

Title	シリコン/酸化膜界面準位からのデジタル雑音 : ミクロの世界からのSOS
Author(s)	谷口, 研二; 中村, 寛; 浜口, 智尋
Citation	大阪大学低温センターだより. 1990, 69, p. 11-15
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/4314
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

シリコン／酸化膜界面準位からのデジタル雑音

—ミクロの世界からのSOS—

工学部 谷口研二・中村 寛・浜口智尋 (吹田 5012)

1. はじめに

非晶質の酸化膜と結晶性シリコン基板との界面は原子配列の違いによる数々のダングリリング結合手が存在する。一般に界面に位置するシリコン原子から酸化膜側に伸びたダングリリング結合手や基板近傍の酸化膜中のダングリリング結合手は界面準位として作用する。すなわち、表面電位が高くなると界面準位は界面近傍の自由電子を捕獲して負に帯電するが、表面電位が下がると見掛け上、電子を放出して正の電荷を有する準位に変わる。このようにシリコン・酸化膜界面に存在する準位は半導体表面近傍の自由キャリアと短時間の内に電荷の授受を行うことができる。従来、この界面準位からの電子捕獲と電子放出の特性を評価するために、高周波キャパシタンス法やチャージポンピング電流の測定が広く行われている。しかし、これらの方法では界面準位の統計的な平均値しか分からない欠点がある。これらの方法に代わって個々の界面準位の特性を評価することが最近注目を浴びている。すなわち、チャンネル長とチャンネル幅が共に $1/4$ ミクロン以下の素子では、上に述べた界面準位の個数が極めて少なく、個々の界面準位に捕獲・放出される電子の状況が簡単に測定できるからである。なお、このようなMOSFETのコンダクタンスのデジタル変化に関する現象は1983年、ベル研究所のグループによって最初に観測され、⁽¹⁾それ以後、各国の研究者が精力的に研究を行っている。⁽²⁻⁷⁾

以下では、このような個々の界面準位の性質や原子的な構造を解明するために行った微小MOSFETのスイッチング電流特性の実験およびその解析結果について紹介する。

2. 実験方法

実験に用いた試料は、Poly-Siゲートで、酸化膜厚20nm、チャンネル長 L 、チャンネル幅 W のマスク寸法は $1.0, 1.2\mu\text{m}$ (実効チャンネル幅 $\sim 0.2\mu\text{m}$) である。実験はサブスレッショルドの電流領域で行い、ドレイン電流 I_d のスイッチング信号のゲート電圧 V_g に対する経時特性をYHPの半導体パラメータアナライザを用いて測定した。測定の際には、ドレイン電圧 V_d を固定($V_d=0.05\text{V}$)し、基板電圧 V_{sb} と温度 T ($-22^\circ\text{C}\sim+23^\circ\text{C}$) をパラメータに使った。

3. 実験結果と考察

微小MOSFETのスイッチング信号はチャンネルに含まれるトラップ準位の個数に応じて変化

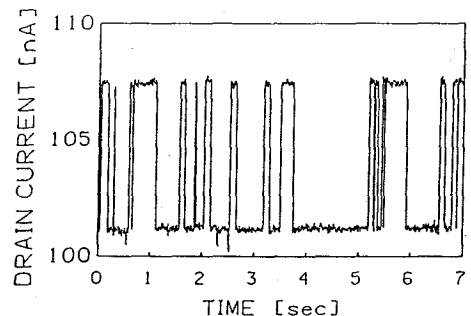


図1 トラップ準位が1個の場合のスイッチング信号の例

する。図1にチャンネル内のトラップ準位が1個の場合のスイッチング信号の例を示す。図1ではドレイン電流が2つの電流状態 (HighとLow)を往復しており、チャンネル内にある1つのトラップ準位が観測されていることを示している。

今回の報告では単純な1個のトラップ準位を含む信号についての解析を紹介する。

(1) スwitchingの原因について

MOSFETのチャンネルを流れる単位チャンネル幅当たりの電子電流密度は $J = -eN\mu E$ で表される。したがって、トラップ準位への電子捕獲・放出によるドレイン電流の変動の原因として次の2点が考えられる。

- ① 電子がトラップ準位に捕らえられると、表面自由電子の面密度、 N 、が低下してドレイン電流が減少する。
- ② トラップ準位に捕らえられた電子と伝導電子とのクーロン相互作用による散乱が増加し、表面自由電子の実効的な移動度、 μ 、が低下する。

これらの要因を分離するための実験を次のように行った。図2は基板電圧をパラメータとして、ドレイン電流の変化量を調べたものである。基板バイアスを増加するとドレイン電流の変化量は大きくなる様子が分かる。いま、ドレイン電流が一定の場合を考えてみよう。MOSFETにおいて基板電圧 (符号は考慮しない) を上げると、シリコン-酸化膜界面における垂直方向の電界が大きくなる。通常、垂直電界強度が大きくなるとMOSFETの反転層の移動度は小さくなる。したがって、ドレイン電流変動の主たる要因が①であると仮定すれば、ドレイン電流の変動幅は基板電圧の増加とともに小さくなるのが予想される。しかし、図2の実験からは全く逆の結果が得られている。このことは基板バイアス印加によりチャンネル内の自由電子がシリコン-酸化膜界面に引き寄せられる結果、伝導電子と捕獲電子とのクーロン相互作用が強くなり、ドレイン電流の変動量が増加するためである。したがって、ドレイン電流の変動の主たる要因は①の面密度の低下ではなく②のクーロン相互作用による散乱過程の増加

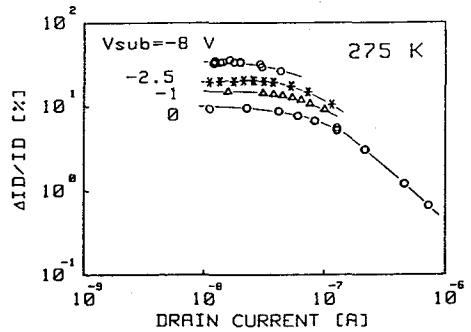


図2 ドレイン電流の変動量のドレイン電流・基板電圧依存性

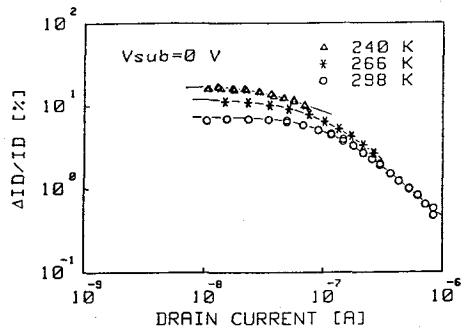


図3 ドレイン電流の変動量のドレイン電流・温度依存性

よることが今回の実験により明らかになった。

次に、この仮説を裏付ける実験データを図3に示す。この図はドレイン電流の変化量の測定温度依存性を示している。低温になる程、ドレイン電流の変化量が大きく観測され、しかもドレイン電流の増加とともにその差が小さくなる実験事実は、ドレイン電流の変化がクーロン散乱の機構に起因していることを裏付けている。すなわち、チャンネル内の電子の運動エネルギーが小さな場合（低温に相当）には、捕獲された電子の周辺にできるクーロン・ポテンシャルの壁によって大半の伝導電子は散乱されるが、高温になると高運動エネルギー電子が増加するので散乱される電子の数は減少して、ドレイン電流の変動量は小さくなる。また、図3においてドレイン電流が大きくなるとドレイン電流の変化量が相対的に小さくなる理由は、チャンネル内の電子の数が増加すると捕獲された電子の作るクーロン・ポテンシャルを伝導電子が遮蔽するため、クーロン散乱を受ける領域が狭くなるからである。

(2) スイッチング電流とMOSFETの寸法について

スイッチング信号の大きさとMOSFETの寸法との関係について簡単に考察した結果を以下に述べる。チャンネル長 L 、チャンネル幅 W の中にキャリア移動度が他と異なる領域（簡単のために、一辺 X の正方形領域を仮定する）を設定する。この移動度の異なる領域には電子が捕獲されたトラップ準位があると考える。簡単な代数計算を行えば、チャンネルコンダクタンスの変化割合は

$$\frac{\Delta I_d}{I_d} \sim \frac{X^2 (\mu - \mu_1)}{WL\mu} \quad (1)$$

となる。ここでは μ_1 は電子を捕獲したトラップ準位の付近の平均的なキャリア移動度である。上の式より、MOSFETの寸法が微小化されると、スケーリング係数 α ($W' = \alpha W$, $L' = \alpha L$) の2乗に比例してドレイン電流の変動量が顕著になってくることがわかる。すなわち、素子を微小化するほどこの種の問題が表面化してくることを意味している。

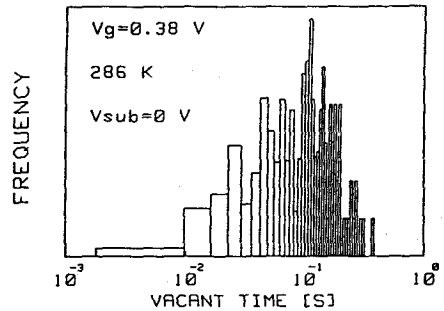


図4 電子放出時間間隔の頻度分布

(3) 電子捕獲・放出時間の分布

図1で代表されるスイッチング特性の高電流状態の時間（電子放出時間 τ_H ）の分布をとると、図4が得られる。このような対数時間軸（横軸）に対する電子放出時間の頻度分布の形状は、ゲート電圧、基板電圧、及び温度を変えてもほとんど変化せず、単に横軸に沿って平行移動するに過ぎないことが各種の実験から明らかになった。また、図4に示される頻度分布の形状は電子捕獲時間にもあてはまることを確認した。

(4) スイッチング信号のゲート電圧依存性

電子捕獲時間間隔がゲート電圧とともに変化する様子を図5に示す。この図より、低電流状態（トラップに電子がある状態）の時間間隔 τ_1 がゲート電圧の増加とともに長くなる傾向が認められる。これはトラップ準位にある電子と伝導帯電子との間に詳細平衡の原理

$$\frac{\tau_H}{\tau_L} = \frac{1-f_T}{f_T} = g \cdot \exp\left(-\frac{E_T-E_F}{k_B T}\right) \quad (2)$$

が成り立っているからである。すなわち、ゲート電圧を dV_g 増加した時、トラップ準位が dE 低下すると、トラップ準位が電子を捕獲している時間 τ_L はフェルミ統計に従って指数関数的に増加する。なお、上式の両辺の自然対数を取り、ゲート電圧で微分すると⁽⁵⁾

$$\frac{dE}{dV_g} = k_B T \frac{d \ln\left(\frac{\tau_H}{\tau_L}\right)}{dV_g} \quad (3)$$

が得られる。これはゲート電圧を変化させた時に酸化膜中のトラップ準位が変動する様子を表したものであり、 $\ln(\tau_H/\tau_L)$ のゲート電圧依存性から、シリコン/酸化膜界面とトラップとの距離が見積もれる。すなわち、酸化膜中のトラップ位置がシリコン/酸化膜界面から離れると、 τ_L と τ_H のゲート電圧依存性は顕著になる。

(6) スイッチング信号の測定温度依存性

図5に基板電圧が零の場合の電子捕獲時間の平均値のゲート電圧・温度特性を、図6に温度 275 K における電子放出時間の平均値のゲート電圧・基板電圧特性を示す。図5, 6より、温度・基板電圧ともに一定の場合には、電子捕獲時間の平均値はゲート電圧とともに増加するが、電子放出時間の平均値はゲート電圧とともに短くなることがわかる。また、どちらの時間間隔の平均値も、温度低下に対しては指数的に長くなるが、基板電圧にはほとんど依存しない。これは、捕獲・放出時間の平均値は電子のエネルギーの関数であるが、界面電界によって電子捕獲・放出時間は変わらないことを示している。

次に、トラップ準位が電子を捕獲・放出する際の活性化エネルギーを求める。図5の測定点のうちゲート電圧が 0.42 V の値をアレニウスプロットすると電子捕獲・放出時間のデータはともに同一の直線に乗る。ここで、時間の平均値 τ_H 、 τ_L が活性化エネルギー ΔE を用いて、

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (4)$$

と表せると考えると、先ほどの直線の傾きより活性化エネルギー ΔE は、電子捕獲・放出のどちらに対

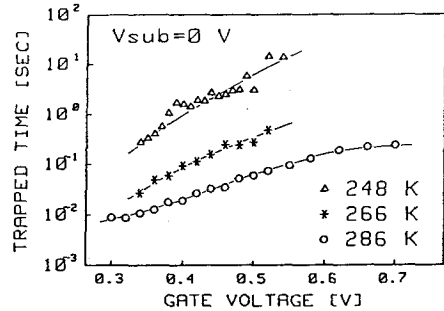


図5 電子捕獲時間間隔とゲート電圧・温度依存性

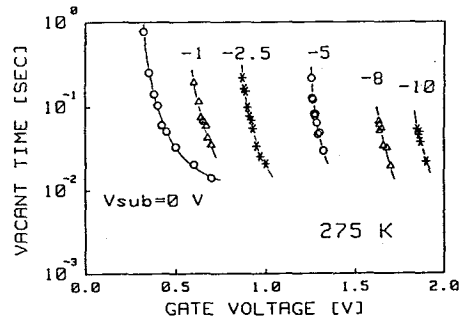


図6 電子放出時間間隔とゲート電圧・基板電圧依存性

しても 290 meV となる。この活性化エネルギーは伝導電子がトラップ準位に移る時に乗り越えなければならないエネルギー障壁を表しているが、伝導帯の底と禁制帯内におけるトラップ準位とのエネルギー差を表しているのではない。むしろ、電子が酸化膜中のトラップに捕獲される際にトラップ周辺の原子的な構造の変化を引き起こすのに必要なエネルギーに相当するものと考えられる。

4. 結 論

微小チャンネルMOSFETにおけるチャンネル電流のスイッチング特性について調べた。振動の大きさは界面電界に比例し電子のエネルギーに反比例することがわかった。また、電子捕獲・不在時間間隔の平均値はともに、電子のエネルギーには比例するが界面電界には依存しないことがわかった。さらに、時間間隔の分布の形は、温度、ゲート電圧、及び基板電圧のいずれにも依存しないことがわかった。

参考文献

- 1) K. S. Ralls, W. J. Skocpol, L. D. Jackel, R. E. Howard, L. A. Fetter, R. W. Epworth and D. M. Tennant, Phys. Rev. Lett., 52, 228 (1984)
- 2) P. M. Mankiewich, R. E. Howard, L. D. Jackel, W. J. Skocpol and D. M. Tennant, J. Vac. Sci. Technol. B4, 380 (1985)
- 3) R. E. Howard, W. J. Skocpol, L. D. Jackel, P. M. Mankiewich, L. A. Fetter, D. M. Tennant R. W. Epworth and K. S. Ralls, Trans. Electron Devices, ED-32, 669 (1985)
- 4) M. J. Uren, D. J. Day and M. J. Kirton, Appl. Phys. Lett., 47, 1195 (1985)
- 5) M. J. Kirton and M. J. Uren, Appl. Phys. Lett., 48, 1270 (1986)
- 6) M. J. Uren, M. J. Kirton and S. Collins, Phys. Rev. B14, 8346 (1988)
- 7) P. Restle, Appl. Phys. Lett., 53, 1862 (1988)

低温センターだより編集委員の異動

退任 山本雅彦氏(工、材料物性)

山本さんには、創刊以来編集委員を務めていただきました。長い間ご苦勞様でした。