

集束イオンビーム照射と化学エッチングを併用した 3次元微細構造形成* (微細構造形成の高能率化)

川 堰 宣 隆^{*1}, 深 瀬 達 也^{*2}, 森 田 昇^{*3}
芦 田 極^{*4}, 谷 口 淳^{*5}
宮 本 岩 男^{*5}, 百 田 佐 多 生^{*6}

Three-Dimensional Microfabrication Using Focused Ion Beam Irradiation and Chemical Etching (High-Efficient Structure Fabrication)

Noritaka KAWASEGI^{*7}, Tatsuya FUKASE, Noboru MORITA,
Kiwamu ASHIDA, Jun TANIGUCHI,
Iwao MIYAMOTO and Sadao MOMOTA

^{*7} Central Research Institute, Toyama Industrial Technology Center
150 Futagami, Takaoka, Toyama 933-0981, Japan

This study aims to fabricate three-dimensional microstructures on a silicon surface using focused ion beam (FIB) irradiation and wet chemical etching. A silicon surface irradiated with FIB withstands etching in KOH, and consequently protruding structures can be fabricated on the irradiated area. Three-dimensional fabrication is possible by taking advantage of the change in the etch stop effect due to irradiation conditions. To fabricate higher structures efficiently, height dependences on various fabrication conditions were investigated. As a result, the height of the structures can be controlled by ion dose, in spite of the higher dose condition. A hard-to-etch mask was formed by preventing the channeling effect. Higher structures were fabricated with shorter etch time at the high-temperature conditions. Etching selectivity increased at high dose and low etchant concentration. These results enable us to fabricate higher structures efficiently.

Key Words : Focused Ion Beam, Wet Chemical Etching, Maskless Patterning,
Three-Dimensional Microfabrication, Single Crystal Silicon

1. 緒 言

本研究は、摩擦力顕微鏡 (FFM) 機構や集束イオンビーム (FIB) 照射によるナノスケール加工と化学エッチングを併用した 3 次元微細構造形成法について検討している⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。FFM や FIB を利用してナノスケ

ール加工を行った単結晶シリコンを、KOH^{(1),(2),(8)-(11)} や HF^{(3),(5)}等の水溶液でエッチング処理すると、照射部のエッチングレートが大きく変化する。これを利用することで、凸状あるいは凹状の微細構造を高能率に形成できる。既報では、この原理を応用して、加工条件によりこれらの作用の強弱を変化させることで、3次元微細構造を形成できることを明らかにした⁽¹⁾⁻⁽³⁾。さらに、照射部に発現するマスキング作用は、シリコンのアモルファス化に起因することを示した^{(2),(4)}。

これまでの FIB 照射を利用した凸状の 3 次元微細構造形成⁽²⁾では、ドーズ量 $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下の条件で弱いマスキング作用を発現させ、この条件内で微細構造の高さを変化させてきた。このため、作製される 3 次元微細構造の高さは、約 300 nm 以下であった。また微細構造作製時のエッチングレートは 50 nm/min

*原稿受付 2008 年 4 月 7 日。

^{*1} 正員, 富山県工業技術センター (〒933-0981 高岡市二上町 150)。

^{*2} 学生員, 富山大学大学院理工学教育部 (〒930-8555 富山市五福 3190)。

^{*3} 正員, 富山大学大学院理工学教育部。

^{*4} 正員, 産業技術総合研究所 (〒305-8564 つくば市並木 1-2-1)。

^{*5} 東京理科大学基礎工学部 (〒278-8510 野田市山崎 2641)。

^{*6} 高知工科大学工学部 (〒782-8502 香美市土佐山田町 宮ノ口 185)。

E-mail: kawasegi@itc.pref.toyama.jp

Table 1 FIB irradiation conditions.

Sample	Single crystal Si (100)
Irradiated ion	Ga ⁺
Ion energy (keV)	30
Dose (μC/cm ²)	2 ~ 53760
Irradiation angle (°)	0, 7
Irradiated area (μm ²)	5 × 5, 10 × 10

Table 2 Etching conditions.

Etchant	KOH
Concentration (mass%)	10 ~ 40
Temperature (°C)	20 ~ 80
Etch time (min)	2 ~ 20
Ultrasonic wave (μm ²)	Addition

以下であり、高い微細構造を形成するためには、長いエッチング処理時間を要する。さらに高い3次元微細構造を形成するためには、照射部に強いマスクング作用を発生させ、その条件内でマスクング作用の強弱を変化させることが必要になる。また、照射条件やエッチング処理条件を変化させ、微細構造の作製時間を短縮することができれば、微細構造を高能率に形成することが可能になると考える。

本報ではFIB照射と化学エッチングを併用して、単結晶シリコン表面に高さ数十~数千nm単位の凸状の3次元微細構造を高能率に形成するため、微細構造の形状の各種実験条件依存性について検討を行った。

2. 実験装置および実験条件

FIB照射には、日立製作所製FB-2000Aを使用した。実験ではイオンエネルギーを一定とし、ドーズ量を変化させてFIB照射を行った。またドーズ量の設定は、照射時間により行った。

まず、単結晶シリコン(100)面に対してFIB照射し、その形状を原子間力顕微鏡(AFM:島津製作所製SPM-9500J2)で観察する。つぎに、その試料をKOH水溶液でエッチング処理する。その際、表面あらさとエッチングむらの改善のため、超音波を付加する⁽¹²⁾。最後に、FIB照射部の形状変化をAFMで観察する。表1と表2は、FIB照射条件およびエッチング処理条件である。

3. 微細構造のFIB照射条件依存性

3.1 ドーズ量による微細構造の形状変化 高い3次元微細構造を高能率に形成するためには、照射部に強いマスクング作用を発生させ、その条件内で微細構造の高さを変化させることが必要である。ま

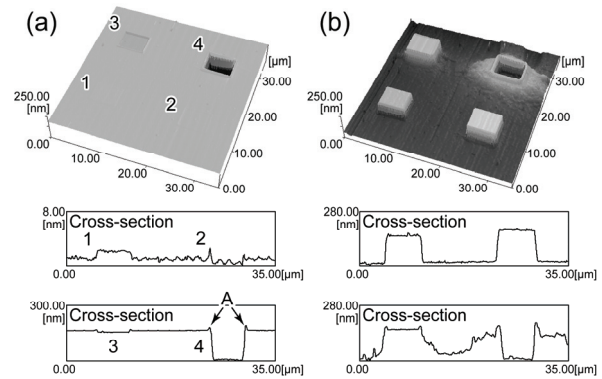


Fig. 1 AFM topography images of ion irradiated areas (a) before, and (b) after etching in 20 mass% KOH for 5 min. The doses are 1: 54 μC/cm², 2: 538 μC/cm², 3: 5376 μC/cm², and 4: 53760 μC/cm².

た同時に、エッチング処理時間の短縮も必要となる。これまでの研究では、FIB照射のドーズ量、イオンエネルギーによって、微細構造の高さを変化させることができることを示した^{(2),(6)}。ドーズ量による微細構造の高さの差は、主にマスク層の厚さ、密度の変化に起因する。一方、イオンエネルギーによる差は、マスク層が形成される深さの違いに起因する。強いマスクング作用を発生させるためには、ドーズ量を増加させることが有効であると考えられる。そこで、ドーズ量を数十~数万μC/cm²単位の大きな範囲で設定したときの、微細構造の形状変化について検討した。

図1(a)は、ドーズ量を54~53760 μC/cm²の範囲で変化させてFIB照射を行った試料のAFM観察像である。ドーズ量が54 μC/cm²の場合、照射部に高さ1.5 nmの微小な隆起が生じた。この現象は、FIB照射によって誘起されたシリコンのアモルファス化に起因する⁽³⁾⁽¹³⁾。ドーズ量が538 μC/cm²以上になるとスパッタに転じ、照射部は凹状となった。また、スパッタが生じる条件では、照射部周辺に高さ数nm~20 nmのバリ状の突起が観察できる(図中、A部)。さらに、その周辺では、高さ1~2 nm程度の隆起した領域が観察された。これらの現象は、スパッタにより生じたシリコンの再付着⁽¹⁴⁾に起因すると考える。同図(b)は、この試料を5分間エッチング処理した後のAFM観察像である。照射部にマスクング作用が発生し、非照射部が選択的にエッチングされることで、凸状の微細構造が形成された。ドーズ量が5376 μC/cm²以下の場合、照射部は凸状である。一方、ドーズ量が53760 μC/cm²になると、エッチング処理前の凹形状が維持されている。またドーズ量が5376 μC/cm²以上の条件では、照射部周辺に表面の荒れた領域が形成され、エッジ部の形状はなだらかに変化している

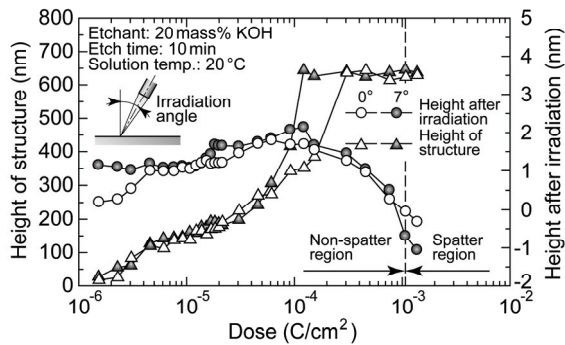


Fig. 2 Change in height of structures irradiated with different irradiation angles plotted as a function of ion dose.

ことがわかる。これは、再付着したシリコン原子自身が KOH 水溶液に対してマスキング作用を発現したためと考える。すなわち高精細な微細構造を形成する場合、試料にスパッタが生じない範囲でドーズ量を設定することが必要となる。本報では、試料がスパッタされない条件下でドーズ量を変化させて実験を行い、各種条件下での微細構造の形状変化について検討した。

3.2 微細構造高さのドーズ量依存性 これまでの実験⁽²⁾では、単結晶シリコン(100)に対して FIB 照射を行い、微細構造を形成してきた。単結晶シリコン(100)にイオン照射すると、照射イオンはチャネリング効果を起こす⁽¹⁵⁾。このため、シリコンのアモルファス化は、試料のより深い領域で生じるようになる。試料の浅い領域で密度の高いアモルファス相を形成できれば、照射時間の短縮が可能となり、より高能率に微細構造を形成できると考える。そこで、チャネリング効果を防ぐ目的で、照射角度を変化させた実験を行った。照射角度は、7°とした。照射角度を 7°にすることで、チャネリング効果を抑制することができる⁽¹⁵⁾。

図 2 は、照射角度を 0°と 7°としたときの、照射後の隆起高さおよびエッチング処理後の微細構造高さのドーズ量依存性である。エッチング処理時間は、10 分とした。照射角度がいずれの場合でも、ドーズ量にともない照射後の隆起高さは増加した。ドーズ量が 100 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上になるとその値は減少し始め、1000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ でスパッタに転じた。単結晶シリコンにイオン照射すると、照射イオンは試料内部に注入され、シリコンのアモルファス化が生じる。ドーズ量の増加にともない、アモルファス化は進行する。これにともなう体積増加⁽³⁾⁽¹³⁾によって、隆起高さが増加すると考える。さらに、シリコンのアモルファス化が進行すると、試料原子間の結合力が変化すると考える。これによって、試料

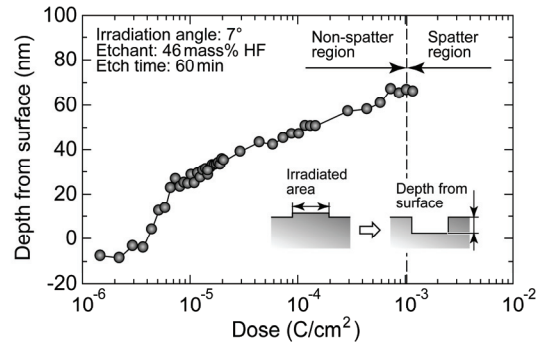


Fig. 3 Change in depth of the ion irradiated area plotted as a function of ion dose.

が結晶状態の時よりもスパッタされやすくなり、本実験条件下ではドーズ量 1000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上でスパッタに転じたと考える。

エッチング処理後の微細構造高さは、ドーズ量が 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ まで緩やかに増加する。ドーズ量がそれ以上になると微細構造の高さは急増し、その後一定値となった。この条件では、照射部に強いマスキング作用が発現し、エッチング処理時間 10 分でもマスキング作用を持続している。照射角度が 7°の場合、ドーズ量のより小さな条件から微細構造高さは一定値となる。すなわち照射角度を 7°にすることで、マスキング作用は強くなることわかる。この傾向は、ドーズ量が 50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上のときに、顕著に表れる。照射角度を 7°にすることで照射イオンのチャネリング効果が抑制され、試料の浅い領域で密度の高いアモルファス相が形成されるためと考える。一方、チャネリング効果が生じると、照射イオンは内部まで注入され、密度の小さなアモルファス領域が試料内部に広く分布するようになる。密度が小さくなると、アモルファス相は照射時のアニールによって消滅しやすくなる⁽¹⁶⁾。このため、シリコンのアモルファス化は進行しにくくなり、マスキング作用は弱くなると考える。すなわち照射角度を変化させ、チャネリング効果を抑制することで、照射時間を短縮できると考える。

つぎに、マスク層(アモルファス相)の選択比(非照射部のエッチングレート/マスク層のエッチングレート)を求める。選択比を算出するためには、まず各照射条件におけるマスク層の厚さを明らかにする必要がある。そこで、FIB 照射した試料をフッ酸(HF)でエッチング処理することで、マスク層の厚さを求めた。HF 水溶液でエッチング処理することで、照射部のアモルファス相のみを選択的に除去することができる^{(3),(5)}。

図 3 は、ドーズ量を変化させて FIB 照射後、46 mass%の HF 水溶液で 60 分間エッチング処理した

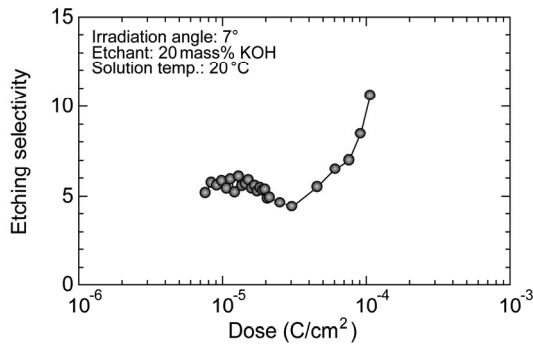


Fig. 4 Change in etching selectivity of the ion irradiated area plotted as a function of ion dose.

後の、照射部の深さである。照射角度は、 7° である。ドーズ量が $4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下の場合、アモルファス相は試料内部で形成されるため、エッチングは進行しない⁽³⁾。ドーズ量がそれ以上になると照射部の深さは急増し、ドーズ量が $7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上で緩やかに増加するようになる。すなわち、ドーズ量の増加にともない、マスク層は厚くなることわかる。一方、その増加割合は、ドーズ量の増加にともない小さくなる。ここで求めたエッチング深さと照射後の隆起高さとの和をマスク層の厚さと定義し、選択比を求めた。

図 4 は、マスク層の選択比のドーズ量依存性である。選択比は、図 2 でマスクング作用が消滅するドーズ量までとした。ドーズ量が $31 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下の場合、選択比に大きな差はみられない。ドーズ量がそれ以上になると、選択比は急増することがわかる。FIB 照射を行ったシリコン内部は、アモルファス相と結晶相が混在した状態にあると考える。ドーズ量が $31 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以下の場合、その領域の厚さの違いが主因となって、ドーズ量によるマスクング作用の強弱に差が生じる。ドーズ量が大きくなると、照射部のアモルファス化が急激に進行し、その密度の違いによって極めて強いマスクング作用を示すようになると思われる。

以上の結果より、ドーズ量を大きな範囲で設定した場合でも、ドーズ量により微細構造の高さを変化させることが可能である。これによって高い 3 次元微細構造の形成が可能になると考える。また、照射角度を変化させることで、照射時間の短縮が可能になることがわかった。

4. 微細構造のエッチング処理条件依存性

4.1 微細構造高さのエッチング処理温度依存性

単結晶シリコンの KOH 水溶液に対するエッチング特性は、その温度、濃度によって異なる⁽¹⁷⁾。また同時に、マスク層のエッチング特性も変化すると考える。そこで、

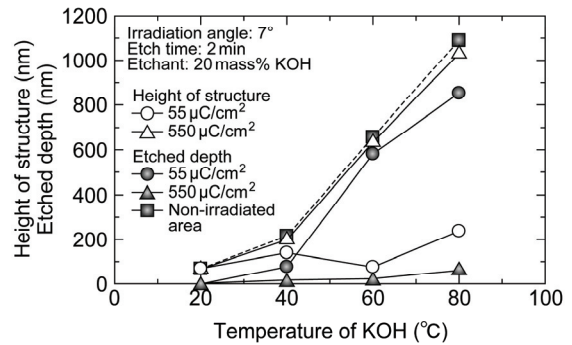


Fig. 5 Change in height of structures plotted as a function of temperature of KOH.

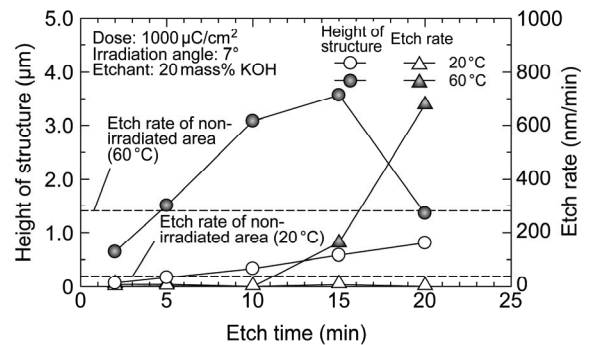


Fig. 6 Change in height of structure etched in KOH with various temperatures plotted as a function of etch time.

エッチング処理条件を変化させた実験を行い、エッチング処理時間の短縮について検討した。まず、エッチング処理温度を変化させた実験を行った。

図 5 は、ドーズ量を変化させたときの、エッチング処理温度に対する微細構造高さおよび照射部のエッチング量である。エッチング処理時間は、2 分とした。エッチング処理温度の上昇にともない、非照射部のエッチング量は急増する。ドーズ量が小さな $55 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ の場合、微細構造の高さに大きな差は見られない。ドーズ量が $550 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ になると、エッチング処理温度の上昇にともない、微細構造高さは増加した。また、温度がいずれの場合でも照射部のエッチング量は小さく、マスクング作用を維持していることがわかる。すなわち、エッチング処理温度による微細構造の高さの差は非照射部のエッチングレートの差に起因し、温度が高い場合に短時間で高い微細構造を形成できることがわかる。

図 6 は、エッチング処理温度 20°C および 60°C の時のエッチング処理時間に対する微細構造高さおよび照射部のエッチングレートの変化である。エッチング処理温度が 20°C の場合、エッチング処理時間の増加にともない、微細構造高さは増加した。照射部

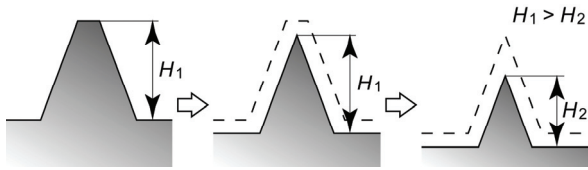


Fig. 7 Schema showing the decrease in height of structure.

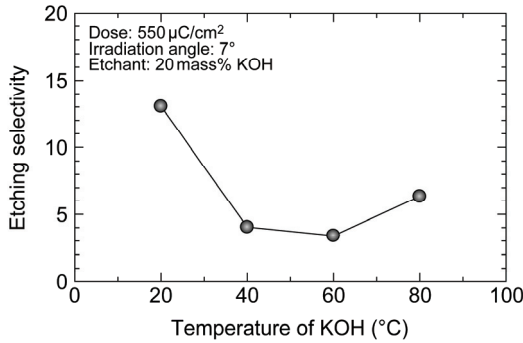


Fig. 8 Change in etching selectivity of the ion irradiated area plotted as a function of temperature of etchant.

でエッチングは進行しておらず、マスク層作用を持続していることがわかる。一方、エッチング温度が 60°C の場合、エッチング処理時間が 15 分まで微細構造高さは増加し、高さは 3570 nm となった。エッチング処理時間がそれ以上になると照射部のマスク層作用は消滅し、微細構造高さは減少した。これは本実験条件下では照射領域の大きさが十分ではなく、図 7 に示すようにマスク層が消滅した後に微細構造の側面方向からエッチングが進行し、微細構造の上面部が消滅したためと考える。このため、高い微細構造を作製する場合、十分な幅のマスク層の作製が必要になることがわかる。

図 8 は、エッチング処理温度とマスク層の選択比の関係である。ドーズ量は、550 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした。エッチング処理温度が 20°C の場合、マスク層の選択比は 13 であった。エッチング処理温度が 40°C 以上になると選択比は小さくなり、約 2~6 となる。すなわち、エッチング処理温度が高くなると、非照射部と同時にマスク層のエッチングも進行しやすくなることがわかる。一方、エッチング処理温度が小さい場合に選択比は大きくなることから、微細構造の最大高さは大きくなることを考える。

以上の結果より、エッチング処理温度を高くすることで、非照射部で大きなエッチングレートを得ることができる。これによって、エッチング処理時間の著しい短縮が可能となることがわかった。一方、スパッタが生じな

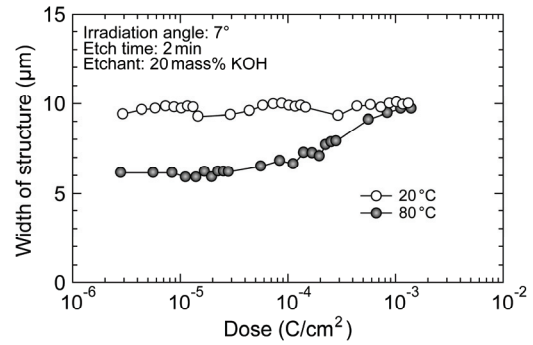


Fig. 9 Change in width of structure plotted as a function of dose.

い条件下でさらに高い微細構造を形成するためには、エッチング処理温度を 20°C に設定し、長時間エッチングを行う手法が有効であると考えられる。

4.2 微細構造幅のエッチング処理温度依存性

マスク層作用を利用した微細構造形成では、エッチングの進行とともに、微細構造の幅も変化する。とくに微細構造が高くなると、その変化量は大きくなる。また、微細構造の幅が小さい場合、図 6 で示したように微細構造高さの低下を招く。そこで、エッチング処理条件による微細構造の幅の変化について検討した。

図 9 は、2 種類の温度でエッチング処理したときの、ドーズ量に対する微細構造上面部の幅の変化である。照射領域は、10 μm \times 10 μm とした。またエッチング処理時間は 2 分である。エッチング処理温度が 20°C の場合、ドーズ量に変化しても微細構造の幅に大きな差は見られない。一方、エッチング処理温度が 80°C になると、ドーズ量が小さいときに微細構造の幅は約 6 μm となった。ドーズ量の増加にともない、その値は 10 μm に収束することがわかる。すなわち、マスク層作用の強弱によって微細構造の幅も同時に変化し、マスク層作用が弱い場合に微細構造の幅は小さくなることがわかる。図 5 で示したように、エッチング処理時間が同様の場合、エッチング処理温度が高いときに、高い微細構造が形成される。そこで、同一高さでの幅の違いを明らかにするため、微細構造の高さに対する幅の変化について検討した。

図 10 は、エッチング処理温度を変化させたときの、微細構造の高さに対する幅の変化である。エッチング処理温度がいずれの場合でも、微細構造の高さの増加にともない、その幅は小さくなる。またエッチング処理温度が変化しても、その傾向は同様である。すなわちエッチング処理温度が異なる場合でも、微細構造の高さの増加にともない、その幅は同じ割合で減少すると考える。

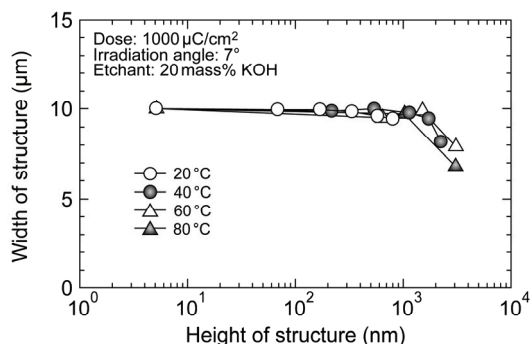


Fig. 10 Change in etching selectivity of the ion irradiated area plotted as a function of temperature of etchant.

以上の結果より、マスクング作用が弱い条件では、微細構造の幅の減少量は大きくなることがわかった。またエッチング処理温度が異なる場合でも、微細構造の高さの増加にともない、同じ割合で微細構造の幅は減少する。このため、高い微細構造を形成する場合には、これらの結果を考慮したうえでの照射領域の設定が必要であるといえる。

4.3 微細構造高さのエッチャント濃度依存性 つぎに、微細構造高さのエッチャント濃度依存性について検討した。図 11 は、エッチャント濃度に対する微細構造高さおよびマスク層の選択比である。ドーズ量は、 $7.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした。エッチング処理時間は、10 分である。エッチャント濃度が低い場合にマスク層の選択比は大きくなり、高い微細構造が形成されることがわかる。本実験条件下では、濃度 10 mass% の場合にマスク層は消滅せず、高い微細構造が形成された。一方、非照射部のエッチングレートに、大きな差は見られない。すなわち、エッチャント濃度が低い場合にマスク層の選択比が大きくなり、マスクング作用が長く持続することで、高い微細構造が形成されることがわかる。

以上の結果より、エッチャント濃度が小さいときに、マスク層の選択比は大きくなる。すなわち、ドーズ量の小さな条件でも強いマスクング作用が発現し、高い微細構造を形成できる。これによって、照射時間の短縮が可能になると考える。

5. 結 言

本報では、FIB 照射と化学エッチングを併用して、高さ数十～数千 nm 単位の 3 次元微細構造を高エネルギーに形成するため、微細構造の形状の各種条件依存性について検討した。本研究で得られた結果を、以下に示す。

(1) ドーズ量が大きな条件でも、ドーズ量によって微細

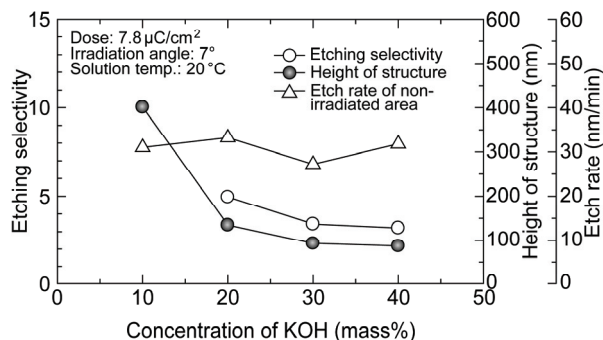


Fig. 11 Change in etching selectivity of the ion irradiated area plotted as a function of concentration of KOH.

構造の高さを変化させることが可能である。これによって、高さ数十～数千 nm の 3 次元微細構造形成が可能になる。また、スパッタが生じない条件に設定することで、高精細な微細構造を形成できる。

- (2) FIB の照射角度を 7° にすることで、チャネリング効果が抑制され、ドーズ量の小さな条件で強いマスク層を形成できる。この傾向は、ドーズ量が $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上のときに、顕著に表れる。
- (3) エッチング処理温度を高くすることで、非照射部のエッチングレートが大きくなり、エッチング時間の短縮が可能となる。一方、エッチング処理温度が小さくなると、マスク層の選択比は高くなる。
- (4) エッチングの進行にともない、微細構造の幅は小さくなる。この傾向は、エッチング処理温度には依存せず、温度がいずれの場合でも同じ割合で幅が低下する。
- (5) エッチャント濃度を低くすることで、マスク層の選択比は大きくなり、小さなドーズ量で高い微細構造を形成することができる。

以上の結果より、濃度の低いエッチャントを用いて高温でエッチング処理することで、照射時間およびエッチング処理時間を短縮できる。さらに FIB 照射時のチャネリング効果を抑制することで、照射時間の短縮が可能となる。これによって、高い微細構造を高エネルギーに形成することができる。と考える。

本研究の一部は、平成 18～19 年度科学研究費補助金萌芽研究(課題番号 18656045)により行われたことを記して、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Kawasegi, N., Morita, Yamada, S., Takano, N., Oyama, T., and Ashida, K., 3D Micro fabrication using combination technique of nano-scale processing and chemical etching (1st report, Possibility of 3D micro fabrication

- using friction force microscope). *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Vol. 70, No. 696, C (2004) pp. 2533–2540.
- (2) Kawasegi, N., Shibata, K., Morita, N., Ashida, K., Taniguchi, J. and Miyamoto, I.: 3D micro fabrication using combination technique of nano-scale processing and chemical etching (2nd report, possibility of 3D micro fabrication using focused ion beam process), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Vol. 70, No. 696, (2004) pp.2541–2547.
 - (3) Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S, Takano, N., Oyama, T., Ashida, K., Taniguchi, J. and Miyamoto, I., 3D micro fabrication using combination technique of nano-scale processing and chemical etching (3rd report, Dependence of enhanced etching effect on FIB processing conditions and application to 3D micro-fabrication), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Vol. 71, No. 705, (2005) pp.1754–1759.
 - (4) Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S., Takano, N., Oyama, T., Ashida, K. and Park, J. W., 3D micro fabrication using combination technique of nano-scale processing and chemical etching (4th report, Mechanism of Masking Effect), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Vol. 71, No. 706, (2005) pp.2035–2040.
 - (5) Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S., Takano, N., Oyama, T., and Ashida, K., 3D Micro fabrication using combination technique of nano-scale processing and chemical etching (5th report, Dependence of mask on processing conditions), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Vol. 71, No. 706, (2005) pp.2041–2046.
 - (6) Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S, Takano, N., Oyama, T., Ashida, K., Taniguchi, J., Miyamoto, I., Momota, S. and Ofune, H., Rapid nanopatterning of a Zr-based metallic glass surface utilizing focused ion beam induced selective etching, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 89 (2006) 143115.
 - (7) Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S, Takano, N., Oyama, T., Momota S., Taniguchi, J. and Miyamoto, I., Depth control of a silicon structure fabricated by 100q keV Ar ion beam lithography, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 253 (2007) pp. 3284–3291.
 - (8) Kawasegi, N., Morita, N., Yamada, S, Takano, N., Oyama, T., Ashida, K., Taniguchi, J., Miyamoto, I. and Momota S.: Etching characteristics of a silicon surface induced by focused ion beam irradiation, *Int. J. Manuf. Technol. Manag.*, Vol. 9 (2006) pp. 34–50.
 - (9) Berry, I.L. and Caviglia, A.L., High resolution patterning of silicon by selective gallium doping, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 1 (1983) pp.1059–1061.
 - (10) Fuhrmann, H., Döbeli, M., Kötz, R., Mühle, R. and Schnyder, B., Thin oxides on passivated silicon irradiated by focused ion beams, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 17 (1999) pp. 3068–3071.
 - (11) Schmidt, B., Bischoff, L. and Teichert, J., Writing FIB implantation and subsequent anisotropic wet chemical etching for fabrication of 3D structure in silicon, *Sensors Actuators A*, Vol. 61 (1997) pp. 369–373.
 - (12) Chen, L., Morita, N. and Ashida, K., Micro-fabrication of single crystal silicon by using combination technique of nano-scale machining and alkaline etching, *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 67, No.9 (2001) pp.1453–1457.
 - (13) Beardmore, K. M. and Jensen, N. G., Direct simulation of ion-beam-induced stressing and amorphization of silicon, *Phys. Rev. B*, 60 (1999) pp. 12610–12616.
 - (14) Orloff, J., Utlaut, M. and Swanson, L., *High resolution focused ion beam: FIB and its application* (2003) Kluwer Academic / Plenum Publishers.
 - (15) Fujimoto, F. and Komaki, K., *Ion beam engineering* (in Japanese) (1995) Uchida Rokakuho Publishing.
 - (16) Pelaz, L., Marqués, L.A. and Barbolla J., Ion-beam-induced amorphization and recrystallization in silicon, *J. Appl. Phys.*, Vol. 96 (2004) pp. 5947–5976.
 - (17) Seidel, H., Csepregi, L., Heuberger A. and Baumgärtel H., Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solution (I. Orientation dependence and behavior of passivation layers), *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 137 (1990) pp. 3612–3626.
-