

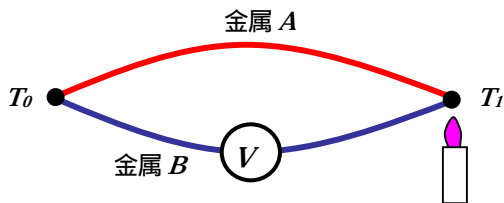
Appendix ペルチェ効果の基礎理論

熱電効果

金属や半導体における電気と熱との間にはゼーベック効果、ペルチェ効果、トムソン効果の3つの現象があり、これらを熱電効果(thermoelectric effect)と呼びます。

ゼーベック効果(Seebeck effect) : 熱 電気変換

1821年にゼーベック(T.J. Seebeck)により発見された現象で、2つの異なる金属 A, B の両端を接続し、2つの接続点に温度差があると($T_0 \neq T_1$)、2つの金属 A, B からなる回路に起電力 V が生じます。この起電力 V を熱起電力(thermo electromotive force)と言います。



図A ゼーベック効果

微小電圧測定や抵抗測定においては、この起電力が誤差要因になるので注意が必要です。また、この効果を逆に利用したのとして熱電対(thermocouple)温度センサとサーモパイル(thermopile)赤外線センサなどがあります。

温度差 $T=(T_1-T_0)$ に対する熱起電力 V_{AB} の変化率

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT} \dots\dots\dots(a)$$

は金属 A, B の組合せで決まり、相対ゼーベック係数と言います。また、相対ゼーベック係数 α_{AB} は温度 T により決まり T の高次式になり、熱起電力 V_{AB} は

$$V_{AB} = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{AB} dT = a + b\Delta T + c\Delta T^2 \dots \dots(b)$$

となります。主な金属(合金)の組合せの相対ゼーベック係数 α_{AB} を表 A に示します。一方の物質を鉛とした場合のゼーベック係数を絶対ゼーベック係数、または、熱電能(thermoelectric power)と言います。金属の代わりに半導体を用いた場合の絶対ゼーベック係数は非常に大きくなり、 p 型 Si 結晶で $300 \sim 1000 \mu V/K$ 、 n 型 Si 多結晶で $-200 \sim -500 \mu V/K$ になります。主な物質の熱電能を表 B に示します。

表 A 主な金属(合金)の相対ゼーベック係数 α_{AB}

銅-コンスタンタン	42.7
クロメル-アルメル	41.0
白金-10%白金・ロジウム	6.4
鉄-コンスタンタン	54.9
銀-金	0.4
銅-鉄	12.2
金-白金	7.8

$\mu V/K$

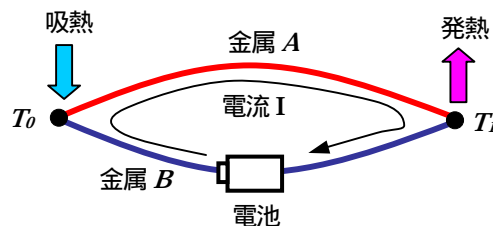
表 B 主な物質の熱電能

Au	+1.9	コンスタンタン	-47	100
Al	-2.0	ZnSb	+220	200
Cu	+4.0	InSb	-130	500
Fe	+13.6	(Bi,Sb ₂)Te	+195	25
Pt	-5.2			

$T=100$ $\mu V/K$

ペルチェ効果(Peltier effect) : 電気 熱変換

1834年にペルチェ(J.C.A. Peltier)により発見された現象で、2つの異なる金属 A, B を接続し、2つの金属からなる回路に電流 I を流すと、接続部に熱の吸収、または放熱が発生します。この効果を利用したのとして熱電冷却素子、すなわち、ペルチェ素子があります。



図B ペルチェ効果

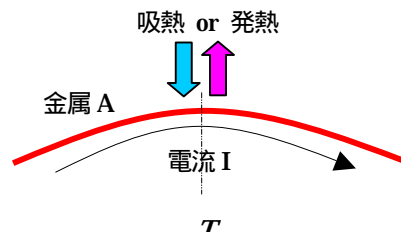
ペルチェ素子に電流 I を流した場合、単位時間当りに吸熱、もしくは放熱する熱量 Q_p は次の関係にあります。

$$Q_p = \pi_{AB} I \dots\dots\dots(c)$$

π_{AB} をペルチェ係数と言います。

トムソン効果(Thomson effect) : 熱、電気 熱変換

1851年にトムソン(W. Thomson/Lord Kelvin)によって発見された現象で、1つの金属において温度差が生じる場合、その金属に電流を流すと温度差が存在する個所で熱の吸収、もしくは発熱が生じます。



図C トムソン効果

電流 I 、温度差 T が存在する場合に生じる単位時間当りの熱量 Q_K は

$$Q_K = KI\Delta T \dots\dots\dots(d)$$

となります。 K をトムソン係数と言います。

ゼーベック効果はペルチェ効果とトムソン効果によると考えられ、熱起電力は

$$V_{AB} = [\pi_{AB}]_{T_0}^{T_1} + \int_{T_0}^{T_1} (K_A - K_B) dT \dots(e)$$

Appendix ペルチェ効果の基礎理論

となります。よって、(b)式より

$$\alpha_{AB} dT = d(\pi_{AB}) + (K_A - K_B) dT \quad \dots (f)$$

ゼーベック係数とトムソン係数の間には

$$(K_B - K_A) = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad \dots (g)$$

が成立しますので、

$$\alpha_{AB} T = \pi_{AB} \quad \dots (h)$$

となります。この関係をトムソンの関係式(Thomson relations)と言います。すなわち、表 A,B のゼーベック係数に基づいてペルチェ係数とトムソン係数を求めることが出来ます。

ペルチェ素子の動作原理
半導体理論の基礎

ペルチェ素子の動作原理を半導体理論により簡単に解説します。金属や半導体中の電子がエネルギー E を持っている状態確率は

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{kT}}} \quad \dots (i)$$

となります。 E_f をフェルミ準位(Fermi level)と言います。 $E = E_f$ とすると、 $f(E) = 1/2$ となるので、フェルミ準位とは状態確率が半分になるエネルギー準位と言えます。

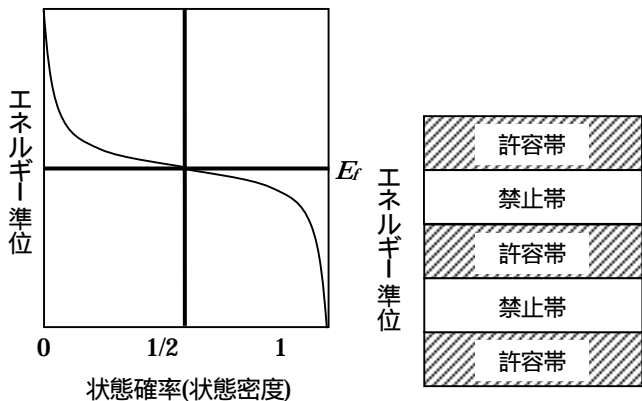


図 D フェルミ分布 $f(E)$

図 E 物質のエネルギー帯

物質中の電子の取りうるエネルギー準位はとびとびであり、電子の取りうるエネルギー帯を許容帯(allowed band)、取りえないエネルギー帯を禁止帯(forbidden band)と言います。また、電子で埋まっている許容帯を充満帯(filled band)と言い、充満帯では自由に電子が動くことが出来ないので、この帯の電子は電気伝導を行うことは出来ません。また、電子が部分的に満たされている許容帯を伝導帯(conduction band)と言い、この帯の電子は自由に移動することが出来るので自由電子(free electron)と言います。また、導電体中の自由電子は電気伝導を担うため伝導電子(conduction electron)とも言います。

金属と N, P 型半導体のフェルミ準位とエネルギー帯との関係の模式図を図 F に示します。すなわち、金属のフェルミ準位は伝導帯中にあり、伝導帯中には多くの自由電子が存在していることを示します。詳細の説明は半導体工学の専門書に譲りますが、N, P 型半導体のフェルミ準位はドナー(donor)とアクセプタ(acceptor)の存在によって決まります。

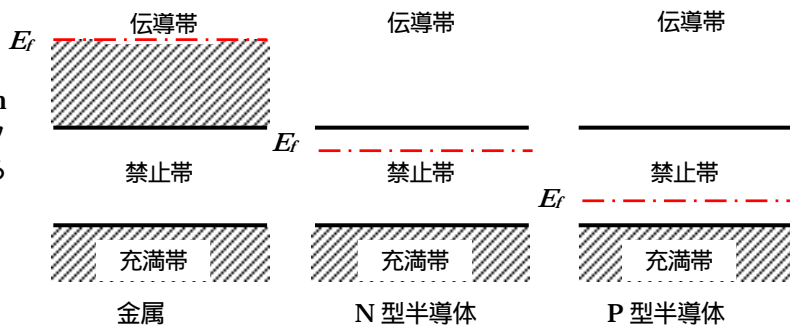


図 F 各物質のフェルミ準位

半導体理論によるペルチェ効果の解説

まず、金属と N 型半導体の接合について考えます。接合前は金属と N 型半導体のフェルミ準位は異なりますが、接合により電子の移動(拡散)によりフェルミ準位が一致します。この電子移動により金属と N 型半導体からなる系の電子のエネルギー分布が均一になります。

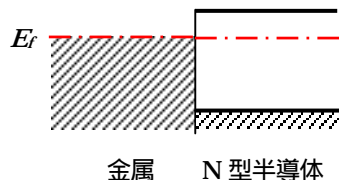


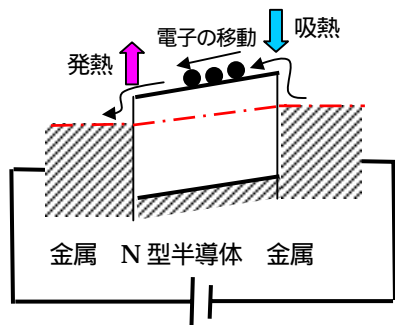
図 G 接合による E_f の一致

次に N 型半導体の両側に金属により接合する場合のエネルギー帯の模式図を図 H に示します。これに外部からの電圧印加により金属と N 型半導体からなる回路に電流を流すと、接合部の一方に吸熱が、そして他方に発熱が生じます。金属のマイナス電極から半導体の伝導体に電子が移動する際、フェルミ準位と N 型半導体の伝導体の底のレベルの差に相当するエネルギーを吸収するため、吸熱が生じます。反対に N 型半導体の伝導体にある電子がプラス電極の金属の伝導体に移る場合は発熱することになります。

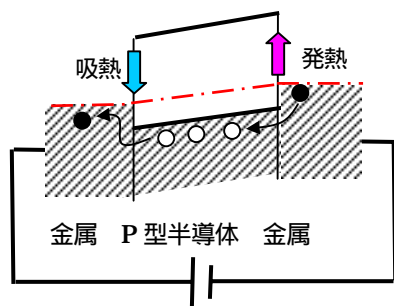
P 型半導体の両側に金属の電極がある場合も同様に考えることが出来ます。但し、ペルチェ効果のメカニズムを考える際、P 型半導体のキャリアーは正孔(positive hole)であることの注意が必要です。

Appendix ペルチェ効果の基礎理論

- (f) 宇佐美晶、玉時康貴：テキストブック電子物性、日本理工出版会
- (g) 下村武：電子物性の基礎とその応用、コロナ社
- (h) 塩山忠義：センサの原理と応用、森北出版

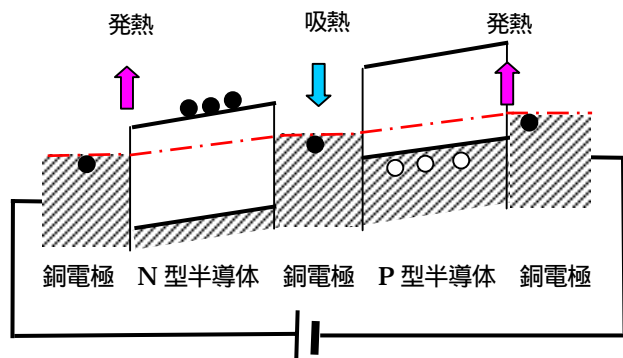


図H 金属-N型半導体でのペルチェ効果



図H 金属-P型半導体でのペルチェ効果

ペルチェ素子はN型半導体とP型半導体、そして銅電極からなっており、半導体理論に従い、その動作原理を図Iで示すことができます。



図I ペルチェ素子の動作原理図

<参考文献>

- (a) M.N.Rudden, J.Wilson, 網川資成訳：固体物性論の基礎、技報堂出版
- (b) 電気学会：物性論、電気学会
- (c) 石黒政一、竹内望、富田彰宏：基礎物性物理学、日新出版
- (d) 森崎弘：最新電子デバイス入門、技術評論社
- (e) 菅博、川畑敬志、矢野満明、田中誠：図説電子デバイス、産業図書