

氏名	三輪真嗣
所属機関	東京大学物性研究所
研究題目	界面磁性の電界変調に関する研究

### 1. 研究の目的

IT機器の低消費電力化は地球環境を維持する上で重要な課題である。これを実現する技術のひとつが不揮発性メモリであり、磁石の磁極(N極とS極)を利用する不揮発性メモリの開発が重要である。現状はメモリへの電流通電により情報を書き込む(N極とS極の反転)必要があり、半導体メモリと比べて書き込み時の消費電力が大きい。そこで本研究では書き込み時の消費電力を1/10~1/100にするため、瞬時の電圧による磁極反転を利用したメモリ駆動技術に応用するための材料研究を行う。具体的には原子層成長技術を用いた界面材料エンジニアリングにより新物質・材料を創成し、金属/絶縁体界面における電界誘起多極子を利用して磁気異方性を高効率制御し、現状比10倍超の電圧磁気効果を示す材料創成を目指す。応募者がこれまでの研究で得た独自知見である電圧磁気効果の新原理を使い、界面規則合金の化学秩序制御による材料設計を用いてこれを実現する点が本研究の特徴である。

具体的には強磁性金属である鉄・コバルト・ニッケルの組成を様々な比率で変更した合金を用意し、この電圧磁気効果を評価する。それにより原子軌道の価数と電圧磁気効果の関係が明確となる。さらにこれらの合金にスピントラッキング相互作用が大きいことで知られる貴金属を組み合わせた合金を作製し、電圧磁気効果の増強を目指す。

### 2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

研究手法として、我々がこれまでに培ってきた「超高真空を利用した原子層成長法」を用いた。具体的にはバナジウム、鉄、酸化マグネシウム、コバルト、ニッケル、パラジウム、金を用いて高品質な金属/絶縁体ヘテロエピタキシャル成長多層膜を作製し、これをデバイスに加工して電圧磁気効果を評価した。

具体的には、まず単結晶酸化マグネシウムの(001)方位基板の上に基板上の不純物の拡散を防止するための酸化マグネシウムを5ナノメートル積層した。次に良質な強磁性体薄膜を用意するための下地層としてバナジウム(V)を20ナノメートル積層し、500°Cで加熱処理をした。そして本研究の要である強磁性層である鉄(Fe)・コバルト(Co)・ニッケル(Ni)・パラジウム(Pd)を様々な組成で変化させた合金を積み、最後に誘電体層の酸化マグネシウムと金属層を用意した(図1)。

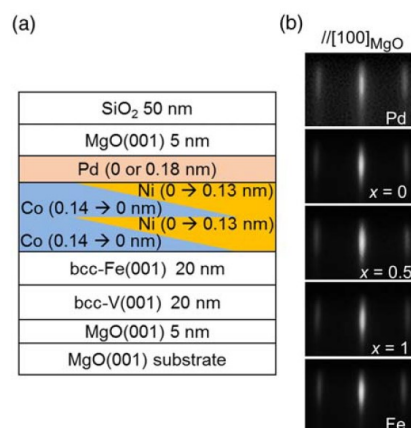


図1(a) 多層膜の構造。(b) 多層膜の電子線解析像。

x=0, 0.5, 1 はそれぞれ Co 100%, Co 50% + Ni 50%, Ni 100%を示す。

## 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)

次にこの多層膜を電子線や紫外線を用いたリソグラフィー法で加工し、デバイスにした(図2)。詳細は割愛するがこのミクロンサイズのデバイスにマイクロ波と呼ばれるギガヘルツ帯域の電流/電圧を流し、スピン波と呼ばれる磁気モーメントの波を励起することで電圧磁気効果を評価した。

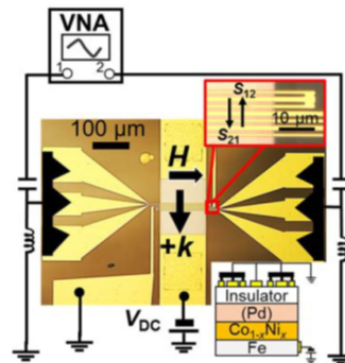


図2 デバイスの光学顕微鏡写真

最後に電圧磁気効果の測定結果を説明する。電圧磁気効果としては電圧による磁気異方性の変化とジャロシンスキー守屋相互作用の変化の2種類を評価した。図3(a)は磁気異方性変化の結果である。Fe・Co・Niは元素の周期表において3d遷移金属と呼ばれる強磁性金属であり、それぞれ3d軌道の電子数がひとつずつ異なる。従ってFe・Co・Niと材料を少しずつ変えていくことにより電圧磁気効果に対する原子軌道の電子数の影響がわかる。結果としてCo 100%の時に電圧磁気効果が最大となり、貴金属のPtやIrを使った時と同等の大きさの電圧磁気効果を得ること成功した。次にこれらの系に対してPdを挿入した影響を精査した。結果としてPdは4d遷移金属と呼ばれるスピン軌道相互作用が比較的大きな材料であるにも関わらず、Co 100%の結果を上回ることはなかった。電圧によるジャロシンスキー守屋相互作用の変化においても同様の結果を得た。

図には示していないがこれらの合金を加熱処理し、原子の配列を変更した実験も行った。しかし、結果として加熱処理をしない状態での多層膜の電圧磁気効果が最も大きいという結論を得た。従って大きな電圧磁気効果を出すにはCoの原子軌道を最大限活用することが重要であることがわかった。

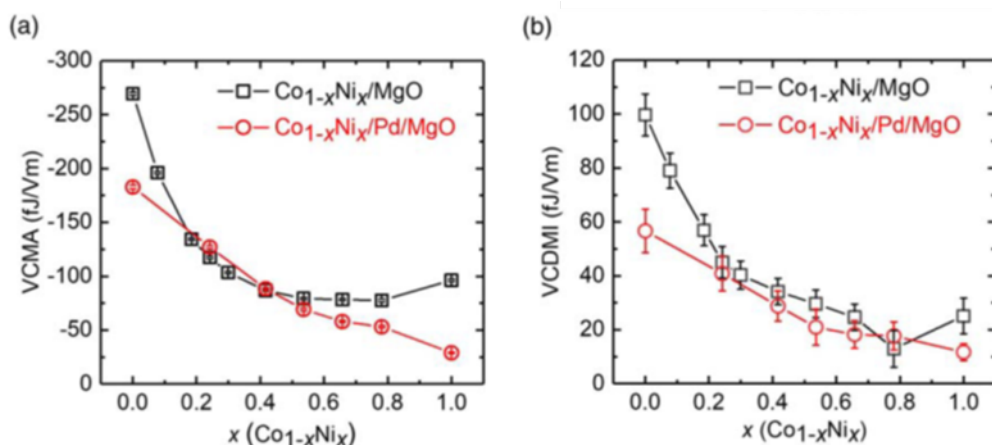


図3 電圧磁気効果の測定結果

(VCMA(Voltage Controlled Magnetic Anisotropy)は電圧による磁気異方性異方性の変化、VCDMI(Voltage Controlled Dzyaloshinskii-Moriya Interaction)は電圧によるジャロシンスキー守屋相互作用の変化利用を示す)。

### 3. 研究の結論、今後の課題

本研究では様々な元素、そして合金における元素の並び方が電圧磁気効果に及ぼす影響を精査した。具体的には鉄・コバルト・ニッケル・パラジウムの超薄膜磁性合金を作製し、酸化マグネシウムを誘電層として電界を印加した。電圧磁気効果としては磁性金属界面における磁気異方性とジャロシンスキー守屋相互作用の変化量を定量的に評価した。

結果として 3d 遷移金属と呼ばれる磁性金属の中ではコバルト単体の電気磁気効果が非常に大きいことを見出した。そしてパラジウムなどの貴金属の合金、そして熱処理依存性を精査した結果、電圧磁気効果に最適な原子配列を明確にした。特に本研究ではコバルト単体において 300 fJ/Vm に近い電圧磁気効果を得た点が最大の成果である。(2019年6月 Japanese Journal of Applied Physics 誌に発表)

今後の課題としては実用材料の開発が重要となる。具体的には貴金属フリーの材料開発が重要である。この点では本研究においてコバルトの重要性を確認できたことは非常に大きな意味を持つ。一方で実用材料としては単に大きな電圧磁気効果を示すだけでなく、熱耐性があり大きな磁気抵抗効果を示す材料開発が重要となる。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

IT機器の低消費電力化は社会生活を豊かにしつつ地球環境を維持する上で極めて重要な課題である。エレクトロニクス分野でこれを実現するキーテクノロジーのひとつが情報維持に電力を必要としない不揮発性メモリである。スピントロニクス分野では、磁石の磁極(N極とS極)が有する不揮発性を利用したメモリであるMRAMの開発が進められており、大容量性・高速性・高い耐繰り返し動作性を満たし得る唯一の不揮発性メモリとして期待されている。書き込み時の消費電力を現状の電流駆動型と比べて1/10~1/100にするために電圧駆動が注目されている。本研究による材料開発により電圧磁気効果の大幅な増強が可能となり、発熱を極力抑えられる電圧駆動型超省エネ不揮発性メモリの実現が期待される。

##### 4. 2. 学術的価値

放射光X線を用いると物質の内部情報を得ることができる。従来の電圧磁気効果の研究は効果の大きさ等の議論に留まり、物質内部の情報から電圧磁気効果を考察した研究は皆無であった。申請者は放射光X線を用いて初めて電圧磁気効果の機構解明を行い、巨大電圧磁気効果を実現するための材料設計指針を得た。本研究はこの知見の実証研究という意味で重要な技術的意義を持つ。また申請者が得た材料設計指針は、電子軌道の隠れた秩序である多極子を電界により誘起するものである。この電界誘起多極子は新たな基礎物性科学の方向性を切り開くものであり、このような観点からも本研究で得られた成果は材料物性研究において学術的な波及効果を有する。

##### 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下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

J. Suwardy, M. Goto, Y. Suzuki, and S. Miwa

“Voltage-controlled magnetic anisotropy and Dzyaloshinskii-Moriya interactions in CoNi/MgO and CoNi/Pd/MgO”

Japanese Journal of Applied Physics (Rapid Communications) 58, 060917 (2019).