

機関番号：12102

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 the physical properties of ferromagnetic semiconductors and its application to spin-polarized electron 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

研究成果の概要（和文）：半導体へのスピン注入源の実現を目的とし、II-VI 族ベースの磁性半導体を対象とした材料探索および強磁性特性の制御・向上を目指した研究を行った。(Zn,Cr)Te における磁性元素 Cr の凝集に着目し、結晶成長時の種々の条件により Cr 凝集および磁化特性を制御することを目指した。その結果、Cr 凝集領域の形成は成長温度により制御できることが示された。さらに二元化合物 CrTe、四元混晶(Cd,Mn,Cr)Te を対象とした研究も行い、強磁性の振舞いを見出した。

研究成果の概要（英文）：Aiming at realization of the source of spin injection into semiconductors, we have performed studies for material search of magnetic semiconductors based on II-VI compounds and control and improvement of ferromagnetic properties. Taking the Cr aggregation in (Zn,Cr)Te as a target of our study, we have tried to control the details of Cr aggregation and magnetic properties by changing various conditions of the crystal growth. As a result, we have succeeded in controlling the formation of Cr-aggregated regions by the growth temperature. In addition, we have studied a binary compound CrTe and a quaternary compound (Cd,Mn,Cr)Te and have observed ferromagnetic behaviors in these materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
2007 年度	7,600,000	0	7,600,000
2008 年度	9,900,000	0	9,900,000
2009 年度	9,900,000	0	9,900,000
2010 年度	7,000,000	0	7,000,000
年度			
総 計	34,400,000	0	34,400,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：

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、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希薄磁性半導体(DMS)を対象とした研究が行われ、そのうちのいくつかの組み合わせでは実際に室温強磁性の発現が報告されている。しかしながら同一の物質で強磁性を否定する実験結果の報告例があるなど、DMS の固有の性質としての強磁性発現の正否ははっきりせず、また強磁性発現のメカニズムも明らかになっていないケースが多い。同一物質で相矛盾する結果が生じる原因としては、結晶中の異相析出物の有無が最も考えやすいが、それ以外にも結晶中の磁性元素の分布の違いも重要な要因と考えられる。磁性元素の分布に偏りが生じ局所的に凝集することにより、高い温度での強磁性が発現する例は既にいくつかの物質で報告があり、我々の II-VI 族ベース DMS の(Zn,Cr)Te を対象とした研究においても同様の現象を見出していた。すなわち、(Zn,Cr)Te にドナー不純物となるヨウ素を添加すると結晶中での Cr の凝集が生じ、強磁性転移温度が大幅に上昇する。本研究課題では、これらの成果を踏まえ、分子線エピタキシー(MBE)法による薄膜結晶成長において(Zn,Cr)Te 中の Cr の凝集を成長条件により制御し、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。さらに II-VI 族ベースの DMS の他の材料も研究対象として、優れた強磁性特性を有し、スピン偏極電子源に適した新材料の開拓することを目的とした。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、将来の半導体スピントロニクス要素技術の一つである電子のスピン制御を目指し、II-VI 族ベースの DMS を対象として、強磁性物質の材料探索、特性の制御・向上およびスピン偏極電子源への応用への可能性を探った。上述のように、我々はこれまでの研究で、(Zn,Cr)Te 中の Cr 分布の偏りと強磁性転移温度  $T_C$  の間には相関があり、ヨウ素をドープした結晶では 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た。これらの研究成果に基づき、MBE 成長における種々の条件により結晶中の Cr 凝集領域の形成を制御し、強磁性特性を改善・向上させ、スピン注入源に適した特性の発現を目指した。それに加え、(Zn,Cr)Te における Cr 組成 100%の極限に対応する二元化合物 CrTe、および II-VI 族半導体 CdTe に二種類の磁性元素 Mn, Cr を同時に添加した四元混晶(Cd,Mn,Cr)Te を対象とし、MBE により成長した薄膜結晶の構造、磁性を調べ、これらの新奇な系における強磁性発現とスピン注入源への応用可能性を探った。

## 3. 研究の方法

本研究で対象とした(Zn,Cr)Te をはじめと

する II-VI 族ベース DMS の薄膜結晶は、固体ソース MBE により成長した。多くの場合、基板には GaAs(001)または(111)基板を用い、ZnTe または CdTe の緩衝層を介しその上に目的とする DMS 層を積層した。ヨウ素のドーピングには、 $\text{CdI}_2$  をヨウ素源として用いた。成長した DMS 薄膜における磁性元素の組成は電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA)により評価した。また結晶性評価には試料断面の透過型電子顕微鏡(TEM)観察を行い、また同時にエネルギー分散型 X 線スペクトルスコピー(EDS)およびエネルギー損失スペクトルスコピー(EELS)によりナノスケールでの局所的な組成分布を調べた。DMS 層全体の磁化測定は超伝導磁束量子干渉計(SQUID)により行い、主として薄膜の成長面に垂直に磁場を印加した配置での磁化を測定し、その印加磁場、温度に対する依存性を解析することにより、系の磁性の特徴的な振舞いを調べた。

## 4. 研究成果

### (1) (Zn,Cr)TeにおけるCr凝集の制御

これまでの我々の研究により、(Zn,Cr)Te にヨウ素をドーピングすると結晶中の Cr の分布に偏りが生じ、Cr が高濃度に凝集することで強磁性転移温度  $T_C$  が大幅に上昇するなど強磁性特性が著しく改善されることが明らかになっている。本研究課題では、これらの成果を踏まえ、(Zn,Cr)Te における Cr 分布と磁性が結晶成長条件によりどのように変化するかを調べるため、MBE 成長時の種々の成長パラメーター — 成長中の基板温度、フラックス量、成長速度、成長面方位 — を広い範囲に亘って変化させた一連のヨウ素ドープ(Zn,Cr)Te 薄膜を成長し、TEM/EDS 分析ならびに磁化測定を行った。その結果、種々の成長パラメーターのうちとりわけ(Zn,Cr)Te 層成長中の基板温度が成長薄膜の結晶性ならびに Cr 分布に大きな影響を及ぼすことを見出した。 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$  の平均の Cr 組成  $x$  が  $x \sim 0.05$  と比較的低い場合には、基板温度  $T_S$  により(Zn,Cr)Te 層の結晶性に変化が見られた。基板温度  $T_S = 270 \sim 300^\circ\text{C}$  付近の比較的低温では結晶中に閃亜鉛鉱(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、 $T_S = 360 \sim 390^\circ\text{C}$  に上昇すると結晶構造ほぼ完全な ZB 型となり、 $T_S$  の上昇により結晶性が大幅に改善することが明らかとなった。EDS による Cr 分布像観察では、 $T_S$  によらず 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Cr組成が  $x \sim 0.2$  と高くなると、基板温度  $T_S$  によりCr凝集領域の形状が変化するという現象が見られた。 $T_S = 300^\circ\text{C}$  では個々のCr凝集領域はほぼ等方的なクラスター形状をしているが(図1(a))、 $T_S$  が  $360^\circ\text{C}$  と高くな

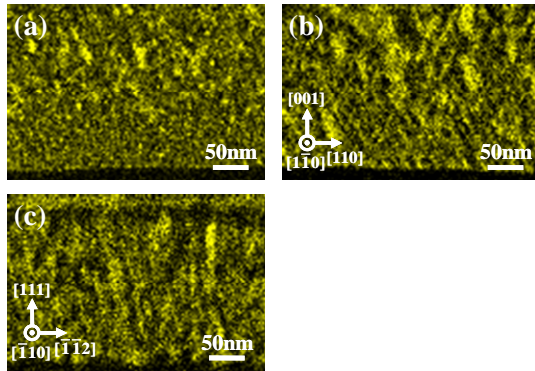


図 1: EDS マッピングにより得られたヨウ素ドーパド  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$  ( $x \sim 0.2$ ) 薄膜断面の Cr の分布像。各試料の成長中の基板温度  $T_s$  および成長面方位は、(a) (001)面,  $T_s = 300^\circ\text{C}$ , (b) (001)面,  $T_s = 360^\circ\text{C}$ , (c) (111)面,  $T_s = 360^\circ\text{C}$ 。

ると斜め方向に伸びた細長い形状に変化している。この細長い Cr 凝集領域の長手方向は成長面方位により変化し、成長面方位が (001) 面ときは成長面に対して斜め方向であるのに対し (図 1(b)), (111) 面では成長面に対し垂直に近い角度となっており (図 1(c))、これらの結果は Cr 凝集領域が母体の ZB 構造の {111} 面に沿って形成されることを示唆している。さらにイオンミリングにより薄片化した断面試料に対し TEM と EELS 像との比較により高 Cr 組成領域の結晶構造を詳細に調べた結果、Cr 凝集領域は母体の ZB 構造と異なる六方晶の Cr 化合物の析出による可能性が高いことが判明した。このような細長い形状の Cr 凝集領域が形成されている試料の磁化特性は、磁化の温度依存性に現れるブロッキング温度が高く、かつ磁化の大きさが磁場の印加方向により異なるという異方性が観測された。

## (2) 二元化合物 $\text{CrTe}$ の作製と磁性

遷移金属カルコゲナイドの一種である  $\text{CrTe}$  のスピントロニクス材料としての応用可能性を探るため、MBE による結晶成長と磁気特性の評価を行った。 $\text{CrTe}$  のバルク結晶における安定相は  $\text{NiAs}$  型構造である一方、 $(\text{Zn,Cr})\text{Te}$  の Cr 組成 100% の極限に対応する ZB 型  $\text{CrTe}$  は理論研究によりハーフメタルと予測され、スピン偏極電子源の材料として期待されている。本研究では MBE により  $\text{GaAs}(001)$  基板上に緩衝層として  $\text{ZnTe}$  または  $\text{CdTe}$  を積層し、その上に  $\text{CrTe}$  層を成長した。 $\text{CrTe}$  層の成長条件として、Cr と Te の分子線供給量比  $\text{Cr/Te}$  および基板温度  $T_s$  を変化させて成長した薄膜の結晶構造を調べたところ、下地の緩衝層物質と成長条件により以下のような違いが生じることが明らかとなった。 $\text{ZnTe}$  上に成長した  $\text{CrTe}$  層では、分子線供給量比がストイキオメトリーに近い条件 ( $\text{Cr/Te} \sim 1$ ) では bcc 構造の Cr 金属が形成されやすく、基板温度によっては ZB- $\text{CrTe}$  と bcc-Cr が混在

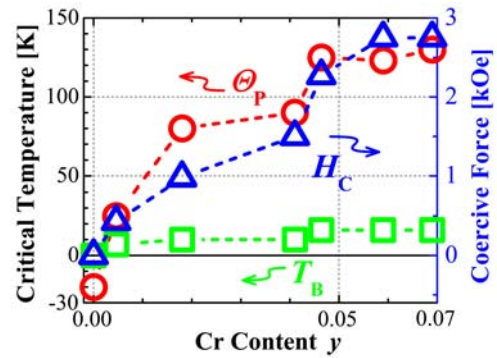


図 2:  $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Cr}_y\text{Te}$  ( $x \sim 0.2$ ) 薄膜における磁性の振舞いを表す特徴的な温度  $T_B$ ,  $\Theta_P$  の Cr 組成  $y$  に対するプロット。 $T_B$  は磁化の温度依存性でピークとして現れるブロッキング温度、 $\Theta_P$  は磁化率の逆数の温度依存性 ( $\chi^{-1}$ - $T$  曲線) の Curie-Weiss 則へのフィッティングより求められる常磁性キュリー温度を表す。2K での磁化曲線における保磁力  $H_C$  も併せて示す。

した相が見られる一方、Te 過剰の条件 ( $\text{Cr/Te} \sim 0.1$ ) では六方晶の  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  が  $c$  面が成長面に対して大きく傾いた配置で積層される。それに対し、 $\text{CdTe}$  上に成長した  $\text{CrTe}$  では、分子線供給量比がストイキオメトリー、Te 過剰のどちらの条件でも、六方晶の  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  が  $c$  面が成長面に平行な配置で積層されることがわかった。磁化特性も下地の緩衝層が  $\text{ZnTe}$  と  $\text{CdTe}$  のどちらであるかによって異なる特性を示し、 $\text{CdTe}$  上に成長した  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  層は  $\text{ZnTe}$  上に成長したものとは異なり、磁化曲線に明瞭な矩形のヒステリシスが観察された。また強磁性転移温度  $T_C$  は  $\text{ZnTe}$  上に成長した  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  層ではほぼ 300K と一定であったのに対し、 $\text{CdTe}$  上に成長した  $\text{Cr}_{1-\delta}\text{Te}$  層では成長条件により 100K ~ 200K の間で変化した。

## (3) 四元混晶 DMS ( $\text{Cd,Mn,Cr})\text{Te}$ における強磁性発現

これまでの DMS の研究においては、半導体に一種類の磁性元素のみを添加した三元系の研究ほとんどで、二種類以上の磁性元素を同時に添加した四元系 DMS の研究は未踏の領域であった。本研究では II-VI 族半導体  $\text{CdTe}$  に Mn, Cr の二種類の磁性元素を添加した四元混晶 DMS の MBE 成長と磁気特性の評価を行った。 $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Cr}_y\text{Te}$  の Mn 組成  $x$  は  $x \sim 0.2$  に固定し、Cr 組成  $y$  を  $y = 0 \sim 0.07$  の間で変化させた一連の試料に対し磁化測定を行った。その結果、Cr を含まない ( $\text{Cd,Mn})\text{Te}$  は常磁性であるのに対し、Cr を添加した薄膜では磁化曲線にヒステリシスが現れ、強磁性となることがわかった。磁化率の逆数  $\chi^{-1}$  の温度に対するプロット ( $\chi^{-1}$ - $T$  曲線) を Curie-Weiss 則にフィッティングすることにより求められる常磁性キュリー温度  $\Theta_P$  は、Cr を含まない試料では負の値 ( $\Theta_P = -20\text{K}$ ) である

のに対し、僅かな量の Cr 添加により正の値 ( $\Theta_p = 25\text{K}$ ) に転じ(図 2)、Mn スピン間の結合が反強磁性から強磁性へと変化したことを示している。このように Mn 間の相互作用が少量の Cr の添加によって反強磁性から強磁性に転じたことから、Mn と Cr 間に強磁性的な相互作用がはたらくことが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)(すべて査読有)

1. K. Ishikawa, S. Kuroda, “MBE growth and magnetic properties of quaternary magnetic semiconductor (Cd,Mn,Cr)Te”, Physics of Semiconductors, AIP Conference Proceedings, *in press*.
2. 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  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$  studied by soft x-ray magnetic circular dichroism”, Journal of Physics: Condensed Matter **23**, 176002, 1-4 (2011).
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. H. Ofuchi, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, “Fluorescence XAFS analysis of local structures in iodine-doped  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ ”, Journal of Physics: Conference Series vol. 190, 012103, 1-4 (2009).
8. 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).
9. N. Nishizawa, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, “Correlation between Cr Distribution and Ferromagnetism in Iodine-Doped (Zn,Cr)Te”, Journal of the Korean Physical Society **53**, 2917-2920 (2008).
10. J. W. Lee, S. Kuroda, K. Takita, F. Takano, H. Akinaga, “Consistent anisotropic behaviors between the magnetic and the magneto-optical properties in  $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$  thin films”, Journal of the Korean Physical Society **53**, 309-312 (2008).
11. F. Takano, T. Nishizawa, J. W. Lee, S. Kuroda, Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Akinaga, “Magneto-optical properties of n-type modulation-doped (Cd,Cr)Te quantum well”, Physica E **40**, 1166-1168 (2008).
12. N. Nishizawa, S. Kuroda, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, “Correlation between ferromagnetism and cluster formation in (Zn,Cr)Te co-doped with charge impurities”, Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 999, 0999-K06-11 (2007).
13. H. Ofuchi, N. Ozaki, N. Nishizawa, H. Kinjo, S. Kuroda, K. Takita, “Fluorescence XAFS study on local study around Cr atoms doped in ZnTe”, AIP Conference Proceedings vol. 882 “X-ray Absorption Fine Structure – XAFS13: 13th International Conference”, 517-519 (2007).
14. 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).
15. F. Takano, T. Nishizawa, H. Kinjo, J. W. Lee, S. Kuroda, H. Ofuchi, Y. Imanaka, T. Takamasu, G. Kido, K. Takita, H. Akinaga, AIP Conference Proceedings vol. 893 “Physics of Semiconductors: 28<sup>th</sup> International Conference on the Physics Semiconductors -- ICPS 2006”, pp.1193 -1194 (2007).
16. H. Ofuchi, N. Ozaki, N. Nishizawa, H. Kinjo, S. Kuroda, K. Takita, “Fluorescence XAFS study on local study around Cr atoms doped in ZnTe”, AIP Conference Proceedings vol. 882 “X-ray Absorption Fine Structure – XAFS13: 13<sup>th</sup> International Conference”, pp. 517-519 (2007).
17. N. Nishizawa, S. Marcet, N. Ozaki, S. Kuroda, K. Takita, “Magneto-optical study of ferromagnetic semiconductor (Zn,Cr)Te”, physica status solidi (c) **3**, 4102-4105 (2007).

〔学会発表〕(計 5 1 件)

### ◎ 国際会議

1. 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, University of Tokyo).
2. 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, University of Tsukuba).
3. Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, "Structural and magnetic properties of binary compound CrTe grown on ZnTe(001) by MBE", The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (2 August 2010, University of Tokyo).
  4. K. Zhang, H. Oikawa, K. Ishikawa, S. Kuroda, "Effect of acceptor co-doping in magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (2 August 2010, University of Tokyo).
  5. H. Ofuchi, Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, "Structural characterization of metastable zinc-blende CrTe by fluorescence X-ray absorption fine structure", The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (2 August 2010, University of Tokyo).
  6. 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, COEX, Seoul, Korea).
  7. Y. Nishio, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome and 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).
  8. 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).
  9. 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).
  10. 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).
  11. S. Kuroda, K. Ishikawa, M. Mitome, Y. Bando, "Inhomogeneous Cr distribution and superparamagnetic properties of (Zn,Cr)Te", 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM-53) (12 November 2008, Austin, USA).
  12. K. Ishikawa, S. Kuroda, "Magnetic properties of magnetic semiconductors with inhomogeneous distribution of magnetic elements", 5th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-V) (4 August 2008, Foz do Iguaçu, Brazil).
  13. S. Kuroda, "Control of nanocluster formation and ferromagnetic properties in diluted magnetic semiconductors (*invited*)", 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29) (31 July 2008, Rio de Janeiro, Brazil).
  14. K. Ishikawa, N. Nishizawa, S. Kuroda, K. Ikeda, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, "Inhomogeneous Cr distribution and superparamagnetic behaviors in magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29) (29 July 2008, Rio de Janeiro, Brazil).
  15. S. Kuroda, "Control of nanocluster formation and ferromagnetic properties by co-doping of charge impurities in ferromagnetic semiconductor (Zn,Cr)Te (*invited*)", Polish-Japanese Joint Seminar "Ferromagnetism and Magnetic Nanostructures in Semiconductors" (28 September 2007, Leszno, Poland).
  16. N. Nishizawa, K. Ishikawa, S. Kuroda, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, "Correlation between Magnetism and Cr Distribution in Iodine doped ZnCrTe", 13th International Conference on II-VI Compounds (12 September 2007, Jeju, Korea).
  17. S. Kuroda, N. Nishizawa, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, "Correlation between ferromagnetism and cluster formation in (Zn,Cr)Te co-doped with charge impurities", Materials Research Society 2007 Spring Meeting (12 April 2007, San Francisco, USA).
  18. S. Kuroda, "Effects of co-doping on ferromagnetism in (Zn,Cr)Te (*invited*)", American Physical Society (APS) 2007 March Meeting (7 March 2007, Denver, USA).
- ◎ 国内学会
1. 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 24 日 神奈川工科大学)
  2. 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 26 日 神奈川工科大学)
  3. 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 14 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-14) (2010 年 12 月 20 日 筑波大学)
  4. 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 14 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-14) (2010 年 12 月 20 日 筑波大学)
5. 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, 「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 9 月 14 日 長崎大学 文教キャンパス)
  6. 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)
  7. 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)
  8. 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)
  9. 西尾 陽太郎, 石川 弘一郎, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄, 「MBE による閃亜鉛鋅型 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)
  10. 西尾陽太郎, 石川弘一郎, 黒田眞司, 三留正則, 坂東義雄, 「MBE による閃亜鉛鋅型 CrTe の成長と磁化特性」第 70 回応用物理学学会学術講演会 (2009 年 9 月 10 日 富山大学)
  11. 大淵博宣, 石川弘一郎, 張 珂, 黒田眞司, 三留正則, 板東義雄, 「ヨウ素ドーブ(Zn,Cr)Te の蛍光 XAFS 法による局所構造評価」第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009 年 3 月 30 日 筑波大学)
  12. 黒田眞司, 石川弘一郎, 張 珂, 西尾陽太郎, 「磁性半導体(Zn,Cr)Te における Cr 凝集クラスターの形成と超常磁性」第 56 回応用物理学関係連合講演会 (2009 年 3 月 30 日 筑波大学)
  13. 黒田眞司, 「半導体における磁性元素の高濃度ドーピングと非一様分布 (招待講演)」日本物理学会 第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 28 日 立教大/立教池袋中・高)
  14. 張 珂, 西尾 陽太郎, 及川 晴義, 石川 弘一郎, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄, 「(Zn,Cr)Te における Cr-rich ナノカラムの形成と磁化特性」第 13 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-13) (2009 年 1 月 27 日 東北大学電気通信研究所)
  15. 石川弘一郎, 張 珂, 黒田眞司, 三留正則, 板東義雄, 「(Zn,Cr)Te における高 Cr 組成の柱状領域の形成」第 69 回応用物理学学会学術講演会 (2008 年 9 月 4 日 中部大学)
  16. 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 日大理工学部船橋キャンパス)

17. 石川弘一郎, 西沢 望, 黒田眞司, 池田 博, 三留正則, 板東義雄, 「高 Cr 組成(~20%)の (Zn,Cr)Te における Cr 分布と強磁性特性との相関」(2008 年 3 月 28 日 日大理工学部船橋キャンパス)
18. 黒田眞司, 「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)」日本物理学会 第 63 回年次大会 (2008 年 3 月 24 日 近畿大学本部キャンパス)
19. 石川 弘一郎, 西沢 望, 黒田 眞司, 池田 博, 三留 正則, 板東 義雄, 「ヨウ素ドーブ (Zn,Cr)Te における Cr 組成分布と強磁性特性の成長条件依存性」第 12 回 半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-12) (2007 年 12 月 20 日 大阪大学産業科学研究所)
20. 石川弘一郎, 西沢 望, 黒田眞司, 池田 博, 三留正則, 板東義雄, 「ヨウ素ドーブ(Zn,Cr)Te における Cr 組成分布と強磁性特性の MBE 成長温度依存性」第 68 回応用物理学学会学術講演会 (2007 年 9 月 8 日 北海道工業大学)

#### 〔産業財産権〕

##### ○出願状況 (計 1 件)

名称: 磁性半導体とその製造方法

発明者: 黒田 眞司、西沢 望、瀧田 宏樹、三留 正則、板東 義雄、トーマス・ディートル

権利者: 物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2007-46400

出願年月日: 2007 年 2 月 27 日

国内外の別: 国内

##### ○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・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 40221949

##### (2) 研究分担者

金澤 研 (KANAZAWA Ken)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・助教

研究者番号: 60455920

(H22)