

# 「半導体スピンエレクトロニクスに向けた複合エピタキシャルヘテロ構造の創製」

東京大学大学院工学系研究科 電子工学専攻 助教授 田中雅明

受賞者は、III-V族化合物半導体をベースとしたスピン機能をもつ複合ヘテロ構造や多層膜のエピタキシャル成長技術を開発し、大きなスピン依存伝導（スピンバルブ効果、トンネル磁気抵抗効果）や大きな磁気光学効果が、半導体をベースとした複合ヘテロ構造で実現されることを示し、スピンエレクトロニクスの構築へ向けて大きく貢献している。強磁性金属/半導体、磁性半導体/非磁性半導体といった良質の単結晶性、原子レベルでの界面急峻性と膜厚制御性、熱力学的安定性をあわせ持つ複合エピタキシャルヘテロ構造を形成する技術を確認し、その光・電子・磁気（スピン）物性を明らかにし、エレクトロニクス・デバイス応用の可能性と指針を示した。

## （1）強磁性金属/半導体ヘテロ構造のエピタキシャル成長とそのスピン依存伝導、デバイス応用

Mnを含む2元の金属間化合物(Mn-III, Mn-V, III=Ga, Al, V=As)の強磁性体としての性質とIII-V族化合物半導体との整合性の良さに着目し、強磁性金属間化合物/半導体ヘテロ構造を作製した(論文(1)-(5))。分子線エピタキシー(MBE)法における結晶成長機構の特質を深く考察し、テンプレート法という独特の手法を開発することによって、従来不可能とされていた異種物質(結晶構造、格子定数、化学結合、電子構造がいずれも異なる磁性金属と半導体)から成る種々の複合ヘテロ構造のエピタキシャル成長に成功した。最も顕著な例は、六方晶NiAs型結晶構造をもつ強磁性金属MnAsとGaAsから成るヘテロ構造である(論文(3)-(5))。成長時にテンプレート法を用いることにより、半導体基板上で強磁性薄膜・多層膜結晶の方位や磁気異方性など磁気的特性を制御できることを示した。GaAsおよびSi半導体基板上において、強磁性金属単結晶薄膜を利用した不揮発性メモリの原理的な動作を示した。さらに最近では、この手法を発展させることによって、強磁性金属(MnAs)/半導体(GaAs, AlAs)/強磁性金属(MnAs)から成る単結晶の多層ヘテロ構造を成長することにも成功し(論文(7))、スピンバルブ効果(いわゆるGMRと同様の磁気抵抗効果)やトンネル磁気抵抗効果(TMR)を室温で観測した。このように半導体ベースの複合ヘテロ構造でスピン依存伝導現象を発現させたことにより、スピンエレクトロニクス伝導デバイスへの道を開いた。

## （2）III-V族ベースの磁性半導体およびその量子ヘテロ構造

新しいIII-V族ベースの磁性半導体GaMnAsを含む超格子構造、量子ヘテロ構造の作製に成功し、III-V族磁性半導体としては初めて量子効果を明瞭に観測した(論文(6)(8)およびT. Hayashi, M. Tanaka et al. Appl. Phys. Lett. 71, 1825 (1997))。また、新しいIII-V族ベースの磁性半導体GaMnAsの大きな磁気光学効果を見出し、そのバンド構造を明らかにした(論文(6)およびK. Ando, M. Tanaka et al. J. Appl. Phys. 83, 6548 (1998))。さらに、GaMnAs強磁性半導体をベースとした強磁性トンネル接合素子を作製し、そのトンネル磁気抵抗効果(TMR)を明瞭に観測(半導体では初めてのTMR観測)するとともに、最近ではそのTMR比が最大75%という極めて大きな値を示すことを見出し、強磁性半導体ヘテロ構造が顕著なスピン依存トンネル現象を示すことを明らかにした(論文(10))。

## （3）GaAs:MnAsナノグラニューラー構造を用いた半導体ベース磁気光学結晶の開発と磁気光学デバイスへの応用

III-V族ベースの磁性半導体を高温でアニールすることにより、GaAs:MnAsナノグラニューラー構造を形成し、それがIII-V族ヘテロ構造と極めて整合性が良いこと、室温で極めて大きな磁気光学効果を示すこと(単位膜厚当たりのファラデー回転角が現在光アイソレータ等磁気光学素子で使われているYIGやCdMnTeのバルク結晶の10倍以上)を明らかにした。さらに、GaAs:MnAsナノグラニューラー構造を用いた半導体ベース磁気光学結晶を作製し、所望の波長で室温において大きな磁気光学効果を得ることに成功し、III-V族化合物半導体をベースとした集積化型磁気光学デバイス応用への指針を示した(以上論文(9))。

（4）上記の研究業績は国際的にも評価され、1994年以降、20回以上の国際会議・国際シンポジウム招待講演を行った(2001年10月現在)。

1. M. Tanaka, J.P. Harbison, T. Sands, J. De Boeck, B. Philips, T. L. Cheeks and V.G. Keramidias, Appl. Phys. Lett. 62, 1565 (1993).
2. M. Tanaka, J.P. Harbison, T. Sands, B. Philips, T. L. Cheeks, J. De Boeck, L.T. Florez, V.G. Keramidias, Appl. Phys. Lett. 63, 696 (1993).
3. M. Tanaka, J.P. Harbison, T. Sands, T.L. Cheeks, G.M. Rothberg, J. Vac. Science & Technology B12, 1091 (1994).
4. M. Tanaka, J.P. Harbison and G.M. Rothberg, Appl. Phys. Lett. 65, 1964 (1994).
5. M. Tanaka, J. Materials Science & Engineering B31, 117 (1995).
6. M. Tanaka, J. Vac. Sci. & Technol. B16, 2267 (1998).
7. M. Tanaka, K. Saito, and T. Nishinaga, Appl. Phys. Lett. 74, 64 (1999).
8. M. Tanaka, H. Shimizu, T. Hayashi, H. Shimada, and K. Ando, J Vac. Sci. & Technol. A18, 1247 (2000).
9. M. Tanaka, H. Shimizu, and M. Miyamura, J. Cryst. Growth 227/228, 839 (2001).
10. M. Tanaka and Y. Higo, Phys. Rev. Lett. 87, 026602 (2001).