

微小制限視野電子回折法による 高精度局所格子歪み計測



Hiroaki Matsumoto
松本 弘昭
株式会社日立ハイテクノロジーズ
グローバルアプリケーションセンタ
技師

=====

近年、MOSTランジスタの性能向上を図るため、チャンネルに応力を印加した“歪みトランジスタ”が先端LSIデバイスに搭載され始めています。そのため、デバイスの歪評価の必要性が高まっており「計測分析技術掲示板」でも多くの質問を頂いています。

これまでに第1回計測分析技術サロンでラマン分光による歪評価技術を紹介していますが、今回はTEMを用いた微小箇所歪評価技術として、2010年11月に開催されたLSIテストシンポジウムで報告[1]されている内容をもとに、“微小制限視野電子回折法による高精度局所格子歪み計測”というテーマで株式会社日立ハイテクノロジーズの松本弘昭氏にお伺いします。

=====

まず初めに微小箇所の歪評価の必要性とこれまでの評価技術の課題点についてご説明下さい。

松本

半導体デバイスの高性能化技術では、トランジスタ構造の微細化のみならず、Siの結晶格子歪みにより高速化する研究が進められています。特にチャンネル領域での結晶格子歪み分布を制御し、電子の移動度を向上する技術が開発されています[2-4]。

このような背景から、デバイス構造設計においてデバイス内部の局所的な結晶歪みを高精度で評価する必要性が増しており、空間分解能10nm、検出感度0.1%の精度が求められています[5]。透過電子顕微鏡(TEM: Transmission Electron Microscope)を用いた格子歪み解析手法としては、収束電子ビームを用いた電子回折像におけるスポット間距離から格子間隔を求めるナノビーム

電子回折(NBD: Nano Beam Diffraction)法が活用されています[6-9]。

NBD法では試料面上10nmの領域に電子ビームを収束した場合、電子線照射条件が開き角0.5mrad程度と大きいため、電子回折像におけるスポットがブロードかつ非対称な強度分布を持つこと、電子線入射位置での試料高さ、入射方位などのわずかな変化によって測定値が変動し易いことなど、測定精度が実験条件に影響されやすいという問題がありました。そこで、今回は更なる精度向上を達成するために、平行電子線照射に近い条件が得られる制限視野電子回折法を用いて、空間分解能10nm、測定精度0.1%以下の高精度かつ高信頼な測定方法を検討しました。

=====

TEMを用いた新しい微小箇所の歪評価技術を紹介頂きますが、その前に一般的な電子線回折での格子歪の測定方法についての説明をお願いします。

松本

結晶格子歪み測定では、歪み領域と無歪み領域(リファレンス)の電子回折像における回折スポット間距離から格子間隔を求め、それらの差分から格子歪み率を算出します。回折スポット間距離 r 、対応する格子間隔 d 、カメラ長 L 、入射電子線の波長 λ には、 $rd=L\lambda$ の関係があります。 $L\lambda$ は定数なので r をCCDカメラで測定することにより d が求められます。歪みSiデバイスの場合には、Si基板断面に対して電子線を[110]晶帯軸入射し、歪み領域及びリファレンス位置からの電子回折像をCCDカメラにて撮影します。格子歪み分布を測定する場合には、注目する領域内で制限視野絞りを移動させながら測定します。図1

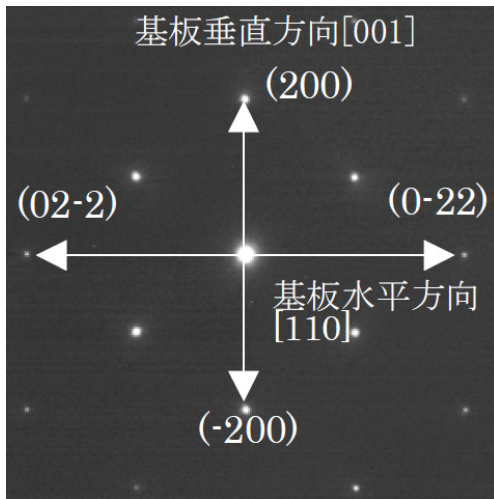


図1 Si[110]の電子回折像

にSi[110]の電子回折像を示します。[110]方向から観察した場合の(220)および(200)回折スポット間距離をピクセル数で測長し、Si基板断面に対して水平方向および垂直方向での格子歪み率を測定します。本実験ではGatan社製UltraScan 2048×2048画素のCCDカメラを用いて電子回折像を記録し、Digital Micrograph(Gatan社製)のラインプロファイル機能を用いて、目視でスポット間距離を測長しています。

=====

今回の微小部歪評価技術では“微小径制限視野絞り”を用いられているのが特徴ですが、“微小径制限視野絞り”とはどのようなものでしょうか。

松本

集束イオンビーム(FIB:Focused Ion Beam)加工により直径約0.7 μmの微小径制限視野絞りを作製し、10nm領域からの電子回折像観察を試みました。図2に微小径制限視野絞りのFIB加工孔のSEM像を示します。微小径制

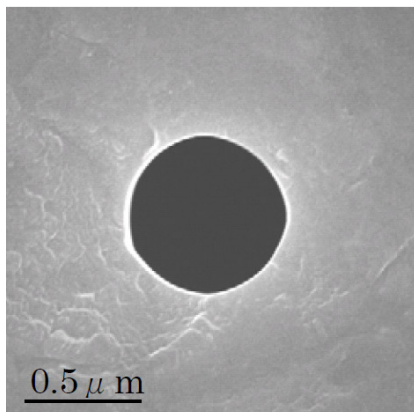


図2 微小径制限視野絞りのFIB 加工孔

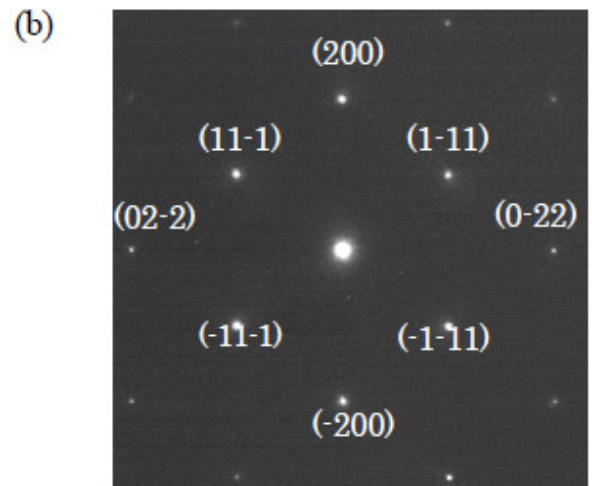
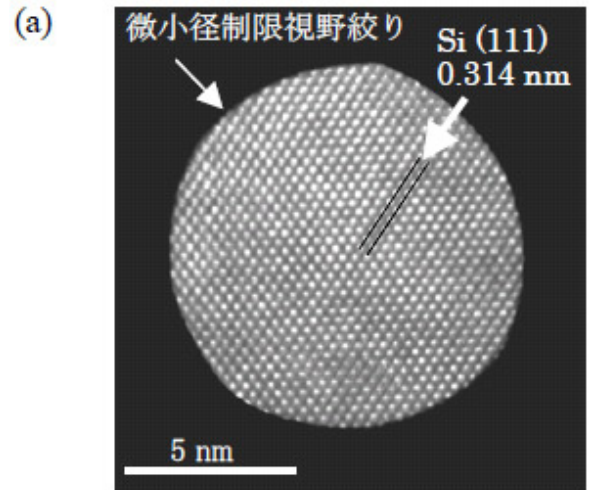


図3 微小径制限視野絞りをを用いて観察したSi[110]格子像(a)と電子回折像(b)

限視野絞り及び今回実験に用いた薄膜試料の作製には、FB-2200 FIB加工観装置を用いています。なおTEM試料作製時の加速電圧は40kVおよび10kVです。

今回、微小制限視野電子回折像の観察にはHF-3300電界放出形TEMを用い、加速電圧300 kV、エミッション電流10 μA、ビーム開き角~0.1mrad、カメラ長1.2mで測定しました。HF-3300の対物レンズの倍率は70倍ですから、0.7 μmの制限視野を用いた場合には試料面上での開口サイズは10nmになります。

図3に直径0.7 μmの微小径制限視野絞りをを用いて観察したSi[110]のTEM像とその時の電子回折像を示します。TEM像から計測した制限視野径は約10nmです。そして本技術による電子回折像では、シャープかつ強度バランスの高い回折スポットが観察されています。

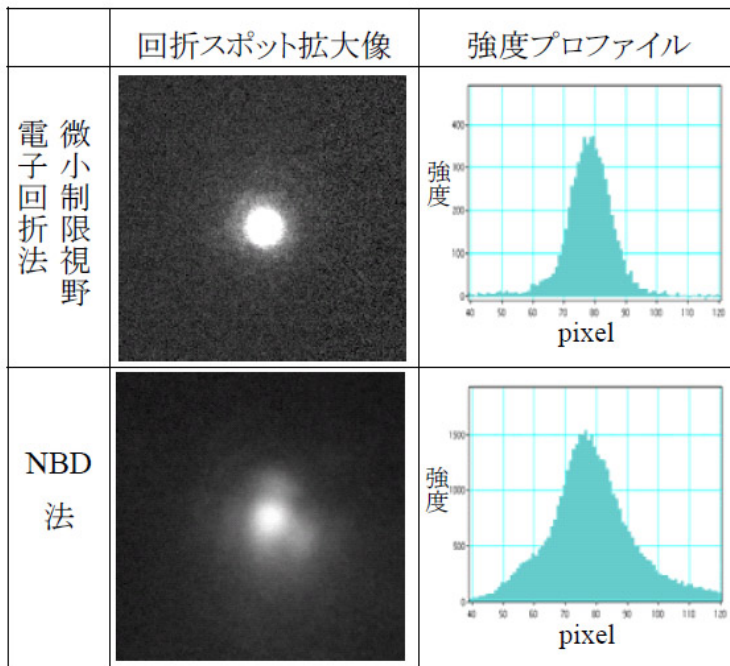


図4 電子線回折スポットの拡大像及びその強度分布

=====

“微小制限視野絞り”では平行性の高い電子線で回折スポットが得られると言うことですが、NBDのデータとの比較結果をご紹介します。

松本

ビーム開き角 $\sim 0.5\text{mrad}$ の収束ビームを用いた場合(通常のNBD法)と、開き角 $\sim 0.1\text{mrad}$ の平行ビームと微小制限視野絞りをを用いた場合(本技術)による回折スポットの形状と強度分布を比較しました。

図4に制限視野電子回折法及びNBD法で取得した回折スポットの拡大像及びその強度分布を示します。制限視野電子回折法では、シャープかつ高い対称性の強度分布を示しています。ピーク位置をスポットの中心として測定すると、1pixel程度の誤差でスポット中心座標の特定が可能です。一方、NBD法では回折スポットがブロードかつ非対称な強度分布であり、スポットの中心位置の判定が困難であることが分かります。このことから本技術の方が高精度測定に有利であることが分かりました。

=====

確かに微小制限視野絞りでは鮮明な回折スポットが得られており、高い精度での評価が期待できます。始めにNBDでは試料高さなどで測定値が変動し易いとのお話がありましたが、この微小制限視野絞り法ではそのような変

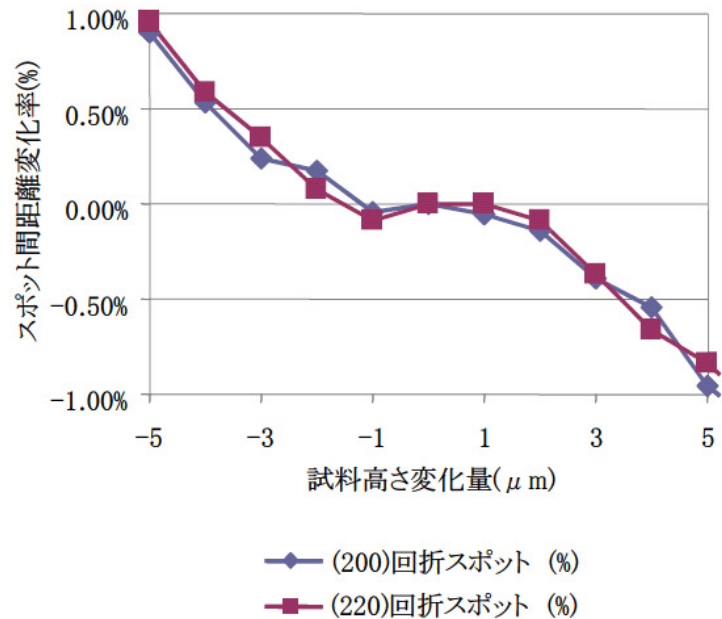


図5 試料高さ変化に伴う回折スポット間距離の変化率

動は生じないのでしょうか。

松本

FIB加工した単結晶試料の場合、加工表面と晶帯軸が必ずしも垂直な関係にあるとは限りません。即ち、晶帯軸入射に対して表面が傾いている場合、各測定位置でカメラ長が異なることになり、測定誤差要因と成り得ます。試料高さをZコントロールによって $1\mu\text{m}$ ステップで変化させ、それに伴う回折スポット間距離の変化量をCCDカメラによって画素数として計測し、測定誤差を検討しました。

電子線入射位置での試料高さの変化に伴うカメラ長変化率を評価しました。図5に $\pm 5\mu\text{m}$ 試料高さを変化させた場合の(200), (220)回折スポット間距離の変化率を計測した結果を示します。試料高さの変化に伴い、スポット間距離が変化することが確認できました。また、試料高さ $\pm 1\mu\text{m}$ の変化量範囲であれば、格子歪み測定誤差は0.1%以下に抑えられることを確認しました。

=====

直径 $0.7\mu\text{m}$ という非常に微小な開口絞りを用いていますが、数nm位置精度で所定の場所にセットできるのでしょうか。

松本

微小制限視野絞りは、TEM対物レンズの実像面位置に挿入されます。電子回折像の測定位置への絞りをセットする場合、蛍光板上の像を拡大してCCDカメラ上に投影

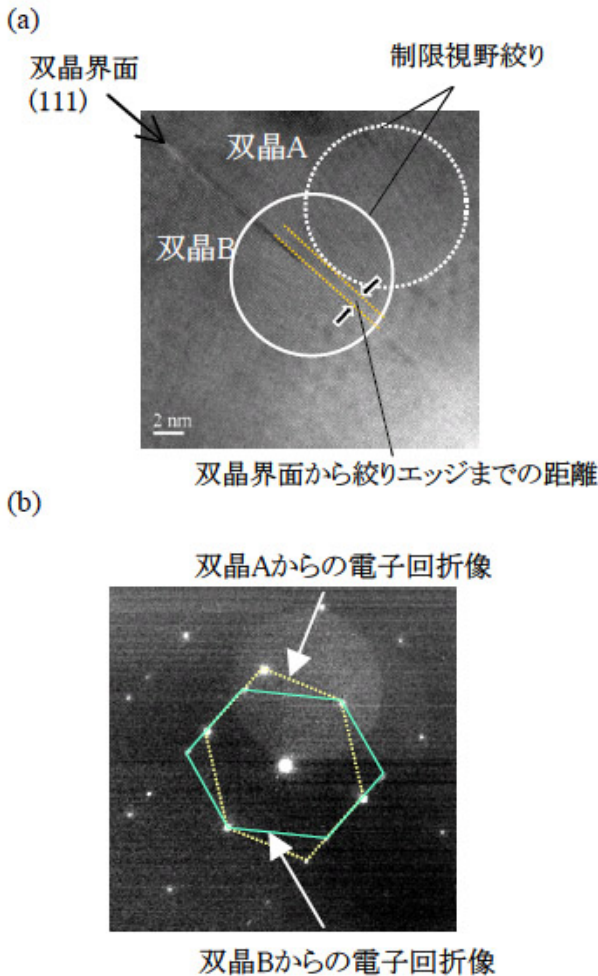


図6 銅多結晶試料を用いた制限視野絞りの位置精度の評価方法
(a) 制限視野電子回折像の測定位置
(b) 界面を中心に挿入した場合の電子回折像

された制限視野TEM像をモニター上でリアルタイムに観察しながら行います。従って、約10nmの制限視野像はモニター上で拡大されるため、目的箇所への絞りのセットが容易に行えます。

そして制限視野絞りの測定位置精度については、次のようにして評価しました。

対物レンズの球面収差の影響により、制限された視野以外の領域から回折波が回り込み、制限視野絞りが選択する試料上の制限視野領域と回折像取得領域に誤差が生じ得ます。

そこで銅多結晶試料における双晶界面を利用して、制限視野領域の選択誤差量を評価しています。図6に測定方法を示します。銅の多結晶粒子内の双晶界面を電子線入射方向に対して平行に合わせます。この時の電子線入射方位は[110]で双晶面は(111)面になります。双晶界面を中心に絞りを挿入した場合(図中実線丸印)、界面を

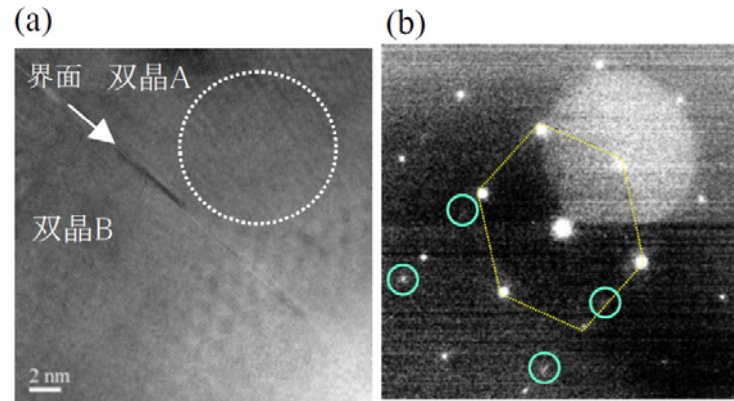


図7 双晶A側の界面から1.0 nmの位置に絞りを挿入して観察した制限視野電子回折像
(a) 制限視野絞り位置
(b) 微小制限視野電子回折像

挟む双方の領域からの回折像が同時に観察されます。ここで、絞りを界面から1.0nmの位置に移動させた場合に、対面の双晶からの回折スポットが観察されるかを確認することにより、測定位置精度を定量化しました。

図7に双晶A側の界面から1.0nmの位置に絞りを挿入して観察した制限視野電子回折像を示します。対面の双晶Bからの回折スポット(図中丸印)が混在しています。したがって直径0.7 μmの制限視野絞りで制限できる10nm領域において、対物レンズの球面収差の影響による回折波の回り込みによる視野選択誤差は1nm以上です。

球面収差による視野選択誤差は、光学理論によれば以下のように表せます[10]。

$$\Delta = Cs \beta^3 \dots \dots (1)$$

ここでCsは対物レンズの球面収差係数、βは注目する回折スポットのブラッグ角度の2倍です。実験装置HF-3300のCsは1.3mm、βは220回折の場合 1.02×10^{-2} radであるので、 $\delta = 1.4$ nmになります。Siの(220)と(-2-20)の両方の回折スポットを用いた場合には2倍の2.8nmになります。

=====

一般的に電子顕微鏡では絞りの汚れが懸念されます。特に今回は微小な絞りですので僅かな絞りの汚れ等も測定精度に影響する可能性はないのでしょうか。

松本

今回の実験で用いた絞りでは汚染を回避するために、プレート表面に金属をコーティングしています。従って、絞りをTEMにインストール後、汚染の心配はありません。

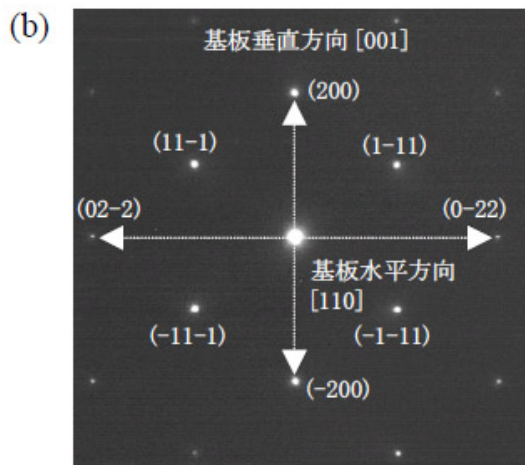
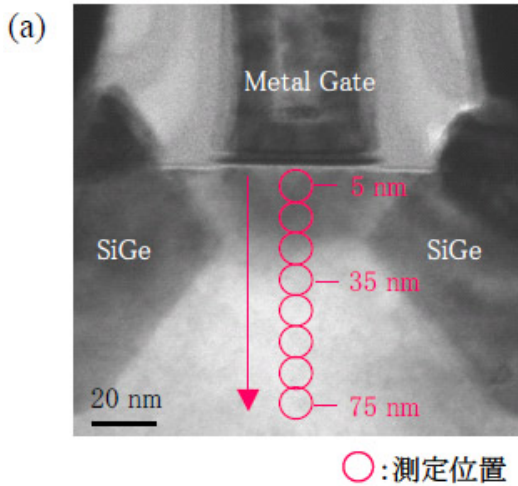


図8 45nmノードPMOSTランジスタゲート近傍の格子歪み測定方法
(a) 測定位置を示すTEM 像、(b) Si[110]の電子回折像

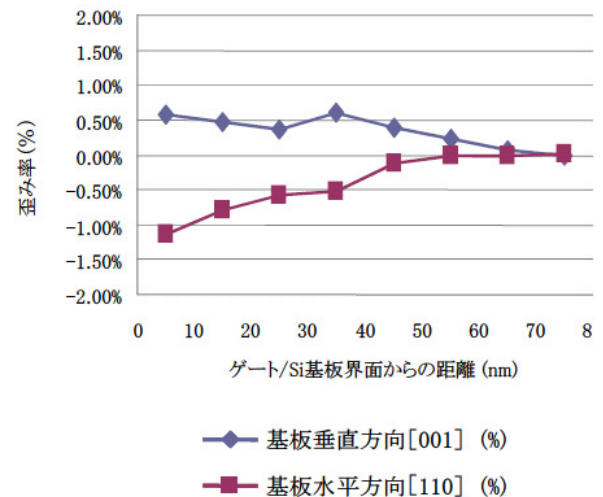


図9 45 nm ノードPMOS トランジスタゲート近傍の格子歪み率解析結果

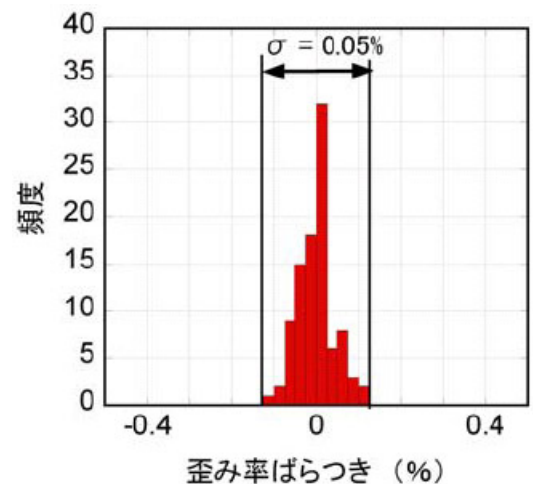


図10 歪み率ばらつきの頻度を示したヒストグラム
計測データ: 計96 点(1ゲートにつき[110], [001]方向で24点)

=====

NBDでは歪分布を求めたマッピングデータがありますが、今回の方法でもマッピング測定は可能でしょうか。

松本

今回の制限視野電子回折を用いた歪み測定では、分析領域の選択を機械的な絞りの移動で行うため、複数領域を自動で測定し、マッピングを作成することは現状では困難です。

=====

NBD,CBEDでは入射電子線を細く絞るため試料のダメージが懸念されます。NBD,CBEDと比較して、今回の方法はダメージは少ないように思いますが、いかがでしょうか。

松本

NBD、CBED法に比較して、試料面上で電子線を拡げて測定が可能のため、電子線収束により発生する局所的な電子線損傷は軽減され则认为ます。

=====

これまでのお話で、高い精度での微小箇所の歪評価が期待されますが、実際のデバイスの評価された結果についての紹介をお願いします。

松本

45nmノードMOSTランジスタゲート近傍の格子歪みを評価しました。図8は45nmノードPMOSTランジスタの断面TEM像(a)と電子回折像(b)です。図中の矢印で示す方向

にゲート/Si界面直下から10nmステップで制限視野絞りを移動させながら測定しています。なお、リファレンスはメタルゲートより200nm下方の基板領域としています。この時のTEM試料厚さは200nmです。本実験では(220)反射の回折スポット間距離(ピクセル長)の測長により基板水平方向[110]の歪み率, (200)反射の回折スポット間距離(ピクセル長)の測長により基板垂直方向[001]の歪み率を計測しています。

図9に45nmノードPMOSTランジスタゲート近傍での格子歪み率の変化を示します。マイナスの歪み率は、測定箇所における回折スポット間のピクセル長がリファレンスに比べて伸びていることを表し、圧縮方向に歪んでいることに対応します。他方、プラスの歪み率は引張り方向に歪んでいることに対応します。ゲート直下約5nmの深さにおいて基板水平方向[110]に1.1%の圧縮歪み、基板垂直方向[001]に0.6%の引張り歪みが計測できました。またSiGeパターン形状と歪みの分布の関係が示されました。本実験ではリファレンスを含む各測定位置での試料高さの変化は±1μm以内で、電子線入射方位は±0.2°の範囲内で測定を行っているため、測定誤差は±0.1%以下になり、実験データの高い精度が確保できました。

測定精度を評価するために複数箇所(4箇所)のゲートにおいて、測定位置5nm, 15nm, 45nm, 75nmおよびリファレンス位置で3回繰り返し測定し、歪み率を解析しました。図10は各ゲートの測定位置データ(3点)について平均値を求め、その平均値に対するばらつき(標準偏差)を示したヒストグラムです。繰り返し精度0.05%(標準偏差)が得られ、本手法の高信頼性が確認できています。

=====

今回のデバイス評価ではメタルゲートより200nm下方をリファレンスとされていますが、このようなリファレンスは必ず必要なのでしょうか。

松本

今回の結晶格子歪み測定法では、歪み領域と無歪み領域(リファレンス)の電子回折像における回折スポット間距離から格子間隔を求め、それらの差分からリファレンスに対する相対的な格子歪み率を算出しています。そのため、リファレンスは必要になります。

ただし、回折スポット間距離 r , 対応する格子間隔 d , カメラ長 L , 入射電子線の波長 λ には、 $rd=L\lambda$ の関係があります。 $L\lambda$ は定数なので、 r をCCDカメラで測定することにより d が求められます。従って、各測定位置でのカメラ長 L が常に一定条件であれば、格子間隔 d が既知の試料で予

め回折スポット間距離 r をピクセル数で測長し、同一測定条件下で測定対象試料の回折スポット間距離 r が測長できれば、リファレンスは必ずしも必要としません。ただし、現在、この場合の測定精度に関するデータはありません。

=====

本法は御社のSTEMやTEMをもっていれば、すぐに導入可能なのでしょうか？まだまだ検討が必要なのでしょうか？

松本

STEMでは不可能です。TEMを用いての測定は原理的には可能ですが、機種などの違いにより、測定条件を詰める必要はあると考えます。個別にご相談ください。

=====

今回は分析サロンにご協力頂きありがとうございました。最後に、今回のお話のまとめをお願い致します。

松本

歪Siデバイスなどのnm領域における結晶格子歪み分布を高精度測定する微小制限視野電子回折技術を開発しました。本技術を用いた場合の種々の測定条件における歪み測定誤差を実験的に検討し、電子線入射方位±0.2°、試料高さ±1μmの変化量範囲であれば、格子歪みの測定誤差は0.1%以下に抑えられることを確認しました。また、対物レンズの球面収差の影響による制限視野領域の選択誤差を、銅の双晶界面を利用して実験および光学理論の両面から検討したところ、視野選択誤差は3nmでした。さらに、45nmノードMOSTランジスタゲート近傍の歪み分布評価に適用し、ゲート直下の深さ方向における0.07%~1.56%程度の圧縮および引張り歪みを繰り返し測定精度0.05%で高精度測定出来たことで、本技術の有用性を確認できました。

=====

お忙しいところありがとうございました。松本さんの今後の活躍を期待しております。これからも先端的な技術を開発し、魅力的な新製品を出して頂くことをお願いします。

参考文献

- [1] 松本弘昭他：微小制限視野電子回折法による高精度局所格子歪み計測：LSITS 会議録, 289-294 (2010)
- [2] Kah-Wee Ang, et al., Appl.Phys.Lett., 86 093102 (2005)
- [3] Ghani, T, et al., IEDM, 11.6.1 - 11.6.3 (2003)
- [4] Chidambaram, P.R, et al., VLSI Symposium Tech., 48-49 (2004)
- [5] ITRS ホームページ:http://www.itrs.net/home.html
- [6] Koguchi M, Nakamura K and Umemura K, Ext.Abst.of the SSDM., 198 (2001)
- [7] Koguchi M, Nakamura K and Umemura K, Proc.Electrochem.Soc., 326 (2001)
- [8] Huang J and Kim MJ, Appl.Phys.Lett., 89 063114 (2006)
- [9] 仲野靖孝他:ナノビーム電子回折法を用いた半導体デバイスの微小領域歪み評価の検討：LSITS 会議録, 91-94 (2009)
- [10] Yamasaki J, Sawada H and Tanaka N, Journal of Electron Microscopy, 54(2) 123-126 (2005)

■用語解説

(hkl)

1組の面の集合である結晶格子面を表すミラー指数。

[hkl]

結晶の方向を表すために「面に垂直な方向」示す指数。

双晶

二つの同一単結晶が、対称面などの幾何学的規則性をもって一体に結合しているもの。

収束角

円錐状に絞って試料に照射する電子ビームにおける円錐の角度の半角。

カメラ長

試料から電子線回折パターンが形成される面までの有効距離。

制限視野絞り

対物レンズの像面に挿入し、制限視野回折において電子回折パターンを得る試料の領域を制限する絞り。

球面収差(係数Cs)

レンズの周辺部を通った電子線が、理想的な像面で光軸上に来ないことでぼけた像を作る収差(その係数)。