

希薄磁性半導体 $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ の共鳴軟X線発光

竹内 智之^{a,b}, 原田 慈久^b, 徳島 高^b, 高田 恭孝^b, 池永 英司^c, 小林 啓介^c, 辛 埴^{b,d},
金正鎮^e, 牧野 久雄^f, 八百 隆文^{ef}

^a 東京理科大学理学研究科, ^b RIKEN/SPring-8, ^c 高輝度光科学研究センター, ^d 東京大学物性研究所, ^e 東北大学学際科学国際高等研究センター, ^f 東北大学金属材料研究所

背景: III-V 族半導体に磁性原子をドーブした希薄磁性半導体(DMS)は、その磁性発現の機構自体が解明されておらず、固体物理の一つのテーマであるというだけでなく、磁気応用材料(スピントロニクス材料)として期待されている系であり、その電子状態を解明する意義は大きい。

しかしながら、III-V 族 DMS は MBE(Molecular Beam Epitaxy)法により製膜される薄膜であるため、測定時において壁開、破断等による清浄表面を得ることが難しい。また、イオンスパッタ法による試料表面のクリーニングも半導体表面の高い活性による表面再構成が起こり、電子状態の変化を及ぼす恐れがあるため、使用することができない。以上の理由により、これまで固体物性において威力を発揮してきた真空紫外～軟X線領域の光電子分光は、その表面感性により、DMS の電子状態を測定することは難しいと考えられる。

一方、軟 X 線発光分光法 (SXES)は軟 X 線により励起された際に放出される軟 X 線を検知する測定手法であり、脱出深度が深くバルク敏感であることから、表面処理をする必要がない。また、軟X線発光分光は元素選択的であるため、価電子帯の特定の元素に由来する部分状態密度のみを得ることができ、III-V 族 DMS の磁性発現機構に大きく貢献できると考えられる。

本研究では、III-V 族 DMS の中でも室温付近で強磁性転移温度を示すことで注目されている $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ について、価電子帯の N2p 部分状態密度を測定するため軟 X 線発光分光を、伝導帯の N 2p 部分状態密度を測定するために軟X線吸収分光をそれぞれN 1s 励起において行った。

実験: 実験は BL27SU に設置されている高分解能軟X線発光分光装置を用いて、東北大学の共同研究者等によって MBE 法で成膜された GaN,及び $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ ($x=0.01, 0.06, 0.10$) 薄膜について行った。測定は室温で行い、軟 X 線発光測定の励起エネルギーはN 1s 吸収端領域である 400 eV 付近を使用した。測定時の分解能は $E/\Delta E=1000$ に設定した。

結果、および、考察: 図 1 に $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ ($x=0, 0.01, 0.06, 0.1$) の N 1s 励起による軟X線吸収スペクトルを示す。得られた軟 X 線吸収スペクトルは伝導帯の N 2p 部分状態密度を反映している。スペクトルの基本的な形状は過去に報告された GaN の吸収スペクトル[1]とほぼ同じであった。しかしながら、Cr ドープした試料では Cr の濃度に依存して増大する構造（縦線 A）が吸収端の立ち上がり観測された。この構造は、N 2p 軌道と Cr 3d 軌道が混成したことにより、伝導帯の

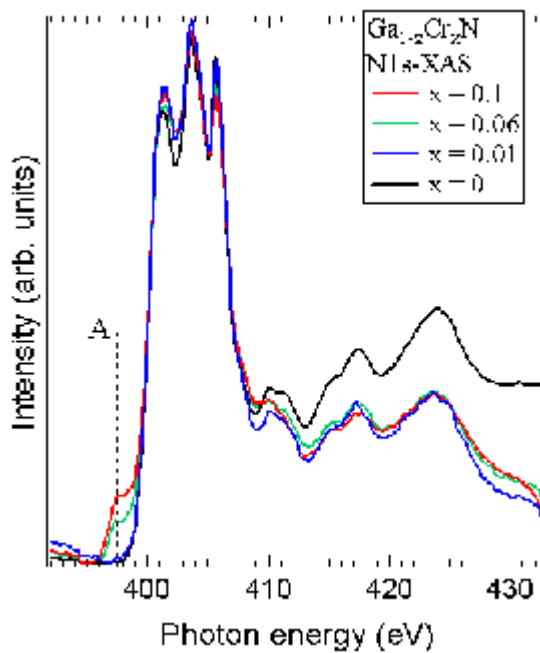


図 1: $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ ($x = 0, 0.01, 0.06, 0.1$) の N $1s \rightarrow 2p$ 軟 X 線吸収スペクトル

N $2p$ 軌道の電子状態に変化を及ぼしたことにより生じた構造であると考えられる。また、401 eV, 403.5 eV, 406 eV 付近にあるピークが GaN に比べブロードになっていることも観測された。

図 2 に軟 X 線発光スペクトルの N $1s$ 励起による測定結果を示す。軟 X 線発光スペクトルは価電子帯の N $2p$ 部分状態密度を反映している。得られたスペクトルは吸収スペクトルと同様に基本的な形状は GaN と Cr をドーピングした試料で変化はなかったが、396 eV 付近の価電子帯の立ち上がり、GaN では観測されていない構造が観測された。この構造もドーピングされた Cr の濃度に対応した変化をしており、価電子帯の N $2p$ と Cr $3d$ 軌道が混成したことによる物だと考えられる。

今後の展望と展開： 本研究では $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ の N $2p$ 部分状態密度について測定を行い、ドーピングされた Cr の $3d$ 軌道が N $2p$ 軌道と混成し、電子状態に大きい影響を与えていることが観測された。今後の計画として、Cr $2p$ - $3d$ 共鳴軟 X 線発光測定を行い、Cr $3d$ 軌道の電子状態を直接観測

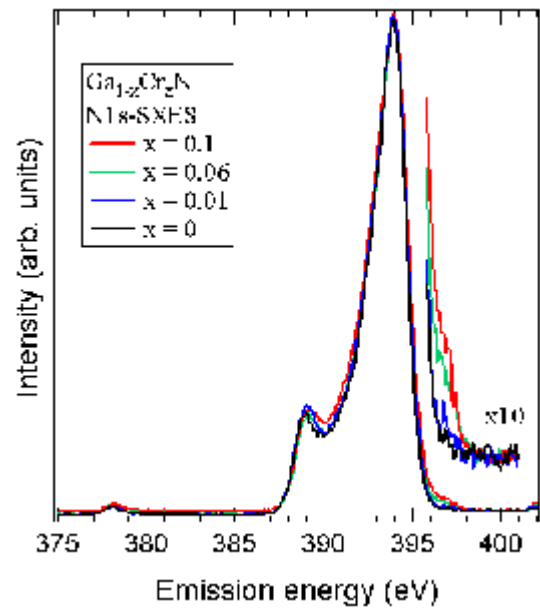


図 2: $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{N}$ ($x = 0, 0.01, 0.06, 0.1$) の N $2p \rightarrow 1s$ 軟 X 線吸収スペクトル

することにより、磁性発現のメカニズムについて電子状態の視点から知見を得ることを予定している。

参考文献：

- [1] J. W. Chiou, *et al.*, App. Phys. Lett. 81, 3389 (2002).

発表論文：

- [1] 原田慈久, 徳島高, 高田恭孝, 竹内智之, 小林啓介, 辛埴, 第 50 回応用物理学関係連合講演会 (口頭発表)