# SiGe/$GeO_2$界面における超高真空熱処理による$GeO_2$の還元とSiの酸化

## $GeO_2$ reduction and Si oxidation at SiGe/$GeO_2$ interface in UHV annealing

°宋　宇振、鳥海　明（東大院工）

°Woojin Song, and Akira Toriumi (The University of Tokyo)

E-mail: song@adam.t.u-tokyo.ac.jp

**[序論]**　高 Ge 濃度(High-Ge-content, HGC) SiGe は次世代 *p*MOSFET の材料として注目されている[1,2]。HGC-SiGe の問題は酸化膜―基板界面反応の制御が極めて難しいことにある[3]。SiGe 界面での Ge は界面特性の劣化の原因になると考えられ、Ge を界面反応から外すために低温後窒化[3]、Si キャップ層堆積[4]、$NH_3$ 表面パシベーション[5]などが提案されてきた。しかし、これらの手法によって SiGe の反応特性を完全に理解されたわけではない。Chang らは Si と Ge 酸化の熱力学的な特性を用いて界面制御が可能であると示したが[6]、実際の SiGe 界面反応は酸化反応だけでは説明しにくい。一方、SiGe の界面制御が難しいという事実は、SiGe 固有の反応が存在することを示唆し、HGC SiGe の界面をうまく制御するためには SiGe 固有の反応特性を理解しなければならない。本発表では HGC SiGe の反応特性の理解を目標とし、SiGe/$GeO_2$ での還元反応に着目して $GeO_2$ の Ge 原子の動きに関して議論する。

**[実験手法]**　5 nm の $GeO_2$ をスパッタ手法で Ge 50 at%の SiGe(40 nm)/*p*-Si 基板の上に堆積した。この基板を超高真空(< $1\times10^{-7}$ Pa)チャンバーの中に入れて 20ºC/min で 950ºC まであげてアニールした。アニール前後のサンプルの変化を XPS で調べた。

**[結果と議論]**　アニール前後の SiGe/$GeO_2$ の XPS スペクトルの変化を **Fig. 1** で示す。$Ge^{4+}$ピークはほとんどなくなり、新しい $Si^{4+}$ピークが生じた。また、それぞれのピーク強度を比べてみると、元の $GeO_2$ の一部の酸素だけが $SiO_x$ の成長に使われたことがわかる。ここから、SiGe の界面反応は単に Si-Ge 交換だけ（$2Si_{0.5}Ge_{0.5} + GeO_2 = SiO_2 + 2Ge$）ではないと推測できる。一方、Ge 原子の行方を調べるため、同じ $GeO_2$ 膜を Si の上に堆積し、アニールして HF 溶液で酸化膜を剥離した(**Fig. 2**)。$Ge^{0+}$ピークが観測され、Ge 原子が Si 基板に存在することが確認された。また SiGe 基板では GeO 脱離が観測されないことを考えると[7]、このスペクトル結果は $GeO_2$ でのほぼすべての Ge 原子が還元されて基板側まで移動すると意味する。

**[結論]**　SiGe/$GeO_2$ での酸化還元反応特性を調べた。アニール前後のピーク強度を比べると SiGe と $GeO_2$ は界面で反応され、$GeO_2$ 中の Ge 原子は基板の表面で還元されて $Ge^{0+}$として残される。同時に $GeO_2$ 中の酸素の一部だけが Si と反応して $SiO_x$ を作ると考えられる。

**[参考文献]**　[1] P. Hashemi *et al.*, VLSI 2015, pp. T16. [2] C. H. Lee *et al.*, VLSI 2016, pp. 36. [3] J.-H. Han *et al.*, SISC 2013, pp.1.3. [4] Z. Shi *et al.*, Appl. Phys. Sci. 224 (2004) 248. [5] K. Sardashti *et al.*, SISC 2015, pp.3.5. [6] C.-T. Chang *et al.*, IEDM 2015, pp. 586. [7] W. Song *et al.*, ICSCI/ISTDM 2016.

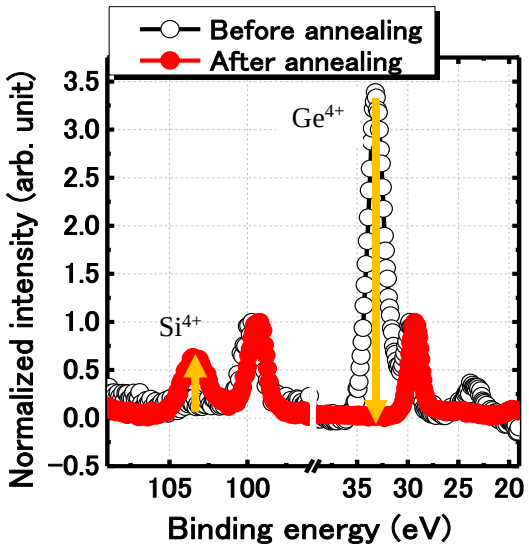


**Fig. 1**. XPS spectra of Si 2*p* and Ge 3*d* region of $GeO_2$/SiGe stack before (black empty) and after (red solid) UHV annealing at 950 ºC.

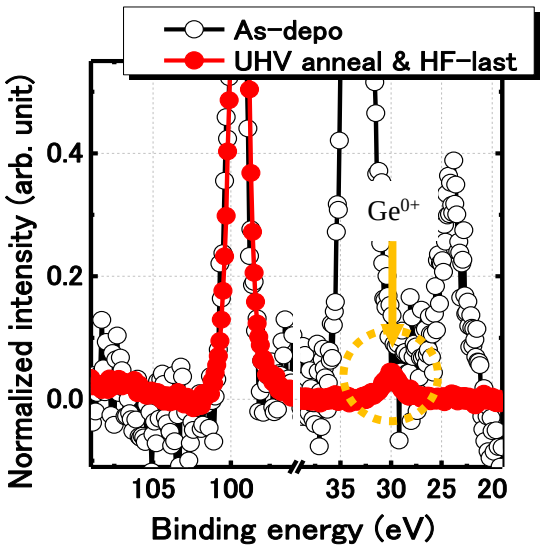


**Fig. 2**. Comparison of XPS spectra of Si 2*p* and Ge 3*d* region of Si/$GeO_2$ stack. ○ As-depo. ● After UHV annealing the sample is HF-last treated. New $Ge^{0+}$ peak appears in the broken circles as indicated.

© 2016年 応用物理学会