

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560034

研究課題名(和文)狭ギャップ化合物半導体の基礎電子物性とスピン物性の探求

研究課題名(英文)Transport and spin properties in narrow gap compound semiconductors

研究代表者

眞砂 卓史 (MANAGO, Takashi)

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：50358058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：III-V族狭ギャップ化合物半導体であるInSbやInAsは、高感度磁気センサーに必要不可欠な物質である。我々は、これらの材料系のうち、InSb量子井戸とInAsSb量子井戸について、シート抵抗、キャリア密度、移動度などの電気伝導特性を系統的に調べた。InAsSbはInSbに比べて非常に良い特性を得ることができる事がわかった。これについて、バンド構造から検討した結果、Asの導入により量子井戸の伝導帯がフェルミレベルより下がるために、低温においても低抵抗を維持できると言うことが分かった。またInSb量子井戸のドーピング効果についても調べ、温度特性を大きく改善できる事が分かった。

研究成果の概要(英文)：Narrow-gap III-V compound semiconductors such as InSb and InAs are indispensable materials for highly sensitive magnetic sensors. We have systematically studied transport properties of InSb and InAsSb quantum wells: the well-width dependence of sheet resistivity, carrier density and mobility. The carrier density and mobility of InAsSb QWs are higher than these of InSb QWs. The InAsSb QWs shows high mobility regardless of the well width. The calculated band-alignment of these QWs revealed that the bottom of the conduction band of InSb QWs is above the Fermi level, while that of InAs<sub>0.1</sub>Sb<sub>0.9</sub> QWs is under the Fermi level, which leads the difference of the carrier density. We also discussed the doping effect into InSb QWs. The doping improves temperature dependence of the mobility and resistivity.

研究分野：スピントロニクス、半導体物性、薄膜磁気センサ

キーワード：量子井戸 キャリア密度 移動度 バンド構造

### 1. 研究開始当初の背景

InSb や InAs 等の狭ギャップ III-V 族化合物半導体は、電子移動度が高く、ホール素子や磁気抵抗素子等の高感度磁気センサとして広く使われている。例えば、パソコン等の情報電子機器に使う超小型ホールモータには、磁気センサとして InSb ホール素子が毎年 10 億個以上使われ、光デバイス、電子デバイスと共に、III-V 族化合物半導体の代表的な応用である。

最近では、身近な家電製品や大型動力機器の省電力化・高性能化のためにも、これらのホールモータ化が進んでいる。高精度の回転制御が可能であることから、従来の誘導モータ比較で 10%近い電気機械変換の効率上昇が知られており、省電力に直結する。また、ホール素子を使う非接触電流検出器は被計測電流による電力消費が無く、年間 100 ~ 200 万個の InSb ホール素子が発電所、変電所、産業用電気機器などに使われてきた。

このように、InSb、InAs 等の薄膜や量子井戸の磁気センサは、21 世紀の産業を支える非接触センサ材料技術として、研究の重要性は周知のとおりである。さらに、InAs や InSb 等は、スピン軌道相互作用が大きい特徴をもち、半導体スピントロニクス材料としても期待されている。しかしながら、これまでの研究の現状は、極めて限られた磁気センサ開発のみであり、基礎的な物性情報の蓄積も超高感度磁気センサ開発に必要な薄膜量子構造の情報蓄積も極めて少ない状況であった。

我々はこれまで分子線エピタキシー法 (MBE 法) により、GaAs 基板との格子ミスマッチが極めて大きい InSb や InAs の超薄膜、InSb 系量子井戸を製作できる結晶成長技術を見出してきた。この結果、InSb に近い格子定数を持つ障壁層を用いた量子井戸構造により、ほとんど欠陥のない活性層を実現した。これらの材料技術と組み合わせ、今後の応用開発を進める上で、極低温から室温まで一貫した特性評価等の研究を進め、電子物性等の知見の蓄積と体系化が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、現在産業界で使われる磁気センサ技術を開発した実績と結晶成長技術の実績を生かして、狭ギャップ III-V 族半導体の薄膜の量子構造の未知の物性やスピントロニクス材料としての新規の可能性、超高感度磁気センサなどの基礎研究を行う。

具体的には、InSb、InAsSb 系半導体を用いて、以下のようにその基本物性の体系的な理解と量子構造制御およびスピン流制御、超高感度磁気センサへの応用などの研究を進める。

- (1) 極低温下から、室温周辺の現象まで、広範な温度領域にわたって、これら量子井戸の電子物性を体系的に解明する。
- (2) バンドダイアグラムの計算を行うことにより、これら量子井戸の電子物性の違いを

理解し、最適なウエハ構造の指針を得る。

- (3) これら物質へのスピン注入可能性を検討するため、まずは金属系で高周波を用いたスピン流の発生・制御技術を確立し、半導体へのスピン注入への指針を得る。
- (4) 本材料系量子井戸のスピン軌道相互作用などの材料・構造依存性を解明し、スピン物性・スピン制御の研究を進める。

このように、本研究では狭ギャップ III-V 族半導体ナノ薄膜の基礎物性を体系的に明らかにし、新たな産業界や社会のニーズに応える超高感度磁気センサの技術創出を目指す。本報告書では主に上記(1)、(2)に関して得られた成果をまとめる。

### 3. 研究の方法

#### (1) InSb QW と InAsSb QW の電気伝導特性

InSb および InAsSb の量子井戸ウエハは旭化成に設置されている量産用 MBE により作製した。試料構造は GaAs cap (6.5 nm)/Al<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>Sb cap (50 nm)/InSb or InAs<sub>0.1</sub>Sb<sub>0.9</sub> active layer (Lw)/Al<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>Sb buffer (700 nm)/GaAs (100) substrate である。InSb QW および InAsSb QW に関して、様々な井戸層厚の試料について、抵抗測定およびホール効果測定から、シート抵抗、移動度、キャリア密度を系統的に評価した。ドーピングは行っていない試料、および InSb 層に  $7.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  の Sn ドーピングをおこなった試料について測定を行った。

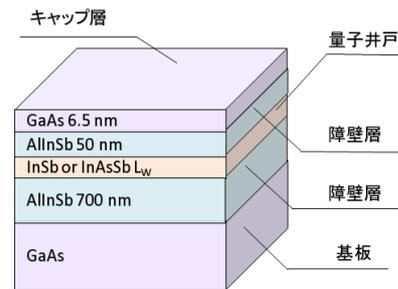


Fig. 1 サンプル構造

#### (2) バンドアライメント計算

Poisson-Schrödinger 方程式を用いてバンドダイアグラムの計算を行った。計算に用いた構造は実験に用いたものと同一とした。ここでひずみの影響は考慮に入れていない。GaAs 表面のフェルミ準位はバンドギャップの半分の位置にピン止めされると仮定した。また、欠陥などによって供給、もしくはトラップされる電子が存在する可能性はあるが、これらの効果は考慮せずに計算を行った。

### 4. 研究成果

#### (a) InSb QW への As 導入効果

シート抵抗の温度依存性は、InSb QW においては 20 K 以降で発散傾向が見えており抵抗は非常に大きい。一方、InAsSb QW では緩やかな温度依存性を示し、このような発散傾向は観測されない。

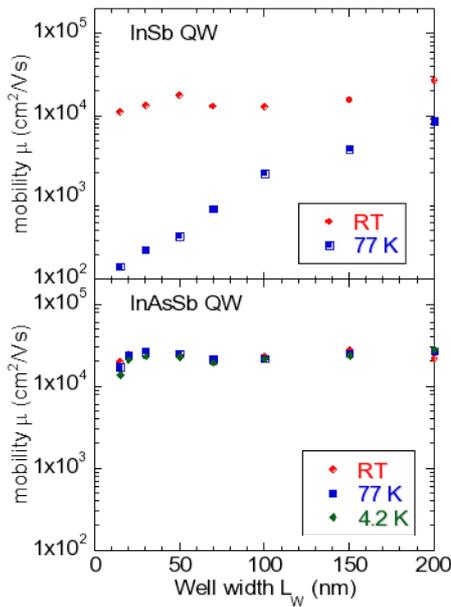


Fig. 2 移動度の井戸幅依存性

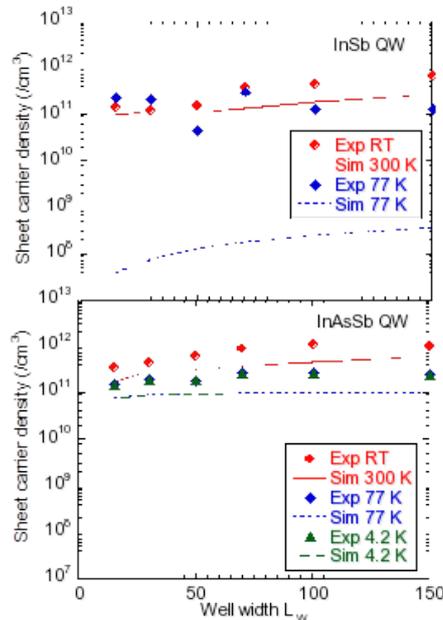


Fig. 3 シートキャリア密度の井戸幅依存性

シート抵抗への寄与として、移動度とシートキャリア密度の相違が考えられる。まず、それぞれの QW の移動度の井戸幅依存性について比較する (Fig. 2)。InSb QW では、室温の移動度は、井戸幅の減少にしたがって若干の低下が見られるものの、移動度の低下はかなり小さい。しかし、77 K では特に小さい井戸幅の試料で著しい低下が見られた。低温において井戸幅が小さいほど移動度の低下が大きいのは、量子井戸界面付近における格子ひずみの影響や、ひずみによる界面の荒れが依然として残っていることを示唆している。一方で、格子ミスマッチを 0% とした InAsSb QW では、井戸幅減少による移動度の低下はほとんど見られず、また室温から 4.2 K と温度を下げてほとんど変化しないことが分か

った。このように、界面における格子ミスマッチの除去により、移動度の低下をほぼ完全に抑制できることが分かった。

次に、それぞれの QW のシートキャリア密度の井戸幅依存性についてまとめたものを Fig. 3 に示す。実線は後で述べるバンドアライメント計算によって見積もられたキャリア密度の計算結果である。InSb QW について、室温においては、計算結果がやや小さく得られているものの、ほぼ実験結果を支持する結果が得られている。しかし、77 K においては、計算では非常にキャリア数は少なく、真性キャリアの励起はほとんどないことが示されており、実験で存在している電子は結晶欠陥などから供給される電子の影響であると考えられる。

InAsSb QW では、室温・低温共に、実験結果を計算がよく説明できていると考えられる。実験値が計算値より大きいのは、InSb QW の時と同じく、結晶欠陥などから供給される電子の影響しているためと考えられる。特筆すべき点として、4.2 K になると、InAsSb QW では有限の値をとり、77 K のときとほとんど変わらないが、InSb QW ではキャリアが著しく減少し、4.2 K ではホッピング伝導領域となってしまうため、キャリア密度は測定不能であったことである。InSb 層への As の導入で、これほどキャリア密度が変化する理由について、次のバンドアライメント計算の結果から考察する。

Fig. 4 に 4 K におけるバンドアライメントの計算結果を示す。InSb QW は典型的なタイプの量子井戸を示す。井戸の伝導体の底がフェルミレベルより上に位置していることであり、この状態は障壁層とのバンドオフセットで決まるため井戸幅には依存しない。4 K では真性電子はほとんど励起されないで、

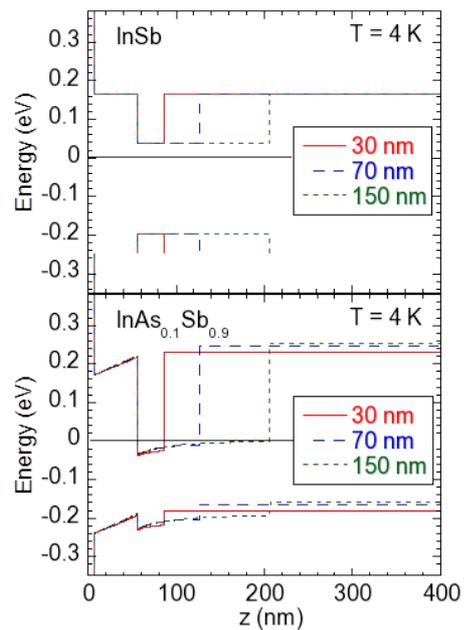


Fig. 4 InSb QW と InAsSb QW のバンドアライメント

この結果は井戸が空乏化することを示している。このように、計算結果は実験における低温での抵抗が発散することによく一致している。一方、InAsSb QW では井戸層と障壁層とのバンドオフセット関係が大きく変わり、量子井戸の部分が全体的に下がるため、タイプ II の量子井戸に変わる。この変化によって、伝導体の底がフェルミレベルより下に位置する。このため 4 K においても井戸の空乏化が起こらず、低温においても比較的抵抗を保つことができる。

このように As の導入は、量子井戸のバンドアライメントに劇的な変化を及ぼすことが分かった。両者のキャリア密度の違いは、主にこのバンドアライメントの違いが原因であることが明らかとなった。

#### (b) InSb QW への Sn ドーピング効果

Fig.5 に示すように井戸層に Sn をドーピングすることにより井戸の底がフェルミ面より下がり、低温でもキャリアが存在できるようになることが分かる。これは InAsSb QW の時と同様、低温における抵抗が発散が抑えられることが期待され、実験においてもドーピングを行った試料では、抵抗の温度変化がかなり抑えられることが分かった。

シートキャリア密度の井戸幅依存性 (Fig. 6) を見ると、室温ではシートキャリア密度は井戸幅に比例して増加しており、この傾きから井戸内のキャリア密度は、 $9.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  と見積もられた。ドーピングによるキャリア密度が  $7.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、InSb の室温における真性キャリア密度が約  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  程度 (実際は、AlInSb 障壁層からも真性電子が少し励起されるため、これらの影響も含めて InSb 井戸層のキャリア密度に換算すると、 $2.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  である) であるため、合理的な結果である。

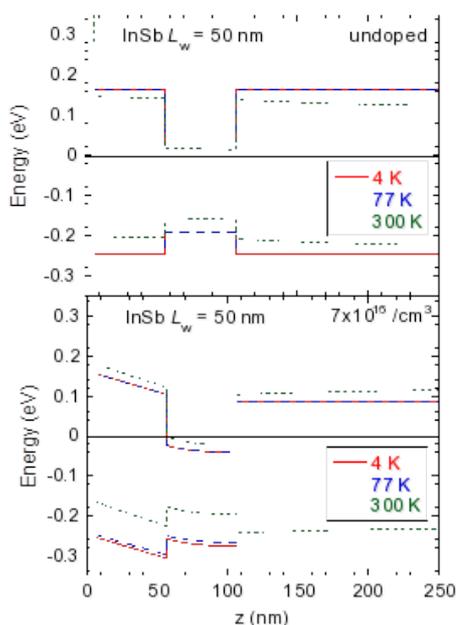


Fig. 5 InSb QW の undoped と doped のバンドアライメント

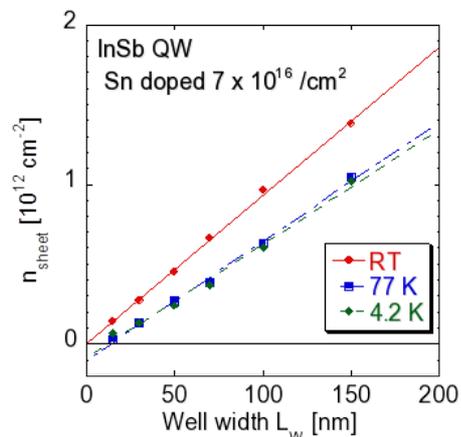


Fig. 6 シートキャリア密度の井戸幅依存性

一方 77 K、4.2 K ではそれぞれ  $7.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $7.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  であり、ドーピングレベルとほぼ同じであるため、低温において真性キャリアはほとんど励起されていない。低温におけるフィッティング直線の  $L_w = 0$  における切片がマイナスになっている。これは、ドーピングによって供給した電子数より、電子伝導に有効な電子数が減少していることを示しており、InSb 層と障壁層の間の界面に、低温になると電子を捕獲するトラップ準位が存在していることを示唆している。界面にトラップされる電子数は井戸幅に依存しないと考えられるので、井戸幅の小さいものほどドーピングによるキャリア供給の効果が薄れてしまうといえる。

このように Sn ドーピングをおこなうと、低温では若干目減りするものの、ほぼ設計通りキャリアが供給できることが分かった。これに伴い、抵抗も劇的に下がり、温度変化が非常に緩やかになる。

今後は、InAsSb QW へのドーピングによるさらなる温度安定性の改善、その際井戸外からキャリアを供給するリモートドーピングの検討、障壁層・井戸層の最適な組成比や井戸構造などの検討を引き続き行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

I. Shibasaki, S. Ishida, H. Geka, T. Manago, Low temperature transport property of the InSb and InAsSb quantum wells with  $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  barrier layers grown by MBE, J. Crystal Growth, 査読有, in press (published on-line), (2015).

T. Manago, K. Yamanoi, S. Kasai, S. Mitani, Damping Factor Estimation using Spin Waves Attenuation in Permalloy Film, J. Appl. Phys., 査読有, vol.117.17D121 (3 pages) (2015).

T. Manago, S. Ishida, H. Geka, I. Shibasaki, Interfacial trap states and improvement of low-temperature

mobility by doping in InSb/AlInSb quantum wells, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.117, 065701 (4 pages) (2015).  
柴崎一郎, ホールセンサとその応用, *電気学会論文誌 E / センサ・マイクロマシン部門誌*, 査読有, Vol.134, 2014, 186-192.  
眞砂卓史, 石田修一, 外賀寛崇, 柴崎一郎, 狭ギャップ半導体 InSb 系量子井戸の最近の進展(解説), 査読無, *J. Vac. Soc. Jpn.* (「真空」), 57, 2014, 259-265.  
柴崎一郎, 眞砂卓史, 石田修一, 外賀寛崇, 超高感度磁気センサのための InSb 量子井戸の研究, *電気学会フィジカルセンサ研究会資料*, 査読無, PHS-13, 2013, 23-25.  
柴崎一郎, 非接触センサによる電子制御モータ時代を拓いた高感度 InSb 薄膜ホール素子と磁性材料(解説), *セラミックス*, 査読無, Vol.48, 2013, 354-361.  
柴崎一郎, 栗山憲治, 牧野崇史, 深澤尚也, 鈴木健治, 量子井戸型 InAs ホール素子による高感度リニアハイブリッドホール IC, *電気学会論文誌 E / センサ・マイクロマシン部門誌*, 査読有, Vol.133, 2013, 301-306.  
K. Yamanoi, S. Yakata, T. Kimura, T. Manago, Spin Wave Excitation and Propagation Properties in a Permalloy film, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.52, 083001 (5 pages) (2013).  
K. Yamanoi, S. Yakata, T. Kimura, T. Manago, Ferromagnetic Resonance of a Single Micron Dot using Vector Network Analyzer, *J. Korea Phys. Soc.*, 査読有, Vol.63, 800-803 (2013).  
T. Manago, K. Yamanoi, S. Yakata, T. Kimura, Size Dependence of Ferromagnetic Resonance Frequency in Submicron Patterned Magnet, *J. Jpn. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.52, 53001 (2013).

[学会発表](計 26 件)

太田 雅己, 葛西 伸哉, 三谷 誠司, 眞砂 卓史, 静磁表面波の減衰長の磁性層厚依存性, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日~2015 年 3 月 14 日, 東海大学(神奈川・平塚市)  
中山 真伎, 田島摩百合, 葛西 伸哉, 三谷 誠司, 眞砂 卓史, Py 薄膜における励起スピン波の磁化方向依存性, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日~2015 年 3 月 14 日, 東海大学(神奈川・平塚市)  
T. Manago, Characterization of spin waves propagating in Permalloy film (Invited), International Workshop "Nano-Spin Sciences", 2015 年 2 月 18 日~2015 年 2 月 19 日, Saga, Japan  
柴崎一郎, 電子制御モータ時代を招来し

た薄膜ホール素子開発と応用(招待講演), 第 7 階三菱マテリアル・早大理工学術院産学連携セミナー, 2014 年 11 月 14 日, 早稲田大学(東京・新宿区)

T. Manago, K. Yamanoi, S. Kasai, S. Mitani, Damping Factor Estimation using Spin Waves Attenuation in Permalloy Film, 59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM), 2014 年 11 月 3 日~2014 年 11 月 7 日, Honolulu, Hawaii

柴崎一郎, 高感度 InSb 薄膜ホール素子(招待講演), 第 31 回センサ・マイクロマシンと応用システム, 2014 年 10 月 22 日, くにびきメッセ(島根・松江市)

太田 雅己, 葛西 伸哉, 三谷 誠司, 眞砂 卓史, 静磁表面波の群速度の磁性層厚依存性, 秋季第 75 回応用物理学関係連合講演会, 2014 年 9 月 16 日~2014 年 9 月 20 日, 北海道大学(北海道・札幌市)

中山 真伎, 葛西 伸哉, 三谷 誠司, 眞砂 卓史, 静磁表面スピン波の非相反性の磁性層厚依存性, 秋季第 75 回応用物理学関係連合講演会, 2014 年 9 月 16 日~2014 年 9 月 20 日, 北海道大学(北海道・札幌市)

I. Shibasaki, S. Ishida, H. Geka, T. Manago, Low temperature transport property of the InSb and InAsSb quantum wells with AlInSb Barrier layers grown by MBE, The 18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2014), 2014 年 9 月 7 日~2014 年 9 月 12 日, Arizona, USA

M. Ota, K. Yamanoi, S. Kasai, S. Miatani, T. Manago, Long Range Propagation of Spin-wave in Thick Permalloy Films, The 15th IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), 2014 年 8 月 24 日~2014 年 8 月 30 日, Fukuoka, Japan

M. Nakayama, A. Yamanoi, K. Yamanoi, S. Kasai, S. Miatani, T. Manago, "Non-reciprocity of Spin-wave in Permalloy Films Measured by Vector Network Analyzer, The 15th IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), 2014 年 8 月 24 日~2014 年 8 月 30 日, Fukuoka, Japan

T. Manago, S. Ishida, H. Geka, I. Shibasaki, Mobility Improvement at Low Temperature by Intentionally Doping in InSb/AlInSb Quantum Wells, International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2014), 2014 年 8 月 3 日~2014 年 8 月 8 日, Savannah, USA

山野井 一人, 山本 明, 葛西 伸哉, 三谷 誠司, 眞砂 卓史, ネットワークアナライザによる静磁表面スピン波の非相反

性の測定”、第 61 回応用物理学学会春季学術講演会、2014 年 3 月 17 日～2014 年 3 月 20 日、青山学院大学(神奈川・相模原市)

眞砂 卓史、石田 修一、外賀 寛崇、柴崎 一郎、InSb および InAsSb 量子井戸のバンドダイアグラムの検討、秋季第 74 回応用物理学関係連合講演会、2013 年 9 月 16 日～2013 年 9 月 20 日、同志社大学(京都・京田辺市)

山野井 一人、葛西 伸哉、三谷 誠司、眞砂 卓史、時間領域と周波数領域におけるスピン波の比較、秋季第 74 回応用物理学関係連合講演会、2013 年 9 月 16 日～2013 年 9 月 20 日、同志社大学(京都・京田辺市)

I. Shibasaki, Thin film magnetic sensors and their practical applications (invited) 日中電子材料シンポジウム、2013 年 9 月 12 日、Beijing, China.

T. Manago, S. Ishida, H. Geka, I. Shibasaki, Comparative Study of Transport Properties in AlInSb/InSb and AlInSb/InAsSb Quantum Wells, The 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE17), 2013 年 8 月 11 日～2013 年 8 月 16 日、Warsaw, Poland

柴崎 一郎、石田 修一、外賀 寛崇、眞砂 卓史、超高感度磁気センサのための InSb 量子井戸の研究、電気学会フィジカルセンサ研究会、2013 年 8 月 8 日～2013 年 8 月 9 日、東京工科大学(東京・八王子市)

眞砂 卓史、石田 修一、外賀 寛崇、柴崎 一郎、InSb 量子井戸における電気伝導性の As 置換効果(特別講演)九州表面・真空研究会(2013)、2013 年 6 月 15 日、福岡大学(福岡・福岡市)

山野井 一人、家形 諭、木村 崇、眞砂 卓史、Py 中のスピン波伝搬における減衰長の磁場依存性、九州表面・真空研究会(2013)、2013 年 6 月 15 日、福岡大学(福岡・福岡市)

⑳ 山野井 一人、家形 諭、木村 崇、眞砂 卓史、Py 中におけるスピン波伝搬の距離依存性、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 03 月 26 日～2013 年 03 月 29 日、広島大学(広島・東広島市)

㉑ 山野井 一人、家形 諭、木村 崇、眞砂 卓史、Py 細線中を伝搬するスピン波の検出、半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-17)、2012 年 12 月 19 日～2012 年 12 月 20 日、九州大学(福岡・福岡市)

㉒ 眞砂 卓史、山野井 一人、家形 諭、木村 崇、孤立ナノ磁性体の強磁性共鳴、半導体スピン工学の基礎と応用(PASPS-17)、2012 年 12 月 19 日～2012 年 12 月 20 日、九州大学(福岡・福岡市)

㉓ 山野井 一人、家形 諭、木村 崇、眞砂 卓

史、ネットワークアナライザを用いたスピン波検出、第 73 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 09 月 11 日～2012 年 09 月 14 日、愛媛大学・松山大学(愛媛・松山市)

㉔ 眞砂 卓史、山野井 一人、家形 諭、木村 崇、ナノ磁性体を用いた強磁性共鳴周波数の制御、第 73 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 09 月 11 日～2012 年 09 月 14 日、愛媛大学・松山大学(愛媛・松山市)

㉕ K. Yamanoi, S. Yakata, K. Kimura, T. Manago, Ferromagnetic Resonance of a Single Micron Dot using Vector Network Analyzer, The 19th International Conference on Magnetism, 2012 年 07 月 08 日～2012 年 07 月 13 日、Busan, Korea

[図書](計 4 件)

柴崎 一郎 他、オーム社、電気工学ハンドブック(第 7 版): 10 編センサ・マイクロマシン、1 章フィジカルセンサ、7 節磁気センサ、2013、総ページ数 2706 ページ(担当 6 ページ)

柴崎 一郎 他、(株)シーエムシー出版、異種機能デバイス集積化技術の基礎と応用: 第 19 章 磁気センサ、2012、総ページ数 279 ページ(第 19 章 13 ページ)

柴崎 一郎 他、(株)情報技術協会、次世代自動車の夢を実現するセンサ開発と制御技術: 第 8 節 高感度薄膜磁気センサ技術と最近の応用、2012、総ページ数 937 ページ(第 8 節 21 ページ)

Shibasaki I, Kuze N., Elsevier Inc., Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production: Chap.31 Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production, 2013, 744 pages (Chap. 31, 24 pages)

[その他] ホームページ等

<http://www.sp.fukuoka-u.ac.jp/section/solid1/manago/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞砂 卓史 (MANAGO, Takashi)  
福岡大学・理学部物理科学科・准教授  
研究者番号: 50358058

(2) 研究分担者

柴崎 一郎 (SHIBASAKI, Ichiro)  
公益財団法人野口研究所・顧問  
研究者番号: 10557250

(3) 研究分担者

石田 修一 (ISHIDA, Shuichi)  
山口投稿理科大学・工学部・嘱託教授  
研究者番号: 70127182