

マイクロ波アシスト磁化反転を用いた、 2層の垂直磁化膜ナノドットの層選択磁化反転

首藤 浩文, 永澤 鶴美, 工藤 究, 金尾 太郎, 水島 公一, 佐藤 利江
(東芝研究開発センター)

Layer-selective switching of a double-layer perpendicular magnetic nanodot
using microwave-assisted magnetization switching technique

H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, T. Kanao, K. Mizushima, and R. Sato
(Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation)

はじめに

媒体上の記録層を多層化することにより記録密度を増大させる, 3次元磁気記録の実現のためには, 記録層を選択した情報の書き込み・読み出し技術の開発が必要である. 本研究では, 書き込み技術に注目し, 2層の垂直磁化膜を積層した磁性体ナノドットにおいて, 層を選択した磁化反転がマイクロ波アシスト磁化反転[1-6]を応用することで可能であることを実証した. さらに, 熱励起の磁化振動に起因する信号の測定をおこない, 各層の反転の原因となっている磁化振動モードの同定をおこなった.

実験方法・結果

2層の垂直磁化膜(LL, UL), MgO膜, 2層の面内磁化膜からなるTMR膜を200 nm × 200 nmのピラー状に加工し, 素子(Fig. 1)を作製した. この素子を用い, マイクロ波磁界中におけるLL・ULの磁化反転を検証した. これらの層は, LLがULより高い磁気異方性を有するよう, 膜構造を制御してある. また, 面内磁化膜は, MR効果を用いて, LL・ULの反転を検出するために用いられる[6]. Fig. 2(a)に, LL・ULの磁化を下方方向に初期化し測定した, 素子抵抗の垂直磁界(H_z)依存性を示す. ここではマイクロ波磁界は印加されていない. 抵抗変化を通じて, 磁化反転を検出でき, 垂直磁気異方性の違いのため, ULの磁化反転のあと, LLの磁化反転がおこる. 強度250 Oe, 周波数(f_{RF})10, 20 GHz, のマイクロ波磁界を印加して同様の測定をおこなった[Fig. 2(b), (c)]. 10 GHzでは, マイクロ波磁界なしの場合と同様にULの反転が起こり, アシスト効果によりその反転磁界が低下した. 20 GHzでは, これまでとは異なり, はじめにLLが反転した. この結果は, マイクロ波磁界の周波数を制御することにより, 層を選択した磁化反転が可能であることを示している. Fig. 3(a)に, 反転する層とその反転磁界の f_{RF} 依存性を示す. f_{RF} によっては, UL・LLの反転が確率的にどちらもおこるが, ここでは, 反転が起こる回数が多い層についてプロットしてある. Fig. 3(b)に, 素子抵抗の高周波成分のスペクトルを示す. LLとULの結合モード(音響モードと光学モード)に対応する熱励起の磁化振動の信号が現れ, これらの信号が現れる条件とFig. 3(a)の磁化反転の条件は対応した. この対応によって, $f_{RF} < 13$ GHzにおける, ULのアシスト磁化反転は音響モードの励起が原因であり, $f_{RF} = 15 \sim 18$ GHzにおける, ULのアシスト磁化反転, および $f_{RF} = 18 \sim 22$ GHzにおけるLLのアシスト磁化反転は光学モードの励起が原因であることが明らかとなった.

参考文献

[1] C. Thirion, et al., Nature Mater. **2**, 524 (2003). [2] J.-G. Zhu, et al., IEEE Trans. Magn. **44**, 125 (2008). [3] S. Okamoto, et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 237209 (2012). [4] G. Winkler, et al., Appl. Phys. Lett. **94**, 232501 (2009). [5] S. Li, et al., J. Appl. Phys. **105**, 07B909 (2009). [6] H. Suto, et al., Appl. Phys. Express **8**, 023001 (2015).

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究開発推進事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によっておこなわれた.

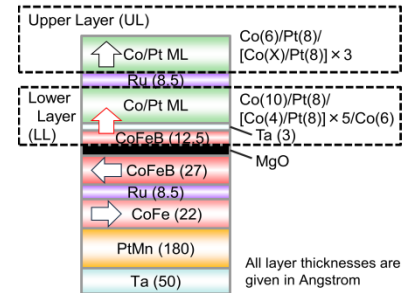


Fig. 1. Schematic configuration of sample

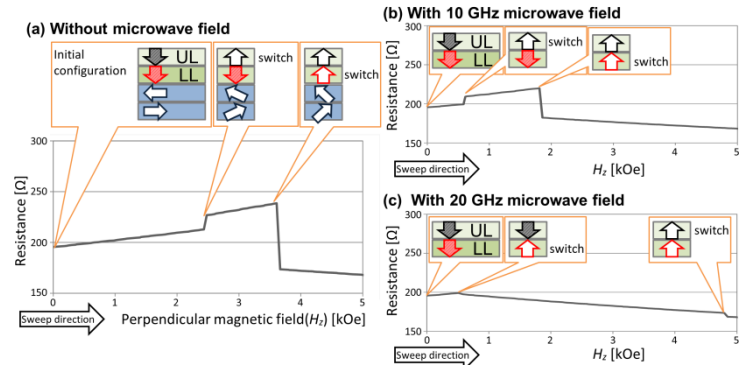


Fig. 2. H_z dependences of sample resistance (a) without microwave field, (b) with 10 GHz microwave field, and (c) with 20 GHz microwave field.

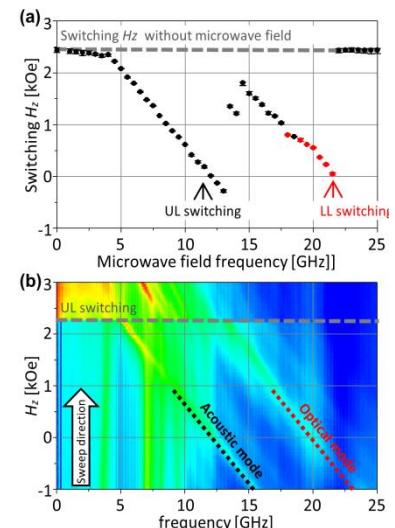


Fig. 3. (a) f_{RF} dependence of switching layer and switching fields. (b) Spectra of high frequency component of sample resistance.

垂直磁化 FePt | Ni₈₁Fe₁₉ ナノドットにおける 磁気渦ダイナミクスを介した磁化反転

関剛斎^{***}、周偉男^{*}、今村裕志^{***}、荒井礼子^{****}、高梨弘毅^{*}
(*東北大金研、**JST さきがけ、***産総研スピントロニクス、)

Vortex dynamics-mediated magnetization switching in perpendicularly magnetized FePt | Ni₈₁Fe₁₉ nanodots

T. Seki^{***}, W. Zhou^{*}, H. Imamura^{***}, H. Arai^{****} and K. Takanashi^{*}

(*IMR, Tohoku Univ., **JST-PRESTO, ***AIST)

はじめに

磁気記録の超高密度化のキーテクノロジーとして、静磁場以外の外部エネルギーを磁性体に加えることで反転磁場を低減するエネルギーアシスト磁化反転が注目を集めている。高周波磁場を利用するマイクロ波アシスト磁化反転は、磁化がエネルギー障壁を乗り越えて反転するための駆動力として磁化歳差運動を共鳴励起し、小さな静磁場で磁化反転を誘起する手法である¹⁻³⁾。この手法は、多値記録において選択的に反転磁場を低減できる利点がある一方、FePt 規則合金に代表される高磁気異方性材料ではサブ THz に達する高周波磁場を必要とする問題がある。我々はこれまで、面内磁化 FePt 層と Ni₈₁Fe₁₉ 層から成る交換結合膜において、Ni₈₁Fe₁₉ 層内にスピン波を励起することにより FePt 層の反転磁場を大幅に低減できることを報告してきた⁴⁾。このスピン波アシスト磁化反転では、スピン波共鳴の周波数が動作周波数を決めるため、高磁気異方性材料を用いた場合でも動作周波数の増大が原理的に生じない。これは交換結合膜を用いることの重要な利点である。本研究では、磁化配置をこれまでの面内磁化から応用に適用し易い垂直磁化配置へと変化させ、垂直磁化を有する FePt | Ni₈₁Fe₁₉ 交換結合膜のナノドットにおいて磁化ダイナミクスが反転磁場へ与える影響について調べ、交換結合膜におけるアシスト磁化反転の有用性を検討した。

実験および数値計算

MgO(001)単結晶基板の上に、Fe (1 nm) | Au (60 nm) | FePt (10 nm) | Ni₈₁Fe₁₉ (150 nm) | Au (5 nm) | Pt (3 nm)の積層構造を作製した。まず、超高真空対応マグネトロンスパッタリング装置を用いて Fe (100)面、Au (100)面および FePt (100)面をエピタキシャル成長させ、その後、イオンビームスパッタ装置を用いて Ni₈₁Fe₁₉ 層および Au | Pt キャップ層を成膜した。FePt 層の成膜温度は 550 °C とし、L1₀ 構造への規則化を促進した。電子線リソグラフィおよび Ar イオンミリングを用いて薄膜試料を直径 260 nm の円形ドットへと微細加工した。

垂直磁場下においてナノドットの磁化曲線を測定した結果、マイナーループに特徴的な挙動が観測された。FePt 層のスウィッチング磁場(H_{sw})以下では Ni₈₁Fe₁₉ 層の磁化反転は可逆的であり、FePt 層と Ni₈₁Fe₁₉ 層が界面で交換結合していることが確認された⁵⁾。実験で得られた磁化曲線とマイクロマグネティクスによる数値計算との比較したところ、FePt 層が垂直磁化を保持したまま、Ni₈₁Fe₁₉ 層内ではボルテックス磁気構造が形成されることが明らかとなった。また、垂直磁場を増大させるにつれて、ボルテックス磁気構造が界面付近に圧縮され、Ni₈₁Fe₁₉ 層内の磁化が垂直方向へと揃うことがわかった。

この垂直磁化 FePt | Ni₈₁Fe₁₉ ナノドットに対し、外部から高周波磁場(H_{rf})を印加して、FePt の H_{sw} を評価した。 $H_{rf} = 0$ Oe では $H_{sw} = 8.6$ kOe であったが、11 GHz の $H_{rf} = 200$ Oe を印加することにより 2.8 kOe まで H_{sw} が低減した。数値計算を用いて磁化反転時の詳細な磁気構造を調べたところ、Ni₈₁Fe₁₉ 層内のボルテックスの運動を介して FePt 層内に逆磁区が効果的に核生成され、その逆磁区が伝搬することによって磁化反転が進行していることが示された。

参考文献

- 1) J.-G. Zhu *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **44**, 125 (2008).
- 2) Y. Nozaki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 082505 (2009).
- 3) S. Okamoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 237209 (2012).
- 4) T. Seki *et al.*, *Nat. Commun.* **4**, 1726 (2013).
- 5) W. Zhou *et al.*, *J. Appl. Phys.* **117**, 013905 (2015).

サブナノ秒パルス磁場を用いた FMR 過渡領域における磁化反転過程に関する研究

岡野 元基、能崎 幸雄
(慶大理工)

The study of the transient region of ferromagnetic resonance by using sub-nanosecond pulsed fields

Genki Okano, Yukio Nozaki
(Keio Univ.)

はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転(MAMR)は、強磁性共鳴(FMR)を利用したエネルギーアシスト磁化反転の手法である。マイクロ波を印加し磁化の FMR を引き起こすことで、より小さな外部磁場での磁化反転が可能となる。これまで MAMR については様々な形状において、磁化反転磁場のマイクロ波周波数、強度依存性が調べられてきた。しかし、一般的な信号発生器が幅 10 ns 以下のマイクロ波を出力できないために、磁化反転ダイナミクスについての報告は少ない。以前我々はこの問題を解決するためにマイクロ波に加えて 2 ns 幅のパルス磁場を重畳印加し、マイクロ波とパルス磁場の協同効果で起こる磁化反転を観測することで、磁化反転ダイナミクスの性質について調べた[1]。今回は磁化緩和時間よりも短いパルス磁場 (サブナノ秒幅) を重畳印加する実験を行い、より詳しく磁化反転ダイナミクスについて調べた。

実験方法

測定に用いた NiFe 細線の寸法を Fig. 1 に示す。表面を熱酸化処理された Si 基板の上に、超高真空蒸着機を用いて厚さ 30 nm の NiFe 細線を作製した。その後、SiO₂ 絶縁層(70 nm)をスパッタ成膜した後、Au(100 nm)のコプレーナ線路(幅 : 2 μm)を作製した。コプレーナ線路にマイクロ波、パルス電流を流すことで NiFe 細線の幅方向にマイクロ波磁場とパルス磁場を印加した。磁化反転磁場は VNA-FMR 法を用いて NiFe 細線の FMR スペクトルを測定することにより求めた。そしてアシスト磁場として(a)マイクロ波のみ、(b)パルス磁場のみ、(c)マイクロ波+パルス磁場の重畳磁場を印加した場合での磁化反転磁場を測定した。

実験結果

ここでは、マイクロ波(周波数 5 GHz、強度 100 Oe、幅 25 ns)とパルス磁場(強度 320 Oe、幅 300 ps)を重畳印加した場合の結果を示す。マイクロ波の立ち上がりからパルス磁場の立ち上がりまでの遅れ時間を t_{delay} と定義し、磁化反転磁場の t_{delay} 依存性を Fig.2 にプロットした。ここで、青点線はパルス磁場のみ、赤線はマイクロ波のみを印加した場合の磁化反転磁場を表す。結果を見るとマイクロ波、パルス磁場のみを印加した場合よりも両者を重畳印加した場合の方が、磁化反転磁場が減少している。またマイクロ波が立ち上がる範囲

($t_{\text{delay}}=0\sim 5$ ns) においては、磁化反転磁場がマイクロ波強度の増加に伴って減少しており、どちらも $t_{\text{delay}}=5$ ns で飽和している。この結果から、磁化の歳差運動の振幅がマイクロ波の強度の増加から遅れずに応答していることがわかる。当日は、さらに詳しく磁化ダイナミクスについて調べた結果についても報告する。

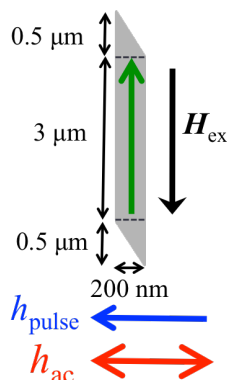


Fig. 1 Lateral size of NiFe wire

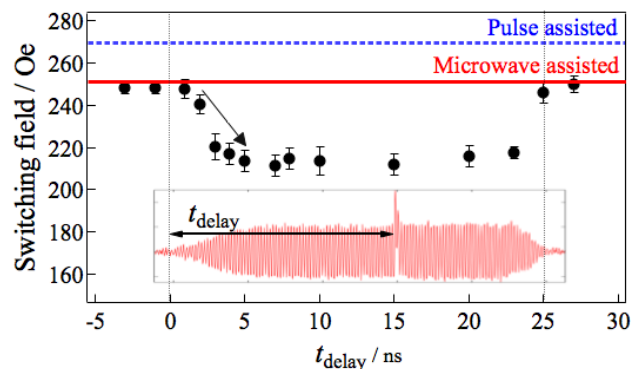


Fig. 2 Switching field under a simultaneous application of microwave and pulsed field

参考文献

[1] G. Okano, Y. Nozaki. Appl. Phys. Express. 8, 013001

Microwave assisted magnetization switching behaviors of the CoCrPt-oxide granular ECC medium

Yuming Lu, Satoshi Okamoto, Nobuaki Kikuchi, Osamu Kitakami

Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan

Microwave assisted magnetization switching (MAS) is one of the promising candidate technologies for future ultra-high density magnetic recording. Recently, our group gives an experimental verification of very large MAS effect on a perpendicular CoCrPt-oxide granular single layer¹⁾. But the layer structure is relatively simple comparing with that of a widely adopted perpendicular CoCrPt-oxide high-density recording medium which has an exchange-coupled (ECC) multilayered structure. From the view point of practical application, it is essentially important to carry out the MAS measurements on the ECC CoCrPt-oxide granular medium to verify the potential for the microwave assisted magnetic recording. In this work, we systematically investigate the MAS behaviors of the ECC CoCrPt-oxide granular medium and have clearly found a significant reduction in coercivity under the assistance of rf fields. The anomalous Hall resistance of the device does not change during the rf pulse injection, indicating that the Joule heating effect is negligibly small.

The ECC CoCrPt-oxide granular film was grown on Ru underlayer by HGST Company. The magnetic element layers and underlayers were patterned into a rectangular shape of $1 \times 3 \mu\text{m}^2$ and a cross shaped anomalous Hall effect (AHE) electrode, respectively, by using electron beam lithography and Ar ion etching. After covering the magnetic element with an insulating SiO_2 layer, an Au stripe line with $2 \mu\text{m}$ in width was fabricated just above the magnetic element. Flowing an rf current into the Au strip line generates a linearly polarized rf field of ~ 310 Oe. The rf current is chopped into a pulse train with the pulse width of $\tau_{\text{rf}} = 20$ ns $\sim 100 \mu\text{s}$.

Figure 1 shows the AHE curves under the assistance of rf field of $\tau_{\text{rf}} = 2 \mu\text{s}$ at various rf frequencies f_{rf} . The rf-field-free coercivity of ~ 5 kOe shifts to a smaller value with increasing the frequency f_{rf} until the coercivity reaches a minimum value of ~ 4.5 kOe at rf frequency ~ 14 GHz. Figure 2 shows the frequency dependent coercivity $H_{\text{c,rf}}$ for $\tau_{\text{rf}} = 20$ ns, $2 \mu\text{s}$, and $100 \mu\text{s}$. Contrary to our previous results which exhibit the very large τ_{rf} dependent $H_{\text{c,rf}}$ in CoCrPt-oxide granular single layer¹⁾, very small τ_{rf} dependent $H_{\text{c,rf}}$ is found in the ECC CoCrPt-oxide granular film, suggesting the small thermal agitation effect in the ECC CoCrPt-oxide granular film. Detailed discussion on the MAS effect in the ECC CoCrPt-oxide granular film needs a further elaborate evaluation of thermal agitation effects with and without the microwave assistance. We greatly acknowledge the sample provision from HGST Japan, Ltd.

Reference

- 1) S. Okamoto et al., Appl. Phys. Lett., 103, 202405 (2013).

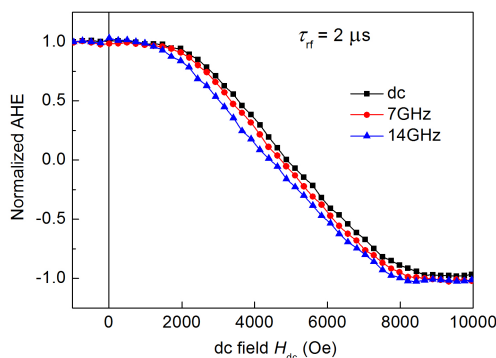


FIG. 1. AHE curves under pulsed rf fields with the pulse duration of $2 \mu\text{s}$ at various frequencies.

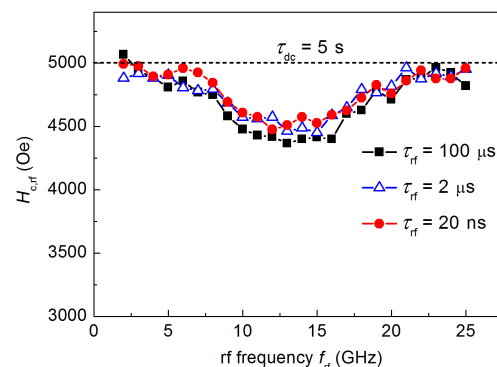


FIG. 2. Frequency f_{rf} dependence of coercivity $H_{\text{c,rf}}$ under different pulse duration conditions.

反強磁性結合を有するマイクロ波アシスト記録用 CoCrPt グラニューラ垂直磁気記録媒体の磁化反転機構

中山湧稀, 草薙勇作, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修
(東北大学)

Magnetization reversal of CoCrPt granular perpendicular media consisting of antiferromagnetically coupled grains for microwave assisted recording

Y. Nakayama, Y. Kusanagi, N. Kikuchi, S. Okamoto, T. Shimatsu, and O. Kitakami
(Tohoku University)

はじめに 将来の高密度記録に用いる記録再生方式として, 結晶粒内で磁化を反強磁性結合させることで双極子相互作用を低減可能な反強磁性結合型(AFC) 媒体に, マイクロ波アシスト効果を用いて記録し, 強磁性共鳴により再生する方法が検討されている^{1,2)}. これまでに我々は, CoCrPt-TiO₂ グラニューラ垂直記録媒体に Ru 中間層を用いて反強磁性結合を導入した AFC 媒体における, 磁化反転機構に関して研究を進めてきた³⁾. 本研究では, VSM, Kerr 効果, 異常ホール効果により磁化曲線を測定し, 磁化反転機構の議論を行うと共に, マイクロ波アシストが磁化機構に与える基礎検討を行った.

実験方法 CoCrPt-TiO₂ グラニューラ媒体は DC マグネトロンスパッタ法により, ガラス基板上的 Ru 下地膜の上に室温で形成した. 2つの CoCrPt-TiO₂ グラニューラ層には Ru 中間層を介して反強磁性結合を導入し, 反強磁性結合を強めるために, Ru 中間層の上下に Co 層を挿入した. マイクロ波アシスト効果の測定は, このサンプルを 3 μm × 1.6 μm の矩形状に微細加工して行った.

結果および考察 Fig.1, Fig.2 には磁性層の上下層膜厚が同じ AFC 構造(CoCrPt(4)/Co(0.7)/Ru(0.9)/Co(0.7)/CoCrPt(4), 単位 nm)について, VSM, および Kerr 効果により測定した磁化曲線をそれぞれ示す. 前者では, 残留磁化がほぼ 0 であり, AFC 構造が実現できている. しかし, Kerr 効果による測定では, 残留磁化が増加している. Kerr 効果による測定では原理的に表面に近い上層の信号が強く出たため, この結果は, 信号の弱い下層から優先的に反転する粒子が多いことを示唆している. この媒体に振幅 500 Oe, パルス幅 2 μsec, 周期 200 μsec のパルス高周波磁界を周波数 3 GHz~20 GHz まで 1 GHz ごとに印加しながら, 異常ホール効果を用いて磁化曲線を測定し, マイクロ波アシスト効果の測定を行った. その結果, 10 GHz において約 11 %の保磁力低減が確認された. この低減はマイクロ波アシストの効果と磁化の熱擾乱の影響が重畳されているため, 上下層の膜厚の異なる AFC 媒体の測定等を通して, 熱擾乱の影響を補正したマイクロ波アシスト効果について議論する.

参考文献

- 1) T. Yang T, H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima and R. Sato, *J. Appl. Phys.*, **114**, 213901 (2013).
- 2) H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima and R. Sato, *Nanotechnology*, **25**, 245501 (2014).
- 3) 中山湧稀, 堀田明良, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上修, 第 38 回日本磁気学会 学術講演会 3pE-2 (2014)

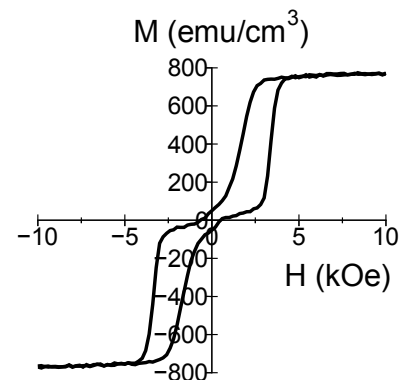


Fig.1 Magnetization curve for the AFC medium.

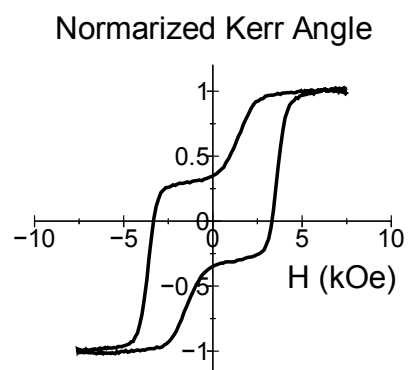


Fig.2 Kerr loop for the AFC medium.