多結晶シリコン中の結晶粒界の抵抗揺らぎに関する物理モデル化

Physical Modeling for Fluctuation of Grain-Boundary Resistance in Polycrystalline Silicon

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. 背景と狙い

多結晶シリコン中のキャリア移動度は、単結晶中に比べて小さ く、そのため、大粒径化によるトランジスタ特性の改善報告が後 を絶たない[1]。そもそも、多結晶シリコン中での結晶粒界による キャリア移動度の低下は、通常、Seto[2]ないしLevinson等[3]によ る熱電子放出のモデルに基づいて考察される。ただし、これらの 熱電子放出モデルに基づく限り、キャリア移動度に顕著な正の温 度依存性が表れることが、もはや前提となってしまう。ところが、 実際にキャリア移動度を DC 測定してみると、負の温度依存性が 確認されてしまうありさまであり[1]、上記モデルへの疑念を禁じ 得ないのが実情である。

これらの実情を踏まえて、我々は、SILC[4,5]やRTN[6-9]、ひ いてはMONOS[10]の局在準位に適用されている、トラップ補助型 トンネリング(Trap-Assisted Tunneling)に基づいて、結晶粒界を 横切る電気伝導を物理モデル化することを提案した[11]。そして、 結晶粒界に制限されながらも負の温度依存性を示すキャリア移動 度が、自己無撞着計算で再現可能なことを、確認/報告した[11]。

ところで、多結晶シリコン中の電気伝導にまつわる問題は、何 もキャリア移動度に限った話ではない。中でも深刻なのが、オン /オフを判定する際に発生する、しきい値の揺らぎ (ノイズ) [12] であろう。本報告ではこのノイズに焦点を当てて、1 ~ 2 us の時 間のオン/オフ判定で問題となる、電流ひいては抵抗の揺らぎの 計算に、上記物理モデル化の手法[11]を応用する。そして、しきい 値付近での電流揺らぎが、±3σ換算で1桁にも成り得ることを示 す。

2. 計算と考察

しきい値状態のキャリア(電子)の表面密度として1x10¹² cm² を想定し、表面量子化計算の結果[13]に基づいて反転層厚みを5 nmと仮定した。すなわち、多結晶チャネル中の電子の体積密度を2x10¹⁸ cm³と見積った。その上で、0.2 umのチャネル幅を想定し、キャリアが結晶粒界を横切る際の断面積を1x10¹¹ cm²と見積った。そして、参考文献[1]に示されている、負の温度依存性を示す50 cm²/V/s前後の電子移動度の実測結果(結晶粒径のメジアン値は約0.8 um)が、おおむね再現できるように、結晶粒界上のトラップの物理パラメータを選んだ。選んだパラメータの値については、表1を参照のこと。

1 V/cm かつ 300 K の条件下で定常状態の自己無撞着計算を行い、 トラップによる電子の捕獲/放出の時定数と占有率を求めた。その結果を表 2 に示す。本表 2 より、3 種類のトラップの内の"Trap-Type 2"の電子捕獲/電子放出の時定数が、それぞれ 3 us/13 us 以上となっているのが分かる。つまり、1 ~ 2 us のオン/オフ判 定時間内では、電子の占有/非占有が平均化されないはずであり、

"Trap-Type 2"はオン/オフ判定のノイズ源と成り得る。そこで、 本 "Trap-Type 2"の30個のトラップによる電子の占有状況を、平 均占有率が 0.8149...の二項分布に従うものと考えた上で、結晶粒界 1 個あたりの低電界移動度の揺らぎ、ひいては電流の揺らぎを解析 した。同解析結果を図1に示す。本図1より、しきい値付近での 結晶粒界1個あたりの電流揺らぎは、±3σ換算で1桁と見積られ、 単結晶チャネルの場合と比べて明らかに大きいことが分かった。

また、上記の電流揺らぎを抵抗揺らぎに変換した上で、結晶粒 界が複数個ある場合の電流揺らぎを解析した。同解析結果を、図2 に示す。粒界数の範囲を例えば2~4個と限定する限り、電流揺 らぎはあまり大きく変化しないと言える。ただし、粒界数が0、す なわち単結晶の場合は、結晶粒界由来の大きな揺らぎが消失する という顕著な変化が起こり得る。

参考文献

M. Oda et al., Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet. 2015, 125. [2] J. Y. W.
Seto, J. Appl. Phys. 46, 5247 (1975). [3] J. Levinson et al., J. Appl. Phys. 53, 1193 (1982). [4] M. Herrmann and A. Schenk, J. Appl. Phys. 77, 4522 (1995).

[5] A. Gehring et al., Microelectron. Reliab. **43**, 1495 (2003). [6] F. Schanovsky et al., J. Comput. Electron. **11**, 218 (2012). [7] M. Zhang and M. Liu, J. Appl. Phys. **113**, 144503 (2013). [8] Y. Higashi et al., IEEE Trans. Electron Devices **61**, 4197 (2014). [9] 宝玉 充 他, 2017 年 第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会, 5p-C11-7. [10] K. A. Nasyrov et al., J. Appl. Phys. **105**, 123709 (2009). [11] 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; M. Hogyoku et al., submitted to SSDM2018. [12] M.-K. Jeong et al., Tech. Dig. Int. Electron Devices **44**, 1915 (1997).

			-		
Trap-Type		1	2	3	
トラップ面密度	[1/cm**2]	2E+12	3E+12	1E+12	
トラップ個数	[none]	20	30	10	
トラップ深さ	[eV]	0.292	0.318	0.398	
Huang-Rhys因子	[none]	2	0.5	1	
フォノン・エネルギー	[eV]	0.01	0.01	0.01	
ます 対目始目しのな話板のしこ プの物理パニア な					

表 1. 結晶粒界上の 3 種類のトラップの物理パラメータ

Trap-Type		1	2	3	
T capture,cathode	[s]	1.25898E-11	3.13663E-06	0.005058186	
T capture,anode	[s]	1.25696E-11	3.10625E-06	0.005008861	
T emission,cathode	[s]	2.03096E-11	1.38333E-05	0.499064273	
T emission,anode	[s]	2.02144E-11	1.3657E-05	0.492670721	
トラップの電子占有率	[none]	0.616958169	0.814931021	0.989950887	
まる 200 Kの内当りがいっいいたて 古二何位 支引体の 休田					

表 2. 300 K の定常状態における目己無撞看計算の結果 (0.8 um の結晶粒径あたり、0.08 mV の印加電圧)



図 1. 結晶粒界 1 個あたりの電流揺らぎ(300 K)



図 2. 結晶粒界が複数個ある場合の電流揺らぎ(300 K)