

## 研究室訪問記 2015年度 一般研究助成 新材料

訪問日 2016年10月19日

東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 工学部電気電子工学科

田中 雅明 教授 スピントロニクス学術連携研究教育センター長

研究題名：超低消費電力デバイスのためのスピントロニクス材料の研究開発

### 東京大学・田中雅明先生を訪ねて

当日は研究内容の概要をまとめた資料と、今年出版された中から2つの論文-Applied Physics Letters(APL)と Nature Communications – を用意していただき、助成研究と関連が深い研究内容をご説明いただきました。前者の論文

(<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/108/19/10.1063/1.49486>)は、室温の強磁性体半導体に成功した内容で、APL 誌(2016年5月9日号)の表紙を飾り、American Institute of Physics(AIP)のニュース(<https://publishing.aip.org/publishing/journal-highlights/best-both-worlds>)にもなったとのこと。後者は、半導体(GaAs)に磁性不純物(Mn)を添加し不純物の添加量を増やして半導体を強磁性にすると価電子帯のコヒーレンスが回復するという、半導体物理学の常識では考えられない現象を発見したという論文です(Nature Communications, Published online on 28 June 2016, <http://www.nature.com/articles/ncomms12013>)。当日は研究の動機から、材料開発、デバイスの構造、作製、評価、論理回路、スピン物性とバンドエンジニアリングの融合、量子効果と波動関数など、幅広く、ライフワークとされている半導体スピントロニクスの現状と将来像をお聞きました。ここにはその一部しか紹介できないことをお許しください。

先生は、磁性と半導体の両方の機能を持つ材料を開発して、超低消費電力で新しい機能を持つスピントロニクスデバイスの実現を目指した研究を行っています。電子は電荷だけでなくスピンを持っていますが、現在の半導体デバイスではスピンの磁石としての性質は全く使われておらず、研究はその両者の利点を組み合わせて新規材料とデバイスを作ることです。具体的にはスピンの機能を半導体に取り入れることで、「不揮発性」、「低消費電力」、「再構成可能性」、「情報処理の柔軟性」、「非相反性」という、従来の半導体デバイスには持ち得ない新しい機能を持つ材料、デバイス、ナノ構造を作製することです。そのために、半導体デバイスに磁性元素や強磁性体を取り込み、かつ、量子サイズ効果、トンネル効果などの半導体バンドエンジニアリングを実現する新しいスピン機能半導体材料を作る必要があります。更にそれらの材料において、電荷とともにスピン輸送やスピン状態を制御してデバイスに応用します。電源を切っても状態が変わらない強磁性体を使うことで不揮発性のメモリや不揮発性の論理回路を実現でき、待機電力を大幅に削減できます。再構成可能なデバイスとは、一つの回路で複数の機能を実現でき、機能を書き換えることができる、すなわち作り直さずに同じハードウェアで機能を書き換えることができるデバイスであり、これにより柔軟な情報処理ができることが期待されます。

半導体と磁性やスピンの機能を合わせ持つ材料は、分子線エピタキシーという結晶成長法によって作製することができます。代表的な材料としては、半導体に磁性元素を添加して強磁性にする強磁性半導体です。1990年代半ばから研究しているのは、半導体レーザとか高速のトランジスタに使われているⅢ-V族半導体 GaAs に磁性元素 Mn を添加した混晶半導体 GaMnAs です。GaAs に Mn を数%程度添加することで、元の閃亜鉛鉱型・結晶構造を保ったままで GaMnAs という混晶で p 型の半導体になり、強磁性になることが知られています。結晶構造を壊さずに 10%~21%と大量の Mn を添加することに成功し、これによりキュリー温度(強磁性転移温度)を、従来の 100K 程度以下から

200K 程度と大幅に上げることができます。これだけ多くの異種元素を入れますので、結晶構造こそ維持していますが、移動度が落ちたり、n 型ができなくなったりします。強磁性発現のメカニズムですが、スピンを持つ Mn が電気伝導を担う正孔キャリアの供給源にもなり、スピンを持つキャリアが結晶内を自由に移動することで、Mn のスピンが揃えられて強磁性になります。もう一つの材料系は Si、Ge などの IV 族半導体ですが、Ge に Fe を添加すると、p 型の IV 族強磁性混晶半導体 GeFe になることを約 10 年前に世界で最初の実証し、以来この研究を継続しています。当初は Mn を Ge に添加してみましたが、Mn は均一に分布せず、Mn 濃度の濃い筒状のナノ構造（ナノカラム構造）ができ、均一な混晶の強磁性半導体にはなりません。GeFe の場合には比較的均一な混晶で強磁性半導体になり、Fe 濃度を 0~20% 位まで連続的に変えることができます。面白いことに、結晶全体では 210K 位と比較的高温まで強磁性ですが、局所的に室温(300K)で強磁性になる領域が存在することが最近分かりました。これを結晶全体に広げることができれば、室温で強磁性の IV 族半導体が得られます。この材料を用いて、不揮発性メモリの基本原理であるトンネル磁気抵抗効果(TMR)を示すデバイスを作ることに最近成功したそうです(<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.9.123001>)。IV 族強磁性半導体は、現在集積回路で使われている Si-CMOS 技術と整合性がよいので、有望と考えています。更にこれまで、III-V 族および IV 族の強磁性半導体では p 型しかできませんでした。初めて n 型の強磁性半導体を実現しました。これが狭いバンドギャップ半導体をもつ InAs に Fe を添加して作製した電子誘起強磁性半導体 InFeAs です。また、これも最近の成果ですが、更に別の狭バンドギャップ半導体 GaSb は Fe と非常に相性が良く、今のところ結晶構造を保ったまま 25% 位まで Fe を添加することができます。それでやっと室温以上のキュリー温度を実現しました。これが III-V 族で最初の室温強磁性半導体です。InFeAs のキュリー温度は 100K 程度ですが、まだ改善の余地がかなりありそうです。GaFeSb の正孔濃度は  $10^{19} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$  位ですが、InFeAs の電子濃度は  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  程度と低く、一桁ほど電子濃度を増やせばキュリー温度を 350K 程度にすることができる可能性があるとのこと。

次にこのような材料を使って何に応用するかですが、目標とするデバイスの一つはスピントランジスタです。パソコンのハードディスクの磁気記録の読み出しに使われている巨大磁気抵抗(GMR)素子、トンネル磁気抵抗(TMR)素子は、非磁性体（前者が金属、後者が絶縁体）薄膜を強磁性体薄膜で挟んだ構造です。2 つの強磁性層の磁化が平行か反平行かで大きく抵抗が変化し、そのときの電気信号の変化を読み出しに使っています。このような 2 端子の磁気抵抗素子にもう一つ端子を付けて 3 端子素子にして上手く動かすとトランジスタになり、この 3 番目の電極による電流制御だけではなく、磁化でも電気的出力を制御し、自由度を増やすことができます。すなわち、平行磁化か反平行磁化かで出力を大きく変えることができる、いわば可変出力トランジスタという世の中にない新しい概念です。磁気抵抗と同じ原理ですが同時にトランジスタとして動作させるデバイスです。磁化を平行か反平行かで出力をデジタル的に変えられますし、磁化を回転させればアナログ的に変えることもできます。トランジスタだけで一個の不揮発性のメモリにもなり、かつその機能を磁化の向きで変えられる再構成可能な論理回路としても働き、高密度・高速で動作する集積回路になります。

次はスピントランジスタ構造の設計です。オーソドックスなのは MOS トランジスタ（金属-酸化物-半導体のゲート構造をもつ電界効果トランジスタ）のソースとドレインの電極を強磁性体にするということです。このデバイスは 2004 年に田中研究室が提案し、世界の半導体研究者らが作る ITRS Roadmap に掲載されていますが、まだきちんと動いておらず、特に、強磁性金属から半導体に効率よくスピン注入することが難しいという問題があります。そこで、スピントランジスタの要素を全部半導体にすれば高品質の積層構造ができると考え、強磁性半導体の研究に取り組んでいます。まず、今一番作りやすい強磁性半導体 GaMnAs を使って縦型のスピン MOSFET を作り原理の実証を行ったところ、磁気電流比が従来の 0.1% 程度から 60% と大幅に向上できました

(<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/107/24/10.1063/1.4937437>)。次の課題は、磁化の反転を磁場ではなく、電流、電圧で制御することです。更に量子構造を使って性能を高める研究として、より大きな磁気抵抗比が期待できる量子井戸構造を持つ縦型スピントランジスタの原理も 16 年前に特許にしたそうですが、まだ実現できておらず、早すぎた出願だったようです。その原理ですが、量子準位を使うと離散的になっているので、ハーフメタル（スピン偏極率 100%の強磁性物質）でなくても完全にアップスピンだけ、ダウンスピンだけという準位ができます。それがエネルギー的に綺麗に分離しているので、磁化の向きによるトンネル電流の差を非常に大きくすることができます。

次は新しい機能につながる物理の話です。前述の GaAs に Mn を添加した GaMnAs の場合、Mn 濃度が 0.03% ではまだ常磁性ですが、Mn 不純物の添加により価電子帯の正孔の波動関数が乱れ、移動度が低下しコヒーレンスが悪くなり、0.55% で最も乱れます。これは不純物を添加した半導体では普通に起こる現象ですが、更に 0.8% 程度 Mn を添加すると強磁性になり、その途端に、コヒーレンスが回復して、Mn 濃度を更に増やすと更にコヒーレンスが增大します。これは、普通の半導体の常識では考えられないことです。これを独自に開発した共鳴トンネル分光法（量子井戸を作って共鳴準位をトンネル電流で見る方法）で明らかにしました。共鳴準位が明瞭に見えれば、量子井戸の準位がきちんとできており、コヒーレンスが良くなることとなります。Mn を添加して常磁性の状態では共鳴準位は見えなくなり、Mn 濃度が 0.9% を超えるとまた明瞭に見えはじめます。強磁性状態の GaMnAs では正孔のコヒーレンスが 40nm と非常に長いことから、波動関数を使ったエンジニアリングができ量子効果デバイスができる可能性があります(2016 年 6 月に Nature Communications に発表)。

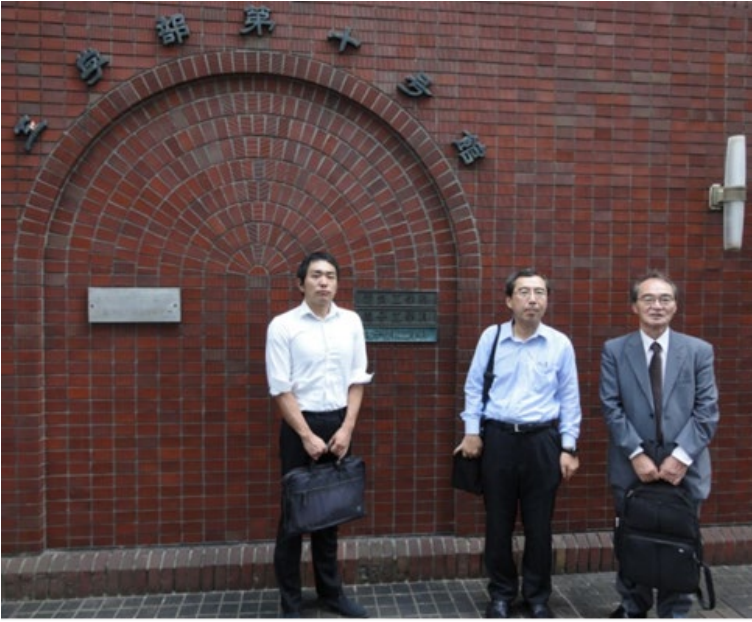
波動関数工学を用いた電圧による磁性の制御の研究も行っています

(<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.92.161201>)。前述の n 型の強磁性半導体材料 InFeAs を使い、InAs と InFeAs と InAs の 3 層からなる量子井戸をチャンネルとした電界効果トランジスタ(FET)デバイスを作製しました。ゲート電圧がゼロの時には、量子井戸中に閉じ込められている電子の波動関数と InFeAs との重なりが大きく、キュリー温度が高く強磁性になります。ゲート電圧を + あるいは - に掛けますと、波動関数がずれ、重なりは小さくなり、キュリー温度が下がり、まだ常磁性にはなっていませんが、強磁性が弱くなります。これは、殆ど電力を消費しない電圧で磁性を変えられることを意味しています。従来の研究でゲート電圧でキャリア濃度が変わり、磁性が変わることが報告されていますが、今回キャリア濃度は殆ど変わらずに、波動関数が変わることで磁性を変えます。波動関数を動かす距離が 10nm とわずかですので、ピコ秒以下と非常に速く動かすことができ、キャリア濃度を変えるのに比べて、一万分の一位の低消費電力で動作可能です。

最後に磁化の向きで出力特性が異なるスピントランジスタができると、何ができるかということについて将来像を紹介されました。例えば、p 型と n 型の MOSFET からなる CMOS インバータと同じ構造、回路で、その内の一つを n 型のスピン MOSFET にします。入力を A と B のスプリットゲートとして、フローティングゲートを設け、この 2 入力に対して出力をみると、磁化の向きで出力が単に反転するだけでなく、平行磁化の時は NOR、反平行磁化の時は NAND になります。この二つのトランジスタだけで NOR、NAND の 2 つの機能をもつ電子回路ができます。これを普通の CMOS で実現しようとするとも 8 個以上のトランジスタが必要なのに対し 2 個ででき、しかも不揮発性です。これをベースにして、殆どあらゆる論理回路を設計することができます。例えば論理回路で使う 2 入力対称関数（AND、OR、XOR、NAND、NOR、XNOR、“0”、“1”の 8 つの関数）を実現しようとする、普通ですと 8 通りの回路を作る必要があり、その切替の回路を入れると 40 個位のトランジスタが必要です。それをスピン MOSFET にすると、10 個のトランジスタ（内 4 個がスピン MOSFET）で実現でき、切り替えも不揮発的にでき、素子数が大幅に減り低消費電力になります。この考え方をベースに論理回路を再構成可能にすることができます。

日本が得意とする磁性材料技術と半導体技術を融合させて、低迷している日本のエレクトロニクス産業を再生させたいという思いに共感した訪問でした。

(2016年10月19日、技術参与・飯塚)



中央が田中先生(工学部第10号館前にて)

**半導体+磁性・スピンの機能をもつ材料** 本グループで  
作製・研究実績

<p>III-V族強磁性混晶半導体ヘテロ構造</p> <p><b>p-type GaMnAs (Mn21%)</b></p> <p>プロトタイプ強磁性半導体 様々な量子物性デバイス研究 Ohya, Tanaka, Nat Phys.2011, APR2014, Nat Comm.2016</p>	<p>IV族強磁性混晶半導体ヘテロ構造</p> <p><b>p-type GeFe (Fe9.5%)</b></p> <p>室温強磁性ドメインの存在を発見 Sci Rep 2016 CMOS技術と整合性の良いIV族で初めてトンネル磁気抵抗効果(TMR)を実現 Wakabayashi, Ohya, Tanaka, PRB2014, JAP2014, SR2016</p>	<p>(Fe添加)狭ギャップ強磁性半導体とヘテロ構造</p> <p><b>(In<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)As n-type</b></p> <p>(In,Fe)As: n型キャリア誘起強磁性、波動関数工学による電氣的磁性制御 (Ga,Fe)Sb: p型、室温以上の高いキュリー温度を実現 (T<sub>c</sub>=340K) 9 nm Hai, Anh, Tanaka, APL2012, APR2014(invited), PRB(R)2015, PRB2015, APL2016(注目論文)</p>
<p>酸化物系スピン機能ヘテロ構造材料</p> <p>高品質ヘテロ構造のMBE成長に成功、TMRを実現 Ohya, Tanaka, ICCGE-18 2016</p>	<p><b>La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> 5 nm</b></p> <p>原子ステップ</p> <p>2x2 μm</p>	<p>強磁性金属/酸化膜/Si</p> <p>シリコン(Si)へのスピン注入と検出</p> <p>Sato, Nakane, Tanaka, APL2015</p>

*Spin-MOSFET*を用いた再構成可能な論理回路(例1)

スピントランジスタでは、出力特性 ( $I_D, g_m$ ) が平行磁化か反平行磁化かに依存し、変えることができる = 出力可変トランジスタ

縦型

横型

Current  $I_D$

平行磁化 (P) large  $g_m$

Current  $I_D$

反平行磁化 (AP) small  $g_m$

**NAND/NOR gate**

vCMOS

AO p-MOSFET

BO n-type spin MOSFET (P / AP magn.)

		$V_{out}$	
A	B	P	AP
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	0

NOR    NAND

T. Matsuno, S. Sugahara, and M. Tanaka, JJAP. 43, 6032 (2004).  
M. Tanaka and S. Sugahara (invited paper), IEEE TED 54, 961 (2007).