

8. 電子ホール対再結合に誘起されたエピ膜中での基底面転位の観察：1

・はじめに

基底面転位を含んでいるバイポーラ素子では、順方向に電流を流すと転位の位置で電子ホール対の再結合が起こります。この時放出されるエネルギーにより Si コア 30 度基底面部分転位と呼ばれている転位が運動し、ショックレー型積層欠陥が形成されます。電流を流し続けると積層欠陥の面積が増大し順方向の抵抗が増加し、いわゆる順方向特性劣化(forward bias degradation)が発生することは知られています[1-4]。結晶が基底面転位を含んでいるとこの現象が発生してしまうため、現状ではバイポーラ電力素子よりもユニポーラ素子の開発が一般的には進められています。

ところで出現したショックレー型積層欠陥の形状を調べると、その積層欠陥を作り出した基底面転位の素性を議論することが可能となり、それによりその基底面転位が素子作製のどのプロセスにより導入されたのか、もともとそこにあったのかなどを議論することが可能になると考えられます。これらのことを議論するためには、エピ膜中に残存する基底面転位の素性を調べ、どのような基底面転位がエピ膜成長後に残存し、それらがどのような形状のショックレー型積層欠陥を形成するのかを調べておくことは重要だと思われれます。現在のエピ膜作製技術では、エピ膜成長時に大部分の基底面転位を貫通刃状転位に変換するので、エピ膜中の基底面転位密度は著しく低下していますが、依然としてエピ膜後に若干の基底面転位が残存しています。まずはエピ膜成長後にエピ膜中に残存している基底面転位の素性を調べ、それらのエピ膜に残存する基底面転位がどのような形状のショックレー型積層欠陥を形成するのかを、この連載 8 と連載 9 で記述します。

順方向特性劣化現象を調べるには pn 接合構造を作製し順方向に電流を流す必要がありますが、pn 接合構造を作製することなく、単に光や電子線を SiC エピ膜に照射しても、エピ膜中で励起された電子とホールの対消滅により Si コア 30 度部分転位が運動し、ショックレー型積層欠陥の面積が増大する現象が確認されます。この現象を照射(あるいは再結合)誘起転位すべり(REGD : radiation or recombination enhanced dislocation glide)効果と呼んでいます[5-7]。バイポーラ素子中での順方向への電流で発生するショックレー型積層欠陥増大の現象と、REGD 効果による現象では、現象が発生する位置に多少の違いが存在する可能性はありますが、エピ膜で REGD 効果を観察することによりエピ膜成長後に残存し、REGD 効果を引き起こす基底面転位の有無、それらの基底面転位の素性、つまり基底面転位のバーガース・ベクトル、それらの転位の向き、それらのエピ膜中での分布、それらの残存理由、それらの基底面転位が作り出すショックレー型積層欠陥の形状を調べることが出来ます[6-8]。このようなデータをプロセス毎に蓄積すると、どの素子プロセスでどのような素性の基底面転位が導入されるかを整理することができます。これらの事がわかると、素子プロセス中での基底面転位導入の抑制の一助となることが考えられます。ここではエピウエハに光や電子線を照射し REGD 効果をひきおこし、各種の解析手法で調べた結果わかったことを説明します。

・実験手法

放射光を用いたベルク・バレット法、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた電子線誘起電流(EBIC : electron beam induced current)法(SEM-EBIC 法)、フォトルミネッセンスイメージング法(PL-imaging 法)で、エピ膜中での REGD 効果を調

べました。放射光を用いたベルク・バレット法では、転位の向き、基底面転位のバーガース・ベクトルの向き、Si コアかあるいはC コア基底面転位か、形成される積層欠陥の形状を調べることができます。SEM-EBIC 法では、30 度 Si 基底面転位の運動の様子および積層欠陥形成プロセスを実時間観察することができます。フォトルミネッセンスイメージング法(PL-imaging 法)では形成したショックレー型積層欠陥の形状を手軽に観察することが可能です。

・界面転位の尾部での基底面らせん転位の拡張の観察

エピウエハ表面に光をあて、残存する基底面転位が REGD 効果をひきおこした状態をベルク・バレット法で観察した例を図 1 に示します。図 1 は、連載その 4 で議論した問題のあるエピ膜中に出現する L 字状の界面転位の尾部に位置する基底面らせん転位部です[9]。エピ膜成長中にウエハの温度分布が均一でないことにより発生すると考えられている界面転位の尾部の基底面らせん転位の部分が、エピ膜中に残存し REGD 効果をひきおこす基底面転位の最も一般的な転位であることが分かります。図 1 で観察される転位の向きを $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow E_1 \rightarrow F_1$ あるいは $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ と時計回り方向に定義すると、この L 字状の基底面転位は $b=1/3[11\bar{2}0]$ のバーガース・ベクトルを持つと同定されます。 $A_1 \rightarrow B_1$ はエピ膜と基板との界面近傍に存在する界面転位部です。黒いコントラストを示しており、C コア刃状完全転位であることが分かります。

図 1 (a) L 字状の $b=1/3[11\bar{2}0]$ 基底面転位のらせん転位部の拡張した状態。

30 μm のエピ膜での観察例。
4H-SiC エピ膜つきウエハ 4 度オフ基板、Si 面の観察。図中の白矢印は表面に投影した g ベクトルの向き。(b)模式図。

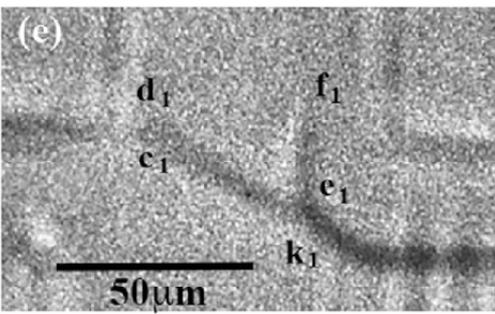
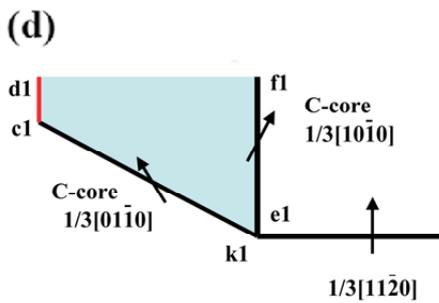
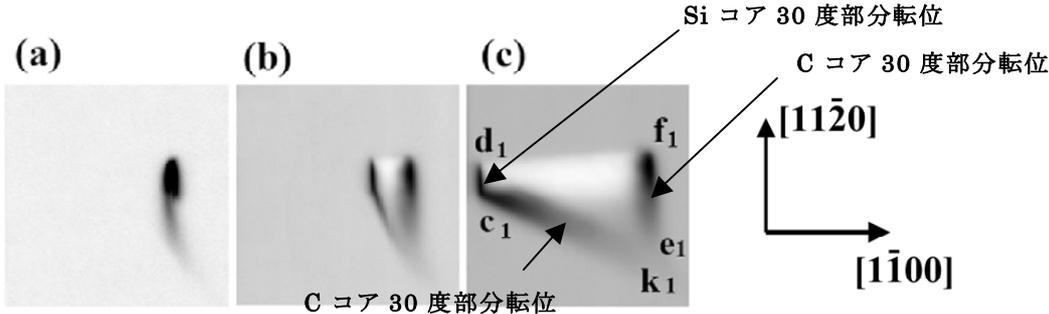
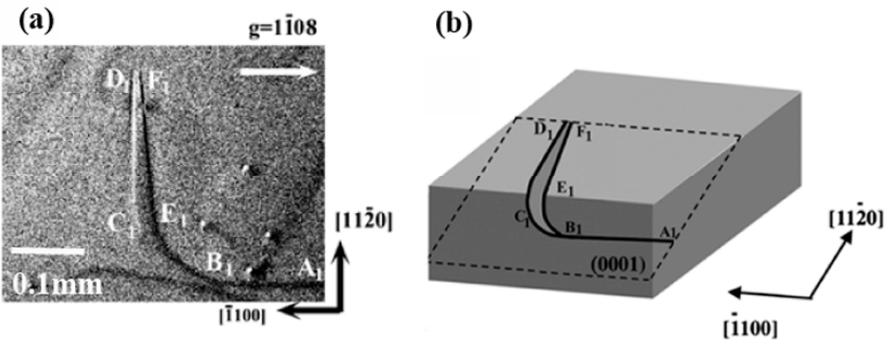


図 2 (a),(b),(c) $b=1/3[11\bar{2}0]$ のバーガース・ベクトルを持つ界面転位尾部の REGD 効果による積層欠陥形成の様子を EBIC による観察。エピ膜の厚みは 5 ミクロン 8 度オフのウエハ。(d)形成されたショックレー型積層欠陥の最終状態に近い状態の模式図。図中の $k_1 \rightarrow c_1$ は C コア 30 度部分転位、 $c_1 \rightarrow d_1$ は Si コア 30 度部分転位。(e)放射光を用いたベルク・バレット法による観察。

図 1 の $E_1 \rightarrow F_1$ および $C_1 \rightarrow D_1$ は基底面らせん転位部が拡張して形成された 2 つの部分転位で、 $E_1 \rightarrow F_1$ は $b=1/3[10\bar{1}0]$ の 30 度 C コア転位、 $C_1 \rightarrow D_1$ は $b=1/3[01\bar{1}0]$ の 30 度 Si コア転位であることがベルク・バレットトポグラフィ法のコントラスト解析より分かります[8]。図 1(a)の $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow E_1 \rightarrow F_1$ は、連載その 7 の図 2(b)の $a_1 \rightarrow b_1 \rightarrow e_1 \rightarrow f_1$ 部に対応しており、図 1(a)の $A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ は、連載その 7 の図 2(b)の $m_1 \rightarrow k_1 \rightarrow c_1 \rightarrow d_1$ 部に対応しています。二つの部分転位に囲まれた部分 $F_1 E_1 B_1 C_1 D_1$ 部が REGD 効果により形成されたショックレー型積層欠陥です。この積層欠陥は $b=1/3[01\bar{1}0]$ のバーガース・ベクトルを持つ Si コア 30 度部分転位 $B_1 C_1 D_1$ が左側方向に運動し成長させていることが分かります。

図 2(a),(b),(c) は、エピ膜の厚み 5 ミクロン 8 度オフのウエハで $b=1/3[11\bar{2}0]$ のバーガース・ベクトルを持つ界面転位尾部の基底面らせん転位部での REGD 効果による積層欠陥形成の様子を SEM-EBIC 法による観察を示しています。図 2(c) はショックレー型積層欠陥の最終形態に近い状態を示します。図 2(e) は図 2(c)の状態をベルク・バレット法により観察した状態を示します。REGD 効果により Si コア 30 度基底面部分転位 $c_1 \rightarrow d_1$ が左側へ動いて行き、それに伴い C コア 30 度基底面部分転位 $k_1 \rightarrow c_1$ が延伸して行く様子が観察されています。黒いコントラストの転位は、C コア基底面部分転位により縁取られ最終的にショックレー型積層欠陥の拡大が停止することを示しています。

図 3(a)は上記で議論された L 字状の界面転位の尾部が REGD 効果により形成されたショックレー型積層欠陥の形状を示しています。連載その 7 で述べたように 4H-Si の四面体の積層 $ABA'C'$ の積層構造のうち最初の A あるいは B に $b=1/3[11\bar{2}0]$ の基底面転位が位置している時このような形状を示します。一方、四面体の積層 $ABA'C'$ の A'あるいは B'に $b=1/3[11\bar{2}0]$ の転位が位置している時には、界面転位は逆 L 字型を示し、図 3(b)のような形状のショックレー型積層欠陥が形成されます[6,8]。バーガース・ベクトルと積層の位置に依存してショックレー型積層欠陥の最終形状の現れ方に違いがあります。ショックレー型積層欠陥の形状と基底面転位の素性の関係を事前に把握しておくこと、バイポーラ系デバイスで問題となっている順方向特性劣化の原因となっている基底面転位がどこで導入されたかを議論することも可能となると考えられます。以下連載その 9 に続きます。

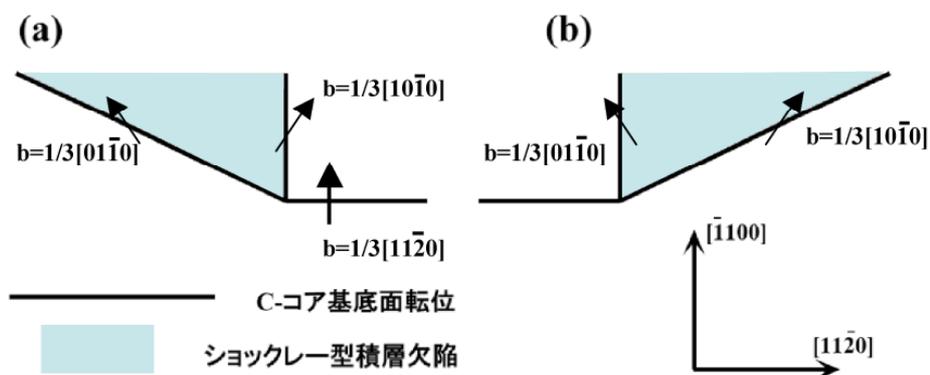


図 3 REGD 効果によりエピ膜中に現れるショックレー型積層欠陥の最終形状。(a) ABA'C'の積層構造のうち AB の位置に $\mathbf{b}=1/3[11\bar{2}0]$ の基底面転位が位置している時に形成される積層欠陥の最終形状。(b) A'C'の位置に $\mathbf{b}=1/3[11\bar{2}0]$ の転位が位置している時に形成される積層欠陥の最終形状。

参考文献

- 1) S. I. Maximenko, P. Pirouz, T. S. Sudarshan: Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 033503.
- 2) A. Galeckas, J. Linnros and P. Pirouz: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 025502.
- 3) M. Skowronski, and S. Ha: J. Appl. Phys. **99** (2006) 011101
- 4) Ha, M. Skowronski, and H. Lendenmann: J. Appl. Phys. **92** (2006) 393.
- 5) N. Zhang, Y. Chen, M. Dudley and R. E. Stahlbush: Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 122108.
- 6) B. Chen, T. Sekiguchi, T. Ohyanagi, H. Matsuhata, A. Kinoshita, H. Okumura: Phys. Rev. **B81 106** (2010) 233203.
- 7) B. Chen, H. Matsuhata, T. Sekiguchi, T. Ohyanagi, A. Kinoshita, H. Okumura: Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 212110.
- 8) H. Matsuhata, H. Yamaguchi, T. Yamashita, T. Tanaka, B. Chen, T. Sekiguchi: Philos. Mag. **94** (2014) 1674.
- 9) H. Matsuhata, H. Yamaguchi, I. Nagai, T. Ohno, R. Kosugi and A. Kinoshita: Mat. Sci. Forum **600-603** (2009) 309.