

「強磁性金属/半導体ハイブリッド構造作製技術の開発」

－ 磁気抵抗スイッチ効果の発見 －

産業技術総合研究所 先進ナノ構造グループ長 秋永 広幸

エレクトロニクスという技術体系は、電子の持っている2つの自由度である電荷とスピンのうち、電荷を操作するための技術です。例えば、この電荷の蓄積、放電、またその流れの開け閉めを行うことによって、半導体エレクトロニクス素子の動作が設計されています。それに対し、もう一方の自由度であるスピンの同じ方向に並んだ場合には巨視的な磁化が現れ、いわゆる磁石となります。一般に磁石は、強磁性体と呼ばれ、金属的な特性を示す物質です。大きな磁場をかけたり温度を上げたりしない限りNS極の向きが変わらないことから、磁気記録媒体¹などとして、私たちの生活を豊かにする上で欠かせないものとなっています。それでは、これらの半導体と強磁性体金属を組み合わせることによって、何が期待できるのでしょうか？本稿では、半導体エレクトロニクス材料であるIII-V族半導体GaAsと強磁性金属MnAs及びMnSbとのハイブリッド構造を作製する技術の開発ストーリーをご紹介します、その展望をお話したいと思います。

1. 研究事始め

強磁性金属と半導体からなるヘテロ構造の研究は、半導体デバイスに新しい機能を加えることを目指して1980年代後半に米国で開始されました^[Ref.1,2]。昨今、スピンエレクトロニクスと呼ばれるに至る新しいエレクトロニクス技術の萌芽でしたが、日本では、当初この新しい分野への関心は高くありませんでした。私は、1990年代初め、産業技術融合領域研究所（現、産業技術総合研究所）において、分子線エピタキシー技術を活かした強磁性金属/半導体ハイブリッド構造材料の研究に着手しましたが、競争相手が少ないものの、相談する人も参考にする資料・文献も少なく、まさに手探りの状態でした。後に、米国では、GaAsと、その格子定数がGaAsのそれに近いFeやMnGaといった強磁性体とのヘテロ成長が行われていたことを知ったのですが、そのような先入観がなかったため、強磁性体としての性質に特徴のあるMn化合物強磁性体金属を、GaAs基板上に成長する物質として選択しました^[Ref.3]。

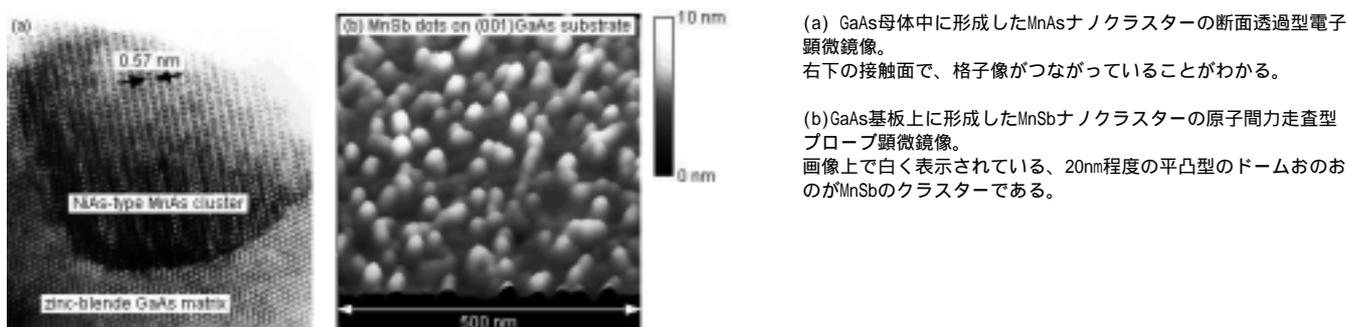
2. MnAs:GaAsハイブリッド構造

強磁性体金属を半導体基板上に作製する技術の開発は、上記のように米国が先行しました。しかしながら、真にハイブリッド化を目指すには、半導体内に強磁性体金属を埋め込むことが出来なければなりません。私は、頃を同じくして開発が進んでいた強磁性半導体（Ga,Mn）Asの成長技術と、低温成長したGaAsを熱アニールすることによりAsクラスターを析出させて高抵抗薄膜を作製する技術とにヒントを得て、GaAs母体中にMnAsのナノクラスターを析出分散させることに成功しました。MnAsはNiAs型と呼ばれる六方晶の結晶構造を持ち、GaAsの結晶構造（立方晶の閃亜鉛鋅型）とは全く異なるのですが、驚くべきことに、ある面をエピタキシャル成長の基準として析出することがわかりました（図1-a）。しかしながら残念なことに、ベルギーのグループに学術論文の発表で先を越されてしまいました。同じことを考えている人間が世界のどこかにはいるのだと、驚いたものです。その後、このハイブリッド系で磁気抵抗効果や大きな磁気光学効果が発現することを見だし、学術論文による発表と特許化を行いました^[Ref.4]。

3. MnSb:GaAsハイブリッド構造

MnSbは大きな磁気光学効果を示す物質であり、GaAsと組み合わせて新規な磁気光学素子を開発することを目標にそのエピタキシャル成長技術の開発を始めました^[Ref.3]。そして、エピタキシャル成長の開発が一段落した1998年初めに一人の大学院生を指導することとなり、分子線エピタキシー装置の操作に習熟してもらうため、このMnSbをGaAs基板上にナノクラスターとして作製するを行いました（図1-b）。まさにただの練習課題であったのですが、これが、後に磁気抵抗スイッチ効果の発見へと結びつきます。

図1 強磁性金属/半導体ハイブリッド構造。



得られたMnSb:GaAsハイブリッド構造の電気抵抗を測定したところ、磁場の印加によって抵抗が何桁も変化する現象を発見することが出来ました²。練習課題であったこともあり、最も安価に手に入る半絶縁性のGaAsを基板として用いたことが結果的には幸いしていました。後に明らかになったことですが、この現象は金属のナノクラスターとその存在による電子の局在が半導体の表面伝導に影響を与えることに起因しており、絶縁性の高い基板の上でなければ観測されなかったものだからです。実験を進めた結果、このハイブリッド構造の面内の電流-電圧特性にはあるしきい値電圧以上において高抵抗状態から低抵抗状態へのスイッチがあり、磁場によってその転移が抑制されているということが明らかになり、私はこの効果を「磁気抵抗スイッチ効果」と名付けました^[Ref.5]。

4. 強磁性金属/半導体ハイブリッド構造に期待すること

現在、磁気抵抗スイッチ効果に関して、既存の半導体製造プロセスと互換性をより高くすることによって磁場センサーへと応用する研究を行っています。現在のハードディスクの読み取りヘッドには、磁場の有無によって抵抗が変化する磁性体金属多層膜からなる素子が用いられていますが、それらと比べてこのハイブリッド構造は1～2桁以上も大きな磁気抵抗変化を示します³。この応用研究が実を結べば、超高密度磁気記録を強力に推進する基盤技術となるでしょう。サッカーワールドカップ全試合をカード型のハードディスクに録画しておく、ということも夢ではなくなるかもしれません。強磁性体金属/半導体ハイブリッド構造は、強磁性体金属から半導体へスピン偏極した電子を注入する実験の舞台となるなど、現在ではスピンエレクトロニクス分野における最も熾烈な研究開発競争が行われている対象の一つとして注目を集めています。量子通信や量子計算などの実現へ向けた基礎的研究を展開するうえでも、重要な役割を担うことが期待されています。

補足説明

1 磁気記録媒体

磁気テープやハードディスクなどの、強磁性体の不揮発性を用いた記録媒体のこと。荒っぽい言い方をすると、これらの媒体においては、ナノメートル寸法の小さな永久磁石のNS極の向きに、情報の1と0を対応させて記録がなされている。この小さな永久磁石からの漏れ磁場を検出することでデータを読み出すのが、ハードディスクの原理である。

2 磁気抵抗変化について

磁場の印加により抵抗が上昇する正の磁気抵抗変化であった。例えば、100mT（ミリテスラ）の磁場を印加したときの抵抗値が、ゼロ磁場での抵抗値と比較して2桁以上も上昇する。

3 磁気抵抗効果素子

強磁性体金属で、非磁性金属あるいは絶縁体を挟んだ構造が、既存の読み取りヘッドの研究開発対象となっている。この構造では、スピン偏極した電子の電気的抵抗が強磁性体金属の磁化の向きにより変化するので、磁場の有無を電気抵抗の変化として読みとることが出来る。負の磁気抵抗変化であることが多く、磁場の印加による抵抗の減少分は高々50%程度である。磁気抵抗スイッチ効果はこのように桁違いに大きな磁気抵抗変化を示すが、そのデバイス応用には、プロセス技術の改善などの課題がある。また、その起源には依然として不明な点が多く、半導体表面における非線形磁気輸送現象という新しい学術的研究対象を提供する可能性が高い。

参考文献

1. G. Prinz, "Hybrid Ferromagnetic-Semiconductor Structures", Science, vol. 250, pp. 1092-1097, 1990.
2. H. Akinaga and H. Ohno, "Semiconductor Spintronics", IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 1, no. 1, pp.19-31, 2002.
3. H. Akinaga, K. Tanaka, K. Ando and T. Katayama, "Fabrication and magneto-optical properties of epitaxial ferromagnetic MnSb thin films grown on GaAs and sapphire", Journal of Crystal Growth, vol. 150, pp. 1144-1149, 1995.
4. 秋永広幸、朝光敦、郭立信、「III-V族半導体を母体としたグラニューラー型磁気抵抗材料」、日本国特許第2945924号。
秋永広幸、小野寺晃一、「半導体磁気光学材料」、日本国特許第2879433号。
5. H. Akinaga, M. Mizuguchi, K. Ono and M. Oshima, "Room-temperature thousandfold magnetoresistance change in MnSb granular films: Magnetoresistive switch effect", Applied Physics Letters, vol. 76, no. 3, pp. 357-359, 2000.