

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25年6月7日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560005

研究課題名（和文）インジウムリンベース・室温スピントロニクスデバイスの研究

研究課題名（英文）InP-based room-temperature semiconductor spintronic materials and devices

研究代表者

内富 直隆 (UCHITOMI NAOTAKA)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：20313562

研究成果の概要（和文）：次世代デバイス技術として期待される半導体スピントロニクスでは、従来の半導体技術と整合性があり室温で強磁性を示す半導体材料の探査が必要である。本研究では、II-IV-V 族多元化合物半導体である ZnSnAs₂ に磁性原子 Mn を添加した磁性薄膜のエピタキシャル成長、その磁気特性について調べ、ハイブリッド磁気抵抗素子への応用を試みた。Mn 添加 ZnSnAs₂ 薄膜は分子線エピタキシーにより InP 基板の上にエピタキシャル成長させることができ 334K の室温強磁性を示す。この磁性半導体と InP 基板と格子整合する InGaAs や InAlAs とのヘテロエピタキシーにより磁性量子ナノ構造の可能性を示した。さらに、MnAs を含むハイブリッド磁気抵抗素子を作製し、II-IV-V 族磁性半導体の応用について検討した。

研究成果の概要（英文）：Ferromagnetic semiconductors have been recently attracted world wide scientific and technological interest because of possible application in spintronic devices. Two-major criteria such as room-temperature ferromagnetism and process compatibility for semiconductor spintronic materials are required from a practical point of view. Mn-doped ZnSnAs₂ thin films were grown on InP substrates by molecular beam epitaxy (MBE). Heteroepitaxial growth of InGaAs and InAlAs layers on ZnSnAs₂ / InP using low-temperature MBE is investigated in order to produce InP-based spintronic devices. We have successfully grown MnAs/ZnSnAs₂/ZnSnAs₂:Mn trilayer heterostructures on InP(001) substrates. The current-in-plane giant magnetoresistance (CIP-GMR) was clearly observed in magnetoresistance measurements in current-in-plane geometry.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2900000	870000	3770000
2011年度	500000	150000	650000
2012年度	400000	120000	520000
年度			
年度			
総計	3800000	1140000	4940000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

Si半導体集積回路では、最小寸法の微細化限界が顕在化し、Beyond-CMOS技術の研究・開発が急務となっている。そのような先行技術の候補として、これまで電子の電荷を利用してきたデバイスに、新たに電子のスピン自由度もあわせて制御する“スピントロニクス”の研究が活発化している。磁気抵抗効果型ランダムアクセスメモリ (MRAM) の開発は、強磁性トンネル接合 (MJT) 素子の磁化状態をメモリとする金属スピントロニクスの代表例である。それと平行して、半導体スピントロニクスの研究が注目されている。半導体スピントロニクスでは、光との相互作用を積極的に取り入れ制御できることが特徴で、電子と光と磁性の3要素を融合させた高機能なデバイスの実現が期待される。すなわち、エレクトロニクス+フォトニクス+マグネティクス=半導体スピントロニクスの新分野の開拓が目的である。従って、半導体スピントロニクスでは、従来の半導体プロセス技術と整合性があり室温で強磁性を示す半導体材料の探査が必要である。

2. 研究の目的

これまでの研究から II-IV-V₂ 型化合物半導体 ZnSnAs₂ 薄膜は、InP (001) 基板と擬格子整合し高品質なエピタキシャル界面を作製することができ、Mn を 5% 添加することにより室温で強磁性を発現する磁性半導体であることを確認している。InP 基板は半導体レーザーや高速電子デバイスに応用され、Mn 添加 ZnSnAs₂ 薄膜は InP プロセスと整合性が良いことから、InP ベーススピントロニクス素子への展開が期待される。

本研究課題では、InP ベーススピントロニクスを実現するために主に次の研究課題について調べた。

(1) 磁性半導体を含む磁性量子ナノ構造を作製するために、InP 基板に格子整合する半導体薄膜の Al_{0.48}In_{0.52}As, Ga_{0.47}In_{0.53}As について、ZnSnAs₂ 薄膜と Mn 添加 ZnSnAs₂ 薄膜とのヘテロエピタキシャルの可能性について検討する。

(2) InP ベーススピントロニクスのプロトタイプとして、磁性金属 MnAs とのハイブリッド磁気抵抗効果構造の作製を試みる。InP (001) 基板上に成長した MnAs/ZnSnAs₂/ZnSnAs₂:Mn 3 層構造の CIP-GMR 効果について調べ Mn 添加 ZnSnAs₂ 磁性薄膜の応用性について調べる。

3. 研究の方法

II-IV-V 族化合物半導体 ZnSnAs₂ 薄膜は、分子線エピタキシー (MBE) 法によりインジウム

リン (InP) 基板上に作製する。これまで報告されているバルク結晶の ZnSnAs₂ はバンドギャップが 0.73eV、格子定数が a=5.852Å、c=11.705Å であり、InP 基板の格子定数 a=5.8694Å と極めて近く、ほぼ格子整合する薄膜を作製することができる。

(1) II-IV-V 族 ZnSnAs₂ と III-V 族 InGaAs あるいは InAlAs とのヘテロエピタキシャルについては、分子線エピタキシーによる成長条件を調べる。特に、Mn 添加 ZnSnAs₂ 薄膜は基板温度 300°C 近傍で結晶成長されることから、この基板温度で Zn, Sn, As, In, Al, Ga のビームフラックス条件と基板温度の関係を明らかにし、RHEED 解析システムを用いて成長条件の最適化を行う。このようにして成長した Mn 添加 ZnSnAs₂ 膜と InGaAs および InAlAs とのヘテロエピタキシャル膜について、結晶構造、電気的特性などを調べる。Mn 添加 ZnSnAs₂ 膜は、基板温度 300°C 近傍で結晶成長を行うが、その温度近傍で磁気特性がどのように変化するか明らかになっていない。従って、Mn 添加 ZnSnAs₂ 薄膜の熱処理温度による磁気特性、電気特性、構造特性について詳細に調べる。あわせて Mn 添加 ZnSnAs₂ については、InP (001) 基板上に ZnSnAs₂ バッファー層を成長させた後に Mn ドープ量を変えて Mn ドープ ZnSnAs₂ を成長させ、超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いて磁化と温度の関係を調べる。

(2) 金属磁性体ハイブリッド構造の、MnAs/ZnSnAs₂/ZnSnAs₂:Mn 3 層構造からなる磁気抵抗効果素子の作製を行う。MnAs は室温強磁性を示す磁性金属で、MnAs (20nm) /ZnSnAs₂ (2nm) / ZnSnAs₂:Mn (50nm) 構造を作製しその磁気抵抗を測定した。II-IV-V 磁性化合物半導体を用いた磁気抵抗効果素子の試みは本研究が初めてである。

4. 研究成果

(1) InP 基板上で InGaAs および InAlAs と ZnSnAs₂:Mn 薄膜とのヘテロ接合について、分子線エピタキシーにより基板温度 300°C で成長実験を行った。InGaAs では、成長速度 0.95~2.93nm と変化させ InP 上に低温成長させ、結晶性について調べた。低温成長した InGaAs では、InP との格子不整合が 0.3~0.8% であった。次に InGaAs を絶縁層とした ZnSnAs₂:Mn 7%/InGaAs/ZnSnAs₂:Mn 5% からなるトンネル磁気抵抗構造の作製を試みた。また、ZnSnAs₂:Mn/InAlAs 多層構造について結晶成長を試み比較的良好な磁性多層構造の作製を確認できた。これらの研究結果から半導体トンネル磁気抵抗効果構造の作製に関する重要なデータを得ることができた。

(2) 金属磁性体ハイブリッド構造からなる、MnAs/ZnSnAs₂/ZnSnAs₂:Mn 磁気抵抗効果素子の作製を行った。MnAs は強磁性電極への有望な候補のひとつである。MnAs/GaAs/MnAs や MnAs/GaAs/(Ga, Mn)As の磁性 3 層構造においてスピン流の注入と検出の報告がなされている。MnAs の格子定数は、 $a=0.3725\text{nm}$ と $c=0.5714\text{nm}$ であり、321K のキュリー温度をもつ強磁性金属であり、GaAs、Si、InP のような一般的な半導体基板の上にエピタキシャル成長できる。ここでは、InP (001) 基板上に MnAs/ZnSnAs₂/ZnSnAs₂:Mn 3 層構造を作製し、その CIP-GMR 効果について報告する。これは、II-IV-V₂ 族 3 元化合物半導体を用いた CIP-GMR についての最初の報告である。この結果は、MnAs 層から ZnSnAs₂:Mn 層へのスピン流の注入を示している。ZnSnAs₂:Mn 層が強磁性金属/ZnSnAs₂:Mn エピタキシャルヘテロ構造でスピン注入・検出のための強磁性電極として機能することを見出した。

MnAs (20 nm) / ZnSnAs₂ (2 nm) / ZnSnAs₂:Mn (50 nm) ヘテロ構造を半絶縁性 InP (001) 基板上に MBE 法を用いて成長した。ZnSnAs₂:Mn の Mn 濃度は、ビーム等価圧比から ~5% と見積もられた。薄膜は、MR 測定を行うために ZnSnAs₂ 層まで湿式化学エッチングによりメサ構造に加工された。その後、インジウムを用いて、電極を MnAs と ZnSnAs₂ 層の表面に形成した。この試料を試料 A とする。比較のために、エッチングプロセスを行わないものを試料 B として用意した。また、試料 C として InP (001) 基板上に成長した単層の MnAs ヘテロ構造を用意した (図 1)。ZnSnAs₂ と ZnSnAs₂:Mn 層のキャリア濃度は、室温で $6.0\text{--}8.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ と $2.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ である。

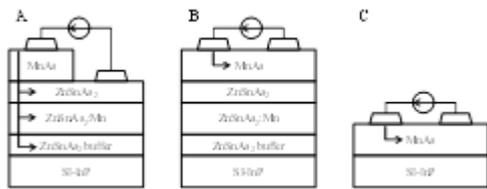


図 1 試料 A, B, C の概略図。矢印は電流の流れを示す。

試料 A は、高抵抗で ZnSnAs₂ と似ており、半導体的な特性を示した。一方、試料 B と C は低抵抗で金属的な振る舞いを示した。MR 測定は、直流法と 4 端子法により行った。試料 A に対するバイアス電流は、 $1 \mu\text{A}$ に固定した。試料 B と C に印加した電流は、同様な電圧となるように一定に固定し、磁場は InP [110] 方向に 9kOe の範囲で印加した。磁気特性は、SQUID を用いて測定した。

図 2 に、InP (001) 基板上 MnAs /ZnSnAs₂ /ZnSnAs₂:Mn の XRD $\omega/2\theta$ パターンを示す。

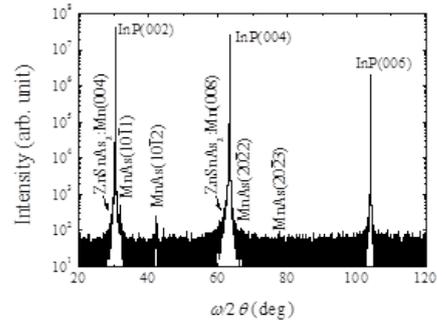


図 2 . MnAs /ZnSnAs₂ /ZnSnAs₂:Mn の XRD $\omega/2\theta$ パターン

InP (002) と (004) ピーク近傍に ZnSnAs₂ と ZnSnAs₂:Mn の回折パターンが観測された。同時に NiAs 型 MnAs からの 10-11, 20-22, 20-23, 10-12 の反射も観測された。この MnAs の格子定数は $a = 0.3720 \text{nm}$, $c = 0.5712 \text{nm}$ と見積もられ、格子は緩和しているといえる。

図 3 に、10K での試料 A, B, C の磁場に対する MR 測定の結果を示す。低磁場 (<2kOe) で、ヒステリシスをもつ 2 つのピークが現れた。高磁場での負の MR は、強磁性 MnAs 層の force field か異方性磁気抵抗 AMR が原因と考えられる。ここで、ZnSnAs₂:Mn 層の磁気抵抗は $10^{-2}\%$ と小さいので無視する。負の MR を除去し、CIP-GMR による MR を取り出すために、MR 比 $(R_{\text{max}} - R_0) / R_0$ を定義する。ここで R_{max} は最大抵抗、 R_0 はゼロ磁場での抵抗である。試料 A の最大 MR は試料 B と C のものよりも大きい。その MR のピークは試料 B と C と異なり、高磁場側にシフトしている。試料 C の R_{max} は試料 B のものよりも低磁場側に現れている。その理由として、試料 C の保持力が ~770 Oe であり、試料 B の ~950 Oe よりも小さいためと考えられる。

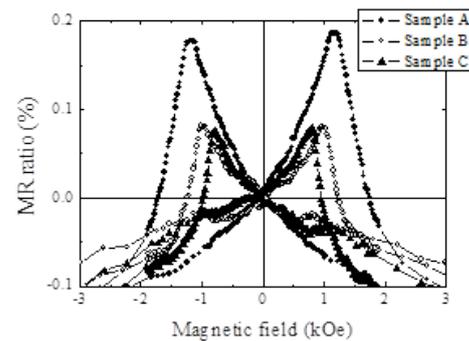


図 3 10K で測定した current-in-plane 配置での試料 A, B, C の MR 曲線。磁場は、InP [110] 方向に印加した。試料 A において低磁場 (<2 kOe) で明らかに CIP-GMR が観測されている。2 層の強磁性層の磁化が反平行のとき抵抗が増大し、平行のとき減少している。試料 B と C の MR 比は試料 A のものよりも小さい。

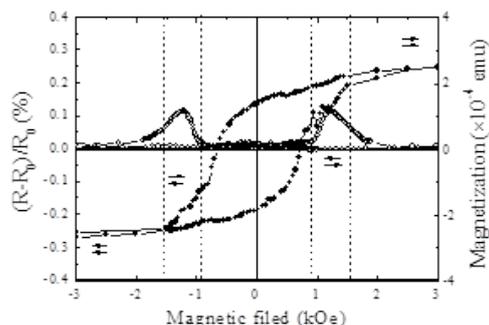


図 4 MnAs(20nm) /ZnSnAs₂(2nm) / ZnSnAs₂:Mn(50 nm) の 100K での GMR 曲線 (○) と 77K での磁化曲線 (●)。磁場は InP [110] 方向に印加している。矢印は MnAs と ZnSnAs₂:Mn 層の磁化の向きを表す。

次に MnAs/ZnSnAs₂/ZnSnAs₂:Mn 3 層構造の磁気特性の測定結果を示す。図 4 に試料 A の磁化曲線と MR 曲線の比較を示す。磁場は InP[110]に沿って-5 から 5kOe の範囲で印加した。磁化曲線中の小さな 2 つのステップは強磁性 MnAs と ZnSnAs₂:Mn 層の間の保磁力差によるものである。SQUID で測定した磁化の温度依存性では、磁化が ~325K で消失した。このキュリー温度は、MnAs (321 K) と ZnSnAs₂:Mn (333 K) のものと一致する。77K での磁化曲線と比較するために、100K の MR 曲線を用いる。ここで示す MR 曲線は、試料 A の MR から試料 B の MR を引き算して得たものである。R_{max} の磁場は、MnAs と ZnSnAs₂:Mn の磁化が反平行になるときと一致していることがわかる。一方、試料 B と C の MR は MnAs 層の AMR に起因するといえる。このように、2 つの強磁性層の平行・反平行磁化配置に依存する抵抗の変化による生じる CIP-GMR を観測した。

ここで得られた研究結果は、Mn をドーブした II-IV-V₂ 族 3 元化合物半導体 (ZnSnAs₂:Mn) を用いた CIP-GMR 効果の観測としては最初の報告となる。これらの結果は、ZnSnAs₂:Mn エピタキシャル層を用いた強磁性体/半導体構造が InP ベーススピントロニクスデバイスの作製に有用なものであることを示している。

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 14 件)

- (1) H. Oomae, S. Irizawa, Y. Jinbo, H. Toyota, T. Kambayashi, N. Uchitomi, Studies of Zinc-blende type MnAs thin films grown on InP (001) substrates by XRD, Journal of Crystal Growth (in press) (査読有)
- (2) H. Toyota, A. Okabe, T. Endoh, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Study of Sb template for

heteroepitaxial growth of GaSb thin film on Si (111) substrate, Journal of Crystal Growth (in press) (査読有)

- (3) N. Uchitomi, H. Endoh, H. Oomae, M. Yamazaki, H. Toyota, Y. Jinbo, Ferromagnetic and transport properties of p-type (Zn, Mn, Sn)As₂ thin films grown on InP substrates for various Mn contents, Physica Status Solidi Proceedings, C9, (2012) 161-164 (査読有)
- (4) H. Oomae, J. T. Asubar, S. Nakamura, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Zinc-blende MnAs thin films directly grown on InP (001) substrates as possible source of spin-polarized current, Journal of Crystal Growth, 338 (2012) 129-133. (査読有)
- (5) H. Oomae, J. T. Asubar, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Anomalous Hall Effect and Magnetoresistance in Mn-Doped ZnSnAs₂ Epitaxial Film on InP Substrates Japanese Journal of Applied Physics 50 (2011) 01BE12-1, 01BE12-4 (査読有)
- (6) H. Hayashi, N. Uchitomi, N. Hoppo, W. Hu, S. Hosokawa, Three Dimensional Local Structure Analysis of ZnSnAs₂:Mn by X-ray Fluorescence Holography 50, (2011) 01BF05-1, 01BF05-4 (査読有)
- (7) N. Uchitomi, J. T. Asubar, H. Oomae, H. Endoh, Y. Jinbo, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology Ferromagnetic ZnSnAs₂:Mn Chalcopyrite Semiconductors for InP-based Spintronics 9 (2011) 95, 102 (査読有)
- (8) N. Uchitomi, H. Endoh, H. Oomae, Y. Jinbo, E. Mammadov, T. Ishibashi, Experimental evidence for site preference of Mn substitution in ferromagnetic (Zn, Mn, Sn)As₂ films Materials Science and Engineering 21 (2011) 012005 (査読有)
- (9) J. T. Asubar, Y. Agatsuma, Y. Jinbo, T. Ishibashi, N. Uchitomi, Annealing Effects on Impurity Band Conduction of ZnSnAs₂ Epitaxial Films, Materials Science and Engineering, 21 (2011) 012031 (査読有)
- (10) H. Endo, J. T. Asubar, Y. Agatsuma, T. Ishibashi, Y. Jinbo and N. Uchitomi

Evidence of Pseudomorphic Growth of ZnSnAs₂ Epitaxial Layers on Nearly Lattice Matched InP Substrates, Materials Science and Engineering, 11 (2011) 012030 (査読有)

- (11) H. Oomae, J. T. Asubar, M. Haneta, Y. Agatsuma, T. Ishibashi, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Dependence of MBE-grown ZnSnAs₂:Mn epitaxial film properties on Mn doping level, Materials Science and Engineering, 11 (2011), 012026 (査読有)
- (12) E. Mammadov, M. Haneta, H. Toyota, N. Uchitomi Photoluminescence study of epitaxial grown ZnSnAs₂:Mn thin films, Materials Science and Engineering, 11 (2011) 012015 (査読有)
- (13) N. Uchitomi, H. Endo, H. Oomae, Y. Jinbo, Ferromagnetic and transport properties of highly Mn-doped ZnSnAs₂ epitaxial layers on InP substrates, Thin Solid Films, 319, (2011) 8207-8211. (査読有)
- (14) N. Uchitomi, H. Oomae, J. T. Asubar, H. Endo, Y. Jinbo Room-temperature ferromagnetism in (Zn, Mn, Sn)As₂ thin films applicable to InP-based spintronic devices, Japanese Journal of Applied Physics, 50, (2011) 05FB02-05FB02-5 (査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- (1) H. Toyota, A. Okabe, T. Endoh, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Study of Sb template for heteroepitaxial growth of GaSb thin film on Si (111) substrate, The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, September 23-28 2012 Nara, JAPAN
- (2) H. Oomae, S. Irizawa, Y. Jinbo, H. Toyota, T. Kambayashi, N. Uchitomi, Studies of Zinc-blende type MnAs thin films grown on InP (001) substrates by XRD, The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, September 23-28 2012 Nara, JAPAN
- (3) A. Suzuki, K. Hayashi, N. Happou, S. Hosokawa, K. Yamagami, W. Hu, M. Suzuki, N. Uchitomi, Middle range local structure analysis of diluted magnetic semiconductor ZnSnAs₂:Mn

thin films by X-ray fluorescence holography, The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, September 23-28 2012 Nara, JAPAN

- (4) M. Yamazaki, H. Oomae, K. Yamagami, T. Kambayashi, H. Toyota, N. Uchitomi Thermal annealing effect on the magnetic properties of (Zn, Mn, Sn)As₂ thin films epitaxially grown on InP substrates, Worldwide University Network 4th International Conference on Spintronic, July 23-25 2012 Sydney, Australia
- (5) A. Suzuki, K. Hayashi, N. Happou, S. Hosokawa, K. Yamagami, W. Hu, M. Suzuki, N. Uchitomi, Structural analysis of ZnSnAs₂ thin films by X-ray fluorescence holography, International Workshop on 3D atomic imaging at nano-scale active sites in materials, August 6-8, 2012 Kashiwa, JAPAN
- (6) H. Oomae, K. Hayashi, N. Happou, S. Hosokawa, K. Yamagami, W. Hu, M. Suzuki, N. Uchitomi, Analysis of local structure around Mn in ferromagnetic ZnSnAs₂:Mn thin films by x-ray fluorescence Holography, International Workshop on 3D atomic imaging at nano-scale active sites in materials, August 6-8, 2012 Kashiwa, JAPAN
- (7) N. Uchitomi, H. Endoh, H. Oomae, Y. Jinbo, E. Mammadov, T. Ishibashi, Experimental evidence for site preference of Mn substitution in ferromagnetic (Zn, Mn, Sn)As₂ films, International Symposium on Global Multidisciplinary Engineering 2011, January 24-25, 2011, Nagaoka
- (8) N. Uchitomi, M. Yamazaki, H. Endoh, H. Oomae, H. Toyota, Y. Jinbo Ferromagnetic and transport properties of p-type (Zn, Mn, Sn)As₂ thin films grown on InP substrates for various Mn contents, 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2011), 22-26, May 2011, Berlin, Germany
- (9) H. Oomae, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Growth and characterization of Mn-doped ZnSnAs₂ based ferromagnetic semiconductor trilayer on InP (001),

6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, 1-5, August 2011, Matsue Japan

(10) K. Yamagami, H. Oomae, H. Endo, E. Mammadov Y. Jinbo, N. Uchitomi, Effect of thermal annealing on magnetic properties of Mn-doped ZnSnAs₂ thin films grown by MBE, 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, 1-5, August 2011, Matsue Japan

(11) E. Mammadov, M. Haneta, H. Toyota, N. Uchitomi Photoluminescence of MBE grown ZnSnAs₂:Mn / InP nanolayers, 2011 Spring Meeting of European Materials Research Society, 09-13 May, 2011, Nice France

(12) H. Oomae, J. T. Asubar, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Anomalous Hall Effect and Magnetoresistance in Mn-doped ZnSnAs₂ Epitaxial Film on InP Substrates, The 2010 International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, June 22-25, 2010, Toyama

(13) H. Hayashi, N. Uchitomi, N. Hoppo, W. Hu, S. Hosokawa, 3D Local Structure Analysis of ZnSnAs₂:Mn by X-Ray Fluorescence Holography, The 2010 International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, June 22-25, 2010, Toyama

(14) H. Oomae, J. T. Asubar, S. Nakamura, Y. Jinbo, N. Uchitomi, Growth and properties of zinc-blende MnAs thin films on InP(001) substrates, The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI), August 1-4, 2010, Tokyo

(15) N. Uchitomi, J. T. Asubar, H. Oomae, H. Endoh, Y. Jinbo, Room-temperature ferromagnetism in (Zn, Mn, Sn)As₂ thin films applicable to InP-based spintronics devices, 17th International Conference on Ternary

and Multinary Compounds, September 27-30 2010, Baku Azerbaijan

(16) N. Uchitomi, H. Oomae, H. Endoh, Y. Jinbo, Ferromagnetic and transport properties of highly Mn-doped ZnSnAs₂ epitaxial layers on InP substrates, International Conference of Asian Union of Magnetic Society (ICAUMS2010), December 5-6 2010, Jedu Island, Korea

○取得状況 (計 2 件)

名称：磁性半導体薄膜及び磁性半導体薄膜の製造方法

発明者：内富直隆

権利者：長岡技術科学大学

種類：特許

番号：特許第 5 1 1 9 4 3 4 号

取得年月日：平成 2 4 年 1 1 月 2 日

国内外の別：国内

名称：磁性半導体素子

発明者：内富直隆

権利者：長岡技術科学大学

種類：特許

番号：特許第 4 9 1 9 1 9 5 号

取得年月日：平成 2 4 年 2 月 1 0 日

国内外の別：国内

[その他]

<http://opt.nagaokaut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内富 直隆 (UCHITOMI NAOTAKA)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：20313562

(2) 研究分担者 なし

研究者番号：

(3) 連携研究者

石橋 隆幸 (ISHIBASHI TAKAYUKI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：2027635

豊田 英之 (TOYOTA HIDEYUKI)

長岡技術科学大学・工学部・技術職員

研究者番号：90467085

神保 良夫 (JINBOYOSHIO)

長岡技術科学大学・工学部・教務職員

研究者番号：10134975