

トライアルユース課題実施報告書(2005A)

課題番号：2005A0080-NI-np-TU

課題名：歪 Si 基板の非破壊高精度歪分布測定

実験責任者所属機関及び氏名：明治大学 理工学部 小椋 厚志

利用ビームライン：BL13XU

各種歪 Si 基板の深さ方向歪分布測定

明治大学理工学部

2005/09/27

小瀬村大亮、山崎浩輔、小椋厚志

1. 実験の背景

LSI の微細化、高性能化に伴い、Si 基板に応力を加えて格子歪を得るという手法が提案されている。この技術によりキャリア移動度が向上し、デバイスの高性能化が期待される。格子歪を得るための手段としては、LSI のプロセス中にトランジスタのチャンネル部にのみ歪を加える方法（プロセス歪もしくはローカル歪）と、プロセス前に格子歪を持った Si 層を有する歪 Si 基板を準備する方法（基板歪もしくはグローバル歪）がある。

2. 実験の目的

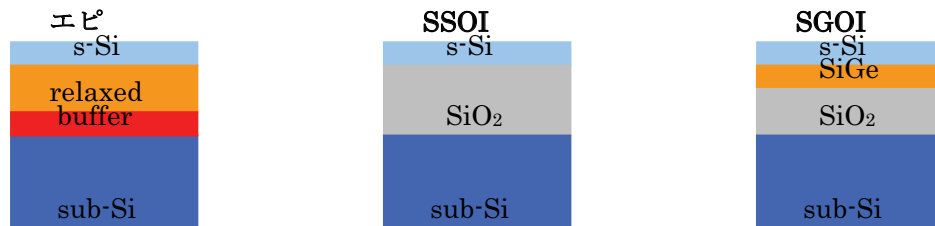
歪 Si を LSI に適用するために正確な“歪量”の評価が必要となる。歪の測定は様々な方法で行われているが、真にデバイスの特性に影響を与えるのはトランジスタのチャンネルが形成される領域である。歪 Si 基板において、設計上の歪量と種々の測定によって得られた歪量との比較は有意義である。また、同一基板内での面内歪量分布を測定することは、デバイスの特性とばらつきを見積もる上でも有意義である。歪 Si 基板において、果たして深さ方向に歪が均一であるかどうか、もし深さ方向に分布があるとすれば真にデバイス特性に影響を与えるのはどの深さの歪であるかを知ることが、実用上大変に有意義であるにもかかわらずあまり検討が進んでいないように見える。本実験では種々の歪 Si 基板に対して X 線の浸入長を変化させて in-plane X 線回折を行い、Si(220)、Si(400)面間隔を測定することで Si 基板最表面近傍における深さ方向の歪量分布を確認した。

* Si(220)の面間隔は 1.91999 \AA 、Si(400)の面間隔は 1.35763 \AA である。そのため、回折角度が大きい(400)の in-plane 回折はより微細な構造を評価する。

* 入射 X 線の浸入長は入射角度 0.28° で大体 5 nm と見積もっている。その他の角度についてもほぼ強度に比例すると推定されるが現在検討中である。

3. 測定試料

歪 Si 基板には、厚い SiGe 層を持つ SiGe 仮想基板を利用したエピ基板と、SOI 構造を組み合わせた SGOI、SSOI 基板が提案されている。本実験では、2 種類のエピ基板と、SGOI、SSOI、それぞれについて測定を行った。測定に用いた歪 Si 基板の構造模式図を図に示す。また、それぞれの基板における各層の膜厚を表にまとめて示す。

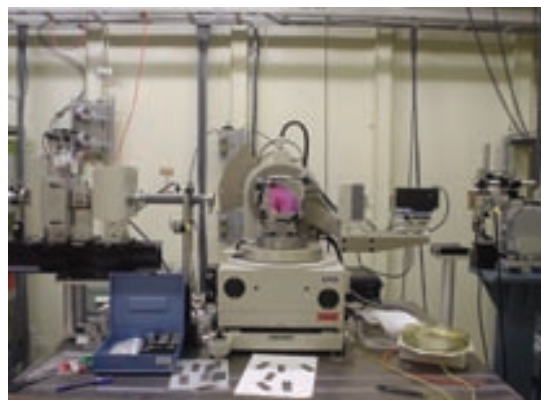


測定基板	SiO ₂	buffer	SiGe	s-Si
エピ(AW)		2um	3um	17.5nm
エピ(SU)		1um	2um	17.5nm
SSOI	200nm			17nm
SGOI	200nm		70nm	17nm

4. 測定方法

各試料に対して in-plane 回折を行った。実験では、X 線入射角度を全反射臨界角近傍で微小に制御することで Si 基板最表面近傍における深さ方向の歪量分布を測定した。また、無歪 Si 基板と比較して歪量を算出した。

* Si 格子面間隔 $d(220) = 1.91999[\text{\AA}]$ 、 $d(400) = 1.35763[\text{\AA}]$ を適用した。

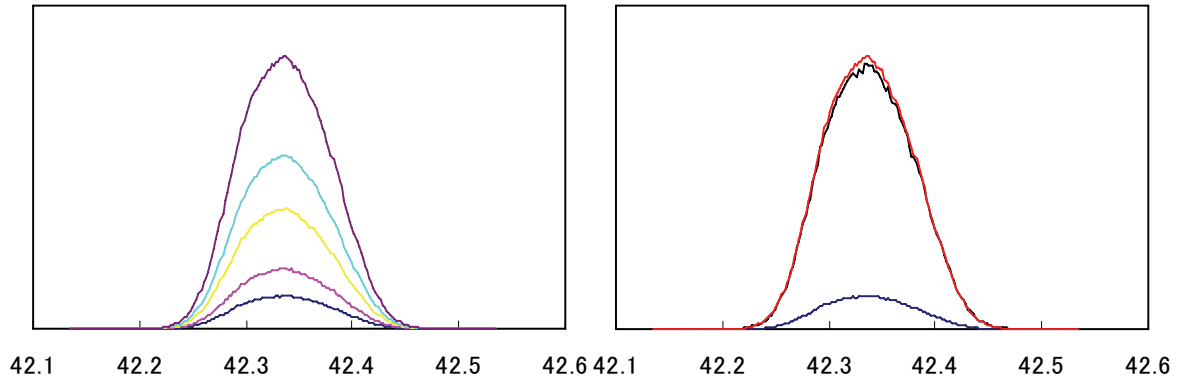


ビームライン：BL13XU

5. 結果と考察

5-1. (400)面間隔の深さ方向分布

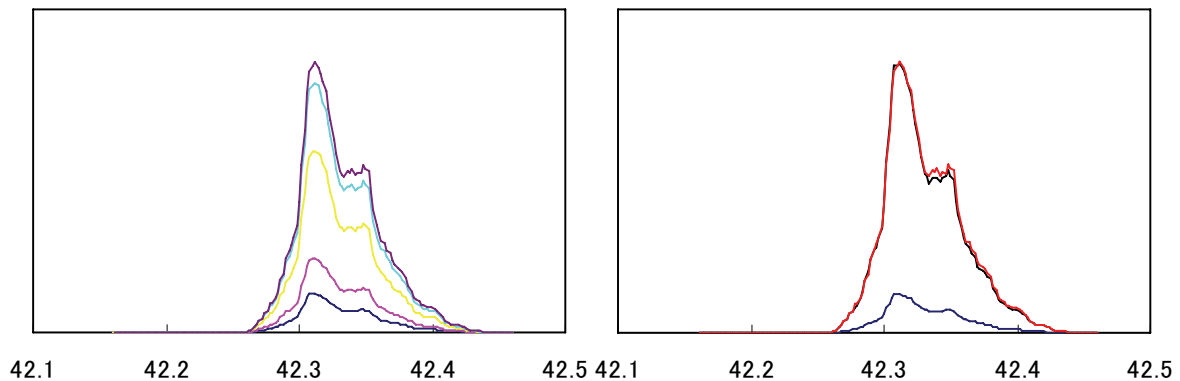
(i) SGOI



* 上図の左側は入射 X 線角度を 0.24° から 0.3° まで変化させて、様々な浸入長において in-plane 回折を行って得られたグラフである。右側のグラフは格子面間隔のシフトを比較するために入射角 0.24° (青) と 0.3° (赤) を選び、さらにピーク変化が比較しやすいように入射角度 0.24° を適当倍した (黒) グラフである。

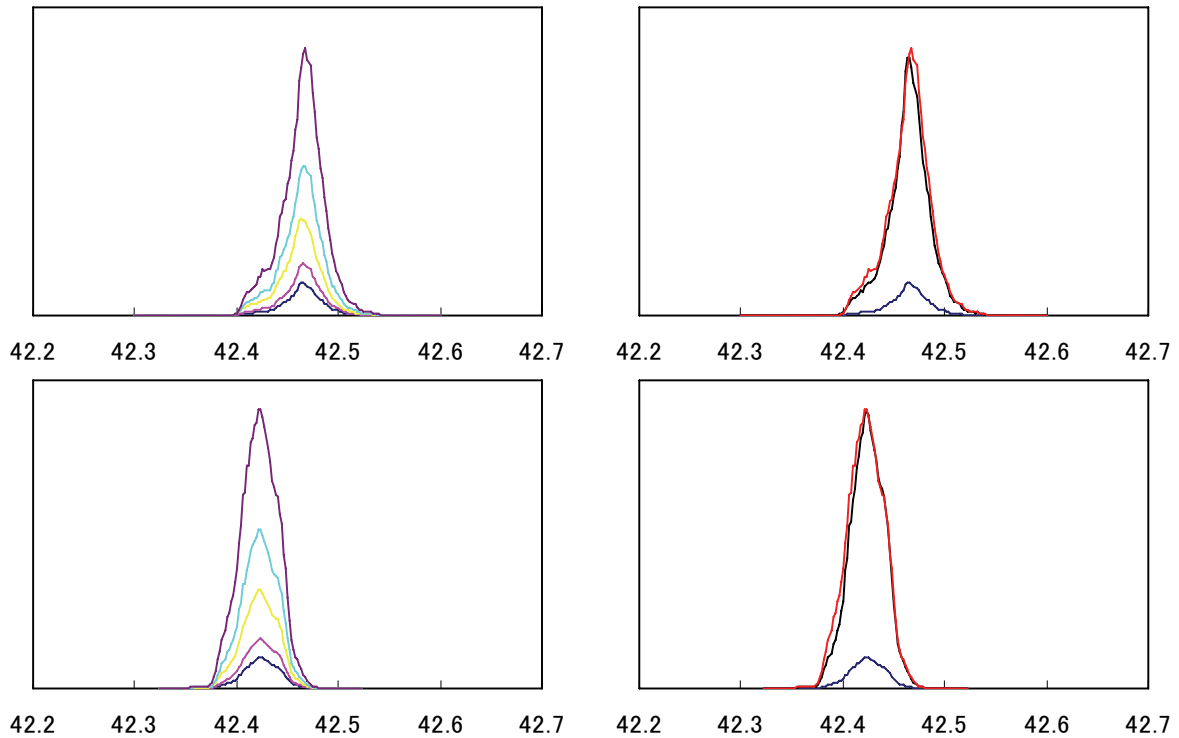
代表的なグラフを示す。測定した箇所ではグラフの赤線と黒線は完全に重なり、SGOI 基板の歪 Si 層における深さ方向の格子面間隔の分布は全く見られなかった。同様に、半値幅より深さ方向における結晶性の分布も全く見られなかった。

(ii) SSOI



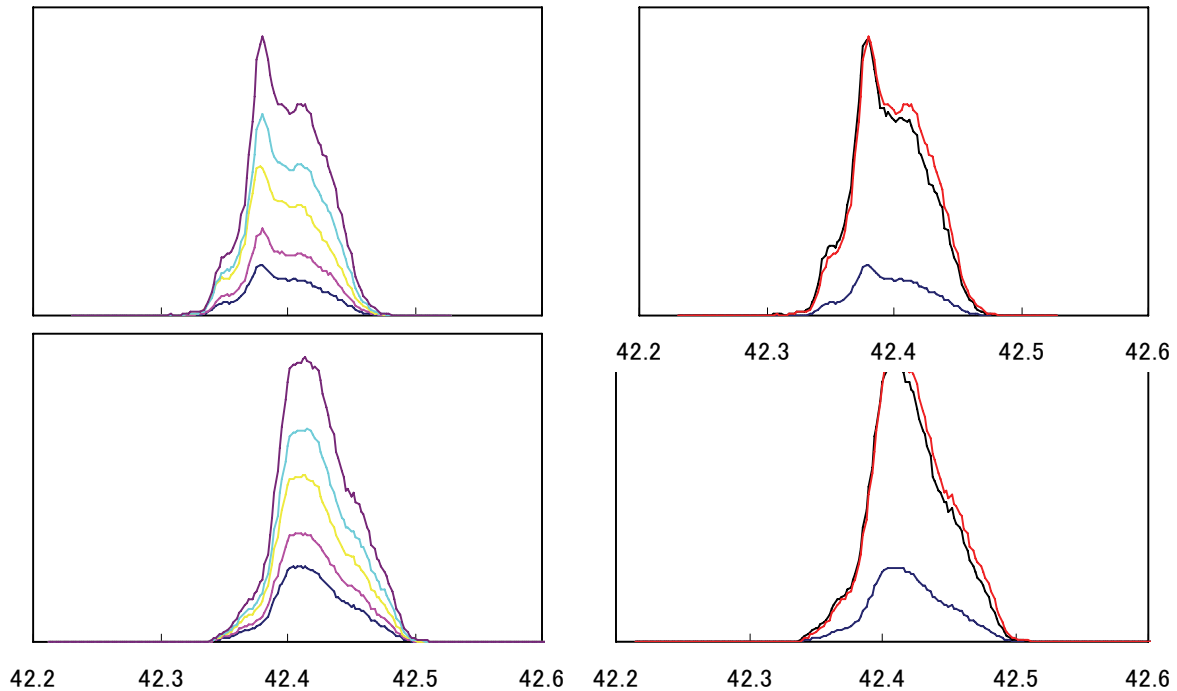
SSOI 基板においても赤線と黒線は完全に重なり、SGOI 基板と同様、歪分布は見られなかった。また、半値幅の比較から SGOI 基板より結晶性が優れていることが分かった。また、ダブルピークを持つことから、本測定の範囲に少なくとも 2 種類の面間隔もしくは方位を持つドメインが存在することが分かる。我々が行った別の測定から、これは SSOI 基板が面方位の異なるドメイン構造を有するためと考えられる。

(iii) エピ(AW)



上段グラフではピークの位置が若干右にシフトしているが、下段グラフでは若干左にシフトしている。今見ているグラフは測定で得られた生データそのままのものである。peak fitting 等の手法により測定ノイズの影響を除去することでより確度の高い考察が期待されるが、エピ(AW)基板ではどちらのシフトが存在するのかを限定することは難しい。ただ下段グラフを見ると表面から深くなるに連れて歪 Si 層の格子面間隔は拡大しているようである。エピ歪基板では、前述のように歪の起源は最表面歪 Si 層の直下に置かれた Si よりも格子定数の大きい格子緩和 SiGe 層の存在である。ここで確認した事実は、SiGe 直上では歪 Si 層では SiGe と同じ格子定数を持つが、SiGe 層から距離が離れるにしたがって（表面に近くなるにつれて）Si 本来の格子定数に近づく、部分的な格子緩和が生じていると考えると直感的に理解しやすい結果である。結晶性は SSOI と同様に比較的良好である。

(iv) エピ(SU)



エピ(SU)基板では、主に深さ方向に対して格子縮小の方向にシフトした。つまり SiGe 層から離れて表面に近づくほど歪量が増加することが確認された。特に下段グラフにおいてピークシフト量を測ったところ $\epsilon = 0.026\%$ という比較的大きな値を示した。このようなポイントがあることから、やはり深さ方向に歪の分布が存在していると考えられる。また、上段グラフでは SSOI 基板でも見られたダブルピークが確認できた。エピ(SU)基板においてもやはり面方位の異なるドメイン構造を有すると考えられる。また、エピ(SU)基板ではダブルピークの位置が本来のピークの右側にある場合と左側にある場合があることから種々の面方位を持つのではないかと考えている。異なるドメイン構造については、ピーク強度がずれていることから深さ方向に対してばらつきがあると考えられる。

これらの結果はエピ(AW)の結果が分かりやすかったのに対して、説明が難しい。エピ(AW)基板とエピ(SU)基板では構造およびエピタキシャル条件が大きく異なる。両者を比較するとエピ(SU)基板の大きな特徴の一つは、トータルの SiGe 層の膜厚が薄いことにある。そのことによる歪の緩和量の違いや、結晶欠陥の違いが両者の違いを与えていると考えられるが、いずれにしてもエピ(SU)で観察された現象の説明は、今のところ明確に行うことはできない。今後の実験を重ねる中で答えを見出していきたい。

5-2. 基板の結晶性

半値($2\theta \chi/\phi$)	
基板	半値幅[°]
AW38	0.047
AW44	0.045
SS08	0.038
SS14	0.054
SG02	0.11
SG07	0.11
SU03	0.065
SU09	0.054
SU14	0.065
SU51	0.067
SU60	0.073
SU67	0.055

* 左表は、先程の in-plane 回折で得られたグラフの半値幅を計算した表である。但し、入射角 0.30° のグラフの半値幅である。

in-plane 回折で得られたグラフの半値幅より基板の結晶性を評価した。まず、一番半値が広がったのが SGOI 基板であった。4 枚の基板の中では SSOI、エピ(AW)の結晶性が良好であることが分かった。ここで言う結晶性のファクターは主に、結晶欠陥、格子歪分布、面方位の異なるドメイン構造である。これらの基板について言えば、前述したように面方位のドメイン構造が大きな影響を与えている。

SSOI は、その製法を考えるとエピ基板の歪 Si 層を BOX 上に転写したものであるが、転写プロセスで何らかの均一化が生じたものと考えられる。SGOI は SiGe を転写した後に、改めて歪 Si 層を成長しているが、最も均一性に劣る結果は興味深い。

5-3. 歪量とばらつき

歪度一覧		
基板	回折面	ϵ [%]
AW27	(400)	0.6
AW33		1.03
AW38		0.68
AW44		0.69
SS08	(400)	0.79
SS14		0.94
SG02	(400)	0.85
SG07		0.85
SU03	(400)	0.79
SU09		0.69
SU14		0.84
SU51		0.72
SU60		0.62
SU67		0.57

この表は各基板の各々の場所における歪量一覧である。エピ(AW)基板の歪量は $0.6\sim 1.03\%$ のばらつきがあった。他の基板に対しても左表のようなばらつきが見られた。この表を見る限り面内分布がばらついている印象を受ける。2 種のエピ基板の歪量は約 0.7% 、SGOI 基板と SSOI 基板の歪量は約 0.85% という値になった。尚、Ge 濃度 20% の歪シリコン基板の歪量の理論値は 0.81204% ($d(400)=1.35763$ 、 $a(\text{Si})=5.44$ 、 $a(\text{Ge})=5.66$) である。この値と比較するとエピ基板の歪量が理論値に対し若干足りていないこと、SGOI、SSOI に関しては理論値を上回っていることが分かった。その理由については現在検討中である。

6. まとめ

*エピ基板に関して格子面間隔のシフト量をまとめた。

シフト量							
基板	$2\theta [^\circ]$ ($\omega=0.24$)	$2\theta [^\circ]$ ($\omega=0.3$)	$2\theta [^\circ]$ ($\omega=0.33$)	差 $[^\circ]$	歪量[%]	歪量[Å]	元の歪量との比率[%]
AW38	42.426	42.424		0.002	0.0035	0.00005	0.58
AW44	42.424	42.424		0	0	0	0
SU03	42.378	42.38		0.002	0.0035	0.00005	0.44
SU51	42.412	42.414		0.002	0.0035	0.00005	0.49
			42.424	0.012	0.026	0.00035	3.6
SU60	42.422	42.422		0	0	0	0
			42.422	0	0	0	0
SU67	42.476	42.476		0	0	0	0
			42.478	0.002	0.0035	0.00005	0.61

シフト量が 0[%]になっているところがある。グラフからはシフトしている様子が見取れるのだが、数値ではシフトが見られない。このことからやはりなんらかの fitting が必要になってくると考える。fitting に関しては現在検討中である。シフトが見られたところでは 0.0035[%]の歪量の変化が見られた。元の歪量との比率を考えるとどの基板も 0.5[%]程度であることが分かった。いずれにしても fitting なしで考察するとどの基板のシフト量も極わずかな量である。最も懸念されることは、エピで見られたピークシフトはごくわずかであるため、これらはすべて測定誤差の範囲内、もしくは同基板中のばらつきの範囲内であり、すべて深さ方向に歪分布はないのではとの疑念である。しかしながら、1) SPring-8 の測定感度、2) SGOI および SSOI では深さにかかわらず完全にピークが一致していること、3) エピでは一方向に系統的にシフトが見られること、などの理由から、少なくとも今回の測定結果は測定誤差やばらつきではなく、何らかの真実を示しているものと考えている。今後、ラマン分光で得られた結果との比較解釈や、各基板に対する相違点の検討によって明らかにしていきたい。また、真にデバイスに影響を与える領域はどの辺りなのか注目したい。

歪 Si を LSI に適用することを目的とし、本実験では各資料(エピ(AW)、エピ(SU)、SGOI、SSOI) に対して in-plane 回折を行った。本実験を行ったことにより様々な課題が浮かんできた。まず、ピーク fitting を行い、歪シフト量を割り出すことを最優先とし、次に浸入角に対する浸入長の正確な見積もりに基づく深さ方向の分布を決定し、さらにエピ基板における格子面間隔のシフト、歪量の理論値とのズレ、各基板の結晶性、面方位の異なるドメイン構造、これらの課題を他の実験、測定結果に還元し深めていきたい。