

Title	半導体における量子極限下サイクロトロン共鳴線幅の実験的研究
Author(s)	小堀, 裕巳
Citation	大阪大学, 1989, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/36394">https://hdl.handle.net/11094/36394</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a>〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

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

Osaka University

【13】

氏名・(本籍)	こ ぼり ひろ み 小 堀 裕 巳
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	第 8 5 5 6 号
学位授与の日付	平成元年3月24日
学位授与の要件	理学研究科物理学専攻 学位規則第5条第1項該当
学位論文題目	半導体における量子極限下サイクロトロン共鳴線幅の実験的研究
論文審査委員	(主査) 教授 大塚 穎三 (副査) 教授 金森順次郎 教授 邑瀬 和生 教授 斉藤 基彦 教授 大山 忠司

論 文 内 容 の 要 旨

量子極限下でのサイクロトロン共鳴の線幅に対する系統的研究を半導体中の様々な散乱について行なった。用いた半導体は Ge, Si, CdS, InSb, GaAs の 5 種であり、調べた散乱は、中性ドナー、中性アクセプター、イオン化不純物、(キャリア) - (キャリア)、音響変形ポテンシャル、音響ピエゾ・エレクトリック、極性光学フォノン散乱の 7 種に及ぶ。サイクロトロン共鳴の線形関数は古典極限(弱磁場域)では、ボルツマン=ブロッホ方程式を解く半古典的な導出方法で説明されるが、量子極限(強磁場域)では、磁場による量子効果は、もはや無視できなくなるので、半古典的導出によって得られた結果は、疑いもたれる。それゆえ、電気伝導度に対する久保公式を用いるなどの量子統計力学的取り扱いが数多くなされている。この量子統計力学的な取り扱いによって得られるサイクロトロン共鳴の線形関数は全磁場域で適用可能であるが、量子極限の条件の下では、その取り扱いは最も単純化される。すなわち量子極限下では、電子は最低ランダウ準位にほとんど分布しているので、弾性もしくは準弾性散乱については、サイクロトロン共鳴によるフォトンの吸収が  $n=0 \rightarrow n=1$  ( $n$ : ランダウ量子数) の選択則によって行なわれる前後で、散乱は次の 3 つに限定される。(1)  $n=0 \rightarrow n=0$  (2)  $n=1 \rightarrow n=1$  (3)  $n=1 \rightarrow n=0$ 。最初の 2 つの散乱はランダウ準位内散乱であり、最後の散乱はランダウ準位間散乱である。ランダウ準位間散乱は異なった状態密度間の散乱であるから、ランダウ準位内散乱に比べて、およそ、 $(\hbar\omega_c/\epsilon(k_z))^{1/2}$  ( $\hbar\omega_c$ : サイクロトロン有効エネルギー、 $\epsilon(k_z)$ : 磁場方向の運動エネルギー) の因子で、その寄与は小さくなる。そのため不純物散乱のような弾性散乱では、サイクロトロン共鳴の線幅は、ランダウ準位内散乱によって支配される。我々は Ge, InSb で得られたイオン化不純物散乱に対する実験結果と数値計算をして得られた理論曲線とを比較して、この事実を確かめた。ただし温度依存性の幾分かの不一致は、弾性

散乱で特に重要な因子と思われる共鳴ピークのシフトを理論的に取り入れなかったためと一部解釈する。中性ドナー、中性アクセプター散乱については GaAs 中で調べた。これらの散乱は 3 体散乱であって、ポテンシャル散乱ではないが、有効ポテンシャルを仮定して、中性ドナー、中性アクセプター散乱の運動量遷移断面積を有効ポテンシャルにくり込むという方法によって数値的に理論計算をした。その時、線幅は磁場が増加するに従って、増加から減少へと推移する。これは、これらの散乱が短距離型から長距離型へと変化した事を意味する。すなわち電子-水素原子（陽電子-水素原子）散乱が低エネルギーで短距離型、高エネルギーで長距離型の散乱断面積を持っている事に対応している。音響フォノン散乱に関しては、非弾性の効果によって、ランダウ準位内散乱の寄与は低温域で小さくなるので、もはや、ランダウ準位間散乱の寄与は無視できなくなる。我々は初めて  $n=1 \rightarrow n=0$  ランダウ準位間散乱の寄与を取り入れて、音響変形ポテンシャル散乱による線幅を数値的に計算し、この事を確かめた。さらに有効質量の異方性を考慮して、その異方性が線幅に大きく寄与する事を Ge と Si に対して示した。同様に音響ピエゾ・エレクトリック散乱に対しても CdS について調べた。音響フォノン散乱は、散乱の種類によらず、温度依存性は同様であるが、その違いは、磁場依存性に反映される、非弾性の効果があるので、一般的に言う事は困難であるが、弾性散乱と音響フォノンの分布関数に対する高温近似を仮定すると、音響変形ポテンシャル散乱による線幅は、磁場に対して増加するが、音響ピエゾ・エレクトリック散乱による線幅は磁場に対して、ほとんど変化しない。これは音響ピエゾ・エレクトリック散乱が音響変形ポテンシャル散乱に対して、より長距離型的である事を意味している、極性光学フォノン散乱に対しては  $\hbar\omega_{LO} > \hbar\omega_c > k_B T$  ( $\hbar\omega_{LO}$ : LO フォノンエネルギー,  $\hbar\omega_c$ ; サイクロトロン有効エネルギー,  $T$ ; 温度) の条件のもとで行なった。したがって  $n=0 \rightarrow n=M$ ,  $n=1 \rightarrow n=N$ ;  $N, M \geq 0$  の関与する、すべてのランダウ準位に対する散乱を考慮しなければならない。このような条件下では、線幅は光学フォノン散乱の吸収部分によって、ほとんど支配される。フォノン放出は、そのエネルギーの大きさのために、ほとんど禁止される。これらは、InSb に対して実験的に確かめられた。

## 論文の審査結果の要旨

小堀君は、在学期間中、一貫して、半導体中のキャリア散乱を、量子極限サイクロトロン共鳴で調べる研究を続けてきた。半導体試料は強磁場下で低温におかれ、キャリアのド・ブローイ波長が、サイクロトロン半径より大きい状態におく。これが量子極限である。このような量子極限におかれたキャリア（伝導電子）が、格子振動・不純物等と衝突して散乱されるとき、古典的常識を越えた振舞をする。小堀君は、その様子を、散乱の種類ごとに、克明に条件を変えて調査した。手段は、遠赤外域における伝導電子のサイクロトロン共鳴線幅を、精密に測定することである。具体的には、音響フォノン（変形ポテンシャルおよびピエゾ）、光学フォノン、中性不純物（ドナーおよびアクセプター）、イオン化不純物、他のキャリアによる電子の散乱を見る。用いた物質は単体半導体の Ge と Si、III-V 族半導体の GaAs と InSb、II-VI 族の CdS である。音響フォノン散乱に関しては Ge, Si の超高純度試料を主に、GaAs と

CdS で補助測定を、また不純物散乱については、各物質ごとに、不純物の型、種類、量を変えて精力的な実験を行ない、理論との比較検討を重ねた。結論としては、1) 音響フォノン散乱（とくに変形ポテンシャル散乱）に関しては、既成理論を再編成することで、実験とかなりよい一致が得られる。2) 不純物散乱に関しては、中性不純物・イオン化不純物ともに、温度依存性と磁場依存性とに共通した振舞が見られる。とくに温度依存性はほとんど無い。散乱断面積の絶対値はイオン化不純物の方が1桁ほど大きい。3) 中性不純物散乱では、量子極限域でも、古典域と同様、ドナー散乱とアクセプター散乱の間で断面積に大差があり、前者の方が1桁以上大きい。4) キャリヤーによる散乱は、定性的にはイオン化不純物散乱と同様に取扱える。—— 等である。

量子極限におけるサイクロトロン共鳴線幅の問題は、半導体物理学における基本的主題のひとつである。しかし、理論・実験ともに、これまでは断片的であり、結果も相矛盾するなど、一貫性に欠けていた。小堀君の仕事は、実験面でこれを見事に整理し、説得力のあるデータを、定量的かつ系統的にまとめた。これらのデータは、今後決定版に近いものとして位置づけられよう。また既成諸理論の交通整理と、一部不備を指適するなど、理論家にとっても啓発されるところ大なるものがあった。よって小堀君の仕事は、理学博士の学位論文として、十分価値あるものと認める。