

平成22年6月25日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005 ～ 2009

課題番号：17072006

研究課題名（和文）強磁場中伝導電子スピンのコヒーレンスの光学的研究

研究課題名（英文）Magneto-optical study for the spin coherence in low dimensional electron systems at high magnetic fields

研究代表者

高増 正 (TAKAMASU TADASHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・ナノ物性グループ・主幹研究員

研究者番号：60212015

研究成果の概要（和文）：半導体を始めとする伝導電子の持つスピン物性を明らかにするため、主に強磁場下での光学的手法を中心とした電子物性研究を行った。その結果、GaAs/AlGaAsヘテロ構造中の2次元伝導電子系の持つスピン配向状態の磁場中でのコヒーレンス状態、外部電場、光による操作性に関する多くの知見を得た。また、強磁場下での光学測定をツールとして、ZnCrTeやCdMnTe等の興味深いスピン物性を有する半導体やカーボンナノチューブ、有機伝導体のスピン、電子基礎物性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have studied spin properties of conduction electron in low dimensional electron systems by means of optical and other methods under very high magnetic fields. Several key aspects for realizing the manipulation and detection of the spin coherence state were obtained in GaAs/AlGaAs two dimensional electron systems. Significant spin-related phenomena and electronic properties are also observed in ZnCrTe, CdMnTe, carbon-nanotube and λ -(BETS)₂FeCl₄ under high magnetic fields.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	18,000,000	0	18,000,000
2006年度	24,200,000	0	24,200,000
2007年度	22,500,000	0	22,500,000
2008年度	20,700,000	0	20,700,000
2009年度	11,900,000	0	11,900,000
総計	97,300,000	0	97,300,000

研究分野：半導体・強磁場物性

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：(1)強磁場 (2)スピン科学 (3)磁気光学 (4)半導体 (5)低次元 (6)磁性半導体 (7)ナノチューブ (8)有機伝導体

1. 研究開始当初の背景

半導体情報通信素子の発展により、情報通信技術は目覚ましい発展を遂げているが、その情報処理能力はもはや限界に達しており、これまでの電子の電荷のみを用いた素子に加え、電子のスピン自由度を効率的に制御、利

用する素子の研究開発に注目が集まっていた。こうした素子の候補として、半導体に磁性不純物を導入した磁性半導体をスピントロニクス素子として用いることが広く検討され、様々な候補物質が研究されていた。しかしながら、これらの物質の電子物性の解明

は多くの困難を伴っており、十分な知見が得られていたとは言い難い。

強磁場を用いた光学的測定は、こうした磁性半導体や伝導電子のスピン物性を明らかにするための有用なツールであり、積極的に強磁場科学を用いることによりスピントロニクス研究に資する可能性を有していることから、本研究を行うことを計画した。

2. 研究の目的

半導体、有機半導体を中心とした伝導電子系の物性においても、電子のスピン自由度を制御、利用する研究に注目が集まっている。こうした研究の多くは、常温、零磁場におけるスピントロニクスデバイス開発のための物質探索を主題として行われているが、その物性を解き明かすためには強磁場下におけるスピントロニクス研究が必須である。これまでの強磁場スピン科学では、主に局在スピンの研究を目的とした NMR や ESR 等の研究手法が開発され、物性研究に資されてきた。伝導電子スピンに関する研究を行うためには、こうした手法に加え、実空間での拡散やコヒーレンスに関する研究手法やコヒーレンスの時間変化に関する研究手法を開発する必要がある。

本研究の目的は、半導体、有機伝導体におけるスピン関連現象の基礎物性を解明し、スピントロニクスデバイスや量子計算機への応用に繋がる伝導電子スピンに関わる現象の物理的基礎を築くことにある。そのため、ゼーマン分裂が大きく、量子状態が明確に定義される 100T 級の強磁場において、時間、空間領域の精密な測定を実現し、スピン状態のコヒーレンスに関する研究を推し進める。

3. 研究の方法

本研究では、半導体、有機半導体等のスピン物性を精密に研究するためのステップとして、

- (1) 高品質の強磁場の発生と測定技術の開発
- (2) 強磁場、光学的測定に適した試料の成長とその基礎特性の解明
- (3) 強磁場物性の解明

の3段階を踏まえて行った。

(1) 強磁場の発生は、物質・材料研究機構における定常強磁場施設及び東京大学物性研究所におけるパルス超強磁場施設を中心に行われた。磁場発生技術の高度化は、本研究プロジェクトの範囲内ではないが、研究分担者が本研究との関連性から、以下の点について改善、高度化を完成させている。

物質・材料研究機構における定常強磁場磁石においては、これまで多くの雑音、振動を有する等の問題点があり、精密な物性研究を行うにあたって、試料温度の上昇等の困難が存在した。平成 18 年度から継続的に行われ

た定常強磁場の電源および冷却水施設の改造により、磁場絶対値の安定性は約 2 桁改善され、それに伴う電磁波ノイズも 1/100 程度に減じることを達成した。その結果、従来難しかった希釈冷凍機を用いた極低温下での物性測定 (100mK 以下) が可能となり、小さな電子相関の効果の検出も可能となった。

また、東京大学物性研究所の電磁濃縮法による破壊型磁場発生においては、これまでの最高記録を大きく塗りかえる 600T 超の磁場発生を可能とした。更に、この磁場下における物性測定として、フォトルミネッセンス、透過スペクトル測定の手法を確立し、400T を超える磁場下でのファラデー効果による磁化過程測定や 100T を超える磁場下での近赤外分光測定を可能とした。

(2) 試料成長に関しては、分子線エピタキシーにより、II-VI 族半導体 ZnCrTe の良質な試料成長に成功し、室温において強磁性の発現を見いだした。この系の強磁性の発現が、ドナーおよびアクセプターのドーピングにより大きく影響されることも発見し、その発現機構の解明のため、原子識別電子顕微鏡観察により研究を行った。その結果、Cr 濃度およびドーピングの状況により、結晶中での Cr の分布が一樣か非一樣かの変化が生じ、これが強磁性発現温度と密接に結びついていることを見出した。

III-V 族半導体においては、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の MBE 成長と、これに量子ドット構造および磁性不純物 Yb の導入を行った。特に 2 次元電子系は、その伝導および光学特性に電子相関やスピン相関の影響が如実に現れるため、2 次元+局在電子 (スピン) の系を最終目標であるスピンコヒーレンス研究のための試料として用いた。

また、カーボンナノチューブ試料においては、成長ではないが、その電子状態や光学遷移則を詳細に調べるために、定常磁場下での配向を行い、パルス強磁場での分光測定用に用いた。

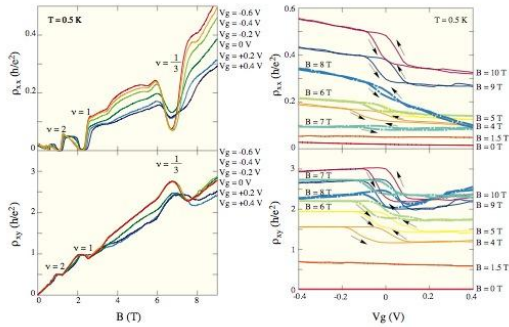
(3) 強磁場物性の解明においては、上記 2 種の強磁場発生装置を用いた輸送現象、可視分光測定、近赤外分光測定、遠赤外分光測定、磁化測定、磁気トルク測定等の精密測定を行い、各試料の強磁場物性を詳細に調べた。また、これらに加えて、テラヘルツ分光装置、低温強磁場用顕微分光装置および低温強磁場用原子間力顕微鏡装置の開発を行い、その基本性能を確認した。

4. 研究成果

上記のような研究手法により、主に以下の3点に関して研究成果を得た。

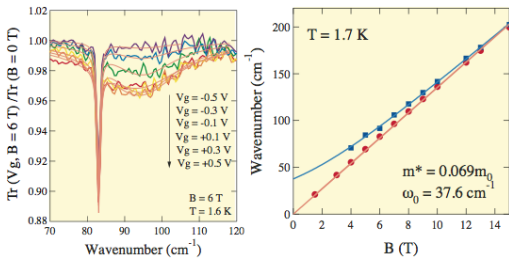
- (1) 半導体中低次元電子系におけるスピン散乱とコヒーレンスに関する研究
- (2) 磁性半導体およびスピネル中のスピン物

性に関する研究
 (3) 有機導体および関連物質における電子状態の解明



(1) GaAs/AlGaAsヘテロ界面に形成される2次元電子系は、その高移動度と低温、強磁場中での多彩な量子物性で、興味深いシステムの一つである。この系の近傍に量子ドットや希土類イオンを置くことにより、これらに強く局在した電子と2次元電子系との電子相関が、2次元電子系や局在電子の性質に強く影響を及ぼすことが予想される。特に2次元電子系が強磁場で示す量子ホール効果は、電子散乱の特性によって輸送特性が敏感に変化するため、局在電子が2次元電子系に及ぼす影響を詳細に観察できるツールにもなると考えられる。我々は、この電子相関に着目して、高移動度2次元電子系の近傍に量子ドット及び局在性の強い希土類電子をドープした系を作製し、その低温、強磁場下での研究を行った。

まずGaAs/AlGaAsヘテロ接合の近傍にInGaAs自己形成量子ドットを埋め込んだ系では、量子ホール効果を示す低温輸送特性が、ゲート電圧によって制御された量子ドット中の電子数によって、量子極限でのみ電気抵抗に異常を示すことが見出された。フィリングファクターが1以下で、2次元電子系のスピンの揃った状態でのみこの抵抗異常が見出されることから、この抵抗異常は、量子ドットによる局在電子と2次元電子との間のスピン散乱(スピンフリップ散乱)に起因すると考えられる。

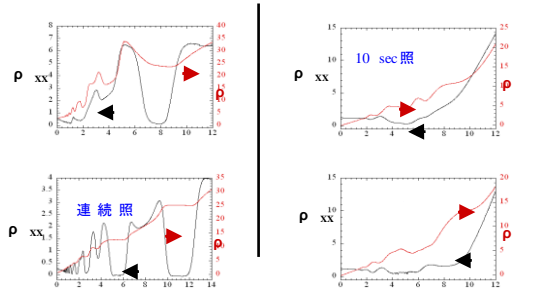


この系を用いた遠赤外領域でのサイクロトロン共鳴実験では、通常の2次元電子系が示す磁場に対して線形に依存する線幅の細いサイクロトロン共鳴に加え、不純物サイクロト

ロン共鳴に似た非線形な磁場依存性を持つ比較的線幅の広いサイクロトロン共鳴線が見出された。この新しい共鳴線は、フロントゲートによる量子ドットへの電子の出し入れに伴ってその強度を大きく変えるため、量子ドットによる散乱を反映した2次元電子系のサイクロトロン共鳴だと考えられる。

この事実は、1層の2次元電子中に局在、非局在の2種類の2次元電子が共存することを示唆しており、輸送現象に見られる抵抗異常がスピンフリップ散乱によることを支持している。量子ホール効果状態下で、スピン散乱が大きな抵抗異常として見出されるのは、 $\nu < 1$ の状態が、スピンフリップした状態をマクロな距離存続させる準コヒーレントな状態であるためと考えられる。

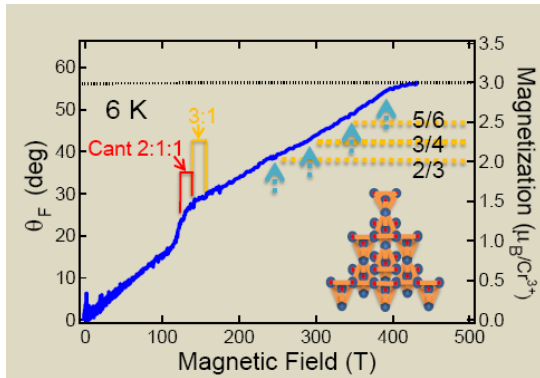
もう一つの、2次元電子のスピン散乱を介した興味深い現象が予想される系として、希土類不純物であるYbを導入した半導体があれば。半導体母結晶に希土類イオンをドープした系では、ごく少数の例を除いてその $4f$ 状態間の遷移による発光現象は確認されていない。



我々は、こうした事実が $4f$ 電子と母結晶電子の微弱でありながら有限な電子相関の結果であることを予想し、GaAs:Yb系に関してその準位形成等に関する基礎物性を探るため、強磁場、低温における研究を行った。その結果、 $x > 0.3$ での $Al_xGa_{1-x}As:Yb$ においてのみ $4f$ 状態間の遷移による発光現象は確認され、また、 $AlAs:Yb/GaAs$ 超格子において、これまでに報告されていない幅の広い低エネルギーの発光を観測した。

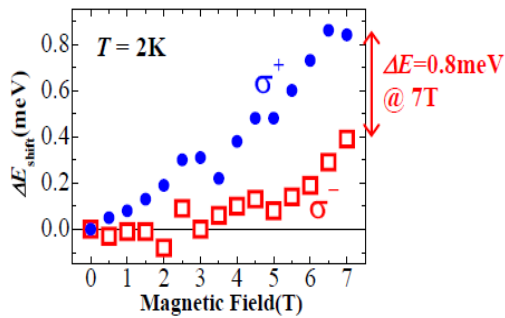
こうした発光レベルの特性からYbによる形成準位の情報を得るために、GaAs/AlGaAs2次元電子のバリア領域にYbをドープした数種類の試料を作製し、2次元電子の輸送特性を通して、散乱に寄与する準位がどこに位置するかを推定し、形成準位の情報を得た。AlGaAsバリアの場合は、1.5eV程度の低エネルギーの光照射で易動度の回復が見られ、こうした条件から、YbイオンがGaAs中に形成する等電子トラップのエネルギー位置の推定に成功した。得られた情報から、YbドープAlAs層を活性層としたPINダイオード構造の作製を行い、電流注入による $4f$ 状態間の遷移による発光を初め

て観測することに成功した。



(2) スピネル酸化物 ZnCr_2O_4 は、磁性を担う Cr^{3+} のスピンの間に反強磁性的な相互作用が働き、Cr イオンがパイロクロア格子を形成した幾何学的にフラストレートしたスピン系であり、強い幾何学的フラストレーションのもとで格子-スピンの相互作用が働いている系と考えられている。この物質は Cr スピン間の交換相互作用が大きいため、磁化過程を調べるためには、超強磁場が必要となる。

この物質において1巻きコイル法を用いた超強磁場下におけるファラデー回転測定およびスタイクキャスト製クライオスタットなどの開発により、低温(6 K)で、電磁濃縮法を用いて400 テスラまでの磁場下での測定を行った。その結果、理論予想による相転移と、予想されていないいくつかの磁気相を発見した。



また $(\text{Zn}, \text{Cr})\text{Te}$ の磁性半導体では、その特性を解明するために磁気光学効果の詳細な測定、特に反射スペクトルにおけるバンド端励起子の磁場によるゼーマンシフトを直接観察することにより、磁気光学効果の大きさを評価した。至および混晶の効果によるブロードニングを抑制しつつ励起子からのシグナルを明瞭に観測するため、 $\text{ZnTe}(001)$ 基板上のCr濃度が1%以下の低い組成の $(\text{Zn}, \text{Cr})\text{Te}$ を対象に、Faraday 配置で $\sigma+$ 、 $\sigma-$ 円偏光に対し反射測定を行った。

その結果、反射スペクトルで ZnTe のバンドギャップである 2.38eV 付近にバンド端自由励起子からのシグナルが現れ、磁場印加に伴い $\sigma+$ 、 $\sigma-$ 円偏光で異なる方向にシフトするの

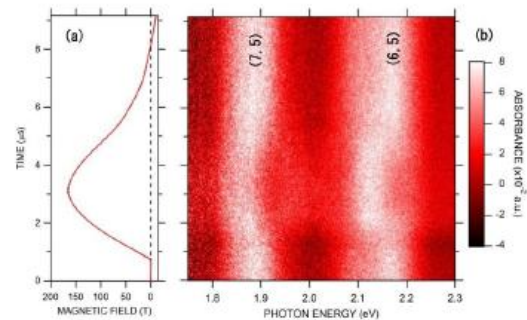
が観測され、 $p-d$ 交換相互作用が強磁性的であることが確認された。

更に、電子の強磁場物性として興味深い成果として、タイプIIナノ構造である ZnSe/BeTe 非ドープ試料で、光励起電子が蓄積されることを利用したサイクロトロン共鳴ピークの観測を、100Tを超える超強磁場で初めて成功した。

磁性半導体を含む $\text{CdMnTe}/\text{CdTe}$ 系2次元電子においては、磁気光学スペクトルに特徴的な電子準位を反映した磁気振動の観測を、テラヘルツ、ギガヘルツの広い周波数範囲において始めて成功した。

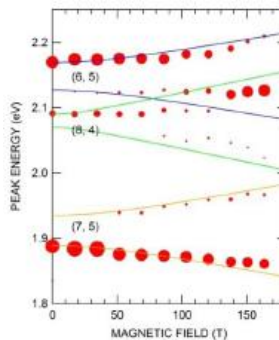
(3) 有機導体における研究では、第一に、単層カーボンナノチューブにおける強磁場下光学スペクトル測定により、サブバンド間励起子物性を明らかにした。単層ナノチューブではその一次元的な構造のために室温でも励起子が安定に存在しており、励起子のエネルギー状態が光物性に大きく表れる。単層ナノチューブにおける励起子エネルギー状態の特徴として、ブリルアン帯のK点とK'点における電子エネルギー状態が縮退しているために、谷内および谷間相互作用によって励起子状態が一重項状態と三重項状態に分裂することが理論的に予想されている。これらのうち、一重項の奇状態のみが光学的に活性("bright")で一重項の偶状態と三重項状態は不活性("dark")となる。一重項の"bright"-"dark"励起子分裂では、どちらがエネルギー的に下方に位置するかという問題が、単層ナノチューブにおける重要な研

可視域パルス超強磁場下 磁気光吸収ストリーク測定



吸収ピークエネルギーの磁場依存性

丸の大きさは、吸収強度を表している。実線は谷内・谷間相互作用を考慮した一重項励起子エネルギーのシミュレーション結果



究課題の一つとなっている。

こうした課題を明らかにするために、高感度のInGaAsアレー検出器を極短パルス磁場の頂上近傍でのみ露光する方式を開発し、測定を行った。その結果、チューブのサイズ等により、異なった励起子が低エネルギー側に現れる、これまでに得られている発光測定の結果と矛盾する測定結果を得た。こうした現象は、ナノチューブの電子状態がより複雑であることを示しており、より定量的な研究を行う必要がある。

また、1次元有機伝導体(TMTSF)₂ClO₄は、低温でClO₄イオンが整列し、その長周期ポテンシャルがブリルアンゾーンを折りたたむことで結果的に2組の一次元フェルミ面(FS)が形成される。最も伝導の高い方位はa軸で、伝導面(ab面)に垂直に磁場をかけると、磁場誘起逐次スピン密度波(SDW)転移を起こし、8Tで量子数N=1の量子ホール効果状態(SDW-I)へ転移することが知られている。さらに強磁場をかけると26T程度で強磁場SDW-II相へと転移する。このSDW状態について、幾つかのモデルが提案されているが、未解決の問題となっている。この問題を確かめるため、35Tまでの比熱測定を行った。その結果、確かに状態密度が振動していることを確認し、抵抗の極大を取るとき、電子の状態密度は極小となることを明確に示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(査読有、以下を含めて計 111件)

- ① Cyclotron resonance of two-dimensional electron system affected by neighboring quantum dot layer: K. Takehana, Y. Imanaka, T. Takamasu and M. Henini, Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 193110-1-3. 査読有
- ② A Near-Infrared Spectroscopy in Magnetic Fields Above 100 T: H. Yokoi, M. Effendi, E. Kojima, S. Takeyama, J. Low Temp. Phys., Vol.159 (2010) 311 - 314 査読有
- ③ Possible Phase Transition Deep Inside the Hidden Order Phase of Ultraclean URu₂Si₂: H. Shishido, K. Hashimoto, T. Shibauchi, T. Sasaki, H. Oizumi, N. Kobayashi, T. Takamasu, K. Takehana, Y. Imanaka, T. D. Matsuda, Y. Haga, Y. Onuki, Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 156403-1-4. 査読有
- ④ Optically Induced Long-Lived Electron Spin Coherence in ZnSe/BeTe Type-II Quantum Wells: H. Mino, Y. Kouno, K. Oto, K. Muro, R. Akimoto, S. Takeyama, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 153101-1-3. 査読有
- ⑤ Fermi Surface in LaRhSi₃ and CeRhSi₃: T. Terashima, M. Kimata, S. Uji, T. Sugawara, N. Kimura, H. Aoki, H. Harima, Phys. Rev. B **78** (2008) 205107-1-10. 査読有

⑥ Full-Magnetization of Geometrically Frustrated CdCr₂O₄ Determined by Faraday Rotation Measurements at Magnetic Fields up to 140 T: E. Kojima, A. Miyata, S. Miyabe, S. Takeyama, H. Ueda, Y. Ueda, Phys. Rev. B **77** (2008) 212408-1-4. 査読有

⑦ Spatially Direct Charged Exciton Photoluminescence in Undoped ZnSe/BeTe type-II Quantum Wells: Z. W. Ji, S. Takeyama, H. Mino, K. Oto, K. Muro, R. Akimoto, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 093107-1-3. 査読有

⑧ Origin and Control of High-temperature Ferromagnetism in Semiconductors: S. Kuroda, N. Ni shizawa, K. Takita, M. Mitome, Y. Bando, K. Osuch, T. Dietl, Nature Materials **6** (2007) 440-446. 査読有

⑨ Extremely High Upper Critical Magnetic Field of the Noncentrosymmetric Heavy Fermion Superconductor CeRhSi₃: N. Kimura, K. Ito, H. Aoki, S. Uji, T. Terashima, Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 197001-1-4. 査読有

⑩ Modification of the Quantum Hall Effect by the Charge State of a Nearby Quantum Dots Layer: K. Takehana, T. Takamasu, M. Henini, J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 114713-1-6. 査読有

⑪ Photoluminescence of Yb³⁺-doped CuInS₂ Single Crystals Prepared by In-flux and Chemical Vapor Transport Methods: N. Tsujii, Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Kitazawa, G. Kido, Journal of Alloys and Compounds, 408-412 (2006) 791-795. 査読有

⑫ Vortex Dynamic and the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov State in a Magnetic-field-induced Organic Superconductor: S. Uji, T. Terashima, M. Nishimura, Y. Takahide, T. Konoike, K. Enomoto, H. Cui, H. Kobayashi, A. Kobayashi, H. Tanaka, M. Tokumoto, E. S. Choi, T. Tokumoto, D. Graf, J. S. Brooks, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 157001-1-4. 査読有

⑬ Suppression of ferromagnetism due to hole doping in Zn_{1-x}CrxTe grown by molecular-beam epitaxy, N. Ozaki, I. Okabayashi, T. Kumekawa, N. Nishizawa, S. Kuroda, K. Takita, Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 192116,1-3 査読有

〔学会発表〕(計305件)

(1) 〔国際会議〕(以下を含めて計132件)

- ① Calorimetric Measurements of One-Dimensional Organic Conductor (TMTSF)₂ClO₄ in High Magnetic Field up to 35 T: S. Uji et al., 6th International Conference on Physical Phenomena in High Magnetic Fields (PPHMF-VI), 2008.8.1-6, Tallinn, Estonia.
- ② Control of Nanocluster Formation and Ferromagnetic Properties in Diluted Magnetic Semiconductors: S. Kuroda, 29th International Conference on the Physics of Semiconductors,

2008.7.27-8.1, Rio de Janeiro, Brazil.

③Two-Dimensional Exciton Complexes in High Magnetic Fields: S. Takeyama, International Workshop on High Magnetic Field Research “New Horizon in High Magnetic Fields”, 2006.1.17-20, Tsukuba, Japan.

④Cyclotron Resonance in II-VI Semiconductors at THz Region: Y. Imanaka, T. Takamasu, K. Takehana, M. Oshikiri, G. Kido, H. Nojiri, Y. Matsuda, H. Arimoto, S. Takeyama, N. Miura, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, 12th International Conference of II-VI Compounds, 2005.9.11-16, Warsaw, Poland.

(2) [国内会議] (以下を含めて全173件)

①強磁場を用いた単層カーボンナノチューブの励起子状態の解明: 横井裕之, 九州大学先端物質化学研究所非常勤講師講演会, 2009.11.6, 福岡県春日市

②量子ドット-2次元電子相関係のコヒーレンス: 高増正, 物性科学領域横断研究会-スピンの拓く物性科学の最前線-, 2008.11.29-2.1, 東京都.

③一次元有機導体の強磁場SDW状態: 宇治進也, 物性科学領域横断研究会-スピンの拓く物性科学の最前線-, 2008.11.29-2.1, 東京都.

④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: 黒田眞司, 日本物理学会第63回年次大会, 2008.3.23-26, 東大阪市.

[図書] (計3件)

(1) 図書

①高増正, 定常磁場下の電気的測定, 実験物理科学シリーズ 5 強磁場の発生と応用, 2008, 共立出版, pp255-263.

②H. Yokoi, N. Kuroda, Y. Kim, S. Kazaoui, N. Minami, K. Uchida, S. Takeyama, “Magneto-optical Study of Aharonov-Bohm effect on Second Subbands in Single-walled Carbon Nanotubes” in “Narrow Gap Semiconductors”, 2005, Taylor & Francis, 6 pages.

(2) 解説

①宇治進也, 有機伝電体における磁場誘起超伝導, 日本金属学会誌 **71**, 2007, pp934-939, 日本金属学会.

②神島謙二, 宮田大資, 佐藤佑樹, 徳江将, 柿崎浩一, 平塚信之, 今中康貴, 高増正, 磁場印加中熱分解による強磁性熱分解炭素の作製, 粉体および粉末冶金, **56**, 2009, 456-460, 粉体粉末冶金協会.

[その他]

(1) ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/nmp/>

<http://takeyama.issp.u-tokyo.ac.jp/>

(2) 新聞報道 (計3件)

①「強磁性半導体、温度制御技術を開発、筑波大など」、日経産業新聞、2007.5.22、添加物制御により CrZnTe で室温の強磁性半導体を得ることに成功

②「強磁性半導体内のナノ結晶形成、不純物添加し制御、筑波大など」、日刊工業新聞、2007.5.23、不純物制御により強磁性半導体においてナノ組織の形成を制御することに成功

③「半導体、室温でも磁性」、朝日新聞、2007.5.25、CrZnTe系で室温の強磁性半導体を開発

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高増正 (TAKAMASU TADASHI)
独立行政法人物質・材料研究機構 量子ドットセンター・グループリーダー
研究者番号: 60212015

(2) 研究分担者

今中康貴 (IMANAKA YASUTAKA)
独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主任研究員
研究者番号: 70354371

寺嶋太一 (TERASHIMA TAICHI)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノスケール物質萌芽ラボ・主幹研究員
研究者番号: 40343834

(2008-2009年度研究分担者)

木戸義勇 (KIDO GIYUU)
独立行政法人物質・材料研究機構・強磁場ステーション・ステーション長
研究者番号: 10013541

嶽山正二郎 (TAKEYAMA SHOJIRO)

東京大学・物性研究所・教授
研究者番号: 20163446

小嶋映二 (KOJIMA EIJI)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号: 10376650

滝田宏樹 (TAKITA HIROKI)
筑波大学・物質工学系・教授
研究者番号: 00011213

黒田眞司 (KURODA SHINJI)
筑波大学・数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 12102967

横井裕之 (YOKOI HIROYUKI)

熊本大学工学部・准教授
研究者番号: 17401404

(3) 連携研究者

宇治進也 (UJI SHINYA)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ量子輸送グループ・グループリーダー
研究者番号: 80344430

(2005-2008年度研究分担者)