OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	Studv of Photo-Magnetic Effect and Spin-Lattice Relaxation on Shallow Donors in Silicon Using a SQUID Magnetometer
Author(s)	近藤, 道雄
Citation	大阪大学, 1987, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1814
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

【43】

氏名・(本籍)	近藤道雄
学位の種類	工学博士
学位記番号	第7749号
学位授与の日付	昭和62年3月26日
学位授与の要件	基礎工学研究科物理系専攻 学位規則第5条第1項該当
学位論文題目	シリコン中の浅いドナーの光磁気効果とスピン格子緩和の超伝導量子干渉磁束計による研究
論文審査委員	(主査) 教授 西田 良男 (副査) 教授 吉森 昭夫　教授 朝山 邦輔　助教授 小田 祺景

論文内容の要旨

光磁気（ＰＭ）効果とは光励起緩和過程においてスピン反転や軌道反磁性の変化によって生じる磁化の変化をいう。ＰＭ効果は固体中で広く起こっている光学的過程の一つであるが，これまで余り報告されていない。超伝導量子干渉磁束計（ＳＱＵＩＤ磁束計）は，ＰＭ効果のような微少かつ速い磁化の変化に追従する新しいセンサーである。本研究の目的はシリコンにおいて初めて観測されたＰＭ効果をＳＱＵＩＤ磁束計を用いて調べ，その起源を明らかにすることにある。そのためにＰＭ効果およびＥＳＲをＳＱＵＩＤで検出する装置が開発された。ＳＱＵＩＤ－ＥＳＲはＰＭ効果の起源の同定のために用いられた。試験的な測定としてルビーのＰＭ効果が示され，ＳＱＵＩＤ－ＥＳＲの結果と比較された。光照射はルビーの基底状態のゼーマン準位間のスピン分布を変化させ，ＰＭ効果はＥＳＲと同様にスピン格子緩和やスピン交差緩和についての情報を与えることが示された。ｎ－型の浅いドナーを含む非補償のシリコンにおいて，液体ヘリウム温度で反磁性的な磁化変化が，バンドギャップよりエネルギーの小さい赤外光によって誘起された。用いた試料は低濃度域の2.2×10^{16}から3.2×10^{17}Ｐ／cm³までの濃度範囲のものであり，ドナーは互いに孤立していると考えてよい。赤外光はドナー電子を伝導帯へ励起し，励起された光電子はイオン化ドナーD^{+}と再結合するか，あるいは中性ドナーに捕獲されてD^{-}状態ができる。観測されたＰＭ効果の起源については二つの可能性が考えられた。

一つは，ドナースピンの分極の減少でありもう一つはD^{-}状態の軌道反磁性である。

観測量は定常状態における信号の振幅と，光照射後の半減時間である。これらの量は温度，ドナー濃度，励起光強度，赤外背景（ＢＧ）照射光強度に依存している。さらに部分的な補償によってＰＭ信号が消失することも見いだされた。

ＰＭ効果の起源が上に述べた二つの可能性のどちらであるかはＳＱＵＩＤ－ＥＳＲおよび遠赤外光伝導によって確かめられた。前者はドナースピンに関する情報を与え後者はＤ⁻状態の寿命に関する情報を与える。その結果，シリコンのＰＭ効果は光照射に伴うドナースピンの分極の減少であると結論された。

観測されたＰＭ効果は２つの事実を表している。一つは光によるスピン格子緩和時間の短縮であり，もう一つはスピン分極の減少である。9×10^{16}Ｐ／㎤のドナーを含む試料において測定された磁化変化は，ドナーの熱平衡スピン分極の大きさの23%に相当し，１秒程度の緩和時間が0.24秒に短縮された。

これらの結果はレート方程式を仮定することによって説明される。スピン反転がどのような機構によって引き起こされるのかはまだ十分理解されていない。

一つの可能性は光励起された伝導電子のドナー電子によるスピン交換を伴う散乱過程があるが，この他にもＤ⁻状態を介したドナー電子間の反強磁性的な超交換相互作用の可能性も考えられる。

論文の審査結果の要旨

光磁気効果とは，磁場中においた試料に光を照射すると磁気モーメントの変化を生じる現象で，光励起と緩和過程においてスピンの反転や軌道反磁性の変化を伴う場合に現れる。光磁気効果の測定は，今まで適当な磁気センサーがなかったために殆ど研究されていない。この論文では，超伝導量子干渉磁束計（ＳＱＵＩＤ磁束計）を用いて，光磁気効果を測定する装置を試作し，シリコンの不純物の光磁気効果を始めて観測した。そして光磁気効果の性質を実験的に調べ，関連する他の現象すなわち，ＥＳＲおよび光伝導の観測を行い，その比較から，光磁気効果の起源を明らかにし，機構を考察している。

先ず光磁気効果とＥＳＲをＳＱＵＩＤで検出する装置を製作し，常磁性イオンを含む物質の光磁気効果としてルビーの観測を行い，装置の性能の評価を行なっている。ルビーでは光照射によりクロムイオンの基底状態のスピン分布が熱平衡からずれること，およびスピン格子緩和やスピン交差緩和に関する情報が得られることを明らかにしている。

次いでシリコンのドナー不純物が，液体ヘリウム温度域で、赤外光照射により反磁性の向きに磁気モーメントが変化することを見い出し，その性質を詳しく調べている。光磁気効果の原因として，ドナー電子のスピン温度の上昇と電子を余分にトラップしたドナー状態（Ｄ⁻状態）の軌道反磁性の２つの可能性が考えられる。この２つの可能性をＥＳＲと光伝導の実験から区別することを行い，光励起に伴うドナースピンの反転によって光磁気効果が起こっていると結論している。またスピン格子緩和時間が赤外光照射により短くなることも見い出している。

光照射により，ドナースピンの反転が起きる機構に関しては，光励起によるホット・エレクトロンが，光電子のスピン温度を上昇させ，光電子とドナー電子のスピン交換を伴う散乱で，ドナー電子の反転が起きると推論している。この推論にもとずいてスピン分極にたいするレート方程式を提唱し，実験結果が，一応説明されることを示している。

本論文の結果は，半導体の光励起と緩和過程にスピン反転の生じることを始めて指摘したものであり，学位論文として価値あるものと認める。