

TbFe 垂直磁化膜をメモリー層とした磁気トンネル接合の 熱アシスト磁化反転

藤澤 佑樹[†] 吉川 大貴[†] 加藤 剛志[†] 岩田 聡[†] 綱島 滋[‡]

[†]名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

[‡]名古屋産業科学研究所研究部 〒464-0819 愛知県名古屋市千種区四谷通 1-13

E-mail: [†](y_fujisa, d_yoshikawa, takeshik, iwata)@nuee.nagoya-u.ac.jp.ac.jp, [‡]s.tsuna@amail.plala.or.jp

あらまし 大きな垂直磁気異方性を有し、低キュリー温度の TbFe をメモリー層とした [Co/Pd] / MgO / TbFe 垂直磁気トンネル接合を作成し、その磁気抵抗(MR)特性およびトンネル障壁へ電流パルスを印加することで発生するジュール熱による熱アシスト磁化反転を確認した。MgO 1.4 nm の磁気トンネル接合素子では低バイアス(40 mV)で MR 比 9 %, 面積抵抗 $342 \Omega\mu\text{m}^2$ 程度の値が得られた。また TbFe 層の室温での保磁力は 1.5 kOe 以上であるが、トンネル障壁にパルス幅 100 msec の電流パルス印加することで発生するジュール熱を利用し、100 Oe の磁界で磁化反転を観測した。

キーワード 熱アシスト磁化反転, MTJ, 希土類-遷移金属, TbFe

Thermally assisted switching on magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetized TbFe memory layer

Yuki Fujisawa[†] Daiki Yoshikawa[†] Takeshi Kato[†] Satoshi Iwata[†]

and Shigeru Tsunashima[‡]

[†]Graduated School of Engineering, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

[‡]Department of Research, Nagoya Industrial Science Research Institute 1-13 Yotsuyadori, Chikusa-ku, Nagoya, 464-0819 Japan

E-mail: [†](y_fujisa, d_yoshikawa, takeshik, iwata)@nuee.nagoya-u.ac.jp, [‡]s.tsuna@amail.plala.or.jp

Abstract Perpendicular magnetized [Co/Pd] / MgO / TbFe tunnel junctions whose memory layer, TbFe, exhibits large perpendicular anisotropy and low Curie temperature were fabricated, and their magneto resistance (MR) properties and thermally assisted magnetization switching utilizing Joule heat generated by a current pulse through the junction were confirmed. The [Co/Pd] / MgO / TbFe junction with a barrier thickness of 1.4 nm exhibited an areal resistance of $342 \Omega\mu\text{m}^2$ and an MR ratio of 9 % at a low bias voltage of 40 mV. The coercivity of TbFe memory layer was more than 1.5 kOe at room temperature, however the magnetization of the TbFe switched at an external field of 100 Oe when the current pulse with a pulse width 100 msec was applied through the junction, which results from Joule heat generated by the current pulse.

Keyword Thermally assisted switching, MTJ, RE-TM, TbFe

1. はじめ

現在、DRAM やフラッシュメモリなど多くのメモリが存在しているが、高密度、高速、不揮発でかつ無制限に書き換えができるメモリはまだ存在していない。磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)は、不揮発性・低消費電力・高速読み書き・無限書き換え耐性などユニバーサルメモリとしての優れた特長を持っており、現在大容量 MRAM の実現に向けて盛んに研究が行われている。

現在実用化されている MRAM では、一般にビット・ワード線に電流を流すことで発生する合成磁界を用いて記憶セルの磁化方向を反転する。しかし、高密度化のためにセルサイズを減少させていくと、(1) 反磁界が大きくなるため、スイッチング磁界が増大し、書き込み電流が著しく増し、消費電力が増大してしまう、(2) 磁性層の体積減少に伴う熱擾乱耐性の低下、といった問題が生じてくる。これらの問題を解決するためには、新しい書き込み方法が必要であり、その方

法の一つとして注目されているのが、熱アシスト記録である[1, 2]. 現在, MTJ素子に直接電流を流し, トンネル障壁部で発生するジュール熱を利用して書き込みを行う熱アシスト型 MRAM(TA-MRAM)が提案されている[3]. この熱アシスト型 MRAM では, 強磁性層/反強磁性交換結合膜をメモリー層として, 磁化固定層とのブロッキング温度の差を利用することで熱アシスト書き込みを実現している[4]. 我々は強磁性/反強磁性交換結合膜に比べ, 書き換え耐性が高く, 高密度化が可能と考えられる希土類-遷移金属(RE-TM)膜である TbFe をメモリー層とした熱アシスト型 MRAM を提案している[5]. TbFe は大きな垂直磁気異方性を有しているため室温において高い熱擾乱耐性がある一方, 低キュリー温度であるため, 高密度熱アシスト型 MRAM に適した材料であると考えられる.

過去に我々は, TbFe 単層膜を微細加工し狭窄構造を作製し, 狭窄部に電流を集中させることで発生するジュール熱を利用した熱アシスト磁化反転の観察を行ってきた[6-8].

図 1(a)は, 熱酸化膜付き Si 基板上の substrate / SiN(10 nm) / Tb₂₀Fe₈₀(80 nm) / SiN(10 nm)を電子ビーム(EB)リソグラフィを用いて 0.86 $\mu\text{m} \times 0.86 \mu\text{m}$ の狭窄部を作製し, 電流パルス印加前後の磁気力顕微鏡像を取得した結果である. 100 Oe の外部磁界を膜法線方向に印加した状態でパルス幅 10 nsec の電流パルスを送ることにより, 図 1(b)のように中心の狭窄部の磁化反転が確認されている. 図 1(c)より, 10 nsec と非常に短いパルス幅でも 2.0 $\text{mW}/\mu\text{m}^2$ という低い電力密度での書き込みが可能であることが確認できた[6-8]. TbFe 層を用いた Gbit 級 MRAM(素子サイズ, 100 nm \times 100 nm)を考えると, MTJ 障壁の破壊電圧 1 [V]の条件のもとで 2.0 $\text{mW}/\mu\text{m}^2$ というジュール熱を発生させるためには, 素子面積抵抗 RA は 500 $\Omega\mu\text{m}^2$ 以下と見積もられる.

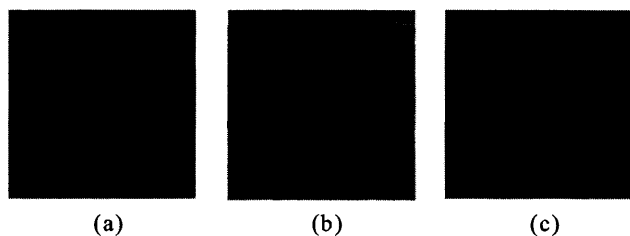


図 1 狭窄構造(0.86 $\mu\text{m} \times 0.86 \mu\text{m}$)に加工した Tb₂₀Fe₈₀(20 nm)単層膜の電流パルス印加後の磁気力顕微鏡像[6-8].

(a)飽和状態, (b) $P = 1.79 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, (c)2.0 $\text{mW}/\mu\text{m}^2$

図 2(a), (b)はそれぞれ過去に我々のグループで検討した [Co/Pd] / Al-O / TbFe 垂直磁化 MTJ 素子における熱アシスト磁化反転の結果である[5]. ここで実線, 破線はそれぞれ低バイアス(40 mV), 高バイアス(350 mV)印加時の測定結果である.

Al-O 層厚 1.6 nm の膜では面積抵抗(RA)値 1.18 $\text{M}\Omega\mu\text{m}^2$ という非常に大きな値であった. Al-O 層を 0.8 nm まで薄膜化することで RA=5.68 $\text{k}\Omega\mu\text{m}^2$ という値まで低抵抗化することができたが, 先ほど述べた熱アシスト磁化反転に必要な面積抵抗 500 $\Omega\mu\text{m}^2$ までには至っていない. そこで今回は低抵抗化が期待できる MgO 絶縁層を用いて MTJ を作製し熱アシスト磁化反転を試みる.

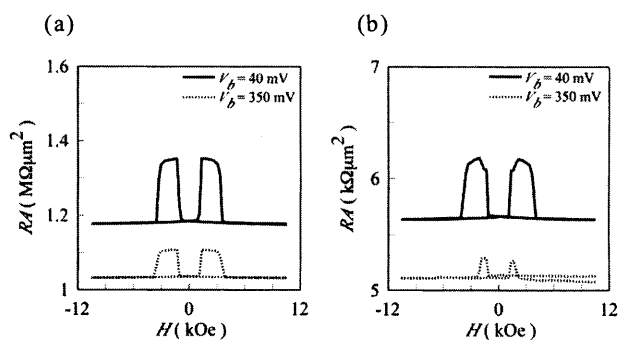


図 2 [Pd(1.6 nm) / Co(0.4 nm)] / Al-O / Tb₁₅Fe₈₅ における磁気抵抗(MR)特性. 実線は低バイアス(40 mV)印加時, 破線は高バイアス(350 mV)印加時

(a)Al-O 1.6 nm, (b) Al-O 0.8 nm

2. 実験方法

熱酸化膜付き Si 基板上に substrate / Ta(10 nm) / [Pd(1.0 nm) / Co(0.5 nm)]₇ / (Co₅₀Fe₅₀)₈₀B₂₀(1.2 nm) / MgO(1.6 ~ 1.2 nm) / Co₅₀Fe₅₀(1 nm) / Tb₂₀Fe₈₀(20 nm) / Ta(5 nm)を成膜した. MgO 層および Co₅₀Fe₅₀層は MBE 装置を用い, その他の層は超高真空スパッタ装置を用いて成膜した. 素子の微細加工には, フォトリソグラフィ, EB リソグラフィ, ECR プラズマエッチングを用い, 接合面積が 7 $\mu\text{m} \times 7 \mu\text{m} \sim 500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ の MTJ 素子を作製した. 磁気抵抗(MR)特性は直流 4 端子法により評価した. 熱アシスト磁化反転は適当な磁界を膜法線方向に印加した状態で, パルス幅 100 msec のパルス電流を流し, その後 1 mA の読み出し電流で接合抵抗を測定することで磁化状態を確認した. 未加工膜の磁気特性は, 交番磁界勾配型磁力計(AGM)により, 磁気光学(Kerr)効果は偏光面変調法によりそれぞれ測定した.

3. 実験結果および考察

3.1. 垂直磁化 MTJ 素子の作製

TbFe を用いた垂直磁化 MTJ の MR 特性を調べるために、Si 基板上に substrate / Ta(10 nm) / [Pd(1.0 nm) / Co(0.5 nm)]₇ / (Co₅₀Fe₅₀)₈₀B₂₀(1.2 nm) / MgO(1.6 nm) / Co₅₀Fe₅₀(1 nm) / Tb₂₀Fe₈₀(20 nm) / Ta(5 nm) を成膜した。膜構成を図 3 に示す。

下部磁性層には、酸化に強く、高い垂直磁気異方性、高いキュリー温度を兼ね備えた Co/Pd 多層膜を用いた。[Co/Pd] / MgO / TbFe 膜の磁化曲線を図 4 に示す。

低磁界(500 Oe)および高磁界(4 kOe)側での磁化変化は、それぞれ Co/Pd 層および TbFe 層の磁化反転に対応している。

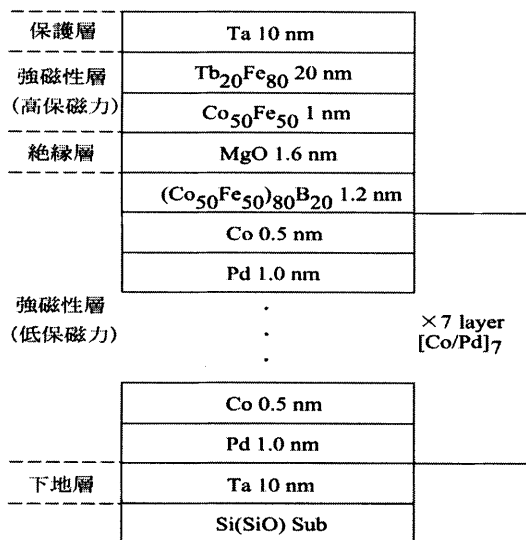


図 3 Co/Pd, および TbFe 層を用いた垂直磁化 MTJ の膜構成

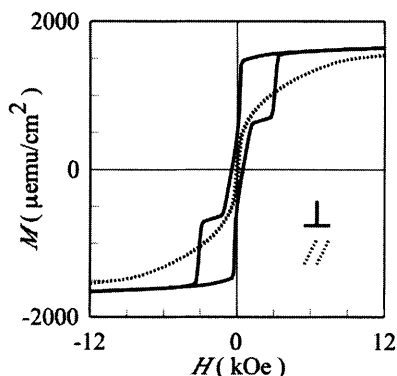


図 4 [Pd(1.0 nm) / Co(0.5 nm)]₇ / MgO(1.6 nm) / Tb₂₀Fe₈₀(20 nm) 膜の磁化曲線。実線および破線は、それぞれ磁界を膜法線方向および面内方向に印加した結果である。

次にこの膜の Kerr ループを測定し、TbFe 層の保磁力と Kerr 回転角の温度依存性を調べた(図 5)。測定は膜面側から行なっており、このため Kerr 回転角 θ_k は主に上層の TbFe 層から生じている。図 5 から温度の上昇に伴い TbFe 層の θ_k , 保磁力 H_c の減少が確認できる。また TbFe 層のキュリー点はおおよそ 130°C であることがわかった。

この膜を微細加工し、接合面積 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ の素子を作製し、MR 特性を測定した。その結果を図 6 に示す。実線と破線は、それぞれバイアス電圧 40 mV, 500 mV で測定した MR 特性である。

図 6 より、低バイアス電圧印加時に 16% 程度の MR 比を得ることができた。この値は一般的な CoFeB / MgO / CoFe 構成の MTJ に比べ小さいが、これは MgO 層蒸着時に熱処理を加えていないため CoFeB 層が結晶化されずアモルファス状態のままであるからだと考えられる。また面積抵抗値は $703 \Omega\mu\text{m}^2$ であった。この値は図 2 に示した Al-O 層厚 1.6 nm の素子に比べ、3 桁以上低い値であり、この結果から MgO は低抵抗化に適した材料であることがわかった。しかし目標とする面積抵抗値 $500 \Omega\mu\text{m}^2$ には至っていない。

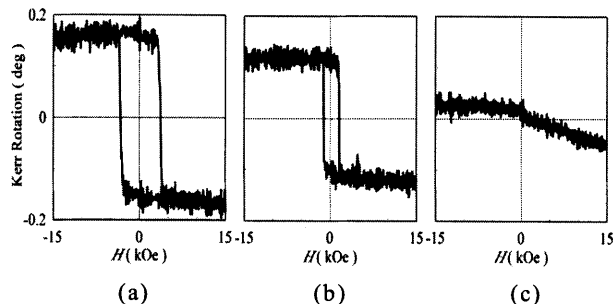


図 5 TbFe 膜の保磁力と Kerr 回転角の温度依存性 (a)24°C, (b)80°C, (c)139°C

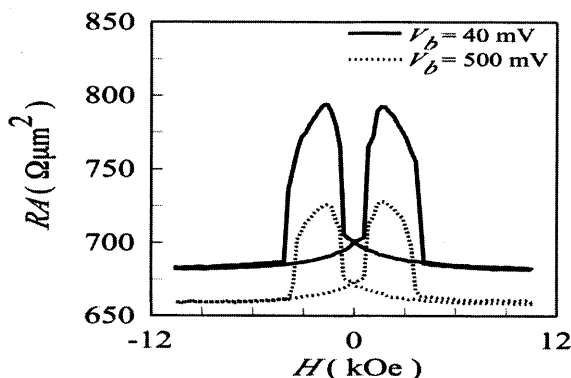


図 6 [Co/Pd]₇ / MgO(1.6 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ 膜の磁気抵抗(MR)曲線。なお、磁界は膜法線方向へ印加。

3.2. MTJの低抵抗化

絶縁破壊電圧(1 V)以内、かつ低磁界での熱アシスト磁化反転を確認するためには、接合の更なる低抵抗化が必要と考えられる。そこで、より MgO 層厚の薄い substrate / Ta(10 nm) / [Pd(1.0 nm) / Co(0.5 nm)]₇ / (Co₅₀Fe₅₀)₈₀B₂₀(1.2 nm) / MgO(1.4 nm) / Co₅₀Fe₅₀(1 nm) / Tb₂₀Fe₈₀(20 nm) / Ta(5 nm)を成膜した。この膜を 2.4 μm × 2.4 μm の素子に微細加工を行い、MR 特性(図 7)を測定した。図 6 の膜に比べて低バイアス電圧印加時の TbFe 側の保磁力が低減しているがこれは TbFe の組成のずれによるものである。低バイアス電圧 40 mV での MR 比は 9 %程度と減少しているものの、面積抵抗値は 343 Ωμm²と目標値を下回る値が得られた。次に、この素子について熱アシスト磁化反転を調べた結果を述べる。

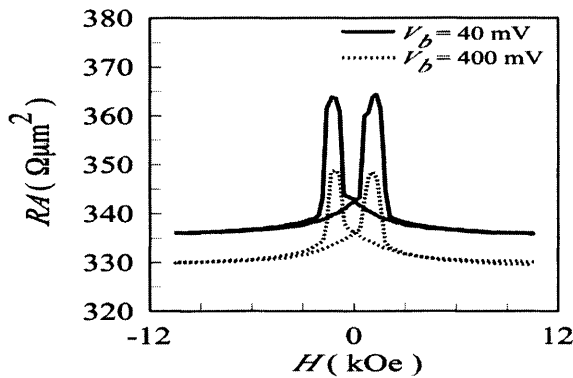


図 7 [Co/Pd]₇ / MgO(1.4 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ 膜の磁気抵抗(MR)曲線。なお、磁界は膜法線方向へ印加。

3.3. 熱アシスト磁化反転の観察

3.2 節で述べた素子について熱アシスト磁化反転を確認するため、様々な外部磁界 H_{ext} を印加した状態で電流パルス印加後の素子抵抗(I - R 特性)を測定した。図 8 は、 H_{ext} = (a)1.30 kOe, (b)0.91 kOe, (c)0.50 kOe, (d)0.10 kOe での I - R 特性を示している。なお、初期状態として Co/Pd 層の磁化は H_{ext} に平行に、TbFe 層は H_{ext} と反平行になるように設定した。

図 8(a)のように、ある臨界値まではパルス電流を流しても、素子は反平行(AP)状態を維持し高抵抗であるが、約 7 mA 以上のパルス電流で磁化反転を示す抵抗の減少が見られ、約 11 mA において、素子は平行(P)状態に遷移していることがわかる。つまり、パルス電流を流すことで MTJ 素子にジュール熱が発生し、TbFe 層の保磁力より小さな H_{ext} で磁化反転が起きている。外部磁界を小さくしていくと、図 8(b)~(d)に示すように、反転に必要な電流が大きくなった。

反転電流を磁化状態が P から AP へ変化する中間の電流値と定義し、この電流から反転に必要な電力密度の外部磁界依存性を見積もった結果を図 9 に示す。

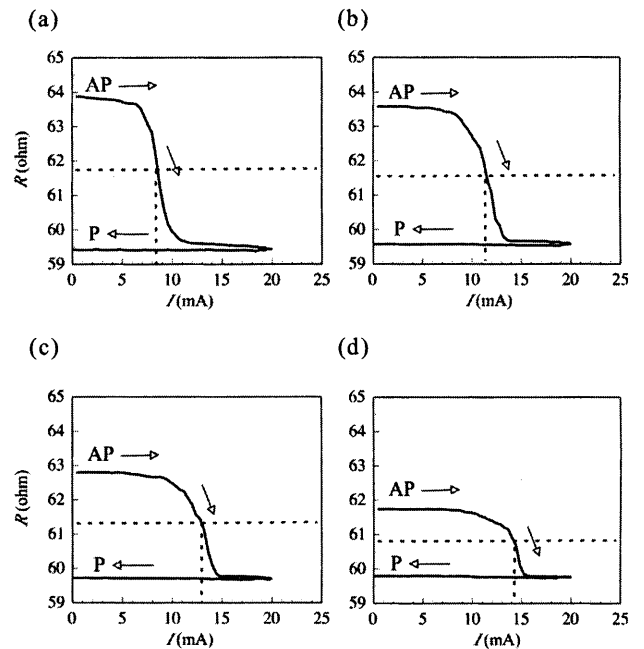


図 8 [Co/Pd]₇ / MgO(1.4 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ 膜の素子抵抗の印加パルス電流依存性(I - R 特性)。磁界は膜法線方向に印加し、それぞれ (a) H_{ext} = 1.30 kOe, (b) H_{ext} = 0.91 kOe, (c) H_{ext} = 0.50 kOe, (d) H_{ext} = 0.10 kOe, とした。

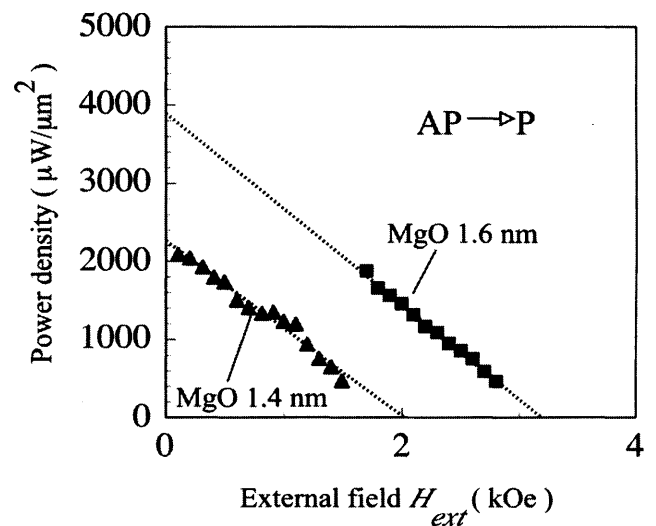


図 9 [Co/Pd]₇ / MgO(1.6 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ 膜の MTJ 素子(四角形)、および [Pd/Co]₇ / MgO(1.4 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ 膜の MTJ 素子(三角形)の磁化反転に必要な電力密度の外部磁界依存性。

図中にはMgO 1.6 nm, および1.4 nmの素子における外部磁界依存性を示す。外部磁界 H_{ext} 減少に伴い反転に必要な電力は単調増加し, 100 Oe程度の低磁界においてもおよそ $2000 \mu\text{W}/\mu\text{m}^2$ で磁化反転が可能であることが確認できた。なお, 図6に示すようにMgO 1.6 nmの素子は, TbFeの保磁力がMgO 1.4 nmのものより高いため, 磁化反転に必要な電力密度がMgO 1.4 nmのものより高い値となった。しかし直線の傾きはほぼ等しく, TbFeの保磁力が等しい場合, 磁化反転に必要な電力密度は等しくなると予想できる。(なお, 同じ電力密度を発生するために素子に付加される電圧はMgO 1.6 nmの方が大きい。) 以上より, TbFe層を用いた熱アシスト型MTJ素子では, 低い電力での磁化反転が可能であるということが確認できたが, さらに低い電圧での熱アシスト磁化反転を観測するためには, MTJ素子のさらなる低抵抗化を進める必要がある。

3.4. 微小素子における熱アシスト磁化反転

3.2, 3.3節では, $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ に加工したMTJ素子において熱アシスト磁化反転を確認したが, 高密度化のためには素子サイズのさらなる微細化が必要である。そこで, フォトリソグラフィとEBリソグラフィを用いて $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ の微小素子を作製した。使用した膜は, substrate / Ta(10 nm) / [Pd(1.0 nm) / Co(0.4 nm)]₆ / (Co₅₀Fe₅₀)₈₀B₂₀(1.2 nm) / MgO(1.2 nm) / Co₅₀Fe₅₀(1 nm) / Tb₂₀Fe₈₀(20 nm) / Ta(5 nm)の膜構成である。

微細加工した後のMR特性を図10に示す。低バイアス(40 mV)時に2%のMR比を示し, 面積抵抗値は $56.8 \Omega\mu\text{m}^2$ という非常に低い値を示した。

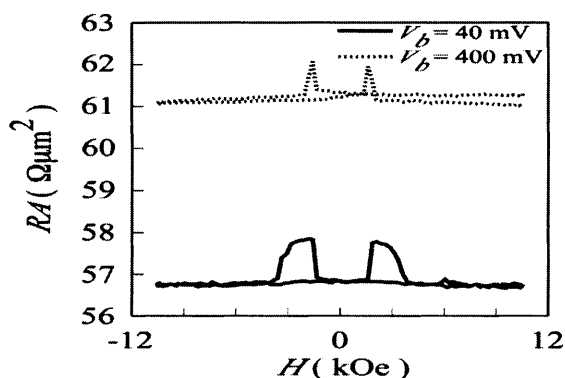


図10 接合サイズ $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ に微細加工した [Co/Pd]₆ / MgO(1.2 nm) / Tb₂₀Fe₈₀ 膜の磁気抵抗 (MR) 曲線。なお, 磁界は膜法線方向へ印加。

また高バイアス(400 mV)印加時に TbFe 側の保磁力が大幅に減少していることが確認できる。これは, バイアス電圧を大きくしたことで接合にジュール熱が発生し, TbFe層の異方性が減少し, 40 mVに比べ低磁界で TbFe層が磁化反転していることを示している。

今後, I - R 測定および反転に必要な電力密度の外部磁界依存性を調べる。

4. まとめ

[Co/Pd] / MgO / TbFeの膜構成で垂直磁化MTJを作製し磁気特性を測定した結果, MgOは低抵抗化に適した材料であることがわかった。また作製した膜で外部磁場をかけながら I - R 特性を測定したところ二つの磁性層の磁化が平行状態から反平行状態へ遷移したことを示す抵抗の減少が見られた。その反転電流から電力密度を見積もるとおよそ $2000 \mu\text{W}/\mu\text{m}^2$ の電力密度を与えることで低磁場でも磁化反転が可能であることが確認できた。

今後はさらなる低抵抗化を進めるために下部磁性層の検討, 微小素子における熱アシスト磁化反転を観測するために加工プロセスの安定化, MgO層を熱処理することによる高MR比の実現などを行なう必要がある。

謝 辞

本実験を進めるにあたりご協力頂いた名古屋大学熊澤正幸氏に感謝いたします。なお, 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)22560315)の助成のもと行われた。

文 献

- [1] R. S. Beech, J. A. Anderson, A. V. Pohm, and J. M. Daughton : J. Appl. Phys., **87**, 6403 (2000)
- [2] J. M. Daughton and A. V. Pohm : J. Appl. Phys., **93**, 7304 (2003)
- [3] Jianguo Wang and P. P. Freitas : Appl. Phys. Lett., **84**, 945 (2003)
- [4] I. L. Preibeanu et al., J. Phys.: Cond. Mat., **19**, 165218 (2007)
- [5] K. Noda, T. Kato, S. Iwata, "Thermally Assisted Switching on Magnetic Tunnel Junctions with Rare Earth-Transition Metal alloys," International Conference of Asian Union of Magnetics Societies 2010, no.CP01, pp.64, Jeju Island, Korean, Dec.2010.
- [6] L. You, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata : Jpn. J. Appl. Phys., **46**, 1003 (2007)
- [7] L. You, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata : Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 146 (2008)
- [8] L. You, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata : J. Magn. Magn. Mater., **321**, 1015 (2009)