

速報

FIB-TOF-SIMS による有機／無機材料の断面観察

飯田 真一*

アルバック・ファイ株式会社 分析室
〒253-8522 神奈川県茅ヶ崎市円蔵370 番地
* shinichi_iida@ulvac.com

(2016年5月9日受理; 2016年6月22日掲載決定)

元素や分子種に対して非常に高い検出感度を持つ TOF-SIMS では、近年、有機、無機材料問わず、深さ方向分析の応用例が増加してきている。TOF-SIMS における深さ方向分析は、スパッタデプスプロファイリングが一般的であるが、試料の構造や組成が複雑な場合は、得られる結果の解釈が極めて困難になる。これまでに我々は、複雑な組成や構造を持つ試料の正確な元素や分子の深さ方向分布を得るために、断面観察法を試みてきた。本稿では、FIB-TOF-SIMS による有機・無機ハイブリッド材料の断面観察を目的とした、Ar-GCIB による FIB 誘起ダメージ層除去の検証結果と、その検証結果を基にした、有機・無機多層膜の断面観察の結果について報告する。FIB と Ar-GCIB とを併用した本断面観察法は、金属層に埋もれた有機材料の断面観察が可能であることを示した。

Cross-section Observation of Inorganic/Organic Materials by Using FIB-TOF-SIMS

Shin-ichi Iida *

ULVAC-PHI Inc.

370 Enzo, Chigasaki, Kanagawa, 253-8522, Japan

* shinichi_iida@ulvac.com

(Received: May 9, 2016; Accepted: June 22, 2016)

The applications of depth profile analyses in TOF-SIMS are expanding, because TOF-SIMS has high sensitivity for elemental as well as molecular species. Sputter depth profiling is commonly used to obtain depth profiles. However, if the sample has a complex structure or composition, the result will be quite difficult to understand. The authors have tried the cross-section imaging methods to know the accurate elemental or molecular depth distributions for such kinds of samples. In this article, in order to acquire the cross-section images from organic/inorganic hybrid materials by using FIB-TOF-SIMS, the possibility of removal of FIB induced damage layer by Ar-GCIB was investigated. The author applied this result to the organic/inorganic multilayer sample analysis, and it was shown that the cross-section imaging of an organic material underneath the metal layer was possible.

1. はじめに

飛行時間型二次イオン質量分析法 (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry; TOF-SIMS) は、元素や分子種に対して非常に高い検出感度を持ち、か

つ、高空間分解能で面分布を可視化できる汎用の固体表面分析手法である。そのため、TOF-SIMS は、金属・半導体材料中の微量な不純物やドーパントの分析、微細化・高精細化が進む電子材料の解析、ポ

リマー・薬剤・生体試料などの詳細な化学構造解析など、有機、無機問わず、様々な分野で広く活用されている。特に TOF-SIMS では、その情報深さが 1-2 nm 以下と非常に浅く、表面下の情報を得るためには、表面層を除去する必要がある。TOF-SIMS は表面分析の中でも最表面に特化した分析手法であるが、材料や製品の特性を評価するためには、最表面の分析のみならず、深さ方向分析が不可欠で、近年、その重要性が増してきている。TOF-SIMS においては、一次イオンビームによる面分布測定と、スパッタイオンビームによるエッチングとを交互に繰り返すことにより深さ方向分析を行う、スパッタデプスプロファイリングが一般的である。TOF-SIMS では測定用のイオン銃に加え、別途、スパッタ用のイオン銃が必要となるものの、指定の微小領域の深さ方向分析が簡便に行える利点があり、イメージの 3 次元化も容易に行える [1]。スパッタイオン銃としては、無機材料には酸素や Cs イオンビームが、有機材料には C_{60} や Ar ガスクラスターイオンビーム (Ar-Gas Cluster Ion Beam; Ar-GCIB) が広く使われている。ただし、この方式は、面内が平坦で均質であるという前提が必要で、試料の形状が複雑、あるいは、材料が不均質な場合、3 次元的な解釈が複雑になる。この問題を解決するために我々は、FIB (Focused Ion Beam) や、Ar-GCIB を用いて作製した試料断面を直接、TOF-SIMS で観察するアプローチを提案し、報告してきた [2,3]。

FIB は古くからある試料加工法の一つで、プローブを数 nm にまで絞ることが可能なため、微細な構造を持つ半導体材料の故障解析に用いられてきた。その後、リフトアウト法など試料作製技術の発展により、現在では主に SEM (Scanning Electron Microscope) や TEM (Transmission Electron Microscope) などの試料前処理用として使われている [4]。ただし、FIB では高エネルギーのイオンビームを用いるため、加工時の損傷が顕著となる。例えば、単結晶試料では FIB 加工後、表面が非晶質化することが知られている [5]。そのため、通常、FIB 加工後は低速 Ar イオンなどを用いてダメージ層を除去する [6]。ただし、有機材料に対しては、単原子イオンを用いてのダメージ層除去は、分子構造を破壊するため行えない [7]。そこで我々は、分子構造にほとんど損傷を与えることなくエッチング可能な Ar-GCIB を利用して、FIB 加工によって表面に形成されたダメージ層の除去を試みた。本稿では、FIB-TOF-SIMS による有機・無機ハイブリッド材料

の断面観察を目的とした、Ar-GCIB による FIB 誘起ダメージ層除去の検証結果と、その検証結果を基に、有機・無機多層膜の断面観察を試みた結果について報告する。

2. TOF-SIMS における深さ方向分析

2.1 スパッタデプスプロファイリングと断面観察法

TOF-SIMS において深さ方向の濃度分布に関する情報を得る方法としては、スパッタデプスプロファイリングと断面観察法の二つに大別される。スパッタデプスプロファイリングではスパッタのステップを細かく取ることで、ナノメートルオーダーの層構造が識別できる利点があるが、冒頭で述べた通り、試料が面内で複雑な組成や構造を有する場合、解釈が困難となる。一方、断面観察法では組成や構造が複雑であっても直接断面を観察するため、解釈が容易である。しかしながら、TOF-SIMS のビームサイズ (約 100 nm) 以下の層構造は識別できない。このように、それぞれの長所が他方の短所を補完しており、試料の組成・構造と、分析の目的に合った方式を選ぶことが重要となる。

2.2 TOF-SIMS における断面観察

これまでに我々は、無機材料に対しては、FIB-TOF-SIMS による断面観察を提案してきた。実例として、銅／タングステン合金を挙げ、FIB 加工面の TOF-SIMS 観察結果を報告した。詳細は [2] を参照頂きたい。銅はタングステンよりスパッタリングイールドが高く [8]、スパッタデプスプロファイリング方式では、先に銅がスパッタアウトされ、組成比を保ったままの深さ方向分析が難しい。一方、FIB-TOF-SIMS による断面観察では、深さ方向の分布が視覚的に捉えられる。このように合金材料に対しては、FIB-TOF-SIMS が有用となる。また、複雑な層構造を持つ有機材料には、以前、本誌で報告した、Ar-GCIB 切削断面観察法が有効である (詳細は [7] の Fig. 8 参照)。ただし、Ar-GCIB は無機材料に対してスパッタリングイールドが極端に低いため、対象は有機材料に限定される。いずれの断面観察法も単独では有機・無機ハイブリッド材料には適用できない。そこで我々は、有機・無機ハイブリッド材料の断面観察を実現するため、FIB と Ar-GCIB とを併用した断面加工を試みた。

3. 実験

本実験に用いた TOF-SIMS 装置はアルバック・フ

アイ社製 PHI nanoTOF II で、本装置には測定用の Bi クラスタイオン銃に加え、スパッタ用として、FIB 銃と Ar ガスクラスタイオン銃が搭載されている。今回の測定条件を Table 1 にまとめた。各電流量は、試料ステージに設置したファラデーカップで計測した。Bi イオンビームに関してはパルス化する前の連続電流値を記載した。測定時及び、スパッタ時には 10 eV の中和電子を用い、今回議論の対象となる $C_{14}H_{11}O_2$ に関しては、測定中のイオン強度の変動が $\pm 2.0\%$ 以内であることを確認した。また、クレーターの深さ計測には、触針式深さ計測器 (Dektak 6M, Veeco) を用いた。今回の実験には、厚さ 250 μm の市販のポリカーボネートフィルム (Goodfellow Cambridge Ltd.) と、表面が約 100 nm の白金で覆われたポリカーボネートをを用いた。

4. 結果

4.1 Ga イオン照射によるポリマー表面へのダメージの検討

まず、Ga イオンビーム照射により、有機材料表面が受けるダメージを検証するため、ポリカーボネート (polycarbonate; PC) フィルムに 30 keV の Ga^+ イオンを試料法線方向から 40 度の角度で照射し、照射前後の表面のスペクトルを比較した。Ga イオ

Table 1. Typical measurement conditions of the present experiment.

	Analysis	Sputter	
		Ar-GCIB	FIB
Ion species	Bi_3^{++}	Ar_{2500}^+	Ga^+
Energy	60 keV	20 keV	30 keV
Ion current	7.8 nA	10 nA	7.3 nA
Raster size	100 μm	500 μm	150 μm
Incident angle	40°	40°	40°

ンのドーズ量は、電流量 7.3 nA、照射領域 150 $\mu m \times 150 \mu m$ 、照射時間 20 秒から、 4.0×10^{15} ions/cm² と算出した。Fig. 1(a), (b) に Ga イオンビーム照射前と照射後の PC 表面の TOF-SIMS スペクトルを示す。Ga イオン照射後、O⁻ 強度が激減し、C_n⁻ ピークが顕著になった。また、PC のメインピークである $C_{14}H_{11}O_2$ が完全に消失した。Ga イオン照射により、PC の分子構造は損傷を受け、さらに酸素の脱離と炭化が起こり、表面が変質したことが示唆される。ポリカーボネート表面に 4 keV の Ar イオンを 1.0×10^{16} ions/cm² のドーズ量で照射すると、炭素濃度が 88 % から 98 % に増加し、酸素濃度が 12 % から 2.0 % に減少することが XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) 測定により分かっており [9]、今回、Ga イオン照射についても同様の組成変化を起こしていると推測される。次にこの損傷を受けた PC 表

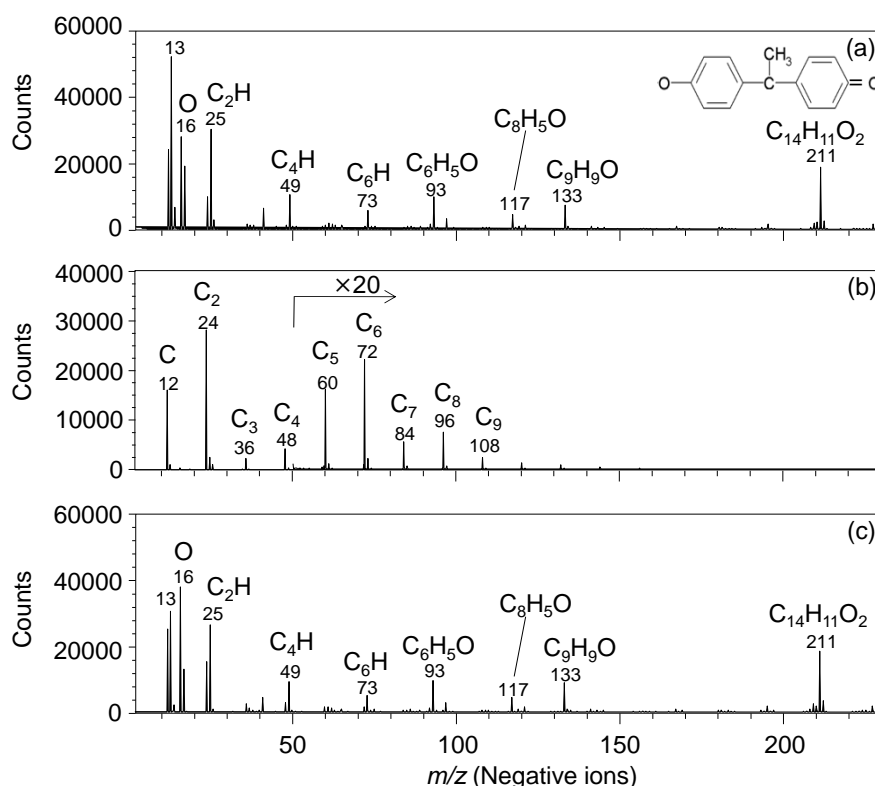


Fig. 1. TOF-SIMS spectra of polycarbonate surface. (a) as-received, (b) after Ga ion irradiation, and (c) after removal of the damaged layer by Ar-GCIB.

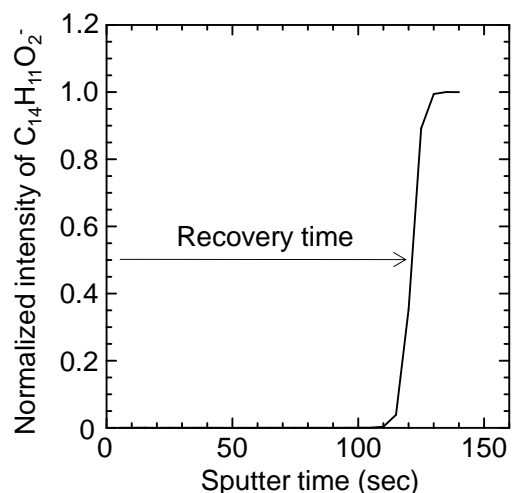


Fig. 2. Intensity profile of $C_{14}H_{11}O_2^-$ with respect to the sputter time of Ar-GCIB.

面に、20 keV、10 nA の Ar_{2500}^+ イオンを 40 度の入射角で $500 \mu m \times 500 \mu m$ の領域に照射した。Fig. 2 に、Ar-GCIB の照射時間に対する、 $C_{14}H_{11}O_2^-$ の二次イオン強度をプロットした結果を示す。縦軸は Ga イオン照射前の $C_{14}H_{11}O_2^-$ の強度で規格化した。135 秒のスパッタ (Ar_{2500}^+ のドーズ量は $3.4 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$) により、 $C_{14}H_{11}O_2^-$ は Ga イオン照射前の強度にまで回復した。また、 $C_{14}H_{11}O_2^-$ だけでなく、Fig. 1(a) で検出されたポリカーボネート由来のフラグメントピーク (例えば、 $C_{15}H_{15}O_2^-$ 、 $C_9H_9O^-$ 、 $C_6H_5O^-$ など) は全て回復していることを確認した。ここで、回復時間を元の二次イオン強度の半分に達するまでの時間と定義し、照射した Ga イオンのドーズ量と、回復時間との相関を調べた。Fig. 3 に示すように回復に要する時間は Ga イオンのドーズ量と共に増加するが、やがて、約 $1 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2$ のドーズ量で頭打ちになることが分かった。

次に、Ga イオン照射によって生じたダメージ層の厚さを見積もるために、ダメージ層除去前後のクレータ深さを計測した。まず、PC 表面に $150 \mu m$ 角のラスタサイズで 500 秒間 ($= 1 \times 10^{17} \text{ ions/cm}^2$) の Ga イオン照射を行った。このときのクレータ深さは 120 nm であった (Fig. 4 点線)。続いて、Ga イオンビームで作製した $150 \mu m$ 角のクレータを中心に、 $500 \mu m$ 角の領域を Ar-GCIB でスパッタした。その際、 $C_{14}H_{11}O_2^-$ の二次イオン強度をモニターしながら、強度が元に戻ったところでスパッタを止め、再度、クレータ深さを計測した。ダメージ層除去後の Ga イオン照射部のクレータ深さは 170 nm (Fig. 4 実線) であったことから、ダメージ

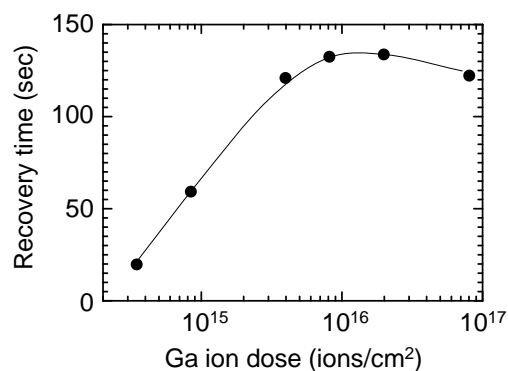


Fig. 3. Recovery time of $C_{14}H_{11}O_2^-$ intensity with respect to the Ga ion dose.

層の厚さは 50 nm (=170 - 120 nm) と見積もられた。その一方、Ga イオン照射を行っていない周辺部のクレータ深さは 510 nm と、同じ材料でも Ga イオン照射により変質した箇所では、変質していない箇所と比べ、10 倍スパッタレートが低くなることが分かった。これは、Ga イオン照射による組成変化により、スパッタレートが大きく低下したものと推測される。

次に TRIM コード[10]を用いて、30 keV の Ga^+ イオンを打ち込んだときの固体内でのイオン軌道のシミュレーションを行った。今回、PC への Ga イオンビーム照射により、表面の炭化が示唆される結果が得られたことから、ターゲットは炭素であると仮定した。その結果、Ga イオンは試料中 40 nm の深さにまで到達することが分かり (Fig. 5)、計測したダメージ層の厚さとほぼ同等の結果が得られた。実際の FIB による断面加工では、加工面に対し、ビーム

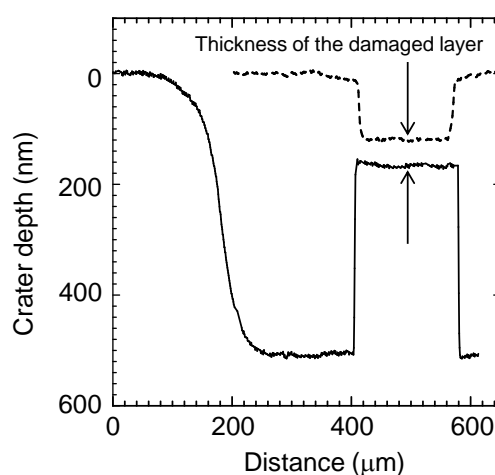


Fig. 4. Crater profiles after Ga ion beam irradiation (dashed line), and removal of the damaged layer (solid line). Thickness of the damaged layer was estimated to be 50 nm.

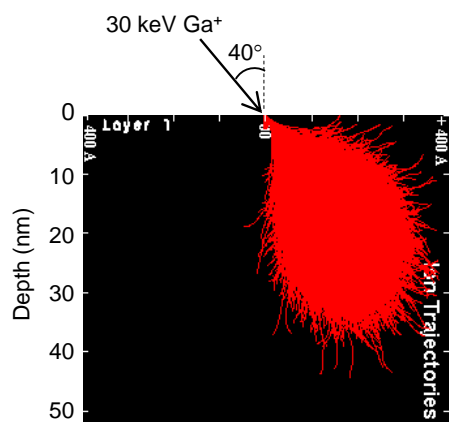


Fig. 5. The simulation result of 30 keV Ga^+ ion trajectory in a bulk graphite.

をすれすれ角で入射することになるため、加工面のダメージ層の厚さは上述の結果より薄くなると考えられる。

以上、有機材料表面への Ga イオン照射により生じるダメージ層について検討を行った。その結果、ダメージ層は Ar-GCIB により除去可能であること、また、ダメージ層除去に要する時間は、Ga イオンのドーズ量が約 1×10^{16} ions/cm² までは増加するが、その後は頭打ちになることが分かった。これは、長時間の FIB 加工を行った後でもダメージ層の除去が可能であることを示唆する結果である。さらに、ダメージが飽和した状態でのダメージ層の厚さは 50 nm で、Ga イオンの侵入深さとほぼ一致することが分かった。

4.2 有機・無機複合材料の断面加工

次に、白金で覆われた PC 試料に対して 2 時間の FIB 加工を行い、前述の方法で加工面に生じたダメージ層の除去を試みた。本実験では、Fig. 6 に示すように、FIB は加工面に対して、すれすれ角での入射となる。FIB 加工後の断面の SIM (Scanning Ion Microscope) 像及び、TOF-SIMS イメージを Fig. 7 に、また、TOF-SIMS スペクトルを Fig. 8(a) に示す。スペクトルから炭化物のピーク (C_n^-) と、長時間の FIB 加工によって堆積した Ga が検出されていることが分かる。続いて、Ar-GCIB によるダメージ層除去を行った。ダメージ層除去には 20 keV、10 nA の Ar_{2500}^+ イオンを用いた。4.1 と同様、 $\text{C}_{14}\text{H}_{11}\text{O}_2^-$ のイオン強度をモニターしながら、強度変化がなくなったところでスパッタを止めた。240 秒間の Ar-GCIB スパッタにより、試料に堆積していた Ga が除去さ

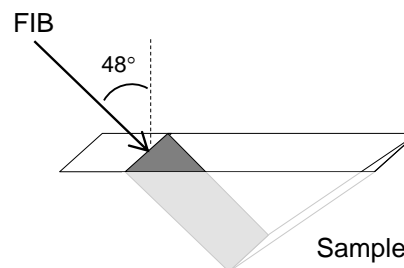


Fig. 6. Illustration of the FIB fabrication.

れ、 $\text{C}_{14}\text{H}_{11}\text{O}_2^-$ のピークが復元した (Fig. 8(b))。長時間の FIB 加工後でも PC 由来の分子イオンピークが復元可能であることが分かった。Fig. 9 に FIB 加工後及び、ダメージ層除去後の $\text{C}_{14}\text{H}_{11}\text{O}_2^-$ イメージを示す。ダメージ層除去後、PC の分布が明瞭に観察された。従来は、有機材料の表面が無機物で覆われている場合、TOF-SIMS でその分子情報を得ることは非常に困難であったが、FIB と Ar-GCIB の併用により、分子イオンの断面観察が可能となった。

5. まとめ

本稿では、有機・無機ハイブリッド材料の断面観察を目的として、Ar-GCIB を利用した FIB 加工面のダメージ層除去について検証した結果を報告した。まずは、Ga イオンビーム照射がポリカーボネート表面へ及ぼすダメージについて検証した。その結果、以下が明らかとなった。

- (i) Ga イオンビーム照射により、分子構造が損傷を受け、表面が変質する。
- (ii) 表面に形成されたダメージ層は Ar-GCIB により除去可能である。
- (iii) ダメージ層除去に要する時間は、Ga イオンのドーズ量が約 1×10^{16} ions/cm² まではドーズ量と共に増加するが、その後、頭打ちとなる。

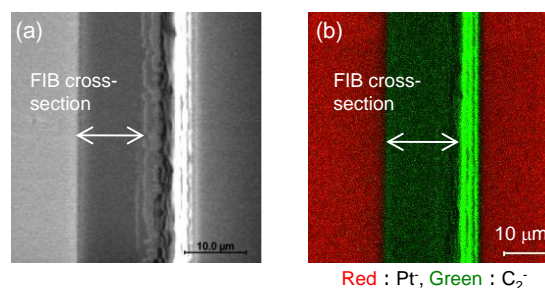


Fig. 7. (a) SIM and (b) TOF-SIMS images from Pt/polycarbonate after FIB fabrication.

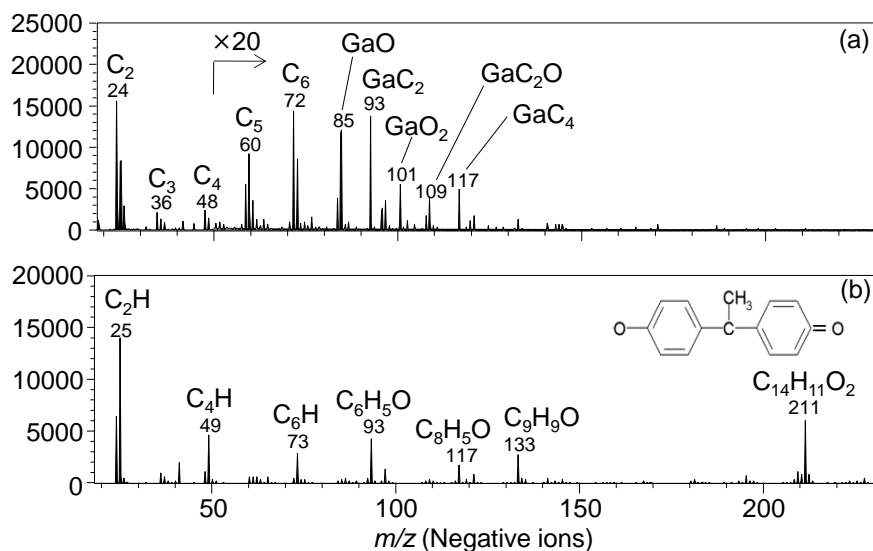


Fig. 8. TOF-SIMS spectra from polycarbonate surface. (a) after FIB fabrication, (b) after removal of the damaged layer by Ar GCIB.

(iv) 1×10^{17} ions/cm² の Ga イオン照射後のダメージ層の厚さは 50 nm と見積もられた。これはほぼ、Ga イオンの侵入深さに相当する。

(v) Ga イオンビーム照射によって変質した PC のスパッタレートは、変質していない PC のそれよりも 10 倍低い。

以上の検討結果を基に、FIB と Ar-GCIB とを併用した断面加工を有機・無機多層膜に応用したところ、金属層に埋もれた PC の断面観察が可能となった。この方式は直接断面を観察するため、深さ方向の濃度分布に関する情報は維持され、有機・無機多層膜だけでなく、無機物のファイバーやフィラーを含有した複雑な内部構造を持つ有機材料に対しても有効である。ただし、Ar-GCIB は無機材料と有機材料とのスパッタリングイールド差が大きく、表面荒れの原因となるため、Ar-GCIB はダメージ層除去にのみ用いるべきである。今後はさらに複雑な構造を持つ有機・無機ハイブリッド材料についても試みる予定

である。

6. 参考文献

- [1] 飯田真一, *顕微鏡*, **48**, 159 (2013).
- [2] G. L. Fisher, in *Cluster Secondary Ion Mass Spectrometry*, ed. by C. M. Mahoney, Chap. 6, pp. 219-225, John Wiley, Hoboken (2013).
- [3] S. Iida, T. Miyayama, G.L. Fisher, J.S. Hammond, S.R. Bryan, N. Sanada, *Surf. Interface Anal.*, **46**, S1, 83 (2014).
- [4] F. A. Stevie, C. B. Vartuli, L. A. Giannuzzi, T. L. Shofner, S. R. Brown, B. Rossie, F. Hillion, R. H. Mills, M. Antonell, R. B. Irwin, B. M. Purcell, *Surf. Interface Anal.*, **31**, 345 (2001).
- [5] L. A. Giannuzzi, F. A. Stevie, *Micron*, **30**, 197 (1999).
- [6] A. Barna, B. Pécz, M. Menyhard, *Ultramicroscopy*, **70**, 161 (1998).
- [7] 飯田真一, *J. Surf. Anal.*, **21**, 112 (2015).
- [8] 志水隆一, 姜熙載, *イオン励起のスペクトロスコピーとその応用*, 合志陽一, 前田浩五郎, 佐藤公隆編, 第 1 章, pp. 17~43. 学会出版センター (1987) .
- [9] S. Iida, T. Miyayama, *Abstract of 17th Scientific International Symposium on SIMS and Related Techniques Based on Ion-Solid Interactions*, p.39 (2015).
- [10] SRIM-2013, <http://www.srim.org/>, [Last accessed June 7th, 2016]

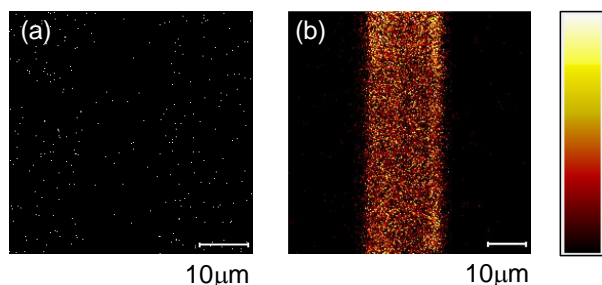


Fig. 9. $C_{14}H_{11}O_2^-$ images from Pt/polycarbonate cross-section surface. (a) after FIB fabrication, and (b) after removal of the damaged layer by Ar-GCIB.

査読コメント, 質疑応答

査読者 1. 阿部芳巳 (MCHC R&D シナジーセンター)

本記事は、実用表面分析の現場でニーズの高い有機・無機複合材料の分析に対して、FIB 加工後に Ar-GCIB で FIB 加工ダメージを除去してから ToF-SIMS 分析を行うというアプローチを提案し、白金被覆ポリカーボネートの系でその有効性を検証しており、JSA 読者に有用性の高い記事と考えます。

[査読者 1-1]

3. 実験でスタティックリミットを 1×10^{13} ions/cm² と記載していますが、スタティックリミットは材料依存性が高いので、試料に用いたポリカーボネートに対する文献値を示した方が正確と思います。

[著者]

御多忙の中、有益な御助言、コメントに大変感謝しております。

御指摘の通り、スタティックリミットは材料、対象とする分子、一次イオン種とその条件によって変わるため、以下のように書き改めました。

「今回議論の対象となる C₁₄H₁₁O₂ に関しては、測定中のイオン強度の変動が ±2.0 % 以内であることを確認した。」

[査読者 1-2]

Fig. 6(a), (b) でトレんチの右側面のコントラストが高い理由は何でしょうか？

[著者]

Fig. 6 に示すように、トレんチの右斜面と左斜面とで一次イオンの入射角が異なります。コントラストは、入射角の違いによる二次イオン化率の違いを反映したものと考えております。

査読者 2. 非公開

近年分析の需要がますます高まっている有機無機混合試料の深さ方向分析に関する重要な知見が含まれる論文であり、掲載に値すると思います。

[査読者 2-1]

1 ページ目、「1.はじめに」5 行目:「情報深さが 1

nm 以下」となっていますが、最近では (昔は 1 nm 以下の記述が多かったが) バイオ材料や有機材料の分析では 1-2nm 以下とされることが多い (Surf. Interface Anal. 2006; 38: 1386-1392 など) ため、2 nm, 1-2 nm 以下などに修正した方が誤解がないと思います。

[著者]

御多忙の中、有益な御助言、コメントに大変感謝しております。

御助言ありがとうございます。1-2 nm 以下と修正致しました。

[査読者 2-2]

Fig. 2 で Ar クラスタによる除去で二次イオン強度が回復した後、Ar クラスタを当て続けるとどうなるか知見があれば加筆してください。また、Ar クラスタ照射によるダメージ除去後に強度が回復しない二次イオンはありませんか？

[著者]

まず、今回の実験で、ダメージ除去後、分単位で Ar クラスタを当て続けた実験は行っていないため、知見はありません。また、ダメージ除去後に強度が回復しない二次イオンの有無に関してですが、少なくとも Fig. 1(a) で検出されたポリカーボネート由来の他のピーク (m/z 347, m/z 465, m/z 481 等) については全て回復していることを確認しております。本文にもその旨、追記致しました。

[査読者 2-3]

Ga イオン照射により変質した部分のスputter レートが、未照射 (変質していない) 部分に比べて 10 倍低くなる理由はなんでしょうか？ また、Ga イオン照射量と sputter レートの変化の間にはどのような関係がありますか？ (照射量増加に応じて低下していきますか？)

[著者]

Fig. 1(b) は、Ga イオン照射により、酸素が脱離して、表面が炭化していることを示しています。この変質したポリカーボネートは、元のポリカーボネートとは組成も特性も異なると推測しており、sputter レートが大きく低下したと考えております。本文にその旨を追記しました。

なお、Ga イオン照射量と sputter レートの関係に

については今回の実験からは言及することはできません。

[査読者 2-4]

「ダメージ層の厚さは、Ga イオンのドーズ量が約 1×10^{16} ions/cm² までは増加するが、その後は頭打ちになる」のは、試料の変質のためその後はスパッタできなくなるせいですか？ つまりダメージの飽和はスパッタの飽和を意味するのですか？

[著者]

Gaイオン照射量とダメージ層の厚さとの関係は今回の実験から言及することはできず、あくまでもダメージ層除去に要する時間は、Gaイオンドーズ量と共に増加し、その後、頭打ちになるとしか言えません。表現が適切ではなかったため、訂正致しました。なお、今回の実験では2時間のFIB加工を行い、その結果、Fig. 7に示すように、10 μmに近い深さまで削ることができておりますので、少なくともこの範囲ではスパッタが進行しなくなることはないと考えております。

[査読者 2-5]

今回の試料は、有機物の表面だけに金属があるため、この方法でも問題ないと思いますが、有機・無機ハイブリッド材料の場合、試料の内部でも金属部分と有機物部分が共存していると思われます。その場合、FIB および Ar クラスターによるスパッタレートの差によって深さ方向分析が難しくなると思われます。この手法をそのまま応用できないように思いますが、その点はどのようにお考えでしょうか？論文題目*をこのままにするのであれば、この点についても触れておくべきだと思います。

* 編集部注：当初タイトル「FIB-TOF-SIMS による有機・無機ハイブリッド材料の断面観察」

[著者]

御指摘ありがとうございます。まとめに以下を加筆致しました。

「この方式は直接断面を観察するため、深さ方向の濃度分布に関する情報は維持され、有機・無機多層膜だけでなく、無機物のファイバーやフィラーを含有した複雑な内部構造を持つ有機材料に対しても有効である。ただし、Ar-GCIBは無機材料と有機材料とのスパッタリングイールド差が大きく、表面荒れの原因となるため、Ar-GCIBはダメージ層除去にのみ用いるべきである。」