

微小領域逆格子マッピングによる

歪 Si/SiGe/Si ヘテロ構造の局所的歪揺らぎの検出

Detection of local strain distribution in strained Si/SiGe/Si hetero structures using micrometer-scaled area reciprocal space mapping

酒井 朗^a、中塚 理^a、望月省吾^a、湯川勝規^a、
竹田晋吾^b、木村 滋^b、坂田修身^b、小川正毅^a、財満鎮明^a
A. Sakai^a, O. Nakatsuka^a, S. Mochizuki^a, K. Yukawa^a,
S. Takeda^b, S. Kimura^b, O. Sakata^b, M. Ogawa^a, and S. Zaima^a

^a名古屋大学、^b高輝度光科学研究センター

^aNagoya University, ^bJASRI

マイクロビーム X 線回折法を用いて、Si(001)基板上にヘテロエピタキシャル成長した Ge 層のマイクロメートルの領域での局所的な歪み揺らぎを評価した。極薄 Ge 層の導入によって、転位の形態を制御することで、モザイシティの小さい Ge 層を形成できることが明らかになった。

The local strain distribution in heteroepitaxial grown Ge layers on Si(001) was investigated by using micro-beam X-ray diffraction. The mosaicity in the Ge layers can be reduced due to controlling the dislocation properties by introducing an ultra-thin Ge layer.

背景及び研究目的

MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 型トランジスタのチャネル領域に面内引張歪を印加し、そのエネルギーバンド構造を変調することで、キャリア移動度を向上させる歪 Si-MOSFET に関わる基板開発が近年積極的に進められている。これは、格子定数の大きな $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 層上に極薄 Si 層を形成して面内伸張歪を加えることによりバンド構造を変調させ、キャリアの移動度の大幅向上を実現する技術で、次世代 ULSI の最有力候補として注目を集めている。この歪 Si 基板開発のキーポイントである Si(001)基板上歪緩和

SiGe バッファ層に対しては、高い結晶品質（低貫通転位密度）、超平坦表面、薄膜化の両立を図るべく、歪の制御、及び歪導入・緩和の主たる担い手となる転位の制御が重要視されている。

さらに微細 Si-MOSFET の開発を考えると、基板全体における歪平均値のチューニングは言うに及ばず、基板面内のサブミクロンスケールにおける歪の揺らぎが重要な問題となる。最近では、チャネルの局所領域にのみ歪を誘起して移動度を向上させる技術も試みられていることから、局所領域における歪の精密な制御は必須となりつつある。しかし、現在、歪緩和 SiGe バッ

ファ層に対して、サブミクロンスケールでの歪みの揺らぎ評価は行われておらず、その形態が不明であることが基板高品質化への弊害の一つとなっている。

一方、我々は Si 基板上への SiGe および Ge 層の成長において、刃状転位成分によって優先的に歪緩和を起こすことで成長層のモザイシティを抑制し、従来よりも結晶性に優れたヘテロエピタキシャル層を形成できることを報告してきた¹⁾。今回、Ge 層成長において転位制御のために導入した極薄 Ge 層がモザイシティに与える影響について、マイクロビーム X 線を用いた微細領域の歪み構造評価により、研究した。

実験

基板として、 $\pm 0.3 \sim 1^\circ$ 程度のオフ角を持つ Si(001)基板を用意した。基板を洗浄後、超高真空中で Si バッファ層を成長後、0.5nm 厚の極薄 Ge 層を 400°C で成長した。更に室温にてアモルファス Ge 層を 35nm 成長後、 200°C の熱処理により Ge 層を結晶化した。その後、 700°C 、10 分間の熱処理を施した。比較の為に、極薄 Ge 層を導入しなかった試料も用意した。

マイクロビーム X 線を用いて、これらの試料の X 線回折 (XRD) 二次元逆格子マッピングを

測定した。マイクロビームはゾーンプレート及びスリットにより形成し、そのビームサイズは $0.47 \mu\text{m} \times 1.7 \mu\text{m}$ であった。

結果及び考察

図 1(a)に Si(001)基板上に Ge 層を成長した試料の Ge (004)面近傍におけるマイクロビーム XRD 二次元逆格子マップを示す。また、図 1(b)にそのピーク位置における ω スキャンのプロファイルを示す。いずれの試料でも ω スキャンのプロファイルは、鋭く強いピーク(I)と比較的ブロードで弱いピーク(II)との二つから構成されていることがわかった。 ω スキャンの半値幅は、Ge 層内の微傾斜に起因するモザイシティを表している。Si 基板上の Ge 層の場合、刃状転位の優先的な導入によって、従来の SiGe 層等に比較してモザイシティの小さな結晶ドメインによって構成されていると考えられ、半値幅の小さな鋭いピーク(I)は、Si 基板に対する微傾斜がほとんどない領域からの回折によるものと考えられる。しかし、よりブロードなピーク(II)は、これ以外に、比較的大きな傾斜角を持つ結晶ドメインが一部に存在することを示唆している。その原因は不規則な 60° 転位の導入によるものと考えられる²⁾。

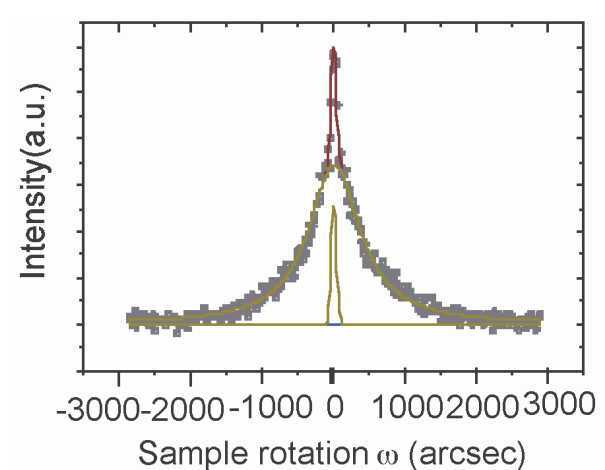
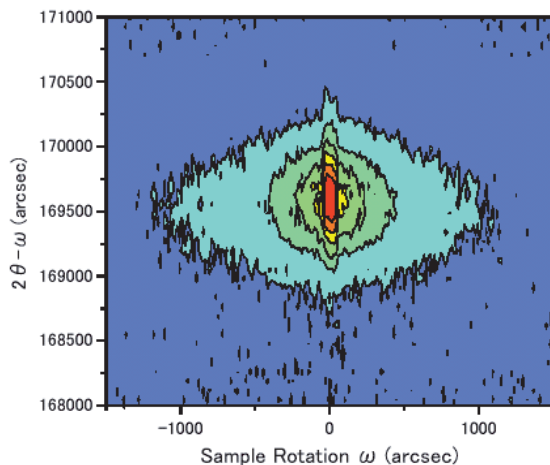


図 1 (a)Si(001)基板上に成長した Ge 層のマイクロビーム XRD 二次元逆格子マップ。(b)Ge(004)ピーク位置における ω スキャンプロファイル。

ω スキャンプロファイルより評価した各ピークの半値幅を表 I にまとめる。また、従来の一般的な X 線回折装置を用いたプロファイルから得られた結果も示す。極薄 Ge 層を導入した試料では、導入しなかった試料に比較して、ピーク(II)の半値幅がより小さい。透過電子顕微鏡による観察からも、半値幅のより小さな試料において、単位面積当たりに観察される 60° 転位の長さが短く、モザイシティがより抑制されていることが明らかになった。

極薄 Ge 層の導入によって成長初期に刃状転位の核となりうるハットクラスタの形成が行われる。その形成に伴って、歪み緩和に寄与する刃状転位の導入をより促進できることが期待される³⁾。これにより、歪み緩和に寄与する 60° 転位の導入を抑制し、モザイシティを低減できたものと考えられる。

また、いずれの試料においても、マイクロビーム XRD においては、従来法による XRD よりもピーク I および II ともに、小さな半値幅が得られた。マイクロビーム X 線において、その照射面積が従来の X 線源に比較して 10^{-6} 程度であることから、ミリメートルサイズの領域においては、マイクロメートルサイズの領域に比較して、より大きな結晶ドメイン微傾斜の揺らぎが存在することを示唆している。

今後の課題

極薄 Ge 層の導入によって、よりモザイシティの小さい結晶性の制御された SiGe および Ge 層の形成が期待できる。一方で、巨視的な歪み揺らぎの原因を明らかにし、マイクロメートルレベルからウェハレベルまでの広いレンジに渡って、歪み、転位の制御された IV 族エピタキシャル成長層を実現することが必要である。

参考文献

- 1) N. Taoka, A. Sakai, T. Egawa, O. Nakatsuka, S. Zaima, and Y. Yasuda, Mater. Sci. Semicond. Proc. **8**, 131 (2005).
- 2) S. Mochizuki, A. Sakai, N. Taoka, O. Nakatsuka, S. Takeda, S. Kimura, M. Ogawa, and S. Zaima, Thin Solid Films, *to be published*.
- 3) A. Sakai and T. Tatsumi, Phys. Rev. Lett. **71**, 4007 (1993).

表 I XRD 二次元逆格子マッピング上の ω スキャンプロファイルより得られた Ge(004)ピークの半値幅。
単位は arcsec。

		極薄 Ge 層なし	極薄 Ge 層あり
マイクロビーム	ピーク(I)	84	84
	ピーク(II)	900	702
従来の XRD	ピーク(I)	390	348
	ピーク(II)	1765	1556