



Title	Electronic and Transport Properties in Mn-doped Silicon
Author(s)	Yamamoto, Sekika
Citation	大阪大学, 1995, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3108026">https://doi.org/10.11501/3108026</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	山 本 夕 可
博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )
学 位 記 番 号	第 1 2 0 9 8 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 7 年 10 月 4 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第2項該当
学 位 論 文 名	Electronic and Transport Properties in Mn - doped Silicon (Mn を添加したシリコンにおける電子および輸送特性)
論 文 審 査 委 員	<p>(主査) 教 授 大山 忠司</p> <p>(副査) 教 授 邑瀬 和生 教 授 赤井 久純 助教授 中田 博保 助教授 竹田 精治</p>

### 論 文 内 容 の 要 旨

結晶Si中に混入した遷移金属不純物はこれまでの研究から、格子間位置に入りやすいことが分かっている。そのためこれらの不純物はSi中で高い拡散係数と低い溶解度を有する。これらの不純物はまた、多くの場合バンドギャップ中に深い不純物準位を形成し、その波動関数は実空間で原子付近に局在している。こういった深い不純物準位は不純物ポテンシャルの局在性に起因して生じ、浅い不純物の場合によく適用される有効質量近似の手法が使えないために、理論的にも取扱の困難な系として知られる。この研究では特にSi中のMnに注目して、そのSi結晶中での振舞いと電子散乱に与える影響について様々な実験手法を用いて多面的な解析を行った。

試料の作製は母体SiにFZ pure Siと $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ のPを含むn型Siおよび $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ のBを含むp型Siの3種類を用い、熱拡散法によって行われた。まず、Si基板上に $10^{-5} \text{ torr}$ 程度の真空中でMnが蒸着され、その後Ar + H<sub>2</sub>雰囲気中で1100°C、24時間の熱処理を行う。Mnの拡散はn型Siを用いて作成した試料においてDLTSの測定を行うことによって確認された。DLTSの測定からは格子間に入ったMnの信号が得られ、信号強度から求めたMn濃度の概算は約 $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ であった。またpure SiでのMn濃度はSIMSによって測定され、その結果、表面 $14 \mu \text{m}$ までの深さにおいて $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ のMn濃度が確認された。

ESRの測定からは格子間に入った中性Mnの信号が得られたが、この信号強度はpure Siを用いて作成されたもので最も大きく、p型Siを用いて作成されたもので最も小さかった。これはn型やp型のSiを用いて作成された試料ではMnが浅い不純物を補償してイオン化するためと考えられ、Xeランプによる定常光を照射して測定を行うことにより信号強度の増大が確認された。これらのESR信号は試料を室温放置することにより作製後100日程度で減衰し、消失することが分かった。格子間Mnはその大きな拡散係数のため室温でも結晶中を容易に移動し、表面に析出したりクラスターを形成するものと考えられる。

Mn不純物による電子散乱の効果はマイクロ波サイクロトロン共鳴の測定により詳しく調べられた。その結果、MnをドープしたSiでは母体として用いたSiに比べて10倍程度運動量緩和時間が短いことが分かった。この散乱効果は400日の室温放置によっても、4割程度しか減衰せず、ESRから得られた格子間Mnの濃度に対応しない。Hall測定の

結果からは pure Si においては多くの Mn<sub>4</sub> クラスターが形成されていることが分かり、その濃度は  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  以下であることがわかった。このクラスターは比較的安定で、1年間は室温放置後もその濃度はほとんど変化せず、格子間 Mn の ESR 信号の減衰に対応しない。従って電子の散乱には主に Mn<sub>4</sub> が寄与していると考えられる。ただし、初期の散乱確率の減衰は格子間 Mn 量の減衰に対応しており、格子間 Mn も散乱に寄与していることが分かった。

さらに Mn による散乱確率の温度依存性はほぼ温度の  $1/2$  乗に比例することが分かった。この温度依存性は浅い不純物の中性不純物散乱の理論では説明できない。温度への  $1/2$  乗の依存性は電子の平均エネルギーの温度依存性に起因すると考えられることから、この散乱断面積が電子エネルギーに依存しないことがわかる。このことは井戸型ポテンシャルによる散乱モデルを支持する。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は Si 中における遷移金属不純物、Mn<sub>4</sub> の電子構造およびその添加による輸送特性への影響を系統的に研究したものである。Mn などの遷移金属が半導体中に入ると、いわゆる深い不純物とよばれる電子形態をとる。この状態は電子を非常に強く束縛しているために有効質量近似という概念が適用できない。そこでその電子構造と輸送特性に及ぼす効果に関する問題は、現在の半導体物理学において理論的にも応用物理的にも非常に関心のあるところである。

山本君はこの問題について、電子スピン共鳴、サイクロトロン共鳴、SIMS、DLTS、フォトルミネッセンスおよび電流磁気効果測定などを通して系統的に研究し、Si 中における Mn 格子点割り込み型 (Mn<sub>4</sub>) と Si を囲む Mn<sub>4</sub> クラスター状態が支配的であることを突き止めた。更に、室温におけるアニーリング作用によって Mn<sub>4</sub> は 100 日程度の時定数で Mn<sub>4</sub> クラスターに変換することを明らかにした。低温における電子散乱には Mn<sub>4</sub> クラスターが主に寄与し、その散乱緩和時間は深い不純物特有の井戸型ポテンシャル散乱で説明できることを結論づけた。

この研究を通して得られた知見は、今後このような系における輸送特性とその安定性を追及するうえで非常に重要で、博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。