

RTN モデルを用いた NBTI 劣化解析手法の検討

Analytical Approach for NBTI-Induced Degradation with RTN Model

藪内美智太郎¹

Michitarou Yabuuchi

京都工芸繊維大学¹

Kyoto Institute of Technology

小林和淑^{1,2}

Kazutoshi Kobayashi

JST, CREST²

JST, CREST

1 概要

PMOS の経年劣化現象である NBTI (Negative Bias Temperature Instability) の発生原因は RTN (Random Telegraph Noise) と同様に酸化膜の欠陥がキャリアを捕捉する現象である可能性が高いことが明らかになった。本稿ではこのような原理に基づいた閾値電圧変動モデル (RTN モデル) を用いた劣化解析手法について検討する。

2 NBTI の発生原理と閾値電圧変動量の算出手法

NBTI の発生原理は PMOS の酸化膜中の欠陥であるとする説が提案されている [1]。欠陥がキャリアを捕獲されている時には閾値電圧 (V_{th}) は高く、放出している時には低くなり、それぞれの状態の平均持続時間を放出時間 (τ_e)、捕獲時間 (τ_c) という。時定数はゲート電圧依存性を持ち、ゲートに負電圧が印加された場合に τ_e は長くなり、 τ_c は短くなることが多い。ある一つの欠陥にキャリアが捕獲されたことで生じる閾値電圧の変動量 (μ) はゲート面積に反比例し、指数分布に従う。

ある V_{th} を持つ PMOS に N 個の欠陥がある場合の V_{th} の変動量 (ΔV_{th}) は式 (1) によって求められる。

$$\Delta V_{th}(t) = \sum_{j=1}^N k_j(t) \cdot \mu_j \quad (1)$$

ここで t は時間を表し、 j は欠陥番号であり 1 から N の値をとる。状態 (k) は捕獲状態で 1、放出状態で 0 であり、 k は各欠陥の捕獲確率 (P_C) によって決まる。長期の劣化における P_C は式 (2) によって求められる [2]。

$$P_C(t) = \frac{\tau_e^*}{\tau_c^* + \tau_e^*} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\tau_e^*} + \frac{1}{\tau_c^*} \right) t \right\} \right] \quad (2)$$

ここで τ_e^* 、 τ_c^* はそれぞれ実効放出時間、実効捕獲時間である。これらはデューティファクタ (DF) と各時定数によって決まり、 DF はゲート入力信号の周波数 f 、1 周期中の信号が High の時間を t_H とした時 $DF = f \times t_H$ となる。各時定数は 10^{-7} s から 10^{11} s に対数等分布し、それぞれ相関があると仮定した [3,4]。式 (2) は時定数が $1/f$ より十分大きい時により近似となる。

計算手順のフローチャートを図 1 に示す。最初のループで各欠陥の特性を決定し、その後 t に応じた ΔV_{th} を計算する。時間の刻み幅 t_s は 1s から 10s で 1s、10s から 100s で 10s 刻みというように増加させ、 1×10^8 s の次は 3.1536×10^8 s として設定し、 t は最大 10 年 (3.1536×10^8 s) とした。図 1 の $\text{rand} < P_C ?$ では欠陥毎に乱数 (0 から 1)

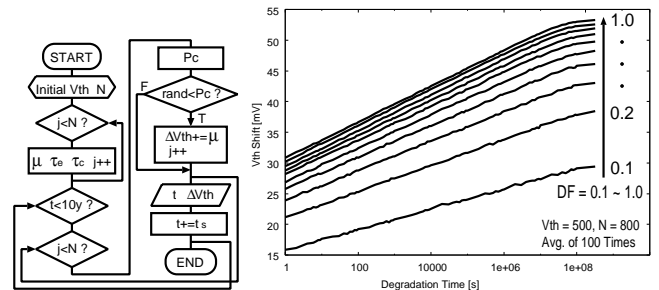


図 1 ΔV_{th} の算出 フローチャート. 図 2 $N = 800, V_{th} = 500\text{mV}$, $DF = 0.1 \sim 1.0$ における ΔV_{th} .

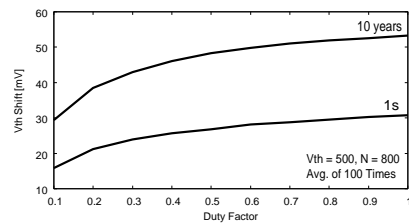


図 3 図 2 と同条件における ΔV_{th} の DF 依存性.

と P_C を比較して k を決めている。欠陥の諸特性も同様に確率分布と乱数を用いて決定した。

条件として $N = 800, V_{th} = 500\text{mV}, DF = 0.1 \sim 1.0$ を設定した場合の ΔV_{th} を図 2 に示す。横軸は対数目盛で t 、縦軸は ΔV_{th} となっており、100 回計算した相加平均である。どの様な DF でも ΔV_{th} は t に対して対数関数的に増加することが分かった。図 3 に図 2 のデータを用いた DF 依存性を示した。横軸は DF 、縦軸は ΔV_{th} で、 $t = 1\text{s}$ と 10 年の場合であり、どちらも DF の増加に伴って ΔV_{th} が増加していくことが確認出来る。欠陥の P_C を近似式により決定しているため、 $DF = 1$ 近辺で ΔV_{th} が急激に大きくなる現象は再現出来なかった。

3 結論

PMOS の酸化膜中の欠陥によるキャリアの捕捉、放出を NBTI の発生原因とする説による劣化モデルで閾値電圧変動量を算出した。その結果、どの様なデューティファクタの条件でも閾値電圧の変動量は時間に対して対数関数的に増加することが明らかになった。

謝辞 本研究はイー・シャトル、富士通セミコンダクター、日本ケイデンス、シノプシス、メンターの協力で行われた。

参考文献 [1] B. Kaczer, et al., IRPS 2009, pp. 55. [2] M. Toledano-Luque, et al., IRPS 2011, pp. 4A.2.1. [3] T. Grasser, et al., IRPS 2010, pp. 16. [4] H. Reisinger, et al., IRPS 2010, pp. 7.