

1. 研究の目的

磁石、つまり強磁性体において、磁化というベクトル量は最も代表的な物理量の一つである。磁気デバイスでは、磁化の大きさではなく"向き"を利用して情報を蓄積する。通常、磁化は磁化が安定しやすい向き、即ち磁化容易軸に沿った方角を向く。その向きは外部磁界やスピン偏極電流により反転させることができる。本研究では、磁化を制御する手法としては今まであまり用いられてこなかった"電界"という新しい自由度を用いて、室温においてほぼ無電流で磁化を反転させること(電界誘起磁化反転)が将来の最終目的である。半導体デバイスでは、電界は半導体メモリや演算装置に用いられているトランジスタのスイッチング動作に用いられ、半導体産業に極めて重要な貢献を果たしてきた。従って、電界誘起磁化反転が実現できれば、磁化の向きを制御するための新しい概念を実証できるという磁性の歴史上の意義だけでなく、半導体デバイスとコンパクトな電圧書き込み型の(電流駆動ではない極めて低消費電力な)不揮発性磁気メモリへの応用も期待できる。大容量の情報をコンパクトに蓄積するためには、一つの情報を記録する素子のサイズをどんどん小さくしていかなければならない。このような場合、磁界を用いた磁化スイッチングは非常に効率が悪く、電流を用いる手法も依然として高い電流密度を必要とする。このため、電界による磁化スイッチングはこのような弱点を補う手法として、今後その価値を高めると考えられる。

電界により磁化のスイッチングを引き起こすには、強磁性体の磁氣的性質(主に磁気異方性)を電界制御する必要がある。本研究ではゲート金属/高誘電率絶縁膜/強磁性金属超薄膜のキャパシタンス接合を用い、強磁性体表面に電界を印加する。界面における電子濃度の変化量が磁氣的性質の制御量を決めるため、高品質(高誘電率・高絶縁耐性)な絶縁膜を用いること、極薄の強磁性薄膜を用いること、がポイントとなる。また、絶縁膜/強磁性薄膜界面の品質が電子濃度の制御量とも関わってくるため、原子層堆積(Atomic layer deposition: ALD)装置を用いて真空中で連続的にこれら薄膜の製膜を行うことにも挑戦する。両者材料の組み合わせにより界面にはいくつものバリエーションがあり、その中から最適な界面構造材料を得ることも一つの目的となる。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

2-1. Co 超薄膜における磁性の電界制御

コバルト(以下 Co)の超薄膜に電界を印加することで、その反転磁界(保磁力)・強磁性転移温度を制御することに成功した。用いた膜は 0.4 nm の膜厚の Co の超薄膜であり、~1 nm の Pt と 3 nm の Ta 下地層の上にスパッタ成膜した。基板は半絶縁 GaAs である。Co の酸化を防止するため、2.0 nm の MgO 層でキャップをした。試料の磁化特性は異常ホール効果を用いた輸送測定により評価した。デバイスは以下のように作製した。まず、試料をホールプローブを持つ幅 20 mm のワイヤー状メサに加工し、次いで 50 nm の HfO₂ 絶縁膜を ALD を用いて堆積し、ワイヤーをカバーした。最後にゲート電極をワイヤー直上に形成した。ワイヤー両端のソース・ドレイン電極間に dc 電流を印加し、ソース・ゲート電極間にゲート電圧を印加し、ホール測定を行った。磁場は試料膜面垂直方向に印加した。測定の結果、Pt 膜厚が 1.04 nm、1.10 nm の試料では、室温付近の一定温度(286.8 K 及び 310.0 K)でゲート電圧(±10 V)に応じて保磁力が 50%以上変化することが分かった。やや温度を上げると(304.5 K 及び 321 K)、今度は強磁性を示すカーブ(+10 V)と常磁性を示すカーブ(-10 V)がゲート電圧によって明瞭に制御できることが分かった。この結果は、室温付近で、磁石⇄非磁石のスイッチングが行えることを示している。このように、強磁性金属の強磁性転移温度を外部電界で制御した例は世界で初めてであり、画期的な結果であると言える。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

2-2. ALD による強磁性遷移金属薄膜と絶縁膜の積層構造の作製

Atomic Layer Deposition(ALD)法は、基板に二つの気化した化学物質を交互に供給することによって、基板表面で起こる化学反応を利用して原子層一層ずつ成長を行う薄膜作製方法である。Al₂O₃や HfO₂のような High-k 絶縁膜の作製手段として広く用いられるようになってきている。しかし、金属磁性薄膜を作製した例はまだほとんど報告されていない。金属磁性薄膜と High-k 絶縁膜の積層構造を真空中で連続的に成膜することは、高品質な絶縁膜/強磁性薄膜界面を実現する上で有利である。そこで、ALD 法を用いて Ni 薄膜と HfO₂の積層構造の作製を試みた。

Si 基板上に ALD チャンバー内で Ni/HfO₂ 薄膜の成膜を行った。成膜方法は以下のとおりである。まず、真空中で一定時間 Ni 前駆体[(C₃H₇C₅H₄)₂Ni]を試料に供給した後、余剰ガスを窒素で排気した。次に、水素ガスを供給することによって還元反応を起こし、この際に生ずる反応残存物を窒素ガスで排気した。上記を 300 サイクル行うことにより Ni 薄膜を成膜した。成膜は 350°C で行った。最後に真空中で連続に HfO₂ 層を ALD 成膜した。表面の評価には AFM、磁気特性評価には SQUID 磁化測定装置を用いた。室温において、強磁性的なヒステリシスを有することが磁化測定から明らかになった。これより、室温で強磁性を示す Ni 薄膜が作製できていることが確認された。また、High-k 絶縁膜との真空中での連続製膜が可能であることが分かった。また、原子間力顕微鏡を用いて表面評価を行った結果、平均表面粗さが 1nm 程度あり島状に Ni が成長していることが分かった。

3. 研究の結論、今後の課題

3-1. Co 超薄膜における磁性の電界制御

Co 超薄膜において、室温付近で強磁性相転移の電界制御に成功した。今後はその起源を明らかにすることが課題である。現段階では、Co 表面での電子濃度が増加すると強磁性転移温度が上昇することが分かっている。これはバルクの Co における第一原理計算から予想される方向と逆である。Co と Pt の合金化や、膜の二次元性が計算に考慮されていない点であり、これらを詳しく調べて行く必要がある。また、Co だけでなく、Fe や Ni、またそれらの合金など様々な材料での動作の実証、最適材料の検証などを行っていききたい。

2-2. ALD による強磁性遷移金属薄膜と絶縁膜の積層構造の作製

Si 基板上に Ni/HfO₂ の積層構造の作製に成功したが、その成長は島状であった。ALD 法を用いて、平坦な膜を得るためには遷移強磁性金属と基板の間の格子ミスフィットを減らす必要がある。その打開策として、基板の選択、基板と強磁性金属の間にバッファ層を挿入するなどの必要がある。また、その他の遷移強磁性金属(Fe, Co やこれらの合金)の成膜を試みることも今後の課題である。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

4. 1. 社会的価値

昨今の電力事情を考慮すると、低消費電力でデバイスを動作させることは今後の社会にとって大きな課題である。本研究により、電流を用いずに電氣的に磁石の性質を制御できることが示され、今後、極めて消費電力の低い磁気デバイス、さらには待機電力ゼロデバイスへの大きな波及効果が期待できる。また、コバルトといった代表的な遷移金属強磁性体での動作を示せたことから、今後は鉄などより安価で手に入りやすい材料を用いて動作を行える指針が得られた。低コスト・低消費電力のデバイス実現への道が開けたものとする。

4. 2. 学術的価値

強磁性金属において強磁性相転移を外部電界で制御した例はこれまでになく、学術的に大きな意味がある。電子濃度と強磁性の関係を電界というツールを用いて迫ることができ、材料科学の観点から大きな進展であると考えている。また、室温で制御が可能であるという点で、応用上も大きな意義があると期待できる。また、電界で強磁性を制御できるということは、磁力をオンオフ出来るということであり、電流を用いずに超低消費電力で電磁石的な動作を行わせるなど、今後新たな展開が期待できる。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

1. D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi, and T. Ono, "Electrical control of ferromagnetic phase transition in cobalt at room temperature" 投稿中
(他、国際会議招待講演 2 件、国内学会講演 2 件)