

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06000

研究課題名(和文)狭ギャップ半導体の電子物性とスピン物性の基礎研究と工学的応用の検討

研究課題名(英文)Fundamental studies and applications of electrical and spin properties in narrow gap semiconductors

研究代表者

眞砂 卓史 (Manago, Takashi)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：50358058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：InSb薄膜ホール素子の微小磁場検出における磁界検出特性、磁界検出の精度を決めるオフセット電圧の揺らぎ、ノイズのパワースペクトルについての検討をおこなった。磁界検出の感度においては、1 uTの磁束密度の磁界を精度よく測定することができることがわかり、さらに、その最大揺らぎは ± 250 nT、揺らぎの標準偏差は130 nT程度であることが分かった。また、ノイズスペクトル測定では広い周波数範囲で $1/f$ ノイズが観測され、そのパワースペクトル密度は、入力電流に比例していることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We investigated magnetic field detection properties of small fields, offset fluctuations of the output voltage, and power spectrum of noise. On the sensitivity, it was found that the InSb Hall element can detect the magnetic field of 1 uT precisely, and the maximum fluctuations and the standard deviation are about ± 250 nT and 130 nT, respectively. In the noise spectrum, $1/f$ noise was observed in wide range of frequency and its power density is proportional to the input current.

研究分野：スピントロニクス、III-V族半導体

キーワード：ホール素子 微小磁場計測 ノイズ特性

1. 研究開始当初の背景

ホール素子は、非接触センサの基本デバイスとして最も一般的な磁気センサの一つである。ホール素子の材料である 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、高感度磁気センサや電流センサとして広く使われている。ホール素子を電流センサとして用いた場合、シャント抵抗を利用する電流センサと違い、直接負荷回路に挿入接続する必要がなく、負荷電流による発熱や電力損失がない。このため、測定系への影響ほとんどゼロであり、微小電流から大電流まで、また、過渡電流から交流・直流まで、極めて効率的に測定できるメリットがある。しかし、市販の高感度 InSb 薄膜ホール素子の実用的な磁界検出の下限は、 $\sim 100 \mu\text{T}$ 程度と思われてきたこともあり、これまで実用上は比較的大きな電流検出に限られ、微弱電流計測ではあまり使われていなかった。

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。さらに、磁気増幅構造、薄膜の単結晶化・量子井戸化など、ホール素子の高感度化をすすめてきた結果、最近の我々の実験によればホール素子は、 μT レベルの磁場がかなり安定に検出できることが分かった。これは微小電流検出に应用すれば数 mA レベルの電流の検出に相当する。IoT 時代に臨み、微弱電流計測等の新規分野の応用の広がりには必須の状況にあり、今後のさらなる高感度磁気センサ・高感度電流センサへの応用に向け、高感度化とノイズ特性の改善、および温度特性の改善が求められている。

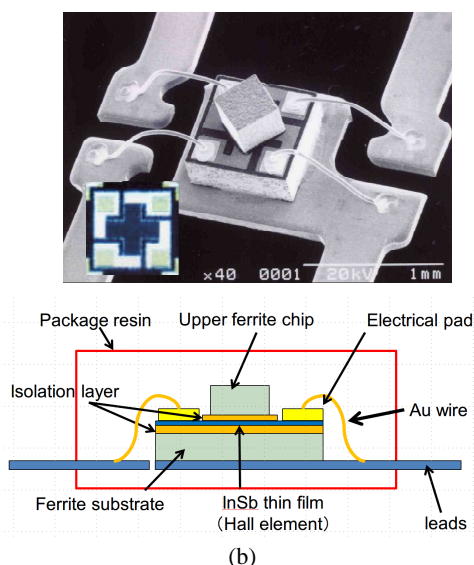


図1 ホール素子の写真と断面図

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 族半導体の薄膜のスピン트로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。また、微弱な信号の検出には測定限界を決めるノイズの評価が不可欠であるが、これまでホール素子のノイズ評価はほとんど行われてこなかった。またホール素子に現れるノイズは、電流経路と出力が直交関係にあるため、ノイズの解析についても未だ確立されていない。このため、ホール素子の微小磁界計測特性とノイズレベルについて検討した。本報告では特に高感度化へ向けたノイズ特性の評価について得られた成果をまとめる。

3. 研究の方法

使用した InSb 蒸着薄膜ホール素子は厚さ 0.3mm、1.0mm 角の軟磁性フェライト基板上に、マイカ基板上に蒸着した InSb 多結晶薄膜 ($0.8 \mu\text{m}$) が接着されたのち、エッチング加工で十字対称形状で製作されている。ホール素子部の中央には、約 0.3 mm の立方体の軟磁性フェライトチップが写真の様に接着固定されており、ホール素子部の InSb 薄膜が軟磁性のフェライト基板及びフェライトチップにより上下からサンドイッチされている。(図 1)。この構造により、ホール素子にかかる磁場を収束・増幅し、感度の向上を図っている。極小磁界検出特性の評価として、ホール電圧の磁束密度依存性、オフセット電圧の揺らぎ、ノイズのパワースペクトルの測定を行った。外乱ノイズを避けるため、シールドボックスの使用や電源の安定化を行っている。

4. 研究成果

図 2(a) は磁場を $\pm 10 \mu\text{T}$ 間で変化させたときのホール電圧の応答電圧である。検出磁界とホール電圧の線形性は非常に良く、ノイズの少ない結果が得られ、 $1 \mu\text{T}$ レベルが十分な精度で測定できていることが分かる。 $1 \mu\text{T}$ 以下ではホール電圧の大きさに比較して、電圧揺らぎがおおよそ 10% 強あり、100 nT の計測精度は少し厳しい。このため、次にホール電圧の計測の精度を決める電圧揺らぎを計測し、ホール電圧測定の精度を調べた。図 2(b) は、ゼロ磁界時のホール端子間の電圧、即ち、オフセット電圧の揺らぎを測定した結果である。ホール素子の入力電流が $100 \mu\text{A}$ のとき、出力電圧の揺らぎは最大 $\pm 50 \text{nV}$ 程度である。これはホール素子の磁界検出感度から磁束密度に換算すると $\pm 250 \text{nT}$ に相当する。これは、図 2(a) の磁束密度依存性の揺らぎと比較してほぼ同レベルである。測定電圧の揺らぎ

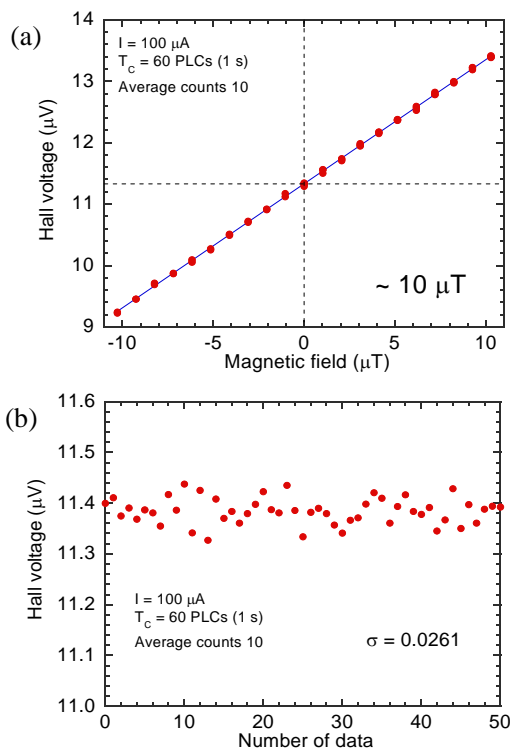


図 2 ホール素子の磁場応答とオフセット安定性

の標準偏差 σ は入力電流が $100 \mu\text{A}$ のときに 0.0261 、この標準偏差を磁束密度に換算すると 130 nT 程度である。このように、InSb 薄膜ホール素子では、 $1 \mu\text{T}$ レベルの測定が精度よく測定できることが分かった。

次に、微弱磁界計測で問題となるゼロ磁界時のオフセット電圧の揺らぎの原因となるオフセット電圧のノイズの周波数依存性、すなわち、ノイズのパワースペクトル測定を行い、ノイズ低減についての対策を検討した。測定したノイズのパワースペクトル密度を図 3 に示す。この結果はホール素子の入力電流が 8 mA と比較的大きな電流の場合であるが、電流源および FFT アナライザの電源として、商用電源のタップから直接とった場合（赤）と、タップと装置の間に、ノイズカットトランスおよび交流安定化電源を挿入した場合（青）を比較している。両者とも 10 kHz

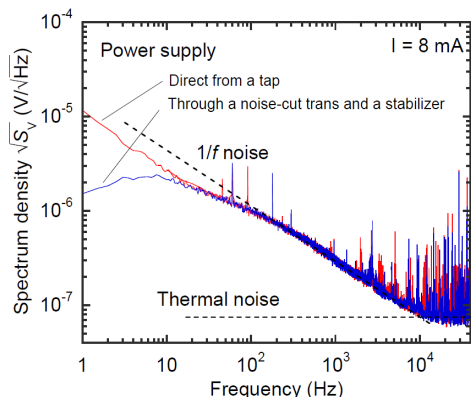


図 3 ノイズのパワースペクトル密度

以下で $1/f$ ノイズが観測されている。周波数が高くなるにつれて、ノイズのパワースペクトル密度は小さくなるため、数 kHz でホール素子を駆動すれば、ノイズの低減につながると考えられる。赤線で $1/f$ ノイズに段がみられるのは、バーストノイズが含まれている場合に見られる形であり、これはオシロスコープで観測された結果とコンシステントである。一方、青線は 10 Hz 以下でノイズスペクトルは $1/f$ の依存性からはずれ、スペクトル密度が低下した。これは低周波におけるノイズが小さくなることを示しており、直流測定に近いところではノイズがほぼ一桁下がることが期待できる。オシロスコープ波形においても、バーストノイズが顕著に少なくなっており、電源のクリーン化は非常に重要であることが分かった。

さらに、ノイズパワースペクトル密度の入力電流依存性を調べた（図 4(a)）。入力電流の低下に伴い $1/f$ ノイズのスロープ部分の傾きをほぼ保ちつつ低周波側に移動し、結果として各周波数におけるノイズのパワースペクトル密度は減少する。 $1/f$ ノイズは 8 mA では 10 kHz まで伸びているのに対して、 1 mA では 1 kHz 程度までと、 $1/f$ 領域が小さくなることが分かった。また、図 4(b) に、 1 Hz におけるノイズのパワースペクトル密度の入力電流依存性をまとめた。この結果から、ノイズのパワースペクトル密度は入力電流に比例していることがわかる。

バルク導体の抵抗から発生する $1/f$ ノイズのパワースペクトル密度は、経験的に Hooge

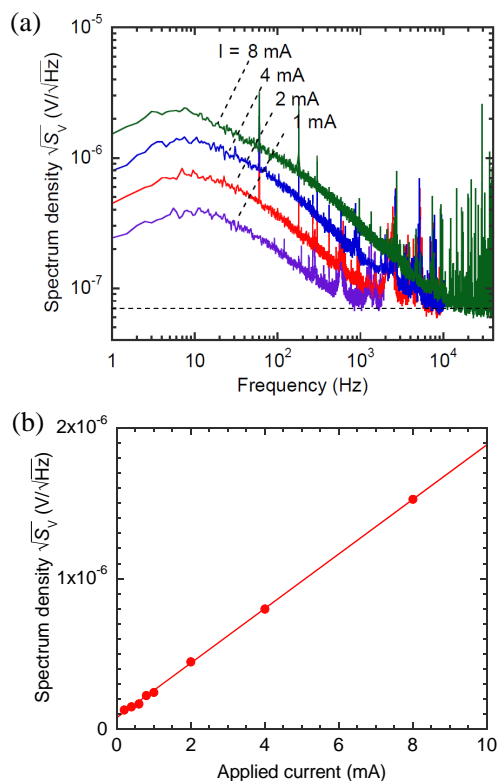


図 4 ノイズパワースペクトルの印加電流依存性

の式で与えられることが知られている。本式は2端子抵抗に関する式であり、電流経路と出力が直交関係にあるホール素子に現れるノイズとは状況が異なるが、オフセット電圧に現れる揺らぎのパワースペクトル密度の実験結果は、ホール素子においてもHoogeの式に従っていることを示唆していることが分かった。この式に従う場合、動作領域のキャリア数を増加させることによりノイズの低減を図ることができるため、素子形状によってもノイズレベルを低減できる可能性がある。

このように、InSb薄膜ホール素子の微小磁場検出における磁界検出特性、磁界検出の精度を決めるオフセット電圧の揺らぎ、ノイズのパワースペクトルについての検討をおこなったところ、磁界検出の感度においては、1 μ Tの磁束密度の磁界を精度よく測定することができることがわかり、さらに、その最大揺らぎは ± 250 nT、揺らぎの標準偏差は130 nT程度であることが分かった。また、ノイズスペクトル測定では広い周波数範囲で1/fノイズが観測され、そのパワースペクトル密度は入力電流に比例していることが分かった。ホール素子の駆動に最適な電流や周波数、素子形状の検討、また、単結晶や量子井戸試料についても今回と同様な微弱磁界検出特性と電圧揺らぎによるノイズの評価が、今後の課題である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文](計9件)

眞砂卓史、笠原健司、西村和浩、柴崎一郎、"ホール素子による微小磁場計測の検討とノイズスペクトル測定"、電気学会論文誌E、センサ・マイクロマシン部門誌 117-122 (2017)

K. Kasahara, M. Nakayama, X. Ya, K. Matsuyama, and T. Manago, "Effect of distance between a magnet layer and an excitation antenna on the nonreciprocity of magnetostatic surface wave", Jpn. J. Appl. Phys., 56, 010309 (4 pages: Rapid communication) (2017).

K. Kasahara, M. Nakayama, M. Tashima, S. Kasai, S. Mitani, T. Manago, "Spin wave propagation in a permalloy film under tangentially fields", Fukuoka University Science Reports, 46(2), 65-68 (2016).

柴崎一郎、"電子制御モーターを生んだ薄膜ホール素子の応用の歴史と現状"、次世代センサ 26, 10-13 (2016).

M. Nakayama, K. Yamanoi, S. Kasai, S.

Mitani, T. Manago, "Thickness dependence of spin wave nonreciprocity in permalloy film", Jpn. J. Appl. Phys. 54, 083002 (5 pages) (2015).

T. Manago, S. Ishida, H. Geka, I. Shibasaki, "Relationship between transport properties and band diagrams in $\text{In}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}/\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ quantum wells", AIP Advance, 5, 067149 (9 pages) (2015).

M. Ota, K. Yamanoi, S. Kasai, S. Mitani, T. Manago, "Saturation of attenuation length of spin waves in thick permalloy films", Jpn. J. Appl. Phys., 54, 113001 (5 pages) (2015).

柴崎一郎、"素人でもやれた磁気センサ技術、電子制御モータを生み電子情報産業を支える高感度薄膜ホール素子の開発"、電気学会論文誌E、135, NL12_2 (2015).

柴崎一郎、"ホール素子の歴史"、電気計算 83,97-99 (2015)

[学会発表](計25件)

柴崎一郎、"高感度薄膜ホール素子開発と応用"、マグネティックス、光・量子デバイス、フィジカルセンサ、マイクロマシン・センサシステム、バイオマイクロシステム合同研究会、西播磨地場産業センター(姫路) 2017/12/14 (14-15) (招待講演)

柴崎一郎、ホールセンサ "歴史と将来展望"、第5回岩崎コンフェレンス、中央大学(東京) 2017/11/28 (招待講演)

眞砂卓史、笠原健司、西村和浩、柴崎一郎、"ホール素子による微小磁場計測の検討"、第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、広島国際会議場(広島) 2017/11/2 (10/31-11/2)

柴田晃治、笠原健司、中山和之、眞砂卓史、"マイクロマグネティックシミュレーションによる静磁表面スピン波の非相反性の検討"、第78回応用物理学学会秋季学術講演会、福岡国際会議場(福岡) 2017/9/7 (5-8)

柴崎一郎、"高感度磁気センサを実用化した化合物半導体薄膜技術の歴史と科学"、次世代センサ協議会テクノスクール、化学会館(東京) 2017/7/23 (招待講演)

K. Shibata, K. Kasahara, K. Nakayama and T. Manago, "Antenna Configuration Dependence of the Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Wave", SPINTECH 9, Fukuoka, Japan, 2017/6/7 (4-8)

眞砂卓史, 笠原健司, 柴崎一郎, "InSb 薄膜ホール素子による微小磁場計測", 第 64 回応用物理学会春季学術講演、パシフィコ横浜 (横浜) 2017/3/14 (14-17)

柴田晃治, 笠原健司, 眞砂卓史, "静磁表面スピン波の非相反性におけるアンテナ形状依存性", 第 64 回応用物理学会春季学術講演、パシフィコ横浜 (横浜) 2017/3/14 (14-17)

眞砂卓史, "He 温度での InSb 及び InAsSb の量子井戸のバンド構造計算結果についての報告とその信頼性などの評価", 第 1 回狭ギャップ化合物半導体薄膜と応用討論会、野口研究所 (東京) 2017/1/18 (17-18)

眞砂卓史, "实用磁気センサの極低磁界特性の評価及び InAsSb 系量子井戸の極低温物性とバンド構造の研究", 第 1 回狭ギャップ化合物半導体薄膜と応用討論会、野口研究所 (東京) 2017/1/17 (17-18)

柴崎一郎, "狭ギャップ化合物半導体薄膜研究と磁気センサ応用の現状", 第 1 回狭ギャップ化合物半導体薄膜と応用討論会、野口研究所 (東京) 2017/1/17 (17-18)

柴崎一郎, 眞砂卓史, 石田修一, 外賀寛孝, 岡本敦, "InSb 及び InAsSb 量子井戸の製作とバンド構造", 第 33 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、平戸文化センター (長崎) 2016/10/25 (24-26)

Kenji Kasahara, Xiaorui Ya, Kimihide Matsuyama, Takashi Manago, "Control of the nonreciprocity of magnetostatic surface wave in a ferromagnetic metal", 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ (新潟) 2016/9/15 (13-16)

柴崎一郎, "狭ギャップ化合物半導体の電子輸送の特徴と応用", 第 25 回センサテクノスクール化学会館 (東京) 2016/6/24 (招待講演)

柴崎一郎, "電子制御モータを生んだ 高感度 InSb 薄膜ホール素子の歴史と現状", 第 75 回次世代センサセミナー、化学会館 (東京) 2016/4/15

太田雅己, 笠原健司, 葛西伸哉, 三谷誠司, 眞砂卓史, "Py に中間層を挿入した膜における静磁表面波の減衰長の関係", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東工大 (東京) 2016/3/21 (19-22)

中山真伎, 笠原健司, 眞砂卓史, "静磁表面スピン波の非相反性に対するアンテナ

—磁性層間の距離依存性", 第 63 回応用物理学会春季学術講演、東工大 (東京) 2016/3/19 (19-22)

眞砂卓史 (招待講演) "スピントロニクス基礎と最近の研究動向", 平成 27 年度応用物理学会九州支部学術講演会、琉球大学 (沖縄) 2015/12/5 (5-6)

T. Manago and K. Yamanoi (Invited) "Spin wave characteristics in permalloy films", Energy Material Nanotechnology (EMN) Bangkok meeting, Bangkok, Thailand, 2015/11/11 (9-13)

柴崎一郎, 外賀寛崇, 岡本敦, "InSb 及び InAsSb 薄膜の GaAs (001) 上への MBE 成長と格子ミスマッチの低減効果", 第 32 回センサ・マイクロマシンと応用システムポジウム、朱鷺メッセ (新潟) 2015/10/30(28-30) (招待講演)

②1 眞砂卓史, 太田雅己, 中山真伎, 葛西伸哉, 三谷誠司, "金属系における静磁表面スピン波伝搬の減衰特性", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場 (名古屋) 2015/9/13 (13-16)

②2 M. Nakayama, M. Tashima, S. Kasai, S. Mitani, T. Manago, "Spin wave propagation in Permalloy films under tangentially magnetic fields with an arbitrary direction", 20th International conference on Magnetism (MMM), Barcelona, Spain, 2015/7/6 (5-10)

②3 M. Ota, K. Yamanoi, S. Kasai, S. Mitani, T. Manago, "High group velocity and large attenuation length of spin-waves in thick Permalloy films", 20th International conference on Magnetism (MMM), Barcelona, Spain, 2015/7/6 (5-10)

②4 柴崎一郎, 外賀寛崇, 岡本敦, "InSb 単結晶薄膜の GaAs (001) 上への MBE 成長と電子輸送特性", 電気学会 E 部門フィジカルセンサ研究会、九州大学 (福岡) 2015/7/3(2-3) (招待講演)

②5 柴崎一郎, "電子情報産業を支える磁気センサ開発と教訓", 次世代センサ協議会第 24 回テクノスクール、化学会館、(東京) 2015/6/25 (招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

Henini M, editor, Ichiro Shibusaki and Naohiro Kuze (chapter 31), Molecular Beam Epitaxy 2nd edition, Elsevier (2018).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

眞砂 卓史 (MANAGO, Takashi)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：5 0 3 5 8 0 5 8

(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：1 0 5 5 7 2 5 0