

モノリシック 3次元 CMOS 集積に向けた Ge-On-Insulator 技術

GeOI Technology for Monolithic 3D CMOS integration

産総研 ○前田辰郎、石井裕之、張文馨、入沢寿史、倉島優一、高木秀樹、内田紀行

AIST ○T. Maeda, H. Ishii, W.-H. Chang, T. Irisawa, Y. Kurashima, H. Takagi, and N. Uchida

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

【背景・目的】

CMOS をモノリシック(monolithic) に 3 次元積層させる M3D CMOS の実現には、従来の Si-CMOS よりもキャリア移動度が高く、CMOS 作製プロセス温度の低い Ge-CMOS の活用が期待される。これまでに、Ge 特有の高品質なゲートスタック技術と高移動度実証により、チャンネル材料としてはその有用性が示されてきた。しかしながら、M3D CMOS には、Ge on Si や Ge-on-Insulator 構造を得るための積層型の基板エンジニアリングが欠かせない。また、微細 GeCMOS には、チャンネルの薄膜化と均一性そして良好なチャンネル裏面の形成方法も同時に求められる。そこで我々は、プロセスストレスを最小限に抑えた低温貼り合せ技術とエピタキシャルリフトオフ(ELO)法により高品質な積層型 Ge 層を開発してきた^[1]。さらに、Ge 層の膜厚を制御するための SiGe 層導入や、原子層レベルで膜厚制御と表面平坦化するデジタルエッチング法、Ge 表面の Si パッシベーション法などの技術により高品質な超薄膜 Ge 層を実現してきた^[2,3]。今回、M3D Ge-CMOS に向けたフルウエハースケールでの積層化と薄膜化された Ge 層の電子物性と結晶性等を評価したので報告する。

【実験方法及び結果】

まず、Ge と優れた格子整合性を有する 4 インチ GaAs ウエハー上に、剥離層となる AlAs 層を挟んで高品質なエピタキシャル成長(Epi-Ge 層)を得る。接合には Epi-Ge 表面の平坦性が重要であることから、Epi-Ge 成長には平坦性を維持するための低温成長と高い結晶性を得るための高温成長の 2 段階成長を取り入れている。この手法により Epi-Ge 層中の転移低減と Rms = 1nm 以下を実現している。その後、Ge 表面には埋め込み絶縁層とパッシベーション膜として機能する Al₂O₃ 膜を堆積させた。Al₂O₃/Epi-Ge/AlAs 層をパターン構造にエッチング後、SiO₂/Si ウエハーと低温で貼り合わせた。接合後、AlAs 剥離層を HCl 水溶液により溶解し、GaAs 基板と Ge 層を剥離して、Epi-Ge 層を Si ウエハー上へ転写した。図 1 に剥離後の GaAs ウエハーと Epi-Ge 層が転写された Si ウエハーの写真を示す。4 インチ全面に Ge 層が転写されており、さらなる大口径プロセスへの適応も可能である。転写前後および薄膜化時の XRD 評価から、転写による性能劣化は見られず、転写された Ge 層および薄膜化後も単結晶とほぼ同等であることがわかった。図 2 は、ELO 法と SmartCut™ 法により作製された Ge 膜厚(70nm)の XRD の比較である。ELO 法の場合、GaAs 基板とのわずかな格子定数差(0.07%)を反映して、極めて微少ではあるが圧縮歪みが内包する一方、SmartCut™ 法ではやや大きめの伸張歪みが観測され、半値幅も大きい。これは、SmartCut™ 法では完全緩和した Ge 層が Si 基板上に結晶成長しており、熱膨張係数差(2 倍以上)から生じる熱応力によるものである。GaAs 基板上の Epi-Ge 層は、熱膨張係数差はほとんど無く、その点でも ELO 法ではより単結晶 Ge に近いものが得られやすい。また、ホール測定 of 膜厚依存性からは、n 型 Epi-Ge 層を薄膜化すると裏面界面の影響により移動度の劣化が見られ、高品質 Ge 層を得るためには裏面形成にも注意を施す必要があることがわかる。

[1] T. Maeda et al., MEE, 109, 133 (2013).

[2] T. Maeda et al., Appl. Phys. Lett. 109, 262104 (2016).

[3] W. H. Chang et al., IEEE TED 66 3 1182 (2019)

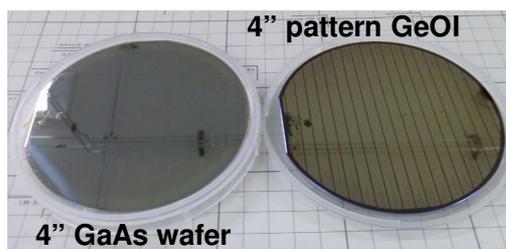


Fig 1. The photographs of 4 inch GaAs and GeOI wafers after Ge layer transfer.

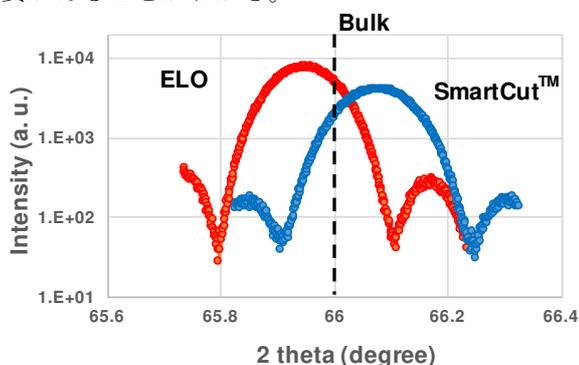


Fig 2. X-ray diffraction curves on the 2θ-ω scan from (004) reflection of 70 nm thick Ge layer using ELO and Smart Cut™ process.