane-view (a) and cross-sectional (b) SEM images of CoNiP magnetic dots.[35]

および Co^{2+}/Co 系の標準電極電位はそれぞれ +337 mV および −277 mV (vs. SHE) である[21]．つまり Cu の方がより貴な，すなわちプラス寄りの印加電位で還元析出するので，印加電位を Co の析出電位より手前（貴な側）に設定すれば，混合溶液中からは Cu のみが析出する．一方，電位を Co も析出するレベルまで卑な（マイナス寄りの）値とすると，当然 Co のみならず Cu も析出することになるが，溶液内の Co イオン濃度を Cu イオン濃度に対し十分大きくしておくことにより，析出物を Co リッチなものとすることができる．このような形で印加電位を周期的に変化させることにより，積層構造の形成が可能である．このような系においては各層や界面の形成に原子レベルの制御が要求されるが，後述のように多層ナノワイヤ形成にも適用可能であるなど，今後いっそうの進展が期待される．

3.3 微細孔配列とアレイ状ナノ構造の形成

機能薄膜・構造体形成の基幹技術として，サイズのそろった微細孔を一面に配列形成する技術が挙げられる．Al を電解液中で酸化する陽極化成プロセスにより，表面にこのような領域を形成できることが知られており，さまざまな分野に利用されている．磁性薄膜分野においても，このような膜に磁性体を電析法により充填し磁気記録媒体に適用する試みが 1970 年代よりなされ[22]，主に垂直磁気記録媒体への応用を目的に多くの検討が行われた[23]．一方，テンプレート援用などによる孔径のいっそうの微細化および配列の規則性の向上がなされたこともあり[24]，Al 陽極酸化膜は，最近では電析法と組み合わせたナノワイヤ形成の鋳型として広く用いられるようになっている[25),26]．また，ブロックコポリマー[27]など多孔質ポリマー膜を鋳型に用いる方法[28]も検討が進められている．さらに，微細孔内への電析の際に前項に述べたパルス法を用いることにより，多層型ナノワイヤの形成も可能である．その例を Fig. 4[29]に示すが，多層構造が個々のワイヤのレベルで明瞭に形成されていることがわかる．またこの系では GMR 特性の発現も確認されている[29]．

これらのプロセスは，次世代の超高密度磁気記録システムのためのパターン媒体[30),31]の形成に適用可能であり，各機関において検討が進められている[32)~36]．

Fig. 5 に SiO_2 モールドパターンを形成した Si 基板にめっき法により形成された磁性ドットの例を示す[35]．析出はパターン底部のみから選択的に進行し，数十 nm 径のパターン内に磁性体が欠陥なく形成されていることがわかる．

一方，上述のような陽極化成プロセスによる多孔質領域の形成は，Al のみでなく，Si にも適用可能であることが知られている．ナノメートルスケールの枝分かれした多孔質領域をもついわゆるポーラス Si は，電位印加による可視域発光性[37]という面から多くの研究がなされているが，表面にリソグラフィーによりエッチング開始点をパターン形成し，光照射を併用した陽極化成を行うことにより，規則的に配列した垂直微細孔の形成も可能である[38),39]．さらに，形成された微細孔への金属などの充填析出も検討されているが，上述のように，電気化学反応系が電位印加方向

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

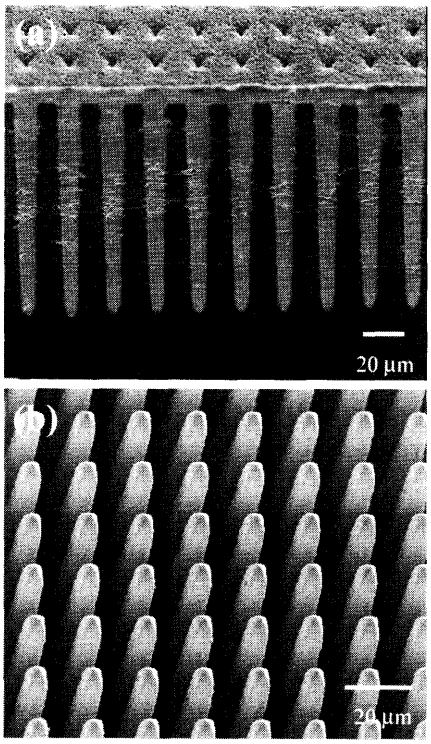


Fig. 6 (a) Cross-sectional SEM image of an array of pores fabricated on a Si wafer surface, filled with Ni by sequential anodization and electrodeposition. (b) SEM images of a Ni needle array (after removal of the metallic Si region).[40]

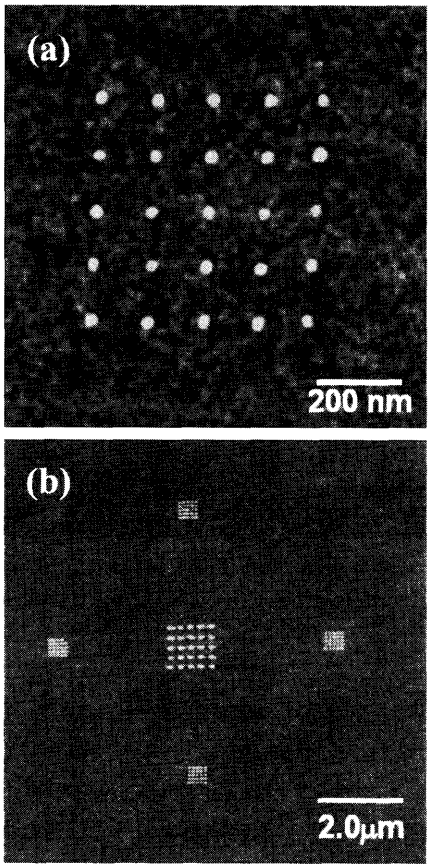


Fig. 7 Tapping-mode AFM image of (a) Au and (b) Cu nanodot arrays fabricated at the patterned nano-defect sites on a hydrogen terminated Si (100) wafer surface formed by the nano indentation process. Z scale (black to white): 0 to 5 nm.[13]

により析出/溶解いずれも行える点を利用し，陽極化成のためのエッチング液にあらかじめ金属イオンを添加し，まず正側の電位印加で微細孔配列を形成し，引き続き負側に電位をスイッチすることで孔内への金属還元析出を一括して行うプロセスも提案されている[40]．

Fig. 6 にこの手法により形成された金属ニードルアレイの例を示す．Fig. 6(a) は Si ウェハ内に形成された状態の断面 SEM 像，また Fig. 6(b) はアルカリ溶液により Si 部を除去した後の SEM 像であり，金属ニードルアレイが所望の領域に均一形成されていることがわかる．ここでは Ni を用いているが，他の金属種にも適用可能であり，種々の MEMS デバイスなどへの応用が期待されている．

3.4 無電解プロセスの可能性

以上，ウェットプロセスによる機能ナノ構造形成について，主に電解プロセスを用いた例をいくつか示した．電解プロセスでは，析出反応に必要な電子は外部電源から基板に供給されるが，一方，溶液内に還元剤分子を添加し，その基板表面での反応により電子を供給する無電解プロセスも用いられている．無電解プロセスの場合には，析出には前述のような金属イオン種が電子を得る還元析出に加え，還元剤分子種の酸化（すなわち電子放出）反応というステップが加わるため，プロセスはいっそう複雑になる．また，電解液の構成成分も増え，特性制御や液の安定性という面からも扱いが難しくなるため，電解プロセスに比べて適用範囲は限定的であった．しかしながら，無電解プロセスでは電子はいわば“オンサイト”で供給されるため，基板表面での局所的な析出を考えた場合，個々に給電線を配する必要がなく，さらに電解プロセスの場合に問題となる電極（つまり析出部位）の形状による電流密度分布の偏りの影響も受けない．したがって，無電解プロセスは従来より大面積，非平滑面への均一成膜性に優れていると位置づけられているが，これに加え，微細な領域への選択析出形成にも有利な手法であるといえる[5]．さらに，さまざまな手法で局所的に反応を促進させることにより，マスクレスでパターン形成を行う試みもなされている．例えば，電解液温度を通常より低くして析出が起きない状態としておき，外部から基板にレーザーを照射して表面の微小領域を局所的に加熱することにより，選択的な析出を行う方法が提案されている[41]．さらに，Si ウェハ表面にナノスケールの欠陥が存在すると，その箇所のポテンシャルが局所的に負にシフトする（すなわち金属イオン種の還元析出に対し活性を示す）ことが走査プローブ顕微鏡技術を用いた表面

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

電位顕微鏡 (SPoM) により明らかになっているが，これを利用し，ウェハ表面にナノ欠陥をパターニングすることで，金属ナノ構造のマスクレス形成が可能であることが示されている[42), 43)].

Fig. 7 にその例を示すが，このプロセスでは，ダイヤモンド製のプローブを用いたナノインデンテーション装置によりウェハ表面に欠陥部位をパターニングし，表面を再洗浄し清浄な水素終端面とした後，ごく微量（10～100 ppb オーダー）の金属イオンおよびフッ酸を添加した超純水に浸漬することにより，欠陥部位のみで金属析出が起こる．このプロセスも，外部電源を用いずに局所的な還元反応により金属を析出させるという意味では「無電解析出」プロセスであるといえる．金属種としては Au, Ag, Cu, Pt, Pd などの貴金属および Co などが適用可能であり，極めて単純なプロセスでありながらナノ構造体の精密形成が可能であり，種々の応用が期待されている．

このように，無電解プロセスはナノレベルでの微細構造体の形成に対しポテンシャルの高いものであるが，上述のように，複雑な析出反応プロセスには不明点も多く，プロセス開発を進めるうえで障害となっているが，最近では非経験的分子軌道法を用いた素過程レベルからの反応解析も進められており[44)～46)]，将来的には積極的なプロセス設計が可能となることが期待されている．

4. ま と め

ウェットプロセスを用いた機能ナノ構造体形成について，電解・無電解プロセスを中心にいくつかの例を紹介したが，これらに示されているように，同プロセスはナノ構造形成手法として高いポテンシャルをもっている．特に，プロセスが複雑で関与する因子が多い分，これらを制御できればさまざまな可能性が拓けるといえるが，そのためには，プロセスの詳細な理解が今後いっそう重要になる．また，同プロセスでは個々の装置に対する依存性はドライプロセスに比べれば少ないため，得られた知見は種々の系に広く適用可能なものとなる．したがって，反応過程を十分理解し，これに基づいて，これまで蓄積されてきた膨大なノウハウ的知見を整理・体系化することができれば，同プロセスの可能性はさらに広がっていくことが期待される．そのような意味から，ウェットプロセスは「古くて新しい」技術であるといえる．

一方，ナノ構造体形成のさまざまな場面で，ウェットプロセスとドライプロセスの双方を利用することとなるため，個々のプロセスの特徴を活かしながら，プロセス全体を通して包括的な視点でとらえ，トータルプロセスとしての最適化を図ることも重要となるであろう．

References

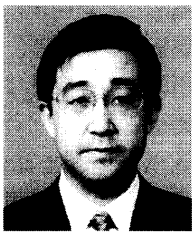
1) P. O. Pedersen: US Patent 836,339 (1906).
2) T. R. Long: *J. Appl. Phys.*, **31**, 1235 (1960).
3) T. Osaka and T. Homma: in "New Trends and Approaches in Electrochemical Technology," ed. by N. Masuko, T. Osaka, Y. Fukunaka (Kodansha-VCH, Tokyo and Weinheim, 1993), p. 13.
4) T. Osaka: *Electrochim. Acta*, **47**, 23 (2001).
5) T. Homma and H. Honma: *J. Surf. Finishing Soc. Jpn.*, **53**, 801 (2002). (in Japanese)
6) L. T. Romankiw: *Electrochim. Acta*, **42**, 2985 (1997).
7) J. W. Schultze and A. Bressel: *Electrochim. Acta*, **47**, 3 (2001).
8) T. Homma: *Hyomen Kagaku*, **25**, 265 (2004). (in Japanese)
9) K. Itaya: "Encyclopedia of Surface and Colloid Science," ed. by A. T. Hubbard (Marcel Dekker, New York, 2002), p. 4602.
10) P. C. Andricacos, C. Uzoh, J. O. Dukovic, J. Horkans, and H. Deligianni: *IBM J. Res. Develop.*, **42**, 567 (1998).
11) U. Cohen and G. Tzanavaras: *Solid State Technol.*, **44**, 61 (2001).
12) O. Shinoura: *DENKI KAGAKU*, **63**, 473 (1995).
13) J. Yahalom and O. Zadok: *J. Mater. Sci.*, **22**, 499 (1987).
14) D. S. Lashmore and M. P. Dariel: *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 1218 (1988).
15) E. Toth-Kadar, L. Peter, T. Becsei, J. Toth, L. Pogany, T. Tarnoczi, P. Kamasa, I. Bakonyi, G. Lang, A. Cziraki, and W. Schwarzacher: *J. Electrochem. Soc.*, **147**, 3311 (2000).
16) I. Bakonyi, J. Toth, L. Goualou, T. Becsei, E. Toth-Kadar, W. Schwarzacher, and G. Nabiyouni: *J. Electrochem. Soc.*, **149**, C195 (2002).
17) A. Cziraki, M. Koteles, L. Peter, Z. Kupay, J. Padar, L. Pogany, I. Bakonyi, M. Uhlemann, M. Herrich, B. Arnold, J. Thomas, H. D. Bauer, and K. Wetzig: *Thin. Solid Films*, **433**, 237 (2003).
18) V. Weihnacht, L. Peter, J. Toth, J. Padar, Z. Kerner, C. M. Schneider, and I. Bakonyi: *J. Electrochem. Soc.*, **150**, C507 (2003).
19) Y. Jyoko and W. Schwarzacher: *Electrochem. Solid State Lett.*, **3**, 377 (2000).
20) Y. Jyoko and W. Schwarzacher: *Electrochim. Acta*, **47**, 371 (2001).
21) For example, A. J. Bard, R. Parsons, and J. Jordan: "Standard Potentials in Aqueous Solution" (Marcel Dekker, New York, 1985).
22) S. Kawai: *Keikinzoku*, **23**, 143 (1973). (in Japanese)
23) N. Tsuya, T. Tokushima, M. Shiraki, N. Wakui, and Y. Umehara: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 2345 (1987).
24) H. Masuda: *Oyobutsuri*, **72**, 1280 (2003). (in Japanese)
25) C. R. Martin: *Chem. Mater.*, **8**, 1739 (1996).
26) J. C. Hulteen and C. R. Martin: *J. Mater. Chem.*, **7**, 1075 (1997).
27) F. S. Bates and G. H. Fredrickson: *Physics Today*, **52**, 32 (1999).
28) K. Asakawa, T. Hiraoka, H. Hieda, M. Sakurai, and Y. Kamata: *J. Photopolym. Sci. Tech.*, **15**, 465 (2002).
29) L. Piraux, J. M. George, J. F. Despres, C. Leroy, E. Ferain, R. Legras, K. Ounadjela, and A. Fert: *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 2484 (1994).
30) S. E. Lambert, I. L. Sanders, A. M. Patlach, M. T. Krounbi, and S. R. Hetzler: *J. Appl. Phys.*, **69**, 4724 (1991).
31) R. L. White, R. M. H. New, and R. F. W. Pease: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 990 (1997).
32) K. Naito, H. Hieda, M. Sakurai, Y. Kamata, and K.

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

Asakawa: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1949 (2002).
33) N. Yasui, A. Imada, and T. Den: *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3347 (2003).
34) S. Z. Chu, S. Inoue, K. Wada, and K. Kurashima: *J. Phys. Chem. B*, **108**, 5582 (2004).
35) J. Kawaji, F. Kitaizumi, H. Oikawa, D. Niwa, T. Homma, and T. Osaka: *J. Magn. Magn. Mat.*, **287**, 245 (2005).
36) K. Yasui, T. Morikawa, K. Nishio, and H. Masuda: *Jpn. J. Appl. Phys., Pt. 2*, **44**, L469 (2005).
37) V. Lehmann and U. Gosele: *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 856 (1991).
38) V. Lehmann: *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 2836 (1993).
39) T. Homma, H. Sato, K. Mori, T. Osaka, and S. Shoji: *J. Phys. Chem. B*, **109**, 5724 (2005).
40) H. Sato, T. Homma, K. Mori, T. Osaka, and S. Shoji: *Electrochemistry*, **73**, 275 (2005).
41) R. J. von Gutfeld, D. R. Vigliotti, O. C. Wells, V. D. Khanna, and E. J. O'Sullivan: *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 348 (1994).
42) T. Homma, N. Kubo, and T. Osaka: *Electrochim. Acta*, **48**, 3115 (2003).
43) N. Kubo, T. Homma, Y. Hondo, and T. Osaka: *Electrochim. Acta*, **51**, 834 (2005).
44) T. Homma, H. Nakai, M. Onishi, and T. Osaka: *J. Phys. Chem. B*, **103**, 1774 (1999).
45) T. Homma, I. Komatsu, A. Tamaki, H. Nakai, and T. Osaka: *Electrochim. Acta*, **47**, 47 (2001).
46) T. Homma, A. Tamaki, H. Nakai, and T. Osaka: *J. Electroanal. Chem.*, **559**, 131 (2003).

(2005年9月26日受理)



本間敬之　ほんま　たかゆき

昭62　早稲田大学理工学部卒業，**平4**　同大学院博士課程修了，**平3**　早稲田大学理工学部助手．講師，助教授を経て平成17年より同教授，**平9〜10**　スタンフォード大学客員准教授，**平10〜**　米国国立科学財団シリコンウェハ工学研究センター兼任研究員，現在に至る．

専門　機能表面化学，電気化学　　（工博）

NII-Electronic Library Service