

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870326

研究課題名(和文)自己スピン回転機能を有する電界放出型スピン偏極電子源の開発

研究課題名(英文)Development of a spin-rotatable spin-polarized field emitter

研究代表者

永井 滋一(Nagai, Shigekazu)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40577970

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：自己スピン回転機能をもつ電界放出型スピン偏極電子源の開発を目的として、以下の成果が得られた。超高真空下で清浄化したW<001>陰極上に、電子ビーム蒸着源を用いてCrを堆積させた。その表面構造を電界イオン顕微鏡で評価した結果、750Kのアニールによって、Cr薄膜が下地W<001>陰極の結晶構造を反映して格子整合していることが判明した。作製した陰極からの電子スピン偏極度の測定を行った結果、40-300Kの測定において、150Kで偏極度は最大20%となった。今後本研究を継続して、Cr(001)表面の結晶構造およびガス吸着が、電界放出電子のスピン偏極度に及ぼす影響を調査する。

研究成果の概要(英文)：For a development of a direction-controllable spin-polarized field emitter, a crystalline structure and spin-polarization of a Cr/W<001>emitter was investigated. An electrochemically etched a single-crystalline W<001> tip was cleaned in ultrahigh vacuum by field evaporation process. Cr was in-situ deposited with electron bombardment evaporation at room temperature. Subsequently, in order to improve the crystallinity of the Cr thin film, the tip was annealed 750K. The surface structure of the Cr/W(001) tip was observed by using field ion microscope with hydrogen as imaging gas. FIM image shows that Cr layers was grown pseudomorphically on W(001). Then we measure spin polarization from Cr/W(001) plane. The maximum of spin polarization of electrons field-emitted from the emitter was 20% at 150 K. Investigation that effects of the surface structure of the Cr thin film and adsorption of gas atoms on the spin polarization has been progressed.

研究分野：表面物理

キーワード：電界放出型電子源 スピン偏極電子源 反強磁性体 層間反強磁性体

1. 研究開始当初の背景

電界放出電子のスピンの偏極度に関する研究は、1970年代から始まり、3d遷移金属強磁性体および希土類金属に対して活発に行われた。Kiskerらが報告したEuS/W陰極からの電界放出電子のスピンの偏極度は、90%以上であり驚異的な値であった[1]。しかしながら、当時の報告では6Tの強磁場中かつキュリー点の17K以下でしか、高い偏極度が得られなかった。そのため、電子顕微鏡や分析装置に実機搭載されることは無かった。この問題に対して、2002年にR. BrylとM.S. Altmanは、単結晶W<111>陰極にCoを数原子層堆積させ、これから電界放出された電子線のスピンの偏極度が室温・無磁場中で最大48%である事を報告した[2]。この報告は、EuS/W陰極の偏極度には及ばないものの、取り扱いの容易さから電界放出型スピン偏極電子源の実用化の可能性を見出したものである。しかし、Co/W<111>が最適系なのか、蒸着されたCoが薄膜なのかクラスターを形成しているのかどうか、また蒸着されたCoの結晶構造とその偏極度への影響などは明らかになっていない。

一方で、スピン偏極走査トンネル顕微鏡法やスピン偏極低速電子顕微鏡などの性能向上によって、クラスターやワイヤーなどの低次元構造や原子レベルでのスピン構造の解析が可能となっている。これらの成果によって得られた知見は、ナノ領域から電子が放出される電界放出型スピン偏極電子源の陰極材料へと応用可能であると考えられる。さらに、スピン分解可能な電子顕微鏡・分析機器との相互発展により、スピン依存の新規物理現象の解明とそのデバイス応用が期待されている。

- [1] E.Kisker, G. Baum, A. H. Mahan, W. Raith, B. Reihl: "Electron field emission from ferromagnetic europium sulfide on tungsten" Phys. Rev. B, 18, p. 2256 – 2275 (1978) .
- [2] R. Bryl, M. Altman: "Spin Polarized Electron Emission from Co Covered W(111) Tip" Proc. Of 48th International Field Emission Symposium, Vol.2, p.55 (2002).

2. 研究の目的

電子スピンは、磁性体や超伝導などの種々の物性に強く関与している。最近では、スピン偏極電子線を用いて表面のスピンを観るだけでなく、電子注入によって表面スピンの向き操作することにも関心が寄せられている。しかしながら、表面スピンに平行・反平行なスピンを持つ電子線を用いる必要があるため、付加的なスピン回転器を用いて電子スピンの向きを回転させる必要がある。そこで、本研究ではCrのスピンフリップ現象を

活用し、電子源自体にスピン回転機能を付与した電界放出型スピン偏極電子源の開発を行う。

高偏極度・スピン回転器能を有する電界放出型スピン偏極電子源を達成するには、清浄な環境で蒸着されたCr表面の原子配列が最も重要となる。そこで、蒸着時のガス放出量が低減可能な電子ビーム蒸着装置と、陰極先端の原子構造を原子分解能で観察可能な電界イオン顕微鏡(FIM)を増設し、W<001>陰極上に堆積されたCr薄膜の原子構造を解析する。

陰極を現有する電界放出電子スピン偏極度評価装置で評価する。これまでの申請者の研究により、電界放出電子の偏極度と偏極ベクトルが“陰極への印加電界”と“陰極温度”に強く依存することが判っている。この2点を主要パラメータとして、高偏極度・スピン回転機能を実現する動作条件を見出す。また、得られた知見を陰極の作製条件に、直ちにフィードバックして最適化を図る。

3. 研究の方法

電界放出は、陰極先端の表面状態に極めて敏感な現象であり、W(001)にCrを原子層レベルでの成膜を制御し、その原子構造を観察し、in-situでスピン偏極度を測定する必要がある。これを実現するために、超高真空電子ビーム蒸着装置を搭載したFIM観察室を電界放出電子スピン偏極度評価装置に増設した。FIM観察室を増設した電界放出電子スピン評価装置の概略図をFig. 1に示す。FIM観察において、下地W<001>陰極にはNe、堆積させたCr膜にはH₂を結像ガスとして用いた。

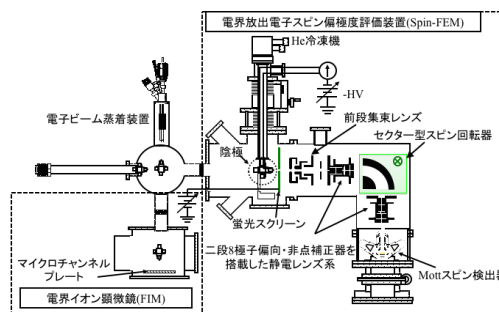


Fig. 1 FIM観察室と蒸着装置を増設した電界放出電子スピン評価装置の概略図。

電解研磨で先鋭化したW<001>陰極を試料準備室とFIM観察室を備えた電界放出電子スピン評価装置に導入した。各チャンバーはロードロック接続されており、それぞれ10⁻⁸Pa台に超高真空排気されている。まず、W<001>陰極表面の清浄化とその確認のため、85Kで電界蒸発処理を施した。Fig. 2に示すNe-FIM像で清浄表面を観察した後、in-situでCrを堆積レート0.1Å/sで20nm相当量を堆積した。

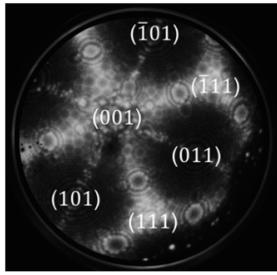


Fig. 2 下地 W<001> tip の FIM 像

4. 研究成果

(1) Cr/W<001> tip の FEM と I-V 特性

結晶性を向上させるために、450 K、600 K、750 K でそれぞれ 100s アニールし、FEM 像の変化を観察した(Fig. 3). アニール温度 450 K、600 K では、FEM 像に変化は見られなかったが、750 K では下地 W を反映した対称性を示す FEM 像(Fig. 3(e)) が観測された.

電界放出現象を記述する Fowler-Nordheim(F-N)の式は次式である.

$$\ln \frac{I}{V^2} = \ln \left\{ 1.54 \times 10^{-6} \frac{\beta^2 A}{\phi} \right\} - 6.83 \times 10^7 \frac{\phi^{\frac{3}{2}}}{\beta V}$$

ここで、 I は放出電流、 V は印加電圧、 β は陰極形状で決まる電界増強因子、 A は放出面積、 ϕ は仕事関数である. この F-N の式に基づいて電流・電圧特性をプロットしたものを(F-N plot)を Fig. 4 に示す. 電界放出の閾値電圧は、Cr 薄膜蒸着後に大幅に減少し、アニール温度の上昇によって W<001> tip の特性に近づいた. さらに、Fig. 5 にアニール温度に対して F-N plot の傾きと切片を示す. W(4.96eV)と Cr(4.79eV)の仕事関数の差は小さいので、傾きの変化は電界増強因子、つまり陰極の形状の変化によるものである. さらに 750 K のアニール後に、切片が変化している. この要因については、FEM 像の変化に見られるような放出面積の変化であると推定される.

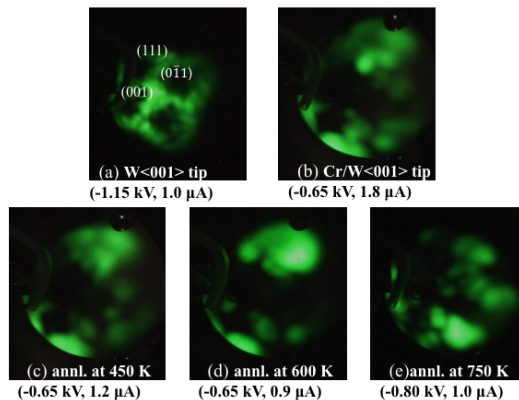


Fig. 3 Cr 膜蒸着前の FEM 像(a), Cr 蒸着後の FEM 像(b), 450 K(c), 600 K(d), 750 K(d) でのアニール後の FEM 像.

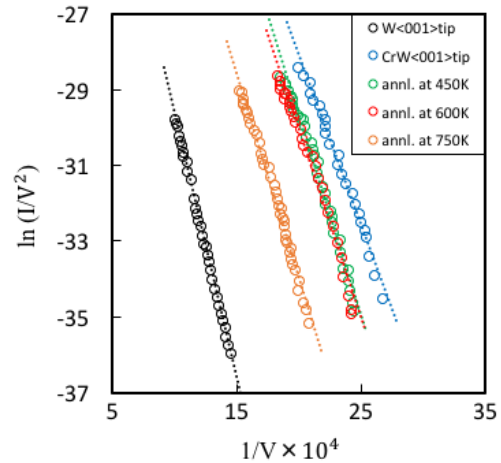


Fig. 4 Cr/W<001>の Fowler-Nordheim plot

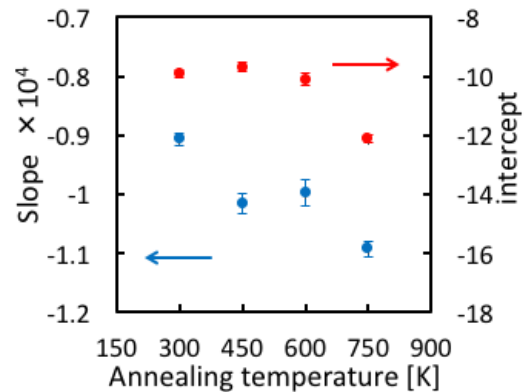


Fig. 5 アニール温度に対する FN プロットの傾き(青)と切片(赤).

(2) Cr/W<001> tip の FIM 観察

750 K でのアニール後の Cr 膜の結晶構造を評価するために、FIM を観察した. アニール処理後の Cr/W<001>陰極の結晶構造の FIM 像観察では、Cr の蒸発電界(27 V/nm)は結像ガスとして通常用いられる He や Ne のイオン化電界よりも低いので、最良像電界強度が 18.8 V/nm (理論値) の H₂ を結像ガスとして用いた. Fig. 6(a)は Cr 薄膜が高速で電界蒸発しているときの Cr/W<001>陰極の H₂-FIM 像である. Fig. 6(a)中の矢印で示した方向に、下地 W(001)面を中心に[001]晶帯軸に沿った四回対称のパターンが観測された. 陰極への印加電圧を下げ、Cr 薄膜の蒸発速度を下げた FIM 観測した結果、Fig. 6(b)中矢印で示すように、下地 W(001)面上に結晶性を示すリングパターンが観測された. リングパターンは、Cr 薄膜が完全に電界蒸発するまで繰り返し観測されたので、堆積させた Cr 薄膜が単結晶構造を形成していたと考えられる.

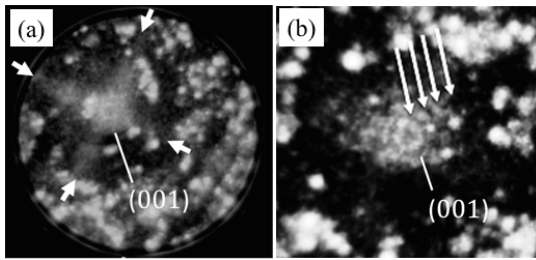


Fig. 6 750 K でアニール後の FIM 像. (a) 全体像, (b) 中央の(001)面の拡大図.

(3) Cr/W<001> tip からの電界放出電子のスピンの偏極度

Cr/W<001> tip からの電界放出電子のスピンの極度の温度依存性を Fig. 7, 偏極ベクトルの方向を Fig. 8 に示す. 40~300K の測定において, 150K で偏極度は最大となった. この要因は磁気的な相転移によるものであると推察され, 研究開始当初に検討していたスピンフリップングに関連する現象であると推察される. しかし, スピン偏極度の方向に明確な回転は観測されない要因は, Cr(001)表面の結晶構造およびステップ構造, ならびに Cr(001)表面への残留ガス吸着などが挙げられる. これらによって本来発現すべきスピン回転が阻害されている可能性があり, 今後, より精密な Cr 薄膜の形成によって改善および自己スピン回転機能が実現すると期待される.

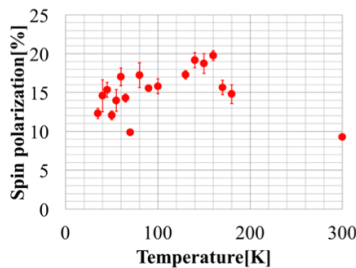


Fig. 7 偏極度の温度依存性.

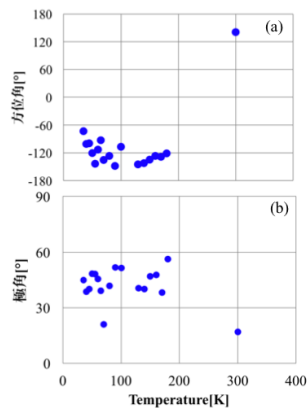


Fig. 8 偏極度の方向の温度依存性. (a) 方位角, (b) 極角.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① S. Nagai, K. Hata, H. Oka, D. Sander, and J. Kirschner : “Atomic structure and spin polarization at the apex of tips used in spin-polarized scanning tunneling microscopy” *Applied Physics Express* 7, 025204 (2014). (査読有)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 阪井 那央哉, 永井 滋一, 岩田 達夫, 梶原 和夫, 畑 浩一 : “スピン方向を制御可能な電界放出型偏極電子源に向けた W(001) 面上に堆積された Cr 薄膜の結晶構造の観察” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (2015 年 3 月 12 日, 東海大学), 12p-A11-19 (2015).
- ② Shigekazu Nagai, Koichi Hata, Hirofumi Oka, Dirk Sander, Jürgen Kirschner : “Atomic structure and spin polarization at the apex of tips used in spin-polarized scanning tunneling microscopy” 9th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '13, (2013 年 12 月 3 日, Big Island, USA), 03P47 (2013).
- ③ 永井 滋一, 畑浩一, 岡博文, D. Sander, J. Kirschner : “スピン偏極 STM 探針先端の原子構造と偏極度評価” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 (2013 年 9 月 19 日, 同志社大学), 19a-D2-13 (2013).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 取得年月日 :

国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 滋一 (Nagai, Shigekazu)
三重大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40577970

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：