Suppression of Crosstalk in High-density Printed Circuit Boards by Coating Electroless-plated Ni-P Alloy Film on Signal Lines

M. Sonehara, S. Kayama, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura

Spin Device Technology Center, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553, Japan

High-density printed circuit boards (PCBs) with less than 50 $\mu\text{m}/50 \mu\text{m}$ line/space has been developed. Since the spacing between adjacent signal lines becomes very narrow in the PCBs, the crosstalk from electromagnetic interference in adjacent lines becomes serious. The authors have proposed a magnetic method of reducing the crosstalk. PCBs with electroless-plated Ni-P alloy film on the signal lines were fabricated. From an experiment using a PCB-TEG with a 130 $\mu\text{m}/50 \mu\text{m}$ line/space and 25-mm line length, crosstalk was suppressed throughout a wide frequency range. In using 6- μm thick $\text{Ni}_{98}\text{P}_{2.0}$ (wt.%) alloy film, the suppressed crosstalk was up to 12 dB around 1 GHz. However, the influence of transmission and reflection in the main signal line was very small.

Key words: crosstalk, electroless-plated Ni-P alloy film, permeability, high density printed circuit board, finite difference time domain method

信号線路に無電解 Ni-P 合金めっき膜を被覆した 低クロストーク高密度プリント回路基板の作製と特性評価

曾根原誠・加山慎二・佐藤敏郎・山沢清人・三浦義正

信州大学スピンドバイステクノロジーセンター, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

1. はじめに

携帯電話に代表される各種情報通信機器は、多機能・高性能化が要求される一方で小型・軽量化も要求されている。その解決策の一つとして、プリント回路基板 (Printed Circuit Board; 以下、PCB と記述) の高密度実装化が挙げられる。最近では、数十 μm のライン/スペース (以下、 L/S と記述) を有する微細配線が使用されている。また、スルーホールや層間ビアを設け立体的に配線した多層 PCB が主流となっている^{1),2)}。しかしながら、高密度化が進むと図 1 に示す配線間容量 C_{ij} および誘導結合 M_{ij} によるクロストークノイズが無視できなくなるため、その対策が急務となっている^{3),4)}。

クロストーク対策として、信号線路間にグランド配線を配し、配線間容量 C_{ij} によるクロストークを抑制する手法⁵⁾が採用されているが、高密度化に不利であり、信号線路とグランド配線間の分布容量 C_i , C_j が増大するため特性インピーダンスを低下させる問題がある。また、フェライトめっき膜やナノグラニューラー薄膜などの磁性体によるノイズ抑制シートの利用⁶⁾が注目されているが、多層 PCB における内部の信号線路への適用が困難で、層間クロストークの抑制まではできない⁷⁾。

筆者らは、多層 PCB における内部の信号線路においても、図 2(a) に示すような誘導結合 M_{ij} による配線間クロストークを抑制する手段として、図 2(b) に示すように信号線路間に Fe 系アモルファス微粒子誘電体中分散型複合材料を充填する方法⁸⁾を検討した。平均粒径 6 μm の SiO_2 で表面を被覆された Fe-Si-B-Cr アモルファス微粒子を 51 vol.%, エポキシ樹脂に分散させ、幅 50 μm の Cu 信号線路間に充填したところ、0.1~8 [GHz]においてクロストークが 10~20

[dB]抑制されることが明らかになった。更に高密度で微細な L/S をもつ PCB に適用するためには、信号線路間に充填する磁性微粒子の粒径を更に小さく、また粗大粒子が無いものが望まれるが、適した磁性微粒子が無いのが現状である。

そこで、新たに図 2(c) に示すように信号線路を無電解 Ni-P

Fig. 1 Schematic of origin of crosstalk between adjacent signal lines.

Fig. 2 Cross-sectional structure of PCBs (a) without crosstalk measures, (b) magnetic composite filled PCB, and (c) electroless-plated Ni-base alloy film coated PCB.

合金めっき膜で被覆する方法を検討した。本方法は、前記の信号線路間複合材料充填型に比べて、信号線路上部からの漏洩磁束をシールドできるため、同一層における信号線路間クロストークのみならず層間クロストークに対しても有効である。また、現在 Ni-P めっき膜は、電極用 Au を形成する際の置換 Au めっきの下地材料として使用されているため、プロセスコストに影響しない利点も有する。

本報告では、初めに組成比の異なる無電解 Ni-P 合金めっき膜の基礎特性を述べ、続いて、信号線路に無電解 Ni-P 合金めっき膜を被覆した PCB の作製方法、クロストークおよび伝送特性の測定結果について述べる。また、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法による電磁界解析の結果も併記する。

2. 無電解 Ni-P 合金めっき膜の基礎特性

本実験で使用した無電解 Ni-P 合金めっき膜の組成比は、 $\text{Ni}_{88}\text{P}_{12}$ (wt.%) (以下、高リン Ni-P と記述)、 $\text{Ni}_{92.5}\text{P}_{7.5}$ (wt.%) (以下、中リン Ni-P と記述)、 $\text{Ni}_{98}\text{P}_{2.0}$ (wt.%) (以下、低リン Ni-P と記述) の三種類とした。無電解 Ni-P 合金めっき膜の基礎特性評価用の基板には、スライドガラス (100 μm 厚) を用い、それぞれ厚さ 6 μm で無電解 Ni-P 合金めっき膜を成膜した。ただし、高リン Ni-P めっき膜は、スライドガラス上に成膜した際に剥離したため基礎特性が評価できなかった。

2.1 電気伝導率

電気伝導率 σ の測定は、4 端子抵抗計 (日置電機(株); 3220) を使用し、測定された電気抵抗率 ρ より算出した⁹⁾。表 1 に中リンおよび低リン Ni-P めっき膜の電気伝導率 σ の測定結果を示す。

表 1 より、中リン Ni-P めっき膜の電気伝導率 σ の方が低リン Ni-P めっき膜に比べて低いことが分かる。中リン Ni-P めっき膜の電気伝導率 σ の測定値は、文献値¹⁰⁾ に比べ約 4 倍低く、一方、低リン Ni-P めっき膜の電気伝導率 σ の測定値は、文献値に比べ約 2 倍低かった。これは、成膜された無電解 Ni-P 合金めっき膜において P が偏析したため、電気伝導率 σ が低下したものと推察される。また、無電解 Ni-P 合金めっき膜の電気伝導率 σ は、信号線路で用いる Cu の電気伝導率 σ の約 1 % であるため、Cu 信号線路から Ni-P めっき膜への信号電流の分流はほとんど無視できるものと考えられる。

2.2 静磁化曲線

静磁化曲線の測定には、振動試料型磁力計 (理研電子(株)製; BHV-55) を用いた。図 3 に中リンおよび低リン Ni-P めっき膜の静磁化曲線の測定結果を示す。また表 1 に各 Ni-P めっき膜の飽和磁化 M_s の測定結果を示す。

図 3 および表 1 より、中リン Ni-P めっき膜の飽和磁化 M_s の方が低リン Ni-P めっき膜に比べて低いことが分かる。また各 Ni-P 合金めっき膜において、膜面内方向では、静磁化曲線は等方性を示した。

Table 1 Measured results from electroless-plated Ni-base alloy film.

Type	Ni-P (7.5 wt.%)	Ni-P (2.0 wt.%)
Average constitution [wt.%]	$\text{Ni}_{92.5}\text{P}_{7.5}$	$\text{Ni}_{98}\text{P}_{2.0}$
Electrical conductivity σ [S/m]	0.412×10^6	0.911×10^6
Saturation magnetization M_s [T]	0.067	0.156
Complex permeability @ 1 GHz	μ'	1.18
	μ''	0
		1.25

Fig. 3 Static magnetization curves in two types of electroless-plated Ni-P alloy films.

Fig. 4 Dependence of complex permeability μ' and μ'' on frequency in two types of electroless-plated Ni-P alloy films.

2.3 複素比透磁率の周波数特性

複素比透磁率の周波数特性の測定には、超高周波透磁率測定装置 (凌和電子(株)製; PMM-9G1) を用いた¹¹⁾。図 4 に中リンおよび低リン Ni-P めっき膜の複素比透磁率の周波数特性の測定結果を示す。また表 1 に各 Ni-P めっき膜の 1 GHz における複素比透磁率の実部 μ' および虚部 μ'' の測定結果を示す。

図 4 より、中リン Ni-P めっき膜においては、2 GHz 以下で複素比透磁率の実部 μ' は 1.1~1.5 とほぼ一定であり、また、虚部 μ'' はほぼ 0 であり、高周波磁気損失は小さいと考えられる。一方、低リン Ni-P めっき膜においては、0.3 GHz 以下で複素比透磁率の実部 μ' はおよそ 4 程度と中リン Ni-P めっき膜に比べて約 2 倍高い値を示した。しかしながら、0.3 GHz 以上では、複素比透磁率の実部 μ' は急激に低下し、虚部 μ'' は増加することが分かった。これは、うず電流および自然共鳴による損失であると考えられる。

3. クロストーク測定用 PCB の作製方法

3.1 クロストーク測定用 PCB の設計・寸法

クロストーク測定用 PCB の概観図を図 5(a)に、寸法を図 5(b)に示す。配線パターンは、信号線路長 l が 25 mm、信号線路幅 L が 130 μm で、信号線路間スペーシング S が 50, 100 μm の二種類とした。図 5 の中央の直線な信号線路が主線路であり、その両側が副線路である。なお、エッチングバランスを取るために最外にダミー線路を配した。信号線路および基板背面のグラウンドの厚さは 32 μm 、誘電体(ガラスエポキシ; 以下, FR-4 と記述)の厚さは 100 μm である。波長短縮効果も考慮すると、本クロストーク測定用 PCB は、2 GHz まで測定可能である。また図 5 中の左右にそれぞれ 4 つの円形は下部グラウンドプレーンとのスルーホールであり、上部および下部グラウンドは電氣的に接続されている。

3.2 信号線路への無電解 Ni-P 合金めっき膜の成膜

信号線路への無電解 Ni-P 合金めっき膜の成膜は、表 2 の条件で酸性脱脂、酸処理、エッチング、Pd 触媒付与の順で前処理を行ない、表 3 の条件で無電解 Ni-P めっきを行なった¹²⁾。なお、プローブとの接触部は、Ni-P めっき膜を成膜していない。

Ni-P めっき膜の組成比は、前章の高, 中, 低リンの三種類で、目標膜厚はそれぞれ 2, 4, 6 μm とした。表 4 に、各 Ni-P めっき膜に対する平均膜厚を示す。表 4 より、平均膜厚は目標膜厚に対し、5 %程度の誤差で概ね目標膜厚に近い厚さであった。以降は、Ni-P めっき膜の膜厚 $t_{\text{Ni-P}}$ は、目標膜厚で記述する。

4. FDTD 法による解析方法

信号線路に無電解 Ni-P 合金めっき膜を被覆した PCB のクロストークの抑制効果を解析するために、FDTD 法を用いた電磁界解析ソフトウェア MAGNA/TDM ((株)CRC ソリューションズ製)を用いた。

図 6 に解析モデルを示す。Ni-P めっき膜が無い解析モデルは、Ni-P めっき膜を Air とした。図 6 の解析モデルと図

Fig. 5 (a) Photograph and (b) dimensions of PCB used to measure crosstalk.

5 の実寸法と一致していない理由は、解析セルの y 方向および z 方向の長さ $\Delta y, \Delta z$ を 6 μm に設定したためであるが、解析モデルの寸法と実寸法との誤差率は 4 %程度なので、解析結果に影響を及ぼさないものとした。

表 5 に代表として、信号線路間スペーシング $S = 96 \mu\text{m}$ 、周波数 $f = 1 \text{ GHz}$ の場合の解析条件を示す。なお、各表の *印は、周波数 f に応じて変わる数値を表している。給電方法は、 $+z$ 方向に電圧を印加した。入力波形には $\sin$ 波を用い、励振持続時間 $t_e = 4 \text{ ns}$ とした。セルサイズは、誘電体内部での波長短縮効果を考慮しても波長に比べ十分小さい値を設定し、周波数 $f = 1 \text{ GHz}$ では、解析セルの x 方向(長手方向)の長さ $\Delta x = 750 \mu\text{m}$ とした。解析空間の境界条件は、最小 Z 面を電気壁 (GND) とし、それ以外の 5 つの面は全て PML (Perfectly Matched Layer) とした。PML のパラメータは、電気伝導率の分散次数を 2、垂直入射時の減衰率を -140 dB、PML の層数を 6 とした。これにより解析空間のサイズは、解析モデルのサイズに比べ信号線路方向で約 1.2 倍であるが、境界面での反射の影響は受けないものであった。

表 6 に解析で用いた各層の物性値を示す。誘電体 FR-4 の比誘電率は 4.6、信号配線の電気伝導率は $59.6 \times 10^6 \text{ S/m}$ とした。また、Ni-P めっき膜の電気伝導率 σ および複素比透磁率の実部 μ' および虚部 μ'' は、前章の測定結果の値を用いた。解析結果は、第 6 章のクロストーク測定用 PCB の測定結果と共に示す。

Table 2 Pretreatment conditions for electroless Ni-P alloy plating.

Process	Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Time [min]
1. Acid degreasing	40	1
2. Acid treatment	R. T.	1
3. Etching	25	5
4. Pd catalyzing	25	5

Table 3 Electroless plating conditions for Ni-P alloy.

Sample name	Ni-P (12 wt.%)	Ni-P (7.5 wt.%)	Ni-P (2.0 wt.%)
Average composition of electroless plating film [wt.%]	$\text{Ni}_{88}\text{P}_{12}$	$\text{Ni}_{92.5}\text{P}_{7.5}$	Ni_{98}P_2
Bath temperature [$^{\circ}\text{C}$]	82	80	90
pH	4.8	4.6	5.0
Ni density [g/L]	6.0	5.0	5.5
Reductant	Hypophosphorus acid		
Coating ratio [nm/s]	3.0	2.8	5.6

Table 4 Mean thickness of electroless-plated Ni-P alloy film.

	Mean thickness [μm]		
Target thickness [μm]	Ni-P (12 wt.%)	Ni-P (7.5 wt.%)	Ni-P (2.0 wt.%)
2	2.33	2.25	2.32
4	3.85	3.94	4.37
6	5.92	6.21	6.31

Fig. 6 Model for analysis of PCB.

Table 5 Analysis conditions.

Analysis area	Size	30,750 x 648 x 252 [μm]*
	PML	5 planes, 2 degrees, Damping factor: -140 dB, Number: 6
Cells	Size	$\Delta x = 750^*$, $\Delta y = \Delta z = 6 [\mu\text{m}]$
	Number	185,976*
	Shape	Rectangular parallel piped
Calculated steps	Time Δt	7 fs*
	Number	571,428*
Feed	Type	Voltage, z axis, sin wave
	Excitation time	4 ns*

Table 6 Material value in each layer.

Layer	μ'	μ''	ϵ'	$\sigma [\text{S/m}]$
Ni-P (7.5 wt.%)	1.18*	0	1	0.412×10^6
Ni-P (2.0 wt.%)	3.24*	1.25*	1	0.911×10^6
Cu	1	0	1	59.6×10^6
FR-4	1	0	4.6	0
Air	1	0	1	0

5. クロストーク測定用 PCB の測定方法

PCB の信号線路間におけるクロストークおよび伝送特性の評価には、図 7 に示すように 4-port 高周波ネットワークアナライザ (ADVANTEST 製; R3767CG OPT14), 同軸ケーブル (ADVANTEST 製; A01253-030), GSG デュアルプローブ (GGB INDUSTRIES INC. 製; picoprobe 40A-GSG-300/ 40A-GSG-300-D-700) を用い、図 8 に示される主線路および副線路における S パラメータを測定した。同図の S_{11} は反射係数, S_{21} は透過係数で、これらを伝送特性として評価した。一方, S_{31} は近端クロストーク, S_{41} は遠端クロストークとし、これらをクロストークとして評価した。なお、測定前には、プローブ用校正基板 (GGB INDUSTRIES INC. 製; Calibration Substrate Part# CS-9) を用いて校正した。測定時の測定対象ではない副線路およびダミー線路には何も接続せず、また各配線の配線間容量 C_{ij} や配線とグランド配線間の分布容量 C_i , C_j は無視できるほど小さいものであった。

Fig. 7 Schematic of the measurement system for S parameters in PCB.

Fig. 8 Definition of S parameters in PCB.

6. クロストーク測定用 PCB のクロストークおよび伝送特性の測定結果

6.1 信号線路への無電解 Ni-P 合金めっき膜の成膜

図 9 に組成比の異なる三種類の無電解 Ni-P 合金めっき膜 ($t_{\text{Ni-P}} = 6 \mu\text{m}$) をそれぞれ信号線路に被覆した PCB ($L/S = 130/50 [\mu\text{m}]$) の伝送特性およびクロストークの周波数特性の測定結果を示す。比較として、Ni-P めっき膜を被覆しない PCB の測定結果も示す。また、前記の FDTD 法によって得られた解析結果も併記するが、測定試料のばらつきや測定誤差などの影響で測定結果とは、最大で 10 dB 程度の不一致は見られたが、各パラメータの周波数特性の傾向は概ね一致した。

図 9(a), (b) より、P 含有量の減少に伴い、反射係数 S_{11} および透過係数 S_{21} は低下する傾向が示された。これは、図 4 で示した Ni-P めっき膜の複素比透磁率の虚実 μ'' による磁気損失の増大や複素比透磁率の実部 μ' による線路インダクタンスの増大による特性インピーダンスが変化したためと考えられる。しかしながら、低リン Ni-P めっき膜において、1 GHz で反射係数 S_{11} は約 5 dB、透過係数 S_{21} は約 0.25 dB 程度の減少であり、携帯電話の RF 回路の受動部品の挿入損失限界が 0.5 dB であることから、伝送特性には大きな影響を与えないと考えられる。

同図(c)より、近端クロストーク S_{31} に対しては、Ni-P めっき膜を被覆すると増加する傾向が示されたが、低リン Ni-P めっき膜でも 1 GHz で約 2 dB 程度の増加であった。

(a) Reflection coefficient S_{11}

(b) Transmission coefficient S_{21}

(c) Near-end crosstalk S_{31}

(d) Far-end crosstalk S_{41}

Fig. 9 Relation between S parameters ((a) reflection and (b) transmission coefficients, and (c) near-end and (d) far-end crosstalk) and constitution of Ni-P film in PCBs.

(a) Reflection coefficient S_{11}

(b) Transmission coefficient S_{21}

(c) Near-end crosstalk S_{31}

(d) Far-end crosstalk S_{41}

Fig. 10 Relation between S parameters ((a) reflection and (b) transmission coefficients, and (c) near-end and (d) far-end crosstalk) and thickness of Ni-P (2.5wt.%) film in PCBs.

一方、同図(d)より、P含有量の減少に伴い、遠端クロストーク S_{41} は低下することが分かる。これは、P含有量が減少すると透磁率が高くなり、磁気シールド効果がより向上したためと考えられる。低リンNi-Pめっき膜において、1 GHzで遠端クロストーク S_{41} は約12 dB減少した。近端クロストーク S_{31} は、駆動線路のドライバと受動線路のレシーバが物理的に近くにあるために遠端クロストーク S_{41} よりも大きく、以前はクロストークとは前者を指すことが多く、後者は重要視されていなかった。しかしながら、近年では、バス伝送の多用によって複数の駆動線路から同じタイミングで伝送される信号が重畳するようになり、特に一方に信号源、他方に負荷という一般的な回路である場合、近端クロストーク S_{31} よりも遠端クロストーク S_{41} の方を抑制する要請がある¹³⁾ことから、本手法は適しているといえる。

6.2 低リンNi-Pめっき膜の膜厚依存性

図10に低リン組成の無電解Ni-P合金めっき膜の膜厚 ($t_{\text{Ni-P}} = 0, 2, 4, 6 \text{ } \mu\text{m}$) に対する信号線路上Ni-Pめっき膜被覆PCB ($L/S = 130/50 \text{ } \mu\text{m}$) の伝送特性およびクロストークの周波数特性の測定結果を示す。

図10(a), (b)より、Ni-Pめっき膜の膜厚 $t_{\text{Ni-P}}$ が厚くなるに伴い、反射係数 S_{11} および透過係数 S_{21} は低下する傾向が示された。これは、Ni-Pめっき膜の膜厚 $t_{\text{Ni-P}}$ を厚くすることで、図4で示したNi-Pめっき膜の複素比透磁率の虚実 μ'' による磁気損失の増大や複素比透磁率の実部 μ' による線路インダクタンスの増大による特性インピーダンスの変化がより顕著に表れたものと考えられる。

同図(c)より、Ni-Pめっき膜の膜厚 $t_{\text{Ni-P}}$ を厚くするに伴い、近端クロストーク S_{31} は増加する傾向が示されたが、 $t_{\text{Ni-P}} = 6 \text{ } \mu\text{m}$, 1 GHzで約2 dB程度の増加であった。一方、同図(d)より、Ni-Pめっき膜の膜厚 $t_{\text{Ni-P}}$ が厚くなるに伴い、遠端クロストーク S_{41} は低下することが分かる。これは、Ni-Pめっき膜の膜厚 $t_{\text{Ni-P}}$ が厚くなると、磁気シールド効果がより向上したためと考えられる。

6.3 信号線路間スペーシング S 依存性

図11に組成比の異なる三種類の無電解Ni-P合金めっき膜 ($t_{\text{Ni-P}} = 6 \text{ } \mu\text{m}$) をそれぞれ信号線路に被覆したPCB ($L/S = 130/100 \text{ } \mu\text{m}$) の遠端クロストーク S_{41} の周波数特性

Fig. 11 Relation between far-end crosstalk S_{41} and constitution of Ni-P film in PCBs.

性の測定結果を示す。比較として、Ni-Pめっき膜を被覆しないPCBの測定結果も示す。また、FDTD法によって得られた解析結果も併記するが、測定結果と概ね一致した。

図11より、低リンNi-Pめっき膜においても、1 GHzで遠端クロストーク S_{41} は約3 dBしか減少せず、図9(d)の信号線路間スペーシング $S = 50 \text{ } \mu\text{m}$ の場合に比べ減少しなかった。これは、信号線路間スペーシング S が狭い場合、信号線路間の電磁結合が強く、Ni-Pめっき膜による磁気シールド効果がより顕著に表れたと考えられ、PCBの高密度化に対して、本手法は有用であると考えられる。

7. まとめ

以上より、信号線路に無電解Ni基合金めっき膜を被覆したPCBは被覆しないPCBに比べ、伝送特性は1 GHzで約0.25 dBの低下だけで大きな影響を与えず、信号線路間スペーシングが狭い高密度PCBほど遠端クロストークを大幅に抑制でき、1 GHzで約12 dB低下できることが明らかになった。信号線路間複合材料充填型に比べクロストーク抑制は劣るため、今後Ni-P組成比や膜厚、 $\text{Ni}_{99.8}\text{B}_{0.2}$ (wt.%)めっき膜への変更などを検討する予定である。

謝辞 無電解Ni-P合金めっき膜は、野口 真氏 (大和電機工業(株)) にご協力頂き成膜した。複素比透磁率の周波数特性の評価は、池田 賢司氏 (太陽誘電(株)) にご協力頂きました。また、4-port高周波ネットワークアナライザは日置電機(株)様、4端子抵抗計は信州大学工学部情報工学科 森迫・劉研究室より拝借した。以上の皆様に厚く御礼申し上げます。

References

- 1) K. C. Yung, H. Liem, H. Choy, and T. M. Yue: *J. Appl. Poly. Sci.*, **116**, pp.2348-2358 (2010).
- 2) K. Takagi: *Yokuwakaru Printed Circuit Boards no Dekirumade* -Second edition- (in Japanese), (Nikkan Kogyo Shinbunsha, Tokyo, 2007).
- 3) J. Xiaosong and Z. Runjing: *Proc. Int. Conf. Electronic Measurement and Instruments 2007 (ICEMI'07)*, pp.2-437-2-440 (2007).
- 4) Y. Kudo, T. Tobana, and T. Sasamori: *IEICE Trans. Commun.*, **92**, 1, pp.296-303 (2009).
- 5) T. Maeno, Y. Sakurai, T. Unou, K. Ichikawa, and O. Fujiwara: *IEEE Trans. Fund. Mater.*, **128**, 11, pp.657-662 (2008).
- 6) H. Ono, T. Ito, S. Yoshida, Y. Takase, O. Hashimoto, and Y. Shimada: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 4(2), pp.2853-2857 (2004).
- 7) T. Maruyama, M. Sonehara, K. Ikeda, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura: *The Papers of Tech. Meeting on Magn.*, IEE Japan, MAG-10-201, pp. 11-16 (2010).
- 8) S. Kayama, M. Sonehara, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura: *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 10, pp.4801-4803 (2009).
- 9) M. Smits: *Bell Syst. Tech. J.*, **37**, 5, pp.711-718 (1958).
- 10) B. Ro: *Corrosion-Resistant Plating and Chemical Plating* (in Japanese), (Nikkan Kogyo Shinbunsha, Tokyo, 1961).
- 11) M. Yamaguchi, Y. Miyazawa, K. Kaminishi, and K.-I. Arai: *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, **3**, 4, pp.137-140 (2003).
- 12) M. Sonehara, S. Noguchi, T. Kurashina, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura: *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 10, pp. 4173-4175 (2009).
- 13) Y. Usui: *Boards Sekkeisyu no Tameno Bunpu Josu Kairo no Subete* -Second edition- (in Japanese), (Self-publishing, 2009).

2010年9月10日受理, 2011年1月6日採録