

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月29日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310070

研究課題名（和文）半導体中の磁性元素凝集ワイヤの自己形成の制御とデバイスへの応用

研究課題名（英文）Control of self-organized formation of magnetic element-rich nanowires in semiconductors and its device application

研究代表者

黒田 眞司 (KURODA SHINJI)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：40221949

研究成果の概要（和文）：半導体中の磁性元素凝集の一例として、II-VI 族ベースの磁性半導体 (Zn,Cr)Te における磁性元素 Cr の凝集についての研究を行った。分子線エピタキシー(MBE)によりドナー性不純物であるヨウ素をドーブした(Zn,Cr)Te 薄膜を成長し、MBE 成長条件を系統的に変化させ成長した一連の試料に対して透過型電子顕微鏡(TEM)と X 線回折(XRD)により構造解析を行い、Cr 凝集の成長条件依存性を調べた。その結果、Cr 凝集の様子は主として結晶中の平均 Cr 組成と成長温度に依存して変化し、特に結晶中の平均 Cr 組成の高い場合には、Cr 凝集は母体半導体とは異なる六方晶構造の微結晶  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  として析出し、その析出量は成長温度と共に増加することが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：As an example of the aggregation of a magnetic element in semiconductors, we have studied the aggregation of Cr in a II-VI magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te. We have grown thin films of (Zn,Cr)Te doped with a donor impurity iodine (I) by molecular beam epitaxy (MBE) and have investigated how the Cr aggregation depends on the growth conditions by performing structural analyses using transmission electron microscope (TEM) and x-ray diffraction (XRD) on a series of samples grown under a systematic variation of the MBE growth conditions. As a result, we have found that the Cr aggregation changes depending on the average Cr composition in the crystal and the growth temperature. In particular, for a high average Cr composition, Cr atoms aggregate into precipitates of  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  nanocrystals of hexagonal structure and the amount of the precipitation increases with the growth temperature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

電子の持つスピンの自由度をエレクトロ

ニクスに利用する「スピントロニクス」が注目を集めている。半導体において電子のスピ

ンを利用したデバイスを実現するためには、スピンを制御するさまざまな要素技術の開発が必要であり、とりわけ半導体にスピンの揃った電子を注入するスピン偏極電子源の開発が必須である。そのためには、半導体でありながら強磁性となる新材料の開発が望まれている。これまで、室温以上の高い転移温度を持つ強磁性半導体の実現を目指し、半導体に遷移元素や希土類元素などの磁性元素を添加した希薄磁性半導体(DMS)を対象とした研究が行われ、母体半導体と磁性元素のさまざまな組み合わせからなる DMS が探索の俎上に乗っている。室温以上の高い強磁性転移温度  $T_C$  を実現するためには、磁性元素を高い濃度で添加することが必要とされるが、その一方で磁性元素を高濃度で添加すると、磁性元素が母体結晶に一緒に固溶せず、磁性元素が局所的に凝集するという現象がさまざまな DMS で報告されている。II-VI 族ベース DMS の(Zn,Cr)Te においても、ドナー性不純物であるヨウ素(I)をドーピングすると数十 nm の大きさの Cr の凝集領域が生じ、 $T_C$  が室温にまで上昇することがこれまでの我々の研究で見出されている。ドナーのドーピングによる Cr 凝集の原因として、我々はドナーあるいはアクセプターのドーピングに伴う磁性元素イオンの価数変化が磁性元素イオンの凝集力に変化を及ぼし凝集を促進するというモデルを考案し、ドーピングにより磁性元素の凝集を制御するという新しいナノ結晶作製手法を提唱した。本研究課題では、これまでの我々の研究の成果を踏まえ、ヨウ素ドーパ(Zn,Cr)Te において、成長条件により Cr 凝集の様子がどのように変化するかを調べ、成長条件により Cr 凝集を人為的に制御し、強磁性転移温度の上昇など強磁性特性を改善することを目指した。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、磁性半導体において磁性元素の凝集を人為的に制御することで強磁

性特性を向上させ、スピン偏極電子源への応用の可能性を探索することを目的として研究を行った。上述のように、我々はこれまでの研究で、(Zn,Cr)Te においてヨウ素のドーピングにより Cr の凝集が生じると共に強磁性転移温度  $T_C$  が大幅に上昇することを見出している。この結果に基づき、分子線エピタキシー(MBE)により成長したヨウ素ドーパ(Zn,Cr)Te で成長条件を系統的に変化させ成長した試料の Cr 凝集の様子を詳細に調べることにより、Cr 凝集を成長条件により人為的に制御し、強磁性特性を改善・向上させることを目指した。

## 3. 研究の方法

ヨウ素ドーパ(Zn,Cr)Te の成長は固体ソース MBE により行った。GaAs(001)または(111)面の基板上に ZnTe 緩衝層を介して、厚さ 300nm 程度のヨウ素ドーパ(Zn,Cr)Te 薄膜を成長した。成長条件により Cr 凝集の様子と磁性がどのように変化するかを調べるため、MBE 成長における種々のパラメーター — Cr の分子線供給量、成長中の基板温度、Zn と Te の分子線供給量比、成長速度、成長面方位 — を系統的に変化させて成長した一連の試料を用意し、X 線回折(XRD)、透過電子顕微鏡(TEM)による詳細な結晶構造解析、および SQUID による磁化特性の評価を行った。TEM 観察では、イオンスライサーにより厚さ数 10nm に薄片化した断面観察試料に対し、物質・材料研究機構の原子識別電子顕微鏡を用いて結晶構造および組成の分析を行った。組成分析にはエネルギー分散 X 線スペクトル(EDS)および電子エネルギー損失スペクトル(EELS)を用い、結晶中の Cr 組成分布および結晶構造との相関を調べた。

## 4. 研究成果

MBE 成長時の種々の成長パラメーターを変化させ成長したヨウ素ドーパ(Zn,Cr)Te 薄膜に対する TEM を用いた結晶構造解析の結

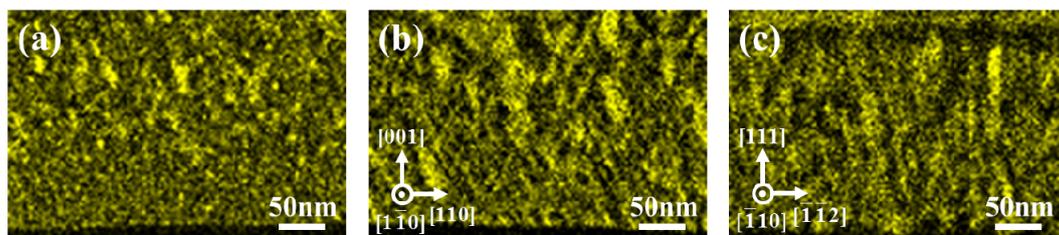


図 1: EDS マッピングにより得られたヨウ素ドーパ(Zn,Cr)Te (Cr 組成約 20%)薄膜断面の Cr 組成分布像。(a)は基板温度  $T_S = 300^\circ\text{C}$  で(001)面上に成長、(b)は  $T_S = 360^\circ\text{C}$  で(001)面上に成長、(c)は基板温度  $T_S = 360^\circ\text{C}$  で(111)B 面上に成長した薄膜の分布像を示す。

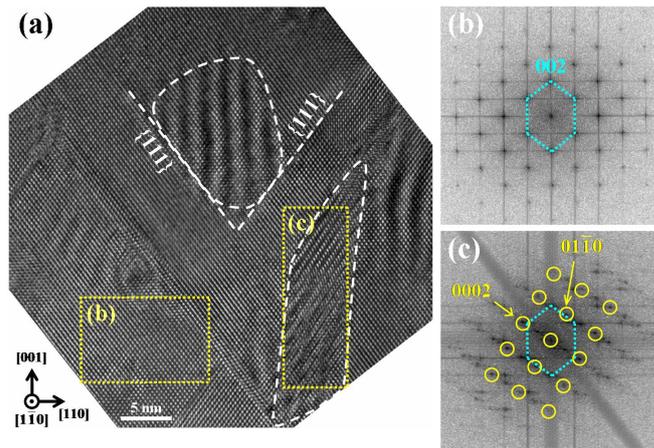


図 2: ヨウ素ドープ  $\text{Zn}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}\text{Te}$  薄膜の(a) 断面 TEM 像と(b), (c) FFT 像。(a)の格子像ではモワレ縞の現れる領域(上部の白波線で囲った領域)や異なる結晶構造からなる領域(下部の白波線領域)が見られる。(b), (c) は(a)の格子像中の黄線で囲った領域(b), (c) の FFT 像。回折パターンより(b)の領域は六方晶構造からなることが分かる。

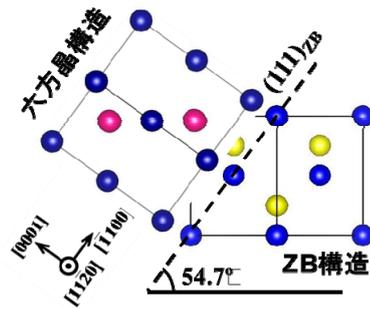


図 3: 母体の  $\text{ZnTe}$  中に析出する六方晶  $\text{Cr}_{1-x}\text{Te}$  と母体の  $\text{ZB}$  構造との方位関係を表す模式図。六方晶の  $c$  面が  $\text{ZB}$  構造の  $(111)\text{A}$  面に平行となるような一定の方位関係を保って析出する。

果、成長パラメーターのうちとりわけ  $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$  層成長中の基板温度が  $\text{Cr}$  凝集に大きな影響を与えることが判明した。 $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$  層中の平均の  $\text{Cr}$  組成が 5%程度と比較的低い場合には、基板温度  $T_s$  により  $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$  層の結晶性に変化が見られた。基板温度が  $T_s = 270\sim 300^\circ\text{C}$  と比較的低温の範囲では、 $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$  の結晶中に閃亜鉛鉱( $\text{ZB}$ )型構造の  $\{111\}$ 面に沿った積層欠陥が多く見られていたのが、基板温度が  $T_s = 360\sim 390^\circ\text{C}$  と高温になると、積層欠陥は消えて結晶構造はほぼ完全な  $\text{ZB}$  型となり、 $T_s$  の上昇により結晶性が改善することが判明した。EDS による  $\text{Cr}$  分布観察では、 $T_s$  によらず  $\text{Cr}$  の凝集が生じているが、分布の偏りは  $T_s$  の上昇により僅かながら減少するように見えた。

一方、平均  $\text{Cr}$  組成が 20%程度と高い場合は、基板温度に係わらず  $\text{Cr}$  の凝集が見られたが、凝集領域の形状が基板温度によって異なることが判明した。基板温度  $T_s = 300^\circ\text{C}$  の場合には  $\text{Cr}$  凝集領域の形状は孤立したクラスター状となっているのに対し(図 1 (a))、基板温度が  $T_s = 360^\circ\text{C}$  になると  $\text{Cr}$  凝集領域の形状は細長いストライプ状に変化する(図 1 (b), (c))。この  $\text{Cr}$  凝集領域のストライプは、成長面方位が  $(001)$ 面の場合には成長面に対して約  $55^\circ$ の傾きをなしており(図 1 (b))、このことから  $\text{Cr}$  は母体の  $\text{ZB}$  構造の  $\{111\}$ 面に沿って凝集する傾向があると判断される。成長面方位を  $(111)$ 面にすると、この  $\text{Cr}$  凝集領域のストライプの方向は成長面に対しほぼ垂

直な方向に変化する(図 1 (c))。これらの  $\text{Cr}$  凝集領域の結晶構造を高倍率の TEM 観察で詳しく調べたところ、モワレ縞や母体と異なる結晶構造の領域が見られ(図 2(a))、これらは回折像の解析から六方晶構造であることが判明し(図 2(c))、さらに EELS 像との比較からこれらの領域が高  $\text{Cr}$  組成に対応することが明らかとなった。以上の結果より、 $\text{Cr}$  凝集は  $\text{NiAs}$  型構造の  $\text{CrTe}$  または  $\text{Cr}$  欠損の生じた  $\text{Cr}_{1-x}\text{Te}$  の微結晶の析出によるものであり、これらの微結晶は六方晶構造の  $c$  面が母体の  $\text{ZB}$  構造の  $(111)\text{A}$  面と平行という一定の方位関係を保って析出している(図 3)と結論づけられる。さらにこの方位関係を利用して、X 線回折測定により六方晶の微結晶からの回折を検出し、回折強度から六方晶析出物の量を評価することを試みた。その結果、六方晶の析出量は基板温度  $T_s$  に伴い増大することが明らかになった。

磁化特性の方は、同じ一連の試料に対する磁化測定を行い、Arrott Plot から強磁性転移温度  $T_C$  を、零磁場冷却下での磁化の温度依存性からブロッキング温度  $T_B$  を導き、同じく基板温度  $T_s$  に対する依存性を調べた。その結果、 $T_C$  は  $T_s$  によらずほぼ一定であるのに対し、 $T_B$  は  $T_s = 330\sim 390^\circ\text{C}$  の高い温度範囲では  $T_s$  と共に上昇し、六方晶  $\text{Cr}_{1-x}\text{Te}$  の析出量と相関があることが確認された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件、すべて査読有)

1. H. Kobayashi, Y. Nishio, K. Kanazawa, S.

- Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, "Structural analysis of the phase separation in magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", *Physica B* **407**, 2947-2949 (2012), doi: 10.1016/j.physb.2011.08.023.
2. K. Ishikawa, S. Kuroda, "MBE growth and magnetic properties of quaternary magnetic semiconductor (Cd,Mn,Cr)Te", *Physics of Semiconductors*, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, AIP Conference Proceedings vol. 1399, (2011), doi: 10.1063/1.3666572.
  3. Y. Yamazaki, T. Kataoka, V. R. Singh, A. Fujimori, F. -H. Chang, D. -J. Huang, H. -J. Lin, C. T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda, "Effect of co-doping of donor and acceptor impurities in the ferromagnetic semiconductor  $Zn_{1-x}Cr_xTe$  studied by soft x-ray magnetic circular dichroism", *Journal of Physics: Condensed Matter* **23**, 176002, 1-4 (2011), doi: 10.1088/0953-8984/23/17/176002
  4. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto, "Exciton dynamics in CdTe/ZnTe quantum structures", *Physica Status Solidi (b)* **248**, 389-392 (2010), doi: 10.1002/pssb.201000805.
  5. 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", *Novel Materials and Devices for Spintronics*, Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 1183, 9-14 (2010), doi: 10.1557/PROC-1183-FF01-11.
  6. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto, "Anisotropic spin dynamics of confined electrons in CdTe/ZnTe quantum structures", *Physical Review B* **81**, 125313, 1-10 (2010), doi: 10.1103/PhysRevB.81.125313.
  7. Y. C. Cho, S. J. Kim, S. Lee, S. J. Kim, C. R. Cho, H. H. Nahm, C. H. Park, I. K. Jeong, S. Park, T. E. Hogn, S. Kuroda, S. Y. Jeong, "Reversible ferromagnetic spin ordering governed by hydrogen in Co-doped ZnO semiconductor", *Applied Physics Letters* **95**, 172514, 1-3 (2009), doi: 10.1063/1.3257733.
  8. H. Ofuchi, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, "Fluorescence XAFS analysis of local structures in iodine-doped  $Zn_{1-x}Cr_xTe$ ", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **190**, 012103, 1-4 (2009), doi: 10.1088/1742-6596/190/1/012103.
  9. K. Ishikawa, N. Nishizawa, S. Kuroda, H. Ikeda, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, "Inhomogeneous Cr distribution and superparamagnetic behavior in magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", *Physics of Semiconductors*, AIP Conference Proceedings vol. 1199, 419-420 (2009), doi: 10.1063/1.3295482.
- [学会発表] (計 40 件)
- ◎ 国際会議
1. S. Kuroda, "Structural and compositional phase separation in ferromagnetic semiconductor (Zn,Cr)Te (*invited*)", Joint Polish-Japanese Workshop Spintronics - from new materials to applications (16 November 2011, Warsaw, Poland).
  2. H. Kobayashi, Y. Nishio, K. Ishikawa, K. Kanazawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, "Structural and compositional phase separation in ferromagnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM-56) (31 October 2011, Scottsdale, USA).
  3. N. Matsumoto, K. Kanazawa, S. Kuroda, "Giant Zeeman splitting in the magneto-reflectance spectra of a diluted magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012) (30 September 2011, Nagoya, Japan).
  4. N. Sekita, Y. Nishio, K. Ishikawa, K. Kanazawa, S. Kuroda, M. Mitome, and Y. Bando, "Structural and magnetic properties of a binary compound CrTe grown on different materials", 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH6) (5 August 2011, Matsue, Japan).
  5. H. Kobayashi, Y. Nishio, K. Ishikawa, K. Kanazawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, "Structural and magnetic properties of phase-separated (Zn,Cr)Te", 5th International Workshop on Spin Currents (27 July 2011, Sendai, Japan).
  6. S. Kuroda, "Phase separation in magnetic semiconductors: Coherent aggregation of magnetic ions vs. precipitation of magnetic nanoclusters (*invited*)", 26th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-26) (22 July 2011, Nelson, New Zealand).
  7. K. Ishikawa and S. Kuroda, "Magnetic properties of quaternary magnetic semiconductor (Cd,Mn,Cr)Te grown by

- MBE”, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010) (23 September 2010, Tokyo, Japan).
8. S. Kuroda, “Search for high-temperature ferromagnetic semiconductors and application for semiconductor spintronics (*invited*)”, 4th AEARU Workshop "Advanced Materials Science Workshop on Artificial and Self-Organized Nanostructure Sciences and Nano-Technologies for the Sustainable World" (30 August 2010, Tsukuba, Japan).
  9. Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, “Structural and magnetic properties of binary compound CrTe grown on ZnTe(001) by MBE”, 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (2 August 2010, Tokyo, Japan).
  10. K. Zhang, H. Oikawa, K. Ishikawa, S. Kuroda, “Effect of acceptor co-doping in magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te”, 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (2 August 2010, Tokyo, Japan).
  11. H. Ofuchi, Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, “Structural characterization of metastable zinc-blende CrTe by fluorescence X-ray absorption fine structure”, 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (2 August 2010, Tokyo, Japan).
  12. K. Ishikawa, S. Kuroda, “MBE growth and magnetic properties quaternary magnetic semiconductor (Cd,Mn,Cr)Te”, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010) (26 July 2010, Seoul, Korea).
  13. S.-J. Kim, Y. C. Cho, S. H. Lee, S. K. Park, C. H. Park, I. K. Jeong, S. Kuroda, S.-Y. Jeong, “Hydrogen mediated ferromagnetic switching effect in Co-doped ZnO semiconductor” 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010) (26 July 2010, Seoul, Korea).
  14. Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, “Formation of Cr-rich Columnal Regions in Magnetic Semiconductor (Zn,Cr)Te”, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009) (8 October 2009, Sendai, Japan).
  15. Y. Nishio, K. Zhang, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, and Y. Bando, “Formation of Cr-rich nano-clusters and nano-columns in ferromagnetic semiconductor (Zn,Cr)Te”, 14th International Conference on II-VI Compounds (24 August 2009, St. Petersburg, Russia).
  16. 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 (SPINTECH-V) (9 July 2009, Kraków, Poland).
  17. S. Kuroda, K. Ishikawa, K. Zhang, Y. Nishio, M. Mitome, Y. Bando, “Formation of Cr-rich nano-clusters and columns in (Zn,Cr)Te grown by MBE”, Materials Research Society (MRS) Spring Meeting (13 April 2009, San Francisco, USA).
- ◎ 国内学会
18. 関田 直也, 西尾 陽太郎, 山脇 和真, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「CdTe(001)上に MBE 成長した二元化合物 CrTe 構造特性の成長条件依存性」第 59 回 応用物理学関係連合講演会(2012 年 3 月 17 日 早稲田大学 早稲田キャンパス)
  19. 小林 広明, 西尾 陽太郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)Te における Cr 凝集領域の形成と磁化特性」第 59 回 応用物理学関係連合講演会(2012 年 3 月 17 日 早稲田大学 早稲田キャンパス)
  20. 松本 直也, 加藤 達典, 金澤 研, 黒田 眞司 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)Te の磁気光学特性」第 59 回 応用物理学関係連合講演会(2012 年 3 月 17 日 早稲田大学 早稲田キャンパス)
  21. 中村 和広, 古田 敦, 金澤 研, 黒田 眞司 「MBE による(Cd,Mn)Te 自己形成ドット作製における成長速度制御と磁気光学特性」第 59 回 応用物理学関係連合講演会(2012 年 3 月 17 日 早稲田大学 早稲田キャンパス)
  22. 小林 広明, 西尾 陽太郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)Te における Cr 凝集領域の形成と結晶構造」第 16 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-16) (2011 年 11 月 28 日 東京工業大学博物館・百年記念館)
  23. 松本 直也, 加藤 達典, 金澤 研, 黒田 眞司 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)Te の磁気光学特性」第 16 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-16) (2011 年 11 月 28 日 東京工業大学博物館・百年記念館)
  24. 金澤 研, 吉田 昭二, 重川 秀実, 黒田 眞司 「STM による希薄磁性半導体

- (Zn,Cr)Teの局所電子状態観察」第16回半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-16)(2011年11月28日 東京工業大学博物館・百年記念館)
25. 小林 広明, 西尾 陽太郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)TeにおけるCr凝集領域の形成と結晶構造 II」第72回応用物理学会学術講演会(2011年9月1日 山形大学)
  26. 松本 直也, 金澤 研, 黒田 眞司 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)Teの磁場中反射スペクトル測定」第72回応用物理学会学術講演会(2011年9月1日 山形大学)
  27. 西尾 陽太郎, 関田 直也, 石川 弘一郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「二元化合物 CrTeのMBE成長における下地層の影響」第58回 応用物理学関係連合講演会(2011年3月25日 神奈川工科大学)
  28. 小林 広明, 西尾 陽太郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「希薄磁性半導体(Zn,Cr)TeにおけるCr凝集領域の形成と結晶構造」第58回 応用物理学関係連合講演会(2011年3月25日 神奈川工科大学)
  29. Y. Yamazaki, T. Kataoka, V. R. Singh, A. Fujimori, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda, “Effect of co-doping of donor and acceptor impurities in the ferromagnetic semiconductor  $Zn_{1-x}Cr_xTe$  studied by soft x-ray magnetic circular dichroism”, 第15回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-15)(2010年12月20日 筑波大学)
  30. 及川 晴義, 黒田 眞司 「強磁性半導体(Zn,Cr)Teのp型変調ドーパヘテロ構造の磁化特性」第15回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-15)(2010年12月20日 筑波大学)
  31. 石川 弘一郎, 黒田 眞司 「四元混晶半導体(Cd,Mn,Cr)TeのMBE成長と磁化・磁気光学特性」第15回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-15)(2010年12月20日 筑波大学)
  32. 西尾 陽太郎, 石川 弘一郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「CdTe(001)上へMBE成長した二元化合物 CrTeの構造と磁化特性」第15回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-15)(2010年12月20日 筑波大学)
  33. 西尾 陽太郎, 石川 弘一郎, 金澤 研, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「二元化合物 CrTeのCdTe(001)上へのMBE成長と結晶構造解析」第71回応用物理学会学術講演会(2010年9月14日 長崎大学 文教キャンパス)
  34. 張 珂, 及川 晴義, 石川 弘一郎, 黒田 眞司 「(Zn,Cr)Teにおけるアクセプターのドーピングによる強磁性抑制の効果」第71回応用物理学会学術講演会(2010年9月15日 長崎大学 文教キャンパス)
  35. 西尾 陽太郎, 石川 弘一郎, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「ZnTe(001)上にMBE成長した二元化合物 CrTeの構造と磁化特性」第57回応用物理学関係連合講演会(2010年3月17日 東海大学湘南キャンパス)
  36. 石川 弘一郎, 黒田 眞司 「四元混晶半導体(Cd,Mn,Cr)TeのMBE成長と磁化特性」第57回応用物理学関係連合講演会(2010年3月17日 東海大学湘南キャンパス)
  37. 石川 弘一郎, 黒田 眞司 「(Cd,Mn,Cr)Te薄膜における磁気特性のCr組成依存性」第14回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-14)(2009年12月21日 慶應義塾大学日吉キャンパス)
  38. 西尾 陽太郎, 石川 弘一郎, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「MBEによる閃亜鉛鉱型 CrTeの成長と磁化特性」第14回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-14)(2009年12月21日 慶應義塾大学日吉キャンパス)
  39. 野澤 伸介, 富本 慎一, 寺井 慶和, 黒田 眞司, 瀧田 宏樹, 舛本 泰章 「時間分解カー回転法を用いたCdTe/ZnTe量子構造中の閉じ込め電子のg因子の符号決定」第70回応用物理学会学術講演会(2009年9月8日 富山大学)
  40. 西尾 陽太郎, 石川 弘一郎, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「MBEによる閃亜鉛鉱型 CrTeの成長と磁化特性」第70回応用物理学会学術講演会(2009年9月10日 富山大学)
- 〔産業財産権〕  
 ○取得状況(計1件)  
 名称: 荷電制御強磁性半導体  
 発明者: 黒田 眞司、西沢 望、尾崎 信彦、瀧田 宏樹  
 権利者: 筑波大学  
 種類: 特許  
 番号: 4446092  
 取得年月日: 2010年1月29日  
 国内外の別: 国内
6. 研究組織  
 (1) 研究代表者  
 黒田 眞司 (KURODA SHINJI)  
 筑波大学・数理物質系・教授  
 研究者番号: 40221949