

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04498

研究課題名(和文)狭ギャップ半導体薄膜の磁場下電子物性研究と超高感度電流センサの開発

研究課題名(英文)Transport properties of narrow gap semiconductor films under magnetic field and development of a high-sensitive current sensor

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：格子ミスマッチがほぼ0%の $\text{InAs}_{0.1}\text{Sb}_{0.9}/\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ 量子井戸は、極低温においても導電性を維持し、高移動度を示す。量子井戸構造のバンドダイアグラム計算を行ったところ、井戸層と障壁層の組成に依存して、バンド構造が大きく変化することを見出した。このため、動作層やバリア層の組成を変化させたときの量子井戸構造の変化を系統的に検討し、広範な温度領域にわたって実用的な高感度磁気センサの開発を進めた。バンドギャップ、キャリア密度の温度変化、井戸の閉じ込め深さ等を評価し、極低温動作可能な高感度磁気センサや電子デバイス等の製作に最適な組成を決定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回見出した量子井戸構造でホールセンサを作製すれば、これまでにない、高感度で温度安定性の高い磁気センサを実現できる可能性がある。また、近年広い温度範囲での測定が望まれるようになっているが、低温における高感度磁気測定が可能になる。これにより、nTオーダーの検出が可能な安価な磁気センサの開発や、微小なmAレベルの電流を検出可能な非接触電流センサの実現にもつながる。半導体の温度安定性が向上する技術でもあるため、ホール素子以外にも利用もできる技術である。また、意図的なドーピングをせずに同等のキャリア増加効果を得る量子井戸の設計方法が示された点は、学術的にも有意義である。

研究成果の概要(英文)： $\text{InAs}_{0.1}\text{Sb}_{0.9}/\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$  quantum wells with almost 0% lattice mismatch maintain conductivity and exhibit high mobility even at extremely low temperatures. When the band diagram of the quantum well structure was calculated, it was found that the band structure changed significantly depending on the composition of the well layer and barrier layers. Therefore, we systematically investigated the changes in the quantum well structure when the compositions of the well and barrier layers were changed, and proceeded with the development of a practical high-sensitivity magnetic sensor over a wide temperature range. We evaluated the band gaps, temperature dependence of the carrier density, the well confinement depth, and determined the optimum composition for high-sensitive magnetic sensors that can operate at extremely low temperatures.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：ホール素子 狭ギャップ半導体 量子井戸

### 1. 研究開始当初の背景

InSb や InAs 等の狭ギャップ III-V 族化合物半導体の薄膜や量子井戸は、電子移動度が高く、ホール素子等の高感度磁気センサとして広く使われてきた。InSb の Sb の一部を As に置換した InAsSb 量子井戸は、バンドギャップをさらに小さくすることができ、そのため大きな移動度が期待できる。これまでの我々の研究で、InAs<sub>0.1</sub>Sb<sub>0.9</sub>/Al<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>Sb 量子井戸は、格子ミスマッチ 0% を実現でき、極低温においても低抵抗を維持し、導電性および磁気的高感度を示すことを報告してきた。

一方、ホール素子を磁気センサに使う非接触電流センサは、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いため、負荷電流によるジュール発熱や電力損失がない。このため、測定系への影響はほとんどなく、過渡電流から交流・直流まで極めて効率的に測定できる。近年では IoT に伴い、電子デバイス用の電流センサへの応用が期待されているが、実用化されている電流センサは比較的大きな電流検出に限られており、微弱電流計測には応用されていなかった。

現在の課題として、狭ギャップ半導体の量子井戸や超薄層における磁界下電子輸送の学術的視点からの更なる解明と共に、磁気を応用した新規非接触センサの工学的応用がある。特に、電気・電子システムの動作状況をリアルタイムに計測できる非接触電流計測技術の開発や、電子回路内での非接触電流検出機能の付与等、今まで行われていなかった非接触センサ機能の開発が必要とされている。これらの課題のうち、我々は高感度磁気センサに必要なウエハ構造の検討を中心に研究を行った。

### 2. 研究の目的

我々は、これまでに InSb 層に As を添加した InAsSb 量子井戸ホール素子の実験的研究を進め、InAs<sub>0.1</sub>Sb<sub>0.9</sub>/Al<sub>0.1</sub>In<sub>0.9</sub>Sb 量子井戸は室温から極低温まで移動度低下を生じないという、実用上極めて有用な知見を得た。これは、幅広い温度範囲で磁気的高感度を維持できることにつながる。感度としては  $\mu\text{T}$  レベルの磁界が安定検出できることが明らかになってきており、微小電流検出に應用すれば、高精度で mA レベルの電流検出が可能なることに相当する。

この量子井戸の性能向上の理由を明らかにするため、量子井戸構造のバンドダイアグラム計算を行ったところ、動作層と障壁層の組成に依存して、バンド構造が大きく変化することを見出した。量子井戸がタイプ II に変化することにより、低温においても井戸層の空位化を抑え、低抵抗の維持と高移動度の実現がなされている。このように、これら組成の制御によって伝導帯の底部とフェルミレベルの位置関係を大きく変化できることが分かり、さらに温度安定性がよく、高感度なホール素子を設計可能であることが示唆されたのである。

このため、動作層やバリア層の組成を変化させたときの量子井戸構造の変化を系統的に検討し、広範な温度領域にわたって実用的な高感度磁気センサの開発の指針を示す。以下では、動作層や障壁層の組成を変化させたときの InAsSb 量子井戸構造の変化を検討した結果について報告する。

### 3. 研究の方法

バンドダイアグラムの計算は一次元 Poisson-Schrödinger 方程式計算プログラムを用いて行った。シミュレーションに用いた量子井戸構造は、GaAs cap (6.5 nm)/ Al<sub>y</sub>In<sub>1-y</sub>Sb (50 nm)/ InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> (50 nm)/ Al<sub>y</sub>In<sub>1-y</sub>Sb (700 nm)/ GaAs (100) substrate である ( $0 \leq x, y \leq 1$ )。格子ミスマッチによる歪みは考慮しておらず、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留めされると仮定した。

### 4. 研究成果

図 1 は、4.2 K および 300 K での InSb と InAs 間のバンドギャップの変化である。InSb の Sb 原子を As 原子で置換すると、バンドギャップが減少し、 $x = 0.4$  あたりで最少を示す。電子移動度を向上させるには、低バンドギャップが適しているため、InSb に比べてバンドギャップを小さくするためには、 $x = 0.1 \sim 0.6$  が望ましいことが分かる。

InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> / Al<sub>y</sub>In<sub>1-y</sub>Sb 量子井戸の各組成の変化に応じて、どのような物理量が変化するかを確かめるため、まず、障壁層の組成を  $y = 0.3$  に固定し、井戸層の As 組成  $x$  を変化させた。図 2 において、 $z$  は表面からの距離を表しており、実線は 4.2 K、破線は 300 K の結果を示している。

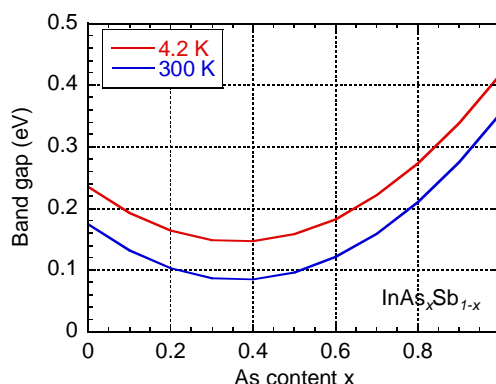


図 1 バンドギャップの変化

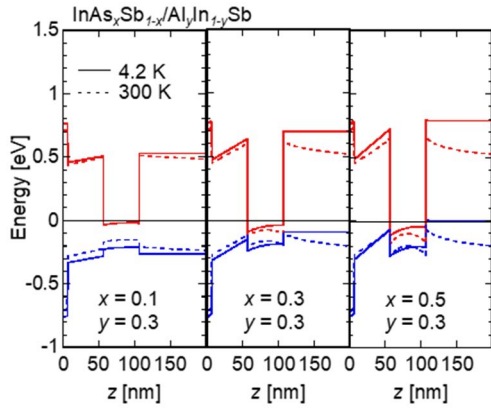


図2 バンド構造の  $x$  依存性

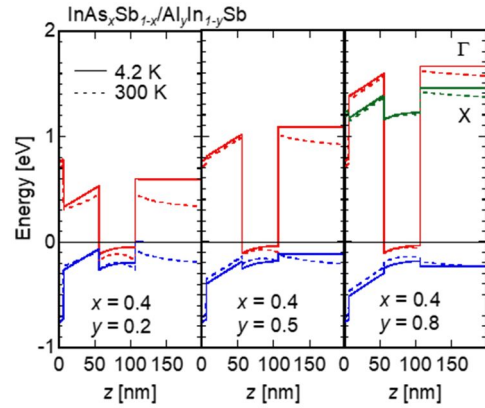


図3 バンド構造の  $y$  依存性

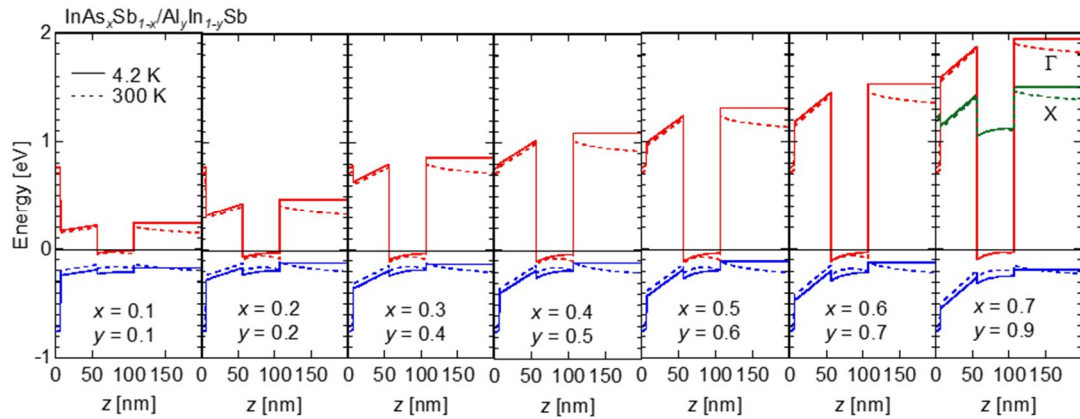


図4 格子整合  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$  量子井戸のバンド構造

井戸層の伝導帯の位置は、 $x$  の増加とともに低下する。 $x$  が増加するにつれて、 $x = 0.1$  に見られる通常のタイプ I 量子井戸からタイプ II を介して、 $x = 0.5$  ではタイプ III に変化する。いずれの  $x$  組成においても、活性層の伝導帯の底はフェルミレベルよりも低いエネルギーになり、十分な電子を井戸に供給できることが分かる。

図3は、井戸層の組成  $x$  を  $x = 0.4$  に固定し、障壁層の組成  $y$  を変化させたものである。井戸層の伝導帯の底は、 $y$  の増加に関わらずほとんど変化しないが、障壁高さは著しく増加する。この場合、井戸のタイプは  $y$  の増加とともに、タイプ III からタイプ II に変化する、最終的にはタイプ I に変化する。

$\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$  量子井戸について、 $0 \leq x, y \leq 1$  における全ての領域について計算を行ったが、現実的に重要なのは、井戸層と障壁層の格子ミスマッチが非常に小さい組成組み合わせのところである。このため、図4に As 含有量  $x$  とし、 $y$  を格子整合条件に近いように選択した場合のエネルギーバンド図をまとめた。これらの格子不整合は、いずれも 0.3% 未満になっている。量子井戸タイプはすべてタイプ II で、バリアの高さを除けばバンド形状はほぼ同じになっている。障壁高さは、 $x$  の増加（それに伴い  $y$  の増加）とともに単調に増加する。すべての格子整合  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$  量子井戸の伝導帯の底が、常にフェルミ準位よりも低いことは重要である。さらに詳細に変化をみると、活性層の伝導帯の底は、最初は  $x$  とともに下向きに移動するが、 $x = 0.6$  以上になると上昇し、その変動がシートキャリア密度に寄与する。このように、 $\text{InAsSb}$  系半導体量子井戸では、極低温で良好な導電性を示す組成領域があり、高い電子移動度を生かしながら極低温まで動作するデバイス作製が可能な材料であることを意味している。

図5は、シートキャリア密度の As 組成  $x$  依存性である。ここで、 $x = y = 0$  は  $\text{InSb}$  薄膜を意味している。シートキャリア密度は 4.2K の  $x (= y) = 0$  を除いて有限の値をとり、量子井戸中のキャリアが室温から低温に至るまで空亡しないことを示している。シートキャリア密度は  $x = 0.6$  で最大になり、300K では約  $7.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 、4.2K では  $4.1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$  に達する。低温において高いキャリア密度が実現できると、温度が上昇した際の熱励起によるキャリア密度の変化率を抑えることに寄与するため、ホール電圧の高い熱安定性に貢献すると考えられる。以前、実験的に井戸層に  $\text{Sn}$  をドーピングした量子井戸の輸送特性を報告したところ、シート抵抗の温度依存性を大幅に低減することができた。しかし、井戸層への直接ドーピングは不純物散乱を引き起こし、移動度に悪影響を及ぼすため、他の方法でキャリア密度を上げることが好ましい。 $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$  量子井戸の場合、ドーピングをしていないのにも関わらず十分なドーピングと同様の効果をもたらし、4.2 K でも高いシートキャリア密度を実現することが可能であることが分かった。さらに、300K と 4.2K でのキャリア密度の比率をプロットした(破線)。  $x = 0.1$  から 0.4 にむけて、

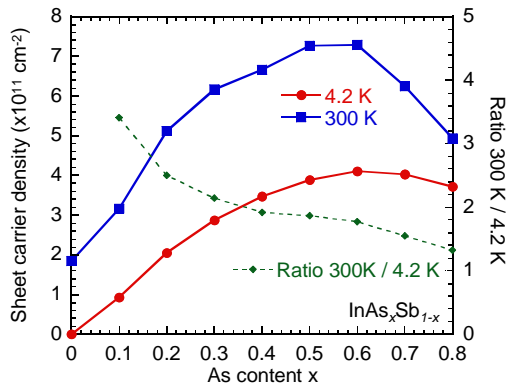


図5 シートキャリア密度の変化

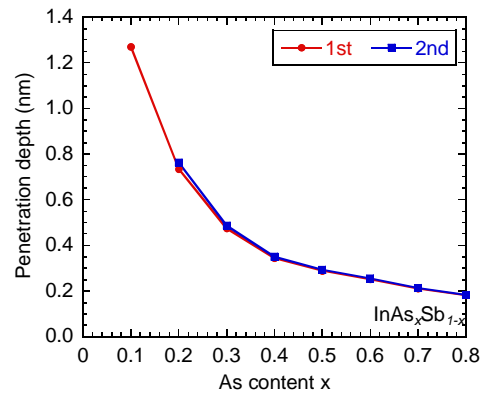


図6 波動関数侵入深さの変化

キャリア密度比率は大幅に低下し、その後ゆっくりと低下する。室温と低温のキャリア密度の差が小さいほど、抵抗の変化が小さくなるため、温度依存性を低減するには、 $x$  が 0.4 より大きい方が適しているといえる。

As 含有量  $x$  が増加に伴い、格子定数をマッチングさせるため障壁層の  $y$  も増加させているが、そのため井戸の障壁高さも大きくなる。障壁高さが高くなると、電子波動関数の強い閉じ込め効果を実現し、界面に電子が存在する確率が小さくなる。障壁層内の波動関数確率の減衰を、指数関数的にフィッティングすることによって、波動関数確率の侵入深さを評価した。この結果を図6に示す。1 番目および 2 番目のサブバンドの侵入深さが示しているが、両者はほとんど変わらず、浸透深さは  $x$  の増加とともに減少している。侵入深さが小さいということは、井戸内の電子の強い閉じ込め効果を意味するため、界面粗さによる界面散乱の低減と、その結果高い電子移動度が期待される。浸透深さは  $x=0.1$  から 0.4 に大幅に低下し、その後ゆっくりと減少する。障壁高さが  $1.10 \text{ eV}$  ( $x=0.4$  ( $y=0.5$ ), @4.2 K) の場合、浸透深さは  $0.34 \text{ nm}$  であり、これは 1 原子層に対応する。したがって、強い閉じ込め効果を得るには、 $x$  が 0.4 より大きい方が望ましいといえる。

以上のような結果を踏まえ、小さなバンドギャップ、キャリア密度の温度変化の少なさ、井戸の閉じ込め深さによる界面散乱の抑制効果等を勘案すると、極低温動作可能な磁気センサや電子デバイス等の製作に最適な  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x} / \text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{Sb}$  量子井戸の組成は、 $x=0.4 - 0.6$  (対応する  $y$  範囲は  $y=0.5 - 0.7$ ) であると結論づけられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Manago Takashi, Kasahara Kenji, Shibasaki Ichiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Composition optimization of InAsxSb1-x/AlyIn1-ySb quantum wells for Hall sensors with high sensitivity and high thermal stability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035213-6 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0039809	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 柴崎一郎	4. 巻 2
2. 論文標題 社会生活の夢を実現したホール素子の研究開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TMS研究	6. 最初と最後の頁 15-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柴崎一郎	4. 巻 1
2. 論文標題 センサ基礎講座第6回 薄膜ホールセンサ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測技術	6. 最初と最後の頁 48-56
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柴崎一郎	4. 巻 -
2. 論文標題 センサは何を変えたか？未来に向かって何を変えるのか？(1)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Webジャーナル・センサイト <a href="http://sensait.jp/9204/">http://sensait.jp/9204/</a>	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 柴崎一郎	4. 巻 -
2. 論文標題 センサは何を変えたか？未来に向かって何を変えるのか？(2)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Webジャーナル・センサイト <a href="http://sensait.jp/9205/">http://sensait.jp/9205/</a>	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件(うち招待講演 5件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 眞砂卓史、笠原健司、柴崎一郎
2. 発表標題 InAsxSb1-x/AllyIn1-ySb量子井戸のバンド構造と極低温電子輸送特性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴崎一郎
2. 発表標題 磁気センサと社会的インパクト
3. 学会等名 第148回アモルファス・ナノと応用研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴崎一郎
2. 発表標題 新規InSb単結晶薄膜の電子輸送と磁気抵抗効果と応用
3. 学会等名 第148回アモルファス・ナノと応用研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 柴崎一郎
2. 発表標題 磁気センサの研究開発
3. 学会等名 第31回センサテクノスクール（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴崎一郎
2. 発表標題 高感度薄膜磁気センサによるイノベーションの歴史と将来展望
3. 学会等名 第28回センサテクノスクール「次世代センサ・アクチュエータの基礎から最先端技術」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠原健司，柴崎一郎，眞砂卓史
2. 発表標題 単結晶InSbホール素子を用いたプリント配線中を流れる電流の非接触計測
3. 学会等名 第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴崎一郎
2. 発表標題 社会生活の夢を実現したホール素子の研究開発
3. 学会等名 TMS研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 21世紀に於ける電力系統技術調査専門委員会（共著 柴崎一郎）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 電気学会	5. 総ページ数 67
3. 書名 歴史に学ぶ21世紀における電力系統技術（第5章3節 p.62-67）	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 半導体積層体	発明者 真砂卓史、柴崎一郎、笠原健司	権利者 学校法人 福岡大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-196657	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	笠原 健司  (Kasahara Kenji)  (00706864)	福岡大学・理学部・助教   (37111)	
研究分担者	柴崎 一郎  (Shibasaki Ichiro)  (10557250)	公益財団法人野口研究所・研究部・顧問   (72690)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------