

技術紹介

1 ガスクラスターイオンビームを用いた高精度ナノ加工技術

Highly Accurate Nano-processing Technique with Gas Cluster Ion Beam

佐藤 明伸

Akinobu Sato

中央研究所 研究開発部 マネージャー 工学博士

ブーレル エマニュエル Emmanuel Bourelle

中央研究所 研究開発部 工学博士

鈴木 晃子

Akiko Suzuki

中央研究所 研究開発部 主任 理学博士

キーワード： 高精度、エッチング、表面粗さ、ガスクラスター、フォトニック結晶

Keywords： high accuracy, etching, surface roughness, gas cluster, photonic crystal

要 旨

次世代ナノデバイスのキーテクノロジーを目指して、ガスクラスターイオンビームを用いた高精度ナノ加工技術の基礎検討を行いました。SF₆ クラスターおよび Ni マスクを用いた化学的エッチングを利用することによって、シリコンに対する選択比 30 以上の高選択比マスク材料を実現しました。また、ガスクラスターイオンビームの加速エネルギーおよび化学反応性をコントロールすることによって、高速エッチング時でも、従来実現できなかったレベルの加工表面平坦化を達成しました。さらに、ビームの角度入射制御により、マスクレスでの周期的ナノパターン形成を実現しました。

なお、本研究は京都大学との共同研究、および独立行政法人 新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) が推進しているプロジェクト「次世代量子ビームナノ加工プロセス技術」の委託を受けて実施しているものです。

SUMMARY

Toward the key technology of next generation nano-devices, we have conducted the basic study for the highly accurate nano-processing technique using gas cluster ion beam. By utilizing the chemical reactivity between SF₆ clusters and materials, we have realized highly selective etching of Si over Ni mask (>30:1). In addition, by controlling the acceleration energy and chemical reactivity of gas cluster ion beam, the high level flattening of a surface, which has not been realized so far, was achieved even at high-speed etching. The periodical nano-pattern formation in a maskless process was also realized by controlling the incident angle of the beam.

The study is the joint research with Kyoto University and is conducted by referral on the project "Advanced Nano-Fabrication Process Technology Using Quantum Beams" promoted by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

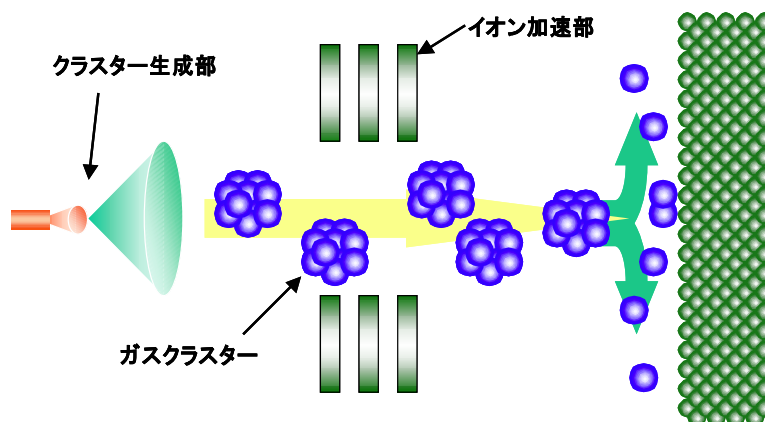


図 1 ガスクラスターイオンビーム装置の概略図

1 まえがき

次世代の半導体デバイスや光デバイス開発には、ナノメートルオーダーでの高精度微細加工技術が必須かつ重要となっています。例えば、光ICの実現が期待されているフォトニック結晶デバイスや、ナノスケールでの次世代インターコネクションデバイスでは、100nm以下のパターン間隔やその垂直加工性、ナノメートルオーダーでの表面粗さをコントロールする必要があります。現状の最先端デバイスのナノ加工技術には、真空装置を用いるドライプロセスとして、反応性イオンエッチング (RIE) やイオンビームエッチング (IBE) が多く用いられています。これらの従来微細加工技術は、加工表面の損傷が大きく、表面粗さもあまり小さくできないなどの問題がありました。われわれはこれらの問題を解決する方法として、ガスクラスターイオンビームを用いた高精度ナノ加工技術に注目しました。本報では、このガスクラスターイオンビームを用いた高精度ナノ加工技術に関して、高アスペクト比加工に必要なマスク材料の選定、化学反応性を用いた高速エッチングでの表面粗さの低減、クラスタービームの角度入射によるナノパターニング、などの基礎検討を行いましたので以下に報告します。

2 ガスクラスターイオンビーム技術

ガスクラスターイオンビーム (GCIB) 技術は、ナノテクノロジー分野のプロセスとして極めて高いポテンシャルを有しています^{1)・5)}。図1に示したように、原子や分子のクラスター(集合体)からなるイオンビームを発生させ、固体表面に照射させるものであり、加工プロセスの新しい分野を切り開きつつあります。この技術は、イオンが発見されて100年余り続いたイオンビーム技術分野に、京都大学などが中心となって日本が新たに開拓・導入した独創技術です。GCIBを利用したナノ加工技術では、数10～数1000の原子や分子からなるクラスターイオン特有の低エネルギー照射効果やラテラルスパッタ効果を活用して、材料内部に損傷を与えることなく加工を行う無損傷ナノ加工、そして、集団のイオンの持つ高密度照射効果によって生じる高い反応性を利用した超高速・高精度ナノ加工を実現することができます。

3 GCIB 用高選択比マスク材料の検討

各種半導体デバイスを微細加工する場合には必ずマスクが必要になりますが、GCIB を用いたエッチングではどのようなマスク材料が適切であるかということ、およびその指針に関して、従来ほとんど検討されていませんでした。また、加工プロファイルのアスペクト比は数 10 程度以上の高アスペクト比を実現したいという要求がありますが、高精度プロセス実現のためにはマスクの厚さは薄くしたいというトレードオフの関係もあります。そこで、我々は高速ナノ加工が実現できる反応性エッチングを用いて、Si に対する高選択比マスクの検討を行いました。

図 2 に各種マスク材料のエッチング率の加速エネルギー依存性を示します。エッチングには SF_6 クラスターを用い、加速エネルギーは 5 ~ 45keV としました。各種マスク材料はスパッタ法により Si ウエハ上に 300 ~ 500nm の膜厚で成膜しました。すべての材料で、加速エネルギーの増加とともにエッチング率が増加しています。これを Si に対する選択比の形で表したものを図 3 に示します。Si に対する選択比は加速エネルギーにはほとんど依存していないことがわかります。また、Ti や Ta の選択比は 5 以下と小さく、選択比が最も大きな材料は Ni であり 30 程度が得られました。これに対して、クラスターの種類を変えて、Ar クラスターを用いて実験を行いました。加速エネルギー 10 ~ 30keV の結果を図 4 に示します。 SF_6 クラスターで選択比が高かった Ni を含めどのマスク材料でも小さな選択比しか得られませんでした。したがって、Si の高選択比エッチングをするためにはガスクラスターの種類が重要なポイントであり、 SF_6 は効果的であることがわかりました。

次に、これら GCIB 高選択比エッチングのメカニズムおよびその材料選定指針について考察してみます。図 5 に、 SF_6 と Ar クラスターを用いた場合のエッチング率の比較を示します。この実験に用いた SF_6 クラスターと Ar クラスターの平均質量はそれぞれ、73000、80000 amu であり、ほぼ同じであります。Ar クラスターを用いた GCIB エッチングでは、どのマスク材料を用いてもエッチング率にそれほど大きな違いはなく、20 ~ 40 atom/ion であります。これに対して、図 4 に示したように、 SF_6 クラスターを用いると Ar クラスターを用いた場合に比較して、1 桁~2 桁大きいエッチング率が得られることがわかります。クラスターの平均質量がほぼ同じなのにエッチング率が異なるのは、ガスクラスターと、マスク材料または Si との化学反応性が異なることが理由であると考えられています。これまでの研究でも、山田らは Si や W に対して SF_6 ガスクラスターを用いると、Ar クラスターを用いた場合と比較して、 SiF_x や WF_x の生成によってエッチングが加速されると報告しています²⁾。 SF_6 クラスターを用いた化学的エッチングをよく理解するために、図 6 に各材料のフッ化物の融点とエッチング率の関係をプロットしてみました。各材料のフッ化物の融点が高くなるにしたがい、エッチング率は小さくなっていることがわかります。これは、材料表面で融点の高いフッ化物が形成されると蒸発しにくくなり、それによってエッチング率が小さくなるものと考えられます。すなわち、Si のフッ化物は融点が低く、そのためにエッチング率が高くなるが、Ni のフッ化物は融点が高いので、エッチング率が小さくなるのです。

これに対して、Ar クラスターを用いた GCIB エッチングの場合には、図 7 に示したように、材料自身の融点とエッチング率に相関があることがわかります。これは Ar クラスター

を用いた場合には化学反応は関与せず、物理的にエッチングされるメカニズムであることが理由です。

以上のように、GCIB 用高選択比マスク材料の検討を行った結果、化学反応性を利用した材料選択により高選択比が実現できることがわかりました。

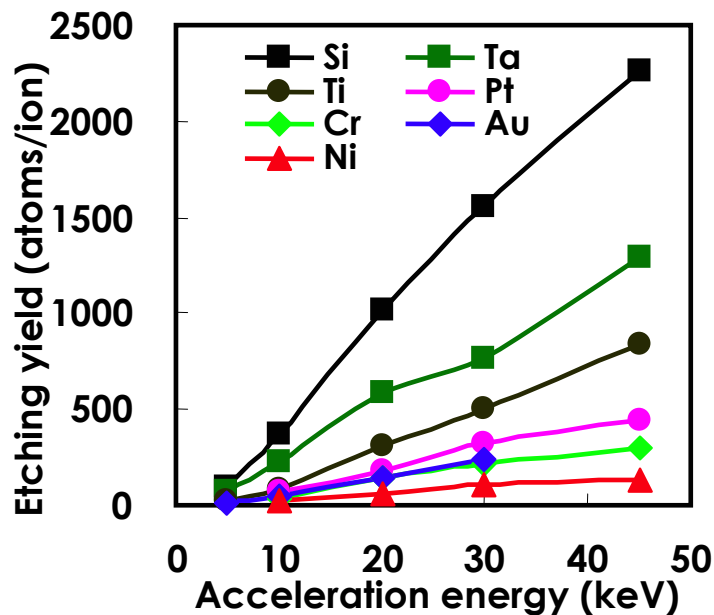


図2 各種材料のエッチング率とSF₆クラスター加速エネルギーの関係

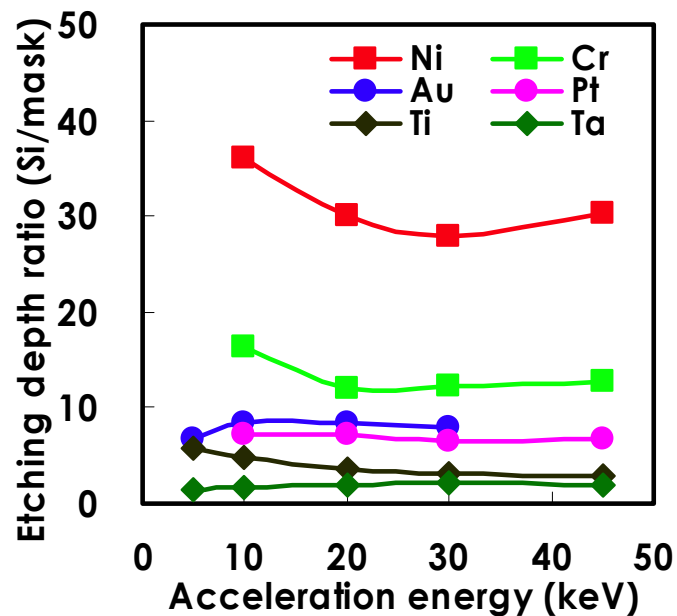


図3 各種材料のSiに対するエッチング選択比の加速エネルギー依存性 (SF₆クラスター)

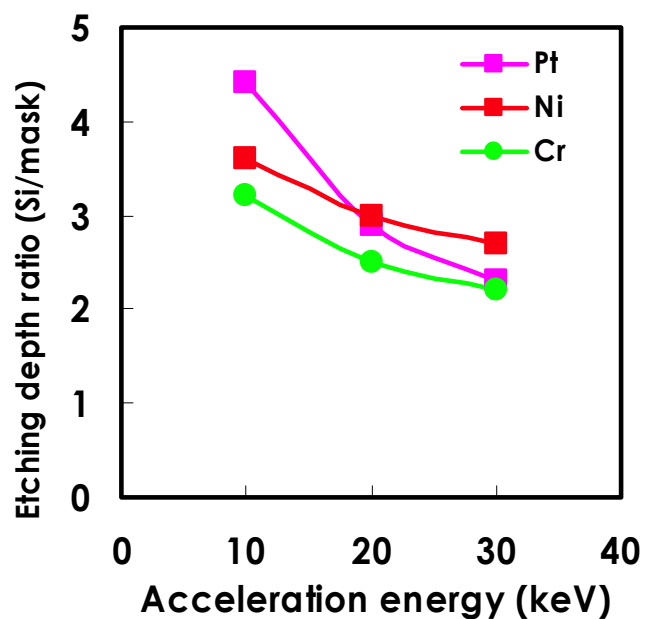


図4 各種材料のSiに対するエッチング選択比の加速エネルギー依存性 (Arクラスター)

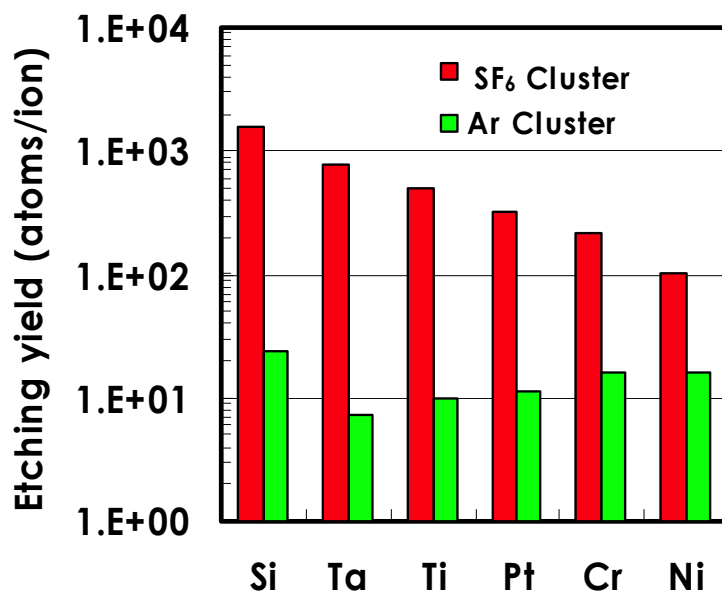


図5 各種材料のエッチング率の比較 (SF₆クラスターとArクラスター)

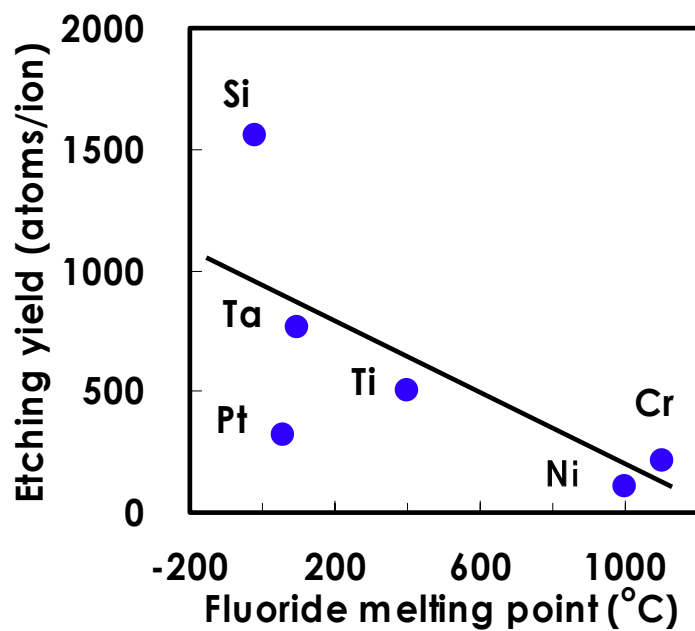


図6 各種材料の SF_6 クラスターでのエッチング率と、各種材料のフッ化物のうち最も低い物質の融点との関係

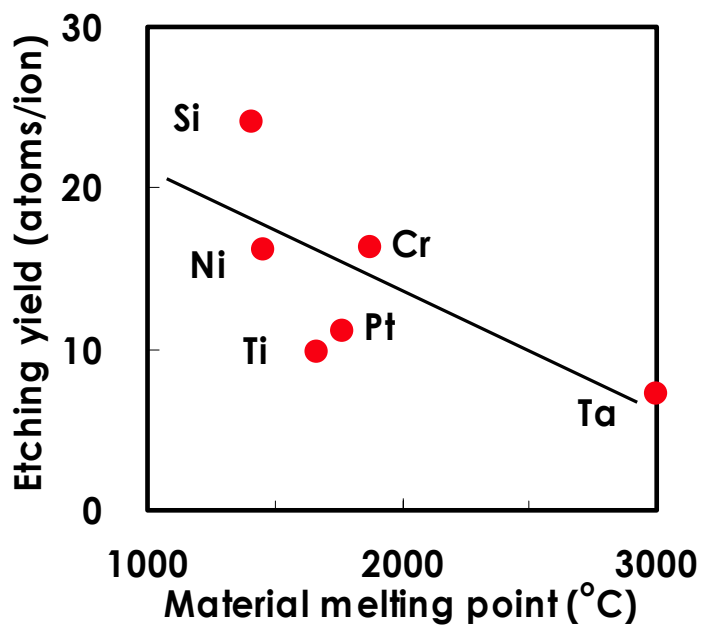


図7 各種材料のArクラスターでのエッチング率と、各種材料自身の融点との関係

4 化学反応性を用いた高速エッチングでの表面粗さの低減

GCIB を用いたナノ加工の大きな利点の一つとして、表面平坦化があります。従来の研究の多くは、パターニングされていない均一な材料表面の平坦化が行われていました³⁾⁻⁴⁾。また、加工に用いるクラスターも化学反応を利用しない Ar などが多く検討されてきました。工業的にはエッチング速度は大きい方が望ましく、3 章で検討したように、GCIB エッチングでは化学反応を利用した方がよいことがわかります。そこで本報では、GCIB 化学的エッチングを用いた場合のエッチング表面の粗さ低減について検討してみました。

図 8 に各種材料に SF₆ クラスター照射後の表面粗さの測定結果を示します。表面粗さは原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて測定しました。Cr 膜について GCIB 照射前後の AFM 像を図 9 に示します。未照射サンプルの表面粗さは、Si はシリコンウエハそのものの値であり、その他はスパッタ成膜直後の値であります。加速エネルギーの増加とともに表面粗さが低減していることがわかります。SF₆ クラスターを用いた表面平坦化においては、物理的エッチングと化学的エッチングの両者の寄与があると考えられますが、表面平坦化に寄与するのはラテラルスパッタ効果が発現する物理的エッチングであると考えられます。加速エネルギーが増加すると物理的エッチングの寄与が相対的に大きくなるために、表面粗さが低減したものと考えられます。

このように、化学反応を利用した高速エッチングにおいても、加工表面の平坦化が実現され、加速エネルギーをコントロールすることで表面粗さを低減できることがわかりました。

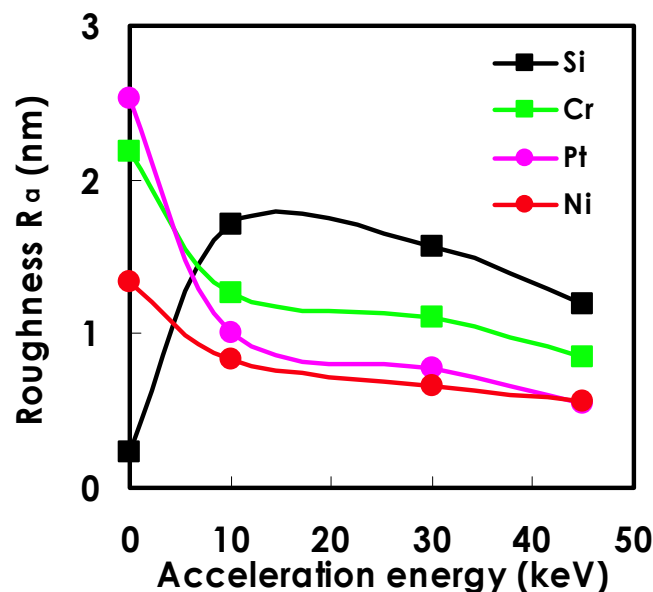
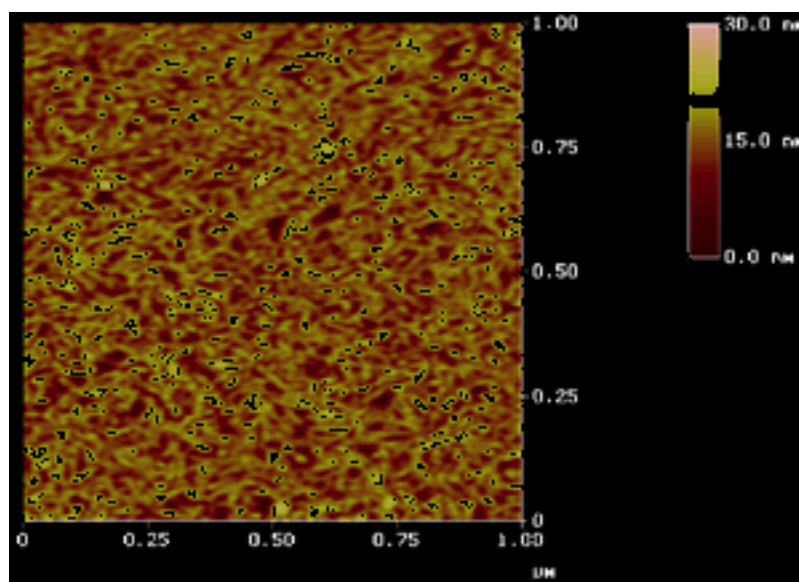
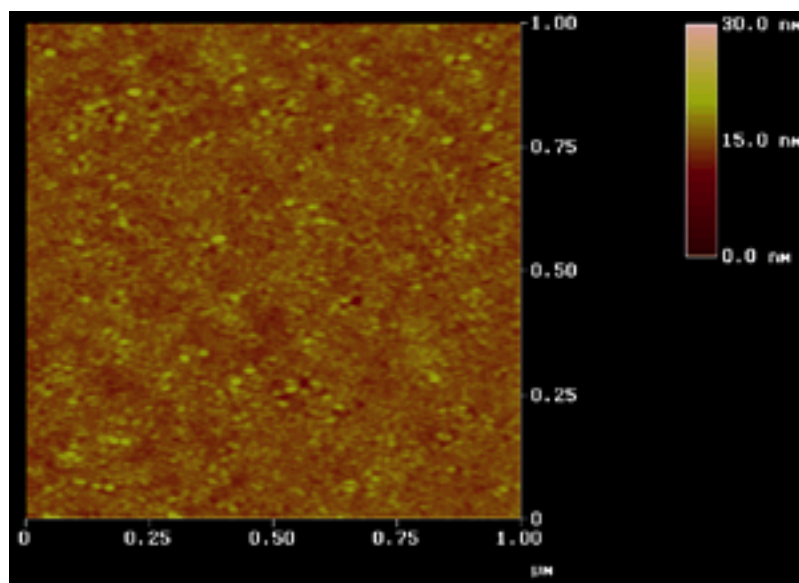


図 8 各種材料の SF₆ クラスター照射後の表面粗さの加速エネルギー依存性



(a) GCIB射前 $R_a=2.18\text{ nm}$



(b) GCIB照射後 $R_a=0.85\text{ nm}$

図9 Cr膜の SF_6 クラスター照射前後の表面粗さ

5 GCIB 角度入射によるナノパターニング

ナノメータースケールでパターニングする技術は、次世代デバイスの中核技術となると考えられます。現在は、短波長光や電子線を用いたリソグラフィ技術が用いられることが一般的ですが、装置が大型化したり、露光に時間がかかったりして、高コストになる問題があります。われわれは GCIB 技術を用いた、マスクレスで、かつ大面積にナノパターニングするプロセスを検討しました。図 10 に各種材料に SF_6 クラスターを角度入射で照射した場合の表面粗さの測定結果を示します。入射角度を大きくしていくと表面粗さが大きくなっていくことがわかります。この表面粗さが大きくなる現象は、表面平坦化への応用としては望ましくないものであり、表面平坦化では入射角度は小さい方がよいことがわかります。しかしながら、クラスタービームの加速エネルギーや入射角度を制御することにより、非常にきれいなナノパターンが形成されることを発見しました。図 11 には Cr 膜に加速エネルギー 20keV、ビーム入射角度 55 度の条件で照射した場合の AFM 像を示します。ビーム入射方向に垂直に、約 100nm ピッチ、高さ 10nm 程度のパターンが形成されていることがわかります。これらのナノパターン形成メカニズムに関しては現在検討中ですが、この周期的ナノパターン形成を、次世代デバイスであるフォトニック結晶や量子ドットデバイス、さらには次世代インターコネクションデバイスに応用することを考えています。

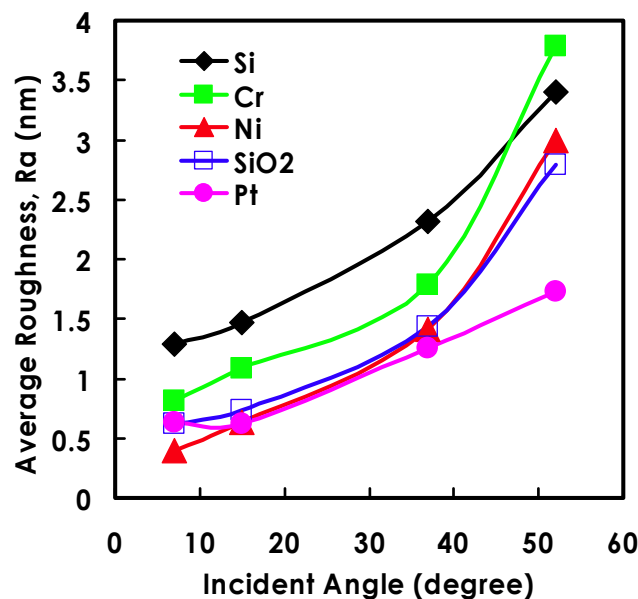


図 10 各種材料の SF_6 クラスター角度入射で照射した後の表面粗さ

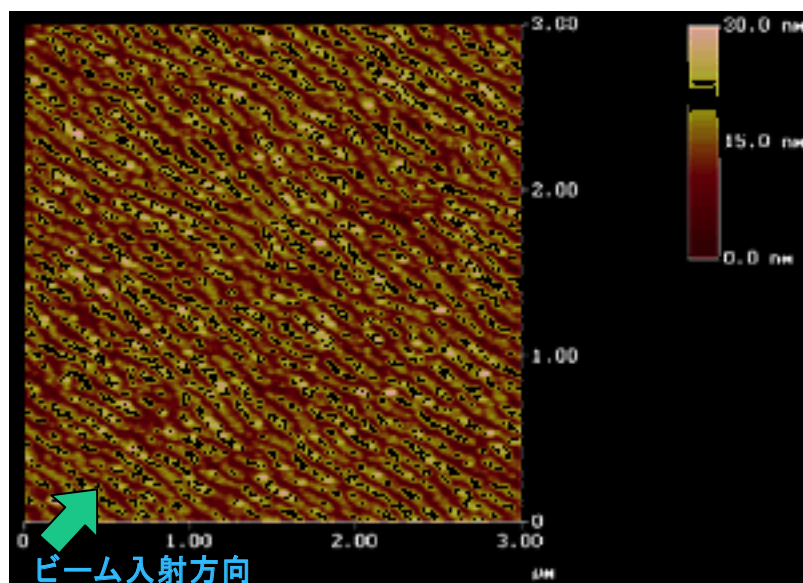


図 11 Cr膜のSF₆クラスター角度入射（52度）による周期的ナノパターン形成

6 むすび

次世代ナノ加工技術として、ガスクラスターイオンビームを用いた高精度ナノ加工技術の基礎検討を行いました。

GCIB 用高選択比マスク材料に関しては、SF₆ クラスターおよび Ni マスクを用いて化学反応性を利用することによって、選択比 >30 を実現しました。また、化学反応を利用した高速エッチングにおいても、加工表面の平坦化が実現され、加速エネルギーをコントロールすることで表面粗さを低減できることがわかりました。さらに、GCIB の角度入射によりマスクレスの周期的ナノパターン形成を実現しました。

今後は、この高精度ナノ加工をフォトニック結晶デバイスやインターコネクションデバイスに適用し、実用性実証をしていきたいと考えています。

なお、本研究は、京都大学との共同研究、および独立行政法人 新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）が推進しているプロジェクト「次世代量子ビームナノ加工プロセス技術」の委託、により行なわれたものであり、共同研究者の京都大学 松尾二郎助教授、瀬木利夫博士に深謝いたします。

【参考文献】

- 1) H. Kitani, et al. : “ Incident angle dependence of the sputtering effect of Ar-cluster-ion bombardment,” Nucl. Instr. and Meth., B 121, p.489 (1997)
- 2) I. Yamada, et al. : “Materials processing by gas cluster ion beams,” Mat. Sci. and Eng. R 34, p.231 (2001)
- 3) I. Yamada, et al. : “Surface modifications by gas cluster ion beams,” Nucl. Instr. and Meth. B 106, p.165 (1995)
- 4) N. Toyoda, et al. : “Surface smoothing mechanism of gas cluster ion beams,” Nucl. Instr. and Meth. B 161, p.980 (2000)
- 5) I. Yamada, et al. : “Non-linear processes in the gas cluster ion beam modification of solid surfaces,” Mat. Sci. and Eng. A 253, p.249 (1998)