チャージポンピング法による Si/SiO_2 界面近傍酸化膜トラップの評価

Characterization of Near-Interface Oxide Traps with the Charge Pumping Method

静岡大電研　土屋敏章，堀　匡寛，小野行徳
Shizuoka Univ., ○Toshiaki Tsuchiya, Masahiro Hori, Yukinori Ono
E-mail: tsuchiya.toshiaki@shizuoka.ac.jp

MOS 系デバイスにおいて，界面トラップの物理はデバイス信頼性のみならず，特性ばらつきや動作安定性の点からも重要であり，デバイスに含まれるトラップの数，個々のトラップの物理的位置・捕獲断面積・エネルギー準位など原子スケールでの理解が必要になっている．

我々はこれまでにチャージポンピング(CP)法を駆使した体系的な界面トラップ評価法を確立し，界面トラップ数のカウンティング技術を確立すると共に，真に単一の界面トラップを評価することによってトラップの本質的なキャラクタリゼーションに成功した[1,2]：界面トラップは 1 個当たり 2 つの電子準位を有し，その CP 電流はこれまで信じられていた fq 一定値（f:ゲートパルス周波数，q:電気素量）ではなく，電子準位のエネルギー位置に依存して 0～$2fq$ の範囲内で様々な値になる[2]．また，多数の単一界面トラップの個々の電子準位を求め，エネルギー準位密度分布を導出した：“界面トラップは U 字型”との一般的な常識とは異なり，バンドギャップ内に 2 つのピークを持つ[3]．さらに，これらの結果を踏まえて，従来の CP 理論を本質的に改定した[3]．

一方，ESR(Electron Spin Resonance)による研究から，界面トラップの正体は Si ダングリングボンド（P_b センター：(100)面 Si の MOS 界面では P_{b0} と P_{b1} の 2 種が存在するが，P_{b0} センターが支配的）であり，P_{b0} はドナー型とアクセプタ型の両性を有し，バンドギャップ内に 2 つのピークのある準位密度分布を有すると報告されている[4,5]．これらの P_{b0} センターに関する特徴は，上記の単一界面トラップの評価から得た結果と合致しており，我々は CP 法によって単一 P_{b0} センターの電気的特性の直接測定に成功したとも言える．

以上の背景と知見に基づいて，上記の体系的 CP 評価法により，数個のトラップしか含まないナノスケール MOS トランジスタを用いて Si/SiO_2 界面近傍酸化膜トラップ（NIOT）の検出・評価を行ったので報告する．

CP 法による NIOT の検出には 175 kHz 以下のゲートパルスが必要との報告[6]があるが，本実験では主に 200 kHz を用いた．図 1 に CP 特性のゲートパルスオン時間 t_{Top} 依存性の例を示す．注目すべきは，ベースレベル V_{Base}=-1 V 付近でピークを示すトラップ（CP 電流値が fq=32 fA 以下であること等から単一トラップと判断される）からの CP 電流が t_{Top} に極めて強く依存していることである．このことはトラップへの電子捕獲の時定数が大きいことを意味する[2]．実際，714 kHz までの f 依存性を評価したところ，その追随性の悪化を確認した．従って，このトラップは界面トラップではなく，電子捕獲にトンネリング現象を伴う NIOT であると考えられる．また，図 2 に示すように，このトラップの CP 電流はゲートパルス立上り時間 t_r および立下り時間 t_f の両者に依存している．この結果は，NIOT も界面トラップと同様に 1 トラップ当たり 2 電子準位を有し，ドナー型とアクセプタ型の両性を有していることを支持していると考えられる．図 3 に別の試料について，f で規格化した CP 特性の f 依存性を示す．図から，f に追随しない NIOT からの信号が V_{Base}=-0.7 V 付近に現れていることがわかる．このように図 1 の結果も含めて NIOT からの CP 電流は，パルスの高レベル（V_{Top}）で強い反転状となる V_{Base}>-1 V（V_{Top} >1 V）の領域で現れる傾向がある．電子捕獲断面積の大小に関係していると推測される．

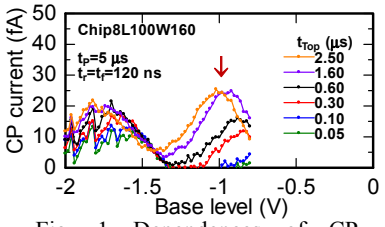

Fig. 1 Dependences of CP characteristics on on-time t_{Top} of the gate pulse.

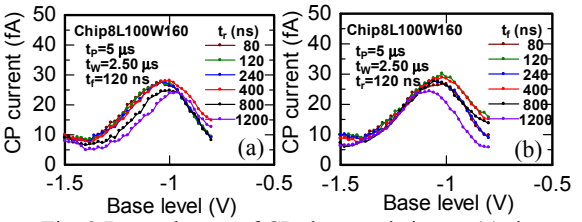

Fig. 2 Dependences of CP characteristics on (a) rise time t_r and (b) fall time t_f of the gate pulse.

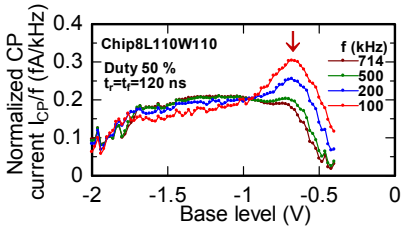

Fig. 3 Dependences of normalized CP characteristics on gate pulse frequency f.

参考文献
[1] T. Tsuchiya et al., JJAP 49, 064001 (2010).
[2] T. Tsuchiya and Y. Ono, JJAP 54, 04DC01 (2015).
[3] T. Tsuchiya and P. M. Lenahan, JJAP 56, 031301 (2017).
[4] P. M. Lenahan and P. V. Dressendorfer, APL 44, 96 (1984).
[5] P. M. Lenahan et al., IEEE T-NS 48, 2131 (2001).
[6] N. L. Cohen et al., IEEE T-ED 42, 2004 (1995).

© 2018年 応用物理学会