

1 はじめに：われわれは GaAs において上の谷間の電子の capture rate が下の谷間の電子のそれよりも大きいことに基づく負性抵抗の存在を理論的に証明することができた。このメカニズムは GaAs の低周波振動特性や同一試料で2種類の振動が発生する実験事実をよく説明するばかりでなく、他の帯構造をもつ半導体での負性抵抗の発生制御の可能性を示している (GaAs の低周波振動のメカニズムとして impurity barrier による負性抵抗も考えられたが、検討の結果、室温では不可能と考えられる)。

2 上下の谷間の電子に対する捕獲断面積の計算：電子はフォノンを1個づつ放出しながらカスケード的に捕獲されるとして $Lax^{1)}$ は Si, Ge における Coulomb attractive trapping center と neutral center の捕獲断面積を理論的に求め実験とよく合う結果を得ている。われわれは Lax 理論を GaAs に適用し、attractive center と neutral center の上下の谷間の電子に対する捕獲断面積を求める。attractive center としては donor-like impurity, neutral center としては acceptor-like impurity を考えればよい。捕獲断面積 σ は

$$\sigma = \int E_0 \exp(-E_0/kT) \sigma(E) dE_0 / \int E_0 \exp(-E_0/kT) dE_0, \quad (1)$$

$$\sigma(E_0) = \int \sigma(E_0, U) P(U) dU, \quad (2)$$

$$\sigma(E_0, U) = \int_0^{\infty} 4\pi r^2 dr [E(r)/E_0] \{1/l[E(r), E_0+U]\}, \quad (3)$$

で与えられる。ここで E_0 : 電子の運動エネルギー, U : binding energy, $P(U)$: sticking probability, r : trap center からの距離, γ_0 : 衝突により E_0+U のエネルギー損失の可能な最大の r , $E(r) = E_0 + V(r)$, $V(r)$: trap center によるポテンシャル, $1/l[E(r), E_0+U]$: Lax により定義された differential reciprocal mean free path である。GaAs の下の谷間の電子に対しては polar optical scattering が支配的で、エネルギー E の電子の緩和時間は

$$1/\tau_{po} = eF^*(2N_{ph} + 1) / (2m_1 E)^{1/2} \quad (4)$$

で与えられる²⁾。ここで e : 電子電荷, N_{ph} : 定常状態での optical phonon 濃度, m_1 : 下の谷間の有効質量, F^* : 有効電界である。上の谷間の電子に対しては intervalley scattering が支配的で緩和時間 τ_{int} は次式で与えられる³⁾

$$1/\tau_{int} = [2D^2 m_2^{(u)3/2} / 3 \cdot 2^{1/2} \pi^3 \rho \omega] [e^\lambda - 1]^{-1} [(E + k\omega - E_{o2})^{1/2} + e^\lambda (E - k\omega - E_{o2})^{1/2}] \quad (5)$$

ここで, D : coupling constant, $m_2^{(u)}$: density of state mass, ρ : GaAs の密度, $\lambda = k\omega/kT$, ω : 遷移にきくフォノンの角振動数, E_{o2} : 上の谷間の底のエネルギー。

(1)~(4)式により下の谷間の電子に対する Coulomb attractive center の捕獲断面積として $4.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ が得られた。上の谷間の電子に対しては (1)~(3)と(5)式により、 $2.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ の値を得た (ただしこの場合上の谷間に付随するレベルを考慮している)。他方 neutral center は分極によつて $V(r) = -A/r^4$ ($r \geq R$), $V(r) = -A/R^4$ ($0 \leq r \leq R$) のポテンシャルを電子におよぼす。われわれはこのモデルによつて、下の谷間の電子に対する neutral center の捕獲断面積として $1.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, 上の谷間の電子に対して $1.5 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ の値を得た。上下の谷間の電子に対する捕獲断面積を別々に求めた実験はないが、上記の値は実験値 ($2 \sim 5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$) をよく説明する

と思われる。以上の結果から上下の谷間の電子の capture rate の比, $C_2/C_1 = (m_1/m_2)^{1/2} (\sigma_2/\sigma_1)$ を求めると attractive center に対しては 2.2, neutral center に対しては 63 となった (m_2 : 上の谷間の電子の geometric mean mass).

3 電流・電圧特性: 上の谷間の電子の capture rate が下の谷間の電子の rate の $1+A \equiv C_2/C_1$ 倍であるとすれば, 全伝導電子濃度 n に対する rate equation は

$$dn/dt = gN^- - C_1(1 + An_2/n)N^0n \quad (6)$$

で与えられる。ここで, g : generation rate (電界に依存しないと考える), N^- : 電子をとらえている center の濃度, N^0 : 空の center の濃度, n_2 : 上の谷間の電子濃度。ここでさらに $n_2/n = (F/F_0)^{\dagger} / \{1 + (F/F_0)^{\dagger}\}$ の Kroemer³⁾ の関係式を用いる。F は電界, F_0 は reference field である。(6)式から任意の電界における定常状態での全伝導電子濃度 n_s を求めることができる。例えば neutral center の場合は (6)式で $N^0 = N - N_d + n$, $N^- = N_d - n$ (N : neutral center の濃度, N_d : shallow donor 濃度) とおくと, $N \approx N_d \gg n_{os}$ の時は $n_s = n_{os}/K^{1/2}$, $N \gg N_d \gg n_{os}$ の時は $n_s = n_{os}/K$ と近似できる。ここで, n_{os} : $F=0$ の時の電子濃度, $K \equiv 1 + A(F/F_0)^{\dagger} [1 + (F/F_0)^{\dagger}]^{-1}$ である。 n_s を用いると定常状態での電流(I)・電界(F)特性は

$$I = n_s e v_0 \cdot [(F/F_0) + B(F/F_0)^5] / [1 + (F/F_0)^{\dagger}] \quad (7)$$

となる。ここで $B = \mu_2/\mu_1$ (μ_1, μ_2 はそれぞれの谷間の移動度), $v_0 = \mu_1 F_0$ 。neutral center に対しては, $1+A = 63$ だから, $n_s = n_{os}/K^{1/2}$ の時の負性抵抗の閾電界 F_{th} は 1.35×10^3 V/cm, $n_s = n_{os}/K$ の時は 1.05×10^3 V/cm となり Gunn 振動のそれよりかなり小さくなり, 低周波振動での実験値 ($2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$ V/cm) の範囲内にある。従って F_{th} の実験値が広範囲にわたっているのは主に試料の doping の違いによるものと考えられる。電圧印加直後, trapping が進行していない時 ($A=0$) は (7)式で $n_s = n_{os}$ とおき I-F 特性 ($t=0+$) が得られる(図1参照)。この時の F_{th} は約 3×10^3 V/cm で, これが Gunn 振動特性に対応する。従って n_s 積が満されると電界印加後初期の内は trapping の関与しない速い振動(Gunn 振動)が生じ, 次に低周波振動が発生することになり, 実験結果⁴⁾(図2)をよく説明する。また重要なこととして次の点を挙げる。以上述べてきたメカニズムによると2谷間半導体で質量の比が充分大きくないために負性抵抗の生じない場合でも適当に trap center を dope して負性抵抗を得ることができる。このことは2谷間半導体ばかりでなく, 最近注目されている nonparabolic band をもつ半導

体(InSbなど)にも適用できる。

- 1) M. Lax: Phys. Rev. 4 119 (1960) 1502.
- 2) E. M. Conwell and M. O. Vassel: Phys. Rev. 166 (1968) 797
- 3) H. Kroemer: IEEE Trans. ED-13 (1966) 27. ED-15 (1968) 819.
- 4) Y. Tokumaru: Appl. Phys. Lett. 11 (1967) 212.

