

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17064008
 研究課題名（和文） オーダーN・フルポテンシャルKKRグリーン関数法の開発・応用
 研究課題名（英文） Development and application of the order-N full-potential KKR-Green's function method
 研究代表者
 赤井久純（AKAI HISAZUMI）
 大阪大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：70124873

研究成果の概要：KKR グリーン関数法にもとづくフルポテンシャル・オーダーN 法とその計算機コードを開発し、これまで取り扱いが困難であった大規模系の高精度なフルポテンシャル計算および大規模不規則系に対するコヒーレントポテンシャル近似の適用を可能にした。この研究によって100層程度の厚さを持つ薄膜の第一原理フルポテンシャル計算や10000層程度までのマフィンティンポテンシャル模型に対する計算を実施し、大規模系に対する新しい知見を得るとともに、新材料、新デバイスのデザインを行なった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	10,700,000	0	10,700,000
2006年度	11,500,000	0	11,500,000
2007年度	11,500,000	0	11,500,000
2008年度	7,400,000	0	7,400,000
総計	41,100,000	0	41,100,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎

キーワード：(1) 計算機マテリアルデザイン (2) 第一原理電子状態計算 (3) オーダーN 法
 (4) フルポテンシャル KKR 法 (5) 量子シミュレーション (6) 量子デザイン

1. 研究開始当初の背景

KKR グリーン関数法は、散乱問題や不純物問題を正確に取り扱うことができる、高速高精度な計算が可能であるなどの利点がある。本研究グループではこのKKR法に1) 不規則合金のような系の計算(CPA)、2) 一切のモデルを仮定しないポテンシャルの取り扱い(フルポテンシャル)、3) サブミクロンサイズの計算(オーダーN)を取り入れることに成功した。しかしこれらの3つの開発はそれぞれ独立に行われており、これらの手法を組み合わせるような試みはなされていない。より現実の物質に即した計算を行う

ためには、これらの手法の全てを統合した量子シミュレータの開発が必要である。

2. 研究の目的

サブミクロンサイズの第一原理電子状態計算を高精度、高速で計算し、信頼性のある計算機マテリアルデザインを可能にするためにオーダーN・フルポテンシャルKKRグリーン関数法を開発する。

3. 研究の方法

以下の方法で研究を進めた。

- 1) フルポテンシャル KKR 法の精度向上、高速度化と安定性の向上をはかり、より大きな系の計算に備える。
- 2) 遮蔽グリーン関数法を用いたオーダーN法の計算機コードを再構築して、フルポテンシャル法の適用、線形応答計算の適用等に備える。
- 3) これらの成果をもとにオーダーN・フルポテンシャルKKRグリーン関数法を開発する。
- 4) 線形応答計算に遮蔽グリーン関数法を用いたオーダーN手法を導入する。
- 5) 開発された手法を用いて、現実に近い膜厚をもつ薄膜の電子状態計算、輸送現象の計算を行い、新材料、新デバイスの計算機マテリアルデザインを実施する。

4. 研究成果

本研究は方法論の開発と、そのような方法論を用いて、現実的な物質群の電子状態の量子シミュレーションおよび量子デザインを実行することである。方法論の開発としては、1) フルポテンシャル・オーダーN法、2) オーダーN輸送現象第一原理計算手法、3) 最適化有効ポテンシャル法の開発を行なった。またそれらの手法の応用として、4) パイライト型遷移金属カルコゲナイドの電子状態と磁性、5) ハーフメタリック希薄反強磁性半導体の輸送現象、6) ゼーベック係数の第一原理計算、7) 半導体ヘテロ構造を用いた核スピン操作、8) スピン輸送の第一原理計算、9) ミクロン厚さ薄膜の第一原理電子状態計算、10) キュリー温度スレーターポーリング曲線、11) 相互作用効果および多重散乱を考慮した原子間相互作用、12) ショットキー障壁の第一原理計算、13) ハーフメタリック反強磁性体のデザインとそれを用いた GMR 素子の研究、14) YMn_2 の電子状態と磁性、15) $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 永久磁石の電子状態と磁気異方性、の研究を行った。これらのうち、12) について簡単に説明する。

金属と半導体の接合界面では金属と半導体の電子状態に応じて、ショットキー障壁が形成される場合と、オーミック接触が得られる場合がある。このような界面における障壁やオーミック接触の形成は界面の数層で起こっていることではなく、半導体側の多くの層を含む領域で生じている。したがって、微視的な取り扱いには困難であり、半導体工学においてこのような金属と半導体の接触は準巨視的な現象論で扱われる事が多い。このような現象論においては微視的な観点では一体何をもってショットキー障壁と見做すかと言った基本的な質問にも的確に答えることは難しい。本研究では、このような多数の層におよぶ金属半導体界面付近の電

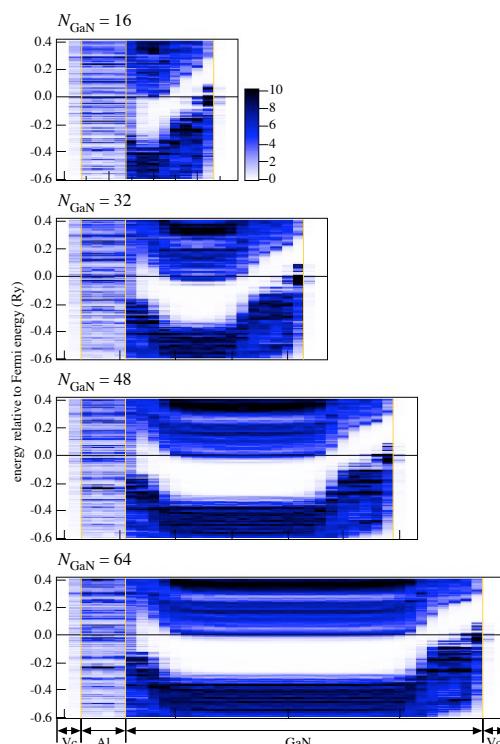


図1 Al/n-type GaN の状態密度

子状態をオーダーN・フルポテンシャル KKR 法でとりあつかい、ショットキー障壁の形成について微視的な理論を展開した。

図1および2にそれぞれn型、p型ドーピングの場合の局所状態密度を濃淡で表した。横軸は多層膜の厚さ方向の位置を表し、縦軸はフェルミレベルを基準にしたエネルギーである。白く抜けている部分は半導体ギャップに相当する。左側のギャップのない部分はAl層に対応する。通常教科書でバンドベンディングの概念的な説明に良く用いられる図が何を表したのかははっきりとはしないが、仮にその概念が図1、2で表現した局所状態密度に対応するものとすれば、これらの図は金属・半導体界面にバンドベンディングが起こっていることを示しているものと言える。これらの様相は半導体層の厚さが約30層を超えるあたりから見えてくる。本計算では約60層になると界面付近でのバンドベンディングは層の厚さに敏感ではなくなる。

n型、p型ドーピングのバンドベンディングは顕著に違っているが、ともにショットキー障壁が形成されていることがわかる。しかし、p型ドーピングに対して障壁は低く、ほぼオーミック接触となっていると言える。実際、実験的にはn型ではショットキー接触、p型ではオーミック接触になる場合が多いと

報告されており、本計算は実験と良く整合しているといえる。n型で高いショットキー障壁、p型で低いショットキー障壁となった理由は、GaNの接触前のドナー準位がAlのフェルミエネルギーより約3.3eVとかなり高い位置にある一方、アクセプターレベルがAlのフェルミエネルギーよりわずかに約0.2eVだけ低い位置にあるためである。n型、p型のいずれの場合も層の中央付近では安定したn型、p型の半導体の電子状態を示しており、ドナーレベル、アクセプターレベルはそれぞれ伝導帯の下端、価電子帯の上端に位置しており、フェルミレベルはそこにピンされている。

金属との界面付近をよく見ると半導体側のギャップ中に金属誘起ギャップ状態(MIGS)が形成されていることがわかる。このようなMIGSが障壁の高さに影響を与えていることは確かであるが、定量的な議論をするためにはさらに大規模な系に対する計算を行う必要がある。

層の右端は真空層に接触している。ただしこの真空層は薄く、その外側には強い斥力ポテンシャル(約40eV)がおかれている。この影響で、真空層ポテンシャルが現実の真空ポテンシャルに漸近する以前に切断された可能性がある。このため真空レベルが価電子

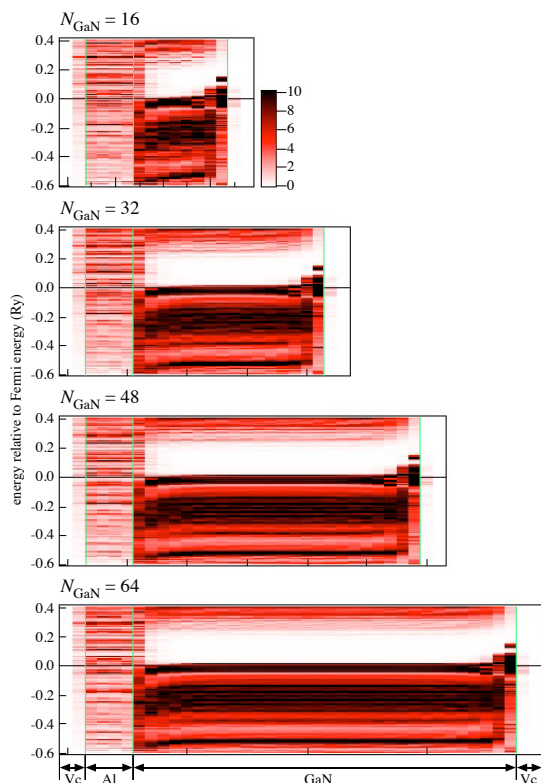


図2 Al/p-type GaN の状態密度

帯の上端より約0.5eV低い位置に存在し、そのため半導体界面との間にショットキー障壁を形成したと見ることができ、この議論の確認のためには真空層を十分とった計算が必要である。

5. 主な発表論文等

(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 22 件)

- 1) M. Oshita, S. Yotsuhashi, H. Adachi, and H. Akai, Seebeck coefficient calculated by Kubo-Greenwood formula on the basis of density functional theory, J. Phys. Soc. Jpn 78, 024708-1-5 (2009), 査読有り.
- 2) S. K. Nayak, M. Ogura, A. Hucht, S. Buschmann, H. Akai, and P. Entel, Ab initio simulations of diluted magnetic semiconductors: cobalt-doped zinc oxide, Phys. Stat. Solidi a, 205, 1839-1846 (2008), 査読有り.
- 3) V.D. Buchelnikov, P. Entel, S.V. Taskaev, V.V. Sokolovsky, A. Hucht, M. Ogura, H. Akai, M.E. Gruner, and S.K. Nayak, Monte Carlo study of the influence of antiferromagnetic exchange interactions on the phase transitions of ferromagnetic Ni-Mn-X alloys (X =In, Sn, Sb), Phys. Rev. B 78, 184427-1-11 (2008), 査読有り.
- 4) H. Ebert, D Koedderitzsch, and H. Akai. A relativistic optimized potential method for solids implemented within the multiple scattering KKR method, J. Phys. C: Condensed Matter 21, 064208-1-4 (2009), 査読有り.
- 5) A. Fucht, S.K. Nayak, M. Ogura, H. Akai, and P. Entel, Monte Carlo simulations of diluted magnetic semiconductors using ab-initio exchange parameters, J. Phys. C: Condensed Matter 21, 064238-1-6 (2009), 査読有り.
- 6) N H Long, M. Ogura and H. Akai, New type of half-metallic antiferromagnets: Transition metal pnictides, J. Phys. C: Condensed Matter 21, 064241-1-6 (2009), 査読有り.
- 7) M. Mihara, K. Matusta, S. Kumashiro, M. Fukuda, S. Kosakai, Y. Umemoto, M. Yoshikawa, F. Nishimura, J. Kumasaki, D. Ishikawa, M. Ogura, H. Akai, and T. Minamisono, Temperature dependence of Knight shifts for 12 B in Pt, Hyperfine Interactions 178, 73-77 (2007), 査読有り.
- 8) M. Ogura and H. Akai, Manipulation of Nuclear Spin in interfaces of diluted magnetic semiconductors, e-Journal of

Surface Science and Nanotechnology 6 , 7–10 (2008) , 査読有り .

- 9) M. Ogura and H. Akai, Nuclear Spin Manipulation in interfaces of diluted magnetic semiconductors, *Hyperfine Interactions* 176, 59–63 (2007) , 査読有り .
- 10) H. Akai and M. Ogura, Hyperfine interaction of half-metallic diluted antiferromagnetic semiconductors, *Hyperfine Interactions* 176, 21–25 (2007) , 査読有り .
- 11) M. Ogura and H. Akai, Electric-field-driven nuclear spin control using diluted magnetic semiconductors, *Appl. Phys. Lett.* 91, 253118-1–3 (2007) , 査読有り .
- 12) N. H. Long and H. Akai, Ab-initio calculation of electronic structure and magnetic properties of $Mn_{1-x}Cr_xTe$, *J. Supercond. Nov. Magn.* 20, 473–378 (2007).
- 13) P. Entel, M.E. Gruner, W.A. Adego, V.-J. Eklund, A.T. Nayak, H. Akai and M. Acet, Ab initio modeling of maetensitic transformations (MT) in magnetic shape memory alloys, *J. Magn. Magn. Mater.* 310, 2761–2763 (2007) , 査読有り .
- 14) H. Akai and M. Ogura, Calculated transport properties of half-metallic diluted antiferromagnetic semiconductors, *Journal of Physics D: Applied Physics* 40, 1238–1241 (2007) , 査読有り .
- 15) N. H. Long and H. Akai, Firstprinciples KKR-CPA calculation of interaction between concentration fluctuations, *Journal of Physics: Condens. Matter* 19, 365232-1–8 (2007) , 査読有り .
- 16) C. Takahashi, M. Ogura and H. Akai, First-principles calculation of the Curie temperature Slater–Pauling curve, *Journal of Physics: Condens. Matter* 19, 365233-1–6 (2007) , 査読有り .
- 17) M. Ogura and H. Akai, Magnetic Properties of 3d Pyrite-type Mixed Crystals Calculated by the Full-Potential KKR-CPA Method, *Journal of Physics: Condens. Matter* 19, 365215-1–6 (2007) , 査読有り .
- 18) M. Ogura, C. Takahashi and H. Akai, Calculated electronic structures and Neel temperatures of half-metallic diluted antiferromagnetic semiconductors, *Journal of Physics: Condens. Matter* 19, 365226-1–8 (2007) , 査読有り
- 19) M. Ogura, Y. Hashimoto and H. Akai, Half-Metallic Diluted Antiferromagnetic Semiconductors, *Physica Status Solidi C* 3, 4160–4163 (2006) , 査読有り .
- 20) H. Akai and M. Ogura, Half-metallic diluted antiferromagnetic semiconductors, *Phys. Rev. Lett.* 97, 06401-1–4 (2006) , 査

読有り .

- 21) M. Toyoda, H. Akai, K. Sato, H. Katayama-Yoshida, Electronic structures of $(Zn, TM)O$ (TM: V, Cr, Mn, Fe, Co, and Ni) in the self-interaction-corrected calculations, *Physica B* 376–377, 647–650 (2006) , 査読有り
- 22) M. Ogura and H. Akai, Full-potential Korringa-Kohn-Rostoker method and its application to electric field gradient calculation, *J. Phys.: Condense. Matter* 17, 5741–5755 (2006) , 査読有り .

[学会発表] (計 8 5 件)

- 1) H. Akai and M. Ogura, Computational nano-materials design and its application to spintronics, Japan-Germany Joint Workshop 2009 Nanoelectronics, 2009/1/21-23, Kyoto
- 2) H. Akai and M. Ogura, Order-N full-potential KKR method and its application to layered systems, SciSSP2009 Workshop, 2009/2/16-19, Kashiwa, Japan
- 3) 山岡人志, 辻井直人, 赤井久純, $Y Mn_2$ 及び $Y_{0.96}Lu_{0.04}Mn_2$ の共鳴 X 線発光分光, Ignace Jarrige, 高橋慶紀, 大橋浩史, 野本大介, 半田克己, 井出純子, 熱田英紀, 柄尾達紀, 伊藤嘉, 吉川英樹, 日本物理学会秋の分科会, 岩手大学, 2008/9/21
- 4) 増山綾香, 小倉昌子, 赤井久純, 永久磁石 $Sm_2Fe_{17}N_3$ への不純物添加効果の第一原理計算, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大, 2009/3/27
- 5) 赤井久純, 小倉昌子, $Ni(S_{1-x}Se_x)_2$ の金属絶縁体転移近傍の電子状態と反強磁性, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大学, 2009/3/27
- 6) 斎藤涼介, 小倉昌子, 赤井久純, KKR-Green 関数法による光学伝導度の第一原理計算, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大学, 2009/3/28
- 7) 永田徹哉, 四橋聡史, 赤井久純, 遮蔽グリーン関数法による伝導率計算, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大学, 2009/3/28
- 8) 小倉昌子, 赤井久純, 遷移金属合金の結晶磁気異方性の第一原理計算, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大学, 2009/3/28
- 8) 岩崎将, 深澤太郎, 赤井久純, $(Y_{1-x}Lu_x)Mn_2(x=0\sim 0.05)$ の電子状態と磁性, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大学, 2009/3/28
- 9) 三島良太, 高田正基, Wilson Agerico Dino, 冨田博一, 赤井久純, Au(111)表面上における Mn 合金の低温走査トンネル分光測定, 日本物理学会第 6 4 回年次大会, 立教大学, 2009/3/30
- 10) H. Akai and M. Ogura, Electric-field-

driven nuclear spin control using diluted magnetic semiconductors, 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第2回公開シンポジウム, 2008/3/4-5, 岡崎コンファレンスセンター

11) H. Akai and M. Ogura, Screened KKR calculation for slabs of micron-order thickness, 次世代ナノ統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 第2回公開シンポジウム, 2008/3/4-5, 岡崎コンファレンスセンター

12) 小倉昌子, 赤井久純, Peter Entel, スピン流を含む伝導率の第一原理計算, 日本物理学会 63 回年次大会, 近畿大学, 2008/3/23

13) 深沢太郎, 赤井久純, 最適化有効ポテンシャル法を用いた第一原理電子状態計算手法, 日本物理学会 63 回年次大会, 近畿大学, 2008/3/23

14) N. H. Long, M. Ogura, and H. Akai, A new type of half-metallic antiferromagnets, 日本物理学会 63 回年次大会, 近畿大学, 2008/3/24

15) 岡田みゆき, 小倉昌子, 赤井久純, パイライト型遷移金属カルコゲナイドの電子状態と磁性, 日本物理学会 63 回年次大会, 近畿大学, 2008/3/26,

16) 赤井久純, 小倉昌子, オーダーN グリーン関数法と半導体ヘテロ界面を用いた核スピン操作, ナノ統合「次世代ナノ磁性」研究会, 神戸市ホテルプラザ北野, 2008/3/27

17) 赤井久純, 小倉昌子, スピン輸送の第一原理計算, 特定領域「量子デザイン」研究会, 国際高等研究所, 2008/3/18

18) H. Akai and M. Ogura, Theory of electronic structure and hyperfine interactions, Sakura-Workshop, 2008/3/31-4/3, Riken, Wakoh, Japan

19) M. Ogura and H. Akai, Manipulation of Nuclear Spins in Interfaces of Diluted Magnetic Semiconductors, Sakura-Workshop, 2008/3/31-4/3, Riken, Wakoh, Japan

20) N. H. Long, M. Ogura and H. Akai, Design of new type of half-metallic antiferromagnets, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

21) M. Ogura and H. Akai, Charge and spin transports in GMR structures, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

22) M. Ogura and H. Akai, Full potential screened KKR method, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

23) H. Ebert, D. Koedderitzsch, and H. Akai, A relativistic optimized potential

method for solids implemented within the multiple scattering KKR method, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

24) T. Fukazawa and H. Akai, An effective approximate method of determining optimized effective potentials for extended systems, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

25) N.H. Long, M. Ogura and H. Akai, First principles calculation of GMR and TMR effects of half-metallic systems, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

26) A. Hucht, S.K. Nayak, M. Ogura, H. Akai and P. Entel, Monte Carlo simulations of diluted magnetic semiconductors using ab initio exchange parameters, International Conference on Quantum Simulators and Design 2008, Tokyo, 2008/5/31-6/3

27) H. Akai and M. Ogura, Calculation of spin transport using the KKR Kubo-Greenwood formula, KKR workshop, Canterbury, England, 4-6 July 2008

28) H. Akai, Development of quantum simulators, Asia CMD Workshop, 6-8 August, Bandung, Indonesia

29) H. Akai, Development of Quantum Simulators, 1st Asia CMD Workshop and DLSU-OU Workshop, 1-5 September, Manila, Philippine

30) H. Akai and M. Ogura, Charge and spin transports, KKR workshop, 2008/9/13-17, Lucca, Italy

31) M. Ogura and H. Akai, First-principles calculation of spin transport, 4th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, Osaka, 2008/9/29-10/1

32) H. Akai and M. Ogura, Computational materials design, FCFP-XVIII and NMS-IV, 2008/9/15-18, Zhenjiang, China

33) H. Akai and M. Ogura, First-Principles Calculation of Spin Transport, 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop (Spin Transport in Condensed Matter), 2008/10/28-11/28, Kyoto, Japan

34) H. Akai and M. Ogura, Half-metallic antiferromagnetic diluted semiconductors and their transport properties, Third International Workshop on DFT applied to metals and alloys, 2007/5/2-4, Oran,

Algeria

35) H. Akai, Green's function method in electronic structure calculation, Spring Course Semiconducting Nanoparticles: Synthesis and Structure, 2007/5/9-11, Duisburg, Germany

36) H. Akai and M. Ogura, Transport properties of half-metallic antiferromagnetic semiconductors, International conference on Nanospintronic Design and Realization 2007, 2007/5/21-25, Dresden, Germany

37) M. Ogura, First principles calculation of the magnetic and transport properties of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, International conference on Nanospintronic Design and Realization 2007, 2007/5/21-25, Dresden, Germany

38) 赤井久純, 小倉昌子, ハーフメタリック反強磁性半導体系の輸送現象, ナノ情報機能・材料 成果報告会, 2007/7/13-14, 東京大学小柴ホール

39) 赤井久純, オーダー-N・KKR 法による多層膜のシミュレーション, ミニワークショップ「大規模・高精度電子状態計算手法に関する研究会」, 2007/7/24-25, 物質・材料研究機構並木共同研究棟 4階大ゼミナール室

40) 小倉昌子, フルポテンシャル KKR 法の開発の現状, 大規模・高精度電子状態計算手法に関する研究会, 2007/7/24-25, 物質・材料研究機構並木共同研究棟 4階大ゼミナール室

41) H. Akai, Green's function method and its application to first-principles calculation of electric transport phenomena, International Workshop on Foundations and Applications of the Density Functional Theory, 2007/7/19-8/10, ISSP, Tokyo

42) H. Akai, Exact Exchange Method Applied to Diluted Magnetic Semiconductors, International Symposium on Foundations and Applications of the Density Functional Theory, 2007/8/1-3, ISSP, Tokyo

43) H. Akai and M. Ogura, Hyperfine Interactions of Half-Metallic Diluted Antiferromagnetic Semiconductors, XIV International Conference on Hyperfine Interactions & XVIII International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions, 2007/8/5-10, Iguazu Falls, Brazil

44) M. Ogura and H. Akai, Manipulation of Nuclear Spins in Interfaces of Diluted Magnetic Semiconductors, XIV International Conference on Hyperfine Interactions & XVIII International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions, 2007/8/5-10, Iguazu Falls, Brazil

45) 小倉昌子, 岡田みゆき, 赤井久純, パイライト型化合物の第一原理計算, 日本物理学

会年会, 北海道大学, 2007/9/21

46) 赤井久純, 小倉昌子, 永田徹哉, 斎藤涼介, 反強磁性ドメイン境界と電子輸送, 日本物理学会年会, 北海道大学, 2007/9/21

47) M. Ogura and H. Akai, Manipulation of Nuclear Spins in Interfaces of Diluted Magnetic Semiconductors, Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2007/9/26-28, Osaka University

(以下 38 件省略)

〔図書〕 (計 2 件)

1) H. Akai and S. Tsuneyuki (Eds.), Journal of Physics: Condensed Matter Special Issue: International Conference on Quantum Simulators and Design 2008 IOP Publishing, Feb. 2009

2) T. Oguchi and H. Akai (Eds.), Journal of Physics: Condensed Matter Special Issue: International Conference on Quantum Simulators and Design 2006 IOP Publishing, Sep. 2007

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

1) 赤井久純, 小倉昌子, N. H. Long 「磁気抵抗効果膜及びこれを用いた磁気抵抗効果素子、並びに磁気デバイス」 特願 2008-073917, 2008 年 9 月 18 日

2) 赤井久純, 小倉昌子, N. H. Long 「ハーフメタリック反強磁性体の調整方法」 特願 2008-073917, 2008 年 3 月 21 日

3) 赤井久純, 小倉昌子, 他 「反強磁性ハーフメタリック半導体」 特願 2006-219951, 2006 年 8 月 11 日

〔その他〕

ホームページ

<http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp>

<http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~tokutei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤井 久純 (AKAI HISAZUMI)

大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70124873

(2) 研究分担者

小倉 昌子 (OGURA MASAKO)

大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30397640

平井 國友 (HIRAI KUNITOMO)

奈良県立医科大学・医学部・教授
研究者番号: 60156627

(3) 連携研究者

なし