

All-in-One半導体プラットフォームによる新量子フロンティア

	研究代表者	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授 Le Duc Anh（れ でうくあいん） 研究者番号：50783594
	研究課題情報	課題番号：24H00018 研究期間：2024年度～2028年度 キーワード：All-in-One半導体、強磁性半導体、近接効果、エピタキシャル成長、量子技術

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

従来の半導体材料が持ち得なかった「超伝導のゼロ電気抵抗」「強磁性の不揮発性」「トポロジーの誤り耐性」という新規量子物性機能を近接効果により半導体へ同時に融合する材料変革を通じて、次世代エレクトロニクスに資する高感度量子計測、省エネかつエラーに強い量子演算の基盤技術の創成を目指す。

All-in-One 半導体プラットフォーム：半導体材料を革新！

半導体材料と他の量子材料との高品質ヘテロ界面で量子状態を融合



複数の量子状態の相乗効果により生まれる未踏の量子物性と機能
次世代の量子計測と量子コンピューティングの基盤技術の開拓

図1 本研究が提案するAll-in-One半導体プラットフォームのイメージ図

●All-in-One 半導体プラットフォーム

半世紀前から使われてきた半導体にはまだ未開拓の大きなポテンシャルが潜んでいる。かつて半導体材料では想像すらできなかった「強磁性」「超伝導」「トポロジー」などの様々な新物性が、原子レベルで制御する最先端の結晶成長とデバイス作製技術によって今や実現可能になっている。本研究ではわれわれが独自に開発した結晶成長技術を用いて超伝導体/トポロジカル物質/強磁性半導体の高品質ヘテロ接合を作製し、量子力学的「近接効果」で半導体材料に複数の量子状態が融合するAll-in-One半導体プラットフォームを創成する。電界効果、光、物質設計など様々な手段による制御性に富んだ半導体材料構造に磁石の状態保持能力、超伝導の電気抵抗ゼロ、物質の欠陥の影響に対する丈夫さなど新機能を持たせることで、半導体材料の革新からエレクトロニクスの未来を切り拓く。

●Feドーブ強磁性半導体：半導体に強磁性をもたらす基盤材料

※強磁性半導体：非磁性半導体(II-V, III-V, IV族)に磁性元素(Mn, Fe…)を数%以上添加した混晶半導体。半導体中に強磁性秩序と磁性関連機能を融合する材料として注目を浴びている。我々が独自に開発したFeドーブ狭ギャップ強磁性半導体はN型もP型も室温で強磁性を示す唯一の強磁性半導体。

Feドーブ強磁性半導体の様々な優れた特性

- ゼロ磁場で電子状態がスピン分裂
- ゲート電界で容易に磁化特性が制御できる
- 電子のスピン・軌道が強く結合
- スピン量子物性に富む
- エレクトロニクスに大変良い整合性

半導体に2つ以上の量子状態や物性を同時に融合することが従来では非常に困難。Feドーブ強磁性半導体で実現したい。

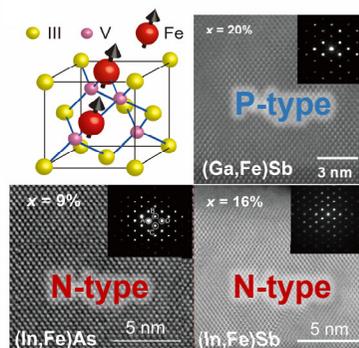


図2. 本研究の基盤材料。我々が独自に開発した、N型もP型も室温で強磁性を示すFeドーブ強磁性半導体。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●複数の量子状態が共存するAll-in-One半導体材料構造の創製：

超伝導体/トポロジカル半金属/FeドーブFMSヘテロ接合を超真空一貫でエピタキシャル結晶成長し、単結晶構造と欠陥フリーのヘテロ界面を作製する。

- 原子レベルで平坦な異種材料界面の制御
- 長距離近接効果の実現と制御
- 量子状態をゲート電圧で制御
- 光電子分光測定と理論計算を併用して新規物質を予想・解明

いずれも量子材料科学の未開拓で重要な学術課題



図3. われわれが作製する半導体上の様々な高品質ヘテロ構造

●All-in-One半導体材料による未踏空間で新規物性探索と制御：

複数の量子状態の相乗効果によって個別の量子状態だけでは得られない様々な新しい量子機能を半導体中で創成できると期待される

<超巨大電磁気応答効果の探索と量子計測技術の開発>

理論計算と実証実験を密接に組み合わせ、様々な強磁性体/トポロジカル材料/超伝導体ヘテロ構造における巨大応答物性を探索する。非相反磁気伝導、異常量子ホール効果、超伝導ダイオード効果など、これらを高感度磁気センサー、超高速省エネの情報処理へ応用する。

<超伝導と強磁性の相互作用を解明・制御>

強磁性体中の超伝導状態は電子スピンの揃ったクーパー対が形成する(スピン三重項超伝導状態)。このような未開拓な超伝導内のスピン物性を解明しエネルギーを消費しない情報処理への応用を目指す。

<半導体材料中のマヨラナ束縛状態の生成と制御>

超伝導・トポロジー・強磁性が共存するAll-in-One半導体材料には非可換統計に従うマヨラナ束縛状態(MBS)が存在すると予想される。MBS状態を用いるとエラーに強い量子演算ができると考えられる。本研究はゲート電圧を用いてFMSのスピン自由度を制御し、強い磁場を使わずにMBS状態の実現を目指す。これは実用レベルの量子コンピュータの実現へ繋がると期待される。



図4. 代表する新規物性の例

