



丸文研究奨励賞 受賞者

フナム ナム ハイ (ベトナム)  
PHAM NAM HAI

東京工業大学 工学院電気電子系  
准教授

## 室温強磁性半導体(GaFe)Sb および(InFe)Asの開拓

鉄系強磁性半導体の創製と半導体スピントロニクスへの応用

### ■ 研究の背景

半導体と強磁性体は情報化社会を支える材料として不可欠かつ重要な役割を果たしている。半導体は集積回路や光通信素子などの様々なデバイスに応用されている。これらの半導体デバイスにおいては、キャリア電荷を高速に制御することによって多くの機能が実現されているため、高速動作が可能である。一方、強磁性体はハードディスクなどの情報記録媒体や磁気抵抗メモリなどの高速不揮発性メモリに利用されている。磁性体デバイスは電子スピンの持つ「不揮発性」「高速性」「高い耐久性」という性質を生かしている。もし半導体と磁性体の長を融合することができれば、磁性体の不揮発性を持ち併せたような半導体デバイスが期待できる。

磁性材料と半導体材料の長を融合できる新材料として強磁性半導体(Ferromagnetic Semiconductor; FMS)は特に重要な材料系であり、大変注目されている。1990年代に東北大学の野英男や東京大学の田中雅明らによりMnを

ドーピングしたIII-V強磁性族半導体(InMn)Asや(GaMn)Asが開発され、半導体でも強磁性が発現できることが分かった。また、Mn系強磁性半導体は電界効果や光照射によるキュリー温度や磁気異方性の変調など、従来の半導体や強磁性金属では得られなかった機能が実証され、世界的に研究が進んできた。また、2000年に強磁性半導体のMean field Zenerモデルが提案され、Mn系の強磁性半導体の発現機構の説明や新材料の探求が行われてきた。しかし、15年以上にわたったMn系強磁性半導体の大規模な研究にもかかわらず、次の三つの問題が未解決のままである。1) p型強磁性半導体しか作製できないこと、2) キュリー温度が室温より低く、室温では強磁性にならないこと、3) 強磁性の起源に関する統一的理解がないことなどが挙げられる。これらの未解決課題は強磁性半導体のデバイス応用にとって大きな障壁となっている。

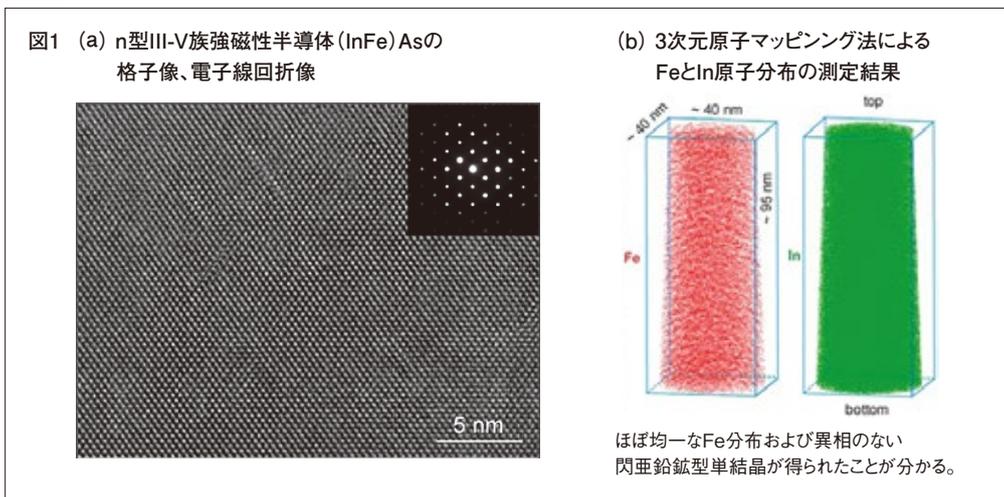
### ■ 研究の成果

本研究は以上の問題点を解決できる新

しい強磁性半導体として、Fe-AsやFe-Sbの正四面体共有結合を有する鉄系強磁性半導体を提唱し、2012年以来、材料作製、物性の解明およびデバイスの実証に成功した。鉄系強磁性半導体は、1) p型だけではなくn型強磁性半導体も作製できる、2) 室温以上のキュリー温度を持つ強磁性半導体を作製できる、3) バンド構造と強磁性の発生メカニズムの解明が比較的容易であることなどにより、従来の強磁性半導体材料の問題点を解決できる革新的な半導体スピントロニクス材料となる可能性を示した。

### ■ 鉄系n型強磁性半導体(InFe)Asの開発

2012年、これまで実現不可能であったn型III-V族強磁性半導体(InFe)Asの作製とその実証に成功した。図1に開発した強磁性半導体(InFe)As(Fe 9.1%)の格子像、電子線回折像と原子分布を示す。InAs半導体に大量のFe原子を添加したにもかかわらず、異相のない閃亜鉛鉱型結晶構造を保ち、かつほぼ均一なFe分布が得られたことが分かる。



また、(InFe)Asは強磁性転移温度が電子濃度に依存する「電子誘起強磁性」を有することを見出した。さらに、(InFe)Asの伝導電子は不純物バンドではなく、伝導帯に滞在するため、最大で1000 cm<sup>2</sup>/Vsと高い移動度を示すとともに、(InFe)As量子井戸における量子サイズ効果が確認できた。さらに、量子井戸の幅の変化および電界効果を用いた波動関数制御を用いて、波動関数と磁性層との相対的な位置を制御することによって、強磁性(キュリー温度T<sub>C</sub>)を変調することに成功した。その結果、従来の技術と比べてチャンネルの電子濃度をほとんど変える必要がなく、非常に低消費電力(2~4桁少ない電力)で磁性(T<sub>C</sub>)の変調に成功した。

### ■鉄系p型強磁性半導体(GaFe)Sbの開発および室温強磁性(T<sub>C</sub> = 340 K)の実現

2014年ごろからGaSbに高濃度のFeを添加することに成功し、非常に高いT<sub>C</sub>を示すp型強磁性半導体(GaFe)Sbの開発に成功した。表1にMn系強磁性半導体およびFe系強磁性半導体の開発史を示す。Mn系強磁性半導体は最大200 KのT<sub>C</sub>しか得られないことに対して(GaFe)Sbでは、Fe濃度が23%以上で、室温以上の強磁性を示した。

### ■将来の展望

強磁性半導体のMean field Zener標準モデルでは、1) n型強磁性半導体において、s-d相互作用が弱いと、キュリー温度を1 K以上達成できない、2) p型強磁

性半導体において、高いキュリー温度を得るためには、バンドギャップが大きいワイドギャップ半導体を使うべきだと考えられてきた。それに対して、本研究の提唱した鉄系半導体の設計論はMean field Zener標準モデルとは対照的である。すなわち、スピンの元である磁性元素と電子を提供するドナーの

元素を分離すれば、必ずしもs-d相互作用が弱いとは限らないため、n型でも高いキュリー温度が得られる。また、p型強磁性半導体では、キャリアが発生しやすいナローギャップ半導体の方がむしろp-d相互作用が強いと期待でき、高いキュリー温度が得られる。実現した(InFe)Asおよび(GaFe)Sbは本研究の提唱を具体化した実施例である。同時に、Mean field Zener標準モデルを理論的に見直す必要があることを示した。

本研究の鉄系強磁性半導体は従来のMn系強磁性半導体の問題点をすべて解決でき、強磁性半導体のデバイス応用への道を切り開いた。たとえば、室温異常ホール効果を用いるスーパー高感度磁気センサーへの応用が期待できる。すでに、室温鉄系強磁性半導体において、実用化されているInSbホール効果磁気センサーと同等な超高感度が得られる。今後は、鉄系強

表1 強磁性半導体の開発史

(InMn)As	~7 K	(1991, IBM)	Mn doping
(InMn)As	35 K	(1993, IBM)	
(InMn)As	90 K	(2006, Titech)	
(GaMn)As	60 K	(1996, Tohoku Univ.)	Fe doping
(GaMn)As	55 - 60 K	(1996-7, Univ. of Tokyo)	
(GaMn)As	110 K	(1998, Tohoku Univ.)	
(GaMn)As	140-150 K	(2002, Nottingham, Pennsylvania)	
(GaMn)As	160 K	(2002, Tohoku Univ.)	
(GaMn)As	173 K	(2004, Nottingham, 2007, Univ. Tokyo)	
(GaMn)As	200 K	(2010, Chinese Academy Science)	
(InFe)As	~70 K	(2012, our work, first n-type FMS)	
(GaFe)Sb	140 K	(2014, our work)	
(GaFe)Sb	230 K	(2015, our work, new T <sub>C</sub> record)	
(GaFe)Sb	340 K	(2016, our work, T <sub>C</sub> > room-temperature)	

磁性半導体の異常ホール効果を改善し、InSbホール素子を越えるスーパー高感度の磁気センサーを開発したいと思っている。また、最近では従来の金属磁性体のトンネル接合でしか確認できなかった巨大な磁気抵抗効果をn型(InFe)As/p型(GaFe)Sbの鉄系強磁性半導体pn接合で実現できるようになった。この現象を3端子半導体デバイスに応用すれば、ノーマリオフ論理回路、再構成可能な論理回路、さらにニューラルネットワークや人工知能など、IOT時代に欠かせない柔軟かつ超低消費電力の電子技術への応用が期待される。

### 謝辞

本研究は東京大学工学系研究科電気系の田中研究室および東京工学工学院電気電子系のPham研究室において行われたものであり、共同研究者および学生の皆様に深く感謝申し上げます。

### References (参考文献)

- [1] P. N. Hai, L. D. Anh, S. Mohan, T. Tamegai, M. Kodzuka, T. Ohkubo, K. Hono, M. Tanaka, "Growth and characterization of n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In, Fe)As", Appl. Phys. Lett. 101, 182403/1-5(2012).
- [2] P. N. Hai, D. Sasaki, L. D. Anh, M. Tanaka, "Crystalline anisotropic magnetoresistance with two-fold and eight-fold symmetry in (In, Fe)As ferromagnetic semiconductor", Appl. Phys. Lett. 100, 262409/1-5(2012).
- [3] P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, "Electron effective mass in n-type electron-induced ferromagnetic semiconductor (In, Fe)As: Evidence of conduction band transport", Appl. Phys. Lett. 101, 252410/1-5(2012).
- [4] N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, "(Ga, Fe)Sb: A p-type ferromagnetic semiconductor", Appl. Phys. Lett. 105, 132402/1-4(2014).
- [5] L. D. Anh, P. N. Hai, Y. Kasahara, Y. Iwasa, Masaaki Tanaka, "Modulation of ferromagnetism in (In, Fe)As quantum wells via electrically controlled deformation of the electron wave functions", Phys. Rev. B 92, 161201(R)/1-5(2015).
- [6] N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, "Magnetic properties and intrinsic ferromagnetism in (Ga, Fe)Sb ferromagnetic semiconductors", Phys. Rev. B 92, 144403/1-14(2015).
- [7] N. T. Tu, P. N. Hai, L. D. Anh, M. Tanaka, "High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga, Fe)Sb", Appl. Phys. Lett. 108, 192401(2016).
- [8] L. D. Anh, P. N. Hai, M. Tanaka, "Observation of spontaneous spin-splitting in the band structure of an n-type zinc-blende ferromagnetic semiconductor", Nature Communications 7, 13810(2016).