

課題番号：2006A0250（※）

課題名：LSI 高性能化のためのストレッサーを用いて導入された Si 歪の非破壊高精度測定

実験責任者所属機関および氏名：明治大学理工学部 小椋 厚志

利用ビームライン：BL13XU

1. 背景

微細化が進展する LSI のポストスケーリング技術として、LSI 製造プロセス中で積極的に歪を導入して高移動度デバイスを実現する歪 Si 技術が注目されている。具体的には、LPCVD 法やプラズマ CVD 法で成膜された Si_3N_4 ストレス印加膜をストレッサーとして、トランジスタのチャンネル領域にのみ歪を加え、電子およびホール両キャリアの移動度向上を得る。ストレッサーの挿入により、LSI を構成する個々のトランジスタの性能が向上することは確認されているが、現段階では、チャンネル領域に実際にどの程度の歪が誘起されているのかを測定する手段は確立されていない。したがって、ストレッサーの成膜条件や構造などの最適化のためには、いちいち膨大な日数と費用をかけてトランジスタを試作する以外の方法がなく、効率的な開発とは言えない。本実験では、非晶質体であるストレッサーと結晶 Si との Si 側界面に導入された歪を、試料表面に入射する X 線の入射角度を変えることで X 線の浸入深さを制御して検出する。種々の条件で成膜したストレッサーが、Si 基板の最表面に与える歪を精密に測定することで、効果的なストレッサーの成膜に関する指針を得て、LSI の性能向上に資する事を目的とする。

2. 目的

本実験では、2005B 期および 2006A 期と同様、LSI 高性能化のためのストレッサー膜による $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面歪の精密評価が目的である。前回までに、ストレッサー膜による歪の特徴、例えば、値が極めて微少であること、その値はストレッサー膜厚に依存していること、予想とは異なる歪が導入されているものもあること、結晶性に優れていること等が確認できた。しかしながら、依然として測定データのばらつきが課題となっている。前回までの実験で培ってきた精密測定ノウハウと、新たに装置精度を向上させるためのアイデアを組み合わせることで $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面近傍の高精度歪測定を行った。

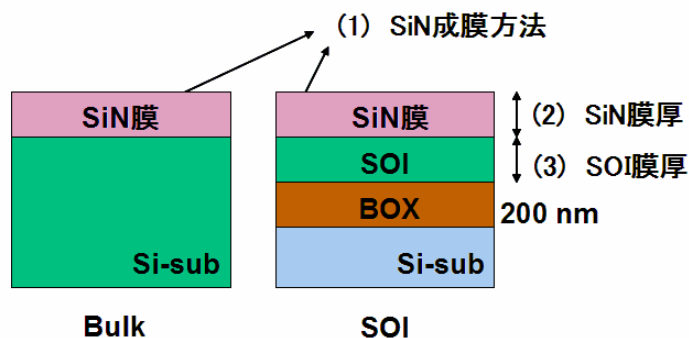
3. 実験方法

前回までと同様、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面近傍に導入された歪を精密に測定するために in-plane X 線回折 (BL13XU) を用いた。試料は Si_3N_4 膜 (ストレッサー膜) を Si または SOI 上に配置した構造を持つ。ストレッサー膜の膜厚を 20nm から 80nm まで変化させ、Si 最表面に導入された歪量を測定した。装置精度を向上させるために、幅 0.05 mm のスリットを用いた。また、 $2\theta_X$ (検出器の軸) の軸出しを測定ごとに行った。シンクロトロン放射光が持つ

極めて高い指向性と、垂直置きゴニオメーターの特徴を活かし、入射角度を丁寧に刻み $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面近傍の深さ方向分布を測定した。

4. 試料

Si_3N_4 膜付き 6 インチ Si 基板および SOI 基板を準備する。引っ張り応力を有する LP-CVD、および圧縮応力を有する P-CVD により堆積した Si_3N_4 膜厚は、20、40、60、80 nm であり、それぞれ、基板最表面に引っ張りもしくは圧縮歪を誘起すると考えられる。SOI 基板に関しては、SOI 膜厚 30、50、100 nm のものを準備し、各々、超薄膜 (UTB-SOI)、完全空乏 (PD-SOI)、部分空乏 (FD-SOI) デバイスへの適用を想定している。基板の構造図を図 1-1 に示す。多種の Si_3N_4 膜厚および SOI 膜厚のものを比較測定することにより、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 界面に導入された歪の程度を検証し、最も効果的な Si_3N_4 膜の成膜に関する知見を得る。



(1) SiN成膜方法	LP-CVD(引っ張り膜), P-CVD(圧縮膜)
(2) SiN膜厚	20, 40, 60, 80 nm
(3) SOI膜厚	100(PD), 50(FD), 30 nm (UTB)

図 1-1. 試料の構造図

表 1-1. 試料番号

試料 No.	SiN 膜厚[nm]	SOI 膜厚[nm]
SOI26	0	30
SOI21	80(tensile)	30
SOI19	40(tensile)	30
SOI18	20(tensile)	30
Si04	80(tensile)	—

5. 結果

図 2-1 ~ 2 : X 線回折スペクトルの入射角度変化 (SOI21、Si04)

- 図 2-3 ~ 5 : X線入射角に対する回折角プロット (SOI26、SOI21、Si04)
- 図 2-6 ~ 8 : X線入射角に対する半値幅プロット (SOI26、SOI21、Si04)
- 図 2-9 ~ 10 : X線入射角に対するX線回折強度プロット (SOI21、Si04)
- 図 2-11 : 反射率測定 (Si04)
- 図 2-12 : ストレッサー膜厚に対する歪量プロット

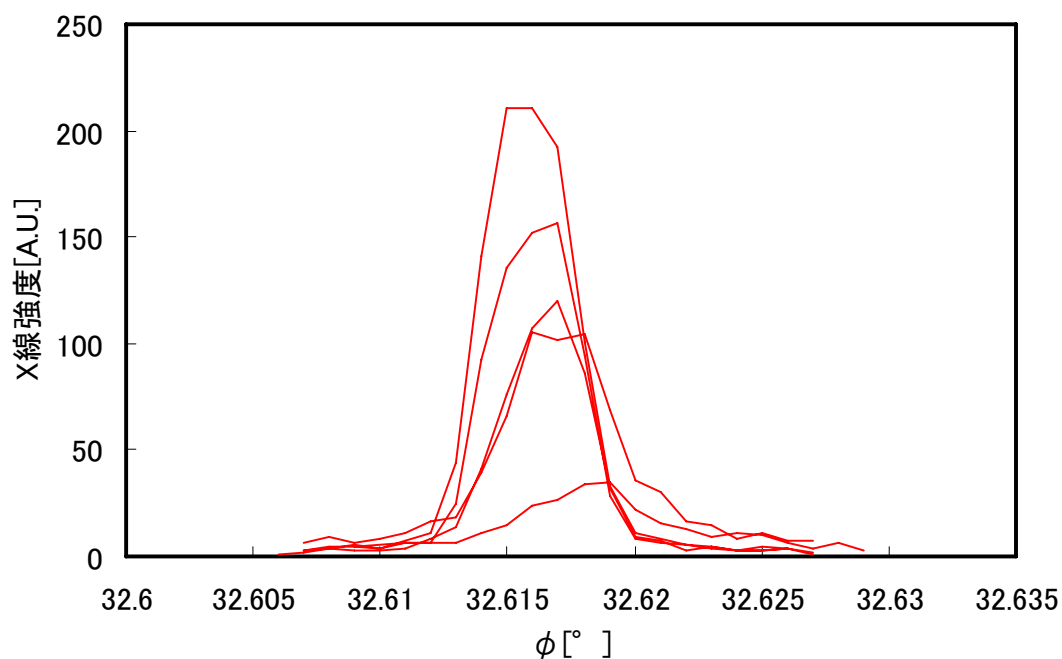


図 2-1. X線回折スペクトルの入射角度変化 (SOI21)

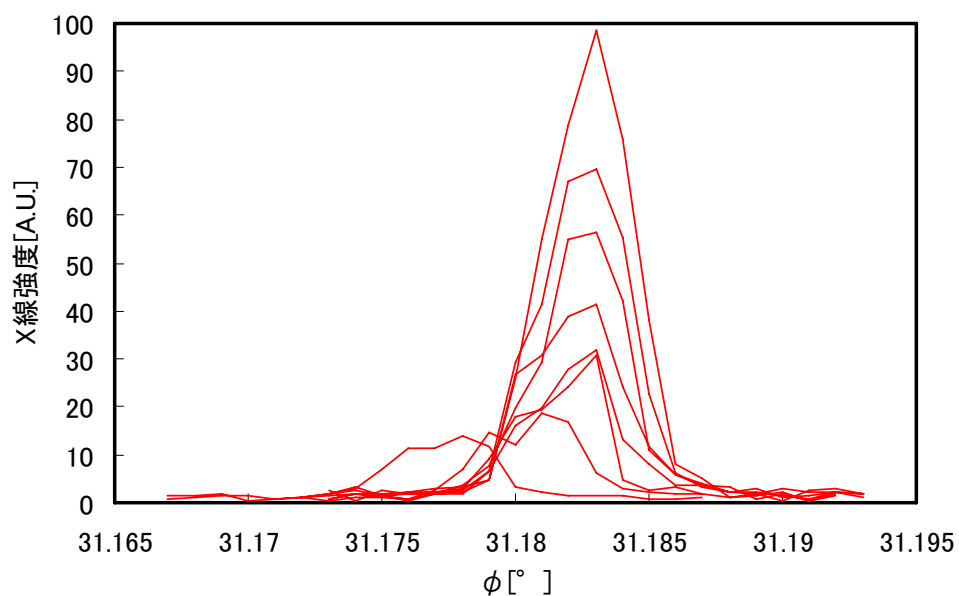


図 2-2. X線回折スペクトルの入射角度変化 (Si04)

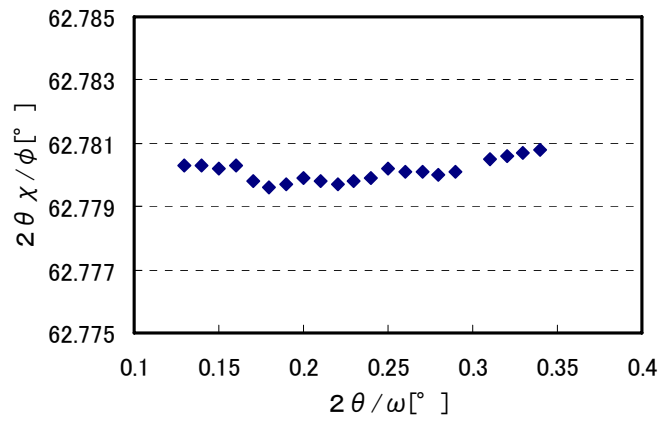


図 2-3 : X線入射角に対する回折角プロット (SOI26)

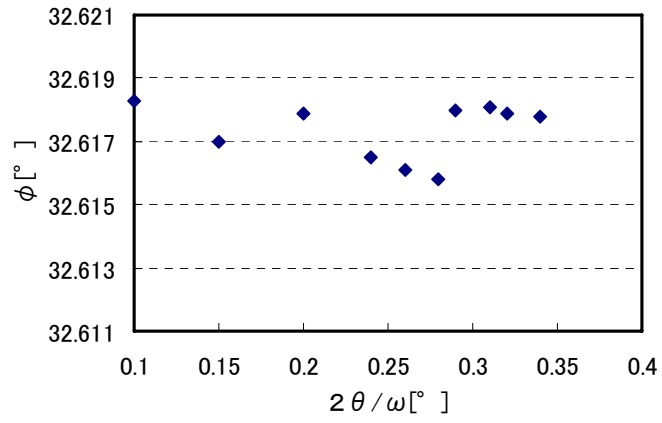


図 2-4 : X線入射角に対する回折角プロット (SOI21)

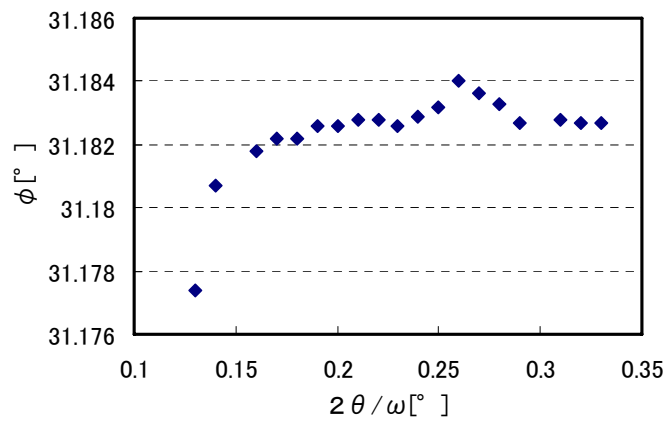


図 2-5 : X線入射角に対する回折角プロット (Si04)

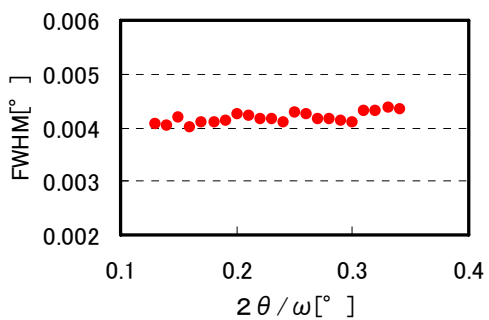


図 2-6: X線入射角に対する半値幅プロット (SOI26)

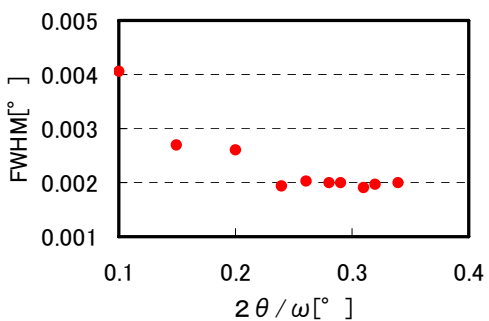


図 2-7: X線入射角に対する半値幅プロット (SOI21)

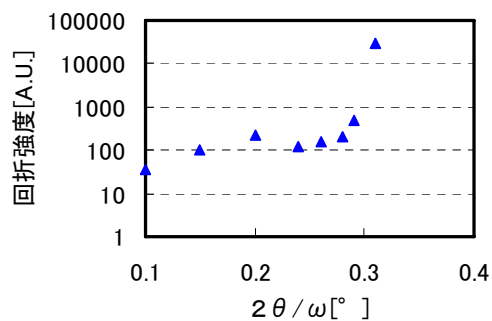


図 2-9: X線入射角に対する X線回折強度プロット (SOI21)

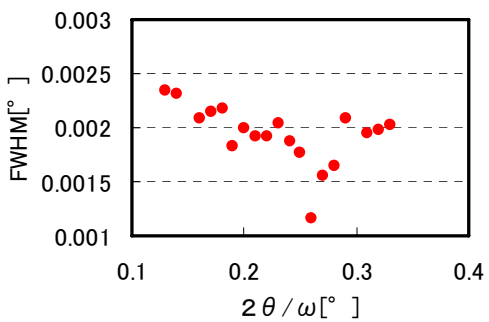


図 2-8: X線入射角に対する半値幅プロット (Si04)

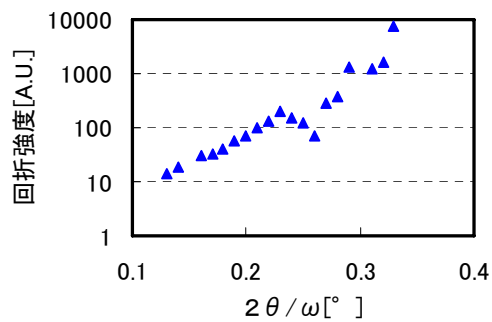


図 2-10: X線入射角に対する X線回折強度プロット (Si04)

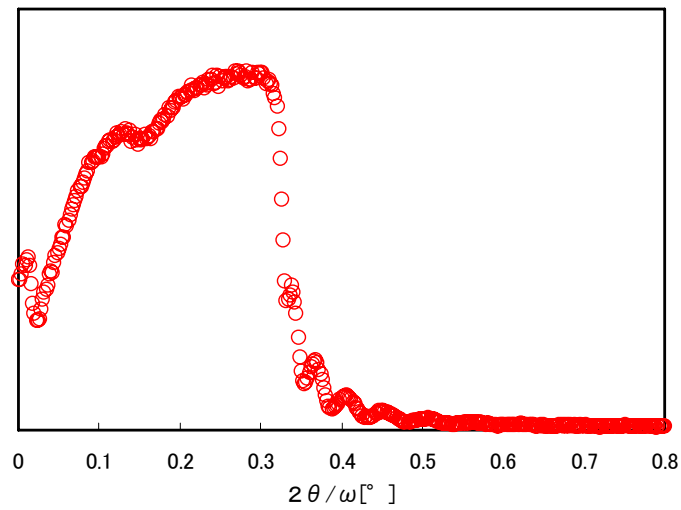


図 2-11. 反射率測定 (Si04)

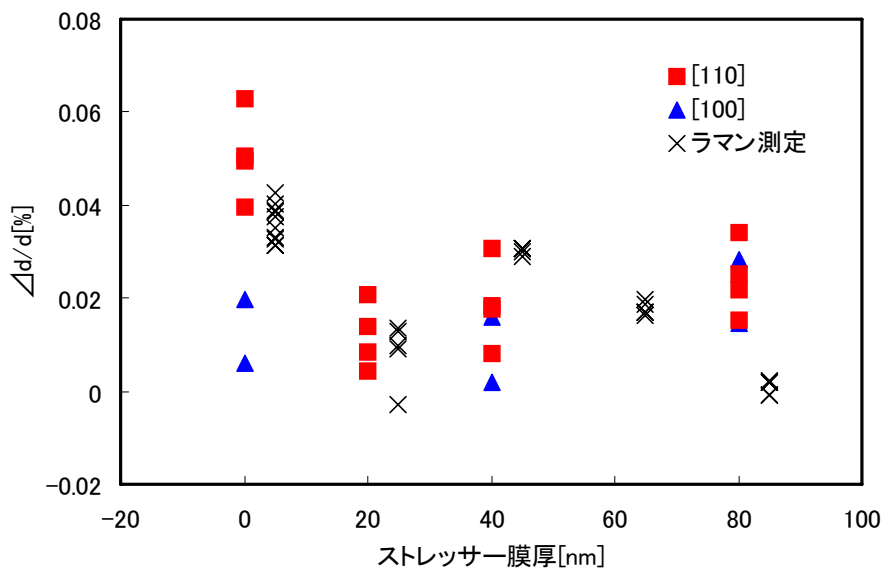


図 2-12 : ストレッサー膜厚に対する歪量プロット

6. 結果、考察

0.05 mm のスリットを適用することで測定が困難になると予想されたが、適当な手順を踏むことで円滑な測定が可能となった。また、 2θ の軸出しを測定ごとに行うこと自体は手間となるが、それ以降は軸が確実に定まったということもあり、スムーズに実験を行うことができた。この操作を行い、良い角度分解能を得ることができ、スリット差し替え時の軸の変調を抑制することに成功した。結果、測定の繰り返し精度が $\pm 0.004^\circ$ (歪精度: 1×10^{-4}) を得た。

図2-1および図2-2より、試料に対する X 線の入射角度を変化させたとき、X 線回折スペクトルのピーク位置がはっきりとシフトしていることを確認した。このことは、基板深さ方向に歪の分布があることを示している。図2-3~5に X 線の入射角度を変化させたときの、スペクトルのピーク位置をプロットしたものを示す。SOI26 (reference) では、歪の深さ分布が一樣だったのに対して (図2-3)、特に、Si04 では、その分布が顕著に現れた (図2-5)。つまり、Si₃N₄/Si 界面近傍で最も大きな歪をとり、深さ方向に漸減し、一定の値に収束していくようなプロファイルを有していた。また、SOI21 でもそのような傾向が一部見られるが、BOX 層の影響を受けてか、ややプロファイルが複雑化しているように見受けられる (図2-4)。

同様なことが X 線回折スペクトルの半値幅から確認できた (図2-6~8)。SOI26 では、X 線入射角度を変化させても半値幅はほぼ一定だったのに対して (図2-6)、SOI21 および Si04 では、より浅い入射角度のとき半値幅の値が大きくなった (Cz-Si の半値幅は 0.002°)。これは主に、Si₃N₄/Si 界面付近での結晶性の劣化と歪の分布の存在を示していると考えられる (図2-7~8)。図2-9~10に X 線入射角度に対する X 線回折の強度のプロットを示す。Si の臨界角 (0.28°) を超えた辺りから指数関数的に X 線の強度が激増している様子が確認できた。さらに、臨界角手前でも、入射角度に依存して X 線強度が徐々に変化している様子が確認できた。このように、X 線入射角度が浅いところで、回折スペクトルの半値幅が広がったことと、回折強度が減少していくことより、Si₃N₄/Si 極界面近傍 (数 nm) の歪測定に成功していると考えられる。トランジスタに影響を与える歪は Si₃N₄/Si 界面の極浅い領域ということを思うと、この手法による歪の測定は非常に有意であると考えている。

図2-11に Si04 の反射率測定結果を示す。これより、Si 上に配置している Si₃N₄ の臨界角は Si のものより大きいことが分かった。つまり、Si の臨界角に達する前に入射 X 線は全反射することを意味している。これより、実験室系の X 線源を用いて測定を行うと、浅い角度のとき、X 線の回折が得られにくい。また、SOI 基板の場合、入射角度を深くしていくと、X 線の発散角が大きいため下地の Si 層まで X 線が浸入し、下地と SOI 層とのスペクトルが現れてしまい、測定が困難になる。

図2-12に本実験で得られた結果のまとめとして、ストレッサー膜厚に対して、X 線の回折角度から歪量を算出し、プロットしたものを示す。さらに、別な実験 (ラマン分光法) で得られたものを合わせてプロットした。今回得られた値は、ラマン分光法で得られたものと比較し得るものであると考えている。これまでの実験と本実験の結果より、ストレッサーを用いて Si₃N₄/Si 界面に導入された歪はとても微少であると考えている。