

氏名	千 葉 明 朗 ち ば めい ろう
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 博 第 266 号
学位授与の日付	昭 和 47 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 一 専 攻
学位論文題目	<b>A Study of Spin Echo Decay Behaviours</b> (スピネコー減衰の振舞の研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 端 恒 夫 教 授 長 谷 田 泰 一 郎 教 授 浅 井 健 次 郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は磷をドーブしたシリコン中に浅くトラップされたドナー電子について、パルス法磁気共鳴の方法で電子スピネコー信号を観測し、エコー信号がパルス間隔での関数として時間的に減衰して行く模様を詳細に調べたものである。

申請者はこの実験のためにまず X-バンド帯で働くパルス法 ESR 装置を製作し、ドナーの濃度  $C$  が  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  から  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  迄の種々の濃度の試料について液体ヘリウム温度域において測定を行なった。

実験結果を要約すると次のようになる。スピネコー信号が観測された試料はドナー濃度が  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  から  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  迄のものである。エコー減衰の様相はその特徴に従って次の三つの濃度領域に分けられる。その領域は

$$\text{I, } (1 \times 10^{16} \leq C \leq 6 \times 10^{16})$$

$$\text{II, } (6 \times 10^{16} \leq C \leq 1.3 \times 10^{17})$$

$$\text{III, } (1.3 \times 10^{17} \leq C \leq 2 \times 10^{17})$$

である。領域 I ではエコーの減衰の様相は  $\exp(-ar-br^3)$ —①—であらわされ、 $a, b$  は濃度及び温度に依存しない定数である。領域 II ではエコー減衰の様相は  $\exp\{-a^*(cr)-m^*(cr)^2\}$ —②—であらわされ、 $a^*$  及び  $m^*$  は濃度、及び温度には依らない定数である。領域 III ではエコー減衰時間は急激に短くなり、非常に大きな濃度依存性を示す。

申請者はこの実験結果を Herzog, Hahn および Klauder, Anderson 等により発展させられた stochastic model にもとづいた理論を用いて解析した。この理論では A, B 二つのスピン系を考える。A はスピネコー信号に寄与しているスピン系であり、B は A スピンの位置に局所場を与えているスピン系である。B スピンの揺動は A スピンの局所場を変え、そのため A スピン系の共鳴周波数が周波数空間で拡散し、スピネコーの減衰がおこる。B スピン系の揺動が B スピンのスピン格子緩和によっておこる場合（これを

T<sub>1</sub> サンプルという) は Mims 等によってすでに調べられている。申請者の実験の場合には B スピン系の揺動は主として B スピン系内のスピン-スピン緩和によるものであり (これを T<sub>2</sub> サンプルという) 申請者は今までの理論をこの場合に対しても適用できるように拡張した。

実験結果の解釈は次の通りである。領域 I では Si<sup>29</sup> の核スピン系が B スピン系の役割をし、このフリップ-フロップによる局所場の変動によってスピネコーに減衰がおこる。局所場の拡散をガウス型と仮定すれば  $\exp(-br^3)$  型の減衰が説明出来る。又 b の値を数値的に推定して実験値とよく一致する値を得ている。領域 II では共鳴に直接関与していない電子スピン系が B スピン系として働く。スペクトル拡散をローレンツ型と仮定すると実験式②の減衰の様相及び濃度依存性を説明し得る。領域 III では B スピンは領域 II と同じく共鳴に直接関与していない電子スピンであるが、B スピンの揺動は B スピン系の T<sub>1</sub> によるものである。(即ち T<sub>1</sub> サンプル)。T<sub>1</sub> としてすでに得られている実験値を用いるとスピネコー減衰時間の大きさ及び濃度依存性が説明される。

参考論文 1 は本実験に用いたパルス法 ESR の装置に関するものである。参考論文 2 は、その装置を用いて燐をドーブしたシリコンの ESR のスペクトルをスピネコー法を用いて測定したもので、特に巾広いバックグラウンドに注目し、これが交換相互作用で結びついた対によるものであることを明らかにした。参考論文 3 はヘリウム温度域で働く能動素子に関するものである。参考論文 4 は本論文と同様の実験を研索で補償された燐をドーブしたシリコンに対して行なったものである。

### 論文審査の結果の要旨

主論文はパルス法磁気共鳴におけるスピネコー信号の減衰の様相を詳細に調べたものである。一般にパルス法磁気共鳴はスピン系の動的な性質を調べる上に非常に有力な手段である。スピン系の動的な性質のうち縦緩和に関しては多くの理論的及び実験的研究がなされており、主要な原理的問題は解決されていると考えられる。ところが、横緩和、特にスピネコー法によって観測されている横緩和に関しては多くの未解決の問題が残されている。

申請者はスピネコー減衰の機構を調べる目的で X- バンドパルス法 ESR 装置を製作し燐をドーブしたシリコン中のドナー電子について、そのスピネコー減衰の様相を、濃度変化及びヘリウム温度域での温度変化を含めて詳細に調べた。この物質は既に定常法 ESR 及び ENDOR 法を用いて、そのスペクトルや超微細構造及びスピン格子緩和時間がよく調べられており、スピネコー減衰の定量的考察に必要なデータがそろっているものである。

実験結果として、三つの濃度領域 I, II, III について、スピネコー減衰がそれぞれ特徴的なふるまいを示すことが見出された。この実験結果を説明するために、申請者は Stochastic Model にもとづいた理論を用いた。この理論は、共鳴にあずかる A スピン系と、これに局所場をおよぼしている B スピン系を考え、B スピン系の揺動による局所場の変動を確率過程としてとり扱い、A スピン系のスピネコー減衰の様相を説明するものである。申請者は、B スピン系として、領域 I では Si<sup>29</sup> の核スピン系、領域 II と III では共鳴にあずからない電子スピン系をとり、揺動の原因としては領域 I, II ではスピン-スピン緩和、領域 III ではスピン-格子緩和を考えた。この際、B スピン系の揺動が B スピン系のスピン-スピン緩和に起

因する場合については、従来の理論の拡張をおこなった。その結果スピネコー減衰の様相およびその濃度依存性、温度依存性について実験と理論の定量的な一致が得られた。

要するに主論文は磷をドーブしたシリコン中のドナー電子系についてその電子スピネコー減衰のミクロな機構を明らかにしたものであり、今後他のスピネ系でのスピネコー減衰の解析にも一つの指針を与えたものであり、極めて意義深く、磁気共鳴の分野の発展に寄与する所が少なくない。参考論文はパルス法 ESR 装置の製作とその応用に関するもので主論文における研究の前駆をなすものであって、申請者のこの分野における豊富な知識とすぐれた研究能力を示している。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。