

平成21年 5月26日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19310068

研究課題名（和文）半導体中の磁性不純物の価数制御による強磁性ナノクラスターの自己形成

研究課題名（英文）Self-organized formation of ferromagnetic nanoclusters by controlling the valence of magnetic impurities in semiconductors

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：強磁性半導体(Zn,Cr)Teにおいて、ドナー性不純物であるヨウ素をドーピングした結晶におけるCr組成分布と磁化特性との相関を調べた。ヨウ素のドーピングにより、結晶中でCrが高濃度に凝集した領域が形成され、それに伴い強磁性転移温度が上昇することが明らかになった。Crの平均組成、ヨウ素濃度、および成長温度などの結晶成長条件をさまざまに変化させ成長した(Zn,Cr)Te薄膜結晶でのCr組成分布を調べた結果、Cr凝集領域の形成はとりわけ成長温度により大きく変化し、成長温度の上昇によりその形状がクラスターから1次元の柱状領域に変化することが示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

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

半導体スピントロニクスへの応用を目指し、強磁性となる半導体新材料の探索が世界中で活発に行われている。これまで母体半導体と磁性元素との実にさまざまな組み合わせからなる希薄磁性半導体(DMS)を対象に研究が行われ、そのいくつかの物質で実際に室温以上の強磁性が報告されている。しかしながらその一方で、同一物質に対して強磁性を否定する実験結果の報告もあるなど、強磁性の正否について現在に至るまで決着がつか

ていない例が多く、混沌とした状況にある。

その中で、我々は強磁性半導体として注目されている(Zn,Cr)Teを対象として取り上げ研究を行ってきた。(Zn,Cr)TeはCr組成が20%程度で強磁性転移温度 T_C が300Kに達し注目を集めているが、我々のこれまでの研究で(Zn,Cr)Teにアクセプター性不純物である窒素(N)をドーピングすると強磁性は抑制され、逆にドナー性不純物であるヨウ素(I)をドーピングすると強磁性が著しく増強することが見出されている。特にCr組成が5%と一定

のとき、ドーピングを施さない(アンドーブ)の結晶では強磁性転移温度 $T_C \sim 30\text{K}$ であったのが、ヨウ素ドーブ結晶では T_C は最高で 300K まで上昇する。このヨウ素ドーピングによる強磁性転移温度上昇の原因は、透過型電子顕微鏡観察(TEM)を用いたナノスケールの組成分析により、結晶中の Cr 組成分布の違いにあることが明らかとなった。すなわち、ヨウ素をドーブした T_C の高い結晶では Cr 原子が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き、強磁性が増強される。本研究課題では、(Zn,Cr)Te において結晶成長条件による結晶中の Cr 組成分布の変化および強磁性との相関を明らかにすることにより、Cr 組成分布と磁化特性を成長条件により人為的に制御する手法を開拓することを目的として研究を行った。

2. 研究の目的

本研究では、(Zn,Cr)Te を対象として、分子線エピタキシー(MBE)により成長した結晶において Cr 凝集領域の形成の様子を詳細に調べ、成長条件により Cr 凝集領域の形成がどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。具体的には Cr の平均組成、ヨウ素のドーピング濃度、および MBE 成長時の種々の成長条件を変化させて成長した結晶における Cr 分布の均一性および磁性を調べ、成長条件と Cr 凝集領域の形成および磁化特性との関連を系統的に解明することを目指した。この成果により、磁性半導体において磁性元素が凝集した領域の形成を成長条件により人為的に制御するというナノ構造形成の手法を開拓し、さらに半導体結晶中に

磁性元素の凝集領域が形成された複合構造の半導体スピントロニクスへの応用の可能性を探索することを目的とした。

3. 研究の方法

試料の(Zn,Cr)Te 薄膜結晶は MBE により GaAs 基板上に結晶成長させた。試料のパラメーターとして Cr の平均組成、ヨウ素濃度を変化させ、また MBE の成長条件として成長中の基板温度、成長速度、成長面方位などを変化させて薄膜結晶を成長した。透過型電子顕微鏡(TEM)観察は物質・材料研究機構の原子識別電子顕微鏡を用いた。成長した(Zn,Cr)Te 薄膜結晶から集束イオンビーム(FIB)により厚さ約 100nm の薄片を切り出し、TEM により断面の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 線スペクトルスコーピー(EDS)を用い、各元素の特性 X 線の強度をマッピングすることにより結晶中の組成分布を調べた。磁化測定は超伝導磁束量子干渉計(SQUID)により行った。薄膜の成長面に垂直に磁場を印加し、磁化の磁場および温度依存性から磁性の特徴的な振舞いを調べた。

4. 研究成果

(1) まず最初に、ヨウ素ドーブ(Zn,Cr)Te:I でのヨウ素ドーピング濃度により結晶中の Cr 組成分布と磁性がどのように変化するかを調べた。結晶中の Cr の平均組成が $x \sim 0.05$ と一定でヨウ素濃度を変化させた一連の(Zn,Cr)Te:I 薄膜を成長し、結晶中の Cr 分布および磁化特性を調べた。この際、MBE 成長中の基板温度は 300°C と一定にした。SQUID による磁化測定を行い、磁化の磁場・温度依存

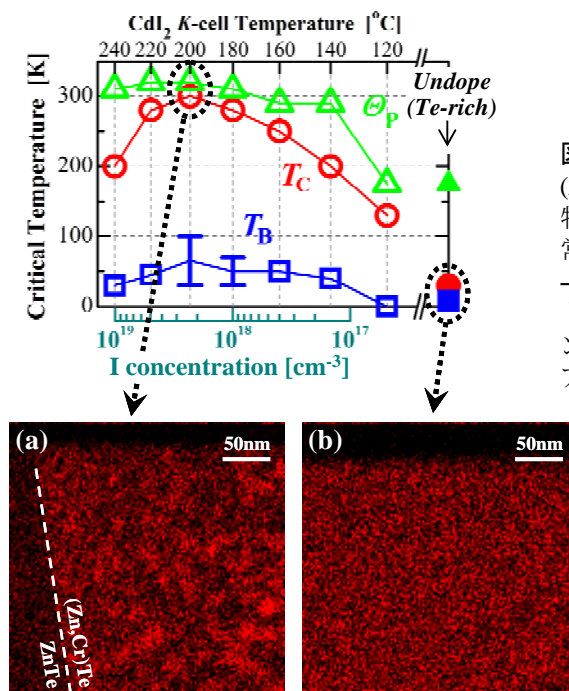


図 1: (上) 平均 Cr 組成 $x \sim 0.05$ のヨウ素ドーブ (Zn,Cr)Te:I 薄膜における磁化特性の振舞いの特徴を表す 3 つの温度 — 強磁性転移温度 T_C 、常磁性キュリー温度 θ_p 、ブロッキング温度 T_B — のヨウ素濃度依存性。図の右端の印はアンドーブ結晶のデータを表す。(下) EDS マッピングにより得られた (a) ヨウ素ドーブ結晶、(b) アンドーブ結晶の Cr 分布像。

性より成長薄膜の磁化特性の振舞いの特徴を表す温度 — Arrott plot から導かれる強磁性転移温度 T_C 、Curie-Weiss plot から得られる常磁性キュリー温度 Θ_p および磁化の温度依存性 ($M-T$ 曲線) に現れるブロック温度 T_B — を導いた。このようにして導いた磁性の特徴を表す3つの温度のヨウ素濃度依存性をプロットしたのが図1のグラフである。図に示すように、ヨウ素をドーピングしていないアンドープ結晶では $T_C=30K$ 程度であったのが、ヨウ素ドーピング結晶ではヨウ素濃度 $[I]$ の増加につれて T_C は上昇し、 $[I] \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で最高の $T_C = 300K$ に達する。常磁性キュリー温度 Θ_p およびブロック温度 T_B も定性的には T_C と同様のヨウ素濃度依存性を示す。EDS による結晶中の Cr 分布像の観察によると、これらの磁化特性と Cr 分布の均一性との間には明確な相関があることが明らかとなった。図1の下部に代表例として T_C が最高値の $300K$ となるヨウ素ドーピング結晶とアンドープ結晶の Cr 分布像の比較を示す。アンドープ結晶では Cr 分布はほぼ一様であるのに対し、ヨウ素ドーピング結晶では Cr 組成分布に不均一が生じ、Cr が高濃度に凝集した数十 nm のサイズの Cr-rich 領域が形成されているのがわかる。TEM による格子像および回折像の観察結果では、(Zn,Cr)Te:I 結晶には $\{111\}$ 面に沿った積層欠陥が多く見られるものの基本的には閃亜鉛型 (ZB) 結晶構造であり、Cr-rich 領域は異種の結晶構造を持つ化合物の析出ではなく、ZB 構造を保ったまま Cr が Zn サイトを置換し局所的に高 Cr 組成の領域となっていることが示された。さらにヨウ素ドーピング濃度の異なる試料においても同様の傾向が観察され、Cr 分布の均一度と磁性の特徴を表す温度との間には明確な相関があり、不均一の程度が大きくなるとこれらの温度が上昇することが示された。この Cr 分布の均一性と磁化特性との相関は、Cr-rich 領域が強磁性のクラスターとしてはたらくために結晶全体の磁性は超常磁性的になり、磁化過程における履歴など見かけ上強磁性的振舞いを示すためと理解される。ヨウ素ドーピングにより Cr 分布が変化する原因としては、以下のようなメカニズムを考えることができる。ZnTe 中で Cr は2価のイオンとして取り込まれ電氣的に中性であるが、その固溶度は低いため Cr 添加量が多くなると相分離が生じ Cr 組成の高い領域と低い領域とが形成される (スピノーダル分解)。この相分離は Cr^{2+} イオン間に引力的相互作用がはたらくためであるが、Cr の 3d 電子は ZnTe のバンドギャップ中に局在準位を形成するためドナーあるいはアクセプターをドーピングするとフェルミ準位のシフトにより Cr イオンの価数は変化する。そうすると Cr イオン間の静電的相互作用により Cr の凝集力が変化し、

Cr 分布が変化するというモデルを考えることができる。

(2) 平均 Cr 組成が $x \sim 0.2$ と比較的高い場合と同じくヨウ素濃度による変化を調べたところ、 $x \sim 0.05$ の場合と同様にヨウ素ドーピング結晶では Cr 分布は不均一であり、ヨウ素濃度が増加すると不均一の度合いは増し、特に Cr-rich 領域のサイズが大きくなるという傾向が見られた。磁化測定では、強磁性転移温度 T_C はヨウ素濃度にあまり依存しないものの、ブロック温度 T_B はヨウ素濃度の増加に伴い顕著に上昇した。これは平均 Cr 組成の値 $x \sim 0.2$ は ZB 構造におけるパーコレーション限界に近いことから、最隣接 Cr 間の強磁性的相互作用がはたらく結果、 $x \sim 0.05$ の場合と異なり分布の均一度に係らず高い T_C を示すのに対し、Cr-rich 強磁性クラスターのサイズが大きくなると、磁気異方性エネルギーの増大により超常磁性的振舞いが顕著になり、ブロック温度 T_B が上昇したと考えられる。

(3) 次に、(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ピング (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がわかったので、その結果について述べる。実験は平均 Cr 組成 $x \sim 0.05$ でヨウ素濃度も一定とし、基板温度を $T_S = 240 \sim 390^\circ\text{C}$ の範囲に亘って変化させて成長した一連の (Zn,Cr)Te:I 薄膜に対し TEM/EDS 分析を行った。TEM 観察の結果、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 $\{111\}$ 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はほぼ完全な 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 分布は不均一であるが、不均一の程度は T_S の上昇により僅かながら減少するように見える。磁化測定においては、磁性の特徴を表す3つの温度 T_C 、 Θ_p 、 T_B は T_S の上昇に伴い緩やかに低下し、Cr 分布の均一度との相関を示した。

(4) 平均 Cr 組成が $x \sim 0.2$ と高くなると、Cr-rich 領域の形成自体は基板温度 T_S に係らず生じるが、その形状が T_S により大きく変化することが明らかとなった。図 2(a), (b) に示すように、 $T_S = 300^\circ\text{C}$ では Cr-rich 領域は孤立したク

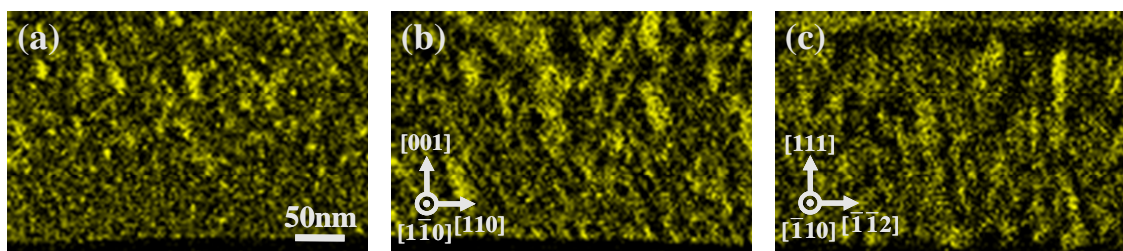


図2: 成長時の基板温度 T_S , 成長面方位を変化させて成長した平均 Cr 組成 $x \sim 0.2$ の (Zn,Cr)Te 薄膜における Cr 分布像。(a)成長面方位が(001)面で基板温度 $T_S = 300^\circ\text{C}$ で成長 (b) (001)面で $T_S = 360^\circ\text{C}$ で成長 (c) (111)面で $T_S = 360^\circ\text{C}$ で成長した薄膜。

ラスタ形状であるが、 $T_S = 360^\circ\text{C}$ では 1 次元の柱状領域が形成されている。この柱状領域は図 2(b)に示すように成長面方位が(001)面のときは成長方向に対して斜め方向となり、Cr 原子が ZB 構造の{111}面に沿って凝集する傾向があることを示唆している。基板温度の上昇により Cr-rich 領域が柱状となるのは、成長表面での原子のマイグレーションの促進により、成長各層の Cr の凝集領域が連続的につながった結果であると考えられる。さらに成長面方位を(111)面にすると、図 2(c)に示すように Cr-rich 柱状領域は成長面に対しほぼ垂直に形成された。磁化測定においては、Cr-rich 柱状領域の形成によりブロッキング温度が上昇するなど超常磁性的振舞いが顕著になり、かつ柱状領域の形成の方向と磁場の印加方向との関係により磁化の振舞いが異なるという異方性が観察された。これは柱状の形状をした Cr-rich 強磁性領域における反磁場係数が磁場印加方向により異なるため生じたと考えられる。

(5) 以上に述べたように、MBE により成長したヨウ素ドーパド (Zn,Cr)Te において、平均 Cr 組成、ヨウ素濃度および MBE 成長条件をさまざまに変化させた薄膜結晶における Cr 組成分布と磁化特性とを調べ、その間に明確な相関があることを明らかにした。特に結晶中の Cr 分布が不均一となり Cr-rich 領域が形成されると強磁性転移温度などの磁化の振舞いの特徴を表す温度が上昇することがわかった。この Cr-rich 領域の形成の様子は MBE 成長中の成長条件、とりわけ成長中の基板温度により変化し、特に平均 Cr 組成が $x \sim 0.2$ と高い場合には、基板温度の上昇により Cr-rich 領域の形状がクラスターから 1 次元の柱状に変化することが示された。(Zn,Cr)Te において観察された以上のような Cr 凝集領域の形成は、この特定の物質に限定されるものではなく、遷移元素の 3d 電子がバンドギャップ中に局在準位を形成するという同様のエネルギー構造を持つ他の磁性半導体においても普遍的に生じる現象であると考えられる。その観点から、本研究の成果は、磁性元素が添加された半導体結晶中で磁性元素

が凝集した領域の形成を成長温度などの結晶成長条件により人為的かつ系統的に制御するという新しいナノ構造の作製法の開拓につながるものと言える。今後はこのような半導体結晶中に磁性元素の凝集領域が形成された複合構造のスピントロニクスへの応用の可能性を調べるため、(Zn,Cr)Te における磁気光学特性や磁気輸送特性などの研究を行う予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 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, *in press* (2009) 査読有.
2. K. Ishikawa, N. Nishizawa, S. Kuroda, K. Ikeda, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, "Inhomogeneous Cr distribution and superparamagnetic behavior in magnetic semiconductor (Zn,Cr)Te", Proceedings of 29th International Conference on the Physics of Semiconductors – ICPS 2008, *in press* (2009) 査読有.
3. 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) 査読有.
4. 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) 査読有.
5. 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) 査読有.
6. 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.
 7. 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: 28th International Conference on the Physics Semiconductors -- ICPS 2006”, pp.1193-1194 (2007) 査読有.
 8. 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”, pp. 517-519 (2007) 査読有.
 9. 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) 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

◎ 国際会議

1. 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 (13-17 April 2009, San Francisco, USA).
2. 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) (10-14 November 2008, Austin, USA).
3. 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) (3-6 August 2008, Foz do Iguaçu, Brazil).
4. S. Kuroda, “Control of nanocluster formation and ferromagnetic properties in diluted magnetic semiconductors (*invited*)”, 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29) (27 July-1 August 2008, Rio de Janeiro, Brazil).
5. 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) (27 July-1 August 2008, Rio de Janeiro, Brazil).
6. S. Kuroda, “Control of nanocluster formation and ferromagnetic properties by co-doping charge impurities in ferromagnetic semiconductors (Zn,Cr)Te (*invited*)”, Polish-Japanese Joint Seminar “Ferromagnetism and Magnetic Nanostructures in Semiconductors” (27-28 September 2007, Leszno, Poland).
7. N. Nishizawa, K. Ishikawa, S. Kuroda, M. Mitome, Y. Bando, T. Dietl, “Correlation between Cr distribution and ferromagnetism in iodine-doped (Zn,Cr)Te”, 13th International Conference on II-VI Compounds (II-VI 2007) (10-14 September 2007, Jeju, Korea).
8. S. Kuroda, N. Nishizawa, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, “Correlation between ferromagnetism and cluster formation in (Zn,Cr)Te co-doped with charge impurities”, Materials Research Society (MRS) Spring Meeting (9-13 April 2007, San Francisco, USA).

◎ 国内学会

9. 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~4 月 2 日、筑波大学)
10. 大淵 博宣, 石川 弘一郎, 張 珂, 黒田 眞司, 三留 正則, 板東 義雄 「ヨウ素ドーピング(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~4 月 2 日、筑波大学)
11. 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」(シンポジウム「高濃度ドーピングへの挑戦とそれに伴う格子欠陥の解決」) 日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日~30 日、立教大学、立教池袋中学・高校)
12. 山崎 陽, 片岡 隆史, 坂本 勇太, 藤森 淳, F.-H. Chang, H.-J. Lin, D.J. Huang, C.T. Chen, 石川 弘一郎, 黒田 眞司 「軟 X 線磁気円二色性を用いた $Zn_{1-x}Cr_xTe$ 薄膜の電子状態に関する研究」日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月 27 日~30 日、

立教大学、立教池袋中学・高校)

13. 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~28 日、東北大学電気通信研究所)
14. 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 回応用物理学学術講演会(2008 年 9 月 2 日~5 日、中部大学)
15. 清水 翔, 西沢 望, 黒田 眞司, 高増 正「強磁性半導体(Zn,Cr)Te の磁場中反射スペクトル測定」第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008 年 3 月 27 日~30 日、日本大学理工学部)
16. 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 分布と強磁性特性の相関」第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008 年 3 月 27 日~30 日、日本大学理工学部)
17. 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「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」(シンポジウム「スピントロニクスはどこまで進んだか」) 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008 年 3 月 27 日~30 日、日本大学理工学部)
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 22 日~26 日、近畿大学)
19. 石川 弘一郎, 西沢 望, 黒田 眞司, 池田 博, 三留 正則, 板東 義雄「ヨウ素ドーピング(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~21 日、大阪大学)
20. 石川 弘一郎, 西沢 望, 黒田 眞司, 池田 博, 三留 正則, 板東 義雄「ヨウ素ドーピング(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 回応用物理学学術講演会 (2007 年 9 月 4 日~8 日、北海道工業大学)

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

高増 正 (TAKAMASU Tadashi)

物質・材料研究機構 量子ドットセンター

主幹研究員

研究者番号: 60212015