

ダイヤモンド半導体／強磁性体ハイブリッド構造を用いた新規スピン機能素子の開発

植田 研二*

Development of novel spintronic devices using diamond semiconductor/ferromagnet hybrid structures

Kenji Ueda*

We have tried growth of half-metallic Heusler Co_2MnSi (CMS) on diamond and fabrication of ferromagnetic Schottky junctions using CMS/diamond heterostructures as a first step for spin injection to diamond semiconductors. By using ion beam assisted sputtering, low temperature growth of single-crystalline (110) oriented CMS films on diamond became possible. The CMS films showed ferromagnetic hysteresis at room temperature, and saturation magnetization (M_s) and coercive fields was estimated to be ~ 1100 emu/cc and ~ 70 Oe, respectively, which were comparable to those of bulk CMS. Schottky junctions using the CMS/diamond heterostructures showed clear rectification properties with rectification ratio of more than 10^2 .

1. はじめに

現在の情報社会を支える Si 半導体集積回路は微細化限界を迎えつつあり、電子産業の更なる発展に必要な新技術の開発が望まれている。その 1 つが、伝導電子のスピンを積極的に利用し、今までに無い機能を発揮する半導体スピン機能素子の開発である。この代表例である「スピントランジスタ」は、トランジスタの持つ論理機能に強磁性体の持つ不揮発性記憶機能が融合した素子である。その実現により不揮発集積回路の開発が可能となれば、記憶領域のみならず、未使用の演算回路部の電源遮断ができる低消費電力高速コンピュータ等の実現が可能となる。スピントランジスタの実現には、半導体にスピン偏極電子を注入し、それをスピン反転により損なうことなく輸送する技術が求められるが、その為には、スピン拡散長の長い半導体とスピン分極率が高い磁性体材料を組み合わせ、スピン注入を行う必要がある。しかし、高効率スピン注入を可能とする半導体—磁性体の組合せ及び半導体／強磁性体界面形成方法は現在確立しておらず、模索段階にある。

我々は、これまでダイヤモンドトランジスタの開発に従事してきており、ダイヤモンドトランジスタのミリ波帯での高周波動作等に関して世界に先駆け報告している⁽¹⁾。その研究過程で、ダイヤモンドは次世代半導体材料として期待されているが、スピナー軌道相互作用が小さく、高い化学的安定性を持つ等の特徴も持つことから、スピントランジスタ作製の為の基盤材料として有望であると考えてきた⁽²⁾。しかし、現在までにダイヤモンドスピントランジスタ作製の試みは無い。そこで本研究では、ダイヤモンドスピントランジスタの実現に向け、ダイヤモンド半導体と強磁性体、特に高いスピン分極率を有するハーフメタル強磁性体とを融合する事により、強磁性体からダイヤモンドへの高効率スピン注入を可能とする界面形成を試みた。

2. 実験方法

ダイヤモンド p 型半導体薄膜は、市販の 1b (100)ダイヤモンド基板 (3 mm 角)上に、マイクロ波プラズマ CVD 装置により作製した。 CH_4/H_2 流量比は 0.1–1%、ガス圧は 50 Torr、成長温度は 700–900°C、膜厚は $\sim 1 \mu\text{m}$ 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、この成長条件でキャリア濃度 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、室温移動度 $\sim 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の p 型半導体薄膜が再現性良く得られている。ダイヤモンド薄膜の p 型伝導は意図的なドーピングによるものではなく、チャンバー内に残存する微量のホウ素に由来している。

Co_2MnSi 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 $\text{Cu } K_\alpha$ 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_2MnSi をショットキー電極 (接合面積 :

100-300 $\mu\text{m}\Phi$), 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

ダイヤモンドと組み合わせる強磁性体として様々な材料が考えられるが、我々はホイスラー合金 Co_2MnSi (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_c) が 985K と室温より遥かに高い為である。まず、作製温度 (T_s) を 500-750 $^{\circ}\text{C}$ 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、 $T_s = 600^{\circ}\text{C}$ 付近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 (図 1 (a))。 $T_s = 550^{\circ}\text{C}$ 以下及び 700 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ 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となった (図 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 (3), (4)。

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 (アシスト製膜法) を用い、より低温での成長を試みた。アシスト製膜法は、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一つである。アシスト製膜法により $T_s = 400\sim 500^{\circ}\text{C}$ でダイヤモンド上に CMS (220) 配向膜が作製でき (図 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 emu/cc、保磁力が 70 Oe とバルク値 (~1100 emu/cc, ~10 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 (図 2) から、アシスト製膜法により $T_s = 500, 400^{\circ}\text{C}$ 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 (Φ_B) はそれぞれ、1.7 及び 0.80 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、アシスト製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 (5)。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。

REFERENCES

- (1) K. Ueda et al., IEEE Electron Dev. Lett., 27 (2006) 570-572.
- (2) K. Ueda, T. Soumiya, and H. Asano, Diamond Relat. Mater. 25 (2012) 159-162.
- (3) K. Ueda, T. Soumiya, K. Kawamoto, N. Fukatani, and H. Asano, International conference on diamond and carbon related materials (ICDCM2012), Granada Spain, Sep. 2012, 025.
- (4) K. Ueda, T. Soumiya, K. Kawamoto, N. Fukatani, and H. Asano, ISPlasma2013, Nagoya Japan, Jan. 2013, P1055C.
- (5) K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, K. Kawamoto and H. Asano, "Epitaxial growth of half-metallic Heusler alloy Co_2MnSi on diamond semiconductors and their interfacial characteristics", 国際学会 NDNC2013 で発表予定、論文投稿準備中。

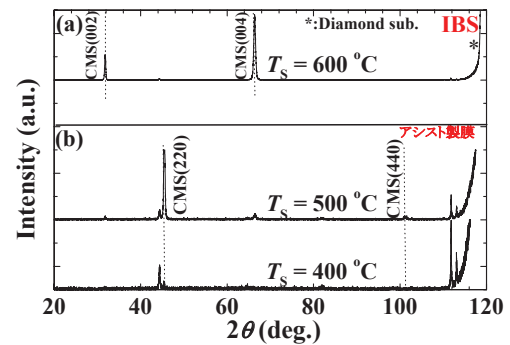


図 1. (a) IBS 法 (600 $^{\circ}\text{C}$) 及び (b) アシスト製膜法により 400-500 $^{\circ}\text{C}$ で作製したダイヤモンド上 CMS 薄膜の X 線回折パターン

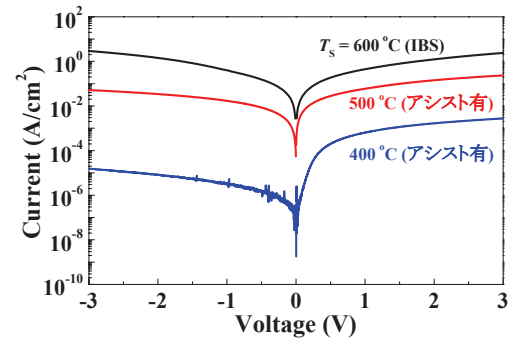


図 2. CMS/ダイヤモンドショットキー接合の電流-電圧 (I-V) 特性