

同位体制御 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ 量子計算基板における微小結晶傾斜角イメージング

Direct imaging of crystallographic tilting in isotopically controlled $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ substrate

名大工¹, 慶大理工² ○(M2) 竹内 公一¹, 宮本 聡^{1,2}, 伊藤 公平², 宇佐美 徳隆¹

Nagoya Univ.¹, Keio Univ.²

○Koichi Takeuchi¹, Satoru Miyamoto^{1,2}, Kohei M. Itoh², Noritaka Usami¹

E-mail: takeuchi.koichi@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

【背景】半導体 CMOS 技術との互換性を有し、同位体制御技術が適用可能なシリコンは、量子ビットを大規模実装するための基板ホスト材料として適している。最近では、同位体制御 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ ヘテロ構造に実装したシリコン量子ビットで、単一電子スピンのコヒーレンス時間が約 10 倍に延伸され、99.9 %以上の量子計算忠実度を達成している[1]。しかし、シリコン量子ビットを大規模集積化するには、スピンに加えてバレー準位の制御性も向上する必要がある、電子の波動関数がヘテロ界面の原子ステップ上に存在するだけでバレー分離は容易に抑制される。この原子ステップは、SiGe 下地層形成中のランダムな転位発生により結晶面が僅かに傾くことに起因すると考えられ、近年ではフレネルゾーンプレートを用いた放射光 X 線ナノビーム回折法により、成長面内における界面傾斜角の空間揺らぎが観測されている[2]。本研究では、よりビーム収束性に優れる透過型電子顕微鏡 (TEM) の回折パターンを基に、同位体制御 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ ヘテロ構造の断面方向から結晶傾斜角をナノイメージングし、転位発生と傾斜角変化の直接的な関連性について検証した。

【実験方法】Si(001)基板上に傾斜組成 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.0-0.3$) 層を $\sim 3\ \mu\text{m}$ 、 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 歪み緩和層を $\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 積層した後、化学機械研磨で表面の平坦化を行い、 ^{28}Si 量子井戸層($\sim 10\ \text{nm}$)からなるヘテロ構造を再成長した[3]。高分解能 TEM を用いた制限視野回折像から、透過スポットを中心とする回折パターンの回転角度を抽出し、Si 基板に対する SiGe 下地層の局所的な結晶傾斜角をマッピングした。また、高分解能 X 線回折から得られる SiGe 歪み緩和層内部の大域的傾斜角と比較した。

【結果と考察】Fig. 1(a)に $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ ヘテロ構造の断面 TEM 像と、微小結晶傾斜角のマッピング結果を同時表示した。転位構造と結晶傾斜角変化において明らかな相関があり、特に点線矢印で示される貫通成分を有する転位に沿って大きな角度変化が生じることが分かる。また、面内方向に平均化した結晶傾斜角は、SiGe/Si 基板界面からの距離に伴い増加傾向を示し[Fig. 1(b)]、 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 歪み緩和層領域では X 線回折結果から得られる大域的傾斜角の値に収束する。さらに、異なる晶帯軸からのイメージング測定からは、局所傾斜角の反転対称性と共に結晶方位角依存性が確認され、また各点において得られた回折スポットは、逆格子空間上で X 線回折結果とも良く一致する。講演では、転位近傍での回転成分と歪み成分の結晶構造解析についても言及する。この新たなナノイメージング法で得られた知見は、バレー状態の構造学的制御法の確立だけでなく、量子ビットなどの実デバイス評価でしか分からなかった、バレー分離の事前予測や特性ばらつき解明に繋がる。

【謝辞】本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)JPMXS0118069228 の助成を受けた。

【参考文献】[1] J. Yoneda *et al.*, Nat. Nanotechnol. **13**, 102 (2018).
[2] P. G. Evans *et al.*, Adv. Mater. **24**, 5217 (2012); M.-I. Richard *et al.*, ACS Appl. Mater. Interfaces **7**, 26696 (2015). [3] S. Miyamoto *et al.*, IEDM – Technical Digest, p.6.4.1-p.6.4.4 (2018).

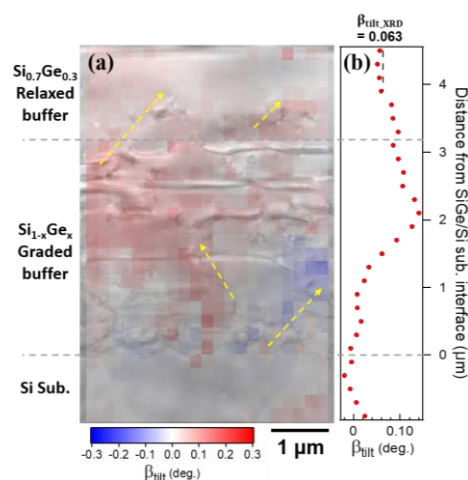


Fig. 1: (a) Tilting angle mapping superimposed on cross-sectional TEM image. (b) Depth profile of tilting angles averaged over the in-plane direction.