修士論文

題目

イオンビーム照射による 4H-SiC の表面粗さの変化

Modification of surface roughness of 4H-SiC by ion beam irradiation

指導教員

百田佐多生

報告者

森本桂矢

令和5年 3月15日

高知工科大学大学院

工学研究科基礎工学専攻

環境数理コース

目次

- 1 序論
- 1.1 背景
- 1.2 イオンビームによる微細加工に関する先行研究
- 1.3 本研究の目的
- 2 原理
- 2.1 イオンビーム照射による結晶材料の表面形状の変化
- 2.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面形状の測定
- 3 装置・器具
- 3.1 多価重イオンビーム照射装置
- 3.1.1 生成系
- 3.1.2 分析系
- 3.1.3 照射系
- 3.2 原子間力顕微鏡(AFM)
- 3.2.1 表面粗さ(RMS)の算出
- 3.3 SRIM シミュレーション
- 4 方法・手順
- 4.1 照射サンプルの準備・取り付け
- 4.2 照射条件
- 4.3 AFM 測定
- 5 結果
- 5.1 照射量による表面粗さの変化
- 5.2 価数による表面粗さの変化
- 5.3 照射角度による表面粗さの変化
- 5.4 エネルギーによる表面粗さの変化
- 6 考察
- 6.1 照射イオンが表面粗さに及ぼす影響
- 6.2 照射角度が表面粗さに及ぼす影響
- 7 結論
- 8 展望
- 謝辞
- 参考文献

付録

1 序論

1.1 背景

炭化ケイ素(SiC)は現在半導体材料として産業界で広く用いられているシリコン(Si)の約 3 倍のバンドギャップ、約 10 倍の絶縁破壊電界を持つなどの点から Si よりも高耐熱、高耐 圧、小型化、高速化などで性能の優れたデバイスができる^{[1][2]}。また、SiC は熱伝導率が高 いため原子炉や核融合炉の構造材料としても研究されている^{[3][4]}。しかし、SiC は化学的安 定性が高く新モース硬度が 13 と非常に高いため、その微細加工が困難である。そのため材 料としての硬度や化学的性質に大きく左右されないイオンビーム照射による加工の研究が なされている^[5]。

1.2 イオンビームによる微細加工に関する先行研究

一般にイオンビームが照射された結晶材料の表面には隆起構造が生成され、先行研究 ^{[6][7][8][9]}によって SiC 基板では隆起高さが照射量とともに線形増加し、その後飽和を迎える ことが分かっている(Fig.1^[9])。また、InSb 基板へのイオンビーム照射により表面粗さを示 す数値である RMS が照射量とともに減少し、平坦化が起こることも分かっている (Fig.2^[10])。しかし、表面粗研さに関する研究は照射量が 1×10¹⁶/cm²~1×10¹⁹/cm²の領域 で行われていて、隆起高さが線形的に変化する低照射量領域で測定した研究はなされてい ない。その領域での表面粗さの挙動を知ることができれば、隆起現象を利用して効率よく 3 次元微細構造を形成するための照射条件を決定できる可能性が高まる。



Fig.1 Ar ビームが照射された SiC における隆起高さの照射量依存性^[9]



Fig.2 N ビームが照射された InSb における表面粗さの照射量依存性^[10]

1.3 本研究の目的

本研究では SiC 基板表面の隆起構造を 3 次元の立体構造として利用するために、SiC の 隆起高さが照射量とともに線形的に変化する照射量領域で、表面粗さの挙動を明らかにす ることを目的とした。このために以下の 2 つの実験を行った。

- ① 価数やイオン種などの照射条件が表面粗さに及ぼす影響の測定
- ② 隆起構造を立体構造として用いる場合に許容できる表面粗さを未照射材料の表面粗 さ以下と仮定し、照射量がどの程度で許容できる粗さになるかの測定
- 2 原理

この章では、本研究の実施にあたって重要な結晶材料の表面形状の変化と原子間力顕微 鏡(AFM)での表面形状の測定の原理について説明する。

2.1 イオンビーム照射による結晶材料の表面形状の変化

結晶材料にイオンビームを照射すると、その表面に隆起現象が発生する。結晶材料表面から入射イオンが材料中で停止する位置までの深さを飛程(*Rp*)と呼び、入射イオンのエネルギーに依存して変化する。また、Fig.3 のように表面から *Rp*の深さまで、結晶中のイオンの軌道に沿って空孔や格子間原子などの点欠陥が生成される。生成された欠陥は結晶構造を変化させ SiC 結晶の場合、原子間の結合距離が広がる。これが体積膨張の原因であると考えられる。照射結晶中での *Rp*や欠陥生成は、3章で説明する SRIM で予測できる。



2.2 原子間力顕微鏡(AFM)による表面形状の測定

AFM に内蔵されたカンチレバーの探針が試料上空を移動する際にたわみが生じる。この たわみによって Fig.4 に示すように探針に照射されているレーザー光が分割フォトダイオ ードに反射する領域が変化する^[11]。その反射した領域によって表面の凹凸を色の濃淡を用 い画像化する。画像化されたデータを解析し、表面粗さなどを求めることができる。



Fig.4 AFM による表面形状測定の原理

3 装置・器具

この章では、本研究に使用した多価重イオンビーム照射装置、原子間力顕微鏡(AFM)、 SRIM シミュレーションについて説明する。

3.1 多価重イオンビーム照射装置

SiC 基板にイオンビームを照射するために、Fig.5 に示す多価重イオンビーム照射装置^[12] を使用した。この装置は以下の 3 つの部分から構成され、イオンの生成から試料への照射 までを行うことができる。



ECRイオン源

Fig.5 高知工科大学の多価重イオンビーム照射装置

3.1.1 生成系

Ar ガスとマイクロ波をプラズマ生成室に導入し、マイクロ波によってガスを電離し Ar イ オンを生成した。プラズマ生成室には大気由来のガスも微量に存在し、Ar 同様にイオン化 される。生成したイオンは引出電圧(V1)を用いてプラズマ生成室から引き出され、加速電 圧(V2)によってさらに加速された。V1 と V2 は、それぞれ高圧電源 PS/EH30P03,0-10(GLASSMAN HIGH VOLTAGE, INC) と HV α -30K2N/100(GLASSMAN HIGH VOLTAGE, INC)によって電圧がかけられる。加速されたイオンの持つエネルギーE は式 (1)で表される。

$$E = qV \qquad (1)$$

E: イオンの運動エネルギー[keV] q:イオンの価数 V:加速電圧[kV]

3.1.2 分析系

生成系で ECR イオン源から引き出されたイオンビームには大気由来の成分や目的の価数 以外の Ar イオンが混入している。本研究で照射したいイオンを選択するために、扇形の分 析磁石とスリットを利用した。扇形分析磁石では 1 対の電磁石をビームの上下方向に磁場 を発生させ、磁場中のイオンにはたらくローレンツ力によってビームを偏向させる。

磁場中でのビームの軌道半径は、イオンの質量 Aと電荷 qの比^Aによって決定する。分析 磁石の磁場を変化させながらスリットの下流でビーム電流を測定すると、Fig.6 のようなマ ススペクトルを測定することができ、目的のイオンを選択することができる。この時のイオ ン源の運転条件を Table.1 に示す。



Fig.6 Ar ガスを導入して測定したマススペクトル

ガス圧(×10 ⁻³ Pa)	RF アンプ(W)	V1(V)	V2(V)
+3.0	20	20	10

Table.1 Fig.6 測定時のイオン源の運転条件

3.1.3 照射系

照射系では、Fig.7 に示すように分析系で選択したビームがアブゾーバ、コリメータ、サ プレッサーを通過した後に、サンプルホルダーに取り付けた SiC サンプルに照射された。

アブゾーバには正の電位を印加し、アブゾーバより上流で発生した電子を吸収させた。直径1mmの穴を持つコリメータを用いて、SiCサンプルに照射するイオンビーム径を決定した。イオンビームが照射された SiC サンプルから 2 次電子が放出される。定圧電源によっ

て負の電位をサプレッサーに印加し、放出された 2 次電子を SiC サンプルに戻し正確なビ ーム電流を電流計で測定した。



Fig.7 イオンビーム照射部

3.2 原子間力顕微鏡(AFM)

AFM(オックスフォード・インストゥルメント株式会社製)を用いて、SiC 結晶表面の粗さ を測定した。照射したサンプルをテープ付きのマグネットに貼り付けステージの上に乗せ た後、カンチレバーホルダーにカンチレバー(オックスフォード・インストゥルメント株式 会社製,AC160TSA-R3)を取り付け AFM 内にセットした。測定は Template モードを使用 し、以下のような条件で測定を行った。

Point & Lines	256
Scan Size	$10 imes 10 \mu$ m
Scan Rate	2.44Hz
Pixel Size	78.4mm

Table.1 AFM 測定条件

3.2.1 表面粗さ(RMS)の算出

物体の表面の凹凸の度合いが粗さである。この粗さは、例えば二乗平均平方根粗さ(RMS) で端的に数値化できる。RMS は AFM の測定結果から求まり、以下の式(2)で定義される。



ここで、Fig.8 を例として RMS を定義する。Fig.8 で / は横軸を表し、x は縦軸の数値 1 つ 1 つを表している。すべての数値を二乗した値を 10μ m で割り平方根を取ることで RMS を求めることができる。



Fig.8 AFM を用いて測定した表面形状と RMS

3.3 SRIM シミュレーション

シュミレーションソフト SRIM を使用して予測した欠陥の深さ分布、飛程(*R*p)などに基づいて、照射条件を設定した。Table.2 に SRIM による計算の条件を記載する。

Ion	Ar
Target	SiC
Total number of ion	20000
Angle(°)	0~50

Table.2 SRIM の計算条件

4 方法・手順

4.1 照射サンプルの準備・取り付け

結晶材料として 4H-SiC(CREE 社製 厚さ 495.78µm, 結晶方向<0001>)を用いた。まず、SiC ウェハ表面の切断したい箇所をダイヤモンドペン(オグラ宝石精機工業株式会社製)

を用いて傷をつけた後に割り、1×1 cmサイズにカットした。そして以下の手順で試料表面 に付着した酸化膜を除去した。

1. 濃度 18%の BHF 溶液に 90 秒浸してエッチング

純水で5分洗浄

3. 大気中に取り出し、N2ガスを吹き付け表面の水滴を除去

エッチング中や洗浄中のサンプルはそれぞれの容器の端に斜めに立てかけ、サンプルの 両面ともエッチングと洗浄がされるようにした。純水で洗浄する場合は、洗浄用容器内に BHF 溶液が貯まるのを防ぐためすべてのサンプルの洗浄が終了するまで純水を流し続けて おく。

次に酸化膜を除去した SiC 試料表面に、Fig.9 のように 4 つのスリット孔のあるステンシ ルマスク(応研商事株式会社製, #09-10724 スリット, SUS, 厚さ 25~30 µ m)を銅性の導電 テープで貼り付けた。マスク上からイオンビームを照射することでスリット孔の部分にの みビームが照射され、照射部と未照射部に分別することができる。





直径 3mm

Fig.9 ステンシルマスク

4.2 照射条件

様々な照射条件下での RMS を測定するために、イオン種、価数、エネルギー、照射量を 変化させて照射を行った。Table.3 に照射条件を示す。ただし、Ar¹⁺と Ar⁷⁺に関しては先行 研究^[9]で照射していた SiC サンプルを使用した為、本研究では照射を行っていない。

イオン	エネルギー(keV)	照射量(×10 ¹⁵ /cm ²)
Ar ¹⁺	90	
Ar ³⁺	90	1 10
Ar ⁷⁺	700	1~10
N ¹⁺	30	

Table.3 イオンビームの照射条件;価数、イオン、照射量

また、照射角度(θ)による RMS の影響を調べるため飛程を一定($R_p=52.29$ nm)にし、Table.4 の条件で照射を行った。また、照射量は $\theta=0$ °で照射した際の RMS からの変化が予想され る照射量で照射した。照射角度は Fig.10 のようにスペーサーを用いて調整した。Table.5 に 示すスペーサーを用い、スペーサー間の距離(1)がサンプルホルダーの照射部の幅 10mm を 超えるように厚さ(d)を調整した。

イオン	$ heta\left(^{\circ} ight. ight)$	エネルギー(keV)	照射量(×10 ¹⁵ /cm ²)
	0	90	
Ar ³⁺	5	90.12	2~5
	20	90.36	

Table.4 照射角度、エネルギー条件

材質	厚さ(mm)
	0.26
アルミーウノ	0.48
) // ミニリム	0.94
	1.90

Table.5 マイクロメーターで測定したスペーサーの厚さ



4.3 AFM 測定

照射部は、Fig.11 に示すように 4 つのスリット孔に対応する照射痕の両端計 8 箇所で表 面形状を測定し、測定した画像を解析して RMS を決定した。Ar¹⁺では、ステンシルマスク を貼り付けて照射したサンプルが 1,3,5×10¹⁵/cm²についてはなかったため、マスクを付け ずに一様に照射したサンプルで 8 箇所測定した。Table.6 に示すように 8 箇所で得た RMS の平均値と標準偏差を求め、その照射条件での RMS と誤差とした。ただし、8 つの RMS 値 の中で平均値±標準偏差×2 の範囲を超えた場合はその値を外れ値と見なして除外し再度 残りのデータで平均値と標準偏差を導出した。



Fig.11 光学顕微鏡で観測した照射後の SiC サンプル ※4 本の照射痕が観測され、赤い四角は AFM の測定箇所を示している。

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.303	0.29
2	0.239	標準偏差(nm)
3	0.279	0.08
4	0.259	
5	0.230	
6	0.236	
7	0.446	
8	0.407	

Table.6 Ar³⁺ビーム(10×10¹⁵/cm²)を照射したサンプルの RMS 値

また、照射前の SiC サンプルの表面粗さを知るために、未照射部で AFM 測定を行い、 RMS を求めた。本研究では照射した Ar³⁺と N¹⁺を照射した SiC サンプルに関してはすべて 同一ウェハからカットしている。そこで、このウェハからカットし、エッチング済みの SiC サンプルを、未照射の状態で AFM 測定を行い RMS を導出した。測定箇所は Fig.12(a)のよ うにサンプル 1 枚当たり 25 箇所×2 枚の計 50 箇所で測定した。一方で先行研究で照射し ていた Ar¹⁺と Ar⁷⁺のサンプルについては同じウェハで未照射のサンプルが無かったため Fig.12(b)のように照射済みサンプルの照射部外の 4 箇所で RMS を測定し、平均と誤差を 求めたうえで、その他の照射量の RMS からさらに平均と誤差を求めた。



Fig.12 未照射部の AFM 測定の箇所

5 結果

5.1 照射量による表面粗さの変化

N¹⁺ビームを照射した場合の照射量と RMS の関係を Fig.13 に示す。図中の赤線は未照射 部の RMS の平均である。表面の隆起高さが線形的に変化する照射量領域では、照射量とと もに RMS が一旦増加した後、減少し、照射前より平坦化することが分かった。





5.2 価数による表面粗さの変化

Ar ビームを照射した場合の価数と RMS の関係を Fig.14 に示す。RMS は Ar³⁺では N¹⁺ビ ームと同様に一度増加した後に減少したが、Ar¹⁺では変化量が Ar³⁺と比較して非常に小さ く同じ挙動をしているか判別できなかった。



Fig.14 RMS の照射量依存性 (a) Ar¹⁺と(b) Ar³⁺ビームを照射した場合

5.3 照射角度による表面粗さの変化

Ar ビームを照射した場合の照射角度と RMS の関係を Fig.15 に示す。Ar イオンを照射した場合、RMS が最大となる照射量は、照射角度が 0,5,20° でそれぞれ 1.05,1.06,1.08[nm] となった。RMS の最大値はほぼ一定で、照射角度と RMS が最大となる照射量の間に、法則性は見られなかった。



Fig.15 RMSの照射量依存性 照射角度を変えて Ar ビームを照射した場合

5.4 エネルギーによる表面粗さの変化

Ar ビームを照射した場合のエネルギーと RMS の関係を Fig.16 に示す。照射量 1× 10¹⁵/cm²で、エネルギー(90,700keV)によって RMS の値に大きく差が出た。渡辺氏の卒業 論文では両者のエネルギーで隆起高さ照射量依存性(Fig.17)が観測されているおり、エネル ギーによる隆起高さの違いが分かっている。エネルギーによって RMS が大きく変化するの は、このエネルギーによる表面の隆起高さの違いが影響していると考えられる。



Fig.16 RMSの照射量依存性 エネルギーを変えて Ar ビームを照射した場合(a) 700 keV, (b) 100 keV)



Fig.17 隆起高さの照射量依存性 エネルギーを変えて Ar ビームを照射した場合^[9]

6 考察

6.1 照射イオンが表面粗さに及ぼす影響

2章で説明したように、結晶材料にイオンが注入されることで SiC 中の飛程の深さまで欠 陥ができ表面が隆起する。その隆起にともない表面粗さ (RMS)が変化する。照射量とともに 表面状態が変化する様子は、Fig.18 に示すアイデアで説明できる。低照射量では個々のイオ ンの入射による微細な隆起が孤立していて、AFM の測定範囲内で隆起ができている部分と そうでない部分の高度差によって RMS とその標準偏差が大きくなると思われる^[13]。一方で 隆起高さが飽和を迎える照射量では、一様に飛程の深さまでイオンが注入されているため、 個々の隆起部分が重なり合って照射面内の隆起高さはほとんど同じになり RMS とその標 準偏差も小さくなると考えられる。



Fig.18 照射量の変化に伴う表面形状の変化

6.2 照射角度が表面粗さに及ぼす影響

照射角度を変化させた際に RMS が最大となる照射量が異なった原因として主に2つの効果が考えられる。

一つ目はイオンビームによるスパッタリング効果である。スパッタリングとは照射イオ ンが固体表面に入射する際、表面原子を弾き飛ばす現象である。Fig.19 に示すように各照射 角度における RMS が最大となる照射量は異なり、その照射量が小さい順に 5°,0°,20°で あった。そして、Table.7 に示すように SRIM から求めたスパッタリング率もスパッタリン グ率が小さい順に 5°,0°,20°であった。この結果から、照射角度を変化させた際に RMS が最大となる照射量が異なった原因であると考えられる。

また、もう一つの効果としてチャネリング効果が考えられる。チャネリング効果とは、本 来飛程の位置で照射イオンが結晶中の原子と衝突するところ、結晶軸と並行に入射するこ とで原子と衝突せずに、飛程の位置よりも深くに注入される現象である。飛程の位置が深く なると欠陥生成での隆起高さは高くなる。しかし、チャネリング効果では材料中の原子と衝 突しないため欠陥は生成されないため欠陥生成によって隆起高さが高くなるということは ない。本研究ではチャネリング効果によって飛程よりも深くに入ったことによる隆起高さ への影響と欠陥が生成されなかったことによる影響のどちらが大きいかは分かっていない ため議論することはできないが、一考の余地はあるのではないかと考える。

角度以外の条件はすべて一定であるためこれらの効果が RMS に影響を及ぼしたのでは ないかと考えている。



Fig.19 各照射角度における RMS が最大となった照射量

照射角度(°)	イオン	エネルギー(keV)	スパッタリング率(Atoms/Ion)
0			1.320
5			1.242
10			1.277
20	Ar	90	1.489
30			1.952
40			2.822
50			4.238

Table.7 SRIM から求めたスパッタリング率

※今回実測した照射角度は赤で示した



Fig.20 SRIM から求めたスパッタリング率の照射角度依存性

7 結論

本研究の照射量領域で測定した RMS の挙動は、先行研究(Fig.2)のような照射量とともに 単調減少とは異なることが明らかになった。また、隆起高さが飽和する照射量に近づくにつ れて RMS 値とその標準偏差は減少した。隆起表面の RMS 値を減少させるためには照射す る結晶材料での照射イオンの飽和照射量を求めることが重要であると考える。

8 展望

今後の展望として、隆起表面の RMS 値は隆起高さの飽和照射量に近づくほど小さくなっ たことから、飽和照射量の予測が必要になると推測する。その為に、価数、エネルギー、イ オン種、照射角度、温度などの条件を変化させたときの飽和照射量を導出し、規則性がない かを調べることが重要である。

謝辞

本研究を行うにあたって、ご協力・ご助言くださった皆様に感謝いたします。研究活動・ 論文執筆にあたって多くのアドバイス・ご協力・ご指導を賜りました百田佐多生准教授に大 変感謝いたします。そして、AFM 測定の使用についてご指導くださった川原村敏幸教授並 びに同研究室の安岡龍哉氏に感謝いたします。最後に、本研究にご協力いただいた百田研究 室の皆様に感謝いたします。特にサンプル処理や照射実験など多岐にわたりご指導くださ った渡辺みひろ氏に大変感謝致します。

参考文献

- [1] https://www.jstage.jst.go.jp/article/ejisso/26/0/26_286/_pdf
- [2] https://www.jstage.jst.go.jp/article/mes/28/0/28_101/_pdf/-char/ja
- [3] http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2004_01/8001SPall.pdf
- [4] https://www-jt60.naka.qst.go.jp/wakate/pdf/wakate_14/OV2_hinokiVG.pdf
- [5] https://iontc.co.jp/ion_injection/
- [6] 佐藤法幸、平成 29 年度修士論文
- [7] 十川恭平、平成 30 年度卒業論文
- [8] 井開一宏、平成 30 年度卒業論文
- [9] 渡辺みひろ、令和元年度卒業論文
- [10] F. Frost, A. Schindler & F. Bigl, Appl Phys A 66, 663–668 (1998)
- [11] http://motility-machinery.jp/?p=466
- [12] Review of Scientific Instruments 75, 1497 (2004)
- [13] https://srim-tutorial-japanese.readthedocs.io/ja/latest/trim.html
- [14] R. Cuerno and J.-S. Kim, J. Appl. Phys. 128, 180902 (2020)

付録

本研究で使用した実測値

※角度の記載のないものは0°とする。

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.869	0.801
2	1.290	標準偏差(nm)
3	0.617	0.213
4	0.709	
5	0.650	
6	0.710	
7	0.761	

Ar¹⁺,90keV,1 \times 10¹⁵/cm² O RMS

Ar1+,90keV,3 $\times\,10^{15}/cm^2\,\mathcal{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.138	0.758
2	0.72	標準偏差(nm)
3	0.907	0.187
4	0.807	
5	0.557	
6	0.666	
7	0.514	
8	0.752	

Ar¹⁺,90keV,5 \times 10¹⁵/cm² \mathcal{O} RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.732	0.885
2	0.960	標準偏差(nm)
3	1.024	0.088
4	0.959	
5	0.814	
6	0.880	
7	0.876	
8	0.837	

Ar¹⁺,90keV,1 \times 10¹⁵/cm² \mathcal{O} RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.224	0.924
2	1.110	標準偏差(nm)
3	1.281	0.268
4	1.049	
5	0.900	
6	0.549	
7	0.601	
8	0.677	

Ar^{1+},90keV,7 $\times 10^{15}/cm^2\, {\rm O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.857	0.829
2	0.664	標準偏差(nm)
3	0.690	0.261
4	0.717	
5	1.506	
6	0.738	
7	0.760	
8	0.703	

Ar³⁺,90keV, 1×10^{15} /cm² O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.600	1.067
2	1.716	標準偏差(nm)
3	1.894	0.557
4	1.319	
5	3.522(除外)	
6	0.715	
7	0.967	
8	0.258	

 $Ar^{3\scriptscriptstyle +},\!90keV,\!2\!\times\!10^{15}/cm^2\,\mathcal{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.914	0.645
2	0.970	標準偏差(nm)
3	0.585	0.179
4	0.589	
5	0.567	
6	0.422	
7	0.544	
8	0.565	

Ar^3+,90keV,3 $\times 10^{15}/cm^2$ O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.366	0.490
2	0.794	標準偏差(nm)
3	0.615	0.140
4	0.417	
5	0.499	
6	0.485	
7	0.378	
8	0.365	

Ar³⁺,90keV,4 \times 10¹⁵/cm² \mathcal{O} RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.899	1.050
2	0.908	標準偏差(nm)
3	1.076	0.257
4	0.720	
5	1.575	
6	1.260	
7	1.140	
8	0.828	

Ar³⁺,90keV,5 \times 10¹⁵/cm² \mathcal{O} RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.308	0.663

2	0.534	標準偏差(nm)
3	1.189	0.432
4	1.106	
5	0.199	
6	0.245	
7	0.278	
8	0.441	

Ar³⁺,90keV,6 \times 10¹⁵/cm² O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.358	0.933
2	0.599	標準偏差(nm)
3	0.563	0.334
4	1.433	
5	0.609	
6	0.751	
7	0.940	
8	1.210	

Ar³⁺,90keV,7 \times 10¹⁵/cm² \mathcal{O} RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.735	0.605
2	0.699	標準偏差(nm)
3	0.480	0.127
4	0.440	
5	0.510	
6	0.829	
7	0.593	
8	0.561	

 $Ar^{3\scriptscriptstyle +}\mbox{,}90\mbox{keV}\mbox{,}10\,{\times}\,10^{15}\mbox{/}\mbox{cm}^2\,{\it O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.303	0.300
2	0.239	標準偏差(nm)
3	0.279	0.077

4	0.259
5	0.230
6	0.236
7	0.446
8	0.407

$Ar^{7+},700 keV,1\times 10^{15}/cm^2\, \mathcal{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	7.837	5.762
2	7.778	標準偏差(nm)
3	6.500	1.869
4	7.119	
5	4.457	
6	12.445(除外)	
7	3.119	
8	3.526	

Ar^7+,700keV, 3×10^{15} /cm² O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	2.381	1.184
2	0.758	標準偏差(nm)
3	1.859	0.576
4	0.764	
5	1.024	
6	0.737	
7	0.756	
8	1.191	

Ar^7+,700keV,5 $\times 10^{15}/cm^2$ O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.365	0.342
2	0.256	標準偏差(nm)
3	0.331	0.055
4	0.316	
5	0.298	

6	0.434
7	0.322
8	0.411

Ar^7+,700keV,6 $\times 10^{15}/cm^2$ O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.592	0.500
2	0.391	標準偏差(nm)
3	0.452	0.094
4	0.652	
5	0.566	
6	0.408	
7	0.861(除外)	
8	0.439	

Ar^7+,700keV,7 $\times 10^{15}/cm^2\, \mathcal{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.825	1.081
2	0.745	標準偏差(nm)
3	1.246	1.024
4	1.141	
5	1.933	
6	0.767	
7	1.003	
8	0.991	

Ar^7+,700keV,8 $\times10^{15}/cm^2\,\mathcal{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	3.213	1.615
2	1.022	標準偏差(nm)
3	0.872	1.151
4	0.879	
5	6.443(除外)	
6	3.635	
7	0.818	

8	0.871

Ar⁷⁺,700keV,10 \times 10¹⁵/cm² O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.783	0.949
2	0.559	標準偏差(nm)
3	0.826	0.283
4	0.663	
5	0.919	
6	1.150	
7	1.413	
8	1.279	

$N^{1+}\text{,}30\text{keV,}1\times10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.814	1.285
2	0.793	標準偏差(nm)
3	1.394	0.489
4	1.200	
5	9.404(除外)	
6	1.345	
7	2.357	
8	1.093	

 $N^{1+}\text{,}30\text{keV,}2\times10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.531	1.646
2	2.394	標準偏差(nm)
3	1.995	0.439
4	1.070	
5	2.063	
6	1.149	
7	1.334	
8	1.631	

 $N^{1+}\text{,}30\text{keV,}3\times10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	2.368	3.993
2	6.854	標準偏差(nm)
3	3.225	1.607
4	6.157	
5	4.004	
6	4.233	
7	2.970	
8	2.135	

$N^{1+}\text{,}30\text{keV,}4\times10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.736	1.349
2	0.681	標準偏差(nm)
3	2.527	0.756
4	1.988	
5	2.387	
6	0.720	
7	0.746	
8	1.008	

$N^{1+}\text{,}30\text{keV,}5\times10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.954	0.636
2	0.770	標準偏差(nm)
3	0.987	0.274
4	0.451	
5	0.457	
6	0.864	
7	0.212	
8	0.392	

$N^{1+}\text{,}30\text{keV,}6\times10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所 RMS(nm)	平均值(nm)
--------------	---------

1	0.789	0.629
2	0.375	標準偏差(nm)
3	0.424	0.189
4	0.589	
5	0.569	
6	0.743	
7	0.989	
8	0.552	

 $N^{1+}\text{,}30\text{keV,}7\!\times\!10^{15}\text{/cm}^2\,\text{O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.594	0.636
2	0.519	標準偏差(nm)
3	0.432	0.274
4	1.048	
5	0.616	
6	0.748	
7	0.481	
8	0.647	

 $N^{1+}\text{,}30 keV\text{,}10 \times 10^{15}\text{/cm}^2 \, \text{\mathcal{O}}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.313	0.322
2	0.299	標準偏差(nm)
3	0.349	0.028
4	0.372	
5	0.335	
6	0.287	
7	0.301	
8	1.343(除外)	

 $Ar^{_{3+}},\!90.12 keV,\!2\!\times\!10^{_{15}}\!/cm^2,\!5^\circ~$ O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.912	0.748
2	0.717	標準偏差(nm)

3	0.563	0.115
4	0.683	
5	0.688	
6	0.678	
7	0.861	
8	0.884	

Ar^{_3+},90.12keV,3 $\times10^{15}/cm^2,5^\circ~$ O RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.889	1.060
2	0.986	標準偏差(nm)
3	0.987	0.213
4	0.768	
5	1.041	
6	1.162	
7	1.113	
8	1.532	

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.057	1.013
2	1.111	標準偏差(nm)
3	1.011	0.065
4	0.924	
5	1.080	
6	1.017	
7	0.980	
8	0.922	

Ar^{3+},90.12keV,5 $\times 10^{15}/cm^{2},5^{\circ}~{\it O}~RMS$

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.728	0.554
2	0.579	標準偏差(nm)
3	0.526	0.076
4	0.483	

5	0.536
6	0.586
7	0.514
8	0.476

$Ar^{3+},\!90.36 keV,\!2\!\times\!10^{15}/cm^2,\!20^\circ~{\it O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.326	1.066
2	1.327	標準偏差(nm)
3	1.735	0.372
4	1.193	
5	1.035	
6	0.996	
7	0.932	
8	0.983	

$Ar^{3+},\!90.36 keV,\!3\!\times\!10^{15}/cm^2,\!20^\circ~{\cal O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.689	0.618
2	0.620	標準偏差(nm)
3	0.669	0.073
4	0.556	
5	0.710	
6	0.596	
7	0.488	

Ar^{_3+},90.36keV,4 $\times 10^{15}/cm^2$,20° $\,$ ${\cal O}$ RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.051	0.971
2	1.097	標準偏差(nm)
3	0.983	0.113
4	1.150	
5	0.882	
6	0.805	
7	0.873	

8	0.927
0	0.921

Ar^{3+},90.36keV,5 $\times 10^{15}/cm^{2},20^{\circ}~{\it O}~RMS$

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.982	1.082
2	1.024	標準偏差(nm)
3	1.089	0.113
4	1.187	
5	1.068	
6	1.155	
7	1.267	
8	0.887	

Ar³⁺,N¹⁺未照射部の RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.164	0.849
2	0.806	標準偏差(nm)
3	0.661	0.238
4	0.721	
5	3.475(除外)	
6	1.101	
7	0.932	
8	1.149	
9	1.409	
10	1.023	
11	1.212	
12	0.733	
13	0.950	
14	0.900	
15	0.972	
16	4.354(除外)	
17	1.482	
18	1.040	
19	1.080	
20	1.027	

21	1.006
22	0.789
23	0.934
24	0.905
25	0.868
26	0.734
27	0.709
28	0.693
29	0.699
30	0.697
31	0.737
32	0.762
33	0.727
34	0.742
35	0.714
36	0.678
37	0.754
38	0.731
39	0.698
40	0.737
41	0.703
42	0.690
43	0.780
44	0.703
45	0.727
46	0.736
47	0.733
48	0.701
49	0.721
50	1.595

Ar1+,90keV,6×1015/cm2,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.680	0.703
2	0787	標準偏差(nm)

3	0.660	0.050
4	0.683	

Ar¹⁺,90keV,7×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.698	0.756
2	0.783	標準偏差(nm)
3	0.889	0.090
4	0.654	

Ar¹⁺,700keV,1×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	4.285	3.209
2	4.527	標準偏差(nm)
3	1.591	1.297
4	2.432	

Ar¹⁺,700keV,3×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.779	0.850
2	0.885	標準偏差(nm)
3	0.857	0.277
4	0.877	

Ar¹⁺,700keV,5×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.340	1.310
2	0.373	標準偏差(nm)
3	4.169	1.651
4	0.357	

Ar¹⁺,700keV,6×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.950	1.091
2	1.184	標準偏差(nm)

3	1.015	0.111
4	1.215	

Ar1+,700keV,7×1015/cm2,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	0.678	4.067
2	2.336	標準偏差(nm)
3	12.192	4.731
4	1.061	

Ar¹⁺,700keV,8×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	1.917	3.425
2	1.665	標準偏差(nm)
3	8.228	2.775
4	1.899	

Ar¹⁺,700keV,10×10¹⁵/cm²,未照射部 RMS

測定箇所	RMS(nm)	平均值(nm)
1	3.237	1.855
2	1.243	標準偏差(nm)
3	0.506	1.054
4	2.433	