

氏 名	越 野 茂 美 こし の しげ はる
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 博 第 4 4 号
学位授与の日付	昭 和 37 年 3 月 23 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 専 攻
学 位 論 文 題 目	Scattering of Electrons by the Thermal Motion of Impurity Ions (不純物イオンの熱運動による電子の散乱)
論文調査委員	(主 査) 教 授 富 田 和 久 教 授 内 田 洋 一 教 授 松 原 武 生

論 文 内 容 の 要 旨

金属における電気抵抗は大きく分けて、電子の格子振動による散乱と、不純物による散乱によって生ずると考えられ、これら二種の効果は、適当な温度領域であれば、互いに他の効果がないものとして独立に計算した散乱確率を加えれば、全散乱確率がえられる。これを Matthiesen 則というが、一般に低温の領域、およびかなりの高温では、この法則からのずれが見いだされ、電気抵抗には温度 T と不純物濃度 x の両者に依存するような付加部分が見いだされる。この付加部分に対する説明としては、

(i) 電子の相関効果, (ii) 不純物の存在による母体の格子振動スペクトルの変化, (iii) 不純物自体の熱運動による非弾性散乱, (iv) 電子による遮蔽の温度変化, (v) 荷電を運ぶ粒子数の温度変化, 等を考えることができるが、現在まで実験事実に定量的な説明を与えた理論はない。すなわち、Sondheimer は Boltzmann 方程式の 2 次の項を考慮することによって、(i) の機構をしらべ、Jones は不純物の存在による母体のデバイ温度の変化を、また Fukuda は不純物によって生ずる局在振動の影響を計算して、(ii) の機構をしらべたが、いずれの場合も数値的に過小で実験を説明するに至らなかった。

著者は主論文において、上記の (iii) の機構、すなわち、不純物自体の熱運動による非弾性散乱の効果を計算し、他の資料からえられた数値を用いることによって、大体抵抗の付加部分を説明できることを示したのである。

用いた仮定は次の三つに要約される。

- (1) 不純物原子と母体原子との原子価および質量にはあまり大きい差がないとして、不純物の運動は純粋な母体の運動で近似した。
- (2) 不純物の存在のために加わるポテンシャルは screened Coulomb 型であるとした。
- (3) 格子振動による散乱と、不純物自体による非弾性散乱との干渉項はすてた。

以上の仮定のもとに主論文前半においては、高温近似の解を求め、付加的抵抗 $\delta\rho$ の値として

$$\delta\rho = 5.25 \times 10^{-9} Z^2 T x \quad \text{ohm-cm} \quad (\text{銅})$$

$$\delta\rho = 1.18 \times 10^{-8} Z^2 T_x \quad \text{ohm-cm} \quad (\text{銀})$$

$$\delta\rho = 1.11 \times 10^{-8} Z^2 T_x \quad \text{ohm-cm} \quad (\text{金})$$

をえた。ただし、 Z は不純物原子と母体原子の原子価の差をあらわしている。ここにえられた値は、Linde によってえられた実験結果と Z に関して一致した傾向を示し、また数値的に同程度である。

上述の機構 (iv), (v) については著者が評価しているが (iv) は $\frac{kT}{\zeta}$ (ζ : Fermi energy) 程度の補正を与えるにすぎず、(v) は小さいであろうという推論が加えられている。

主論文後半においては、高温近似をすて、変分法を用いて Boltzmann 方程式の解を求め、低温の様子をしらべた結果

$$\rho = \frac{2\sqrt{2}}{\pi d \hbar^2} \frac{Z^2 e^2 m^{3/2}}{v^3 S^{1/2}} \frac{F(KT)^2 x J_2(T)}{S^{1/2}}$$

なる結果をえている。低温においては格子振動にもとづく抵抗は急激に減少するから、他に抵抗の異常をもたらす原因のない場合には、上記の付加抵抗が認められるはずであるが、現在までのところ、この領域にあたる実験は乏しい。

参 考 論 文

その 1: N 型半導体 Ge に、不純物として Ga を入れた場合、普通には電気抵抗、および Hall 係数の温度変化 ($\frac{1}{T}$ -plot) は、一回の knick を示すが 10^{16} 程度の不純物を入れた場合には、2 段階の knick があらわれる。この現象に対して、不純物の電子が帯構造をもつエネルギー準位をもつとし、かつ励起帯に付ずいする電子の易動度が、基底帯のそれに比べてかなり大きいと仮定して、現象論的記述を与えたものである。

その 2: 不純物電子の振舞いは参考論文その 1 にみるごとく帯構造を仮定して理解されるようにみえる。しかし、一方濃度から考えると、もし不純物が規則的配置をしているものなら、帯構造のひろがりはいきわめて小さいはずであると考えられる。この gap をうめるものは不純物の配置が乱雑であるという事実であることを示そうとしたのが、この論文である。方法は局所的な配置を無限に延長した規則格子を幾種類も考えて band の下端の状態のエネルギーを不純物の配置に関して平均した。結果として、たとえば基底状態の場合には、濃度が 10^{18} 程度から帯構造を示すことが導かれ、妥当な値をえている。

その 3: 非極性の半導体において、電子の易動度 μ の温度変化は、低温では $T^{-1.5}$ に比例するが、ある温度 T_0 以上では $T^{-2.3}$ に比例するようになる。この現象に対する説明として、通常の機構より一歩進み格子振動の量子が 2 個関係する過程 (2 phonon process) の重要性を指摘した論文である。細部の誤りはその後訂正されたが、考え方においてはその後も外国で同趣旨の計算が行なわれている。

その 4: 半導体の熱伝導度 κ は低温では温度とともに増加し、格子振動のみによって理解することができるが、高温になると (intrinsic range), 再び増加する場合が認められており (Ge, Pb, Te 等), 特別の説明が必要である。従来は

(i) Exciton によるとする考え (Ioffe)

(ii) Ambipolar diffusion によるとする考え (Price)

が提出されているが、いずれも定量的一致をみていない。本論文において著者等は、これらにかわるものとして

(iii) Resonance transfer による機構

を提案し、評価した。近似的計算の結果は、伝導帯よりみて不純物準位の深さを E_0 、原子価帯の深さを E_1 とすれば

$$\kappa \propto N^2 T^{5/4} e^{-(E_1 - 4E_0)/kT} \quad (\alpha \gg \beta)$$

$$\kappa \propto N^2 T e^{E_0/kT} \quad (\alpha \ll \beta)$$

ここに α^{-1} は Bohr 半径、 β^{-1} は screening 半径である。理論の結果は、このような効果が、たしかに intrinsic range で実験と同傾向を示すことが導かれるが、濃度に対する依存性をしらべられる実験はまだあらわれていない。

論文審査の結果の要旨

固体における輸送現象に関しては、かなり以前にこれを理解する理論的なわくが与えられたにもかかわらず、その後の進歩は必ずしもすみやかでなかった。しかし近年応用上の必要と実験技術の進歩により、かなり細部にわたる実験的資料がえられるようになり、理論的にも固体内におこる細かい過程を解析することが可能になってきた。主論文において著者がとりあげた Matthiesen 則からのずれの問題もその一例である。しかし、上記の事情から理論的解析の試みは数少ない現状で、著者の所論はある意味でこの分野の定量的研究に先鞭をつけたものといってもよい。この現象の原因としては、(i) 電子の相関効果、(ii) 不純物の存在による母体の振動スペクトルの変化、(iii) 不純物自体の熱運動による電子の非弾性散乱、(iv) 電子による遮蔽の温度変化、(v) 荷電をはこぶ粒子の数の温度変化、等が考えられるが、著者はこのうちで特に (iii)、すなわち、不純物自体の熱運動による電子の非弾性散乱の効果が重要であろうとの見通しをたて、簡単な模型を用いて理論的に定量的結論を導いたのである。理論の結果は数値の程度と、濃度ならびに温度に対する依存性において、実験と一致する特性を示し、他の原因の見積りに関して考慮の余地のあることを考えても、なおこの (iii) の過程が、この現象の要因であることを強く示していると見ることができる。

参考論文はいずれも著者の半導体に関する造詣をうかがわせるものであるが、そのうち特にその 3 は重要であり、非極性半導体における、易動度の温度変化を理解する上に、格子振動の量子 (phonon) が 2 個関与する過程の重要性を指摘した最初の論文として、海外の注目をも受けたものである。

これを要するに、著者の主論文は金属の残留抵抗に対する不純物の熱運動の影響に関する定量的説明の可能性をはじめて示したものであり、参考論文もまた半導体内における輸送現象に関する創意ある見解を含んでいる。よって、著者の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。