

RTN トラップの高電界下での Defect Profiling ～ マルチフォノンモデルに基づく理論外挿 ～

Defect Profiling of RTN Traps under High Electric Fields ～ Theoretical Extrapolation Based on Non-radiative Multiphonon Transition ～

宝玉 充 泉田 貴士 尾上 誠司 (東芝メモリ)

Michiru Hogyoku, Takashi Izumida, and Seiji Onoue

(Institute of Memory Technology Research & Development, Toshiba Memory Corporation)

E-mail: michiru.hogyoku@toshiba.co.jp

MOSFET において、ゲート絶縁膜中のチャンネル寄りに位置しているトラップは、一般に閾値電圧へのインパクトが大きく、Random Telegraph Noise (RTN) への影響も大きい。参考文献[1]によると、このようなトラップ (RTN トラップ) の場合、①「キャリアの捕獲/放出は、共にチャンネルを相手とし」、②「ゲート絶縁膜電界の増加と共に、チャンネルの反転キャリアを捕獲するレートが速くなって、キャリア捕獲状態が優勢になる」と考えられている。ところが、ゲート絶縁膜電界がさらに強くなり、強反転にまで達すると、RTN の測定感度が悪くなるため、トラップの振る舞いを実験的に確かめることが難しくなる (通常は μA オーダーのドレイン電流で測定する[1])。そのため、RTN トラップが高電界下でどう振る舞うかについて、良く知られていない。ここでは、チャンネル周辺のトラップが多い MOSFET において、強反転状態のキャリア密度や、高電界下でのゲート絶縁膜のリーク電流などを、精度良く計算することはできない。

そこで我々は、測定の代わりに、物理モデルに基づく理論外挿によって、高電界下での RTN トラップの振る舞いを予測することとした。物理モデルは、RTN[2-5]のみならず、SILC[6, 7]、MONOS[8]、variable-range hopping[9]、polycrystalline silicon[10]などのトラップに幅広く応用されている、無輻射のマルチフォノンモデル[11]に基づいた。NMOSFET を想定し、ゲート酸化膜の厚みは 4 nm とした。ゲート酸化膜中の電子トラップは、トラップ深さを 3 eV とし、閾値電圧へのインパクトが大きくなるよう、チャンネル寄りの 1.2 nm の位置に配置した。

理論外挿の結果、高電界下での RTN トラップの振る舞いは、2 種類に大別されることが分かった。その 1 種類目の計算例として、キャリアの捕獲/放出にともなう格子系の変形エネルギー、すなわち格子緩和エネルギー[2, 11] : Shv を、 0.96 eV とした場合について述べる。トラップの捕獲/放出の時定数と、ゲート酸化膜の電位差 : V_{ox} の関係について、図 1 に示す。 $\tau_{\text{c,sub}}/\tau_{\text{c,gate}}$ はそれぞれチャンネル (sub) /ゲート (gate) の反転電子を捕獲 (capture) する時定数、 $\tau_{\text{e,sub}}/\tau_{\text{e,gate}}$ はそれぞれチャンネル/ゲートの伝導帯に電子を放出 (emission) する時定数である。 V_{ox} が 0.4 V 付近までは、 $\tau_{\text{e,sub}}$ が最も短い。しかし、 V_{ox} が 0.4 V 付近以上になると、常に、 $\tau_{\text{c,sub}}$ が最も短くなる。時定数が短いことは、そのプロセスが他に比べて優勢であることを意味する。つまり、この例では、第 1 段落の見通しの通り、高電界下で、常にキャリア捕獲状態が優勢ということになる。ただし、優勢でない方のキャリア放出に関して、 V_{ox} が 1.6 V 付近以上の高電界下では、チャンネル側よりもむしろゲート側へのデトラップが支配的になっている[5]。

一方、 Shv が小さくなり 0.12 eV になると、図 2 に示すような 2 種類目の現象が現れる。 V_{ox} が 0.7 V 付近までは、 $\tau_{\text{e,sub}}$ が最も短い。そして、 V_{ox} が 0.7 V 付近以上で、 $\tau_{\text{c,sub}}$ が最も短くなる。ところが、 V_{ox} が 2.2 V 付近を超えると、 $\tau_{\text{e,gate}}$ が最も短くなる。つまり、この例では、第 1 段落の見通しに反して、高電界下で、チャンネルの反転キャリアの捕獲が遅くなって、むしろゲート側へのキャリア放出が最も優勢になる。

図 2 に示すような、高電界下でのチャンネルの反転キャリアの捕獲が顕著に遅くなる現象は、いわゆるマーカス理論の逆転領域効果[12]で説明できる。ゲート絶縁膜電界の増加によって、キャリアの捕獲状態

のエネルギーを過度に下げると、捕獲レートが逆に遅くなっていることが、格子緩和エネルギーが小さいケースで確認できている。

以上、物理モデルに基づく理論外挿によって、高電界下での RTN トラップの振る舞いを予測した。RTN トラップが、閾値電圧周辺のゲート電界下ではチャンネルの反転キャリアを捕獲していたにもかかわらず、高電界下でゲート側にキャリアを放出してしまうケースがあることを明らかにした。このことは、チャンネル周辺のトラップが多い MOSFET において、強反転状態のキャリア密度や、高電界下でのゲート絶縁膜のリーク電流などを計算する際に、大きな影響を与えるものと考えられる。

参考文献 : [1] T. Nagumo et al., IEDM Tech. Dig., 2010, 628. [2] F. Schanovsky et al., J. Comput. Electron. **11**, 218 (2012). [3] M. Zhang and M. Liu, J. Appl. Phys. **113**, 144503 (2013). [4] Y. Higashi et al., IEEE Trans. Electron Devices **61**, 4197 (2014). [5] Y. Higashi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 04DC14 (2015). [6] M. Herrmann and A. Schenk, J. Appl. Phys. **77**, 4522 (1995). [7] A. Gehring et al., Microelectron. Reliab. **43**, 1495 (2003). [8] K. A. Nasyrov et al., J. Appl. Phys. **105**, 123709 (2009). [9] 宝玉 充 他, 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-A24-4. [10] 宝玉 充 他, 2017 年 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 17a-E206-13. [11] J. Zheng et al., J. Phys.: Condens. Matter **6**, 1695 (1994). [12] R. A. Marcus, Rev. Mod. Phys. **65**, 599 (1993).

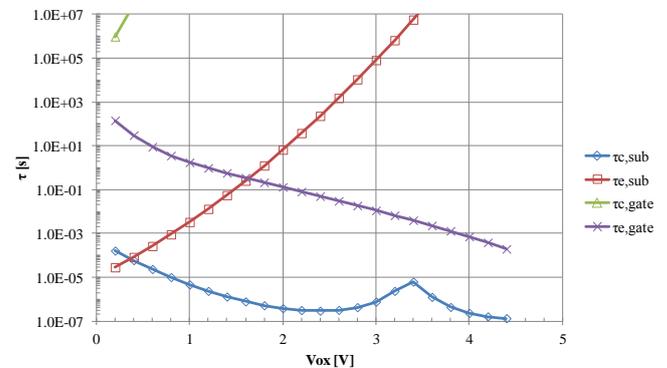


図 1. $\text{Shv} = 0.96\text{ eV}$ の計算例

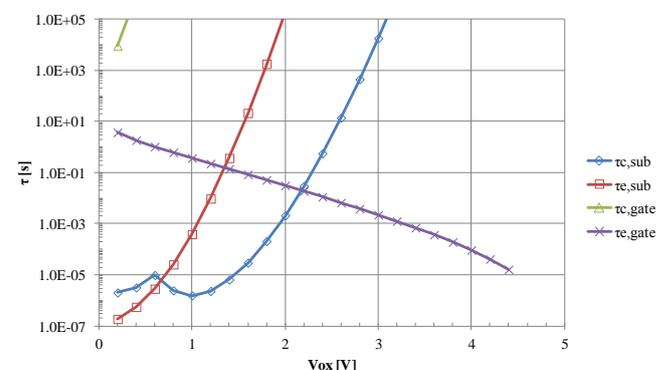


図 2. $\text{Shv} = 0.12\text{ eV}$ の計算例