

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 石渡 洋一

III-V 族希薄磁性半導体は近年の‘半導体スピントロニクス’の形成に貢献し、特に(Ga、Mn)As においては正孔濃度 ( $n_p$ ) の増大で発現するキャリア誘起強磁性が大きな注目を集めている。これは外部パラメータによるスイッチングに代表される応用化への期待に加えて、基礎物学的にも重要な遍歴強磁性の問題と関連している。キャリア誘起強磁性の発現機構として複数のモデルが提案されているが、キャリアとなる正孔の状態が、実験的にまだ未解決である。

本研究では軟X線分光のサイト選択性を利用して、Mn アクセプター状態の直接的な観測を行うことを目的としている。しかし、軟X線分光の利用には二つの課題が含まれる。一つは測定が与える空間スケールの問題である。軟X線分光の局所性はそのクラスター解析の成功で確認されており、III-V 族希薄磁性半導体で予想される大きな正孔半径に応答可能であるかは明らかでない。もう一つは本研究で利用する軟X線共鳴発光分光の歴史が浅く、不純物系への適用が未開拓な点である。近年、軟X線共鳴発光分光の性能は著しく向上しており、不純物の中性 ( $A^0$ )・イオン化 ( $A'$ ) 状態の判別に有効性が期待される。本研究ではこれらの問題を解決するために、(Ga、Mn)As 系を中心として、複数の参考試料の測定し、比較を行った。

本論文は以下の四つの章で構成される。

第1章は序章として III-V 族希薄磁性半導体のキャリア誘起強磁性に関する現在の状況をまとめ、その研究に対する軟X線分光の有用性を指摘している。又 III-V 族希薄磁性半導体に内包される二種類の試料依存性—‘強磁性・常磁性成分の共存’と‘As ドナーの混入’—が強調されている。前者の含有比は Mn 濃度 ( $x$ ) と関係し、後者は低温アニールにより実験的抽出が可能となる。本研究では  $x$  依存性と低温アニール効果を併用し、強磁性状態の詳細な議論を可能にしている。

第2章は測定試料と測定条件の整理を行っている。ここで参考試料である III-V 族希薄磁性半導体 (In、Mn) As、II-VI 族希薄磁性半導体 (Cd、Mn)Te、 $Mn_2O_3$  が紹介されている。

第3章は4つの節に分かれ、測定結果と議論を扱っている。3. 1節では軟X線吸収分光による測定結果が提示されている。ここで軟X線吸収分光の簡便さを生かし、上述した試料の系統的な測定が行われている。ここから(Ga、Mn)As に関する以下の三つの結論が導出されている。(1)強磁性成分は  $Mn^{2+}$  イオン状態を形成し、As  $4p$  的な正孔の束縛は弱い。(2)常磁性成分は  $Mn^{2+}$  イ

オンと As ドナーが結合した状態である。(3)  $Mn^{2+}$  イオン / As ドナーの比は  $n_p$  と相関を持つ。最後の結果は (Ga, Mn)As の金属・絶縁体転移と As ドナーとの関係を示唆している。

3. 2節では軟X線共鳴発光分光を用いて、軟X線吸収分光で不明であった (Ga, Mn)As の正孔束縛状態に関する詳細な議論が進められる。ここで (Cd, Mn)Te、 $Mn_2O_3$  との比較から、 $A$  状態が支配化する中で、僅かな  $A^0$  状態の共存が指示される。然しながら軟X線発光分光は測定空間スケールの問題を抱え、 $A^0$  状態をそのままのシグナルとして反映するか明らかでない。つまり正孔の束縛半径が大きい時、 $A^0$  状態を  $A$  状態として認識する可能性が秘められている。

3. 3節では二種類の方法で上記の検証が行われる。初めに軟X線共鳴発光分光測定が行われた (Ga, Mn)As と、ほぼ等しい  $n_p / x$  比を持つ (In, Mn)As 試料の結果が比較される。ここで軟X線共鳴発光分光の測定空間スケール > 正孔の束縛半径が成立すれば、スペクトルに反映される  $A / A^0$  比は一致する筈である。然しながら結果は  $A / A^0$  比の明瞭な増大を表す。又  $n_p / x$  比が異なる (Ga, Mn)As の  $x$  依存性は、ほぼ一様なスペクトルの  $A / A^0$  比を示す。これらの結果は (Ga, Mn)As の正孔束縛半径が、軟X線共鳴発光分光の測定空間スケールの限界に近接する状態を指示し、 $A^0$  状態が束縛半径に関係して、次第に  $A$  状態とカウントされる様子を予想させる。さらに (Ga, Mn)As における軟X線共鳴発光分光の乏しい  $n_p / x$  比依存性は、系の一様な  $A^0$  状態の形成を示唆している。

3. 4節では前節で結論された (Ga, Mn)As の  $A^0$  状態を考慮した、キャリア誘起強磁性モデルの提案が行われている。これは強磁性運動交換と  $p-d$  交換の共存に基づく描像であり、絶縁体試料の強磁性が説明可能な点が特徴的である。

第4章では以上の結果の要約と、測定空間スケールの定量性を議論する為の実験手法の提案が行なわれている。

以上、本論文は III-V 族希薄磁性半導体 (Ga, Mn)As の  $A^0$  状態を初めて明らかにし、且つそこから導出される強磁性機構にまで議論を進めている。又、今まで殆ど議論が行われていない軟X線分光の測定空間スケールに着目し、定性的な結果を与えている。さらに未だ発展段階にある軟X線共鳴発光分光の新奇な物性研究への適用に成功し、その有用性を示した点も、今後に与える影響は大きい。

よって博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。