

技術報告

収束イオンビームを用いたスパッタリング

関根 哲、坂口清志、加無木大介

日本電子株式会社

〒196 東京都昭島市武蔵野 3-1-2
(1997年8月13日受付 ; 1997年8月29日掲載決定)

Sputtering by Focused Ion Beam

T. Sekine, K. Sakaguchi and D. Kamuki

JEOL LTD

3-1-2 Musashino, Akishima, Tokyo 196, Japan

(Received August 13 1997; accepted August 29 1997)

Most aspects for sputtering using a focused ion beam (FIB) can be interpreted from the general knowledge for ion sputtering. But there are a few aspects which is peculiar to FIB. For example, the etching rate is determined not only by ion dosage, but also by a scan speed of ion beam. We describe here about a sputtering by FIB including general and special aspects.

1. はじめに

収束イオンビーム (FIB) は超微細加工を行うための有力な道具として、この10年の間に広く用いられるようになった。FIB用のイオン源には、液体金属イオン源、特にGa⁺が良く用いられる。Ga⁺イオン源は高輝度で安定していて、且つエネルギー広がり小さいイオン光源を作れるので、イオンビームを細く絞り込むのに適している。最近では数nmのイオンビームが得られるようになった。高輝度で極細イオンビームで試料をスパッタリングすると特有の現象も現れる。ここではそれらも含め、FIBを用いたスパッタリングについて概説する。

2. どこまで細いビームが可能か

イオンビームをどこまで細く絞り込むことができるかは、イオン源の大きさ、輝度、エネルギー広がり、レンズ系の収差、縮小率など多くの要因に支配される[1]。ひとつの装置に限れば、加速電圧、ビーム電流により細さの限界が決まる。現在市販されている装置のビーム径とビーム電流の関係図の例を Fig.1 に示した[2]。加工は10nAから10pA程度の電流で行われる。従って、図から加工時のビーム系は数百nmから十数nm程度であることが読み取れる。イオン励起の二次電子像 (SIM像) の観察は、1pA程度まで電流を落としても良いから、5~8nm程度の分解能が

得られる。近い将来分解能は更に向上するであろう。

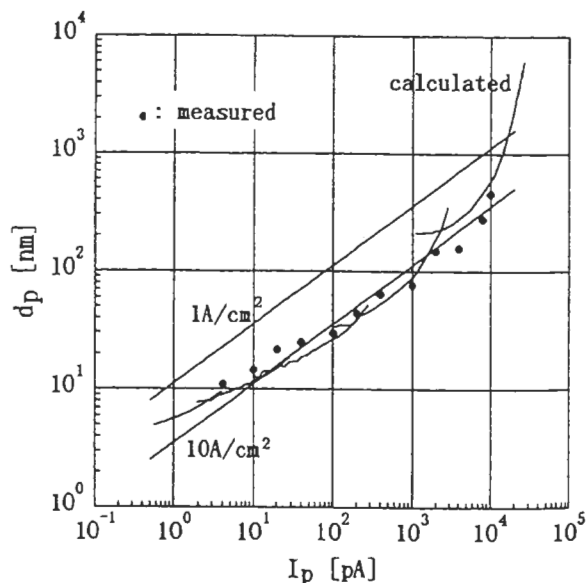


Fig. 1 Diagram of ion probe diameter D_p vs. ion probe current I_p (Sakaguchi et al ref. [2]).

3. 物質によるエッチングレートの違い

スパッタリングによるエッチングレート* は物質によりかなり異なる。30 kVのGa⁺イオンに対するスパッタイールド* とスパッタリングレート* をTable 1に示した[3]。テーブルに示した物質の中では、最もレートが高いのはAu、最も低いのはAl₂O₃で、その違いは約20倍である。

4. スパッタイールドの加速電圧依存性

* 単位時間にスパッタされる試料の厚さ
 * 1個の入射イオンに対してスパッターされるターゲット原子数
 * 単位打ち込みイオン量当たりエッチングされるターゲット体積

Substrate	Y (atoms/ion)	S (μm ³ /nC)
C(Diamond)	2.7	0.18
Si	2.2	0.27
Al	2.9	0.3
Ti	3.3	0.37
Cr	1.3	0.1
Fe	3.9	0.29
Ni	2	0.14
Cu	3.4	0.25
Mo	1.2	0.12
Ta	2.8	0.32
W	1.2	0.12
Au	14.1	1.5
MgO	1.3	0.15
SiO ₂	0.6	0.24
Al ₂ O ₃	0.3	0.08
TiO	1.1	0.15
Si ₃ N ₄	0.5	0.2
TiN	1.2	0.15
Fe ₂ O ₃	0.8	0.25
GaAs	2.1	0.61

Table 1 Calculated values of sputter yield Y and measured values of sputtering rate S for various substrates for Ga⁺ at 30 kV. Referred from Orloff et al [3].

種々のイオン種とターゲット物質の組み合わせについて、スパッタイールドの加速電圧依存性を調べたMatsunamiらの詳しい報告がある[4]。ただ、この報告にはGaイオンについてのデータが無い。Fig.2では、ArイオンでSiターゲットをスパッタリングした場合のグラフを示した[4]。FIBは10~50 keV程度エネルギーを用いる。この範囲ではスパッタイールドはエネルギーの増加に対して緩やかな単調増加である。これはGaイオンに関してもほぼ同様である。われわれの実測でも10 keVに対して30 keVで5~10%増程度である。

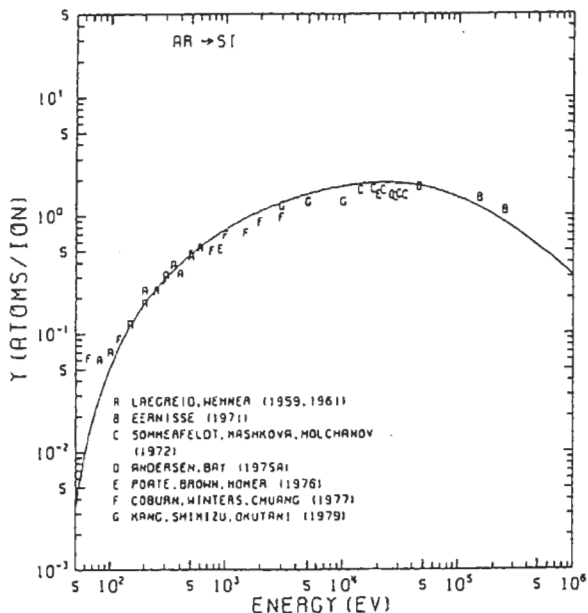


Fig. 2 Ion induced sputtering yields vs. energy (Ar+ ions, Si target). After Matsunami et al. ref. [4].

5. エッチングレートの走査速度依存性

エッチングレートは単位面積当たりに打ち込まれるイオン量、すなわちドーズ量に比例する。しかし、FIBを用いたスパッタリングでは、更に「走査速度もエッチングレートに関するパラメータ」として含めなければならない。実例をFig. 3に示した[5]。同図は、加速電圧、ビーム電流、ビーム径、ラスタ範囲、全照射時間を同一にしておき、走査速度を変化させたときのエッチングレートを実測したものである。走査速度を遅くすると、あるところからエッチングレートは増加を示し、最低速走査では最高速走査の場合に比べて数倍にも達する。以下にその理由を考察してみよう。

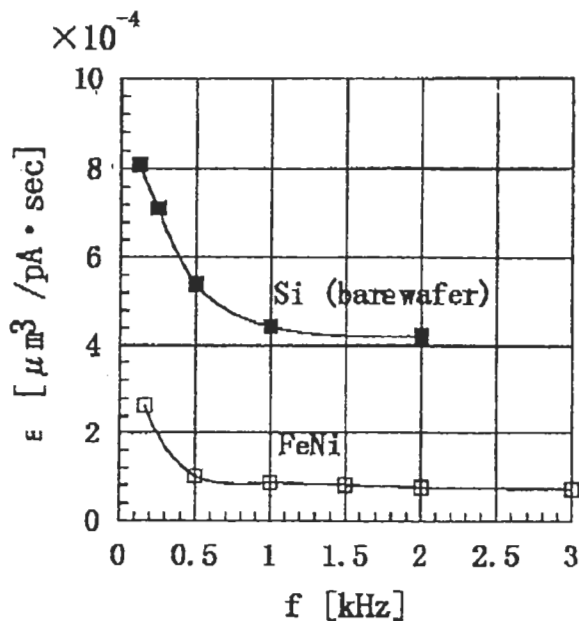


Fig. 3 Etching rate as a function of scanning frequency, f for Si and FeNi. The 1/f equals to the dwell time per pixel. After Sakaguchi et al. Ref. [5].

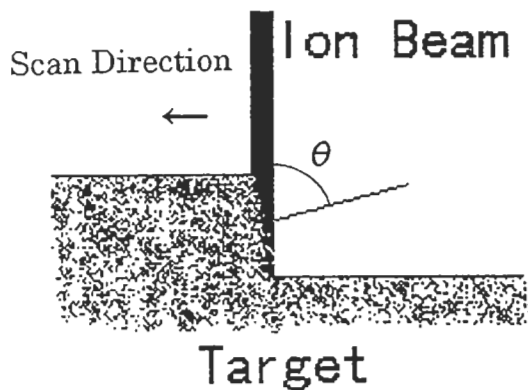


Fig. 4 Illustration to show that focused ion beam of high density runs while generating a height step. The higher the step height is, the bigger the etching rate is.

液体金属イオン源の輝度は、Gaで $10^6 \text{ A/cm}^2 \text{ sr}$ 、電流密度も 10 A/cm^2 と高い。

このような高密度のイオンビームでターゲットをゆっくり走査すると、Fig. 4 に示したように、走行するイオンビームの前後で段差が顕著となる [6, 7]。この段差が大きくなるようなスパッタ条件ほど、エッチングレートは大となる。段差部斜面上に立てた法線とビームとのなす角を θ とするとき、スパッタイールドと θ を Fig. 5 に示した。ドットは実測値で、点線で示した $1/\cos^2 \theta$ の曲線とほぼ一致する [7]。

走査速度が異なると、加工でできる穴の形状もことなる。走査速度が速い時、穴底は相対的に平坦であるが、遅い時はスパッタ粒子の再付着が大となり穴底は傾斜する。

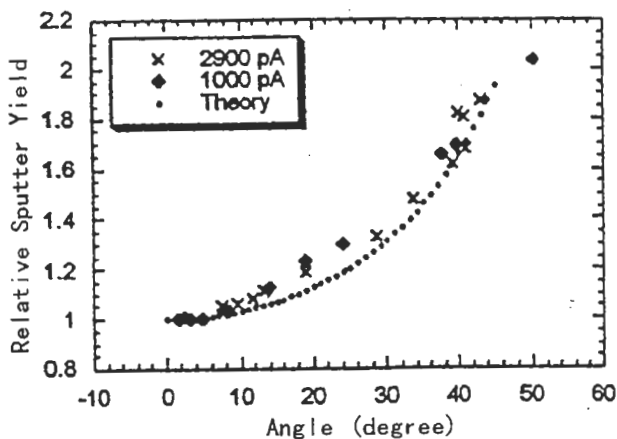


Fig. 5 Relative sputter yield vs. angle of incidence for Si, obtained from the model of ref. [6] is compared to the $1/\cos^2 \theta$ dependence calculated from the known macroscopic yield on angle incidence. After Santamore et al., ref. [7]

6. ガスアシストエッチング

イオンスパッタリング時に、イオンビーム照射部に反応性のガスを導入すると、エッチングレートを増大させることが可能である。これをガスア

シストエッチングという。いくつかのガス種とターゲット物質についてエッチングレートの増加率を Table 2 に示した [8]。エッチングレートの増加率は導入するガス種に大きく依存する。

ガスアシストエッチングの効用は、エッチングレート増大の他に、再付着を低減する効果がある。これは飛散する粒子が化学反応によりガス化し、真空チャンバー外へ放出されるからである。アスペクト比の大きい穴を開ける場合、再付着が障害となるが、このようなときガスアシストエッチングが有効である。

Gas Chemistry	Aluminum	Tungsten	Silicon	Silicon Dioxide
XeF ₂	None	7 ~ 10	7 ~ 12	7 ~ 10
Cl ₂	7 ~ 10	None	7 ~ 10	None
Br ₂	8 ~ 16	None	5 ~ 6	None

Table 2. Etching enhancement by gas assist. Enhancement is the ratio of hole depth per dose with gas to that without gas (ref.[8]).

7. 金属と絶縁物のデポジション

FIB は試料のエッチングだけでなく、金属や絶縁物の局所デポジションにも用いられる。

タングステンヘキサカルボニル W(CO)₆ は室温では固体であるが、これを 50 ~ 150℃ に加熱すると昇華する。昇華ガスをキャピラリーチューブを介してイオンビーム照射部へ噴射すると、その部分にタングステンを析出させることができる [9]。タングステンの他に、白金、モリブデンなどの金属のデポジションが可能である。

ガス種を選ぶことにより絶縁物のデポジションもできる。tetramethylorthosilicate (TEMOS) などを導入すると Ga イオン照射部に SiO₂ を析出させることができる [10, 11]。

8. まとめ

収束イオンビームによるスパッタリングについて概要を紹介した。

- 1) FIBで利用できる最小ビーム径は現在5~8 nm程度(1 pA程度の電流、SIM像の観察)である。加工は10 pAから10 nA程度の電流で行われるから、ビーム径は十数nmから数百nm程度である。
- 2) スパッタリングによるエッチングレートは物質によりかなり異なる。
- 3) FIBでは10~50 keV程度エネルギーを用いる。この範囲ではエッチングレートはエネルギーの増加に対して緩やかな単調増加である。
- 4) エッチングレートは単位面積当たりに打ち込まれるイオン量、すなわちドーズ量に比例する。しかし、FIBを用いたスパッタリングでは、更に「走査速度もエッチングレートに関するパラメータ」として含めなければならない。
- 5) ガスアシストはエッチングレート増大の他に、再付着を低減する効果がある。
- 6) FIBは試料のエッチングだけでなく、金属や絶縁物の局所デポジションにも用いられる。

文献

- [1] 足立、電子顕微鏡、30(3)、237 (1996)
- [2] 坂口、星野、坂田、石本、加無木、後藤、熊谷、関根、LSIテストシンポジウム/1996 会議録、平成 8. 11. 7-8、千里ライフサイエンスセンター、大阪) p.152
- [3] J. Orloff, L. W. Swanson and M. Utlaut, J. Vac. Sci. Technol. B 14(6), 3759 (1996)
- [4] N. Matsunami, Y. Yamamura, Y. Itikawa, N. Itoh, Y. Kazumata, S. Miyagawa, K. Morita, R. Shimizu and H. Tawara, Atomic Data and

Nuclear Data Tables, 31, 1-80 (1984)

- [5] 坂口、加無木、第 58 回応用物理学界学術講演会 (1997 年 10 月、秋田大学) 発表予定
- [6] T. Ishitani and T. Ohnishi, J. Vac. Sci. Technol. A9(6), 3084 (1991)
- [7] D. Santamore, K. Edinger, J. Orloff and J. Melngailis, The 41st International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication (May 27 to 30, 1997, Dana Point, CA, USA) p. 343
- [8] M. Abramo, L. Hahn and L. Moszkowicz, Proceeding of the 20th International Symposium for Testing and Failure Analysis (13-18 November 1994) p. 439
- [9] D. K. Stewart, J. A. Morgan and B. Ward, J. Vac. Sci. and Technol. B9(5), 2670 (1991)
- [10] R. J. Young and J. Puretz, J. Vac. Sci. and Technol. B13(6), 2576 (1995)
- [11] S. Lipp, L. Frey, C. Lehrer, B. Frank, E. Demm, S. Pauthner and H. Ryssel, J. Vac. Sci. and Technol. B14(6), 3920 (1996)

査読者との議論

査読者 富田充裕 (東芝環境研)
本間芳和 (NTT)

富田: FIB装置を用いた微細加工を行う上での基礎となるスパッタリング現象について幅広く紹介していただいております、FIB使用者にとって非常に有益な情報になるものと思われま。

富田: 'エッチングレート' と 'スパッタイールド' の言葉の使用法を混同されているようです。表面分析辞典 (日本表面科学会編; 共立出版) によりますと、スパッター率 (sputtering yield) : スパッター原子数/入射イオン数、スパッター速度 (sputtering rate) : 単位時間にスパッタされる厚さ (通常Å/min) となっており、Table 1, Fig. 2 ではエッチングレートではなくスパッタ率の言葉を用いるべきです。第5節の内容は、段差部斜面へのビーム入射角によるスパッタ率の変化がエッ

エッチングレートの変化を引き起こすというもので、言葉の使い方はそのままでもいいかと思えます。ただ、エッチングレートとスパッタ率の言葉を両用することになりますので、読者が混乱しないよう各言葉の定義を最初に記したほうが分かり易いと思えます。

著者：言葉の使用法を混同していた部分がありました。脚注に、エッチングレート、スパッタイールド、スパッタリングレートの定義を入れました。Table 1の説明は、etching rate S を sputtering rate S に修正しました。Fig. 2を説明する第4節は、エッチングレートの表現をスパッタイールドに修正しました。

富田：テーブル1のetching rate S は物質密度を考慮するとsputter yield Yと同定義ですので、sputtering rate S とするか、文献[3]に記しているようにsputtering sensitivity S としたほうが良いと思えます。

著者：sputtering rate Sとしました。

本間：将来におけるFIBの分解能の増加は、主にどのような要因によると期待できるのでしょうか？

著者：FIBの分解能は、大別して3つの因子：イオンソースの特性（光源の大きさ、角電流密度、エネルギー広がりなど）、光学系の特性（特にレンズの色収差など）、信号系の特性（検出効率など）に関係します。これらのどれも未だ改善の余地が残されています。

本間：エッチングレートが低走査速度で大きくなる原因が、段差部への斜入射効果によるものという事はわかりましたが、走査速度が遅いほどエッチングレートが大きくなる事が、簡単には理解できません。わかりやすくご説明いただけませんか？

著者：結局、表面付近でエネルギーが消費される割合が増えるのと飛翔粒子の逃げる空間が広がることだと考えられます。

本間：走査速度が遅いとき、スパッタ粒子の再付着のため穴底が傾斜するというイメージがつかえません。再付着がクレータの側壁側から起こるためでしょうか？

著者：その通りです。

本間：ガスアシストエッチングが再付着を低減する効果があることについて、ガス化の化学反応はスパッタされた粒子と気体との衝突時に起こるのでしょうか？その場合、反応を十分起こすにはどのくらいのガス圧が必要なのでしょうか？

著者：ガスが試料表面に吸着された状態のところへイオンが衝突した瞬間にガス化が起こります。ガスの流入密度は 10^{18} molecules/cm²/sec程度です。