

研究成果公表掲載依頼用リリース文 要旨

1. タイトル：

半導体スピントロニクス材料 GaMnAs におけるバンド構造の新たな描像

2. 発表概要：

最も典型的な強磁性半導体として 10 年以上にわたって活発に研究の行われてきた GaMnAs において、そのバンド構造とフェルミ準位の位置が未解明であることが近年大きな問題となっていた。本研究では、高精度のエッチング手法と共鳴トンネル分光を組み合わせたユニークな手法を開発し、様々な GaMnAs 試料においてフェルミ準位の位置とバンド構造を初めて系統的に明らかにした。得られた結果は、今まで一般的に受け入れられてきたバンド構造の理解とは大きく異なっており、今後、強磁性半導体材料系の基礎研究、およびこれらを利用した次世代の半導体スピントロニクス素子を実現する上で、重要な指針となることが期待される。

3. 発表内容：

近年、今まで半導体素子では利用されてこなかった電子のスピン自由度を用いて、半導体で新しい機能を実現しようという試みが盛んに行われている。半導体に磁性不純物を添加することにより作製される強磁性半導体は、大変着目されている材料系である。特に GaMnAs は、最も典型的な強磁性半導体として、その発見以降 10 年以上にわたって、活発に研究が行われてきた。しかし、GaMnAs の最も基礎的な物性とも言えるそのバンド構造、特にフェルミ準位の位置が未だに解明されておらず、近年、大きな問題となっていた。フェルミ準位の位置を解明することは、これらの材料系における強磁性発現のメカニズムを解明する上でも、デバイス応用を考えるためにも、極めて重要である。本研究では、GaMnAs 表面層の表面をエッチングによって削ることにより、その膜厚を nm オーダーで制御した。この手法を用いて、表面 GaMnAs 層に形成される共鳴準位（量子準位）の GaMnAs 膜厚依存性を、様々な GaMnAs 試料に対して詳細に調べた。その結果、すべての試料において、①フェルミ準位が禁制帯中に位置すること、②GaMnAs の価電子帯構造が GaAs のそれとほとんど同一であること、③価電子帯のスピン分裂が極めて小さく数 meV 程度であること、④価電子帯が空間的に均一であることを明らかにした。本結果は、従来広く受け入れられてきた強磁性半導体の概念とは大きく異なっており、今後の強磁性半導体の基礎研究および応用研究における新たな指針になることが期待される。

4. 発表雑誌：

英国科学誌 Nature Physics (2011 年 2 月 6 日 Online) に掲載予定

5. 注意事項： 日本時間 2011 年 2 月 7 日午前 3 時まで発表禁止

6. 問い合わせ先：

田中雅明（東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授）

詳細は別紙をご参照ください。

2011年2月4日

報道関係者各位

東京大学

半導体スピントロニクス材料 GaMnAs におけるバンド構造の新たな描像

東京大学大学院工学系研究科の研究論文が英国科学誌「Nature Physics」に掲載されます

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の田中雅明教授、大矢忍准教授の研究グループは、高精度のエッチング手法と共鳴トンネル分光法を組み合わせたユニークな方法を開発し、様々な強磁性半導体 GaMnAs 試料において、フェルミ準位（注1）の位置とバンド構造（注2）を系統的に明らかにすることに初めて成功しました。特に GaMnAs のフェルミ準位の位置は、これらの材料系における強磁性発現機構を理解する上で極めて重要であり、その解明が切望されてきました。得られた結果は、従来一般的に受け入れられてきたこれらの系のバンド構造の理解とは大きく異なっており、今後これらの材料系の研究を進める上で、また、これらの材料系を用いた次世代スピントロニクス素子を実現する上で、重要な指針になると期待されます。本研究は、東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻の田中・大矢研究室において、主に大矢准教授と高田健太氏（卒業研究）により実験研究が行われたものです。本研究成果は英国科学誌「Nature Physics（ネイチャー フィジックス）」（2011年2月6日 Online）に掲載されます。

注意事項

Embargo（発表禁止期間）の遵守をお願い申し上げます。

オンライン掲載（日本時間2月7日午前3時）まで発表禁止。

1. 研究の背景

エレクトロニクスや半導体素子では利用されてこなかった電子の「スピン自由度」（注3）を用いて、新しい機能を実現しようという研究が盛んに行われている。このような「スピントロニクス」（注4）といわれる分野において、半導体に磁性不純物を添加することにより作製される「強磁性半導体」（注5）は、半導体でありながら強磁性（磁石の性質）を示すため、非常に注目されている重要な材料系である。特に GaMnAs は、最も典型的な強磁性半導体として、過去10年以上にわたって活発に研究が行われてきた。しかし、強磁性の発現機構とその基礎物性とも言えるバンド構造は十分に理解されていない。特に、フェルミ準位の位置を明らかにすることは、これらの材料系における強磁性発現機構の理解およびデバイス応用の実現のためにも必須であり、解明が待たれていた。

一般的に強磁性半導体材料でこれまで受け入れられてきた考え方は、伝導に寄与する正孔が価電子帯中（注2）に存在するという図1(a)に示した価電子帯伝導モデル[1,2]である。このモデルでは、Mnのドーピングによって形成される不純物バンド（注6）と価電子帯が強く混成し、その混ざったバンドの中にフェルミ準位(E_F)が存在すると考えられている。しかし、近年主に光学的な測定により、 E_F が価電子帯中ではな

く禁制帯中（注2）に存在する [図1 (b)参照] ことが示唆され[3-5]、その真偽が大きな論争の的となっていた。

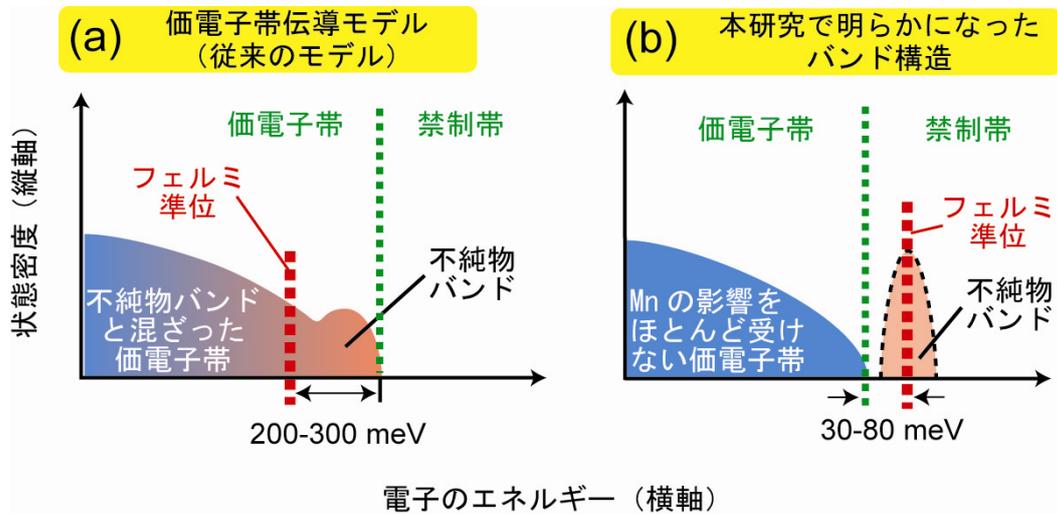


図1. 従来一般的に受け入れられてきた電子構造（左）と、本研究で明らかになった電子構造（右） 従来は、Mnのドーピングによって形成される不純物バンドと価電子帯が大きく混ざり、フェルミ準位はそこに存在すると一般的には考えられていた。本研究における共鳴トンネル分光実験により、価電子帯がMnのドーピングの影響をほとんど受けていないこと、また、フェルミ準位が禁制帯中に存在することが明らかになった。本研究では明瞭な不純物バンド [(b)に示した黒い点線で囲まれた領域] は観測されていないが、他の様々な研究から、存在している可能性が高いと考えられる。

参考文献

- [1] T. Dietl *et al.*, *Science* **287**, 1019 (2000).
- [2] T. Jungwirth *et al.* *Phys. Rev. B* **76**, 125206 (2007).
- [3] V. F. Sapega *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 137401 (2005).
- [4] K. S. Burch *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 087208 (2006).
- [5] K. Ando *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 067204 (2008).

2. 研究成果

本研究では、図2 (a)に示す GaMnAs($d=4.6-22$ nm)/ AlAs(5 nm)/ GaAs:Be(100 nm)/ p^+ GaAs(001)で構成される様々な Mn 組成と強磁性転移温度を持つ素子を、分子線エピタキシー法（注7）を用いて作製した。素子の表面をエッチングによりわずかに削ることにより、GaMnAsの膜厚 d の異なる様々な素子を作製した。図2 (b)にこれらの素子の価電子帯構造を示す。GaMnAsの価電子帯の正孔は、表面側の空乏層（注8）により曲がった価電子帯（黒い実線）が作るショットキー障壁（注8）と AlAs 障壁に挟まれることによってエネルギーが離散化（量子化）し、青線で示すような共鳴準位が形成される。GaMnAsの厚さ d の増加に伴い量子化が弱くなり、これらの共鳴準位はバルク状態（つまり d が無限大）における価電子帯の頂上（つまり価電子帯と禁制

帯の境目) に近づいていく。図 2 (c) に共鳴準位のエネルギーと GaMnAs の厚さの関係を示す。一方、フェルミ準位は電圧がゼロの状態に対応する。従って、共鳴準位の電圧を調べることで、フェルミ準位の位置が分かる。本研究では、電流を図 2 (a) に示した素子構造の下部から上部に流して測定を行った。

図 2 (d) に実際に実験で得られた電流 - 電圧特性の二階微分特性 ($-d^2I/dV^2$) を、印加電圧と GaMnAs の厚さに対してカラーマッピングしたグラフの一例を示す。(上部の白丸に対応する d の値が、実際に測定を行った素子の GaMnAs の厚さ。それ以外の領域は外挿によりマッピングされている。) それぞれの d において (つまり、グラフを縦に切ると)、 d^2I/dV^2 の大きさが電圧の変化に対して振動していることが分かる。また、振動のピークの電圧値が、 d の増大に従い有限の値に収束する傾向を示している。これは、図 2 (c) で説明した共鳴トンネル効果 (注 9) の典型的な振る舞いである。[図 2 (c) とはグラフの上下が反転していることに注意。] この収束先の電圧が GaMnAs の価電子帯の上端エネルギー E_V に相当する。一方、フェルミ準位 E_F は電圧がゼロである状態に相当するため、 E_F は禁制帯中に存在することが分かる。本研究で測定を行ったすべての試料において、このように E_F が禁制帯中に存在することが明らかになった。図中に示した青と緑の曲線は理論的に得られた共鳴準位であるが、良く実験結果を再現できている。本研究では、このような実験と理論解析から、フェルミ準位の位置とバンド構造を定量的に求めることに成功した。

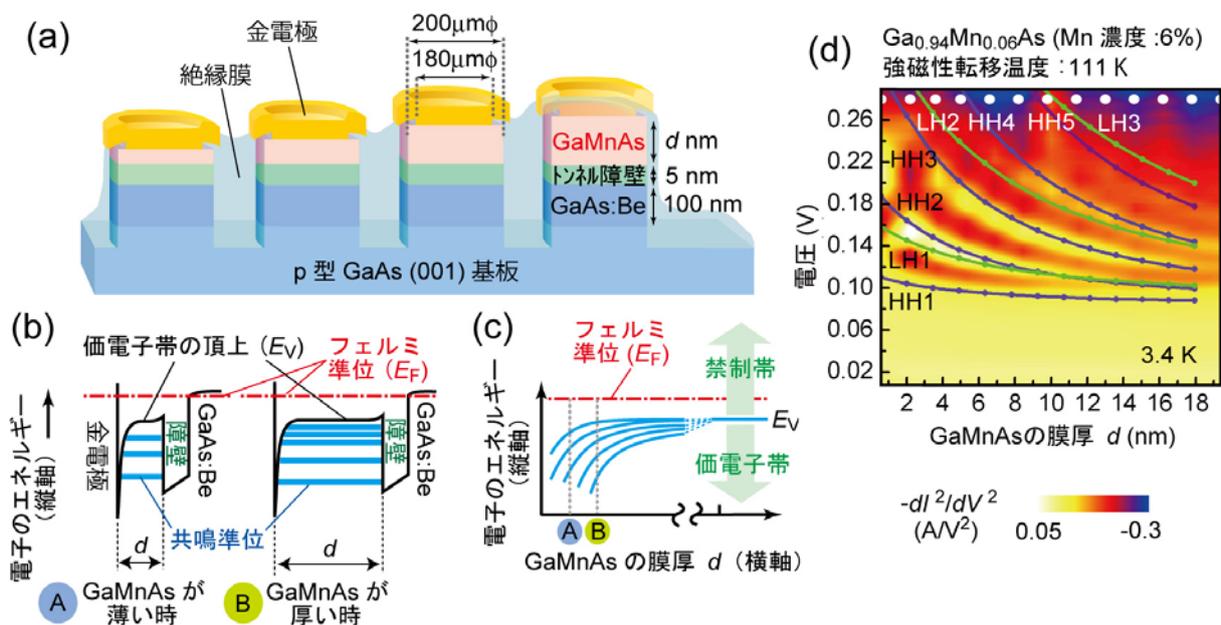


図 2 (a) 本研究で作製した様々な GaMnAs 膜厚 d を有する素子の構造 (b) これらの素子における価電子帯構造の模式図。 d が大きくなるにつれて、共鳴準位 (青線) が価電子帯の頂上 (E_V) に近づく様子。(c) 共鳴準位の GaMnAs の厚さ d に対する依存性。(d) GaMnAs 膜厚 d と印加電圧に対して、実験的に得られた $-d^2I/dV^2$ の値 (電流の電圧に対する 2 階微分特性) をカラーマッピングしたグラフ。青と緑の実線は、理論的に得られた共鳴準位。実験結果を極めて良く再現できている。実験解析から、 E_F の位置を定量的に求めることができる。

図 1 (b)に、得られた GaMnAs のバンド構造を模式的に示す。本研究により、GaMnAs の価電子帯は Mn の影響をほとんど受けておらず、GaAs の価電子帯がほとんどそのままの形状で GaMnAs 中にも存在していることが明らかになった。さらに、今までこれらの系の強磁性の発現において重要だと考えられてきた価電子帯のスピン分裂（注 1 0）が、無視できるほど小さい(3-5 meV)ことが明らかになった。

3. 本研究成果の意義

強磁性半導体 GaMnAs においてバンド構造とフェルミ準位 E_F の位置が未解明であることが大きな問題となっていたが、本研究ではこれらを精度よく定量的に決めることに初めて成功した。また、従来、強磁性の発現と大きな関係を持つと考えられていた価電子帯のスピン分裂は、極めて小さいことが明らかになった。これらの結果は、従来一般的に受け入れられてきたこれらの材料系のバンド構造の理解とは大きく異なっており、強磁性発現機構を理解する上で極めて重要な新たな知見であると言える。さらに今後の、室温で強磁性を示す半導体材料の実現や、これらの材料系を用いた次世代の量子効果を用いたスピントロニクスデバイスなどの開発においても、極めて重要な指針になると期待される。

4. 用語解説

注1 フェルミ準位

その準位を電子が占有している確率が 50%になるエネルギー。絶対零度では、フェルミ準位が電子の存在可能な最大のエネルギーとなる。

注2 バンド構造、価電子帯、禁制帯

結晶中では結晶格子のイオン殻による周期的な電場によって、電子のとり得るエネルギーがいくつかのエネルギー領域に制限される。このそれぞれの領域をエネルギーバンドと呼び、これらをバンド構造と呼ぶ。半導体においては、電子が存在することのできないエネルギー領域である禁制帯が存在する。それを挟んでエネルギーの低い方に価電子帯、高い方に伝導帯が存在する。

注3 (電子)スピン

電子が本来持っている自転のような性質。スピンを持つことで電子は各運動量と磁気モーメントを持つ小さな電磁石となっている。電子スピンは物質の磁性の源であり、スピンの状態には上向き(up spin)と下向き(down spin)という二つの状態がある。

注4 スピントロニクス

電荷とスピンの自由度を用いることによって発現する、電氣的、磁氣的、光学的な現

象を応用する新技術。現在、トンネル磁気抵抗効果 (TMR) 素子を集積化した不揮発磁気メモリー、不揮発性および再構成可能な論理回路、半導体中のスピンの応用、スピンを利用した量子計算や量子情報処理技術などに関心が集まっている。

注5 強磁性半導体

半導体中に磁性を持つ不純物原子 (Fe, Co, Mn など) を添加 (ドーピング) した物質。半導体と磁性体の特性が互いに関連した特異な性質を持つ。半導体をベースとしたスピントロニクス材料の候補として重要である。強磁性半導体は、半導体でありながら強磁性 (磁石の性質) を示すため、半導体デバイスに新たな機能をもたらす材料として期待されている。

注6 不純物バンド

異種物質が高い濃度で添加されることによって、新たに形成される電子が存在可能なエネルギー領域 (バンド) のこと。GaAs に Mn をドーピングする場合、GaAs の禁制帯中に不純物バンドが形成されると考えられている。

注7 分子線エピタキシー法

超高真空において、材料が入った坩堝を加熱することにより原子または分子をゆっくり基板の上に降らせて積層させ、単結晶の薄膜を成長させる結晶成長方法。1原子層または1分子層単位の膜厚制御性があり、さまざまな薄膜の作製に使われている。

注8 空乏層、ショットキー障壁

半導体の表面においては、金属を半導体表面に接触した界面にできる欠陥のためフェルミ準位が禁制帯中のほぼ中央にピン止めされるという現象が起こる。これによって、図2(b)のように半導体表面付近では価電子帯の上端のエネルギー (E_V) および伝導帯下端のエネルギーに曲がりが生じ、キャリア (正孔、電子) がいない領域が存在する。このようなキャリアのいない領域を空乏層という。また、金属/半導体界面におけるバンドの曲がりによって生じる障壁をショットキー障壁という。

注9 共鳴トンネル効果

数 nm 程度の二層の絶縁層 (ポテンシャル障壁) で挟まれた領域 (量子井戸) では、電子の波としての性質が顕著にあらわる。電子波は定在波となるため、電子のエネルギーは離散化 (量子化) され、共鳴準位が形成される。このような構造に電圧を印加すると、電極の電子のエネルギーと共鳴準位が一致したところのみで大きな電流が流れる。この現象のことを共鳴トンネル効果という。

注10 スピン分裂

電子のスピンに依存したエネルギーの分裂のこと。

5. 発表雑誌・論文名・著者名

英国科学誌 Nature Physics (2011年2月6日 Online) に掲載予定
Shinobu Ohya, Kenta Takata and Masaaki Tanaka.

“Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs”
Nature Physics, published online on 6 February, 2011. (DOI 10.1038/NPHYS1905)

6. 著者所属

大矢 忍 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 准教授
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

高田 健太 (卒業論文研究時) 東京大学工学部電子情報工学科
(現在) 東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻 修士課程
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

田中 雅明 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

7. 詳細な内容のお問い合わせ先

田中 雅明
東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 (教授)