InSnZnO MOSFET の高電子移動度の起源

Origin of High Electron Mobility in InSnZnO MOSFETs

東芝メモリ(株) °斉藤 信美, 上田 知正, 手塚 勉, 池田 圭司
Toshiba Memory Corporation °N. Saito, T. Ueda, T. Tezuka and K. Ikeda
E-mail : nobuyoshi.saito@toshiba.co.jp

【背景】酸化物半導体トランジスタは極低オフリーク特性(<10^{-22} A/μm)や優れた S/D 間耐圧(V_{BD}>40 V)、低温プロセス(<400 °C)で形成可能といったユニークな特徴を有することから、近年 3D-LSI 実現に向けた BEOL トランジスタとして注目を集めている[1-5]。しかしながら、酸化物半導体の代表材料である InGaZnO は移動度が高々10 cm^2/Vs と低く、BEOL トランジスタとしての応用範囲が限定される。InGaZnO をベースとする高移動度材料として、Ga を Sn に置換した InSnZnO が 30 cm^2/Vs 程度の高移動度を示すことが報告されているが[6]、高移動度特性が実現される機構については十分に理解されていない。InGaZnO の伝導機構解析に関しても、ホール効果移動度測定による検討は多数あるものの[6-9]、キャリア密度の調整は成膜時の酸素流量や成膜後の水素アニール処理による酸素欠損量制御によってなされており、膜組成の変化による移動度への影響を分離することができていない。本報告では、これらの影響を除外するために、試作した酸化物半導体トランジスタのゲート電界によるキャリア密度変調を利用した。構成元素を変えた酸化物半導体 MOSFET に対して、系統的に移動度の温度およびキャリア密度依存性を調べることで酸化物半導体チャネルの各構成元素がキャリア伝導に与える影響を理解し、InSnZnO の高移動度の要因について検討した結果について報告する。

【実験】酸化物半導体チャネルとして InGaZnO、InSnZnO、InSnGaO の 3 種を用意し InGaZnO については In 組成比を変更したものも作製した。トランジスタ構造はボトムゲート型トップコンタクト構造であり、ゲート電極とソース／ドレイン電極はタングステン、ゲート絶縁膜には PE-CVD により成膜した SiO_2膜を用いた。移動度の評価は Split CV 法によって行った。IV 測定時のドレイン電圧は V_d = 10 mV、CV 測定の周波数は f = 5 kHz を用いた。評価に用いたトランジスタの素子サイズは L/W = 50/50 μm であり 300 K～10 K の範囲で温度依存性を取得した。

【結果】図 1 に InGaZnO トランジスタの移動度のキャリア密度(N_s)依存性を示す。キャリア密度の増加に伴い移動度は増大する。また温度依存性に関しては低温ほど移動度が減少し、N_s =10^{13} cm^{-2} での移動度は 300 K で 13.9 cm^2/Vs であったが、10 K では 2.8 cm^2/Vs と大幅に低下する。この傾向はチャネル組成に依らず確認された。移動度の温度依存性を解析した結果、300 K~25 K では熱活性型の挙動を示し、20 K 以下の極低温では $T^{-1/4}$ に比例する Variable range hopping (VRH)伝導となることを示唆する結果を得た。図 2 に熱活性型となる温度領域から算出した活性化エネルギーのキャリア密度依存性を示す。この活性化エネルギーは伝導帯端にてキャリア散乱要因となるポテンシャル揺らぎの散乱振幅に相当する。上記散乱振幅はキャリア密度の増加に伴いスクリーニングの効果により低下し、高キャリア密度(N_s=10^{13} cm^{-2})ではチャネル材料に依らず約 2 meV となった。一方で、低キャリア密度(N_s=10^{12} cm^{-2})では InGaZnO の 7 meV と比較して InSnZnO は 12 meV と増大していることがわかった。次に図 3 に VRH 伝導となる極低温領域(<20 K)で抽出された傾き値(B)と 300 K における移動度との関係を示す。図 3 中の式に表すように B の逆数は Cation の波動関数の重なりと状態密度の積であり、B が小さくなるほど移動度が増大する相間がみられた。これは酸化物半導体のバンド伝導の移動度に Cation 同士の波動関数の重なりが強く影響を及ぼすことを意味する。InSnZnO では添加された Sn により伝導帯端のポテンシャル揺らぎは深くなる、一方で Sn の最外殻電子軌道である 5s 軌道の寄与により、In とともに伝導帯を形成する波動関数の重なりが増加し、ポテンシャル揺らぎ増大の効果を打ち消して、バンド伝導の移動度が向上していると考えられる。

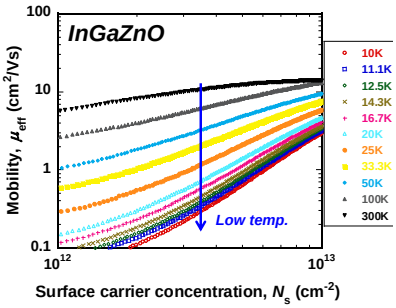

Fig.1 Surface carrier concentration dependence of mobility extracted by split CV method at different temperatures.

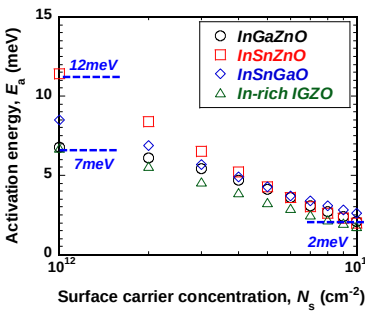

Fig.2 Comparison of N_s dependence of the activation energies of mobility in high temperature region.

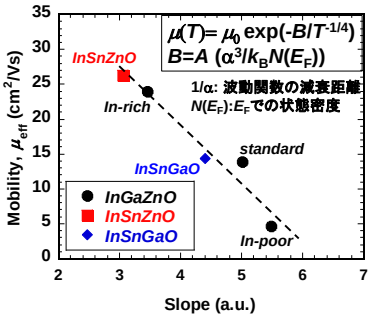

Fig.3 Relationship between the slopes in VRH conduction regions (<25 K) and mobility with different OS channels.

【参考文献】[1] K. Nomura et al., Nature,432, 488(2004), [2] T. Aoki et al., ISSCC 2014, p502, [3] Y. Kobayashi et al., VLSI 2104, p170, [4] K. Kaneko et al., VLSI2011, p120, [5] K. Ota et al., VLSI 2105, p214, [6] S. Tomai et al., JJAP, 51, 03CB01(2012). [7] K. Nomura, et al., APL, 85, 993(2004). [8] T. Kamiya et al., J. Display Tech., 5, 462(2009), [9] T. Kamiya et al., APL 96, 122103(2010)

© 2018年 応用物理学会