局在キャリアのデトラップの温度依存性に関する考察

Consideration on Temperature Dependence of De-trapping of Localized Carriers

宝玉 充　　泉田 貴士　　谷本 弘吉　　青木 伸俊　　尾上 誠司　　(東芝メモリ)
Michiru Hogyoku, Takashi Izumida, Hiroyoshi Tanimoto, Nobutoshi Aoki, and Seiji Onoue
(Institute of Memory Technology Research & Development, Toshiba Memory Corporation)
E-mail: michiru.hogyoku@toshiba.co.jp

1. 背景と目的

絶縁膜中の局在準位と言えば、かつては、トランジスタの信頼性悪化の主要因といった、悪役のイメージしか浮かばなかった。ところが、いつの間にか、SiN 膜中のトラップがメモリ素子に欠かせないアイテムとなり、その物理モデル化の必要性は日に日に高まっている。

こうした近況の中、SiN などの膜中のトラップに関して、キャリアの捕獲ないし放出のレートを測定・計算・考察する報告を見るに、研究者間の考え方に大きな隔たりを感じることが多い。キャリアの捕獲で言えば、捕獲断面積を一定値と捉える報告[1 - 4]がある一方で、捕獲に際するキャリアのエネルギー遷移をフォノン遷移で定式化した上で、捕獲断面積をキャリアのエネルギーの関数と捉える報告[5, 6]もある。また、キャリアの放出、いわゆるデトラップで言えば、①熱励起のみで議論するやり方[7]と、②それに Poole-Frenkel 効果を組み込むやり方[2]と、③熱励起（正確にはフォノン遷移）とトンネル効果の両方を考慮するやり方[3 - 6]が、混在しているのが実情である。

本報告では、議論しやすそうなデトラップに着眼し、③のフォノン遷移とトンネル効果の両方を考慮する物理モデルを前提に、デトラップの温度依存性について詳しく考察する。そして、①や②の物理モデルに比べて、③が如何に妥当な物理モデルであるかを論じる。

2. 計算と考察

フォノン遷移とトンネル効果の両方を考慮したデトラップの物理モデル③は、参考文献[3 - 5]に倣って、small polaron の self-trapping [8]を想定した Makram-Ebeid & Lannoo の Trap-Assisted Tunneling [9, 10]に基づいた。SiN 膜中のトラップのパラメータについては、

トラップ深さ：Φt を 1.5 [eV]
格子緩和エネルギー：Shv を 2 [eV]
フォノン・エネルギー：hv を 0.05 [eV]

とした。また SiN の物理パラメータについては、

バンドギャップを 4.9 [eV]
トンネル質量を 0.42 [electron rest mass]

とした。Shv を少し大きめにした以外は、参考文献[3 - 5]の値に非常に近い設定となっている。

図 1 に、240 ~ 360 [K]の温度範囲、1 ~ 5 [MV/cm]の電界範囲での、SiN 単膜のデトラップ・レートのアレニウス・プロットを示す。そして、この図 1 から、デトラップに際する見かけの活性化エネルギーを算出した結果を、図 2 に示す。この図 2 より、「デトラップに際する見かけの活性化エネルギーは、電界の増加と共に、トラップ深さの 1.5 [eV]を著しく下回るようになる」ことが分かる。また、「その下回る度合いは、Poole-Frenkel 効果を組み込んだ②の物理モデルの場合よりも、顕著である」ことも分かる。

ところで、参考文献[2 - 4]などによると、熱励起のみの①の物理モデル、あるいはそれに Poole-Frenkel 効果を組み込んだ②の物理モデルでは、デトラップの頻度因子：attempt-to-escape frequency が、非物理的に小さく見積もられてしまう。より具体的に言えば、③の物理モデルが 10^{13} [1/s]オーダーの attempt-to-escape frequency を導き[4]、それが実験結果をうまく説明する[3, 4]のに対して、①や②の物理モデルでは、attempt-to-escape frequency を電子の遷移頻度としては小さすぎる 10^{6} ~ 10^{9} [1/s]オーダーに設定しない限り、実験結果とは符合しない[2 - 4]。こうした傾向は、次のように解釈できる。つまり、我々が用いたデトラップの物理モデル③には、温度依存性が極端に弱い物理的効果、すなわちトンネル効果が組み込まれており、その結果、図 2 に示したように、見かけの温度依存性が顕著に弱くなる。要するに

デトラップ・レート　＝
（物理的に正当な大きさの attempt-to-escape frequency）×
（小さめのトンネル確率）×
（活性化エネルギーが小さく、大きめのアレニウス項）

の構図が成り立っているものと考えられる。そのため、アレニウス・プロットに頼った①や②のモデル化では、見かけ上、attempt-to-escape frequency が（小さめのトンネル確率）の分だけ小さく見えてしまうのである。こうした議論は、フォノン遷移とトンネル効果の両方を考慮したデトラップの物理モデル③が、妥当であることを示唆している。

参考文献

[1] W. Shockley and W. T. Read, Phys. Rev. **87**, 835 (1952).　[2] H. Bachhofer et al., JAP **89**, 2791 (2001).　[3] K. A. Nasyrov et al., JAP **96**, 4293 (2004).　[4] A. V. Vishnyakov et al., Solid-State Electronics **53**, 251 (2009).　[5] K. A. Nasyrov et al., JAP **105**, 123709 (2009).　[6] F. Schanovsky et al., Proc. SISPAD, 2013, p. 451.　[7] H. Seki et al., JJAP **57**, 06KB04 (2018).　[8] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* 8th ed., Chap. 14.　[9] S. Makram-Ebeid and M. Lannoo, PRB **25**, 6406 (1982).　[10] Sentaurus Device User Guide L-2016.03, Chap. 17.

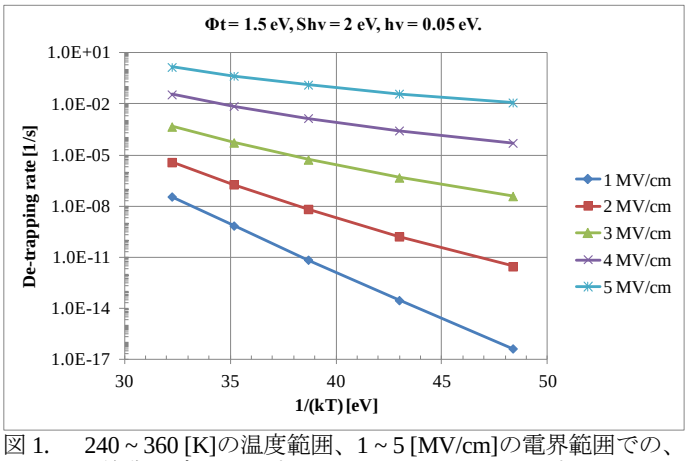

図 1.　240 ~ 360 [K]の温度範囲、1 ~ 5 [MV/cm]の電界範囲での、SiN 単膜のデトラップ・レートのアレニウス・プロット

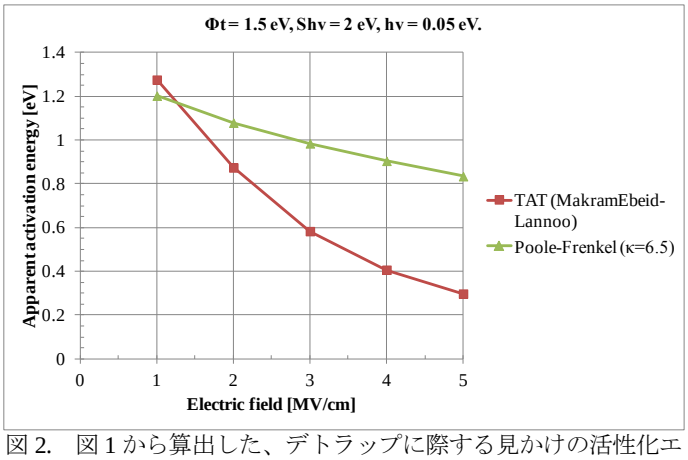

図 2.　図 1 から算出した、デトラップに際する見かけの活性化エネルギー（Poole-Frenkel 効果の計算では、同効果を強めに評価するために、比誘電率：κ を SiN にしては小さめの 6.5 [2]とした）