

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2013

課題番号：25600075

研究課題名(和文) 金属薄膜における強磁性キュリー温度の歪み応答に関する研究

研究課題名(英文) Mechanical stress induced change in ferromagnetic Curie temperature in metal thin film magnets

研究代表者

千葉 大地 (Chiba, Daichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10505241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：磁石の特性は、一度作るとなかなか変えることができない。後から自在に変えられると、応用の幅が広がる。歪みを加えると、磁化方向が変わることは良く知られている。しかし、磁力やキュリー温度がどのように変化するかについては、あまり多くの研究がなされていない。本研究では、身近な金属の磁石を用いて薄膜を作り、故意に歪みを加え、そのキュリー温度がどのように変化するかを調べた。

研究成果の概要(英文)：It is very difficult to control properties of magnets once they have been prepared. If their properties can be controlled afterward, the variety of an application possibility will be increased. It is well known that the magnetization direction can be controlled by an application of mechanical stress. But experimental reports on the stress dependence of magnetic force or Curie temperature are not many. In this research, we prepared thin film magnets using accessible metal elements, and investigated the change in Curie temperature under the application of the mechanical stress.

研究分野：総合理工

科研費の分科・細目：応用物理学・応用物性

キーワード：スピントロニクス 強磁性金属 キュリー温度 歪み応答

1. 研究開始当初の背景

磁石の性質は、一度作ると熱を加えない限り変わることがない。これは一般的なことであるが、その他にも歪みを加えると、磁化の向き易い方向やその強さを決めるパラメータ(磁気異方性エネルギー)が変わることは知られている。この磁石と歪みの関係は、磁歪効果として知られ、一般には磁界を加えることで磁石に歪みが増えることを指す。先に紹介した歪みによる磁化方向の変化は磁歪の逆効果(ピラリ効果)である。

一方で、本研究の提案者はナノスケールの薄い膜状の磁石に絶縁膜(誘電体)を介して電圧を加えることで(コンデンサの上下に電圧を加えると電荷が蓄積するのと同じ効果を使って)、そのキュリー温度 T_C が変化することを、強磁性半導体を用いて磁性の歴史上初めて報告した[Nature 408, 944 (2000)]。 T_C は磁石が磁石ではなくなる温度である。つまり、磁力を電氣的にオン・オフできる温度領域を作ることができたということである。このように、電界を加えるとももの性質が変化する効果は、「電界効果」と呼ばれ、半導体デバイスで発展してきたものである。そこでは、半導体中の自由電荷(キャリア)濃度を制御してその流れをゲーティングするという狭い意味を持っていた。上記の結果では、磁石と半導体の性質を併せ持つ強磁性半導体の、半導体的性質が磁石の性質を制御する役割を果たしたことになる。つまり、「電界効果」を広義で実践し、より多様な物質群での融合的新機能の創発を実現する土台を築く大きな意義を持つ研究であったと考えている。

では、金属の磁石ではどうであろうか。金属膜で誘電体を挟み、コンデンサを作って上下に電圧を加えると、電荷は金属膜の表面僅か1原子層程度に蓄積される。半導体に比べ、キャリア濃度が圧倒的に大きいため、表面に電荷が蓄積されると内部への電界が遮蔽されてしまうからである。しかし、我々は、驚くべきことに、コバルト(Co)のような身近な強磁性金属でも、室温付近で T_C を電界制御できることを見つけた[Nature Materials 10, 853 (2011)]。これを観測するために、2原子層程度の薄い Co を用い、表面1原子層程度の電荷の蓄積効果が全体の磁性に影響を及ぼすような構造にした。今では室温を挟んで100°Cもの温度範囲で電氣的にCoの磁力を消したり元に戻したりできるようになった[Applied Physics Letters 100, 122402 (2012)]。強磁性半導体では、その T_C が変化するメカニズムが理論的にも考察され、実験を良く説明することが知られている。しかし、電界で強磁性金属の T_C が変化する物理は未だ完全に理解できていない。この理解を進めることが今後の発展に重要な鍵を握る。Co表面の電荷密度(つまり原子一個当たりの電子数)が変化し、それに付随してCo原子間の強磁性的な相互作用や、電子構造が影響を受けることで、 T_C の変化が生じたというストーリーが尤もら

しい。しかし、電圧を加えることで誘電体が歪み、結果として2原子層程度のCoが引きずられて歪み、 T_C が変化した可能性も慎重に考慮しないとイケない。これは、裏を返すと、Coを故意に歪ませると T_C が変化する可能性があるということである。

半世紀以上前であるが、圧力を加えることで強磁性金属のバルク体の T_C が僅かに変化したという報告がある。物質に圧力を加えると、原子間隔が狭まる。つまり、原子の周りを回っている電子は隣の原子とより重なり易くなる。これにより、原子間の強磁性的な相互作用や、バンド構造が変化し、 T_C が変わったと考えられる。

2. 研究の目的

歪み印加により、磁化の方向ではなく、 T_C が変化する可能性を調べるのが本研究の目的である。本研究では、強磁性金属の薄膜に意図的に引っ張りや圧縮歪みを加えて、 T_C と歪み量の間関係を調べる。圧縮歪みの場合は1. で述べたとおりであるが、引っ張り歪みの場合は、圧力を加える場合とは逆に、原子間隔が広がる方向に働く。この場合でも当然強磁性的な相互作用は変化すると予想され、原子の周りを回っている電子の隣の原子との重なりも変化するため、 T_C は変化するであろうと予想される。上手く試料を作れば、温度を変えること無く磁力をオン・オフできると予想される(図1)。



図1. 果たして歪みで磁力がオン・オフ可能となるか！？

3. 研究の方法

(1) 研究体制

本研究を進める上で、面内に歪みを加える必要がある。そのため、機械的な歪みを印加するプロフェッショナル(兵庫県立大学・生津資大氏)を分担者として、共同で研究を進めた。

(2) 研究項目

① 磁性金属薄膜の製膜と T_C チューニング

2. で「上手く試料を作れば」と申し上げた。機械的歪み印加で T_C が変化したとしても、それを実験的に観測するには、歪みを加えながらも温度制御が行い易い室温付近に T_C があることが望ましい。Coなどの強磁性金属を数原子層程度に薄くすると、その T_C は厚い膜(バルク体)に比べ、大幅に減少する。この辺りは代表者の得意とするところであり、 T_C

が室温付近にある条件をチューンすることから研究を開始した。

②メンブレン基板上への製膜

通常の製膜は Si などの半導体基板上に行う。しかし、Si の基板は厚みもあり、硬いため、その上に製膜した金属膜に歪みを加えるのには適していない。そこで、穴の開いた Si 基板上に、200 nm 程度の極めて薄い SiN メンブレン薄膜が載っている基板を用い(図 3a 参照)、その上に(1)でチューンした磁性金属薄膜を製膜することにした。

③歪み印加測定システムの構築

メンブレンが載った Si 基板を真空チャックで吸着すると、Si 基板の穴の部分の気圧が下がり、メンブレンがたわむ。これにより、メンブレン上の金属膜に歪みが加わる。このような原理で歪みを加えることができる装置を自作した。

図 2 にその装置の概要を示す。試料に磁界を加える電磁石の鉄心部に、真空引き用の穴が開いており、そこから基板を吸着し、メンブレンをたわませることができる。鉄心の下にはペルチェ素子があり、鉄心の温度を $-10 \sim +100^{\circ}\text{C}$ の範囲で精密にコントロールできる。その上に載せた試料の温度も熱伝導により同時にコントロールできる。電気的な測定(異常ホール効果の計測)により、歪みが加わった状態の磁化状態を検出するため、市販の簡易プローバと上記のシステムが組み合わせて利用できるように工夫した。

真空ポンプを動作させると、メンブレンがたわむが、膜厚が極めて薄いことから、真空引きの度合いにより、圧縮歪みと引っ張り歪みを使い分けて金属膜に加えることができる。

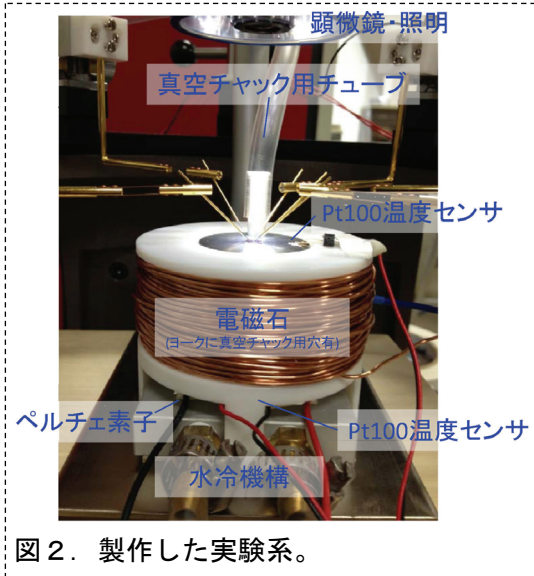


図 2. 製作した実験系。

4. 研究成果

(1)メンブレン基板上の試料特性

図 3 に素子構造と、その素子の磁気特性を測定した結果の一例を示す。素子は、メンブ

レン上に製膜した 2 原子層程度の Co 超薄膜を、フォトリソグラフィ・Ar イオンミリングを用いてホールバー形状に加工したものである(図 3a)。ホールクロスが Si 基板のくり抜き穴部分に形成されるようにしてある。図 3b は異常ホール効果を用いて測定した、Co 超薄膜の磁化特性である。明瞭な矩形のヒステリシスが観測されており、メンブレン上に特性の優れた Co 超薄膜を製膜できていることが確認できる。

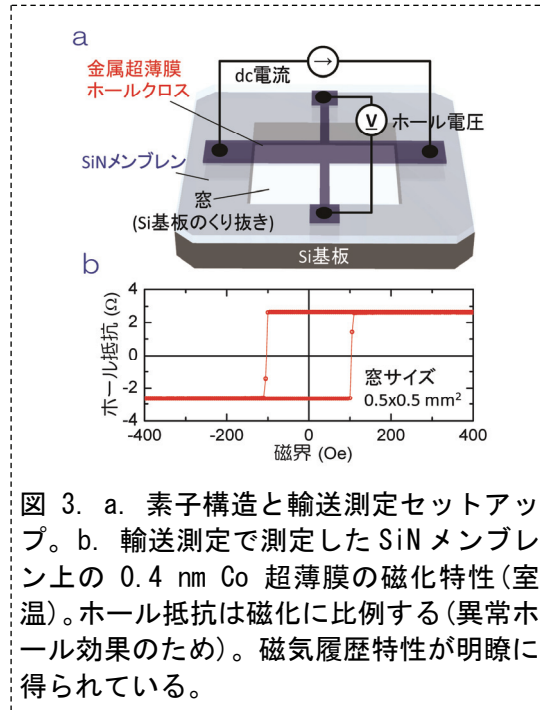


図 3. a. 素子構造と輸送測定セットアップ。b. 輸送測定で測定した SiN メンブレン上の 0.4 nm Co 超薄膜の磁化特性(室温)。ホール抵抗は磁化に比例する(異常ホール効果のため)。磁気履歴特性が明瞭に得られている。

(2)歪み印加下での実験結果

様々な超薄膜を製膜した結果、室温付近に T_c を持つものを作製することができた。図 4 は歪みを ON・OFF した際の T_c 付近の磁気特性である。どちらも保磁力や残留磁化を持たないソフトな特性であるが、これは T_c 直前の温度において、ゼロ磁界付近で多磁区化が起こり、試料全体として磁化が相殺されるためである。ON と OFF の状態で明らかな磁気特性の変化が見られる。OFF の状態の方が、ホール電圧の飽和値が若干小さく、常磁性的な曲線により近づいていることから、 T_c が低い状態にあると予想される。

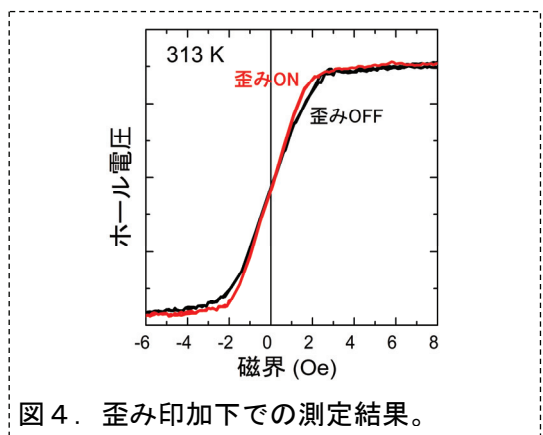


図 4. 歪み印加下での測定結果。

(3)まとめと今後の展望

本研究により、歪みにより T_c が変化している可能性を示すことができた。歪み量の定量評価と T_c の変化量など、より詳しい実験を現在行っているところである。

格子歪みと磁性の関係は、冒頭で述べたように、主に歪みと磁化方向の関係だけに限定され、学問が進んできた。本研究を発展させ、より広い範囲で、格子歪と磁性を調べていきたい。

5. 主な発表論文等

[その他]

ホームページ等

<http://chiba-lab.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

千葉 大地 (CHIBA, Daichi)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：10505241

(2)研究分担者

生津 資大 (NAMAZU, Takahiro)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90347526