

交流電流加熱による Si(001) 表面構造変化

土井 隆久・細木 茂行

日立製作所中央研究所 185-8601 東京都分寺市東恋が窪 1-280

(2002 年 10 月 25 日受理)

Structural Change of Si(001) Surfaces after Alternating Current Heating

Takahisa DOI and Shigeyuki HOSOKI

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji, Tokyo 185-8601

(Received October 25, 2002)

Si(001) vicinal surfaces heated with a sine wave of 10^4 Hz AC are investigated by using scanning reflection electron microscopy. Surfaces of 1×2 that consist of wide 1×2 terraces (the 1×2 dimer is perpendicular to the direction of the heating current) and narrow 2×1 terraces (the 2×1 dimer is parallel to the direction of the heating current) were obtained at temperatures below 850°C . At temperatures between 850°C and 1100°C , on the other hand, double-domain surfaces where 2×1 and 1×2 terraces are arranged regularly with approximately equal widths were formed. The driving force for growth changes from thermal effect to evaporation effect at about 850°C . At temperatures above 1100°C , the surfaces are composed of mosaic domains due to the evaporation of the atoms.

1. はじめに

Si 半導体素子は高速化、高集積化、低電力化等により現代社会の発展を支えてきた。しかし、素子構造の微細化や薄膜化が進み、従来技術に基づく設計規則が原理的限界に近づくにつれて、素子の高性能化や高機能化にとってナノ構造導入による量子効果の利用が避けられなくなっている。

表面の広い範囲にナノ構造を規則的に形成する技術は、既存の半導体微細加工技術の活用により実用段階に近づいている¹⁾。その一方で、応力^{2~4)}や電場^{5~12)}を加えて Si(001) 基板を加熱すれば、ナノ構造形成前の型板(表面)を作製できることが報告されている。電場を加えて Si(001) 表面を加熱する場合 (Fig. 1), 原子蒸発の影響が小さい低温では、電流を step-up 方向に流すと 2×1 面 (2×1 ダイマーは電流方向と平行; Fig. 1 (a)) が, step-down 方向に流すと 1×2 面 (1×2 ダイマーは電流と垂直; Fig. 1 (b)) が, それぞれ成長することが

知られており^{5~12)}, 電場の印加方向により表面構造を容易に制御することができる。ここで, 2×1 面の前面は S_A ステップ (2×1 ダイマーと垂直) で, 1×2 面の前面は S_B ステップ (1×2 ダイマーと平行) である¹³⁾。ところが, 同じ Si(001) 基板を直流電流^{14, 15)}, 交流電流⁶⁾, 電子衝撃¹⁶⁾等で高温に加熱すると, ほぼ等しい幅で 2×1 面と 1×2 面とが交互に並ぶ Double Domain (DD) 表面が形成されることが観察された。

本報告では, Si(001) 表面を交流電流で加熱し, 走査型反射電子顕微鏡 (scanning Reflection Electron Microscope) を使って表面構造の温度変化を調べた結果を示す^{17, 18)}。交流加熱では, 原子蒸発作用が熱拡散作用を抑制するため, DD 表面が形成されることを示した。

2. 実験

走査型 REM¹⁹⁾は, 蛍光板上で選択した反射電子回折 (Reflection High-Energy Electron Diffraction) スポット強度を画像信号とする顕微鏡である。使用した装置は, 真空度 (測定室) が 1×10^{-8} Pa 以下, 電子線の加速電圧が 20 kV, その直径が約 20 nm, 試料入射角が 3° 以下で

E-mail: doit@crl.hitachi.co.jp

ある。電子線を低角で試料に入射するため、REM 像は電子線入射方向に縮んだ像となる。

Si(001) 試料は約 $30 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ の短冊形で、CZ-N 型基板 (抵抗率 $8\text{--}12 \Omega\text{cm}$, 傾き $<2^\circ$) から切り出した。試料の長辺と短辺とは $<110>$ 方向とほぼ平行で、長辺方向に電流を流して試料を加熱した。超高真空中で試料

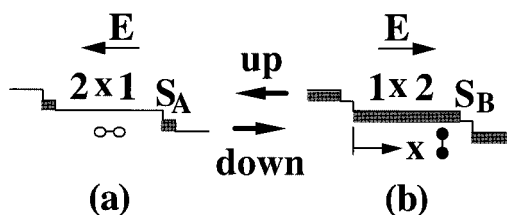


Fig. 1 A Si(001) surface: (a) a 2×1 surface consisted of wide 2×1 and narrow 1×2 terraces, and (b) a 1×2 surface consisted of wide 1×2 and narrow 2×1 terraces. The 2×1 (1×2) surface changed to the 1×2 (2×1) surface by step-down (step-up) current heating. The front edge of the 2×1 terrace was the S_A step parallel to the dimer row, while that of the 1×2 terrace was the S_B step perpendicular to the dimer row.

を約 1200°C で数秒間加熱すると、表面の汚染層や酸化膜が除去され、清浄表面が得られる。この表面を step-up 方向の直流電流で加熱すると広い 2×1 面を持つ 2×1 表面 (Fig. 1 (a)) が、step-down 方向の電流で加熱すると広い 1×2 面を持つ 1×2 表面 (Fig. 1 (b)) が、それぞれ形成される。信号スポットとして 2×1 回折スポットを選んだため、REM 像では明部が 2×1 面に、暗部が 1×2 面にそれぞれ対応する。

2×1 表面と 1×2 表面とを交流電流で加熱し、表面構造の温度変化を比較した (観察は室温で行った)。周波数 $1 \sim 10^4 \text{ Hz}$ の交流電流で試料を加熱し、加熱後の表面構造を比較したところ、周波数の違いにかかわらず同様の構造が観察された (詳細は省略)。この観察に基づき、試料を 10^4 Hz 正弦波電流で加熱した場合の結果を以下に示した。交流電流の 1 周期は 1×10^{-4} 秒であり、半周期 (5×10^{-5} 秒) ごとに電流方向が step-up 方向と step-down 方向とを交互に入れ替わる。なお、試料表面に Si 原子を供給する際には、電子ビーム蒸発源を使用した。

3. 交流電流加熱による Si(001) 表面構造変化

2×1 表面の構造変化を Fig. 2 に示す。交流加熱前の

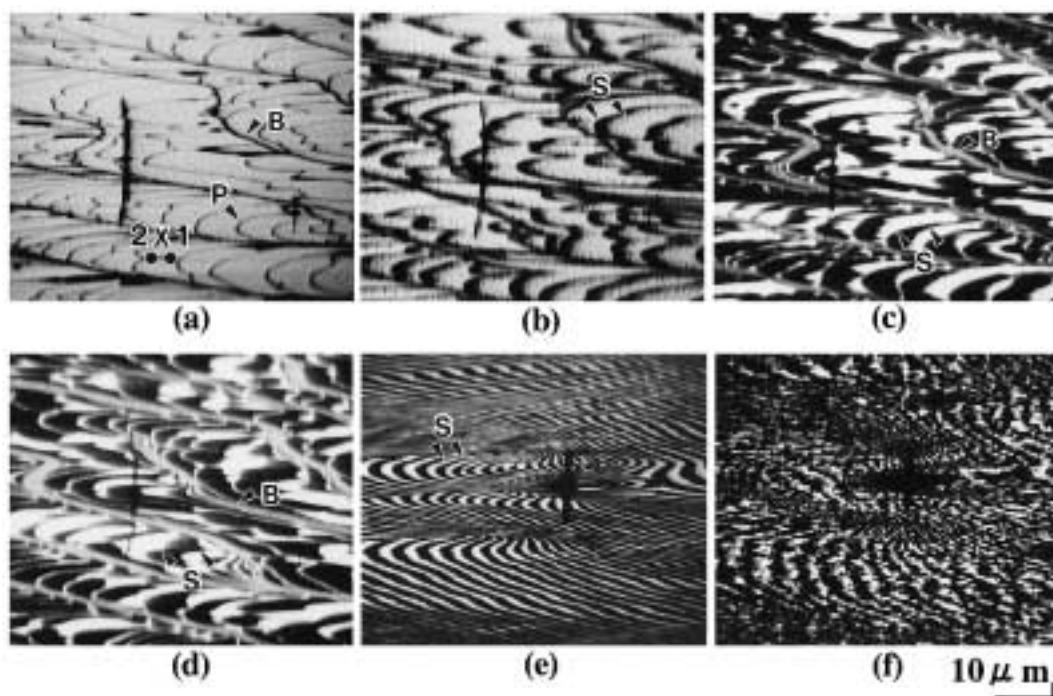


Fig. 2 REM images of the 2×1 surface after AC heating: (a) before heating, (b) 600°C for 180 min, (c) 800°C for 150 min, (d) 900°C for 120 min, (e) 1070°C for 5 min, and (f) 1140°C for 3 min. The direction of the 2×1 dimer is shown in (a). Bright regions correspond to the 2×1 terraces and dark regions are the 1×2 terraces. After AC heating, the step bands (B) released pairs (P) of steps, then the pairs split into single steps (S).

表面 (Fig. 2 (a)) にはステップバンド (ステップ集合体; B) が多数存在し、バンド間における 2×1 面 (明部) 幅は写真長手方向 (長辺 $\langle 110 \rangle$ 方向, 即ち, 通電方向) に平均約 $5 \mu\text{m}$ である。この表面では, 1×2 面は幅が狭く, 暗い線状構造 (P) として観察されている。この試料の表面は写真長手方向に対して左が高く右が低い, 1×2 面 (暗線) と左右の 2×1 面 (明部) との境界は, Fig. 1 (a) に示したように, S_A ステップ (暗線の左側明部と暗線との境界で, 2×1 面の前面ステップ) と S_B ステップ (暗線とその右側明部との境界で, 1×2 面の前面ステップ) とに, それぞれ対応する。700°C よりも低温で 2×1 表面を加熱すると, 1×2 面が広がるものの, 数時間の加熱では 2×1 面 (明部) は 1×2 面 (暗部) よりも数倍以上広い。600°C で加熱した後の表面を Fig. 2 (b) に示す。この表面では, 明部と暗部との境界 (S) がステップに対応し, 明部の右端に S_A ステップが, 暗部の右端に S_B ステップが, それぞれ存在する (像の縮みを補正すると, 2×1 面の小さな暗点は写真上下方向に長軸を持つ楕円構造を取り, ダイマー方向との関係から¹³⁾, 表面に形成された 1 原子層深さの穴構造であることがわかる)。ところが, 700°C ~ 1100°C で加熱する

と, 2×1 表面は DD 表面 (2×1 面幅 $\approx 1 \times 2$ 面幅) に変化する。ステップバンド (B) は, 800°C で加熱した後の表面 (Fig. 2 (c)) と 900°C で加熱した後の表面 (Fig. 2 (d)) とには残るが, 1070°C で加熱した後の表面 (Fig. 2 (e)) からはほぼ消える (バンドが消えた表面で平均面幅が約 $1 \mu\text{m}$ となることから, この試料の $[001]$ 方位は写真長手方向に約 0.5° 傾いていることがわかる)。さらに, 1100°C 以上に加熱すると, 2×1 表面はモザイク様構造を持つ表面 (凹凸表面と呼ぶ) に変化する。1140°C で加熱した後の表面を Fig. 2 (f) に示す。この表面には, 幅の狭い面 (2×1 面と 1×2 面) が混在している。

1×2 表面の構造変化を Fig. 3 に示す (Fig. 2 と同様, B はステップバンド, P は 1 対のステップ, S はステップである)。800°C 以下では, 加熱により 2×1 面 (明部) が少し広がるが, 1×2 表面は 1×2 表面のままである。800°C で加熱した後の表面を Fig. 3 (b) に示す。ところが, 850°C ~ 1100°C で加熱すると, 1×2 表面は DD 表面に変わる。850°C で加熱した後の表面と 900°C で加熱した後の表面とを, Fig. 3 (c) と Fig. 3 (d) とにそれぞれ示す。1100°C 以上に加熱すると, 2×1 表面 (Fig. 2 (f)) と同様, 1×2 表面も凹凸表面に変化する。

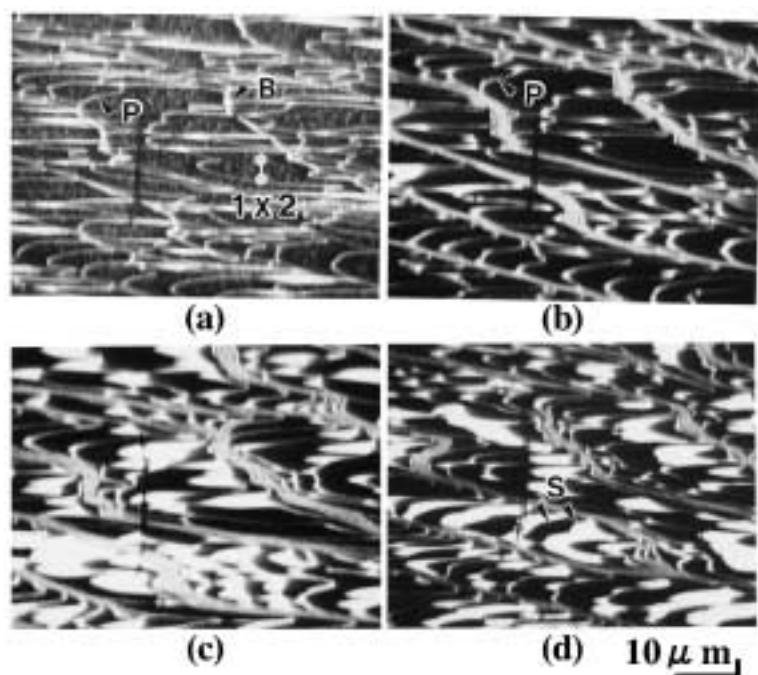


Fig. 3 REM images of the 1×2 surface after AC heating: (a) before heating, (b) 800°C for 180 min, (c) 850°C for 240 min, and (d) 900°C for 60 min. The direction of the 1×2 dimer is shown in (a). After AC heating, the step bands (B) released pairs (P) of steps, then the pairs split into single steps (S).

この観察結果に基づきダイアグラムを作成し、表面構造とその律速因子について検討した。

3.1 ダイアグラム

この Si(001) 試料 (面幅 1~5 μm) では、交流加熱により表面構造が2度変化することがわかった。最初の変化は DD 表面の形成である。ところが、700°C~850°C で加熱すると、2×1 表面は DD 表面に変化した。1×2 表面は 1×2 表面のままであり、両者に違いが認められた。この違いの原因を調べ DD 表面の形成温度を決定する目的で、1200°C で数秒間加熱して作成した清浄表面 (高温熱処理表面と呼ぶ) を交流電流で加熱した結果 (Fig. 4) を、2×1 表面 (Fig. 2) および 1×2 表面 (Fig. 3) の観察結果と比較した。高温熱処理表面 (Fig. 4 (a)) は狭い 2×1 面 (明部) と狭い 1×2 面 (暗部) とから成り、2×1 表面の性質と 1×2 表面の性質とを合せ持つと考える。この表面を 800°C で加熱すると (Fig. 4(b)-(c))、加熱時間が長いほど 1×2 面 (暗部) の占有率が増すことがわかった。1×2 面占有率の増加は、2×1 面 (明部) が 1×2 面 (暗部) に変わる割合が高いことを意味し、1×2 表面が DD 表面よりも安定であることを示唆する。この結果は 2×1 表面の結果と矛盾するが、2×1 表面の結果 (Fig. 2 (c)) を再検討したところ、幅数 μm 以下の 2×1 面 (狭い 1×2 面と組を成す) の多くが、加熱後に 1×2

面 (狭い 2×1 面と組を成す) に変わることがわかった。このことは、800°C で長時間加熱すれば 2×1 表面が 1×2 表面に変わることを示唆する (高温熱処理表面も同様)。その上、1×2 表面は 1×2 表面のままであることから、800°C では 1×2 表面が安定であると結論した。一方、900°C で加熱すると、2×1 表面 (Fig. 2 (d)) および 1×2 表面 (Fig. 3 (d)) と同様、高温熱処理表面 (Fig. 4 (d)) も DD 表面に変わった。この結果は、900°C では DD 表面が安定であることを支持する。表面構造の温度変化が 1×2 表面のそれと良く一致することから、1×2 表面の結果に従い、約 850°C で DD 表面が形成されると結論した。

ところで、Si(001) 表面における2度目の変化は凹凸表面の形成である。この変化は約 1100°C で起こり、加熱前の表面構造に依存しない (直流加熱¹⁵⁾でも、2×1 表面と 1×2 表面とから、約 1100°C 以上で凹凸表面が形成された)。1100°C では 1 原子層 (約 6.8×10^{14} 原子/ cm^2) が約 15 秒²⁰⁾で蒸発すること、この表面 (Fig. 2 (f)) が高温熱処理表面 (Fig. 4 (a)) と似ていることから、凹凸表面は原子蒸発作用により形成されると結論した。

上記の結果に基づき、この Si(001) 試料の、加熱温度と表面構造との関係を Fig. 5 に纏めた (直流加熱における両者の関係¹⁵⁾も一緒に示した)。交流加熱では、850

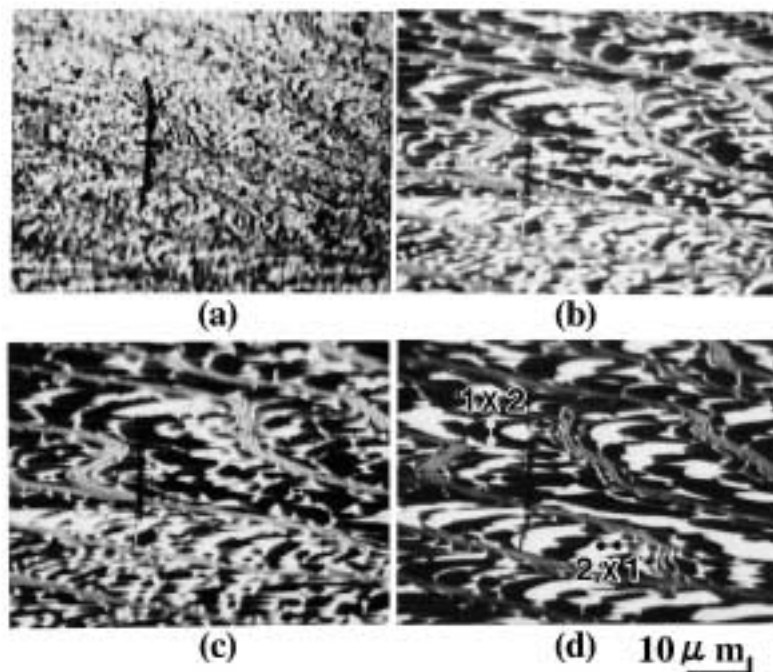


Fig. 4 REM images of the flash-heated surface after AC heating: (a) before heating, (b) 800°C for 60 min, (c) 800°C for 120 min, and (d) 900°C for 60 min.

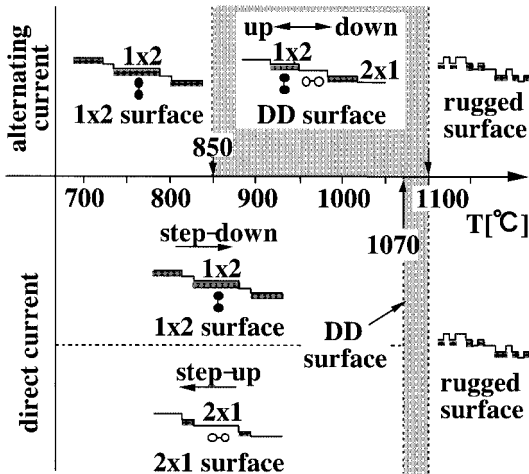


Fig. 5 A Si(001) surface with 1–5 μm terrace width. AC heating produced the 1×2 surface at temperatures below 850 $^{\circ}\text{C}$, the DD surface between 850 $^{\circ}\text{C}$ and 1100 $^{\circ}\text{C}$, and the rugged surface above 1100 $^{\circ}\text{C}$. On the other hand, DC heating produced the $2\times 1/1\times 2$ surface at temperatures below 1070 $^{\circ}\text{C}$, the DD surface between 1070 $^{\circ}\text{C}$ and 1100 $^{\circ}\text{C}$, and the rugged surface above 1100 $^{\circ}\text{C}$.

$^{\circ}\text{C}$ よりも低温で 1×2 表面が、850 $^{\circ}\text{C}$ ～1100 $^{\circ}\text{C}$ でDD表面が、1100 $^{\circ}\text{C}$ よりも高温で凹凸表面が、それぞれ形成されることを明らかにした。直流加熱では1070 $^{\circ}\text{C}$ ～1100 $^{\circ}\text{C}$ でDD表面が形成されることから、交流加熱がDD表面作製に有利であることがわかった。

3.2 1×2 表面形成 ($\sim 850^{\circ}\text{C}$) の律速因子

2×1 表面を交流電流で加熱すると、step-up方向とstep-down方向とに、 1×2 面がほぼ同速度で成長した (Fig. 2)。加熱前の 1×2 面幅を w_0 、 t 時間加熱後の値を w とすると、 1×2 面の成長量 (Δw) は $(w - w_0)/2$ となる。ところで、直流加熱 (900 $^{\circ}\text{C}$ 以下) の結果から、 1×2 面が 2×1 面よりも速く成長 (両面共、加熱時間に比例して成長)⁹⁾することがわかっている。交流加熱では、電流方向がstep-up方向とstep-down方向とに交互に入れ替わるため、交流加熱の 1×2 面成長速度は、直流加熱の 1×2 面成長速度 (step-down方向の電流に対する値) と 2×1 面成長速度 (step-up方向の電流に対する値) との差の半分となり、交流加熱でも 1×2 面が時間 (周期) に比例して成長すると予想した。ところが、 Δw と t との関係 (Fig. 6) を調べると、この予想に反し、 1×2 面が加熱時間の $1/2$ 乗に比例して成長することがわかった (ここでは省略するが、 Δw と t との関係からSi原子の拡散係数 D を求め、拡散係数と温度とのアレニウスプロットから、Si(001)表面におけるSi原子拡散の活

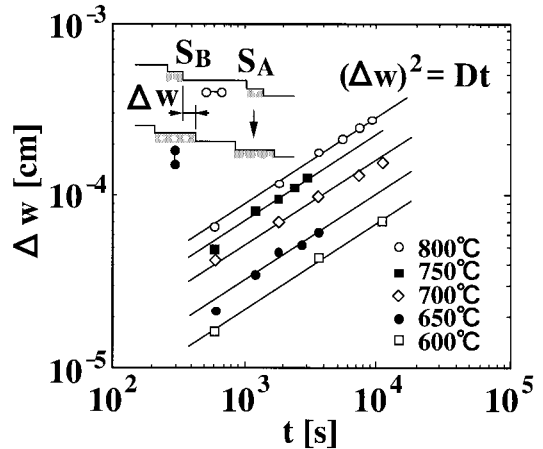


Fig. 6 Growth of the 1×2 terrace after AC heating. The horizontal axis is heating time t [s], and the vertical axis is the width $\Delta w = (w - w_0)/2$ [cm], where w_0 and w are the widths of the 1×2 terrace before and after heating. Below 850 $^{\circ}\text{C}$, the 1×2 terraces grew with a $1/2$ power-law of time dependence.

性化エネルギーを決定した)¹⁰⁾。 $1/2$ 乗則に従う成長は、熱拡散作用が成長を律速することを示唆する (850 $^{\circ}\text{C}$ よりも低温では、熱拡散作用 $\gg$ 蒸発作用が成立すると考える)。

ここで、 S_A ステップ放出原子が 1×2 面上を電場 (ダイマー列) 方向に移動する²¹⁾場合について、交流加熱における 1×2 表面の形成過程を検討した。 x 軸をstep-down方向に選び、 S_A ステップ位置を原点にとると (Fig. 1)、直流加熱におけるSi原子の流束 $J_{\pm}(x, t)$ は式 (1) となる^{10~12)}。

$$J_{\pm}(x, t) = -D[\partial n(x, t)/\partial x] \pm DFn(x, t)/kT \quad (1)$$

式 (1) において、 $J_+(x, t)$ はstep-down方向 (+) の流束、 $J_-(x, t)$ はstep-up方向 (−) の流束、 $n(x, t)$ は表面原子密度、 D はダイマー列方向の拡散係数 (熱作用)、 F は原子に働く力 (電場作用) である。step-down方向 (+) に D を選び、step-down方向 (+) に対して $F(+)=+F$ 、step-up方向 (−) に対して $F(-)=-F$ とすれば、交流加熱におけるSi原子の流束 $J_-(x, t)$ は式 (2) となる。

$$J_-(x, t) = [J_+(x, t) + J_-(x, t)]/2 = -D[\partial n(x, t)/\partial x] \quad (2)$$

流束の式 (式 (2)) と連続の式 (式 (3)) とから、交流加熱におけるSi原子の拡散方程式は式 (4) となる。

$$\partial n(x, t)/\partial t + \partial J_-(x, t)/\partial x = 0 \quad (3)$$

$$\partial n(x, t)/\partial t = D[\partial^2 n(x, t)/\partial x^2] \quad (4)$$

式(4)は 1×2 面が $1/2$ 乗則に従って成長することを示唆し、Fig. 6の結果を支持する。

以上のことから、交流加熱($\sim 850^\circ\text{C}$)では、各周期で電場作用が打ち消され、熱拡散作用により 1×2 面が成長すると結論した。即ち、熱拡散作用が 1×2 表面形成の律速因子であることを明らかにした。

3.3 DD 表面形成 ($850^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$) の律速因子

歪みを加えてSi(001)試料を加熱すると、表面構造が変化することが知られている²⁻⁴⁾。ところで、加熱試料には熱歪み(試料と周辺部との膨張率の違いが原因)がかかるため、DD表面形成の原因として熱歪みが考えられる。交流加熱の実験結果(Fig. 5)を熱歪みで説明するためには、熱歪みの値が 800°C で約 0.1% (張力)から 850°C で 0% へと変化する必要がある²⁻⁴⁾。その上、熱歪みの値が温度に比例すると仮定すれば、その値は 850°C で 0% から 900°C で -0.1% (圧縮力)へと変化すると予想する。即ち、熱歪みが原因であれば、実験結果は 1×2 表面(800°C 以下)がDD表面を経て 2×1 表面(900°C 以上)に遷移することを示唆する。しかし、Si(001)表面を交流電流で 1100°C 以上まで加熱したが、この 2×1 表面への変化は観察されなかった。また、熱歪みがDD表面を形成するのであれば、直流加熱においても 850°C でDD表面が形成されると予想する(熱作用と電場作用とは独立に働くため、同じ温度では同じ熱歪みが働く)。しかし、Si(001)表面を直流電流で 850°C に加熱しても、この予想に反し、DD表面は形成されなかった¹⁵⁾。以上のことから、DD表面は熱歪み以外の原因により形成されると結論した。

ところで、直流加熱($1070^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$)では、 850°C よりも高温ではあるものの、原子蒸発によりDD表面が形成された¹⁵⁾。この結果を踏まえて、交流加熱の場合に、

蒸発作用がDD表面形成の原因である可能性について検討した。原子蒸発の影響を調べるため、高温(850°C 以上)に加熱したSi(001)表面に外部からSi原子を供給する場合としない場合とについて、両者の表面構造を比較した。Si原子は電子ビーム蒸発源から供給し、Si原子の供給率は約 6×10^{11} 原子/ cm^2s (約 960°C の原子蒸発率に相当)²⁰⁾である。 900°C 以下では、この供給率は蒸発率(900°C で約 7×10^{10} 原子/ cm^2s)の10倍以上となることから、多数の原子が表面に残留すると予想する。 900°C の場合について、原子供給(6×10^{11} 原子/ cm^2s)の有無による表面構造の違いをFig. 7に示した。原子を供給しない場合(Fig. 7(a))は 1×2 表面がDD表面に変わったが、原子を供給する(Fig. 7(b))¹⁷⁾と 1×2 表面は 1×2 表面のままであった(供給原子は結晶原子よりも蒸発し易いにもかかわらず、Fig. 7(b)の結果は多数の原子が表面に留まることを示す)。前者の場合は原子蒸発によりDD表面が形成されたが、後者の場合は、原子供給が原子蒸発の効果を打ち消し、 1×2 表面が形成されたと結論した(この結果は蒸発作用を抑制すれば 1×2 表面が形成されることを意味し、交流加熱では熱作用が表面構造の変化を律速することを示唆する)。

原子蒸発と原子供給とを考慮すると、交流加熱(850°C 以上)における拡散方程式は式(5)となる。

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 n(x, t)}{\partial x^2} \right] + R - n(x, t) / \tau \quad (5)$$

ここで、 R は原子供給率、 $n(x, t)/\tau$ は原子蒸発率、 τ は原子滞在時間である(R, n, τ は正数)。原子を供給しない場合($R=0, n/\tau > 0$)は、 $\partial n(x_c, t)/\partial t = 0$ を満足する解 x_c (臨界点)が存在する(Fig. 8)。臨界点($x=x_c$)で、 $D(\partial^2 n/\partial x^2) = n/\tau$ が成立し、蒸発作用(τ に依存)と熱作用(D に依存)とが釣り合う。この結果、領域 $x <$

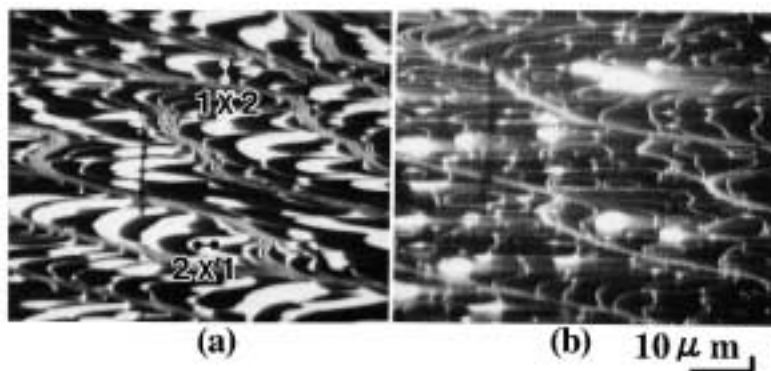


Fig. 7 A Si(001) surface during AC heating at 900°C . (a) Without atom deposition, the 1×2 surface changed to the DD surface. (b) With atom deposition (about 2.4 ML), the 1×2 surface did not change to the DD surface.

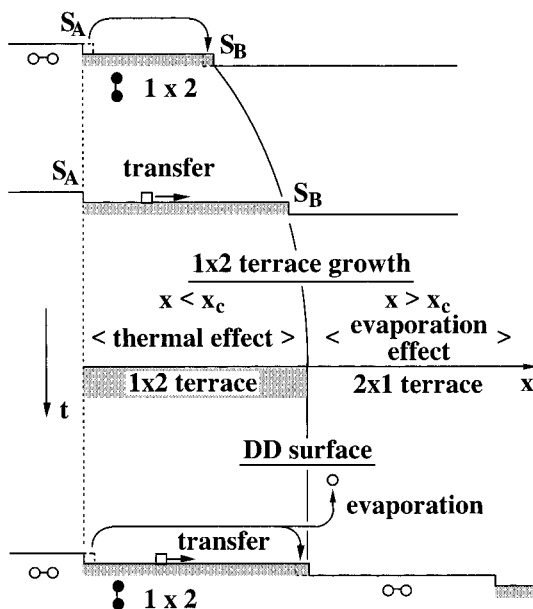


Fig. 8 Formation of the DD surface by AC heating. At the critical position x_c , the growth of the 1×2 terraces stops due to the balance between evaporation effect and thermal effect. At $x < x_c$, thermal effect is larger than evaporation effect, so the 1×2 terraces grow due to thermal effect. At $x > x_c$, however, evaporation effect is larger, and thus the kinetics of the atoms is dominated by evaporation effect. The 1×2 terraces do not grow at $x > x_c$, and the 2×1 terraces are produced instead. The driving force changes from thermal effect to evaporation effect at x_c .

x_c では、 $D(\partial^2 n / \partial x^2) > n / \tau$ となり、熱作用が蒸発作用よりも強く働く。Si 原子は表面に留まり熱作用が原子の運動を律速するため、 1×2 面が $1/2$ 乗則に従って成長する。ところが、領域 $x > x_c$ では、 $n / \tau > D(\partial^2 n / \partial x^2)$ となり、蒸発作用が熱作用よりも強く働く。Si 原子が蒸発し 1×2 面の成長が停止するため、この領域 ($x > x_c$) は 2×1 面となる。この結果、蒸発作用が熱作用を抑制する場合に、DD 表面が形成されることがわかった。一方、原子供給により $R > n / \tau$ となれば、全表面で $D(\partial^2 n / \partial x^2) + R > n / \tau$ が成立する (R が 6×10^{11} 原子/cm²s の場合、温度 900°C では $R > n / \tau$ が成立する)。この結果は、熱作用が原子の運動を律速し、全表面で 1×2 面が成長することを示唆する。即ち、原子供給が蒸発作用を打ち消し ($R > n / \tau$)、全表面で熱作用が働く場合に、 1×2 表面が形成されることがわかった。式 (5) に基づく検討結果は観察結果 (Fig. 7) を説明し、原子蒸発作用により DD 表面が形成されることを支持する。

以上のことから、交流加熱 ($850^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$) では、

蒸発作用が熱拡散作用を抑制し、原子蒸発により DD 表面が形成されると結論した (蒸発作用は高温ほど強くなり、 1100°C 以上では、蒸発作用 $\gg$ 熱拡散作用が成立すると考える)。即ち、原子蒸発作用が DD 表面形成の律速因子であることを明らかにした。それに加え、交流加熱では、 850°C 以上でも熱拡散作用が (蒸発前の) 表面原子の運動を律速することを示した。

3.4 原子蒸発温度

Si(001) 表面において、同じ原子 (結晶原子) であるにもかかわらず、交流加熱の原子蒸発温度 (約 850°C) と直流加熱の値 (1000°C 以上)¹⁵⁾ との間に大きな違いが認められた。この違いの原因を調べるため、 1×2 表面における原子の運動について検討した。

温度が 900°C で原子供給率 (R) が 6×10^{11} 原子/cm²s の場合、3.3 で示したように、全表面で $\partial n / \partial t > 0$ が成立し、 1×2 表面が保持される。この条件では、表面に多数の原子が存在し蒸発作用が抑制されるため、 1×2 表面における原子の運動を調べることができる。ところが、この条件において、交流加熱下の原子成長過程 (蒸発の逆過程) と直流加熱下のそれとを比較したところ、両者の間に顕著な違いが認められた。詳細は省略するが、加熱温度と原子供給率が同じであるにもかかわらず、交流加熱 (前者) では島成長 (原子が島外周に捕獲)¹⁷⁾ が、直流加熱 (後者) では沿面成長 (原子が基板ステップに捕獲)⁸⁾ が、それぞれ観察された。成長様式の違いは、 1×2 表面形成過程 (3.2) と同様、交流加熱では時間の $1/2$ 乗に従う原子移動を、直流加熱では時間に比例する移動を、それぞれ示唆する (供給原子と結晶原子に対して、同じ関係が成立することがわかった)。この冪指数の違いは、原子の拡散 (移動) 距離とその所要時間とに大きく影響するため、原子蒸発の影響が広い面ほど顕著に現われることを意味する。

交流加熱では原子が広い面を横断するのに長い時間が必要とするため、直流加熱と比較して、低い温度から原子蒸発が顕在化することを示した。蒸発温度の違いは、原子がステップに到達するまでに要する時間 (表面滞在時間) の違いに起因すると結論した。

4. おわりに

走査型 REM を使って、交流加熱における Si(001) 表面構造の温度変化を調べ、(1) 850°C よりも低温では、熱拡散作用 ($\gg$ 蒸発作用) により 1×2 表面が、(2) $850^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$ では、原子蒸発作用が熱拡散作用を抑制するため DD 表面が、(3) 1100°C 以上では、原子蒸発作用 ($\gg$ 熱拡散作用) により凹凸表面が、それぞれ形成されること等を明らかにした。

試料加熱方式や原子供給条件等を適切に設定することにより、Si(001) 表面構造を広範囲にわたり制御できることを示した。ここで示した方法は、量子効果素子を構築する際の型板表面の作製等に応用できると考える。

謝 辞

本研究を御指導頂きました、東京大学・市川昌和教授、日立中研・柿林博司主管研究員に感謝いたします。

文 献

- 1) 荻野俊郎, 本間芳和, 日比野浩樹, 小林慶裕, 住友弘二, K. Prabhakaran, 尾身博雄: 表面科学 **19**, 557 (1998).
- 2) O.L. Alerhand, D. Vanderbilt, R.D. Meade and J.D. Joannopoulos: Phys. Rev. Lett. **61**, 1973 (1988).
- 3) F.K. Men, W.E. Packard and M.B. Webb: Phys. Rev. Lett. **61**, 2469 (1988).
- 4) H. Tamura, Y. Tanishiro, H. Minoda and K. Yagi: Surf. Sci. **382**, 310 (1997).
- 5) A.V. Latyshev, A.B. Krasil'nikov, A.L. Aseev and S.I. Stenin: JETP Lett. **48**, 526 (1988).
- 6) A.V. Latyshev, L.V. Litvin and A.L. Aseev: Appl. Surf. Sci. **130-132**, 139 (1998).
- 7) H. Kahata and K. Yagi: Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L 858 (1989).
- 8) M. Ichikawa and T. Doi: Vacuum **41**, 933 (1990).
- 9) T. Doi, M. Ichikawa, S. Hosoki and K. Ninomiya: Phys. Rev. B **53**, 16609 (1996).
- 10) S. Stoyanov: Jpn. J. Appl. Phys. **30**, 1 (1991).
- 11) A. Natori, H. Fujimura and H. Yasunaga: Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 1164 (1992).
- 12) T. Kawamura and M. Wilby: Jpn. J. Appl. Phys. **31**, L 362 (1992).
- 13) D.J. Chadi: Phys. Rev. Lett. **59**, 1691 (1987).
- 14) N. Inoue, Y. Tanishiro and K. Yagi: Jpn. J. Appl. Phys. **26**, L 293 (1987).
- 15) T. Doi, M. Ichikawa and S. Hosoki: Phys. Rev. B **55**, 1864 (1997).
- 16) R.M. Tromp and M.C. Reuter: Phys. Rev. B **47**, 7598 (1993).
- 17) T. Doi, M. Ichikawa, S. Hosoki and H. Kakibayashi: Appl. Phys. Lett. **74**, 3675 (1999).
- 18) T. Doi, M. Ichikawa and S. Hosoki: Surf. Sci. **499**, 161 (2002).
- 19) M. Ichikawa: Mater. Sci. Rep. **4**, 147 (1989).
- 20) R.E. Honig: RCA Rev. **23**, 567 (1962).
- 21) Y.-W. Mo and M.G. Lagally: Surf. Sci. **248**, 313 (1991).