

High- μ チャネル材料と絶縁膜の界面制御

High- μ channel and its MOS interface control

産業技術総合研究所 [○]前田辰郎、安田哲二

AIST, [○]Tatsuro Maeda, Tetsuji Yasuda

E-mail: t-maeda@aist.go.jp

Si の物理的な限界によって微細化による性能向上は限界を迎えており、さらなる高速化の手段として、Si よりも移動度の高い Ge や III-V 族化合物半導体のチャネルへの導入が求められている。特に電子移動度の高い III-V 族化合物半導体に関しては、1970 年代から、GaAs や InP といった III-V 族半導体上に、様々な酸化手法や絶縁膜堆積法で絶縁膜を形成し、MOS 界面準位 (D_{it}) を低減する試みがなされた。しかし、Si-MOS 界面に比べ、III-V 族化合物半導体を用いた MOS 界面には、高密度の界面準位が発生し、当時のプロセス技術では実用上十分な品質の MOS 界面を形成する技術確立するには至らなかった。逆にこの III-V MOS 界面制御の困難さは、ゲート金属と III-V 結晶層を直接接合するショットキーゲート型 FET の開発を促し、1978 年に富士通の三村らにより発明された HEMT として結実する。

近年、上記に述べた実用的要求の高まりと最先端シリコンテクノロジーの導入により、III-V MOS 界面制御のデバイス・プロセス技術は着実に進歩を続けている。特に大きな技術的な進捗は、high-k 材料の堆積技術として大きく進歩した原子層堆積 (ALD) 法の III-V MOS 界面への適応にある。2003 年に ALD- Al_2O_3 をゲート絶縁膜に用いた GaAs nMOSFET の報告以降[1]、比較的良好な III-V MOS 界面が ALD 技術により容易に実現できることが報告された[2]。また、Ga を一部 In 置き換え、InP 基板と格子整合させた高品質 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ の MOS 界面では、伝導帯端付近の D_{it} が比較的低く、チャネル材料として Si 比べ 2-3 倍の移動度向上が実証されるようになる。このことが、III-V MOSFET 開発の大きな契機となる。低い界面準位の理由は、Al の原料となる TMA (Trimethyl-aluminum) が III-V 表面に供給されると、その還元作用により界面準位の要因とされる過剰 As ないし As 酸化物が自動的に除去されるセルフクリーニング効果によるものとされている[3]。しかしながらバルクの移動度と比較すると、その性能はまだ不十分であることから、さらなる界面特性の向上のために、様々な界面処理法や界面制御層の導入が提案されている。Ga リッチ界面を形成することにより D_{it} の分布が鋭敏に変化することや[4]、ギャップ内だけでなく伝導帯中の界面準位も移動度に影響することが実験的に示されている[5]。また、本来移動度に異方性の無い III-V 材料にもかかわらず基板面方位を(111)A 面に変えることで移動度は大きく向上することから、界面に存在する陽イオン(In, Ga)と陰イオン(As)の形成するダイポールの局所的な揺らぎも、電子の散乱に大きく影響するとの指摘もある[6]。これは、Si にはない化合物半導体特有の問題である。high-k 材料の選択においても、 Al_2O_3 のような 3 価の酸化物が良好な III-V MOS 界面を形成すると理論的にも支持される[7]一方で、 HfO_2 のような 4 価の酸化物でも結晶成長と ALD を一貫して行うことで良好な界面を形成することも示されている[8]。また移動度向上の別のアプローチとして、先の化合物半導体の結晶ヘテロ界面作成術を応用した量子井戸 MOSFET もしくは MOS-HEMT 構造も効果的である[9]。この構造も化合物半導体特有のものでゲート絶縁膜面とチャネル面との間に InGaAs より電子親和力の小さな InP などの結晶層を薄く挟むことで、残留欠陥準位のある MOS 界面とチャネルを空間的に分離し、界面起因のキャリア散乱を低減することで移動度は大幅に向上する。

懸案であった化合物半導体において MOS 界面がある程度改善され、Si CMOS 集積回路における微細化も限界に近づきつつある中で、化合物と Si テクノロジーの融合は必然の流れである。界面準位発生の機構や界面制御による界面準位低減の機構が、依然として十分理解されていない中、今後も、化合物半導体特有の特性を活かしつつ、界面準位の発生を広いエネルギー域にわたって抑制するとともに、キャリア散乱を最小化するための構造改善の努力が続けられることになる。

[1] P. D. Ye, et al., APL 83 180 (2003). [2] M. L. Huang, et al., APL 87 252104 (2005). [3] M. Milojevic, et al., APL 93 202902 (2008). [4] W. Jevasuwan, et al., APEX 7, 011201 (2014). [5] N. Taoka, et al., IEDM 610 (2011). [6] Y. Urabe, et al., IEDM 142 (2010). [7] J. Robertson, et al., IEDM 119 (2009). [8] T. D. Lin, et al., APL 103 253509 (2013). [9] J. Lin, et al., IEDM 757 (2012).