制御グリッドを用いた SEM の磁気コントラスト

Magnetic Contrast in the Scanning Electron Microscope with a Control Grid

田中敏雄・国分明男 電子技術総合研究所, 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4 (☎305)

T. Tanaka and A. Kokubu

Electrotechnical Laboratory,

1-4, Umezono 1-chome, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki, 305

A differential detection system of magnetic contrast with control grid in the scanning electron microscope is proposed, and its application to the magnetic contrast improvement for perpendicularly recorded magnetization is discussed. The system consists of two symmetrically placed detectors and a differential amplifier. The output voltage of each detector is fed back to a control grid placed between magnetic film and detector.

It is shown that the detected signal amplitude of the system with control grid is 3 times greater than that of the system without control grid for perpendicularly recorded magnetization on Co-Cr film. The differential amplitude of the twin detectors is twice the amplitude of each detector in the system. Perpendicularly recorded magnetization of 3 micron bit length on Co-Cr film is detected with the system. These results suggest that the system may provide a convenient means to observe recorded pattern on magnetic films and show a step towards an electron beam readout in high density recording.

1. ま え が き

SEM (Scanning Electron Microscope) による磁区観察の方法には、2次電子を用いる方法と反射電子を用いる方法がある。我々は、2次電子による方法で、記録媒体上に記録された磁化の観察や高密度記録における再生への可能性を検討している¹⁾。

2次電子像の磁気コントラストは、2次電子の軌道が試料表面上の洩れ磁界を通り抜けるときにローレンツ力により曲げられることにより生ずる。2次電子の軌道に大きな影響を及ぼす磁界成分は、膜面に水平な成分である¹⁾。曲げられる向きは記録磁化から発生される磁界の向きによって決まり、検出器に向かうものと、これとは逆方向に向かうものが生じる。この差が2次電子像に現れ、磁気コントラストとして観察できることになる。磁気コントラストの大きさは、洩れ磁界の水平成分の大きさと洩れ磁界の影響を大きく受けた2次電子のみを選別して検出する検出方法に依存する¹⁾。

高密度になるほど、試料表面上の洩れ磁界の水平成分が小さくなるため、磁気コントラストが低下し、再生信号も減少してくる。このような磁気コントラストの低下を改善するためには、試料表面上の洩れ磁界を通り抜けた後の2次電子のうち、磁界の影響を大きく受けたもの

のみを選別して検出することが重要になってくる。これまでに、試料と検出器の間にスリットを置く方法²⁾や、我々が既に報告した差動検出方式³⁾などの方法が試みられている。

本論文では、2個の検出器を試料に対して対称に置き、試料と検出器の間にそれぞれ制御グリッドを設け、検出器からの信号をそれぞれ制御グリッドにフィード・バックし、検出器に入る2次電子を制御することによる、差動検出方式を提案し、それを用いて Co-Cr, Ni-Fe 二層膜上に記録された記録ビットの磁気コントラストの測定を行ったので、結果について報告する。

2. 制御グリッドを用いた磁気コントラスト

Fig. 1(a) は、制御グリッドを用いた差動検出方式による磁気コントラストの原理を示す図である。なお、以下では垂直磁気異方性膜上に記録された磁化を測定対象にする。

試料と左側および右側検出器の間にそれぞれ制御グリッドを設け、検出器からの信号をそれぞれの制御グリッドにフィード・バックすることにより、左側および右側検出器に入る2次電子を制御できるように構成されている。

Fig. 1(b) は、制御グリッドの動作を説明するための

Fig. 1(a) A schematic illustration of secondary electron trajectory.

Fig. 1(b) A diagram showing horizontal component of the leakage field, detector output signal and driver output signal.

模式図を示したものである。Hx は垂直磁気異方性膜上の水平方向の洩れ磁界成分の分布を示し、V1 は左側検出器の再生信号の波形を示している。再生信号は垂直磁気異方性膜からの磁界分布に依存して三角形的になる¹⁾。Vg1 は左側の制御グリッドに印加される電圧波形を示している。ここでは左側の検出器についてのみ示しているが、右側の検出器では、再生信号の極性が逆極性³⁾になるので、右側の制御グリッドに印加される電圧波形も逆極性になる。

電子ビームはz軸方向から入射し、x方向に走査されるとすると、その時発生する2次電子は、垂直磁気異方性膜上の洩れ磁界の向きに従い左側、あるいは右側の検出器の方向に曲げられる。今、電子ビームがaからbに走査されるとすると、Hxは零から正方向に増加するから、それに従い左側検出器の方向に曲げられる2次電子も増加し、左側検出器の出力V1を増加させる。V1が増加すると、左側の制御グリッドに印加される電圧Vg1が増加する。Vg1が増加すると、試料と左側の制御グリッド間の電界強度が強くなり、左側の検出器の方向に曲

Fig. 2 Block diagram of the differential detection system with a control grid.

げられつつある2次電子はさらに加速され、左側の検出器に引き寄せられる。一方、右側の検出器では、右側の制御グリッドに印加される電圧が減少し、試料と右側の制御グリッド間の電界強度は弱くなり、右側の検出器に引き寄せられる2次電子は減少する。

次に電子ビームの走査位置がbからcに移動すると、Hxは徐々に減少するから、それに従い左側の検出器の方向に曲げられる2次電子も減少し、試料と左側の制御グリッド間の電界強度は徐々に弱くなり、左側の検出器に引き寄せられる2次電子は徐々に減少してくる。逆に、試料と右側の制御グリッド間の電界強度は徐々に強くなり、右側の検出器に引き寄せられる2次電子は徐々に増加してくる。電子ビームの走査位置がc点になると、Hxは零になるから、左側の制御グリッドと右側の制御グリッドの印加電圧が等しくなり、左側の検出器と右側の検出器に引き寄せられる2次電子も等しくなる。

さらに電子ビームの走査位置がcからdに移動すると、Hxは零から負方向に増加するから、それに従い右側の検出器の方向に曲げられる2次電子が増加し、試料と右側の制御グリッド間の電界強度が強くなり、右側の検出器に引き寄せられつつある2次電子はさらに加速され、右側の検出器に引き寄せられる。逆に、左側の検出器に引き寄せられる2次電子は減少する。

このように、左側検出器と右側検出器のそれぞれの制御グリッドは、互いに逆の動作をし、垂直磁気異方性膜上の洩れ磁界の向きに従い曲げられる2次電子をそれぞれ制御グリッドで制御し、左側検出器と右側検出器の磁気コントラストを向上させる。ここで両検出器出力の差をとれば、記録磁化に対応した信号がさらに強調されることになる。

本論文で用いる磁気コントラストの定義は次の通りである。2次電子が発生されないときの検出器出力を基底レベルとし、検出器に向かう2次電子の信号を S^+ 、検出器に向かわない2次電子の信号を S^- とすると、磁気コントラスト $C_{(0)}$ は次のように表される。

$$C_{(0)} = \frac{2(S^+ - S^-)}{S^+ + S^-} \quad (1)$$

差動検出方式では、各検出器の出力は互いに逆極性になるが、磁気コントラストは同様に定義される。

3. 実験装置の構成

Fig. 2 に、制御グリッドを用いた差動検出方式の構成図を示す。加速電圧は 2 kV である。制御グリッドは 0.5 mm 間隔の銅のメッシュで構成されている。検出器からの信号は、高域通過フィルタを通り、駆動回路で増幅され、制御グリッドにフィード・バックされる。高域通過フィルタは走査位置による直流レベルの変動を取り除くためのものである。なお、駆動回路は制御グリッドに印加する直流レベルと信号振幅が調整できるように構成されている。また、検出器からの信号はさらに増幅器で増幅され、演算回路で演算され、左側出力、右側出力、差動出力、加算出力の四つのモードが得られるように構成されている。

測定に使用した試料は Co-Cr, Ni-Fe 二層膜で、Co-Cr 層の膜厚は 3.2 μm 、Ni-Fe 層の膜厚は 1.6 μm である。ここで Co-Cr 層、Ni-Fe 層の膜厚が大きいのには、記録時の減磁を緩和し、残留磁化を大きくさせるためである⁴⁾。基板は厚さ 150 μm のガラス板、および厚さ 70 μm のポリイミドフィルムを用いた。Table 1 に Co-Cr 膜と Ni-Fe 膜の磁気特性を示す。Co-Cr 膜への書き込みは、補助磁極励磁による垂直ヘッドを用い⁵⁾、予め直流消去した後、NRZI all "I" 信号の飽和記録を行った。主磁極は厚さ 6 μm の Ni-Fe 板を石英と Mn-Zn フェライトではさみ込んだ構造になっている⁶⁾。石英の媒体と接する部分は、かまぼこ形に研磨してある。

4. 実験結果及び考察

Fig. 3 は、制御グリッドに印加する直流レベルを設定するために、制御グリッドに直流電圧のみを印加し、制御グリッド印加電圧に対する左側、右側検出器のそれぞれの直流レベルと信号振幅を測定したものである。図中 V_L , V_R は左側、右側検出器のそれぞれの直流レベルを示し、 ΔV_L , ΔV_R は左側、右側検出器のそれぞれの信号振幅を示している。ここで、測定対象となった記録ビット長 d は 50 μm である。

グリッド印加電圧を 0 (V) から上げて行くと、直流レベル、信号振幅とも徐々に大きくなり、ある一定値になる。さらにグリッド印加電圧を上げて行くと、直流レベル、信号振幅とも減少して行く傾向になる。

これは、グリッド印加電圧が 0 (V) のとき、エネルギー

Table 1 Magnetic properties of Co-Cr films.

	t (μm)	M_s (emu/cc)	$H_c(\perp)$ (Oe)	$H_c(\parallel)$ (Oe)	$M_r(\perp)/M_s$	$M_r(\parallel)/M_s$
Co-Cr	3.2	450~500	1000	500	0.22	0.17
Ni-Fe	1.6	600~600		5

Fig. 3 DC level and signal amplitude vs. grid voltage for perpendicular recording.

Fig. 4 Magnetic contrast vs. grid voltage for perpendicular recording.

ギーの低い 2 次電子は制御グリッドで阻止されているが、グリッド印加電圧を上げることにより、エネルギーの低い 2 次電子も徐々に制御グリッドを通過し、検出器に引き寄せられ、グリッド印加電圧が 50 (V) 程度になると、発生した 2 次電子がほとんど検出器に到達することになり、一定値になるものと考えられる。さらにグリッド印加電圧が 100 (V) 以上になると、エネルギーの低い 2 次電子は制御グリッドに引き止められ、制御グリッドを通過できなくなり、検出器に到達できる 2 次電子が減少するものと考えられる。すなわち、制御グリッドは 2 次電子のエネルギー・フィルタとして動作し、Fig. 3 は 2 次電子のエネルギー分布を示していることになる。

Fig. 3 において、左側、右側検出器のそれぞれの直流レベルは、グリッド印加電圧が約 50 (V) のときに最大値になり、左側、右側検出器のそれぞれの信号振幅は、グリッド印加電圧が約 30 (V) のときに最大値になる。これは、信号に寄与する 2 次電子のエネルギーが低いことを示している。このことは、2 次電子のエネルギーの

低いものほど、洩れ磁界の影響を強く受けることから説明できる²⁾。

Fig. 4 は、Fig. 3 で示される直流レベルと信号振幅の変化を磁気コントラストで示したものである。制御グリッドに印加する直流レベルが約 20 (V) のときに磁気コントラストが最大になる。したがって以下の測定では、制御グリッドに印加される直流レベルは 20 (V) に設定されている。

Fig. 5 は、制御グリッドに印加する直流レベル 20(V) に、さらに検出器からの信号を重畳させて測定したときの、記録ビット長に対する磁気コントラストの依存性を示すものである。なお、比較のために制御グリッドがないときの測定値も示してある。制御グリッドがないときと比較して、約 3 倍磁気コントラストが改善されていることが分かる。

これは第 2 節で述べたように、検出器からの信号を制御グリッドにフィード・バックすることにより、検出器に入る 2 次電子が制御グリッドで制御され、その結果、2 次電子の軌道選別効率が向上し、磁気コントラストが改善されたことによるものと考えられる。このことは、制御グリッドに印加する電圧波形を反転させると、磁気コントラストがほぼ零になることから説明される。

Fig. 6 は、制御グリッドがないときと、あるときの差動出力の 2 次電子像と再生波形の一例を示したものである。ここで、再生波形は媒体上で 1 回だけ走査したときの波形である。制御グリッドにより、2 次電子像、再生波形とも改善されていることが分かる。

5. ま と め

制御グリッドを用いた差動検出方式を提案し、それを用いて Co-Cr, Ni-Fe 二層膜上に記録された記録ビットの磁気コントラストの特性を実験的に検討し、次のような結果を得た。

2 個の検出器を試料に対して対称に置き、試料と検出器の間にそれぞれ制御グリッドを設け、検出器からの信号をそれぞれ制御グリッドにフィード・バックし、検出器に入る 2 次電子を制御することにより、制御グリッドがないときと比較して、約 3 倍磁気コントラストが改善されることが分かった。その結果、 $3\mu\text{m}$ 間隔で記録された Co-Cr, Ni-Fe 二層膜の磁気記録情報が検出できることを示した。

磁気コントラストをさらに向上させるためには、第 4 節で述べたように、2 次電子のエネルギーが低いものほど、洩れ磁界の影響を強く受けることから、低加速電圧

Fig. 5 Magnetic contrast vs. bit length with and without control grid.

Fig. 6 Magnetic contrast and signal waveform for Co-Cr film with and without control grid, (a) without control grid, (b) with control grid.

で動作する高輝度な電子銃などの検討が必要になると考えられる。

終りに、本研究の機会を与えてくださった柏木寛電子計算機部長、討論に参加された研究室の諸氏に感謝します。

文 献

- 1) 田中, 国分: 信学技報, MR 81-7, 23 (1981).
- 2) D. C. Joy and J. P. Jakubovics: *J. Phys. D*, **2**, 1367, (1969).
- 3) 田中, 国分: 日本応用磁気学会誌, **6**, (2) 127 (1982).
- 4) 田中, 国分: 信学技報, MR 82-9, 43 (1982).
- 5) S. Iwasaki, Y. Nakamura and K. Ouchi: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-15**, 1456 (1979).
- 6) 田中, 国分: 第 6 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 131 (1982).

1983 年 12 月 13 日受理, 1984 年 2 月 14 日採録