

## 研究課題別 事後評価結果

1. 研究課題名： 半導体をベースとしたスピン機能材料の開発とスピンエレクトロニクスへの展開

2. 研究代表者： 田中 雅明（東京大学 大学院工学系研究科 教授）

### 3. 研究内容及び成果

本研究は、さきがけ研究を基にして、III-V族およびIV族半導体をベースとして磁性・スピン機能を融合させた様々な複合物質系・ナノ構造を作製し、強磁性秩序と高い強磁性転移温度、巨大な磁気光学効果、巨大な磁気輸送現象を併せ持つ「半導体スピン機能材料」を実現することを目指した。

本研究の成果を以下に示す。

#### 1) GaAs:MnAs ナノクラスター材料の物性とそのデバイス応用

①NiAs 型六方晶構造 MnAs ナノクラスターを含む GaAs:MnAs グラニューラー薄膜の作製に加え、強磁性転移温度が 360K に達する閃亜鉛鉱型結晶構造の MnAs ナノクラスターを持つ GaAs:MnAs グラニューラー薄膜の作製に成功した。この薄膜の特性として、反射率と損失は GaAs:MnAs(閃亜鉛鉱型)グラニューラー薄膜の方が小さいが、磁気光学効果(カー回転角、楕円率)は GaAs:MnAs(NiAs 型)グラニューラー薄膜の方が大きいことが明らかになった。

②GaAs:MnAs(NiAs 型)グラニューラー構造において、600%以上におよぶ大きな正の磁気抵抗効果を室温で観測した。同様の磁気抵抗効果は GaAs:MnAs(閃亜鉛鉱型)グラニューラー薄膜でも観測された。

③GaAs:MnAs(NiAs 型)グラニューラー構造を磁性層として、この磁性層の横磁気カー効果による非相反損失を利用した導波路型光アイソレーターを InP 基板上に作製した。また、光通信波長の  $1.55\ \mu\text{m}$  帯 TM モードライクの光において、室温下で約 1.3dBmm のアイソレーション比を観測し、導波路型光アイソレーターが動作可能であることを示した。

#### 2) 強磁性半導体の高転移温度化と新材料の作製

①成長温度を  $150^\circ\text{C}$  から  $200^\circ\text{C}$  の非常に低い温度まで下げ、GaMnAs 層の膜厚を 10 nm と薄くすることにより、12%以上(最大 21.3%)の高い Mn 組成を有する混晶強磁性半導体 GaMnAs 薄膜のエピタキシャル成長に成功した。また、作製された膜について構造評価、磁気光学効果、MCD(Magnetic Circular Dichroism)、異常ホール効果、磁化測定等を行い、真性の強磁性半導体であることを証明した。さらに低温アニールによって、GaMnAs(混晶薄膜)の強磁性転移温度( $T_c$ )としてこれまでの最高値にほぼ匹敵する 170K を得た。

②磁性元素(Mn)をデルタドーブした GaAs と Be ドープ p 型 AlGaAs からなる選択ドーブヘテロ構造を形成し、逆 HEMT(High Electron Mobility Transistor)構造において Mn デルタドーブ層の濃度を 0.5 原子層に高めることにより、192K の  $T_C$  を観測した。また、ヘテロ構造を順 HEMT 構造として、Mn デルタドーブ層の濃度を 0.6 原子層に増やし、成長後の低温アニールによって約 250K の  $T_C$  を観測した。

③新しいIV族ベース強磁性半導体  $Ge_{1-x}Fe_x$  のエピタキシャル成長に成功した。この  $Ge_{1-x}Fe_x$  はダイヤモンド型結晶構造をもち、クラスタ析出物等の異相がない単一の結晶相であること、局所的な Fe 組成にはゆらぎがあることを高分解能 TEM および組成分析により証明した。MCD による評価から、 $Ge_{1-x}Fe_x$  は単一の磁気光学スペクトルを持つ(すなわち単一の磁性層を持つ)真性の強磁性半導体であり、 $T_C$  は Fe 組成 13%で 170 K に達することが判明した。

### 3) 強磁性半導体トンネル磁気抵抗デバイス

① $In_{0.4}Ga_{0.6}As$  の非磁性量子井戸層を有する  $Ga_{0.94}Mn_{0.06}As$  (20 nm) / AlAs ( $d$  nm) /  $In_{0.4}Ga_{0.6}As$  (0.42 nm) / AlAs ( $d$  nm) /  $Ga_{0.94}Mn_{0.06}As$  (20 nm) 二重障壁強磁性トンネル接合を、p型 GaAs(001)基板上に分子線エピタキシー法を用いて作製するとともに、AlAs 障壁膜厚に対して TMR(Tunneling Magneto Resistive)比が振動的に変化し、特定の膜厚で TMR が負になる現象を発見した。この結果を理論計算と対比して検討した結果、上記の振動現象は共鳴トンネル効果とバンド構造が複雑に絡み合って出現することを明らかにした。

②p型 GaAs(001)基板上に GaAs:MnAs(厚さ 5nm) / AlAs(2.2nm) / GaAs(1nm) / MnAs (20nm)からなるヘテロ構造の強磁性トンネル接合(MTJ; Magnetic Tunnel Junctions)を作製し、バイアス正負の両方で明瞭な TMR を観測した。その結果、GaAs 半導体中に埋め込まれた MnAs ナノ微粒子がスピン注入源およびスピン検出器として働くことが示され、TMR 比が半減するバイアス電圧は 1200 mV に達することがわかった。これは、従来の強磁性半導体ヘテロ構造(GaMnAs/III-V/GaMnAs)を用いた MTJ のバイアス電圧 40mV と比較して極めて大きく、半導体ベースの TMR デバイスとして非常に優れたバイアス特性を持つことが示された。

③GaMnAsヘテロ構造を用いた三端子デバイスであるスピンホットキャリアトランジスタを試作し、電流転送率0.85-0.9、電流増幅率10程度の電流増幅機能を確認した。エミッターコレクタ間ではトンネル磁気抵抗効果が明瞭に観測されたことから、スピン依存伝導特性を併せ持つことが示されたとともに、トンネル磁気抵抗比には共鳴トンネル効果によると思われる特異なバイアス依存性があることが判明した。

## 4. 事後評価結果

### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

期間中の外部発表、特許等の実績を示す。

発表論文：29 件

その他著作、レビュー：4 件

口頭発表：国内 54 件、海外 55 件

特許出願：国内 1 件、海外 1 件

磁性半導体は、元素金属強磁性体と比較してスピン密度が小さいため、高温における強磁性特性の発現が困難であるという原理的な課題があった。本研究のアプローチは、ナノ構造クラスタを半導体単結晶中に分散させることによってスピン間相互作用の強さと半導体特性の制御性との両立を図ることであり、低温成長とアニール技術やデルタドーピング等の新しい材料技術の開拓により、実現に向けて一歩進めることが出来た。この成果の材料科学への貢献は十分に大きいと言える。また、光電子デバイス、磁気記憶デバイス、スピントランジスタ等の原理実験を行い、興味ある特性を得ることに成功している。これらは、性能的にはまだ初歩的なものであるが、デバイス概念の提示と検討課題の抽出という意味で技術的にインパクトの強い業績である。

研究成果は数多くの原著論文によって公表されている。デバイス研究の中で新規性と速報的価値の高い成果を選んで掲載することで高い評価を得ている学術誌が8篇の論文を採択したことが本研究のインパクトの強さを物語っている。学術論文の件数を考えると特許取得可能なアイデアはもっと多いと推察される。

### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

20世紀後半は、半導体の制御性の飛躍的向上、種々の化合物半導体とヘテロ構造の導入によって、高度な機能を持つ半導体製品が大量に供給されるようになった時代であった。本研究によって磁性を広く制御出来る半導体の有力候補が付け加わり、半導体技術の突破口を開くものと期待出来る段階に来ている。ただし、次世代の電子情報システムを牽引するコア技術として確立するためには、室温以上で動作するまで磁氣的相互作用を強めなければならず、まだ挑戦は続くと考えられる。今後の展開としては、磁氣的相互作用を強くするための方策を物理的原理の観点から深く探求する方向や、現在到達した材料性能をもとに高度の機能を持つデバイス概念を確立して特殊用途への適用可能性を探求する方向等が考えられ

る。平坦な道とは言えないが挑戦する価値の高いテーマであり、さらなる展開を期待する。

#### **4-3. その他の特記事項(受賞歴等)**

2007年3月 日本学術振興会賞

この他、指導した学生・研究員が4件の学術奨励賞を受けた。