

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の目的及び背景

II-VI族あるいはIII-V族半導体において、カチオンの一部をMnなどの磁性イオンで置換した混晶半導体は、半導体としての性質に加え磁氣的性質を兼ね備えた物質であり、希薄磁性半導体 (Diluted Magnetic Semiconductor : DMS) と呼ばれている [1]。Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>TeはII-VI族半導体のDMSの典型的な一例であり、伝導キャリアのスピンとMn<sup>2+</sup>イオンの局在磁気モーメントとの間に働く *sp-d* 交換相互作用により、巨大ゼーマン分裂、巨大ファラデー回転、磁気ポーラロン効果といったDMSに特有の磁気光学効果が現れることで知られている。

このようなDMSのナノスケールサイズの低次元化構造では、バンドの閉じ込め効果により電子の波動関数が増えるため、*sp-d* 交換相互作用が系のサイズに依存し、上記の磁気光学効果にも変化が生まれると考えられる。よってDMSのメゾスコピック系における研究は、物理的に、また新たな磁気光学効果の発現といった観点からも興味深い問題である。近年、分子線エピタキシー (MBE) 法等の結晶成長法を用いることにより、DMSと非磁性の半導体からなる超格子を制御よく作製できるようになったため、現在までにこのようなDMSの低次元化の効果は、CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Teをはじめとする2次元の超格子で研究が行われてきた [2, 3]。その新しい展開として量子細線・量子ドット等の更に低次元のDMS微細構造で、交換相互作用に起因する効果が3次元のバルクや2次元の超格子とどのように違った形で現れるかは興味を持たれる。特にDMS量子ドットではキャリアが0次元的に閉じ込められた状態にあり、これと磁性イオンとの間に交換相互作用が働くため、DMSナノ構造に特有の磁気光学効果が顕著に現れると期待される [4, 5, 6]。実際これまでに、SiO<sub>2</sub>中に埋め込まれた微粒子の形で (Cd,Mn)Se ドット [7, 8]、(Zn,Mn)S ドット [9, 10] といったDMS量子ドットを作製し、その磁気光学特性の研究を行った報告が数例だけある。しかし、これらの微粒子はサイズ分布が大きく、SiO<sub>2</sub>とドットの界面も良質ではないため、その光学特性を定量的に評価する事が困難であった。このように良質な光学特性を示すドット構造の作製は困難であったため、DMS量子ドットにおける磁気光学効果の実験報告例は非常に少なく、理論的にもほとんど明らかになっていないのが現状である。

一方、近年量子ドットの作製方法として歪みを利用し量子ドットを自然形成させる自己組織化という方法が注目を浴び、III-V族半導体を中心に活発に研究が行われている [11]。これは格子不整合基板上へのエピタキシャル成長の際に起こりうる Stranski-Krastanov (SK) モードという成長モードを利用し、ドット構造を半導体表面上にエピタキシャルに成長させる方法である。自己組織化によるドットの作製は複雑なプロセス技術等を必要とせず、また作製したドット構造は自然形成であるため機械的損傷を受けず、良い光学特性を示すという利点がある。従って、この自己組織化の手法により作製したDMS量子ドットは新たな光物性研究の対象として期待されるが、本研究の開始段階ではII-VI半導体における自己組織化

ドットの作製は始まったばかりの段階であった [12]。

本研究の目的は、従来とは異なる自己組織化の手法により DMS である  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  の量子ドットをエピタキシャルに成長し、その光物性研究を行うことである。本研究を遂行することにより良い光学特性を示す DMS 量子ドットが作製され、その光物性研究により DMS のメゾスコピック系の物性が解明できるものと考えられる。しかし、前述のように II-VI 族半導体における自己組織化ドットの報告例は少なく、Mn がドーブされていない CdTe の自己組織化ドットでさえ作製報告例はなかった。そこで、本研究では以下の順序で研究をすすめ、DMS 量子ドットにおける低次元化の効果の解明を目指した。

1. まずはじめに、非磁性である 2 元系化合物半導体 CdTe の自己組織化ドットの作製を試み、その成長機構と光物性の解明を目的とした研究を行う。
2. 更に Mn を混入させた  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  自己組織化量子ドットを作製し、その光物性研究を行う。

その結果、1. では CdTe 自己組織化ドットの作製にはじめて成功し、その光物性研究において CdTe 量子ドット中の励起子の 0 次元性を明らかにした。また、2. では低 Mn 組成領域において  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  の自己組織化ドットの作製に成功し、光物性研究において Mn を含む量子ドットに特有の効果を観測した。そしてこの  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  量子ドットに特有の効果は、DMS 量子ドット中での磁気ポーラロン効果に起因することを明らかにした。

## 1.2 本論文の構成

本論文は第 1 章から第 6 章までの 6 章により構成されており、以下に本章以降の各章の概要を述べる。

- 第 2 章：

本研究で対象とした希薄磁性半導体  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  の物性について述べる。はじめに 3 次元のバルクにおける  $sp-d$  交換相互作用とそれに起因する磁気光学特性について述べる。その後、これまでに報告されている DMS の低次元化の効果について紹介する。

- 第 3 章：

自己組織化ドットについての説明を行った後、実際の試料作製方法について述べる。

- 第 4 章：

1.1 節で記述した研究の順序 1. の部分、すなわち CdTe 自己組織化量子ドットの作製と光学特性について述べる。CdTe 自己組織化ドットの作製方法と、原子間力顕微鏡

## 第1章 序論

(Atomic Force Microscope : AFM) による表面観察の結果について述べる。そして作製した CdTe 量子ドットにおける光学測定の結果を述べた後、考察及び結論を述べる。

- 第5章 :

1.1 節で記述した研究の順序 2. の部分である、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  自己組織化量子ドットの作製と光学特性について述べる。第4章と同じく Mn を混入したドット構造の作製方法と、AFM による表面観察の結果について述べる。その後、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  量子ドットにおける光学測定の結果を述べ、考察及び結論を述べる。

- 第6章 :

最後に本研究の結論を述べる。