

SiGe 薄膜における歪み緩和と結晶傾斜への水素局在効果

Hydrogen localization effects on strain relaxation and crystallographic tilting in SiGe

名大院工 ○(M2)加納 光樹, 宮本 聡, 黒川 康良, 宇佐美 徳隆

Nagoya Univ. ○Mitsuki Kano, Satoru Miyamoto, Yasuyoshi Kurokawa, Noritaka Usami

E-mail: kano.mitsuki.x4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

【背景】 シリコン(Si)量子コンピュータは、最先端の半導体微細加工技術と同位体工学により、その実現性が近年高まっている。特に、シリコンゲルマニウム(SiGe)薄膜に埋め込まれた ^{28}Si 同位体層で実装された Si 量子ビットは、表面欠陥からの外乱要因を回避できる優位性もあり、99.9%以上の量子計算忠実度を達成するなど最も有望な量子アーキテクチャの1つとなっている[1]。しかし ^{28}Si 同位体層とのヘテロ界面における原子ステップの存在が、実装される個々の Si 量子ビットの制御性を低下させる原因となり得る。最近、我々は SiGe 下地層形成中の歪み緩和に伴う転位欠陥が、原子ステップ発生に繋がるランダムな結晶方位角の傾斜を招くことを明らかにした。この Si/SiGe ヘテロ構造型の量子プラットフォームでは、歪み緩和と結晶傾斜角抑制の両立に原子レベルでの欠陥制御が必要であり、これは局在水素がもつ結合切断と欠陥終端という相反的性質を利用することで実現可能と考えられる。本研究では、歪み SiGe ホスト基板に水素を局在導入することで、水素クラスター欠陥が歪み緩和と結晶傾斜角に与える影響について検証した。

【実験方法】 化学気相成長により Si(001)基板上に $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 傾斜組成層を成膜し、その上に $\text{Si}_{0.87}\text{Ge}_{0.13}$ 層を形成した。水素プラズマ処理(HPT)を $T_{\text{HPT}} = 100\text{--}140^\circ\text{C}$ 、3時間行うことで水素を表面近傍に局在導入し、その後 600°C までのポストアニール拡散により水素のクラスター化を促進した。SiGe 層に対する水素導入効果として、ラマン分光分析、透過型電子顕微鏡(TEM)及び高分解能 X 線回折(XRD)を用いて、歪み緩和及び結晶傾斜角の変化を調べた。

【結果と考察】 Fig. 1(a)に水素に関連した振動モードのラマンスペクトルを示す。 100°C 付近の HPT によって Si-H と H_2 の振動モードが明瞭に観測され、 1992 cm^{-1} に現れる小さなピークは孤立水素(isolated-H)及び Ge-H 由来の振動モードと同定される。この結果は、SiGe 層への水素の効率的な局在導入を示唆しており、部分的に水素の気相状態で取り込まれていると考えられる。また

断面 TEM 像からは、(001)及び(111)面に平行な水素プレートレットの形成が観察され[Fig. 1(b)]、クラスター化による加圧状態の水素欠陥では周辺の結晶格子を変位させることに起因する明確な干渉パターンが現れる。フリッジ間隔から水素内圧を解析すると、 $\sim 5.4\text{ GPa}$ という大きな内部応力を誘起していることが分かった。この時、歪み緩和率はポストアニール後に $<5\%$ と僅かに増加傾向を示すものの、微少な結晶傾斜角を XRD 解析すると $5 \times 10^{-3}\text{ deg}$ 程度の変化に留まっていた[Fig. 1(c)]。これらの結果は、水素局在を用いた欠陥制御が、Si/SiGe 量子プラットフォームにおける歪み緩和と結晶傾斜角抑制に有用であることを示すものである。

[1] J. Yoneda *et al.*, Nat. Nanotechnol. **13**, 102 (2018).

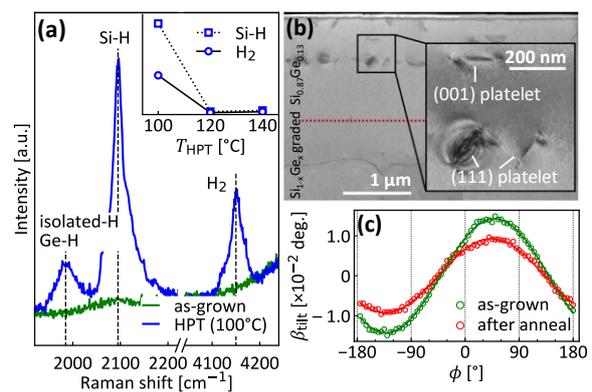


Fig. 1: (a) Raman spectra of H-related modes in strained SiGe for comparison with as-grown and HPT samples. The inset shows the integrated Raman intensity plotted as a function of T_{HPT} . (b) Cross-sectional TEM image of H platelets formed in the proximity of SiGe surface. (c) Azimuthal dependence of crystallographic tilting obtained by high-resolution XRD measurements for as-grown and post-annealed samples.