

STCTS 法による MOS 構造の界面特性

Characteristics of Interface in MOS Structure by STCTS Method

大 石 義

Tadashi OISHI

(平成元年 1 月 13 日受理)

コンピュータ等の電子機器には MOS デバイスが使用されている。この MOS 構造において、ゲート電圧を印加しておき、さらにパルス電圧を重ねると容量が過渡応答を示す。この原因は、パルス電圧が加わった時に、半導体中のキャリアがトンネル効果により絶縁膜内に入って行き、この中にあるトラップに捕獲され、パルス電圧が OFF になると時間の経過と共に半導体中に放出されて来ることにより容量が過渡応答を示していると考えられる。

この現象を利用して、界面のみでなく絶縁膜中への深さも考慮したトラップ密度 (空間トラップ密度) を求める手法を考え、これを「STCTS 法 (空間トラップ容量過渡応答法)」と呼ぶことにした。

この手法を、Si-MOS で確かめたところ、空間トラップ密度は $10^{24}\text{m}^{-3}\text{eV}^{-1}$ のオーダーであり、絶縁膜中の深いところへ行くにしたがって減少していることが分かった。また、時間の経過と共に絶縁膜中の、より深い所にあるトラップからのキャリア放出が容量の過渡応答に寄与していることが確かめられた。なお、この STCTS 法において測定した信号値から、界面の捕獲断面積を評価することもでき、この値は 10^{-19}m^2 のオーダーとなった。

1. は じ め に

近年、人工知能をめざした第五世代コンピュータの研究がいろいろ行われているが、そのためには超高速論理素子の開発が必要である。これを実現するため、Si では達成できないような超高速論理素子への応用が期待される、電子の移動度や飽和速度が大きい III-V 族化合物半導体素子の開発研究が行われているが、まだ数多くの問題点を抱えている。

コンピュータ等の電子機器に使用されているデバイスの特性、信頼性、寿命などは、本来、

表面の性質に強く依存するため、半導体の表面に良好な界面特性を持つ絶縁膜を形成する技術の確立が必要である。しかし、化合物半導体の場合、未だにSi半導体のような成果が得られていない。原因はいろいろあると思われるが、その内の一つとして界面準位密度の値がSi-MOSに比べて大きいという点があげられる。そこでこの界面準位密度とこれに影響をおよぼす界面の捕獲断面積についての評価法を、まずSi-MOSで考えてみた。これがIII-V族化合物半導体素子の界面の評価に役立てば超高速論理素子の開発も進展するものと思われる。

MOS構造の界面の電気的性質を正確に知ることは、MOSデバイスの動作特性のモデル化ならびに界面状態の物理的発生原因を明らかにする上で重要なことであり、従来から多くの界面状態の測定方法が提案されている。例えば、低周波C-V法 (quasistatic technique)、グレイ・ブラウン (Gray-Brown) 法、コンダクタンス法、DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy)²⁾³⁾法、ICTS (Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy)⁴⁾法等があるが、このうちDLTS法では、あらかじめ界面状態に捕獲させていた多数キャリアを、温度を低温から次第に高温まで変化させることにより、半導体中へ放出させ、その時の容量の温度特性から界面準位密度のエネルギー分布や捕獲断面積を知ることが出来る。しかし、この方法では温度を変えることによる材質 (例えばSiO₂中のイオン) の変化が予想される。このため、温度を変えないで容量の変化から、界面状態の情報を知るのに適した方法として、ICTS法が考えられた。これは、等温下でMOS構造にゲート電圧を印加して接合付近に空乏層を拡大させておき、それにさらにパルス電圧を印加した時、図1-1の(1)に示されるようにキャリアが空乏層内に入って行き界面で捕獲され、パルス電圧がOFFになると時間と共にキャリアが放出され再び元の空乏層に戻る。この空乏層の幅の変化により容量が過渡応答を示す。この容量の過渡

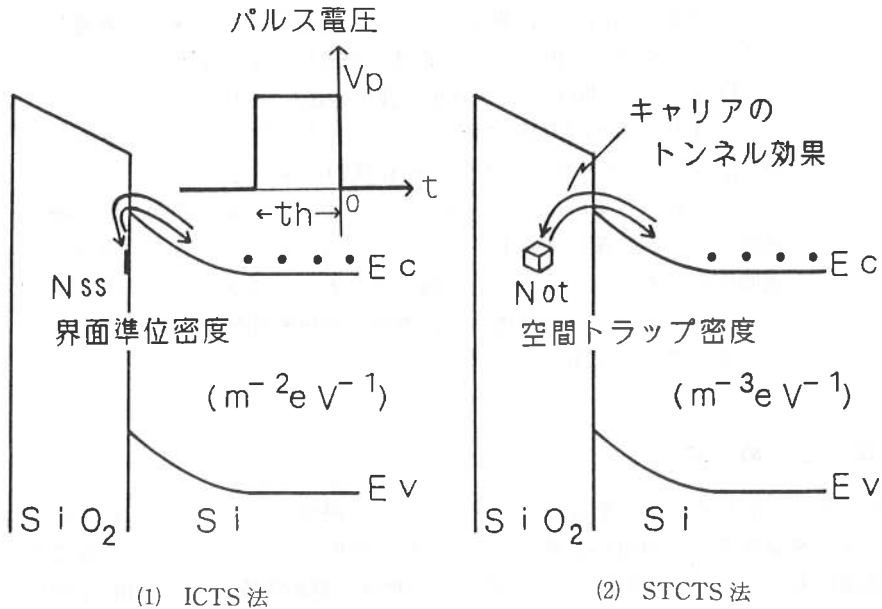


図1-1 ICTS法とSTCTS法の比較

応答から界面準位密度を求めるものである。

ところが、最近の研究の進展にともない、界面のみならず絶縁膜中の界面近傍に存在するトラップを含めた、広い意味での界面準位による影響を考慮する必要ができてきた。図 1-1 の (2) に示されているように、パルス電圧を印加した時に、キャリアが界面で捕獲されるのは勿論であるが、キャリアはトンネル効果により絶縁膜中にも入っていき、この絶縁膜中にあるトラップに捕獲され、パルス電圧が OFF になると、それが時間と共に放出され、これにより容量の過渡応答がおこっていると考えられる。この現象を利用し、絶縁膜中のトラップ密度等を評価する手法を考えた。

従来の界面準位密度の場合は、界面の単位面積当たりを考えているが、絶縁膜中のトラップ密度を考える場合には、絶縁膜中への深さを考慮する関係で、単位体積当たりのトラップということになる。そこで、この絶縁膜中におけるトラップ密度のことを、「空間トラップ密度」と呼ぶことにし、この容量の過渡応答から空間トラップ密度を求める手法を「空間トラップ容量過渡応答法」(Space Trap Capacitance Transient Spectroscopy Method) 略して「STCTS 法」と呼ぶことにした⁵⁾⁶⁾

2. パルス電圧印加による MOS 容量の時間変化

MOS 構造において、ゲート電極に印加した電圧 V_a は、絶縁膜にかかる電圧 V_{ox} 、半導体基板にかかる電圧 (表面電位) $\psi(t)$ 、金属と半導体との仕事関数差 ϕ_{MS} の 3 成分に分配されるため

$$V_a = V_{ox} + \psi(t) + \phi_{MS} \quad (2-1)$$

で与えられる。またゲート電極上の電荷を Q_g 、絶縁膜内の電荷を Q_{ox} 、界面上の電荷を Q_{ss} 、半導体内の電荷を Q_s とすると電荷中性条件より

$$Q_g + Q_{ox} + Q_{ss} + Q_s = 0 \quad (2-2)$$

となる。ここで絶縁膜容量を C_{ox} とすると

$$Q_g = C_{ox} V_{ox} \quad (2-3)$$

であり、絶縁膜内における電荷 Q_{ox} は Q_g 、 Q_{ss} 、 Q_s に比べ非常に小さく、これを無視すると (2-2)、(2-3) より

$$V_{ox} = -\frac{1}{C_{ox}}(Q_{ss} + Q_s) \quad (2-4)$$

を得る。半導体内の電荷 Q_s が、空乏層電荷 (ドナー準位による電荷) Q_D とバルク準位による電荷 Q_T からなるとすると (2-4) は

$$V_{ox} = -\frac{1}{C_{ox}}(Q_{ss} + Q_D + Q_T) \quad (2-5)$$

となる。絶縁膜と半導体との界面から半導体側に向かう位置座標を z 、半導体基板のドナー密度を N_d 、バルク準位密度を $N_{t,i}$ 、時刻 t での空乏層幅を $W(t)$ 、バルク準位の分布関数を $f_T(z, t)$ 、半導体誘電率を ϵ 、電気素量を q とするとガウスの法則を利用して

$$\psi(t) = -\frac{q}{\epsilon} \int_0^{w(t)} z \{N_d + \sum_i N_{ti} f_T(z, t)\} dz \quad (2-6)$$

で与えられる表面電位 $\psi(t)$ を得る。

また界面から絶縁膜中に向かう位置座標を x とすると、絶縁膜内のトラップ密度 (空間トラップ密度) N_{ot} [$\text{m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$] は、絶縁膜中への深さ x とエネルギー E の関数となり、トラップのキャリア占有率 f は x, t, E の関数で表されるから、界面電荷密度 Q_{ss} は

$$Q_{ss} = q \int_{E_v}^{E_c} \int_0^{T_{ox}} N_{ot}(x, E) \{1 - f(t, x, E)\} dx dE \quad (2-7)$$

で与えられる。ここで E_v は半導体の価電子帯の頂上のエネルギー、 E_c は半導体の伝導帯の底のエネルギー、 T_{ox} は絶縁膜の厚さである。ゼロ温度近似をすると、バルク単位の分布関数 $f_T(z, t)$ はフェルミ単位より大きいならば 0、小さいならば 1 となり、各バルク単位の電子放出率を e_{ni} 、 $t=0$ の時のバルク単位による電荷層幅を z_{bi} 、 $t=\infty$ の時の電荷層幅を z_{ai} とする時には (2-6) は

$$\psi(t) = -\frac{q}{2\epsilon} \{N_d W^2(t) + \sum_i N_{ti} \{z_{ai}^2 + (z_{bi}^2 - z_{ai}^2) e^{-e_{ni}t}\}\} \quad (2-8)$$

またドナー単位による電荷 Q_D は

$$Q_D = q N_d W(t) \quad (2-9)$$

バルク単位による電荷 Q_T は

$$Q_T = q \sum_i N_{ti} \{z_{ai} + (z_{bi} - z_{ai}) e^{-e_{ni}t}\} \quad (2-10)$$

で与えられる。これらの式を整理すると

$$\begin{aligned} \phi_{MS} - V_a = & q \int_0^{w(t)} \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon} \right) N_d dz + \frac{q}{C_{ox}} \sum_i N_{Ti} \{z_{ai} + (z_{bi} - z_{ai}) e^{-e_{ni}t}\} \\ & + \frac{q}{2\epsilon} \sum_i N_{ti} \{z_{ai}^2 + (z_{bi}^2 - z_{ai}^2) e^{-e_{ni}t}\} \\ & + \frac{q}{C_{ox}} \int_{E_v}^{E_c} \int_0^{T_{ox}} N_{ot}(x, E) \{1 - f(t, x, E)\} dx dE \end{aligned} \quad (2-11)$$

となるが、十分時間が経過したとき $t=\infty$ とし、その時の空乏層幅を W_a とすると (2-11) は

$$\begin{aligned} \phi_{MS} - V_a = & q \int_0^{w_a} \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon} \right) N_d dz + \frac{q}{C_{ox}} \sum_i N_{Ti} z_{ai} + \frac{q}{2\epsilon} \sum_i N_{ti} z_{ai}^2 \\ & + \frac{q}{C_{ox}} \int_{E_v}^{E_c} \int_0^{T_{ox}} N_{ot}(x, E) \{1 - f(\infty, x, E)\} dx dE \end{aligned} \quad (2-12)$$

となる。この二つの式を整理することにより

$$\begin{aligned} 0 = & \int_{w_a}^{w(t)} \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon} \right) N_d dz + \sum_i N_{Ti} e^{-e_{ni}t} \int_{z_{ai}}^{z_{bi}} \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon} \right) dz \\ & + \frac{1}{C_{ox}} \int_{E_v}^{E_c} \int_0^{T_{ox}} N_{ot}(x, E) \{f(\infty, x, E) - f(t, x, E)\} dx dE \end{aligned} \quad (2-13)$$

を得る。単位面積当たりの MOS 容量 C は、空乏近似の半導体容量では

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon} \quad (2-14)$$

であるから、(2-13) の右辺第一項の被積分項は

$$\left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon}\right) N_d dz = \frac{1}{C} N_d \epsilon d\left(\frac{1}{C}\right) \quad (2-15)$$

となる。また、ある時刻 t での容量を $C(t)$ 、十分時間が経過した後の時刻 ∞ での容量を $C(\infty)$ とすると (2-13) は

$$\begin{aligned} \frac{1}{C^2(t)} - \frac{1}{C^2(\infty)} &= \frac{2}{\epsilon N_d} \sum_i e^{-\epsilon_n t} \int_{z_{bi}}^{z_{oi}} N_{ti} \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{z}{\epsilon}\right) dz \\ &+ \frac{2}{\epsilon N_d C_{ox}} \int_{E_v}^{E_c} \int_0^{T_{ox}} N_{ot}(x, E) \{f(t, x, E) - f(\infty, x, E)\} dx dE \quad (2-16) \end{aligned}$$

と表すことが出来る。但し $C(t)$ 、 $C(\infty)$ 、 C_{ox} は単位ゲート電極面積当たりの値である。この式の右辺第一項が半導体バルク単位の効果、第二項が界面効果である。半導体バルクトラップよりも、絶縁膜内のトラップのほうが多い MOS 構造では、(2-16) の右辺の第一項は省略出来る。ここで新しく

$$\frac{1}{C^2(t)} - \frac{1}{C^2(\infty)} \equiv F \quad (2-17)$$

と定義すると

$$S_t \equiv t \frac{dF}{dt} = \frac{2}{\epsilon N_d C_{ox}} \int_{E_v}^{E_c} \int_0^{T_{ox}} N_{ot}(E, x) t \frac{d}{dt} \{f(t, x, E) - f(\infty, x, E)\} dx dE \quad (2-18)$$

となる。この $S_t \equiv t \cdot dE/dt$ は絶縁膜中のトラップに捕獲、放出されたキャリアによる容量の過渡応答からくる値であり、これを STCTS 信号と呼ぶことにした。この STCTS 信号は時刻

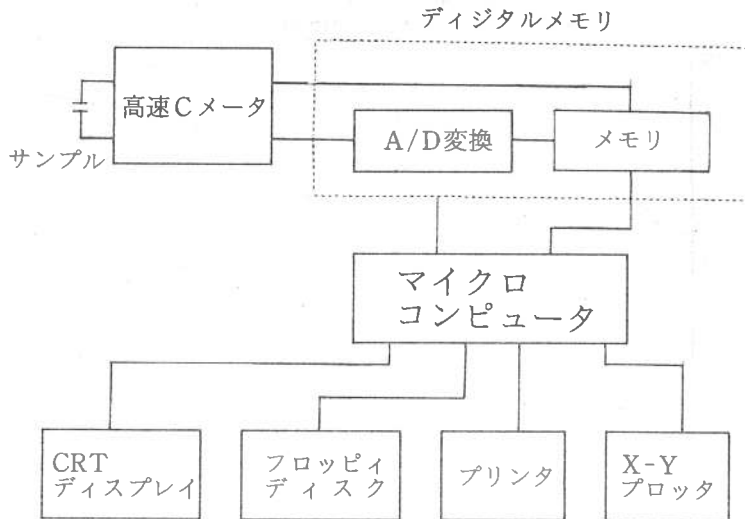


図 2-1 STCTS 信号測定システム

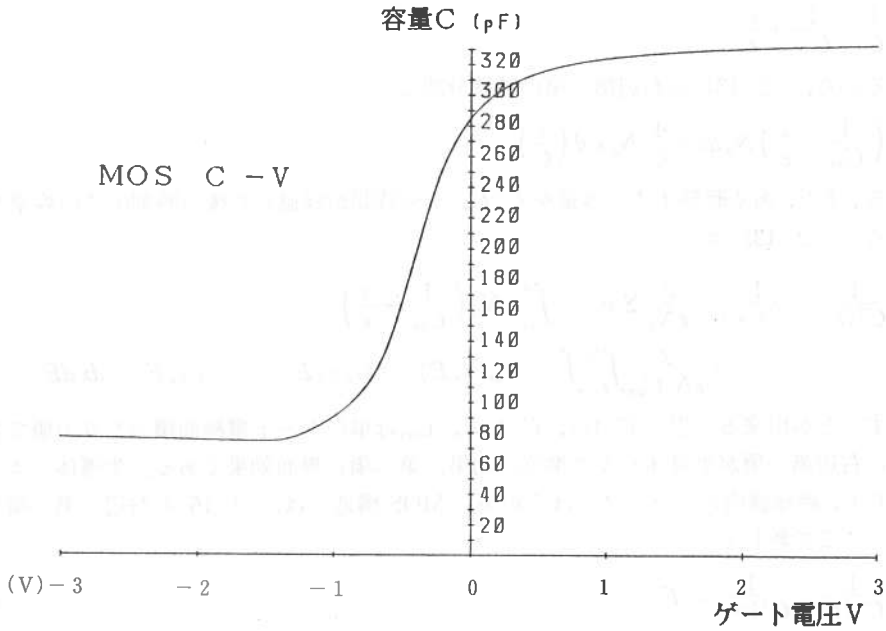


図 2-2 C-V 特性曲線

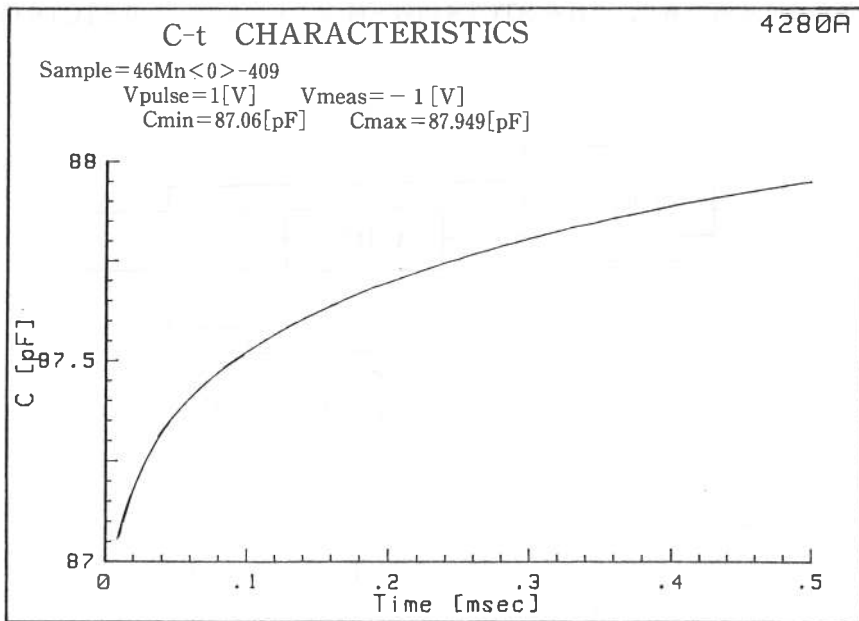


図 2-3 容量過渡応答特性曲線

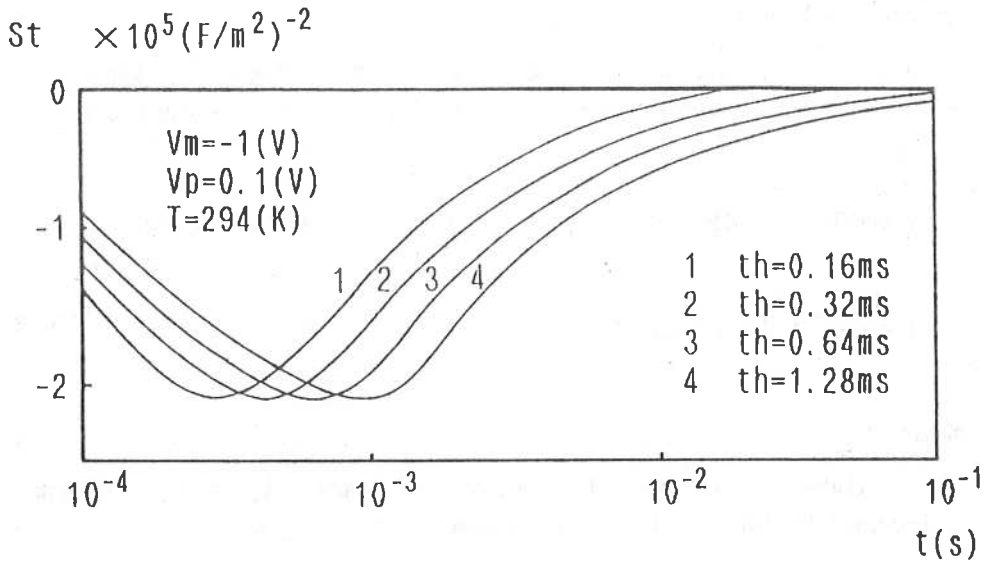


図 2-4 STCTS 信号の時間特性

t における容量 $C(t)$, 十分時間が経過した後の容量 $C(\infty)$ の実測から求めることが出来る。

STCTS 信号の測定システムは図 2-1 に示す通りである。MOS 容量の過渡応答波形を高速 A/D 変換し, それをデジタルメモリに保存し, その後にデータを取り出してマイクロコンピュータで処理した。

この測定に用いた MOS ダイオードは n 形基板 Si で SiO_2 膜の厚さは 1180 \AA である。この MOS ダイオードの C-V 特性を図 2-2 に示す。また, この MOS ダイオードに -1.0 V のゲート電圧を印加しておき, さらに $V_p = 0.10 \text{ V}$ のパルス電圧を重ねた時の, 容量の過渡応答特性曲線の例を図 2-3 に示す。これをコンピュータ処理して得た STCTS 信号 (S_t) と時間 (t) との関係を示したのが図 2-4 である。この結果から, STCTS 信号は時間変化に対して最小値を示し, その後 0 に近づいて行くことがわかった。

なお, パルス電圧印加時間 t_h を 0.16 ms , 0.32 ms , 0.64 ms , 1.28 ms と増加させていくと, S_t が最小値を示す時刻も右にシフトして行くことがわかった。

このようにして, STCTS 信号は容量の実測値をコンピュータ処理して求めることが出来るので, (2-18) においてキャリア占有率が求まれば, 絶縁膜中への深さを考慮した空間トラップ密度 N_{ot} を評価することが可能となる。

3. 空間トラップのキャリア占有率の時間的变化

MOS 構造において, 絶縁膜中の空間トラップ (その密度: N_{ot}) が, 半導体の多数キャリア (その密度: n_0) を捕獲, 放出することによるキャリア占有率 f は Shockley-Read-Hall (S.R.H) 統計を適用すると

$$\frac{d(N_0 f)}{dt} = \sigma_n V_{th} n_s N_{ot} (1-f) - e_n N_{ot} f \quad (3-1)$$

で与えられる。ただし、 σ_n はトラップの捕獲断面積、 v_{th} は電子の熱速度、 e_n は空間トラップの放出率である。また、ある時刻に空間トラップに捕えられているキャリア密度を n_t とすると

$$f = \frac{n_t}{N_{ot}} \quad (3-2)$$

となり、 f が時間 (t) の関数であるから、(3-1)を f について解くと、初期値を A とした場合

$$f = \frac{1}{1 + e_n \tau_n} + \left(A - \frac{1}{1 + e_n \tau_n} \right) e^{-\left(\frac{1}{\tau_n} + e_n\right)t} \quad (3-3)$$

ただし

$$\sigma_n v_{th} n_s \equiv \frac{1}{\tau_n} \quad (3-4)$$

また(3-3)は時刻 $t=0$ のとき $f=A$ となるから、ゲート電圧に V_a (このときの表面電位は ψ_a) を十分な長い間印加して、あらかじめ定常状態にしておいたとき

$$f = A = \frac{1}{1 + e^{-\frac{E - (E_{F0} + q\psi_a)}{kT}}} \equiv f(\psi_a) \quad (3-5)$$

となる。ここで、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 E_{F0} はバルク中のフェルミ準位である。次に時刻 $t=0$ でゲート電圧を V_a から V_b (この時の表面電位は ψ_b) に突然変化させると $t=\infty$ では(3-3)は

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{1 + e_n \tau_n} \\ &= \frac{1}{1 + e^{-\frac{E - (E_{F0} + q\psi_b)}{kT}}} \equiv f(\psi_b) \end{aligned} \quad (3-6)$$

で表される。したがって、ある時刻 t での空間トラップのキャリア占有率 f は、(3-3)、(3-5)、(3-6)より

$$f = f(\psi_b) + [f(\psi_a) - f(\psi_b)] e^{-\frac{t}{\tau_n(\psi_b)}} \quad (3-7)$$

となる。これより、時刻 $t=t_h$ までゲート電圧 V_b を印加した時には

$$f(t_h) = f(\psi_b) + [f(\psi_a) - f(\psi_b)] e^{-\frac{t_h}{\tau_n(\psi_b)}} \quad (3-8)$$

となる。この $f(t_h)$ をあらたに初期値とみなして $t=0$ でゲート電圧を V_b から V_a に戻すと、時刻 $t=\infty$ では $f=f(\psi_a)$ となるから(3-3)より、時刻 t において

$$f(t) = f(\psi_a) + [f(\psi_b) - f(\psi_a)] \left\{ 1 - e^{-\frac{t_h}{\tau_n(\psi_b)}} \right\} e^{-\frac{t}{\tau_n(\psi_a)}} \quad (3-9)$$

で与えられる $f(t)$ を得る。

MOS構造において、ゲート電圧 V_a をあらかじめ印加しておき、次に V_b なる電圧パルスを時間 t_h だけ印加してから、直ちにもとの電圧 V_a にもどす。時間 t_h 内に、酸化膜内の空間トラップ

に捕獲された多数キャリアが、ゲート電圧 V_a に戻した時点で再び空間トラップから半導体内に戻されていく。この時の空間トラップのキャリア占有率 f は時間 t と共に減少していく。この減少特性を表現している式が (3-9) である。

ここで、(2-18) で表される STCTS 信号の式の中にある時刻 t での空間トラップのキャリア占有率 $f(t)$ と $t=\infty$ でのキャリア占有率 $f(\infty)$ との差について検討する。 $f(t)$ は前式で与えられており、 $f(\infty)$ は (3-9) より $f(\infty)=f(\psi_a)$ となる。したがってこの二式より

$$f(t)-f(\infty)=[f(\psi_b)-f(\psi_a)]\left[1-e^{-\frac{t}{\tau_n f(\psi_b)}}\right]e^{-\frac{t}{\tau_n f(\psi_a)}} \quad (3-10)$$

さらにこの式を変形して

$$I \equiv t \frac{d}{dt}[f(t)-f(\infty)] = -\frac{t}{\tau_n f(\psi_a)} [f(\psi_b)-f(\psi_a)] \left[1-e^{-\frac{t}{\tau_n f(\psi_b)}}\right] e^{-\frac{t}{\tau_n f(\psi_a)}} \quad (3-11)$$

を得る。これは STCTS 信号に含まれる式であるから、STCTS 信号要素 I と呼ぶことにする。この STCTS 信号要素 I は時間 t 、絶縁膜中への深さ x 、エネルギー E の関数である。

4. STCTS 信号に最も寄与する絶縁膜中のトラップの位置

STCTS 信号が時間 t の変化に対してピーク特性を示すことはわかったが、この信号が界面から絶縁膜中への位置 x の変化に対して変化することを明確にする。

(3-4) で与えられている時定数 τ_n はキャリアのトンネル効果によって位置 x の関数であるから

$$\frac{1}{\tau_n} = \sigma_n V_{th} n_s = y_0 e^{-\frac{x}{x_0}} \equiv y \quad (4-1)$$

ただし

$$y_0 = \sigma_{no} V_{th} n_s \quad n_s = N_d e^{-\frac{q\psi_0}{kT}} \quad (4-2)$$

ここで x_0 は界面から絶縁膜中へのキャリアの波動関数の減衰定数、 σ_{no} は界面での捕獲断面積である。また (3-11) において

$$\frac{t}{f(\psi_a)} \equiv a \quad \frac{t_h}{f(\psi_b)} \equiv b \quad (4-3)$$

と定義すると (3-11) は

$$I = \left(\frac{t_h}{b} - \frac{t}{a} \right) \{-a y e^{-ay} + a y e^{-(a+b)y}\} \quad (4-4)$$

となる。これを y で微分して

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dy} \left\{ t \frac{d}{dt} [f(t)-f(\infty)] \right\} \\ & = \left(\frac{t_h}{b} - \frac{t}{a} \right) \{-a e^{-ay} + a^2 y e^{-ay} + a e^{-(a+b)y} - a(a+b) y e^{-(a+b)y}\} \end{aligned} \quad (4-5)$$

となる。この式において

$$-a e^{-ay} + a^2 y e^{-ay} + a e^{-(a+b)y} - a(a+b) y e^{-(a+b)y} = 0 \quad (4-6)$$

となる時 I がピークを示す。すなわち、この時の y を y_p とすると

$$y_p = y_0 e^{-\frac{x_p}{x_0}} \quad (4-7)$$

で表される x_p の時 STCTS 信号要素 I はピークを示す。STCTS 信号には絶縁膜内の $x=0$ から $x=T_{ox}$ (絶縁膜の厚さ) まで分布する全てのトラップからのキャリア放出が含まれるが、特に $x=x_p$ 付近に位置するトラップが最も STCTS 信号に影響することになる。

5. STCTS 信号が最小値を示す時刻からの界面の捕獲断面積の評価

STCTS 信号要素 I には、絶縁膜内の $x=0$ から $x=T_{ox}$ (絶縁膜の厚さ) まで分布するすべてのトラップからのキャリア放出が含まれるから、(3-11) で表される STCTS 信号要素 I を x で 0 から T_{ox} まで積分すると

$$J \equiv x_0 \{f(\psi_b) - f(\psi_a)\} \left\{ -1 + e^{-\frac{t}{f(\psi_a)} y_0} + \frac{\frac{t}{f(\psi_a)}}{\frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)}} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)}\right) y_0} \right) \right\} \quad (5-1)$$

ここで $1 > \exp(-T_{ox}/x_0) \cong 0$ とする。(5-1) において時刻 t 、あるいはパルス電圧印加時間 t_h の変化により、 t と t_h を含む 2 つの指数項の効果が、STCTS 信号に大きく影響する。

$$\frac{t y_0}{f(\psi_a)} < 1 \quad \frac{t y_0}{f(\psi_a)} + \frac{t_h y_0}{f(\psi_b)} < 1 \quad (5-2)$$

$$\frac{t y_0}{f(\psi_a)} < 1 \quad \frac{t y_0}{f(\psi_a)} + \frac{t_h y_0}{f(\psi_b)} > 1 \quad (5-3)$$

$$\frac{t y_0}{f(\psi_a)} > 1 \quad \frac{t y_0}{f(\psi_a)} + \frac{t_h y_0}{f(\psi_b)} > 1 \quad (5-4)$$

以上の 3 通りが t 、 t_h の変化によって生じる。(5-2) 及び $t > 0$ を満たすとき

$$t_h < \frac{f(\psi_b)}{y_0} \quad (5-5)$$

となる。この時 (5-1) において、この式の指数項が

$$e^{-\frac{t y_0}{f(\psi_a)}} \cong 1 - \frac{t y_0}{f(\psi_a)} + \frac{t^2 y_0^2}{2 f(\psi_a)^2} \quad (5-6)$$

$$e^{-\left(\frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)}\right) y_0} \cong 1 - \left\{ \frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)} \right\} y_0 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)} \right\}^2 y_0^2 \quad (5-7)$$

と近似出来るような小さなエネルギー領域では (5-1) の J を J_{el} として

$$\frac{J_{el}}{x_0 \{f(\psi_b) - f(\psi_a)\}} = -\frac{t t_h y_0^2}{2 f(\psi_a) f(\psi_b)} \quad (5-8)$$

を得る。しかしエネルギー E が大きくなると (5-4) の場合が生じ 2 つの指数項は省略できるほど小さくなるので、この時の J を J_{eh} として

$$\frac{J_{eh}}{x_0 \{f(\psi_b) - f(\psi_a)\}} = - \frac{\frac{t_h}{f(\psi_b)}}{\frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)}} \quad (5-9)$$

となる。式 (5-8) と (5-9) が一致する時のエネルギーを E_b とすると

$$E_b = E_{F_0} + q\psi_a + kT \ln \left\{ \frac{1}{f_b(\psi_a)} - 1 \right\} \quad (5-10)$$

で表される。ここで

$$f_b(\psi_a) = \frac{1}{4} \{ t y_0^2 A_f t_h + \sqrt{t^2 y_0^4 A_f^2 t_h^2 + 8 t^2 y_0^2 + 8 B_f t y_0^2 t_h} \} \quad (5-11)$$

ただし

$$A_f \equiv 1 - B_f \quad B_f \equiv e^{\frac{q\psi_a - q\psi_b}{kT}} \quad (5-12)$$

となる。ここで J をエネルギー E で、 E_b (価電子帯端) から E_c (伝導帯端) まで積分する。被積分項に含まれる $[f(\psi_b) - f(\psi_a)]$ が $E = E_b$ で 0、 $E = E_c$ でも 0 となるので積分範囲を $-\infty$ から $+\infty$ にすると

$$S_{te} \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} J dE = -\frac{x_0}{2} kT A_f t t_h y_0^2 \left\{ \frac{1}{f_b(\psi_a)} - 1 \right\} - x_0 kT \ln \left\{ 1 + \frac{A_f t t_h}{(t + B_f t_h) \frac{1}{f_b(\psi_a)}} \right\} \quad (5-13)$$

となる。この式は (5-5) を満足する時刻 t 、パルス電圧印加時間 t_h に成立し、エネルギー E が小さい時は $f(\psi_a) \cong 1$ 、 $f(\psi_b) \cong 1$ であるから、さらに (5-13) は $t_h < (1/y_0)$ を満足する時成立することになる。また、パルス電圧印加時間 t_h が $1/y_0$ よりも十分に小さい時には (5-11) において t_h を含む項は $8 t^2 y_0^2$ よりも十分小さいため

$$f_b(\psi_a) \cong \frac{1}{\sqrt{2}} t y_0 \quad (5-14)$$

となる。ゆえに、これを (5-13) に代入し、STCTS 信号が最小値をとる時刻付近では

$$1 > \frac{A_f t t_h f_b(\psi_a)}{t + B_f t_h} \quad (5-15)$$

と仮定し、対数を近似すると

$$S_{te} = -\frac{x_0}{2} kT A_f t t_h y_0^2 \left(\frac{\sqrt{2}}{y_0} - t \right) - x_0 kT \left\{ \frac{A_f t t_h y_0 t}{\sqrt{2} (t + B_f t_h)} \right\} \quad (5-16)$$

を得る。この式より、時刻 t に対する S_{te} が最小値を示す時刻を t_p とする。

$$y_0 = \frac{\sqrt{2} B_f t_h}{(t_p + B_f t_h)^2} \quad (5-17)$$

となる。ここで $y_0 = \sigma_{no} v_{th} n_s$ 、 $n_s = N_d \exp(q\psi_a/kT)$ と定義されているので、STCTS 信号が最小値を示す時刻 t_p は

$$t_p = \frac{\sqrt{2} B_f t_h}{v_{th} N_a e \frac{q \psi_s}{kT} \sigma_{no}} - B_f t_h \quad (5-18)$$

で表される。

この式はパルス電圧印加時間 t_h の関数となっており、また界面の捕獲断面積 σ_{no} を含んでいるため、STCTS 信号の実測値から t_p と t_h を求めれば、界面の捕獲断面積 σ_{no} を評価することが出来る。

図 2-4 で表される STCTS 信号の時間特性のグラフにおいて、それぞれのパルス電圧印加時間 t_h における信号が最小値を示す時刻を求めて、これをグラフに表してみた。図 5-1 は縦軸に t_p 、横軸に t_h をとり、図 5-1 からよみとった実測値を●印でプロットしたものである。

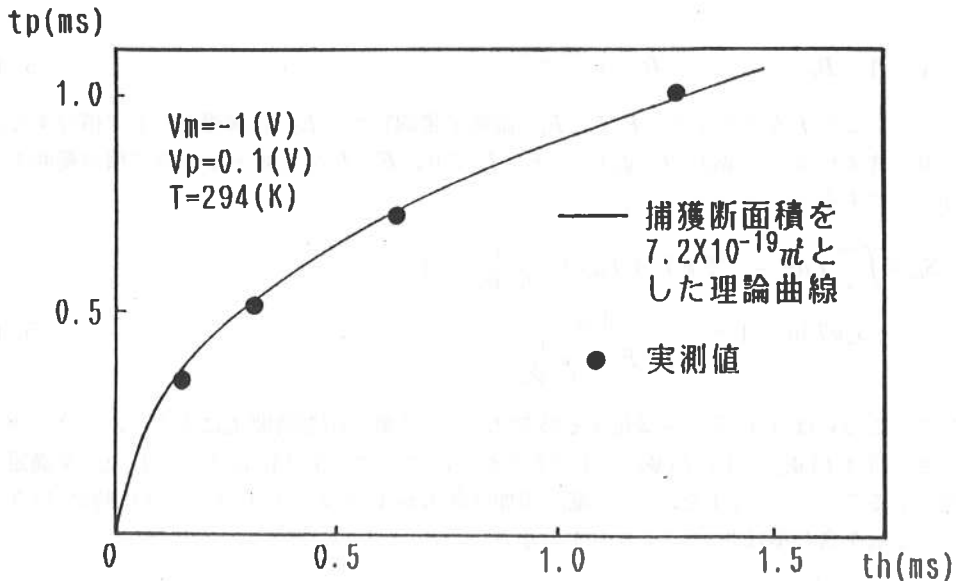


図 5-1 パルス電圧印加時間 t_h と STCTS 信号が最小値をとる時刻 t_p の関係

(5-18) で表される t_p の理論式のグラフは、界面の捕獲断面積の値により、いろいろな傾きのグラフになるが、捕獲断面積の値を $\sigma_{no} = 7.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ としたとき実線で表されるような理論曲線となり、実測値を表す●印と一致した曲線となった。この界面の捕獲断面積の値については、いろいろな報告がなされているが、それらの値は $10^{-19} \text{ m}^2 \sim 10^{-21} \text{ m}^2$ であるから、この実験から求めた値 $\sigma_{no} = 7.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ は多小大きめな値ではあるが妥当な値と思われる⁸⁾⁹⁾

6. STCTS 信号に最も寄与する絶縁膜中のトラップのエネルギー

(3-11) で表される STCTS 信号要素 I はエネルギー E の関数であるから、STCTS 信号に最も寄与するエネルギーについてここで検討してみる。(3-5)、(3-6) より

$$f(\psi_b) - f(\psi_a) = \frac{f(\psi_a)(1 - B_f) - A_f f(\psi_a)^2}{A_f f(\psi_a) + B_f} \quad (6-1)$$

で表される。これを用いると (3-11) は

$$I = \frac{f(\psi_a)(1 - B_f) - A_f f(\psi_a)^2}{A_f f(\psi_a) + B_f} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_n f(\psi_a)}} \right] \left[-\frac{t}{\tau_n f(\psi_a)} \right] e^{-\frac{t}{\tau_n f(\psi_a)}} \quad (6-2)$$

となる。ここで

$$K \equiv \frac{1}{f(\psi_a)} \quad L \equiv -\frac{t}{\tau_n} \quad M \equiv -\frac{t_h}{\tau_n} \quad (6-3)$$

と定義すると (6-2) は

$$I = L \left(\frac{-A_f + A_f K}{A_f + B_f K} \right) \left[e^{LK} - e^{A_f M + (B_f M + L)K} \right] \quad (6-4)$$

となる。これを K で微分した値を 0 と置くと

$$\frac{A_f + B_f}{A_f + B_f K} - L(1 - K) - \left[\frac{A_f + B_f}{A_f + B_f K} - (B_f M + L)(1 - K) \right] e^{M(A_f + B_f K)} \quad (6-4)$$

を得る。これはエネルギー E で微分して、0 に等しいと置いた場合と同じである。この式をさらに整理すると

$$f(\psi_b) + \left(1 - \frac{1}{f(\psi_a)} \right) t y - \left[f(\psi_b) + (t_h B_f + t) \left(1 - \frac{1}{f(\psi_a)} \right) y \right] e^{-\frac{t y}{f(\psi_a)}} = 0 \quad (6-5)$$

を得る。これは STCTS 信号に最も寄与するエネルギーの満足すべき関係式である。

以上の結果より、STCTS 信号に位置的に最も寄与し、しかもエネルギー的にも最も寄与している x_p , E_p は (4-6), (6-5) を連立して求めれば良い。前式より $y \cdot t / f(\psi_a)$ を求めてこれを Z_e とすると

$$Z_e \equiv \frac{y t}{f(\psi_a)} = \frac{-f(\psi_b) + \left[f(\psi_b) + t_h B_f \left(1 - \frac{1}{f(\psi_a)} \right) y \right] e^{-\frac{t y}{f(\psi_a)}}}{f(\psi_a) - 1 - \left\{ f(\psi_a) - 1 \right\} e^{-\frac{t y}{f(\psi_a)}}} \quad (6-6)$$

また (4-6) より $y \cdot t / f(\psi_a)$ を求めこれを Z_x とすると

$$Z_x \equiv \frac{y t}{f(\psi_a)} = \frac{1 - \left(1 - \frac{t_h y}{f(\psi_b)} \right) e^{-\frac{t y}{f(\psi_b)}}}{1 - e^{-\frac{t y}{f(\psi_b)}}} \quad (6-7)$$

したがって、 $x = x_p$ でしかも $E = E_p$ である条件を満足する関係は $Z_e - Z_x = 0$ である。なお、 $x = x_p$ で $E = E_p$ である時の時刻 t は、求めた x_p , E_p を (6-6) に代入することにより知ることが出来る。

この実験で使用した MOS ダイオードにおいて $N_d = 1.35 \times 10^{21} \text{ (m}^{-3}\text{)}$, $\psi_a = -0.35 \text{ (V)}$, $\psi_b = -0.29 \text{ (V)}$, $\sigma_{no} = 7.2 \times 10^{-19} \text{ (m}^2\text{)}$ の場合の x_p , E_p , t , t_h の関係を表 6-1 に示す。この結果 E_p は $E_p = E_{F0} + \psi_a \approx 0.51 \text{ (eV)}$ に固定されていることになった。しかし t_h が大きいときには E_p に変化が見られた。この E_p の上限は $E_{F0} + \psi_b \approx 0.57 \text{ (eV)}$ と考えられる。

	$t_h(s)=1.28 \times 10$		$t_h(s)=1.28$		$t_h(s)=1.28 \times 10^{-1}$		$t_h(s)=1.28 \times 10^{-2}$		$t_h(s)=1.28 \times 10^{-3}$		$t_h(s)=6.40 \times 10^{-4}$		$t_h(s)=3.20 \times 10^{-4}$	
$X_p(m)$	$t(s)$	$E_p(eV)$	$t(s)$	$E_p(eV)$	$t(s)$	$E_p(eV)$	$t(s)$	$E_p(eV)$	$t(s)$	$E_p(eV)$	$t(s)$	$E_p(eV)$	$t(s)$	$E_p(eV)$
0	—	0.542	0.0122	0.542	0.0178	0.534	0.0484	0.512	0.053	0.510	0.053	0.510	0.053	0.510
1×10^{-11}	—	0.542	0.0139	0.542	0.0222	0.532	0.0576	0.511	0.061	0.510	0.061	0.510	0.061	0.510
1×10^{-10}	0.0452	0.542	0.0474	0.541	0.143	0.517	0.196	0.510	0.196	0.510	0.197	0.510	0.197	0.510
1×10^{-9}	2.54×10^4	0.510	2.54×10^4	0.510	2.54×10^4	0.510	2.54×10^4	0.510	2.54×10^4	0.510	2.54×10^4	0.510	2.54×10^4	0.510
2×10^{-9}	1.22×10^{10}	0.510	1.22×10^{10}	0.510	1.22×10^{10}	0.510	1.22×10^{10}	0.510	1.22×10^{10}	0.510	1.22×10^{10}	0.510	1.22×10^{10}	0.510

表 6-1 STCTS信号に最も寄与する位置とエネルギー

パルス電圧印加時間 t_h が小さいとき、STCTS 信号に最も寄与するエネルギーは $E_{F_0} + \psi_2$ のところであることがわかったから、エネルギーを固定して STCTS 信号要素 I と界面から絶縁膜中への距離 x の関係を (3-11) を用いて求めてみる。

図 6-2 は界面での捕獲断面積 $\sigma_{no} = 7.2 \times 10^{-19}$ (m²)、STCTS 信号に最も寄与するエネルギー $E = 0.51$ (eV)、パルス電圧印加時間 $t_h = 0.64$ (ms) の時のそれぞれの時刻 t における STCTS 信号要素 I と絶縁膜中への深さ x の関係を求めたものである。このグラフより、それぞれの時刻においていろいろな深さからのキャリア放出が I に寄与しているが、最も寄与している深さは時間の変化と共に絶縁膜中深く入っていることが分かる。すなわち、時間と共に、より深い所にあるトラップからのキャリア放出が STCTS 信号に寄与している。

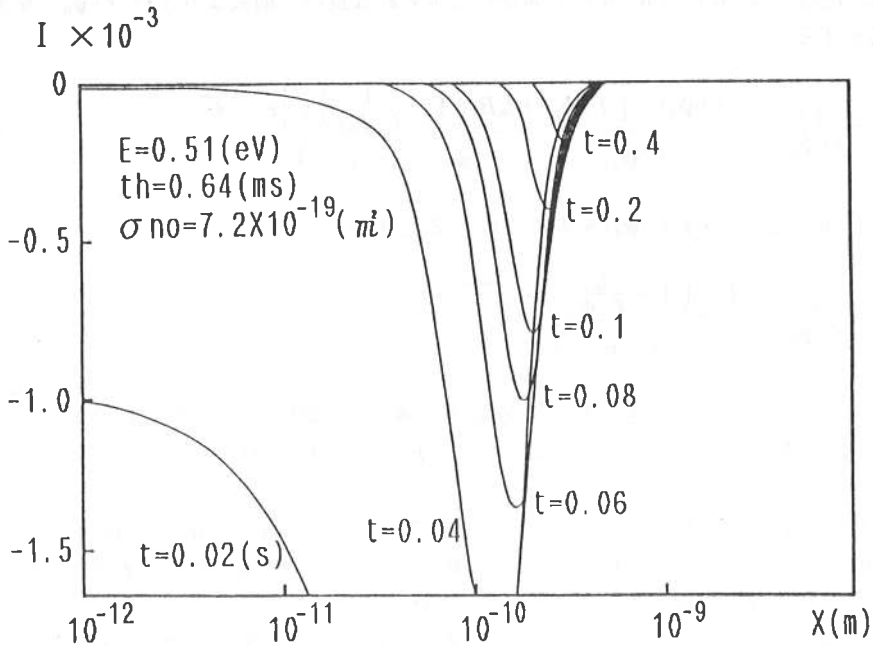


図 6-2 STCTS 信号要素 I と酸化膜中への距離 x との関係

7. STCTS法による空間トラップ密度の評価

STCTS信号要素 I を絶縁膜中への深さで積分した式は(5-1)で表されるが(5-4)の条件が成立する大きい時間領域では二つの指数項は省略できる。すなわち

$$e^{-\frac{t\psi_0}{f(\psi_0)}} \cong 0 \quad e^{-\left(\frac{t}{f(\psi_0)} - \frac{t_h}{f(\psi_0)}\right)\psi_0} \cong 0 \quad (7-1)$$

となる。ゆえに(5-1)は

$$J = x_0 \{f(\psi_b) - f(\psi_a)\} \left\{ -\frac{\frac{t_h}{f(\psi_b)}}{\frac{t}{f(\psi_a)} + \frac{t_h}{f(\psi_b)}} \right\} \quad (7-2)$$

で表される。図6-2においてエネルギーは固定して考えたが、実際には、いろいろなエネルギーからのキャリア放出が寄与しているから、これをエネルギー E で価電子帯端 E_v から伝導帯端 E_c まで積分する。被積分項に含まれる $[f(\psi_b) - f(\psi_a)]$ が $E = E_v$ で0、 $E = E_c$ でも0となるので積分範囲を $-\infty$ から $+\infty$ にすると(7-2)は

$$S_{te} \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} J dE = -x_0 k T \ln \left\{ 1 + \frac{A_f t_h}{t + B_f t_h} \right\} \quad (7-3)$$

を得る。(7-3)を用いて(2-18)を表すと、大きい時間領域においてSTCTS信号 S_t は

$$S_t = \frac{2 N_{ot} S_{te}}{\epsilon N_d C_{ox}} \quad (7-4)$$

となる。ただし C_{ox} は単位面積当たりの絶縁膜容量であるから、電極面積が S で絶縁膜容量が C_o の場合は

$$S_t = \frac{2 S N_{ot} S_{te}}{\epsilon N_d C_o} \quad (7-5)$$

で表される。図6-2において、それぞれの時刻 t におけるSTCTS信号に最も寄与する深さ x が与えられるから(7-5)を用いて空間トラップ密度 N_{ot} と絶縁膜中への深さ x の関係を求めることが出来る。

電極面積が $7.85 \times 10^{-7} \text{m}^2$ 、半導体誘電率が $1.06 \times 10^{-10} \text{F/m}$ 、基板不純物濃度が $1.35 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ 、絶縁膜容量が $2.30 \times 10^{-10} \text{F}$ であるMOSダイオードを用いて(7-5)より空間トラップ密度 N_{ot} を求めると図7-1のような結果になる。これより界面から少し入った位置でトラップ密度がピークを示し、その後絶縁膜中深く入るに従って減少していることが分かる¹⁰⁾

8. ま と め

MOS構造にゲート電圧を印加しておき、さらにパルス電圧を重ねた時の容量の過渡応答から求めることが出来るSTCTS信号は、パルス電圧印加時間 t_h が異なると、最小値をとる時刻 t_b が変化する。この t_h と t_b の関係から界面の捕獲断面積 σ_{no} を評価することが出来、 $\sigma_{no} = 7.2 \times 10^{-19} \text{m}^2$ を得た。捕獲断面積の値については、いろいろな報告がなされているが、いずれの値も $10^{-19} \sim 10^{-22} \text{m}^2$ のオーダーであり、今回の評価法による値もほぼ妥当な値と考えられる。

またSTCTS信号に最も寄与するエネルギーは、 t_h が小さい時、 $E_{F_0} + \psi_a$ (E_{F_0} : バルク中のフェルミ準位、 ψ_a : 表面電位) 付近に固定されることが分かった。これをもとにSTCTS信号

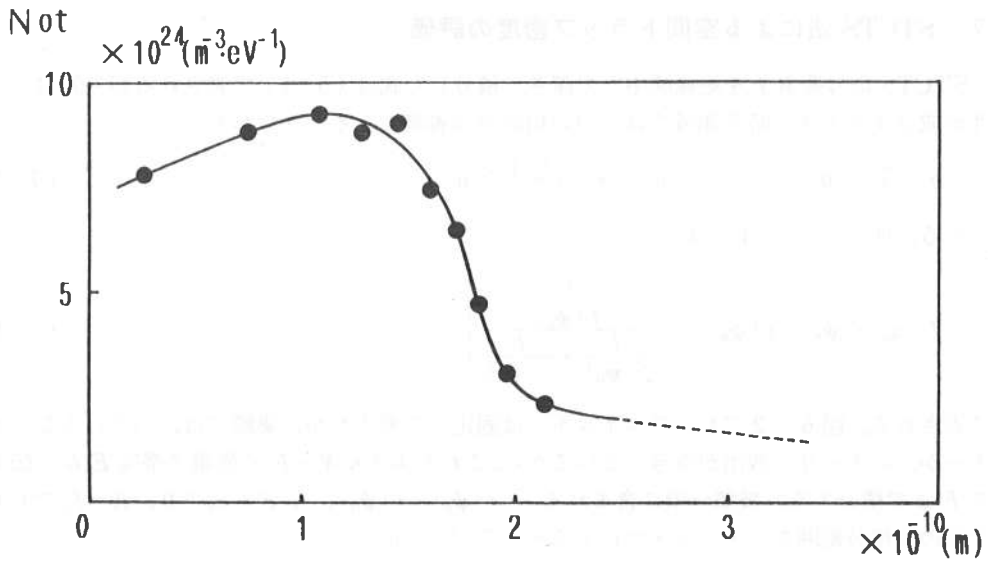


図7-1 空間トラップ密度 N_{ot} と酸化膜中への距離 x との関係

と絶縁膜中への深さとの関係を調べたところ、時間の経過と共に、界面から、より深い所にあるトラップからのキャリア放出が信号に寄与していることが分かった。なお、信号に寄与する深さは、界面から 6 \AA 程度迄であると考えられる。

STCTS 信号の値をもとに、絶縁膜中のトラップ密度（空間トラップ密度）を求めたところ $10^{24} m^{-3} eV^{-1}$ のオーダーになり、界面から少し入った位置で最大値を示すが、その後、深く入るにしたがって減少していくことが分かった。またそれぞれの深さにおける絶縁膜中のトラップ密度を深さで積分した値は $10^{10} cm^{-2} eV^{-1}$ のオーダーとなる。従来、界面準位密度の値がこの位のオーダーであると言われていたので、従来言われていた界面準位密度は、実は界面から絶縁膜にかけてのトラップの総和であると考えることが出来る。

以上のことが、Si-MOS のみならず化合物半導体における界面準位密度の評価につながれば、III-V 族化合物半導体素子による超高速論理素子の開発も進展するものと思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり御指導、御助言をいただきました文部省宇宙科学研究所後川昭雄教授（東京大学名誉教授）、藁品正敏博士及び宇宙電子部品実験室各位に深謝します。

文 献

- 1) 古谷章, 藁品正敏, 後川昭雄; "InP 陽極酸化 MOS 界面特性", 電子通信学会技術報告, ED 84-88 (1984).
- 2) T.J. Tredwell, C.R. Viswanathan; "DETERMINATION OF INTERFACE-STATE PARAMETERS IN A MOS CAPACITOR BY DLTS", Solid State Electronics, Vol. 23,

- P-1171, (1980).
- 3) P.van Staa, H. Rombach, and R. Kassing; "Time-dependent response of interface states in indium phosphide metal-insulator-semiconductor capacitors investigated with constant-capacitance deep-level transient spectroscopy", J. Appl. Phys., 54 (7), P-4014, July (1983).
 - 4) 大串秀世, 徳丸洋三, 田中一宣; "ICTS 法による連続分布局在準位の測定", 電子通信学会技術報告, SSD 81-116, (1981).
 - 5) 大石義, 藁品正敏, 後川昭雄; "空間トラップ容量過渡応答法による MOS 構造のトラップ密度の評価", 電気関係学会関西支部連合大会, G 9-27, (1986).
 - 6) Tadashi Oishi, Masatoshi Warashina, Akio Ushirokawa; "EVALUATION OF CAPTURE CROSS-SECTION OF MOS INTERFACE BY STCTS METHOD", IEICE NATIONAL CONVENTION RECORD, 222, (1987).
 - 7) 多田昭一郎, 藁品正敏, 後川昭雄; "微小パルス高 ICTS 法による界面準位の評価", 電子通信学会技術報告, SSD 86-156, (1987).
 - 8) 徳丸洋三, 大串秀世; "等温過渡容量法 (ICTS) による MOS 界面の評価", 電子通信学会技術報告, SSD 81-125, (1981).
 - 9) E.H. NICOLLIAN, J.R. BREWS; "MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology", John Wiley and Sons, New York, (1982).
 - 10) 増田宏, 何力, 矢野仁之, 大野英男, 長谷川英機; " Al_2O_3 /native oxide/InP MIS 構造の ICTS による評価 (II)", 応用物理学会学術講演会, 3 P-B-10, (1985).