

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048011

研究課題名（和文）強磁性半導体の特性制御とスピン源への応用

研究課題名（英文）Control of physical properties of ferromagnetic semiconductors and application for spin source

研究代表者 黒田 眞司 (KURODA Shinji)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号：40221949

研究代表者の専門分野：半導体工学

科研費の分科・細目：スピンド

キーワード：スピントロニクス

1. 研究計画の概要

半導体スピントロニクス実現のために必要とされるさまざまな要素技術の中で、スピン偏極した電子の生成はとりわけ重要とされ、そのスピン偏極電子の源となる材料として強磁性となる半導体新材料の開発は必須と見做されている。室温以上の転移温度を持つ強磁性半導体の物質探索が活発に行われているが、本研究課題では、II-VI族半導体にCrを添加した磁性半導体混晶を主たる対象として、強磁性特性の制御・向上とスピン偏極電子源への応用を目指して研究を行っている。我々は(Zn,Cr)Teを対象としたこれまでの研究で、荷電不純物のドーピングにより結晶中のCr組成の分布が変化し、その結果、強磁性特性が大幅に変化することを見出している。とりわけドナー性不純物であるヨウ素のドーピングにより強磁性転移温度 T_c が大幅に上昇した結晶においてはCr分布が不均一となってCrが高濃度に凝集した領域が形成され、このCr凝集領域が強磁性クラスターとしてはたらくことが高い T_c の原因であることを突き止めた。本研究課題では、これらの成果を踏まえ、MBEの成長条件を系統的に変化させることで、(Zn,Cr)Te結晶中のCr凝集領域のサイズ、形状、配置を制御し、強磁性特性が向上した結晶を成長するための条件を探索する。さらにこのような半導体中に強磁性クラスターの存在する複合構造の磁化特性だけでなく電気伝導・磁気光学特性を調べ、スピン偏極電子源としての有用性を検討する。加えて実際に非磁性半導体層とのヘテロ構造からなるスピン注入デバイスを作製し、スピン注入源としての性能評価を行う。

2. 研究の進捗状況

(1) (Zn,Cr)TeにおけるCr凝集ナノカラムの形成

ヨウ素ドーピング(Zn,Cr)TeのMBEによる結晶成長において、種々の成長パラメーターを系統的に変化させ、Cr凝集領域の形成の様子がどのように変化するかを調べた。その結果、成長中の基板温度の上昇によりCr凝集領域の形状が0次元のクラスター形状から1次元のナノカラム状に変化することを見出した。このナノカラムの形成方向は成長面方位により変化し、Cr原子が閃亜鉛鉱(ZB)型構造の{111}面に沿って凝集する傾向があることを示している。磁化測定においては、磁場をナノカラムに対し平行または垂直のどちらの方向に印加するかに応じて磁化の異方性が見られた。

(2) (Zn,Cr)TeにおけるCrの価数変化と強磁性との相関

(Zn,Cr)Teにアクセプター性不純物である窒素をドーピングすると強磁性が抑制されるが、この原因はドーピングに伴うCrの価数変化がCr間の強磁性的相互作用に影響するためと考えられている。このCr価数変化と強磁性特性との相関を定量的に明らかにするため、窒素のドーピング量を変化させた(Zn,Cr)Te薄膜を作製し、磁化特性の変化を調べた。また(Zn,Cr)Teをベースとしたp型変調ドーピングヘテロ構造において、界面に蓄積された2次元正孔による強磁性抑制の効果を明らかにした。

(3) 閃亜鉛鉱型CrTeのMBE成長

ハーフメタルであると理論的に予測される閃亜鉛鉱(ZB)型CrTeの作製を目指し、MBEによる結晶成長を行った。成長中の基板温度

および Cr, Te 分子線供給量比を変化させて成長を行い、結晶構造および磁性を調べた。その結果、Cr, Te の分子線供給量比により結晶構造および磁性が大きく異なることが明らかとなり、部分的に ZB-CrTe が混在した結晶が成長する条件を見出した。

(4) 四元混晶磁性半導体(Cd,Mn,Cr)Te の磁性半導体に 2 種類以上の磁性元素を添加した磁性半導体における磁性を調べることを目的として、CdTe に Mn と Cr を同時に添加した四元系混晶半導体(Cd,Mn,Cr)Te 薄膜を成長し、その磁性を調べた。その結果、Cr を添加しない(Cd,Mn)Te において反強磁性的であった Mn 間の相互作用が、僅かな量の Cr の添加により強磁性的に変化することが明らかとなった。

3. 現在までの達成度

② おおむね順調に進展している。

(理由)

当初の研究計画にあった、(Zn,Cr)Te における Cr 凝集領域形成の制御と強磁性特性の向上の課題に関しては、成長温度によって Cr 凝集領域の形状が制御できることを実証し、ナノカラム状の凝集領域の形成と異方的な磁化特性の実現に成功している。またハーフメタル ZB-CrTe、四元混晶(Cd,Mn,Cr)Te などの(Zn,Cr)Te 以外の新しい材料においても成果を得つつあり、研究はおおむね順調に進展していると言える。

4. 今後の研究の推進方策

本研究課題の研究期間は残り 1 年であるが、研究の進捗状況の項で挙げた(1)~(4)のテーマの研究を引き続き行い、強磁性半導体の特性の制御・向上とスピン源への応用という目標に向かい研究を推進する予定である。

5. 代表的な研究成果

(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 10 件)

1. Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, "Formation of Cr-rich nano-clusters and columns in (Zn,Cr)Te grown by MBE", Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 1183, 1183-FF01-11, 1-6 (2009). (査読有)
2. S. Kuroda, N. Nishizawa, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, K. Osuch, T. Dietl, "Origin and control of high temperature ferromagnetism in semiconductors, Nature Materials **6**, 440-446 (2007). (査読有)

[学会発表] (計 28 件)

1. S. Kuroda, "Controlling size and shape of

ferromagnetic nanocrystals in (Zn,Cr)Te (invited)", 5th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (7-11 July 2009, Kraków, Poland)

2. S. Kuroda, "Control of nanocluster formation and ferromagnetic properties in diluted magnetic semiconductors (invited)", 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29) (7 July-1 August 2008, Rio de Janeiro, Brazil)
3. 黒田 眞司, 西沢 望, 瀧田 宏樹, 三留 正則, 板東 義雄, ディートル トーマス, 「磁性半導体における磁性元素の不均一分布と強磁性特性 (招待講演)」第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008 年 3 月 27 日~30 日、日大理工学部船橋キャンパス)