

ヘリウムイオンビーム照射による Si トレンチパターンに対する ラインプロファイル生成のシミュレーション

総合技術センター

情報システム分野

山中 卓也 (Takuya Yamanaka)

1. はじめに

近年デバイスの微細化が進み、半導体デバイスのサイズはますます小さくなっている。そのような小型化されたデバイス構造の検査や測定のために、走査電子顕微鏡 (SEM) は広く利用されている。しかし、デバイスの測長は1nm以下のスケールに近づいてきており、SEMの空間分解能と複雑な電子-試料間相互作用からくる限界が見えてきており、SEMに変わる新しいツールが求められている。そうしたツールの一つとして、ヘリウムイオン顕微鏡 (Helium Ion Microscope : HIM) がある。HIMは試料表面をヘリウムイオンビームにより走査し、放出二次電子から画像を生成する走査イオン顕微鏡 (SIM) の一つである。HIMの像形成メカニズムはSEMと似ているが、SEMより高い二次電子収率をもち、また放出二次電子の試料内での広がり (lateral distribution) が小さく、高いSN比と空間分解能を持っている。このようなことから、HIMは今デバイス計測におけるSEMに変わる新しいツールとして注目されている。

以前の論文において^[1]、大宅はSiのステップパターンを異なるイオン種(水素、ヘリウム、ネオン、ガリウム)のイオンビームで走査したときの二次電子放出のモンテカルロシミュレーションを実施した。その結果、数nmのサイズにおいても、ヘリウムイオンビームがもっとも良いコントラストを持つことが示された。一方で、ステップ側壁の傾斜が増加するとき、そのラインプロファイルがなだらかになっていく傾向が見られた。本研究では、側壁が傾いたトレンチ構造をもつ表面に対応したシミュレーションモデル^[2]を用い、また入射角についても40°まで傾斜角を変化させて、その二次電子放出のさらなる詳細な性質を明らかにする。

2. シミュレーションモデル

本研究のモンテカルロシミュレーションは試料表面を数十keVのエネルギーをもつイオンで照射したときの二次電子放出をモデル化している。一般的に二次電子放出過程には2つのメカニズム(キネティック放出とポテンシャル放出)があるが、HIMにて通常使用される数十keVのエネルギーではキネティック放出が支配的となる。キネティック放出とはイオンが試料中の電子に運動エネルギーを与えて二次電子を放出するメカニズムである。イオンが試料に侵入すると、試料原子との弾性衝突もしくは非弾性衝突が起こり、また非弾性衝突時には二次電子を生成する。弾性衝突によりイオンから運動エネルギーを与えられた反跳試料原子は、さらにキネティック放出により二次電子を生成する。モデルでは、イオン固体相互作用のプロセスは各弾性衝突・非弾性衝突それぞれの平均自由行程により、二体衝突近似をもとにしたモンテカルロ法を用いてシミュレーションされている。モデルの詳細については^{[3][4]}を参照されたい。二次電子は伝導帯の電子の個々の励起によって生成され、その平均自由行程はイオンと反跳原子による電子散乱の部分波展開によって計算している。シミュレーションによって計算される二次電子収率は、固体内で生成される二次電子の初期エネルギーに大きく影響を受ける。ここでは、初期エネルギーを、イオン(反跳原子)が伝導帯電子に正面衝突したときに与えるエネルギー ΔE にフィッティング係数 k を乗じたものとしている。係数 k の値はシミュレーションと二次電子収率の実験値を比較して決定される。生成された二次電子は試料内の原子および電子と弾性、非弾性衝突を繰り返し、さらに連鎖的に二次電子を生成する^[5]。これら二次電子が試料表面に到達し、表面エネルギー障壁 $E_f + \Phi$ (Si: 12.7eV) を越えて、真空中に放出される。ここで E_f はフェルミエネルギーで、 Φ は表面仕事関数である。係数 k を0.5としてシミュレー

シミュレーションした二次電子収率は30keVヘリウムイオンビームで2.33/ionであり、20keVのビームで実際に測定された二次電子収率2.38/ion^[6]とほぼ同じである。

図1はシミュレーションで用いた2つの溝（トレンチ）をもつ表面形状を示す。表面各点をゼロサイズビームと仮定した30keVのヘリウムイオンで照射したときの二次電子収率を計算した。側壁や溝底面から再放出されたイオン、反跳原子および二次電子の一部は別の表面に再入射することになるが、本シミュレーションではこの再入射を考慮している。再入射したイオンが大きなエネルギーをもつとき、さらに二次電子が生成される。一方、エネルギーの低い二次電子は再入射すると試料に吸収されて、生成二次電子数にはカウントされない。

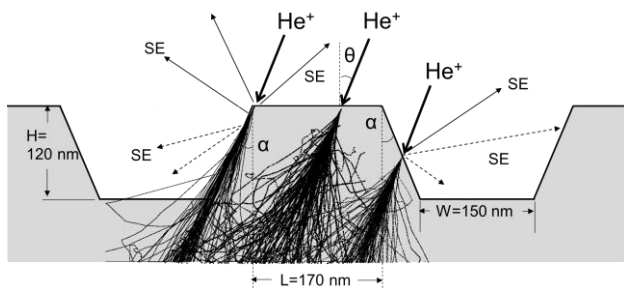


図1 シミュレーションに用いた2つの溝部分を持つトレンチパターン ($\alpha=23^\circ$, θ はビーム入射角)。イオンの入射方向を矢印で、三点へ入射後の軌道例 (100本) を示した。表面から出る細線は二次電子(SE)の放出方向の例を示し、破線は表面に再入射するSEを示す^[2]。

3. 結果と考察

図2は入射角 $0^\circ \sim 40^\circ$ としてシミュレーションで求めた二次電子収率のラインプロファイルを示している^[2]。ビーム位置は(a)における左側の溝の底部を0としている。 0° における側壁ラインプロファイル（以下Sidewall Line Profile:SLPとする）は左側と右側の側壁の形状に一致した特徴を示している。斜面の頂点では、二次電子放出がピークを示しており、これは側面からの二次電子放出が増加するためである。斜面の底部で極小の値を示しており、これは側面から放出される二次電子が底部や反対の側壁などに再吸収されてしまうためである。入射角が斜めになると、左のSLPは高く、右は低くなっており、さらに左のSLPは 0°

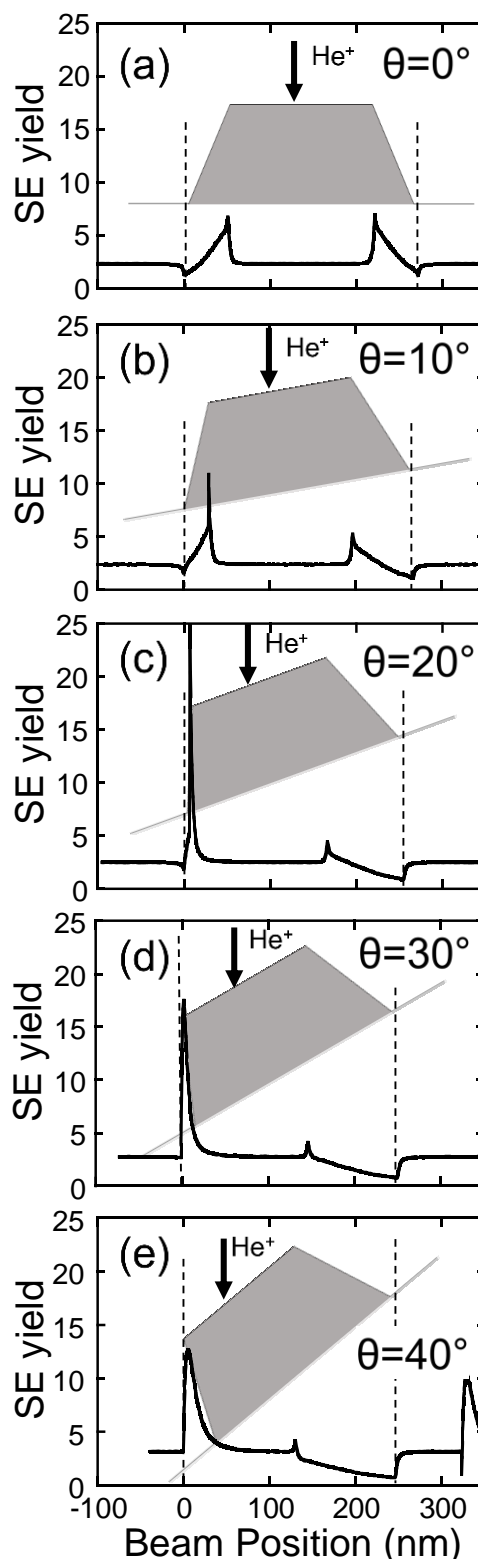


図2 トレンチパターンを走査したときのラインプロファイル^[2]

と比べてより狭く、右は広くなるという、幾何的効果を示している。この幾何的効果は右SLPが消えていく原因となっている。さらに 20° を越えて入射角が増加していくと、左SLPは再び広がっている。一方右SLPの二次電子収率はさらに減少している。

図3はシミュレーションを行った左右SLPの二次電子収率と半値幅(FWHM)を縦軸、横軸を入射角として示したものである。それぞれの値はトレンチ間の平坦部からの差から取ったものである。左SLPの二次電子収率は入射角に対して大きく変化しており入射角20°付近にて最大となっており、そこから角度が離れていると減少するグラフとなっている。この二次電子収率が最大となる入射角20°は溝の側壁の角度(〜23°)に近いことから、側壁に平行に(grazing angle)侵入するイオンによるものと推察される。このgrazing angleの入射は側壁からの最大脱出深さ(〜10nm)以内の二次電子をかなり多く生成するため、二次電子放出量を増加させる。半値幅もまた同様に、20°付近で最小の値をもつことができる。

一方、右SLPの二次電子収率と半値幅は入射角が増加するにつれて、単調に減少していく。この右SLPの二次電子収率の減少は、斜面表面の法線方向からの入射角の減少と、二次電子収率の逆コサイン依存性^[7]によるものである。

図1に示すように、今回の試料モデルの側壁の斜面は23°の傾きをもったものとなっているが、この側壁の角度によるSLPの違いをみるため、傾きのない側壁(0°)でトレンチ幅等他の条件を同じとしたものについてシミュレーションを行ったのが図4である。23°のグラフでは側壁底部から上部にかけて傾いているのが、0°では垂直となっている。一方、0°のときは、側壁上部でピークからだんだんと減少して平衡となる形状となっているが、斜面(23°)の場合、ピークから垂直に減少して平衡となっている。

またトレンチ間の平坦部がより狭くなったときの二次電子収率とラインプロファイルの変化を見るために、トレンチ間隔を変化させて(170nm,60nm,10nm)シミュレーションしたものを図5に示す。このときの入射角は0°である。SLP形状は平坦部の幅が減少していくにつれ位置がシフトしているが、全体的な形状には変化はない。10nmの幅となっても、平坦部が少し左右のSLPに吸収されているもののピークについては同様に確認できる。トレンチ間の幅が10nm程度でも十分にピークの検出ができ、幅が二次電子収率に影響しないことができる。なお、このシミュレーションでは試料上方に放出されるすべての二次電子をカウントしている。通常HIMの二次電子検出器

は一般的なEverhart-Thornley (ET)検出器で、試料の斜め上方に設置されているため、一方向からの放出二次電子を受けやすい傾向がある。このような影響を考慮したシミュレーションを行うことで、さらに正確な結果を得られると推察される。

4. まとめ

30keVのHeイオンビームによって照射されたSi表面上の溝構造に対する二次電子放出シミュレーションをおこなった。そのラインプロファイルは左右両側の側壁上の形状について、入射角依存性による違いを示した。入射角の増加にともない、ビームの傾きで見え難くなる側壁(beam-opposing sidewall) に対する二次電子収率はまず高く、鋭くなり、その後斜面の角度を超えると、低く、幅広くなっていった。ビームの傾きに向かい合う側の斜面 (beam-facing sidewall) では、本研究における最大の入射角40°まで二次電子収率は低下し、幅も広がり続けた。シミュレーションによるラインプロファイルにより、Si表面上の溝構造の特徴を再現できた。また、この入射角による変化を、二次電子収率と半値幅で定量的に示し、beam-opposing sidewallでは側壁の角度と等しい入射角で二次電子収率が最大となり、半値幅が最小となる鋭いピークが現れることを示した。溝の幅を10nm程度まで減少させても、ラインプロファイルを生成できることを示した。

謝辞

本研究にて理工学研究部電気電子系大宅薫教授には、シミュレーションプログラムの提供と、ご指導をいただきました。ここに謝意を表します。本研究はJSPS科研費 24560029 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K.Ohya, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 06JB01 (2014)
- [2] 山中卓也 第16回徳島大学理工学部総合技術センター技術発表会 2016年9月
- [3] K.Ohya, Nucl. Instr. and Meth. B 195 (2002) 281.
- [4] K.Ohya, Nucl. Instr. and Meth. B 206 (2003) 52.
- [5] K. Nishimura, J. Kawata, and K. Ohya, Nucl.

[6] J. Morgan, J. Notte, R. Hill, and G. Ward,
Microsc. Today 14, 24 (2006).

[7] K. Inai, K. Ohya, and T. Ishitani, J. Electron
Microsc. 56, 163 (2007).

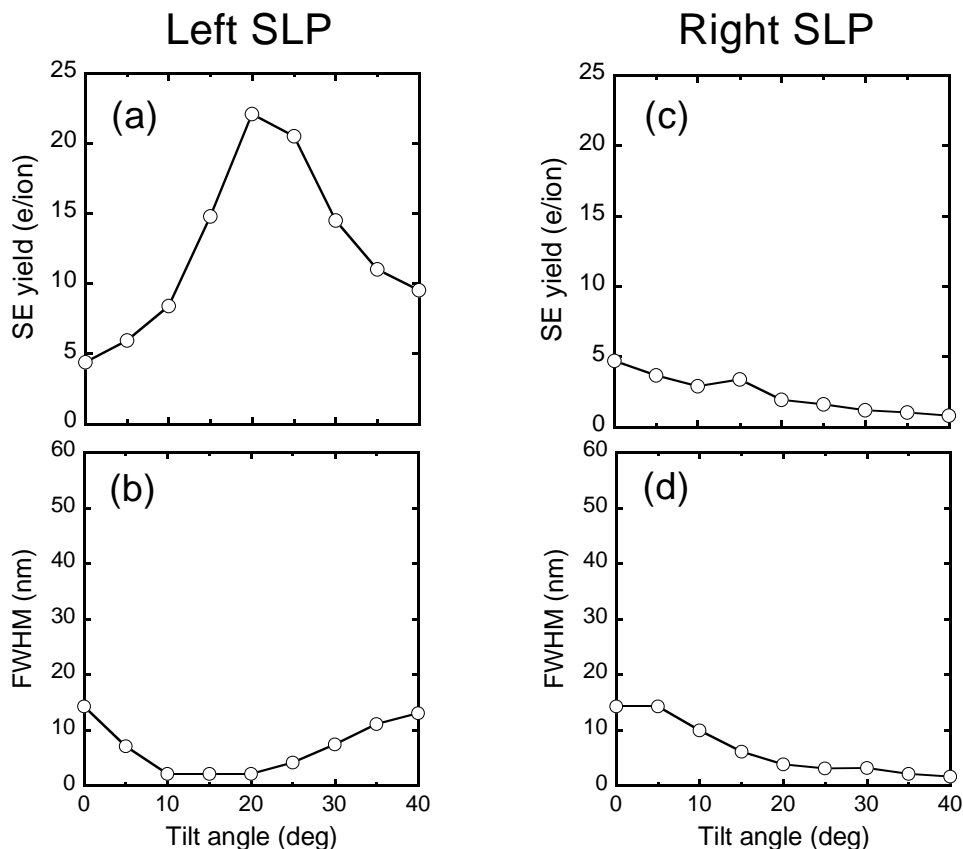


図3 左と右の側壁ラインプロファイル(SLP)それぞれについて、入射角に対する二次電子収率と半値幅の変化。二次電子収率は中央平坦部からの差、半値幅については中央平坦部からのfull-width-at-half-maximum (FWHM) である。

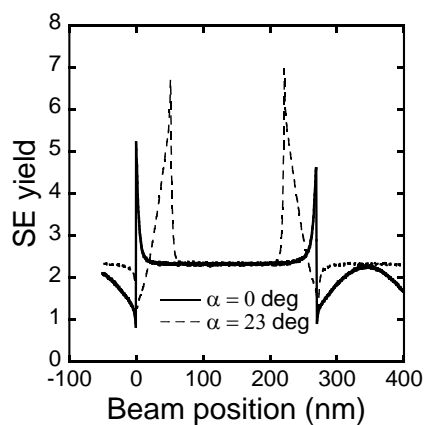


図4 垂直の側壁($\alpha=0^\circ$)と傾きのある側壁(23°)のトレンチパターンに対する二次電子収率のラインプロファイル

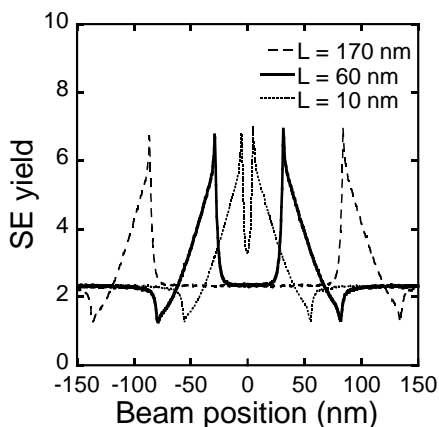


図5 上面平坦部が 170nm, 60nm, 10nm のトレンチパターンに対する二次電子収率のラインプロファイル