微小バブルの発生条件と安定性

Stability and Generation Condition of Small Bubbles

窪山弘信・古澤秀一・井上健太・大越正敏

九州工業大学情報工学部, 飯塚市川津 680-4 (〒820-8502)

H. Kuboyama, S. Furusawa, K. Inoue, and M. Ohkoshi

Faculty of Computer Science, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawazu, Fukuoka 820-8502

Small bubbles were found in magnetic garnet films with the easy axis perpendicular to the film plane. Their diameter is smaller than that of normal bubbles. They appear after stripe domains have been chopped by a pulsed magnetic field with high intensity after a single chopping. Small bubbles are generated under a limited range of bias field and pulse field conditions. They remain stable within a narrow bias field range, above which they collapse and below which they transit irreversibly into larger elliptical bubbles or stripes. The contrast of the Faraday image of small bubbles is different from that of normal bubbles.

Key words: bubble domain, stripe domain, garnet film

1. はじめに

磁区や磁壁の動特性は古くからの研究課題であるが、1970年代にはバブルメモリの研究が盛んに行われ、磁気バブルの静特性はもちろん、動特性もかなりよく理解された¹⁾。しかしながら、バブル磁壁における垂直・水平ブロッホラインの微視的な構造や動特性は実証することが難しかったため、十分明らかになっているとは云えない。ストライプ磁区をパルス磁場によりチョッピングするとバブルが生成することはよく知られているが、そのメカニズムに関する研究は意外に少ない²⁾。

磁性ガーネットの膜面に垂直に弱いバイアス磁場を加えた状態で、パルス磁場を重畳しストライプ磁区をチョッピングすると、バブル磁区が発生するが、通常のバブルとは偏光状態の異なった微小なバブルも発生することを報告した³⁾。微小バブルの直径はストライプ磁区幅より小さく通常のバブルのコラプス直径くらいのもので、通常のバブルが楕円に伸び出し始めるランアウト磁場付近で存在する。本論文では微小バブルの発生条件と安定性を詳細に研究した結果を述べる。微小バブルと区別するために通常のバブルはノーマルバブルと呼ぶことにする。

2. 実験方法

膜厚 h が $7\ \mu\text{m}$ の液相エピタキシャルガーネット膜 $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ の磁区を、光学顕微鏡によりファラデー効果を利用して 1279×1023 ピクセルの CCD カメラで観察した。試料には、飽和磁化 $4\pi M_s = 80\ \text{G}$ 、特性長 $l = 2.2\ \mu\text{m}$ 、ノーマルバブルのコラプス磁場 $H_{\text{col}} = 22\ \text{Oe}$ の試料

#1 と $4\pi M_s = 104\ \text{G}$ 、 $l = 2.1\ \mu\text{m}$ 、 $H_{\text{col}} = 29\ \text{Oe}$ の試料#2 とを用いた。どちらの試料も保磁力は $0.5\ \text{Oe}$ とやや高めである。ここで特性長はストライプ磁区幅⁴⁾およびバブル磁区直径⁵⁾のバイアス磁場依存性から求めた。なお、特にことわらない場合は試料#2を用いた。

適度なバイアス磁場 H_b を印加したストライプ磁区にパルス磁場 H_p を膜面垂直に一発印加し、ストライプ磁区をチョッピングしてバブルを発生させた。パルス磁場 H_p は 10 ターンのコイルを用い、幅 $\tau_p = 5 - 50\ \text{nsec}$ 、強さ $500\ \text{Oe}$ までとした。何発ものパルス磁場を印加すると磁壁構造が変化する可能性があるため、バイアス磁場を磁気飽和するまで増加させてからバイアス磁場をゼロに戻し、新たな初期状態のストライプ磁区をつくり出した後、再び実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3. 1 微小バブルの偏光特性

磁性ガーネット試料#1の膜面垂直方向に $16\ \text{Oe}$ のバイアス磁場を加えた状態で、同方向にパルス幅 $20\ \text{nsec}$ のパルス磁場 $100\ \text{Oe}$ を加えてストライプ磁区をチョッピングすることによって生成したノーマルバブル、微小バブルについての偏光状態を観測した。アナライザー角度 $\theta_A = -6, 0, 2, 6, 12\ \text{deg}$ での撮影画像を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) は $H_b = 16\ \text{Oe}$ において観察したノーマルバブルと共存した微小バブルの偏光顕微鏡像である。試料#1におけるノーマルバブルのコラプス磁場は $22\ \text{Oe}$ なので、 $H_b = 16\ \text{Oe}$ と低いバイアス磁場では、ノーマルバブルは直径約 $20\ \mu\text{m}$ に伸びだしかかって楕円形状をしている。コントラストの異なる直径が $7\ \mu\text{m}$ と $5\ \mu\text{m}$ の微小バブル A, B が存在している。ノーマルバブルのコントラストは、 $\theta_A = 0\ \text{deg}$ の直交ニコルを境にして反転するのに対し、微小バブル A, B のコントラストが反転するのは各々 $\theta_A = 3, 8\ \text{deg}$ と直交ニコルからずれている。

バイアス磁場を $21\ \text{Oe}$ に増加することで直径を $8\ \mu\text{m}$ とコラプス直径近くまで小さくしたノーマルバブルの偏光顕微鏡像を Fig. 1(b) に示す。直径の大きな Fig. 1(a) のノーマルバブルと同様の θ_A 依存性を示し、やはり $\theta_A = 0\ \text{deg}$ でコントラストが反転している。それに対し微小バブルでは、Fig. 1(a) の $\theta_A = 2\ \text{deg}$ ではノーマルバブルは明るいのに微小バブル B は暗く写っている。このように微小バブルでは、偏光面の回転がノーマルバブルとは異なっていることがわかる。

微小バブルの磁区内部では、中心から外に向かってコン

Fig. 1 Optical micrographs of normal and small bubbles observed at different analyzer angles. (a) $H_b = 16$ Oe, (b) $H_b = 21$ Oe.

トラストが徐々に変化していることがわかる. このことを詳しく見るため, 直径方向で透過光強度の変化する様子を測定した. $\theta_A = 0$ deg に対する結果を Fig. 2 に示す. ノーマルバブルでは磁壁に相当する部分でのみ強度減少がみられ, 内部では透過光強度は一定である. しかし, 微小バブル A では磁区内部で強度が徐々に変化しており, 一定部分がない.

Fig. 2 Distribution of the transmitted light intensity across the bubble center. $\theta_A = 0$ deg.

Fig. 3 Dependence of the transmitted light intensity on the analyser angle.

アナライザー角度 θ_A の回転による, これらバブルの中心における透過光強度とまわりの逆磁区の透過光強度の変化を Fig. 3 に示す. $\circ$ はノーマルバブル, $\blacktriangle$ は微小バブル A, $\bullet$ は微小バブル B, $\square$ は周囲の逆磁区を表している. $\theta_A = -6$ deg ではノーマルバブルと微小バブル B の透過光強度は等しくなる. $\theta_A = 0$ deg では, ノーマルバブルと逆磁区の透過光強度が等しくなり, 直交ニコルを境にしてコントラストが反転することになる. また, この試料 # 1 のファラデー回転角は 10 deg であることが分かる. $\theta_A = 12$

deg では、ノーマルバブルに比べて2つの微小バブルのコントラストが弱いことが分かる。微小バブル A, B のコントラストが反転するのはそれぞれ 3 deg, 8 deg と直交ニコルからずれている。以上の透過光強度変化については Fig. 1 から確認できる。

微小バブル B では磁区内の透過光強度は $\theta_A = 0$ deg で最小になっていて、偏光面が回転していないことを示している。直径の大きい微小バブル A では、磁区内の透過光強度が最小となるアナライザー角度は -6 deg であり、微小バブル B と比較してノーマルバブルのスピンド分布に近いと考えられる。Fig. 2 の結果と考えあわせると、微小バブルのスピンは中心に向かって徐々に傾き、非常に幅広な磁壁状態になっていて、中心付近のスピンは膜面内を向いている可能性がある。あるいは、ハーフバブル⁶⁾のように微小バブル内磁化が磁性ガーネット膜表面まで貫いていない可能性も考えられる。膜厚方向で微小バブルの高さが変わるとすれば、偏光面の回転が減少することも説明できる。G G G 基板界面との格子不整合による歪誘導磁気異方性や膜厚方向組成分布があって、微小バブル発生の原因になっている可能性はあるが、詳細は今後の検討課題である。

3. 2 微小バブルの発生条件

微小バブルの発生はバイアス磁場、パルス磁場、パルス幅に依存する。試料#2 における H_p と H_b に対する微小バブルの発生領域を $\tau_p = 25, 40$ nsec に対して Fig. 4 に示す。微小バブルは $\tau_p = 25$ nsec の場合は●で、 $\tau_p = 40$ nsec の場合は■で囲まれた領域内で発生する。どちらの場合も微小バブルはバイアス磁場が 18 – 24 Oe で生成されることがわかる。パルス幅 τ_p が短いと高い H_p を必要とし、パルス幅が長くなるにしたがって発生領域は狭くなり、 $\tau_p > 50$ nsec では発生しない。同図にはノーマルバブルの発生領域も示してある。微小バブルとノーマルバブルの発生領域は高バイアスでは殆ど一致していることが分かる。したがって、ストライプからチョッピングによって生じる微小バブルとノーマルバブルの発生メカニズムには大きな違いはないことが示唆される。

Fig. 4 Generation condition for small bubbles.

バイアス磁場一定の条件では、微小バブルの発生には τ_p と H_p がほぼ反比例の関係にあることが分かった。バイアス磁場 21.8 Oe の場合はパルス幅とパルス磁場の積 $\tau_p \cdot H_p$ が約 $2 \mu\text{sec} \cdot \text{Oe}$ のときにもっとも発生頻度が多かった。 $\tau_p \cdot H_p > 3 \mu\text{sec} \cdot \text{Oe}$ の領域ではノーマルバブルも消えてしまい、 $\tau_p \cdot H_p < 1 \mu\text{sec} \cdot \text{Oe}$ の領域ではストライプが切れることはない。 H_p によってストライプ幅が狭くなる方向に磁壁が移動し、磁壁移動度を μ_w とすれば、 τ_p で移動距離 L は

$$L = \mu_w \tau_p H_p. \quad (1)$$

$\tau_p \cdot H_p \sim 2 \mu\text{sec} \cdot \text{Oe}$ であったバイアス磁場 21.8 Oe におけるストライプ幅は $8 \mu\text{m}$ であるから、 $L = 4 \mu\text{m}$ とすると、磁壁移動度 μ_w は $2 \text{m/sec} \cdot \text{Oe}$ となる。この値は、比較的測定が容易なストライプ先端の移動度の予備的な測定結果とほぼ一致している。微小バブルを発生させるのに必要な $\tau_p \cdot H_p$ はバイアス磁場が低くなるにつれて大きくなるが、これはストライプ幅の増加、したがって移動距離 L の増加に対応していると考えられ、磁壁は H_p がかかっている時間中は一定速度で移動していると考えられる。

微小バブルの直径には発生条件に依存して分布がある。この微小バブル直径の分布を、 H_b , τ_p , H_p に対して調べた。 $H_b = 20.7$ Oe, $\tau_p = 10$ nsec とし、 H_p を 100 – 200 Oe と変えたときに発生した微小バブルの、面積 0.01mm^2 あたりの数を微小バブル直径に対して Fig. 5 に▲で示した。微小バブルの大きさには直径が $1.5 - 12 \mu\text{m}$ と分布があり、直径 $\sim 4.5 \mu\text{m}$ が最も多く観察された。 $H_p = 135$ Oe と 180 Oe の場合を○と□で示したが、 $H_p = 135$ Oe では直径 $\sim 5 \mu\text{m}$ が比較的多く、 $H_p = 180$ Oe では直径 $\sim 8 \mu\text{m}$ が比較的多い。パルス磁場の強さによって直径分布が変化していることが分かる。

Fig. 5 Number of small bubbles vs. the diameter of small bubbles generated by $H_p = 100 - 200$ Oe with $\tau_p = 10$ nsec and $H_b = 20.7$ Oe.

3. 3 微小バブルの安定性

生成した微小バブルのバイアス磁場に対する安定性を調べた。4個の微小バブルについてそれらの直径に対するバイアス磁場依存性を Fig. 6 に示す。バイアス磁場を大きくするにしたがって微小バブルの直径は小さくなっていくが、あるバイアス磁場で突然消滅してしまい、バイアス磁場を戻しても復活することはない。この微小バブルが消滅するバイアス磁界 H_{scol} はノーマルバブルのコラプス磁場 H_{col} より低い。生成時の直径が大きい方が高いバイアス磁場でまで存在でき、約 5 Oe 増加させた場合に消滅することが多かった。しかしながら、 $H_b = 18.5$ Oe で作成した直径 6 μm の微小バブルはわずかな H_b の増加で消滅した。逆にバイアス磁場を下げていった場合は徐々に直径が大きくなりある磁場で直径の大きなバブルまたはストライプに突然遷移した。

同図にはノーマルバブルの直径の H_b 依存性を○で示してある。バイアス磁場が低い所ではバブルが楕円変形するが長径と短径をとともに○で表示してある。また、 H_b の増減に対するヒステリシスも含まれている。実線はノーマルバブルの直径に対する Thiele の安定理論曲線⁵⁾で、破線は不安定解である。バイアス磁場が高い領域では理論値とほぼ一致しているがバイアス磁場が低い所ではバブルが楕円変形するためずれが生じている。微小バブルはノーマルバブルのランアウト磁場付近で生成され、存在するバイアス磁場の領域は約 5 Oe と狭い。また、微小バブルの安定存在領域はこの理論曲線から外れているため、ノーマルバブルとは異なるバブルと考えられる。

Fig. 6 Bias field dependence of the bubble diameter.

ノーマルバブルより直径の小さなバブルとしては二安定バブル⁷⁾が知られている。二安定バブルでは H_b の増加によって直径の小さいバブルに遷移し、 H_b を減らすと元のバブルに復活する。二安定バブルのコラプス磁場はノーマルバブルのコラプス磁場より高い。したがって、ここで観察された微小バブルは、二安定バブルではない新しいタイプのバブルと考えられる。試料#1における微小バブルの存在するバイアス磁場範囲は約 2 Oe と狭く、この磁場範囲内では直径はほぼ一定であったが、試料#2における微小バブルの存在するバイアス磁場範囲は約 5 Oe と比較的広く、非常に小さい直径まで安定に存在することもあることが分かった。

微小バブルの発生原因はまだ良く分かっていないが、パルス磁場チョップによる磁区切断後、パルス消去後の磁壁移動時保磁力が大きいために磁壁が準安定状態で止まってしまったために微小バブルが生じている可能性³⁾が考えられる。

4. まとめ

微小バブル発生条件と安定性を調べた結果、 $\tau_p \cdot H_p$ の値が約 2 $\mu\text{sec} \cdot \text{Oe}$ のとき発生しやすい。微小バブルが発生するバイアス磁場領域は 18 – 24 Oe と狭く、発生条件に依存して直径には 1.5 – 12 μm と分布がある。微小バブルの偏光状態はノーマルバブルとは異なるが、その直径によっても異なっており、微小バブルのスピンの分布は発生条件に依存していると考えられる。微小バブルはノーマルバブルより直径が小さい、コラプス磁場が低い。また微小バブルは非常に小さい直径まで安定に存在する場合があることが明らかになった。

文献

- 1) A. P. Malozemoff and J. C. Slonczewski : Magnetic Domain Walls in Bubble Materials, (Academic Press, N.Y., 1979).
- 2) T. M. Morris, G. J. Zimmer, and F. B. Humphrey : *J. Appl. Phys.*, **47**, 721 (1976).
- 3) M. Ohkoshi : *J. Appl. Phys.*, **92**, 370 (2002).
- 4) D. C. Fowles and J. A. Corpland : *Proc. AIP Conf.*, **5**, 240 (1972).
- 5) A. A. Thiele : *Bell Syst. Tech. J.*, **48**, 3287 (1969).
- 6) W. J. DeBonte : *Bell Syst. Tech. J.*, **51**, 1933 (1972).
- 7) R. Suzuki and Y. Sugita : *IEEE Trans. Mag.*, **14**, 210 (1978).

2002 年 10 月 7 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録