MOS 界面トラップの充電 TSC

正 員 国 吉 繁 一 (千葉大)

正 員 田 中 国 昭 (千葉大)

正 員 大 木 創 (千葉大)

1. ま え が き

半導体デバイスの超高速・高集積および大電力化が進む中で、雑音、ドリフトの低減および高信頼性の達成の点から各種 MOS デバイスの絶縁体-半導体界面の界面単位密度、捕獲断面積などのトラップパラメータの種々の方法による精密測定が求められている。

MOS 界面の熱刺激電流 (以下、TSC と呼ぶ) については、Simmons 氏らにより界面トラップパラメータの解析法として提案され、MNOS メモリーデバイスの界面トラップ単位の解析が同氏ら⁽¹⁾ および Ikoma 氏ら⁽²⁾ によって行なわれている。また熱刺激表面ポテンシャル (TSSP) の測定による界面トラップの解析法が Hino 氏ら⁽³⁾ によって提案されている。本研究は MOS 界面トラップへ電子が捕獲されときの律速過程を理論的に解析し、昇温過程にみられる熱刺激形の充電電流 (これを充電 TSC と呼ぶ) を検討したものである。

2. MOS 界面の充電 TSC

(2.1) 理論 充電 TSC とは、低温で MOS 界面単位を過剰放出の状態 (定常状態ではキャリアに占有される準位が空である状態) にした後、試料を数分間低温に保ち、擬定常状態にし、一定速度で試料を昇温したときに界面単位へのキャリアの充電過程で測定される電流である。この充電過程における律速過程を、キャリアが図 1 に示されるような半導体のバンドの曲り ψ を越えて界面に到達することであると仮定すると、

$$\frac{dQ_{ss}}{dt} = -\alpha Q_{ss} e^{-\psi(Q_{ss})/kT} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで、 Q_{ss} は界面単位の過剰放出電荷量、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。 α は半導体バルク中の自由キャリア密度、熱速度、界面単位のキャリアに対する捕獲断面積などに関係する因子であり、当然温度依存性を持つものであるが、 Q_{ss} の関数である ψ に比較して充電 TSC への寄与はゆるやかであり、以下の議論では定数であると仮定する。図 1 に示されるように、半導体のバンドの曲り ψ は測定開始 (昇温開始) と共に大きくなり、最終的に ψ_{st} になる。このために ψ と kT の比はほぼ一定になり、(1) 式からわかるように放出形の TSC とは異なり、ピーク部分がかなり平坦な特性となる。

また TSC の測定開始時の半導体のバンドの曲りを ψ_i とし、測定終了時の定常状態でのバンドの曲りを ψ_{st} とすると

$$Q_{TSC} = (\psi_{st} - \psi_i) C_{ox} \dots\dots\dots (2)$$

が成立する。ここで、 C_{ox} は MOS 構造の酸化膜容量、 Q_{TSC} は TSC として測定される放出電荷量である。

(2.2) 充電 TSC の数値計算 ここでは充電 TSC の特性を検討するために、一例として、半導体の不純

図 1 充電過程のバンドの変化

Fig. 1. Band diagram at charging process.

Thermally Stimulated Charging Current of MOS Interface Traps. By Shigekazu Kuniyoshi, Member, Kuniaki Tanaka, Member & Hajime Ohki, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University).

国吉繁一: 正員, 千葉大学工学部電気工学科

田中国昭: 正員, 千葉大学工学部電気工学科

大木 創: 正員, 千葉大学工学部電気工学科

物濃度分布が一様で、空乏近似が成立する場合に対しての充電 TSC の式を導き、数値計算を試みる。

界面単位の過剰放出電荷 Q_{ss} 、により誘起されたゲート電極電荷、半導体空乏層電荷をそれぞれ Q_M 、 Q_d とすると

$$Q_{ss} = -(Q_M + Q_d) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_M = (\psi_{st} - \phi) C_{ox} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_d = S \sqrt{2\epsilon q N_d} (\sqrt{\psi_{st}} - \sqrt{\phi}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 S 、 ϵ 、 N_d はそれぞれ電極面積、半導体の誘電率、不純物濃度である。 Q_M はゲート電極上に誘起された電荷であり、この電荷の温度に対する変化が TSC として測定されるものである。(1)、(3) ~ (5) 式より Q_{ss} 、 Q_d 、 ϕ を消去すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(Q_M - S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st} - \frac{Q_M}{C_{ox}}} \right) \\ = -\alpha \left\{ Q_M + S \sqrt{2\epsilon q N_d} \left(\sqrt{\psi_{st}} - \sqrt{\psi_{st} - \frac{Q_M}{C_{ox}}} \right) \right\} \exp \left\{ - \left(\psi_{st} - \frac{Q_M}{C_{ox}} \right) / kT \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を得る。(6) 式の両辺を時間 t 、あるいは $dT = \beta dt$ として温度 T で積分すると、それぞれ

$$\begin{aligned} Q_M - S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st} - \frac{Q_M}{C_{ox}}} \\ + S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st}} \\ = A \exp \left(-\alpha \int_0^t e^{-(\psi_{st} - Q_M/C_{ox})/kT} dt \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} Q_M - S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st} - \frac{Q_M}{C_{ox}}} \\ + S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st}} \\ = A \exp \left(-\frac{\alpha}{\beta} \int_{T_i}^T e^{-(\psi_{st} - Q_M/C_{ox})/kT} dT \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ただし

$$\begin{aligned} A = Q_{M,init} - S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st} - \frac{Q_{M,init}}{C_{ox}}} \\ + S \sqrt{2\epsilon q N_d} \sqrt{\psi_{st}} \end{aligned}$$

である。

図2は、(7)式を用いて計算した温度 100 K における Q_M の減衰特性を示す。計算に用いた各定数の値は $\psi_{st} = 0.74 \text{ eV}$ 、 $\alpha = 0.159 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 、 $N_d = 0.59 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $S = 1 \text{ mm}^2$ 、 $C_{ox} = 362 \text{ pF}$ 、 $\epsilon = 13 \epsilon_0$ である。

初期電極電荷 $Q_{M,init}$ が約 150 pC 以下ではほとんど減衰せず、 $Q_{M,init}$ が 150 pC 以上では減衰は最初の数秒間で急激に起こり、その後はほとんど減衰しな

図2 電極電荷の時間依存性

Fig. 2. Time dependence of charge on gate electrode.

図3 $Q_{TSC} - Q_{M,init}$ 特性

Fig. 3. $Q_{TSC} - Q_{M,init}$ characteristics.

い。このことは、TSC 測定開始前の放置時間がある程度以上の長さであれば、TSC 測定の初期条件は一定に保たれることを意味している。放置時間を 120 s として、図2より Q_{TSC} と $Q_{M,init}$ の関係を求めると図3のようになる。 $Q_{M,init}$ が 150 pC 以下では、 Q_{TSC} は $Q_{M,init}$ に比例し、150 pC 以上では飽和している。以後、図3の飽和領域に対応した TSC を飽和 TSC と言う。

(7)式を用いて、飽和 TSC の放出電荷量 $Q_{TSC,max}$ と ψ_{st} の関係を求めたものを図4に示す。温度は 100 K である。図の破線が計算結果を示し、図からわかるようにほとんどの部分で直線と一致している。このことは、飽和 TSC の場合には、TSC 測定開始時のバンドの曲り $\psi_{i,min}$ は、 ψ_{st} の値にかかわらず一定となっていることを意味しており、(2)式より

$$Q_{TSC,max}(\psi_{st}) = C_{ox}(\psi_{st} - \psi_{i,min}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。これより、飽和 TSC の放出電荷量を測定す

図 4 $Q_{TSC,max} - \psi_{st}$ 特性Fig. 4. $Q_{TSC,max} - \psi_{st}$ characteristics. 図 5 Q_M の温度依存性Fig. 5. Temperature dependence of Q_M .

ることにより ψ_{st} が得られる。ここで、 $\psi_{i,min}$ が ψ_{st} によらず一定となる事実は、この節の初めて設けた仮定がなくても成立することは、(1)式より明らかである。 $\psi_{i,min}$ を決定するのは TSC 測定開始温度 T_i である。図 5 は、 ψ_{st} をパラメータとした飽和 TSC 測定時の電極電荷 Q_M の変化を示したものである。さきに述べたように、初めと終りの領域を除くと、ほぼ直線的に減衰していることがわかる。この Q_M の温度特性を時間で微分して得られる TSC 曲線を図 6、図 7 に示す。図 6 は Q_{TSC} をパラメータにしたもので、150 pC ($=Q_{TSC,max}$) から 25 pC まで減少させた場合の TSC の変化を示している。図からわかるように、飽和 TSC の場合には測定開始温度から直ちに電流が立上っている。 Q_{TSC} の減少と共に立上り温度は、ほぼ比例して高温側に移動している。立下り部分については Q_{TSC} の値によらず一致していることがわかる。飽和 TSC の場合、電流が初めから立上っているという

図 6 充電 TSC の Q_{TSC} 依存性Fig. 6. Calculated thermally stimulated charging current for various Q_{TSC} . 図 7 飽和充電 TSC の ψ_{st} 依存性Fig. 7. Calculated thermally stimulated charging current for various ψ_{st} .

点は、実際の測定において飽和 TSC であると決定するために重要である。

図 7 は、定常状態での半導体のバンドの曲り ψ_{st} をパラメータとした場合の充電 TSC の変化を示す。 Q_{TSC} はすべての場合に飽和 TSC となるように値を決めたので、立上りの部分は一致している。また、 ψ_{st} の増加に伴って立下り温度はほぼ比例して増大しており、上部の平坦部分もわずかに大きくなっている。図 7 のグラフから放出電荷量を求めて、(9)式を使ってゲート電圧 V_G に対する ψ_{st} の値が $\psi_{i,min}$ の分を除いて決定できる。次に、 $\psi_{i,min}$ の評価法について考える。

図 8 は、定常状態でのバンドの曲り ψ_{st} を 0.7 eV 一定に保ったときの飽和 TSC の放出電荷量 $Q_{TSC,max}$ と昇温開始温度 T_i の関係を示したものである。図に見られるように $Q_{TSC,max}$ と T_i は、ほとんどの領域で直線関係にあることがわかる。このことは、(9)

図 8 $Q_{TSC,max} - T_i$ 特性Fig. 8. $Q_{TSC,max} - T_i$ characteristics.

式より $\psi_{i,min}$ が T_i に比例していることを示しており、図8の傾きがその比例係数を与えるものである。こうして、この比例係数に T_i を乗じることにより、 T_i における $\psi_{i,min}$ の値が求められることになる。なお $\psi_{i,min}$ が T_i に比例するという事は、この節の仮定によらず充電 TSC の律速過程を(1)式で表わしたことによる。このように測定開始温度を変化させた飽和 TSC の測定と、開始温度を一定に保って昇温時のゲート電圧を種々変えた飽和 TSC の測定から、 $\psi_{si} - V_G$ の特性が求められる。

3. 試料および実験方法

MOS 界面準位を、充電 TSC を用いて検討するための試料として、プラズマ陽極酸化法で作成した Si-MOS キャパシタを用いた。酸素プラズマは容量形電極に 13.56 MHz、1.2 kV の高周波電圧をかけて発生させた。直流 30 V の定電圧陽極酸化を 60 分間行ない、約 700 Å の SiO₂ 膜を得た。基板は不純物濃度 $4.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の n 形 Si を用いた。

TSC の測定は金属製真空装置内で行なった。過剰放出状態は、(i)低温での光照射による方法と、(ii)降温時のゲート電圧 V_b と昇温時(充電 TSC 測定時)のゲート電圧 V_c の差による方法など⁽⁴⁾があるが、ここでは(ii)の方法で行なった。放出電荷量 Q_{TSC} は V_b と V_c の差の大きさにより、定常状態のバンドの曲り ψ_{si} は V_c の値によって制御した。

4. 実験結果および検討

図9(a)は、コレクティング電圧 $V_c = -4 \text{ V}$ 一定

(a) 測定値

(b) 計算値

図 9 充電 TSC の V_b 依存性Fig. 9. Thermally stimulated charging current for various V_b .

として、バイアス電圧 V_b を -4.8 V から -4.1 V の間で変化させたときの充電 TSC の変化を示したものである。なお、バイアス電圧印加温度は $0(^{\circ}\text{C})$ 、TSC 測定開始温度はすべて 95 K である。この場合、コレクティング電圧 V_c が一定であり、すべての場合について定常状態での半導体のバンドの曲り ψ_{si} は一定となるため、〈2・1〉節で述べたように、立上り温度は一致しており、立上り温度が大きく変化していることがわかる。 $\psi_{i,min}$ を決定するためには、 ψ_{si} 一定のもとで測定開始温度 T_i を変えて測定を行なう必要があるが、ここでは図9の各々の TSC 曲線に対して、次のようにして実効的な測定開始温度 T_i^* を決定して、 $\psi_{i,min}$ を求めた。

(i) $V_c = -4.8 \text{ V}$ の場合の TSC が 0.17 pA に立上る温度を $T_i^*(-4.8)$ とする。

(ii) 他の場合に対しては、立上りの電流値と放出電荷量の比が(i)項の場合と一致するような電流値に対応する温度を $T_i^*(V_c)$ とする。

以上のようにして求めた T_i^* と各々の TSC 曲線の下面積から求めた放出電荷量 $Q_{TSC,max}$ の関係を図10に示す。〈2・1〉節で述べたように、 $Q_{TSC,max}$ は T_i^* に対して直線的に変化している。この直線の傾きから 95 K での $\psi_{i,min}$ を求めると 0.347 eV となった。この値を(9)式に代入して ψ_{si} を求めると 0.708 eV となった。ここで得られた ψ_{si} と放出電荷量を用いて

図 10 $Q_{TSC,max} - T_i$ 特性

Fig. 10. Experimental $Q_{TSC,max} - T_i$ characteristics.

図 11 飽和充電 TSC の V_c 依存性

Fig. 11. Observed thermally stimulated charging current for various V_c .

計算した充電 TSC 曲線を図 9 (b) に示す。なお、計算に用いた他の定数は次のとおりである。

$$C_{ox} = 371 \text{ pF}, \epsilon = 11.8\epsilon_0, N_d = 4.45 \times 10^{15} (1/\text{cm}^3)$$

$$S = 0.79 \text{ mm}^2, T_i = 95 \text{ K}, \beta = 0.34 \text{ K/s}$$

$$\alpha = 1.63 \times 10^{14} (1/s)$$

実測値と計算結果とは、曲線の立上り部分を除いては平坦な部分、立下り部分とも良く一致しており、〈2・1〉節で述べた α を定数とする仮定が妥当なものであることがわかる。立上り部分については、実測値のほうが計算よりもゆるやかに立上っている。これについては、計算上なされた幾つかの仮定に原因しているものと考えられる。

図 11 は、 $V_c = V_b + 1 \text{ V}$ として V_c を -5 V から 0 V まで変化させた場合の充電 TSC を示す。各曲線 TSC は測定開始直後から立上っており、すべて TSC 飽和となっていることがわかる (この試料の場合、図 9 からわかるように、 V_b と V_c の差が 0.8 V 以上で飽和 TSC となっている)。 V_c が -5 V から 0 V へ変わる、すなわち ϕ_{si} が小さくなると、充電 TSC は〈2・1〉節で述べたように、平坦部の電流値が小さくなると共に立下り温度が低温に移動している。これらの曲線から求めた放出電荷量 $Q_{TSC,max}$ と、さ

図 12 $\phi_{si} - V_c$ 特性

Fig. 12. $\phi_{si} - V_c$ characteristics.

図 13 界面単位密度分布

Fig. 13. Distribution of interface states density.

きに求めた $\phi_{si,min} (= 0.347 \text{ eV})$ を用いて ϕ_{si} と V_c の関係を求めたものを図 12 に示す。同図の $\phi_{si} - V_c$ 特性と理想 $\phi_{si} - V_c$ 特性の比較から求めた界面単位密度分布 N_{ss} を図 13 に示す。図中、破線で示された曲線が充電 TSC から求めたもので、実線は同一試料についてターマン法⁽⁵⁾により求めた結果である。界面単位密度のオーダーは一致しているが、伝導帯に近い側では充電 TSC による結果はターマン法のそれよりも大きな値となる。

充電 TSC から求まる界面単位密度は、充電 TSC の放出電荷量のコレクティング電圧 V_c 依存性から得られるものであり、このとき充電 TSC の形状は N_{ss} の決定にほとんど影響しない。従って、〈2・1〉節で述べた幾つかの仮定は、 N_{ss} の決定においては問題とはならないことがわかる。ただ、半導体中の不純物分布を一様とする仮定は、理想 $\phi_{si} - V_c$ 特性に影響するものであり、この点を通じて、 N_{ss} の決定に誤差を与えることが考えられる。この点についてはターマン法でも同じ事情にある。充電 TSC を用いて界面単位を測定する際の問題点としては、このほかに浅い単位の測定には十分な低温 (液体窒素温度以下) が必要とされ

ることである。

5. ま と め

MOS 界面トラップへのキャリアの捕獲過程を熱刺激電流として観測する充電 TSC を提案し、数値計算により充電 TSC の特性を検討した。また、実際にプラズマ陽極酸化 n-Si MOS ダイオードに対して、充電 TSC の測定を行ない、理論との比較検討を行なった。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 充電 TSC は、最大値付近に平坦な部分があり、放出形の TSC に比較してブロードなピークとなる。

(2) 立上り温度は放出電荷量にほぼ比例して低温側に移動する。なお、飽和 TSC の場合には定常状態でのバンドの曲り ϕ_{ss} にかかわらず、立上り温度は一致する。立下り温度は放出電荷量によらず ϕ_{ss} で決定される。

(3) ゲート電圧 V_G と ϕ_{ss} の関係を充電 TSC の放出電荷量という積分量によって求めることができ、放出形の TSC によるよりも、測定誤差の影響が少な

い。

(4) 測定から得られた ϕ_{ss} , Q_{TSC} を用いて計算した充電 TSC は実測値と良く一致した。

(5) V_G と ϕ_{ss} の関係を求め、ターマン法と同様の手続きにより界面準位密度が求められた。

最後に、本実験を進めるにあたり協力された本学大学院生 佐倉英俊、板橋和夫両君に感謝いたします。
(昭和 58 年 5 月 9 日受付, 同 58 年 12 月 28 日再受付)

文 献

- (1) L. S. Wei & J. G. Simmons : "Trapping, Emission and Generation in MNOS Memory Devices", *Solid State Electron.*, **17**, 591 (1974)
- (2) T. Katsube, Y. Adachi & T. Ikoma : "Memory Traps in MNOS Diodes Measured by Thermally Stimulated Current", *ibid.*, **19**, 11 (1976)
- (3) 山下・岩本・日野 : 「熱刺激表面電位による MIS 界面準位の測定法」, 電学論 A, **98**, 93 (昭 53-2)
- (4) 国吉・田中・大木 : 「充電 TSC による MOS 界面の解析」, 電気学会電子材料研究, EFM-83-10 (昭 58-2)
- (5) L. M. Terman : "An Investigation of Surface States at a Silicon/Silicon Dioxide Interface Employing Metal-Oxide-Silicon Diodes", *Solid State Electron.*, **5**, 285 (1962)