

氏名・(本籍)	深瀬哲郎
学位の種類	理学博士
学位記番号	理第237号
学位授与年月日	昭和44年2月19日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和37年3月 東北大学大学院理学研究科修士課程物理学専攻修了
学位論文題目	砒素及びアンチモンの磁気音響効果の研究
論文審査委員	(主査) 教授袋井忠夫 教授森田章 教授平原栄治

## 論文目次

- § 1 緒言
- § 2 研究事項
- § 3 実験方法及び試料
- § 4 測定結果及び考察
- § 5 結論

# 論文内容要旨

## § 1 緒 言

静磁場中での伝導電子による超音波の吸収現象には、サイクロトロン共鳴、幾何共鳴、ドップラーシフト、サイクロトロン共鳴、シュブニコフ・ドハース型振動、巨大量子振動など多種多様な現象があり、金属のエネルギー帯構造の研究手段として用いられている。

半金属の As 及び Sb は伝導帯に僅少の電子が、価電子にはこれと同数の正孔が夫々存在する。Lin - Falicov ( Phys. Rev. **142** ( 1966 ) 441 ) の計算によると、As の正孔フェルミ面はブリルアン帯の T 点を中心にして 6 本の細い首 ( $\gamma$ -neck) でつながれた 6 個のポケットより成る。この  $\gamma$ -neck はエネルギー帯の鞍部にあると考えられている。Sb の正孔フェルミ面は、Falicov - Lin ( Phys. Rev. **141** ( 1966 ) 563 ) の計算によれば H 点にあるポケットが T 点を中心にして 6 個配置されている。

極低温、強磁場において音波と同位相で進行する電子群は音波と強い相互作用をする。このため音波はランダウ減衰をうけ、巨大量子振動が観測される。この巨大量子振動 ( 以下 GQO と略記 ) は Bi 及び Ga について既に報告されている。しかし As の  $\gamma$ -neck はエネルギー帯の鞍部にあるため上記の物質の場合とは様相が異なる。また As のスピンについて今までに報告がなかった。本研究では As について鞍部点にあるランダウ準位が GQO の峰の形にもたらす効果やスピン質量とエネルギー帯の特殊性との関係を検討した。

一方低磁場における磁気音響効果にドップラーシフト・サイクロトロン共鳴 ( 以下 DS-ACR と略記 ) と呼ばれる現象がある。これは金属中を進行する電子の感じる有効周波数がサイクロトロン周波数 ( $\omega_c$ ) の整数倍と等しい磁場において、音波が電子によって共鳴吸収される現象である。DSACR には数種の異なった振動現象があり、本研究における有効状態数の極による共鳴型振動はその一種である。DSACR の研究には球形フェルミ面モデルによる Kjeldaa ( Phys. Rev. **113** ( 1959 ) 1473 ) の理論とそれを一般のフェルミ面に拡張した Kaner et al ( Soviet Physics - JETP **13** ( 1961 ) 147 ) 等の理論がある。一方閉じた軌道による DSACR の実験報告はなかった。本研究は Sb の閉じた軌道による DSACR を観測し、Kaner 等の理論に従ってフェルミ面の非楕円体性を論じた。

## § 2 研究事項

### I As の磁気音響効果における巨大量子振動

- (1)  $\gamma$ -neck の正孔による GQO を観測する。またその吸収曲線はランダウ準位がエネルギー帯の鞍部にあたるために如何なる形になるかを調べた。

(2) スピン分裂を観測し,  $g$  値を求める。一方 Lin-Falicov の帯計算の結果から  $g$  値を計算し, 実験値を比較検討する。

## II Sb の磁気音響共鳴吸収

- (1) DSACR を観測し, Kaner et.al の理論に従って考察する。
- (2) DSACR の観測条件及び吸収曲線の形とフェルミ面の非楕円体性との関連を検討する。
- (3) 広義の幾何共鳴を観測し, フェルミ面に関するこれまでに知られている結果と比較検討する。

## § 3 実験方法及び試料

As の試料は純度 99.9999% の As を, Bridgman 法により単結晶にした。Sb の試料は純度 99.9999% の Sb を蒸留後, 30 回帯熔精製した。単結晶の作製には引き上げ法を用いた。Sb の残留抵抗比は約 2500 である。減衰係数の測定はパルス法で行ない, Z 軸方向に伝播する 15 ~ 180 MHz の縦波超音波を用いた。磁場を YZ 面及び XZ 面内で回転し  $4.2^\circ\text{K} \sim 1.2^\circ\text{K}$  の温度の範囲ですべての測定を行なった。

## § 4 測定結果及び考察

### I As の磁気音響効果における巨大量子振動

$H \gtrsim 0.9 \text{ KG}$  において音波の減衰係数にドハース・ファンアルフエン効果と類似の  $\frac{1}{H}$  に対して周期的な振動が観測された ( $H \parallel Z$  における周期は  $3.84 \times 10^{-5} \text{ G}^{-1}$ )。  $H > 10 \text{ KG}$  になると吸収の峰は一段と鋭くなり, GQO の性質を顕著に示した。強い磁場の吸収の峰に分裂が認められた。吸収の峰の形は強磁場側にすそを引いている。

#### (1) 振動の周期

振動周期の磁場方向依存性は Priestley et. al. (Phys Rev **154** (1967) 671) のドハース・ファンアルフエン効果における結果と良い一致を示した。従って観測された GQO は,  $r$ -neck に起因すると考えられる。吸収の起る磁場の逆数の値と対応するランダウ準位数との比例関係から,  $r$ -neck の中心部には, Lax モデルが充分良い近似として適用できることがわかった。これは Maltz の磁気光効果の研究 (Technical Report of the Department of Engineering, M. I. T. June, 1968) によっても支持される。また逆質量テンソルの各成分  $\alpha_{xx}, \alpha_{yy}, \alpha_{zz}, \alpha_{yz}$  は夫々 3.07, 4.07, 1.63 及び 7.16, またはフェルミ・エネルギー及び禁制帯幅は夫々 0.0114 eV, 0.172 eV と求められた。

#### (2) $g$ 因子

強い磁場における GQO の峰の分裂はスピンによる分裂である。この分裂から  $g$  値を算出しようとする場合次の二つの場合が考えられる。即ち (a)  $m_s \doteq m_c$ , (b)  $m_s \ll m_c$  (但し  $m_s, m_c$  はそれぞれスピン質量, サイクロトロン質量)。 1)  $r$ -neck のエネルギー帯には Lax

モデルが良い近似で適用できる。2) 本測定の本領域では、フェルミ準位の磁場による変化は無視できる。以上の二点を考慮に入れて吸収曲線を計算した。この結果上記の解釈の内 (a)  $m_s \approx m_c$  が正しい事が判明した。測定された  $g$  因子の値は  $H \parallel Z$  軸で 75,  $H$  が  $Z$  軸からはなれるに従って減少する。Lin-Falicov によると、ブリルアン帯の  $Q$  点で偶然縮退がある。スピン軌道相互作用を考慮すると、この縮退がとけて新たに二つの準位ができる。価電子帯の正孔が  $r$ -neck を形成する。この二つの準位について、Cohen Blount (Phil. Mag. 5 (1960) 115) の方法を適用し、 $g$  値を算出した。その結果 Lax モデルの適用限界内で  $g(H \parallel Z) = 80.6$ ,  $H$  が  $Z$  軸からはなれるに従って  $g$  値は減少する。このことは実験結果を良く説明した。

### (3) 吸収の峰の形

$r$ -neck がエネルギー帯の鞍部にあることを考慮して、GQO の吸収係数を導出した。この式に、(1)及び(2)で得られたパラメーターを代入することによって、実験曲線を非常に良く再現できた。GQO の峰は強磁場側にすそを引いている。これは  $Bi$  の場合と逆であり、このことは  $r$ -neck がエネルギー帯の鞍部にあることの証拠である。

## II Sb の磁気音響共鳴吸収

次にあげる二種の振動が  $H < 3 \text{ KG}$  において観測された。これらはいずれも  $\frac{1}{H}$  に対して周期的であり、その周期は音波の周波数 ( $\omega$ ) に反比例する。

### (1) ベッセル関数型の振動

振動の形は温度及び周波数に無関係である。振動の形及び周期の解析から、これは広義の幾何共鳴である。周期より求めたパラメーターは Shoenberg のドハース・ファンアルフエン効果 (Phil. Trans A 245 (1952) 1) のデータと良く一致する。

### (2) スパイク状の鋭い峰を有する共鳴型振動。

本効果の観測される磁場の角度範囲は狭く、 $YZ$  面内では  $Z$  軸より  $15^\circ \sim 25^\circ$ ,  $XZ$  面内では  $Z$  軸より  $20^\circ \sim 30^\circ$  及び  $50^\circ \sim 70^\circ$  である。吸収の峰の半値幅は温度の低下とともに、また音波の周波数の上昇とともに減少する。磁場の方向によっては峰に分裂を生ずる。以上の性質よりこの振動は Kaner et. al により提唱された DSACR であることが解った。振動の周期は、 $\Delta(\frac{1}{H})_{\pm} = e/(cm_e |q <v_z> \pm \omega|)$  で与えられる (但し  $q$  は音波の波動ベクトル、 $<v_z>$  は磁場方向のフェルミ速度)。フェルミ面が閉じている場合  $m_c q \cdot <v_z>$  は  $k_z$  の関数である。従って振動の周期は  $k_z$  によって連続的に変化する。このため一般には DSACR の吸収の峰は、スパイク状の共鳴型にはなり得ない。吸収の峰が共鳴型になるのは  $m_c q \cdot <v_z>$  が極値を有する場合であり、それにはフェルミ面が変曲点を有することが不可欠である。もし変曲点があれば、磁場を適当な方向から加えると、 $\partial(m_c \cdot <v_z>)/\partial k_z = 0$  となるような磁場に垂直な断面が存在する。この断面上の電子が DSACR の条件を満たす磁場を  $H_r$  とすると、 $H_r \pm 4H/2$  の磁場で吸収にあずかる電子の状態数は  $4H/(\partial(m_c \cdot <v_z>)/\partial k_z)$

に比例し、これは発散する。従って吸収係数は  $Hr$  で鋭い峰をなす。即ちスパイク状の吸収の峰を有する振動は有効状態数の極に起因するものであ。振動の周期より  $m_e$  及び  $\langle v_z \rangle$  を求めた。この値を Datars ( Canad. J. Phys 40 ( 1962 ) 1784 ) の Azbel - Kaner サイクロトロン共鳴による値と比較した。その結果このスパイク状の鋭い吸収は、正孔フェルミ面における状態数の極による共鳴吸収であることが知られた。このことは正孔フェルミ面が楕円体でない直接証明である。

## § 5 結 論

- (1) As の正孔フェルミ面の  $r$ -neck に起因する GQO が観測された。これは As における最初の観測である。
- (2)  $r$ -neck には Lax モデルが良い近似で適用できることがわかった。このモデルに従って帯因子を算出した。
- (3) スピン分裂から  $g$  値が求められた。H//Z 軸で  $g$  値は最大値 75 となり、H が Z 軸からはなれるに従って減少した。
- (4) Lin - Falicov の帯計算にもとづいて  $g$  値が計算され、実験値と良い一致が得られた。
- (5)  $r$ -neck がエネルギー帯の鞍部にあることを仮定して吸収係数を計算し、実験曲線と非常に良い一致を得た。
- (6) Sb において DSACR が観測され Kaner et. al の理論が検証された。
- (7) 状態数の極に起因する DSACR が観測されたことにより、Sb の正孔フェルミ面が楕円体でない直接証明を得た。
- (8) 峰の分裂より、正孔のサイクロトロン質量及びフェルミ速度が夫々  $0.144 m_e$  及び  $2.21 \times 10^7$  cm/sec と求められた。
- (9) 広義の幾何共鳴より逆質量テンソルが求められ、ドハース・ファンアルフエン効果等による従来との一致が得られた。

## 後 記

これらの研究は

- 1) T. Fukase: Giant Quantum Oscillations in the Magneto - Acoustic Attenuation and the Spin Splitting of Arsenic.  
J. Phys. Soc. Japan に投稿中
- 2) T. Fukase and T. Fukuroi: Giant Quantum Oscillations of Magneto - Acoustic Attenuation in Arsenic. ( Short note )  
J. Phys. Soc. Japan 23 ( 1967 ) 650.

- 3) T. Fukase and T. Fukuroi : Magneto - Acoustic Resonances in Antimony.  
J. Phys. Soc. Japan **21** ( 1966 ) Suppl. 751.
- 4) T. Fukase and T. Fukuroi : Resonant Oscillations of Ultrasonic Attenuation  
of Antimony in a Weak Magnetic Field. ( Short note )  
J. Phys. Soc. Japan **21** ( 1966 ) 814. に発表した。

なお, 参考論文としては,

- 1) T. Fukuroi, Y. Muto, Y. Saito, K. Tanaka and T. Fukase : On the  
Electric Structure of Bismuth and Its Dilute Alloys.  
SCI. REP. RITU. **A-18** ( 1966 ) Suppl. 418.
- 2) T. Fukuroi and T. Fukase : Magnetic Flux Jumps in Superconducting  
3Nb - Zr Alloy Wires.  
SCI. REP. RITU. **A-16** ( 1964 ) 132.
- 3) T. Fukuroi and T. Fukase : Role of Insulations in a Superconducting  
Magnet.  
SCI. REP. RITU. **A-15** ( 1963 ) 297.

がある。

## 論文審査結果の要旨

本論文は次の2部よりなる。

### (I) As の磁気音響効果における巨大量子振動 (GQO) の研究

純度 99.9999 % の As を Bridgman's 法により単結晶にし 1.2° K で結晶の Z 軸方向に 15~180 MHz の縦波超音波パルスを入射し磁場を YZ 面と XZ 面内で回転して減衰係数を測定した。磁場が 1 KG では dHvA 効果と似た周期的振動を認めるが 10KG 以上になると吸収の峰は鋭くなり GQO の形を示す。この振動は正孔のフェルミ面の  $F$ -neck によると考えられる。この時の  $\frac{1}{H}$  と対応する Landau 準位数の比例関係から  $F$ -neck の中心部に Lax Model が良い近似で適用されることが判った。フェルミエネルギーは 0.0114 eV, 禁制帯幅は 0.172 eV と求められた。強磁場における GQO の峰のスピンスplitから磁場が Z 軸方向の時  $g=75$  で磁場が Z 軸から離れると  $g$  は減少する。正孔の  $F$ -neck がエネルギー帯の鞍部にあることを考慮し GQO の吸収係数を求め GQO の峰が強磁場側にずらすことが説明された。

### (II) Sb の磁気音響共鳴吸収の研究

純度 99.9999% の Sb を蒸留後帯熔融精製し単結晶を引上げ残留抵抗比 2500 のものを得た。これについて As と同様に減衰係数を測った。3KG 以下の磁場で  $\frac{1}{H}$  に対し周期的で音波の周波数に反比例する周期をもつ次の2種類の振動を観測した。第1はベッセル関数型の振動で周期から求めたフェルミ面の値は dHvA 効果の結果とよく一致する。第2はスパイク状の鋭い峰をなす共鳴型振動で磁場の限られた角度範囲でのみ観測される。吸収の峰の幅は温度が低い程また音波の周波数の高い程鋭く現われる。これらの結果からこの共鳴は Kaner 等が理論的に導いた Doppler shifted サクロトロン共鳴に相当することが判った。Sb の閉じた軌道によるこの共鳴吸収の観測結果から正孔のフェルミ面に変曲点があり、従って楕円体から著しく歪んでいることを明かにした。なお共鳴吸収の分裂から正孔のサイクロトロン質量は 0.144  $m$ , フェルミ速度は  $2.21 \times 10^7$  cm/sec と求められた。

以上の研究結果は半金属に属する As 及び Sb のフェルミ面の形状を決定する上に極めて重要な貢献をしたもので、深瀬哲郎提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。