



研究ノート

室温透明強磁性半導体の創製と半導体スピントロニクス

朝日 一*

Synthesis of room-temperature transparent ferromagnetic-semiconductors and semiconductor-spintronics

Key Words : GaN-based magnetic semiconductor, GaCrN, ferromagnetism, photoluminescence, molecular beam epitaxy

1. はじめに

半導体と磁性体は情報通信(IT)技術の基本材料として重要な役割を果たしている。これまで、この二つの材料は個別に異分野に属する材料・デバイスとして別々に研究・開発されてきた。21世紀の高度情報化社会を支える情報通信処理デバイス・システムをより高速化・大容量化・省エネルギー化をするには、これらの融合は必然となっている。そのようなものとして、磁性半導体は注目を集めている。ここでは、従来からの電荷(電子)、光を制御する半導体デバイスに、もう一つの自由度であるスピン(磁性)を加えて制御し、電荷、光、スピンを複合制御する新機能デバイスを実現しようというものである。この分野は半導体スピントロニクスと呼ばれている、新しく起こってきた融合領域である。代表的なのは、磁性スピンを含んだIII-V族磁性半導体 GaMnAs, InMnAsである^[1,2]。InMnAs, GaMnAsでは、キャリア誘起強磁性が発見され、光あるいは電気で磁性を制御することが初めて可能となった^[3,4]。しかし、キャリア誘起磁性をはじめとする性質は、これまですべて低温で現われるものであった。実用上は、室温以上のキュリー温度を持つ室温強磁性体半導体が不可欠である。

Dietlらは平均場近似に基づくモデルによりGaNやZnOにMnをドーピングすることにより、室温におい

て強磁性の発現が可能であると予測した^[5]。阪大産研の吉田らのグループは、第一原理計算により、ワイドギャップ半導体(GaN, ZnO)に遷移金属(V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni)を高濃度にドーピングすることができれば、強磁性状態が安定になることを示し、GaNではCrが最も有望であると予測した^[6]。

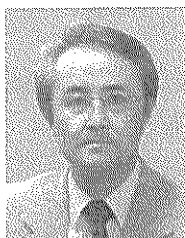
本論文では、重要なエレクトロニクス材料GaNにCrをドーピングした磁性半導体GaCrNの創製と新デバイス作製可能性について報告する。GaCrNは室温強磁性を示し、良好な磁気特性が得られた。そして、GaCrNのもう一つ重要な性質は、比較的強い発光特性を示すことである。従来の磁性半導体InMnAs, GaMnAsでは発光は得られていない。GaCrNは電荷、光、スピンを複合制御するスピントロニクス材料として大変有望である。

2. 新磁性半導体GaCrNの創製

GaCrNは、III族原料として固体Ga, V族原料としてECRプラズマ励起の窒素(N₂)ガス、遷移金属として固体Crを用いたECR-MBE法により成長した^[7]。GaCrN成長の際の基板温度は650-700℃、Gaセル温度は920℃(分子線強度 2.0×10^{-7} Torr)、N₂流量は1.5SCCM、そしてCrセル温度は845-990℃である。成長は、サファイア基板表面を800℃で15分間熱的クリーニングを行った後、GaN低温バッファ層を400℃で約2nm堆積し、成長温度まで基板を昇温することで再結晶化させた後に、15nmのGaNバッファ層を成長させ、その上にGaCrN(120-490nm)の成長を行った。成長したGaCrNは透明で表面は鏡面である。

3. GaCrNの結晶性及び磁気、光学特性

GaCrNの場合、約2%以下のCr濃度に対して相分離のない結晶が得られた。図1はCr濃度約2%の



* Hajime ASAHU
1948年2月生
1976年東京大学大学院工学研究科博士課程修了
現在、大阪大学・産業科学研究所、教授、工学博士、電子材料工学
TEL 06-6879-8405
FAX 06-6879-8409
E-Mail asahi@sanken.osaka-u.ac.jp

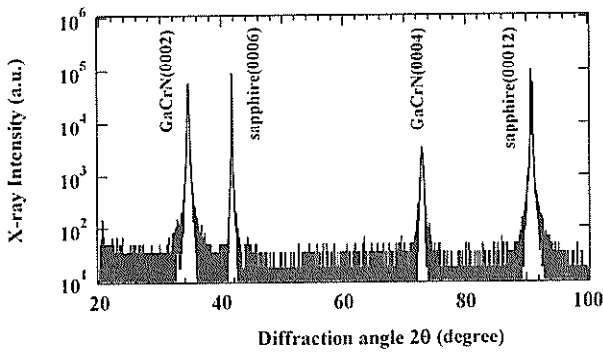


図1 サファイア基板上に成長したCr組成2%のGaCrN試料のX線回折パターン

GaCrNのX線回折パターンであり、GaCrN及びサファイア基板の回折ピークのみが観測されている。

この試料に対する磁化-磁場(M-H)曲線を図2に示す。磁化はSQUID(超伝導量子干渉計)を用いて測定した。7K, 300K両温度において、明瞭な磁化

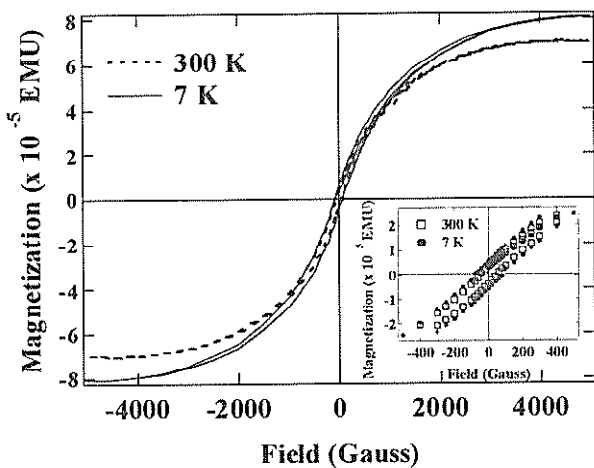


図2 Cr組成2%のGaCrNの磁化-磁場(M-H)曲線

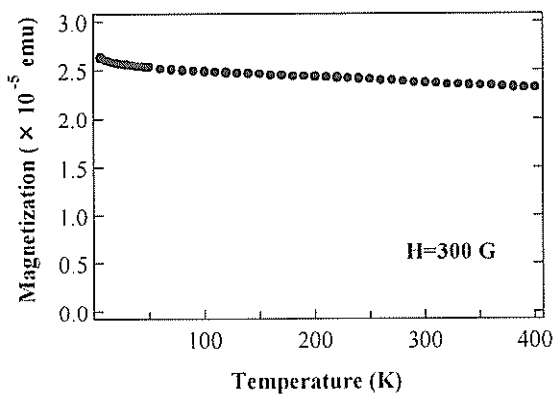


図3 Cr組成2%のGaCrNの磁化-温度(M-T)曲線

ヒステリシス(挿入図)と磁化の飽和が観測されている。GaCrNは低温でも高温でも、強磁性的に振舞うことが見出された。保磁力は90Oeである。Cr原子1個あたりの磁気モーメントは2.6である。図3の磁化-温度(M-T曲線)をみると、GaCrNのキュリー温度は400K以上であることが予測できる[7]。

InAs, GaAs ベースの磁性半導体 InMnAs, GaMnAsは相分離を抑制するためにInAs, GaAsの通常成長温度に比べかなり低温で成長されており、発光が観測されていない。しかし、GaNベースの磁性半導体は通常のGaN成長温度で成長を行うことができるため、室温でも比較的強いフォトルミネセンス(PL)発光が観測された。しかも、室温強磁性を示し、応用上非常に重要な意味を持つ。図4はGaCrNの100Kおよび300KでのPL発光スペクトルを示す。約3.3eVのピークはGaCrNによるものと判断されている。このように、GaCrNは室温強磁性で、伝導性を示し、発光特性を示し、電荷・光・スピンを複合制御した半導体スピントロニクス材料として魅力的な磁性半導体であることが明らかとなった。

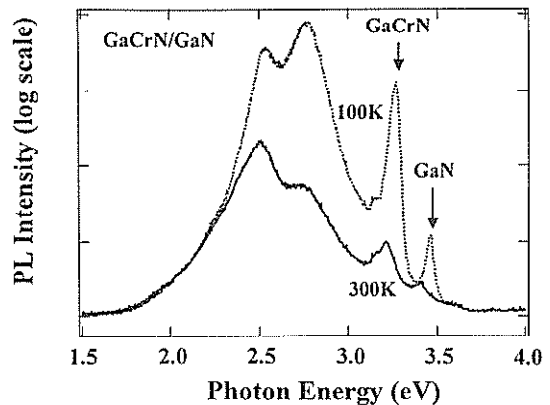


図4 100K および 300K における GaCrN の PL 発光スペクトル

最近、Ⅲ族原料に固体Ga、窒素源としてNH₃(アンモニア)ガス、そして遷移金属に固体Mnを用いたアンモニアMBE(分子線エピタキシー)法で成長したGaMnN磁性半導体において、キュリー温度が940Kであるとの報告があり注目されている[8]。しかし、GaMnNでは低温において、M-H曲線はヒステリシスを示すものの、強磁場領域での磁化の飽和が見られず、常磁性的成分の混在が観測されており、GaMnNでの強磁性の起因については今後の研究が

必要である。我々は同様な方法によりGaMnNを成長し、PL発光を観測している。

4. 期待される新機能デバイス

半導体と磁性体の融合、すなわち、電気・光・磁気(電荷・光・スピンの)一体化は新機能を有するデバイスの誕生が期待される。すでに、InMnAsをチャンネル層とする電界トランジスタ(FET)が作製されている^[9]。そこでは、印加電界の大きさを変えることによってキャリア密度を変化させ、強磁性転移温度、保持力などの磁性が制御できている。しかし、本研究のGaCrNは光励起による発光が観測されていることから、光デバイスにも向いている。GaCrNをレーザの活性層とすると、普通のレーザの直線偏光と違い、円偏光を発することが予測されることから、円偏光半導体レーザの実現が期待される。

5. おわりに

新しい磁性半導体GaCrNをECR-MBE法でサファイア基板上に初めて成長した。X線回折と磁化測定から、GaCrNは400K以上のキュリー温度を持つ透明室温強磁性体であることがわかった。更に、GaCrNからの発光も見られ、この材料は電荷・光・スピンを複合制御した半導体スピントロニクス材料として大いに期待される。

これに関する研究は現在進行中である。ここで紹介した研究は周逸凱助手ならびに研究室の大学院生との共同研究によるものである。

参 考 文 献

- [1] H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmuller, L.L. Chang and L. Esaki: *Pys. Rev. Lett.* 63, 1849(1989).
- [2] H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Kasumoto and Y. Iye: *Appl. Phys. Lett.* 69, 363(1996).
- [3] S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi and H. Munekata: *Phys. Rev. Lett.* 78, 4617(1997).
- [4] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno and K. Ohtani: *Nature* 408, 944(2000).
- [5] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert and D. Ferrand: *Science* 287, 1019(2000). K. Sato and H. Katayama-Yoshida: *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L485(2001).
- [6] K. Sato and H. Katayama-Yoshida: *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L485(2001).
- [7] M. Hashimoto, Y.K. Zhou, M. Kanamura and H. Asahi: *Solid State Comm.* 122, 37(2002).
- [8] S. Sonoda, S. Shimizu, T. Sasaki, Y. Yamamoto and H. Hori: *J. Crystal Growth* (印刷中).
- [9] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno and K. Ohtani: *Nature* 408, 944(2000).

