

3 半導体のキャリア密度

3-1 状態密度と分布関数

ここでは、あるエネルギーを持ったキャリア（電子あるいは正孔）がどのくらいそのエネルギー状態に存在しているのかを表す。始めに、キャリアの個数を知るために必要な状態密度と分布関数について説明する。

3-1-1 状態密度

状態密度(density of state) $N(E)$ とは、電子や正孔などのキャリアを収納する器の大きさを示すものをいう。エネルギー間隔 $E \sim E+dE$ の間にある(単位体積あたりの)状態の数 $N(E)dE$ は次式で表される。

$$N(E)dE = 4\pi \left(\frac{2m^*}{h^2} \right)^{3/2} E^{1/2} dE$$

この式の導出は煩雑であるためここでは省略する(中嶋堅志郎著「半導体工学」(オーム社)など)。半導体では、伝導帯および価電子帯を考慮して次のように与えられる。

$$\text{伝導帯底部} \quad N(E)dE = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} dE \quad \cdots(3.1)$$

$$\text{価電子帯頂部} \quad N(E)dE = 4\pi \left(\frac{2m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2} dE \quad \cdots(3.2)$$

エネルギー E と状態数 $N(E)$ の関係は $N(E) \propto \sqrt{E}$ となるため、 N を横軸、 E を縦軸にグラフを描くと放物線を描くことがわかる。

3-1-2 分布関数

分布関数 distribution function(または分布則)とは、状態密度(キャリアの器)に実際キャリアが存在しているかどうかの確率を表すものをいう。すなわち、キャリアが存在していれば確率は 1、存在していなければ 0 となる。温度 T が 0[K] であれば、電子(または正孔)は低い順位から順に占有していくが、温度が上がると必ずしも低い順位に電子が占められていくとは限らない。

固体中の電子に適用可能な分布関数は次式で与えられている。

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad \cdots(3.3)$$

この分布関数を**フェルミ・ディラクの分布関数(Fermi-Dirac distribution function)**という。ここで、 E_F は**フェルミエネルギー-Fermi energy(フェルミ準位 Fermi level)**といい、 $f(E) = 1/2$ の時のエネルギー値を示す。この分布関数を図 1 に示す。 $T=0$ [K] では $f(E)$ が階段状に変化するが、温度が高くなるにつれて変化がなだらかになってくる。特にエネルギーが高い範囲では

$$f(E) \cong e^{-(E-E_F)/kT} \quad \cdots(3.4)$$

と近似できる。

・正孔の存在確率

正孔の存在確率は、電子の存在していない確率に相当するので

$$1 - f(E) = \frac{1}{e^{(E_F-E)/kT} + 1} \quad \cdots(3.5)$$

となる。特にエネルギーが高い範囲では次のように近似できる。

$$1 - f(E) \cong e^{-(E_F-E)/kT} \quad \cdots(3.6)$$

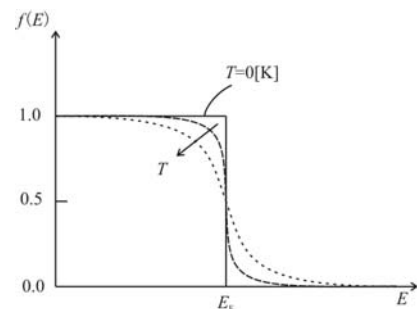


図 1 フェルミ分布関数