

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560372

研究課題名(和文) 強磁性ハーフメタル/ダイヤモンド半導体ヘテロ接合を用いた新規スピndeバイスの開発

研究課題名(英文) Development of novel spin devices using half-metallic ferromagnet/diamond semiconductor heterojunctions

研究代表者

植田 研二 (Ueda, Kenji)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10393737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではスピントランジスタの実現の為に最重要課題である強磁性体から半導体への高効率スピン注入に関して、長スピン拡散長等の優れた特徴を持つダイヤモンド半導体と強磁性ハーフメタルCo₂MnSi(CMS)を組合せて達成する試みを行った。研究成果として、高効率スピン注入に必須となる急峻なハーフメタルCMS/ダイヤモンド半導体界面が～300℃でのCMSの低温成長により得られる事を明らかにし、CMS/高濃度不純物ドーパダイヤモンド接合を用いた3端子Hanle測定によりスピン注入由来と思われる信号を得た。スピン緩和時間は～7nsと見積もられたが、高不純物ドーパ半導体を用いている事を考慮すると大きな値である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried injecting spin polarized carriers efficiently from ferromagnets into semiconductors by combining diamond, which expected to have long spin diffusion length, and half-metallic Co₂MnSi (CMS), which has high spin polarization. We found abrupt half-metallic CMS/diamond interfaces can be obtained by low temperature growth of CMS at around 300℃ and also observed spin signals by 3-terminal Hanle measurements, which was related to spin injection into diamond semiconductors. By the measurements, spin relaxation time was estimated to be 7 ns, which was relatively larger if we consider the value was obtained for heavily impurity doped semiconductors.

研究分野：電子材料

キーワード：スピントロニクス 半導体 ダイヤモンド ハーフメタル ホイスラー

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは、大きなバンドギャップ(5.5eV)、高熱伝導度、高移動度等の優れた特性を持ち、高周波高出力デバイスとして期待されている。ダイヤモンド高周波高出力デバイスが実現すれば、ミリ波帯の通信衛星等で使われている真空管を固体素子化し、電力効率、信頼性等を大幅に向上させる事ができる。これまでに、申請者は単結晶ダイヤモンド薄膜を用いた電界効果トランジスタ(FET)を作製し、1GHzで実用レベルの出力電力密度2.1W/mm²が得られる事を世界に先駆けて報告した。また、大面積化に優れた多結晶ダイヤモンドを用いてFETを作製し、ミリ波帯での高周波動作(~120GHz)が可能である事を初めて示した。これらは無線通信システム基地局等で用いられている高周波増幅器での使用に十分耐えうる値であり、ダイヤモンド半導体の高いポテンシャルを実証する結果である。この様に申請者は近年、ダイヤモンド半導体デバイスの開発に従事してきたが、ダイヤモンド半導体の優れた特性を生かした新しい展開として、ダイヤモンドを用いたスピン機能素子(スピントランジスタ)の開発を行っている。

スピントランジスタは、強磁性体の持つ不揮発性メモリ機能とトランジスタの持つ演算機能が融合した素子であり、1つの素子で「メモリ+演算機能」を持つ。その実現により不揮発集積回路の開発が可能となれば、メモリ領域のみならず、未使用の演算回路部分の電源遮断ができる超低消費電力コンピュータ等の実現が可能となる。しかし、スピントランジスタの作製は極めて難しく、不揮発性機能を明確に実証した例は無い。

スピントランジスタは強磁性体/半導体積層構造を主要構造としており、強磁性体から半導体への高効率スピン偏極電流注入(スピン注入)が実現の鍵となる。現在スピン注入に関する研究は、実用半導体であるSiやGaAsを主体に進められており、強磁性体から半導体への効率的なスピン注入を可能とする材料特性と界面形成法が模索されている段階である。しかし、SiやGaAsは強磁性材料との反応性等が高く、界面制御性等に問題がある為、未だに室温で十分なスピン注入効率が得られていない。これに対し申請者は、ダイヤモンド半導体が、

軽元素半導体である為、スピン-軌道相互作用が小さく、長いスピン拡散長が期待できる、化学的安定性に極めて優れている為、界面不純物層が非常に出来にくい、

ホウ素ドーピングにより金属並みの低抵抗化が可能(伝導率不整合の問題解決に有効)等の特徴を有する為、スピンデバイスとしても有望であると考えている。その為ダイヤモンド半導体を用いる事により、強

磁性-半導体界面で生ずる上記の問題を解決し、高効率スピン注入を実現できる可能性があると考えて研究を進めている。

2. 研究の目的

スピントランジスタは、強磁性体の持つ不揮発性記憶機能とトランジスタの持つ演算機能が融合した不揮発性記憶演算デバイスである。その開発により不揮発性集積回路が実現すれば、未使用演算回路の電源遮断ができる超低消費電力コンピュータ等の実現が可能となる。

本研究では、スピントランジスタ実現の為に最重要課題である強磁性体から半導体への高効率スピン偏極電流注入(スピン注入)に関して、高い化学的安定性や大きなスピン拡散長等の優れた特徴を持つ「ダイヤモンド半導体」と、大きなスピン分極率を有する「強磁性ハーフメタル」を組合せ、その界面を精密制御する事により実現する事及び、ダイヤモンドスピントランジスタを創出する事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では強磁性体からダイヤモンドへの高効率スピン注入がキー技術となるが、ダイヤモンド半導体への高効率スピン注入に関して研究を、強磁性ハーフメタル/ダイヤモンド積層構造界面の高品質化を行い、ダイヤモンド半導体への高効率スピン注入指針を確立するという形で進めた。強磁性ハーフメタル/ダイヤモンド半導体接合の高品質化によるスピン注入の高効率化を主体として研究を進めたが、それと同時に界面制御がより容易な、NiやCo等の強磁性体とダイヤモンドとの接合を用いたスピン注入も併行して行い、接合界面への絶縁層、高濃度ドーブ層の挿入や強磁性体のスピン分極率等がスピン注入効率に与える影響についても考察を行った。

4. 研究成果

本研究の主要成果として以下の2点が挙げられる。

(1) 申請者は強磁性ハーフメタルであるCo₂MnSi(CMS)がダイヤモンド上にエピタキシャル成長する事を見出した。また、高効率スピン注入に必須となる急峻なハーフメタルCMS/ダイヤモンド半導体界面を実現する為には、CMSの~300Kでの低温成長が必須であるが、Arイオンビームアシストを用いたCMSの結晶成長により可能となる事を明らかにした。CMSの各種物性の成長温度依存性から、CMSのハーフメタル性とある程度の結晶性を維持したまま、急峻なCMS/ダイヤモンド界面を得るには300-400Kが最適な成長温度である事が分かった。

(2) 上記の結果を参考にCMS/高濃度ホウ素ドーブp型ダイヤモンド接合を用いて

スピン注入実験を行った。なお、高濃度ホウ素ドーピング型ダイヤモンドとして金属伝導に近い低抵抗率を有するダイヤモンドを用いているが、これは CMS ハーフメタルとダイヤモンド間の伝導度ミスマッチを解消し、スピン注入を高効率に行う為である。CMS を磁性電極とした 3 端子ハル測定からスピン注入に由来すると思われる信号が観測され、スピン緩和時間 ~7ns が得られた。この値はスピン拡散長 70nm(@100K)に相当する。このスピン緩和時間は高濃度に不純物ドーピングが為された半導体材料中でのスピン伝導現象である事を考慮すると非常に大きな値であり、同程度不純物がドーピングされた Si や GaAs 半導体と比較して 2 桁以上大きな値である。これらはダイヤモンドの小さなスピン-軌道相互作用に由来する結果であると申請者らは考えており、ダイヤモンドの他材料に対する大きな優位性を示唆する結果であると思われる。また、スピントランジスタの作製も試みたが、現在のスピン注入効率が低く (<~1%) スピン注入信号が非常に小さい為、スピントランジスタ動作には至らなかった。

この様に本研究で初めて、急峻なハーフメタル CMS / ダイヤモンド半導体界面の作製と、ハーフメタルからダイヤモンドへのスピン注入に成功しており、開始当初の研究目標はある程度達成されたと思われる。今後の課題として更なるスピン緩和時間 (拡散長) の増大とスピン注入の効率化がスピントランジスタの実現に必須であると思われる。

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 9 件)

1. High-temperature and high-voltage characteristics of Cu/diamond Schottky diodes
K. Ueda, K. Kawamoto, and H. Asano
Diamond Relat. Mater. in press.
2. Low temperature growth of Co₂MnSi films on diamond semiconductors by ion-beam assisted sputtering
M. Nishiwaki, K. Ueda, and H. Asano
J. Appl. Phys., 117 (2015) 17D719-1-4.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4917466>
3. Fabrication of epitaxial Co₂MnSi films on lattice-matched MgAl₂O₄ substrates by ion-beam assisted sputtering
K. Ueda, M. Nishiwaki, T. Soumiya, and H. Asano
Thin Solid films, 570 (2014) 134-137.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.09.045>

4. High-temperature characteristics and stability of Cu/diamond Schottky diodes
K. Ueda, K. Kawamoto, and H. Asano
Jpn. J. Appl. Phys., 53 (2014) 04EP05-1-4.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.04EP05>

5. Ferromagnetic Schottky junctions using half-metallic Co₂MnSi/diamond heterostructures
K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, and H. Asano
Appl. Phys. Lett., 103 (2013) 052408-1-4.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4817295>

6. Inversion of magnetoresistance in La_{1-x}Sr_xMnO₃/Nb-doped SrTiO₃/CoFe junctions
K. Ueda, K. Tozawa, and H. Asano
J. Kor. Phys. Soc., 63 (2013) 706-710.
<http://link.springer.com/article/10.3938/jkps.63.706>

7. Epitaxial growth and physical properties of Heusler/perovskite heterostructures
K. Kobayashi, K. Ueda, N. Fukatani, H. Kawada, K. Sakuma, and H. Asano
J. Kor. Phys. Soc., 63 (2013) 620-623.
<http://link.springer.com/article/10.3938%2Fjkps.63.620>

8. High-temperature characteristics of Ag and Ni/diamond Schottky diodes
K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya and H. Asano
Diamond Relat. Mater., 38 (2013) 41-44.
DOI:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2013.06.007>

9. イオンビームアシストスパッタ法による Co₂MnSi 薄膜の低温エピタキシャル成長
植田研二、浅野秀文
電子情報通信学会技術研究報告 (信学技報) (IEICE Technical Report vol. 114 No. 234 (2014) MR2014-17)

[学会発表](計 29 件)

1. M. Nishiwaki, K. Ueda, S. Aichi, T. Miyawaki, H. Asano
“Low temperature growth of epitaxial Co₂MnSi films on lattice-matched MgAl₂O₄ substrates by ion-beam assisted sputtering”
Intermag 2014, Dresden Germany, May 4-8 (7 May) (2014), FS-9.
2. K. Ueda, H. Asano
“Half-metallic Heusler/diamond heterojunctions for spintronic applications”
IUMRS-ICA 2014, Fukuoka, Aug. 25-29 (25 Aug.) C1-I25-001 (招待講演).
3. K. Ueda, K. Kawamoto, H. Asano

- “High-temperature and high-voltage operation of Cu/diamond Schottky diodes”
ICDCM (International conference on diamond and carbon materials) 2014, Madrid, Spain, Sep. 7-11 (10 Sep.), O12 A.2.
4. K. Ueda, K. Kawamoto, S. Aichi, M. Nishiwaki, H. Asano
“High-Temperature and High-Voltage Characteristics of Cu/Diamond Schottky Diodes”
SSDM 2014, Tsukuba, Sep. 8-11 (11 Sep.), N-8-3.
5. K. Ueda
“High-temperature and high-voltage characteristics of diamond Schottky diodes”
2nd French-Japanese Workshop on Diamond Power Devices, Fukuoka, Oct. 6-10 (8 Oct.) 4-5.
6. M. Nishiwaki, K. Ueda, S. Aichi and H. Asano
“Low temperature growth of Co₂MnSi films on diamond semiconductor by ion beam assisted sputtering”
59th Annual Magnetism & Magnetic Materials conference, Honolulu, Hawaii, Nov. 3-7 (6 Nov.) (2014) EP-08.
7. K. Ueda, and H. Asano
“Co₂MnSi/diamond Schottky junctions for spintronic applications”
EMN-fall meetings 2014, Orland FL, USA, Nov. 22-25 (22 Nov.) (2014) MM-05 (招待講演)
8. K. Ohtsuka, K. Ueda, S. Aichi and H. Asano
“Cu diamond Schottky diodes for high-temperature and high-power applications.
ISPlasma2015, Nagoya Japan, Mar. 26-31 (27 Mar.) (2015) B3-O-06.
9. 植田研二、河本圭太、西脇雅人、浅野秀文
“Cu / ダイヤモンドショットキーダイオードの高温耐電圧特性”
第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、2014年 9月17-20日(9/18)
10. 植田研二 浅野秀文
“イオンビームアシストスパッタ法による Co₂MnSi 薄膜の低温エピタキシャル成長”
電子情報通信学会、磁気記録・情報ストレージ研究会(MR)、柏崎エネルギーホール(新潟)、2014年10月2-3日 (10/2, (5) MR) (招待講演)
11. K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, K. Kawamoto, and H. Asano
“Epitaxial growth of half-metallic Heusler alloy Co₂MnSi on diamond semiconductors and their interfacial characteristics”
NDNC(New Diamond and Nano Carbon conference), Singapore, May 19-23, (2013)
12. K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya, and H. Asano
“High temperature stability of diamond Schottky junctions”
NDNC(New Diamond and Nano Carbon conference), Singapore, May 19-23, (2013)
13. K. Ueda and H. Asano
“High temperature characteristics of diamond devices”
1st French-Japanese Workshop on Diamond power devices, (招待講演)
Chamonix, France, 19-21 June, (2013).
14. K. Ueda, M. Nishiwaki, T. Soumiya, K. Kawamoto and H. Asano
“Ferromagnetic Schottky junctions using half-metallic Co₂MnSi/diamond heterostructures”
2013 JSAP-MRSジョイントシンポジウム, Kyoto, Sep.16-20, (2013)
15. K. Ueda and H. Asano
“SrLaVMoO₆ as a Strong Candidate for a Half-metallic Antiferromagnet”
2013 JSAP-MRSジョイントシンポジウム, Kyoto, Sep.16-20, (2013) (招待講演)
16. K. Ueda, M. Nishiwaki, T. Soumiya, K. Kawamoto and H. Asano
“Fabrication of half-metallic Co₂MnSi/diamond Schottky junctions”
International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM), Fukuoka, Sep.24-27, (2013)
17. K. Kawamoto, K. Ueda, M. Nishiwaki, and H. Asano
“High-temperature characteristics of diamond Schottky diodes using various Schottky metals”
International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM), Fukuoka, Sep.24-27, (2013)
18. K. Ueda, T. Soumiya, M. Nishiwaki, K. Kawamoto, T. Miyawaki, H. Asano
“Magnetic Schottky junctions using heterostructures of half-metallic Co₂MnSi/diamond semiconductors”
58th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM), Denver, Nov.4-8, (2013)
19. K. Ueda, K. Tozawa, and H. Asano
“Inversion of magnetoresistance in La_{1-x}Sr_xMnO₃/Nb-doped SrTiO₃/CoFe junctions”
The 19th International Conference on Magnetism with SCES (ICM). Busan, Jul.8-13, (2012) (7/9)
20. K. Kobayashi, K. Ueda, N. Fukatani, H. Kawada, K. Sakuma, and H. Asano

“Fabrication and Characterization of Heusler-alloy/Perovskite Heterostructures”
The 19th International Conference on Magnetism with SCES (ICM). Busan, Jul.8-13, (2012) (7/13)

21. 河本圭太, 植田研二, 宗宮嵩, 浅野秀文
“ダイヤモンド半導体/金属ショットキー接合の高温特性”
2012秋季第73回応用物理学会学術講演会 松山大学 (2012) 9月11-14日(9/13)

22. K. Ueda, T. Soumiya, K. Kawamoto, N. Fukatani, and H. Asano
“Ferromagnetic Heusler/diamond heterostructures for spintronic applications”
International Conference on Diamond and Carbon Materials(ICDCM), Granada, Sep.3-6, (2012) (9/4)

23. K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya, and H. Asano
“High-temperature characteristics of diamond Schottky diodes above 600°C”
International Conference on Diamond and Carbon Materials(ICDCM), Granada, Sep.3-6, (2012) (9/5)

24. K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya, E. Bustarret, and H. Asano
“High temperature operation of diamond Schottky diodes above 750 °C”
International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM), Kyoto, Sep.25-27,(2012) (9/26)

25. T. Soumiya, K. Ueda, K. Kawamoto, N. Fukatani and H. Asano
“Epitaxial growth of half-metallic ferromagnets Co₂MnSi on diamond semiconductors”
International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS), Nara, Oct.2-5, (2012) (P)

26. T. Soumiya, K. Ueda, K. Kawamoto, N. Fukatani, and H. Asano
“Fabrication of diamond/Heusler heterojunctions for spintronic applications”
ISPlasma2013, Nagoya, Jan.28-Feb.1, (2013) (1/29)

27. K. Ueda, K. Kawamoto, T. Soumiya, M. Nishiwaki, and H. Asano
“High temperature characteristics of Schottky diodes using diamond semiconductors”
ISPlasma2013, Nagoya, Jan.28-Feb.1, (2013) (1/30)

28. 宗宮嵩, 植田研二, 西脇雅人, 河本圭太, 宮脇哲也, 浅野秀文

“ダイヤモンド半導体/ハーフメタルCo₂MnSi ショットキー接合の作製”
第60回応用物理学会春季学術講演会 神奈川工科大学 (2013) 3月27-30日(3/27)

29. 河本圭太, 植田研二, 宗宮嵩, 西脇雅人, 宮脇哲也, 浅野秀文
“ダイヤモンドショットキー接合の高温安定性評価”
第60回応用物理学会春季学術講演会 神奈川工科大学 (2013) 3月27-30日(3/27)

〔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 0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
<http://www.numse.nagoya-u.ac.jp/F5/k-ueda/index.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者
植田 研二 ()

研究者番号：10393737

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：

