

課題番号 : F-13-NU-0005  
 利用形態 : 機器利用  
 利用課題名 (日本語) : ハーフメタルを用いたスピndeバイスの研究  
 Program Title (in English) : Spin devices using half-metal  
 利用者名 (日本語) : 植田 研二  
 Username (in English) : Kenji Ueda  
 所属名 (日本語) : 名古屋大学大学院 工学研究科  
 Affiliation (in English) : Graduate school of engineering, Nagoya-University

### 1. 概要 (Summary)

ダイヤモンドは高い絶縁破壊耐圧、物質中最大の熱伝導度等の優れた物理特性を有する事から次世代半導体デバイス、特に高周波高出力デバイスとして期待されている。これに加え我々は、ダイヤモンドはスピン注入対象としても極めて有望であると考えている<sup>[1]</sup>。その理由は、ダイヤモンドが軽元素半導体である為スピン軌道相互作用が小さく、長スピン拡散長が期待される事、化学的安定性にも優れている等の為である。しかし、現在までにダイヤモンドへのスピン注入に関する報告は全く無い。本研究で我々は、ダイヤモンド半導体へのスピン注入の第一段階として、ハーフメタル強磁性体(Co<sub>2</sub>MnSi)/ダイヤモンド半導体ショットキー接合を作製し、その磁気・伝導特性について調査した。

### 2. 実験 (Experimental)

マイクロ波プラズマ CVD 法によりダイヤモンド Ib(100)基板の上に、CH<sub>4</sub> を炭素源、トリメチルボロンを B ドープ源とし、ダイヤモンド半導体薄膜の結晶成長を行った。膜厚は~1 μm とした。ダイヤモンド薄膜の電気特性はホール効果測定により評価しているが、キャリア濃度~10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>、室温移動度~1000 cm<sup>2</sup>/Vs を有する p 型半導体薄膜が再現性良く得られている。

Co<sub>2</sub>MnSi 強磁性体薄膜は、イオンビームスパッタリング装置を用いてダイヤモンド薄膜上に成長させた。得られた薄膜の構造解析は Cu K<sub>α</sub> 線を使用した X 線回折法により行った。フォトリソグラフィ法により、上記の Co<sub>2</sub>MnSi をショットキー電極 (接合面積 : 100-300 μm<sup>2</sup>)、Ni/Ti をオーミック電極として用いたダイヤモンドショットキーダイオードの作製を行い、電流-電圧 (I-V) 測定を行った。

### 3. 結果と考察 (Results and Discussion)

ダイヤモンドと組み合わせる強磁性体として我々はホイスラー合金 Co<sub>2</sub>MnSi (CMS) に着目した。この理由は、CMS がスピン分極率が 1 であるハーフメタル材

料であり、かつ強磁性転移温度 (T<sub>C</sub>) が 985K と室温より遥かに高い為である。まず、作製温度 (T<sub>S</sub>) を 500-750°C の範囲で制御しながら、イオンビームスパッタ (IBS) 法によりダイヤモンド上への CMS 薄膜の作製を試みた。X 線回折測定から、T<sub>S</sub> = ~600°C の狭い温度範囲でのみ、CMS 薄膜がエピタキシャル成長 (配向関係 : CMS (001)[100]/diamond (001)[110]) することが分かった (Fig. 1(a))。T<sub>S</sub> = 550°C 以下及び 700°C 以上の成長温度では、CMS 薄膜はアモルファス又は多結晶となった。600°C で作製した CMS 薄膜の飽和磁化は 400 emu/cc 程度とバルク値 (~1100 emu/cc) に比べ半分程度となり、また保磁力も 200 Oe と大きくなった。次に、この条件でダイヤモンド半導体上に作製した CMS 薄膜を用いて接合を作製し、I-V 測定を行ったところ、整流性は見られずオーミック的

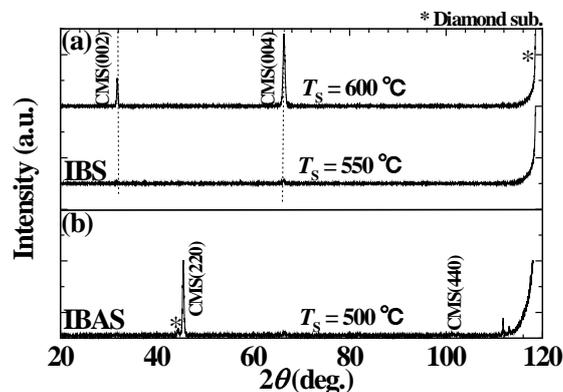
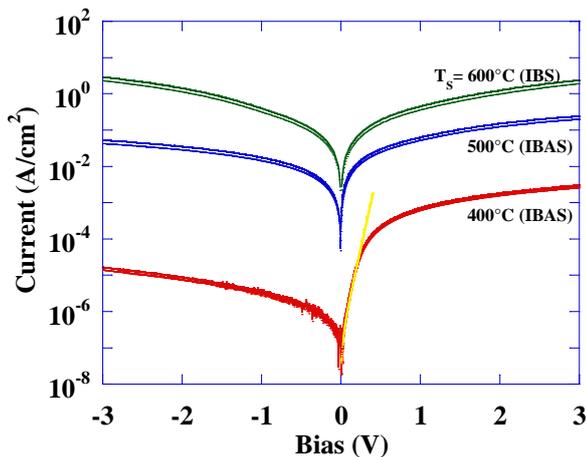


Fig. 1 (a) X-ray diffraction patterns (2θ-θ) for the Co<sub>2</sub>MnSi films deposited on diamond at the substrate temperature (T<sub>S</sub>) of 600°C and 550°C by IBS, and (b) 500°C with Ar ion-beam assist (IBAS).

となった (Fig. 2)。熱電子放出 (TE) モデルによる I-V 特性の解析の結果、理想因子 (n 値 : 接合界面の品質に関連する) が非常に大きくなり、磁化測定の結果と合わせ、高温成長により、ダイヤモンド / CMS 界面で反応や拡散等が生じていると考えた。

次に、ダイヤモンド / CMS の高温での界面反応、拡散等を防ぐためにイオンビームアシストスパッタ法 (アシスト成膜法) を用い、より低温での成長を試みた。



**Fig. 2** *I-V* characteristics Schottky junctions fabricated by using the CMS/diamond heterostructures formed at  $T_s$  of 400°C, 500°C (IBAS) and 600°C (IBS). The dotted line shows the fitting results using TE model.

アシスト成膜法は、スパッタリングによる結晶成長の最中にArイオンビームを薄膜に照射する事によりエネルギーを与え、結晶成長を低温で促進する手法の1つである。アシスト成膜法により $T_s = 400 \sim 500^\circ\text{C}$ でダイヤモンド上にCMS(220)配向膜が作製でき(Fig. 1(b))、IBS法に比べて $200^\circ\text{C}$ 近く成長温度の低温化ができる事が分かった。また、これらのCMS薄膜の飽和磁化は $1100 \text{ emu/cc}$ 、保磁力が $70 \text{ Oe}$ とバルク値( $\sim 1100 \text{ emu/cc}$ ,  $\sim 10 \text{ Oe}$ )に近い値が得られた。また、この薄膜を用いて作製したCMS/ダイヤモンド接合のI-V特性の結果(Fig. 2)から、アシスト成膜法により $T_s = 500$ 、 $400^\circ\text{C}$ で作製した接合で、それぞれ明瞭な整流性が得られ、成長温度の低温化により整流比が増加する事が分かった。そして、最も整流比の大きかった $T_s = 400^\circ\text{C}$ の薄膜を用いた接合のI-V特性をTEモデルにより解析した所、 $n$ 値及びバリア高さ( $\Phi_B$ )はそれぞれ、1.7及び $0.80 \text{ eV}$ と見積もられた。 $n$ 値が理想値である1に近い事からI-V特性がTEモデルに従っており、比較的良質なショットキー接合が作製できている事が分かった。これは、アシスト成膜法を用いた低温成長により、CMS/ダイヤモンド界面での反応又は拡散等が抑制された為だと考えられる。今後、CMS薄膜の作製条件を最適化していくことで、ショットキー界面の高品質化が期待でき、CMSからダイヤモンドへの高効率スピン注入、更にはダイヤモンドスピントランジスタの実現に繋がっていくと思われる。

#### 4. その他・特記事項 (Others)

(参考文献)

[1] K. Ueda, T. Soumiya and H. Asano, *Diamond Relat.*

*Mater.* 25 (2012) 159-162.

(共同研究者等 (Coauthor))

この研究は浅野 秀文 教授の他、大学院及び学部学生4名との共同研究の成果です。

#### 5. 論文・学会発表 (Publication/ Presentation)

(論文 Publication)

1) K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, and H. Asano  
*Appl. Phys. Lett.*, 103 (2013) 052408.

2) K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya and H. Asano  
*Diamond Relat. Mater.*, 38 (2013) 41.

(学会発表 Presentation)

1) K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, K. Kawamoto, and H. Asano, "Epitaxial growth of half-metallic Heusler alloy  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  on diamond semiconductors and their interfacial characteristics" NDNC(New Diamond and Nano Carbon conference), Singapore, May 19-23, (2013).

2) K. Ueda, M. Nishiwaki, T. Soumiya, K. Kawamoto and H. Asano, "Ferromagnetic Schottky junctions using half-metallic  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ /diamond, heterostructures", 2013 JSAP-MRS joint symposium, Kyoto, Sep.16-20, (2013).

3) K. Ueda, M. Nishiwaki, T. Soumiya, K. Kawamoto and H. Asano, "Fabrication of half-metallic  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ /diamond Schottky junctions", International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM), Fukuoka, Sep.24-27, (2013).

4) K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, K. Kawamoto, T. Miyawaki, H. Asano, "Magnetic Schottky junctions using heterostructures of half-metallic  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ /diamond semiconductors", 58<sup>th</sup> Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM), Denver, Nov.4-8, (2013).

5) 西脇雅人, 植田研二, 宗宮嵩, 河本圭太, 宮脇哲也, 浅野秀文, "イオンビームアシストスパッタ法を用いたダイヤモンド半導体上へのハーフメタル  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  薄膜の低温成長", 第37回日本磁気学会学術講演会, 北海道大学, (2013)9月3-6日.

6) 西脇雅人, 植田研二, 河本圭太, 愛知慎也, 浅野秀文 "イオンビームアシストスパッタリング法を用いた格子整合  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  基板上への  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  薄膜の成長", 第61回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学, (2014), 3月17-20日(3/17).

#### 6. 関連特許 (Patent)

なし。