

355nm 偏光 UV レーザによる単結晶 SiC 面のナノレベル加工

国立東京工業高等専門学校 機械情報システム工学専攻 機械工学科
准教授 角田 陽
(平成20年度 一般研究開発助成 AF-2008217)

キーワード：355nm 偏光 UV レーザ，単結晶 SiC，微細加工

1. はじめに

単結晶 SiC (炭化ケイ素, シリコンカーバイド) は, Si よりも優れた半導体特性を有しているため, 次世代半導体材料として期待され, 実用化もはじまっている. さらに, その高い融点や硬度に起因する耐熱性や耐摩耗性などの機械的特性に優れていることにも着目されている. 従来より, 通常サイズの機械要素部品としての利用がなされているものの, 高硬度ゆえに除去加工に代表される一般的な機械的加工法による SiC の高精度微細表面形状創成は十分ではない現況にある. しかし, 高精度微細加工が実現できれば, 単結晶 SiC は X 線ミラーなどの機械構造部材としての利用にとどまらず, 半導体特性と機械的特性の両者の同時有効活用など, 広範な応用が期待できる. 例えば, マイクロコンポーネント材料として単結晶 SiC が適用できれば, MEMS (Micro Electro-Mechanical System) / NEMS (Nano Electro-Mechanical System) の機能面材料として多様な活用ができる.

そうしたなかで, 我々は, 基板上における分子の自律的整列現象 (エピタキシャル成長) を原理とする付着堆積成長 (成膜) 技術である MBE (分子線エピタキシ) 法を, 機械構造体用超精密微細表面創成技術として応用し, さまざまな基板上に単結晶 SiC 薄膜を作製することを試みてきた. その結果, 適切な条件下においては, ナノメートル・オーダ (ナノレベル) の精度に達する高純度無欠陥単結晶 SiC 超平滑薄膜面が単結晶 Si 基板に作製できることを明らかにしている.

そして, 355nm 偏光 UV レーザによる, それらの単結晶 SiC 面に対する, 数 nm 以下の溝および穴形状といったナノ構造創成を検討している.

本研究では, 単結晶 SiC 薄膜面上に, 355 nm 偏光 UV レーザによってナノ構造の創成を試み, 加工条件とナノ表面性状との関係について実験的に評価し, さらにマイクロ構造の試作を通じて, ナノレベル創成メカニズムを解明し, ナノレベル加工の実用化の基礎とすることを目的とする.

2. 実験装置・実験方法

図1に本研究で用いた UV レーザ加工装置の概略構成

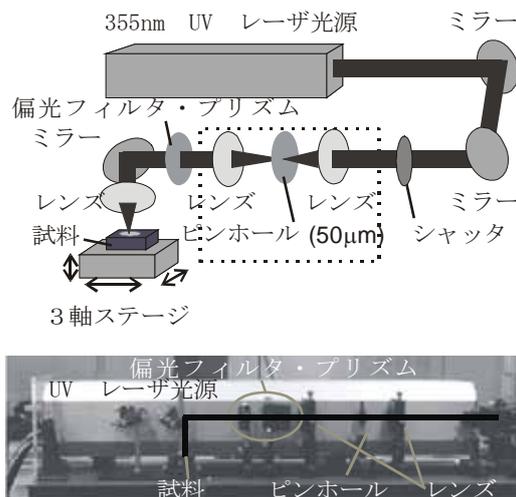


図1 レーザ加工装置の構成概略図

を示す. UV レーザの仕様は, 波長 355 nm, 繰り返し周波数 80 MHz, パルス幅 15 ps, 出射ビーム径 1 mm である.

光学系においては, 偏光フィルタ, プリズム, レンズ系などにより, 試料部で焦点があうように調整している. また, 試料が設置される 3 軸移動ステージは, X 軸および Y 軸の水平 2 軸方向が, 分解能 2 μm , ストローク 50 mm で, Z 軸垂直方向が, 分解能 200 nm, ストローク 20 mm の仕様のもを用いた.

被加工材としては, Si 基板上に成長させた単結晶 SiC 薄膜面の他に, 比較のために, Si 基板, SiC 基板, Si 基板上に堆積させた Si_3N_4 薄膜および SiO_2 薄膜なども対象とした.

3. UV レーザによるマイクロ構造の形成実験結果

3.1 マイクロ穴形成実験結果

図2は, レーザ照射時間を 1 秒とし, レーザフルエンスを変化させたときの, 単結晶 SiC 薄膜面への穴加工結果を示す. 調整の結果, 試料への照射位置でのレーザースポット径はおおよそ 2 μm であった. レーザフルエンスが 0.023 J/cm^2 以上の場合, 穴の直径は約 5 μm で, 穴の周辺に熱の影響を受けていると考えられる痕跡が観察できる.

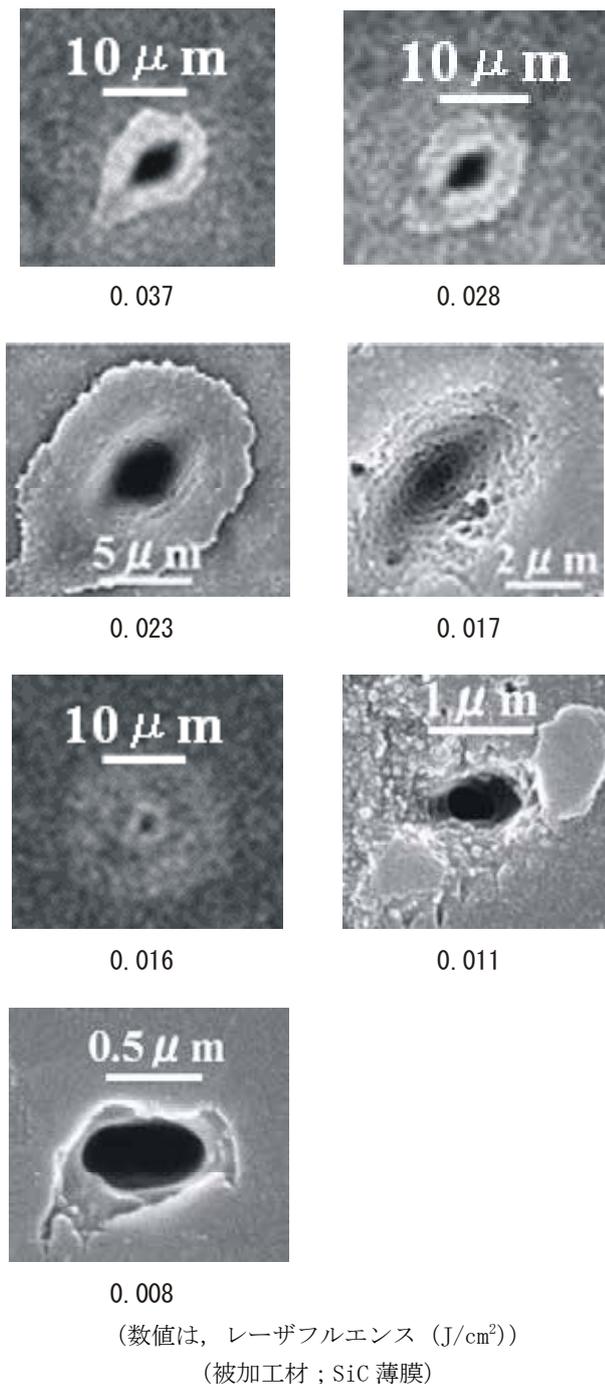


図2 マイクロ穴加工結果の走査型電子顕微鏡観察像

一方、レーザフルエンスが 0.017 J/cm^2 以下の場合、レーザのスポット径以下の穴が加工できていると見受けられる。これは、レーザ光強度がレーザ光のスポット内で分布をもち、ある強度分布以上の部分だけで加工がなされているといえる。さらに、レーザフルエンスが 0.008 J/cm^2 の時では、熱の影響をほとんど受けずに、穴の直径約 $0.5 \mu\text{m}$ の加工ができた。これらから、レーザフルエン

スを材料物性にあわせて適切に設定することで、レーザの熱影響を抑えた所望の加工が行えると推察される。したがって、本研究で使用したようなUVレーザを用い、ハードマスクなどを使用しないで、直接的に、数 μm ~ 数百 nm の加工が行える可能性があるといえる。

3・2 マイクロ溝形成実験結果

レーザフルエンスを 0.023 J/cm^2 で一定として、ステージ走査（移動）速度を変化させて、単結晶SiC薄膜に対して溝加工をした結果を図3に示す。ステージ走査速度が遅い場合、穴加工と同様に加工部の周囲に熱影響に熱の影響を受けていると考えられる痕跡が観察できる。

一方、ステージ走査速度を速くし、例えば $2400 \mu\text{m/s}$ で加工した場合、レーザのスポット径以下の溝幅 $1 \mu\text{m}$ 以内の溝の加工ができた。これは、単位面積、単位時間あたりに照射されるレーザ光強度がステージ走査速度によって変化するためと考えられる。

比較のため、SiC基板で同様に加工を行った結果を図4に示す。レーザフルエンス： 0.045 J/cm^2 を一定でステージ移動速度： $400 \mu\text{m/s}$ と $2400 \mu\text{m/s}$ で溝加工を行ったところ、移動速度： $400 \mu\text{m/s}$ では、熱の影響を大きく受けたためか、連続した溝加工が行えなかったが、速度 $2400 \mu\text{m/s}$ では、溝幅が $1 \mu\text{m}$ 以内の溝の加工が単結晶SiC

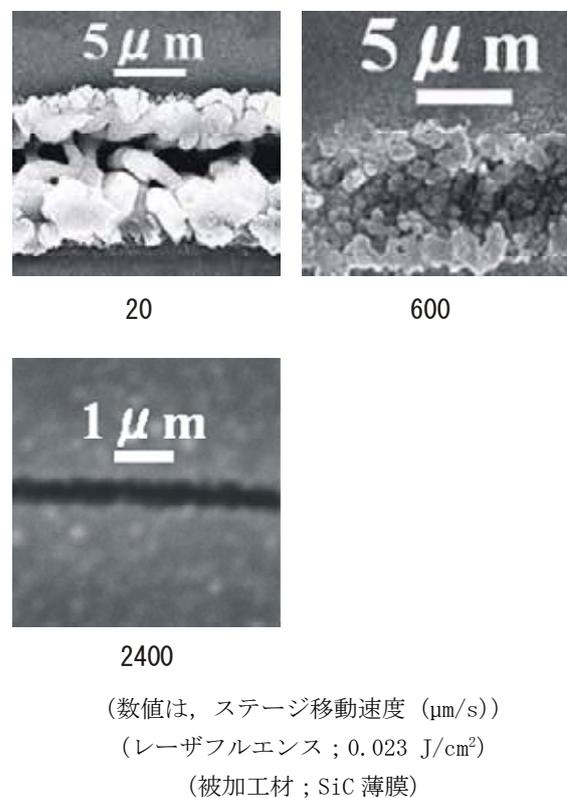
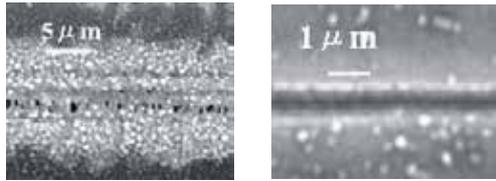


図3 マイクロ溝加工結果の走査型電子顕微鏡観察像

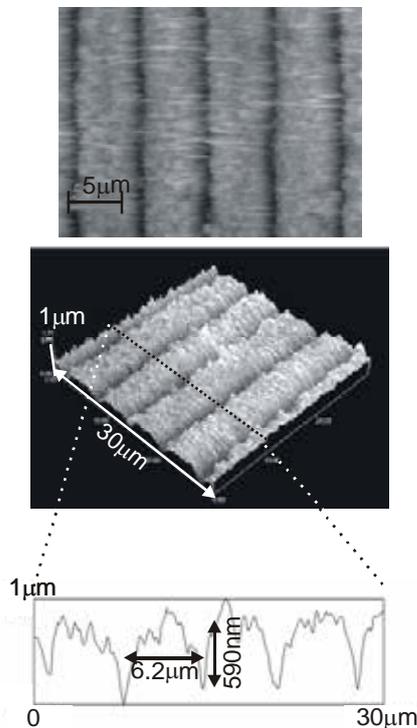


400

2400

(数値は、ステージ移動速度 (μm/s))
 (レーザーフルエンス ; 0.045 J/cm²)
 被加工材 ; SiC 基板

図4 マイクロ溝加工結果の走査型電子顕微鏡観察像



(レーザーフルエンス ; 0.023 J/cm²)
 (被加工材 ; SiC 薄膜)

図5 マイクロ溝加工結果の原子間力顕微鏡観察像

薄膜の場合と同様に行えた。

次に溝と溝の間を 6 μm 間隔でステージ走査速度 2400 μm/s を一定にして連続的に溝加工を行った結果の一例を図5に示す。溝幅は 760 nm となっており、単独の溝加工の場合に比べて、低いレーザーフルエンスで溝が形成された。これは連続的に溝加工を行うと、熱影響などで溝の周辺部分の化学結合状態が変化して、低いレーザーフルエンスで加工が可能になることが考えられるが、詳細メ

カニズムは解析中である。

4. マイクロ構造加工部の物性評価

超微小押し込み硬さ試験機 (ナノインデンテーション試験機, エリオニクス ENT-1100a) を用いて、溝加工をした SiC 薄膜や Si 基板に対して溝と溝の間に超微小圧子を押し込むことで硬度やヤング率を求めた。

図6に単結晶 SiC 薄膜, Si 基板および SiC 基板にマイクロ溝加工を施したものおよび加工をしていない Si 基板に対して、押し込み深さを変えて硬さ試験をした結果を示す。単結晶 SiC 薄膜の場合、押し込み深さが 500 nm 以上になると、硬さの値が一定になるのは、薄膜の厚さが 500 nm 程度で、基板に圧子が到達しているためと考えられる。また、薄膜のついていない基板で押し込み深さが小さい場合に硬さの値が安定していないのは、自然酸化膜などの影響のためと考えられる。

図6から、マイクロ溝加工をした SiC 薄膜 (■) は、溝加工した Si 基板 (▲) よりもレーザーによる硬度の低下が見られず、無加工の Si 基板 (△) とほぼ同様の硬度を維持した。SiC 薄膜にレーザー加工によって溝加工を施すことにより、硬度の低下が抑えられたといえる。溝加工が加工部およびその周囲の機械的特性になんらかの影響を及ぼしている可能性がある。

そこで、レーザーフルエンスを変えて溝加工を行った場合について、それぞれの加工部における硬さやヤング率の違いを超微小押し込み硬さ試験により調べた結果を図7に示す。

レーザーフルエンス 0.028 J/cm² のレーザーを照射して加工した場合、加工をしていない SiC 薄膜と比較して、硬度やヤング率が低下していた。一方、レーザーフルエンス 0.023 J/cm² のレーザーを照射して加工した場合は、硬度やヤング率の低下は見られなかった。また、レーザーフルエンス 0.011 J/cm² のレーザーを照射した場合も、硬度やヤング率の低下は見受けられない。これらから、レーザ

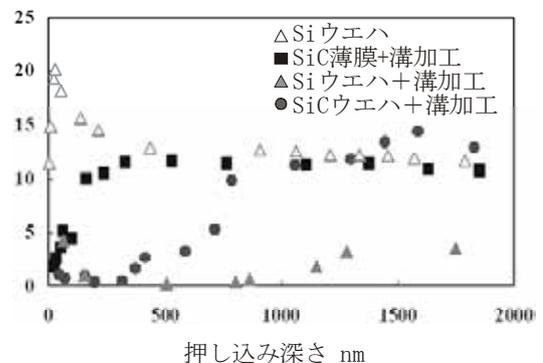


図6 マイクロ溝加工結果の原子間力顕微鏡観察像

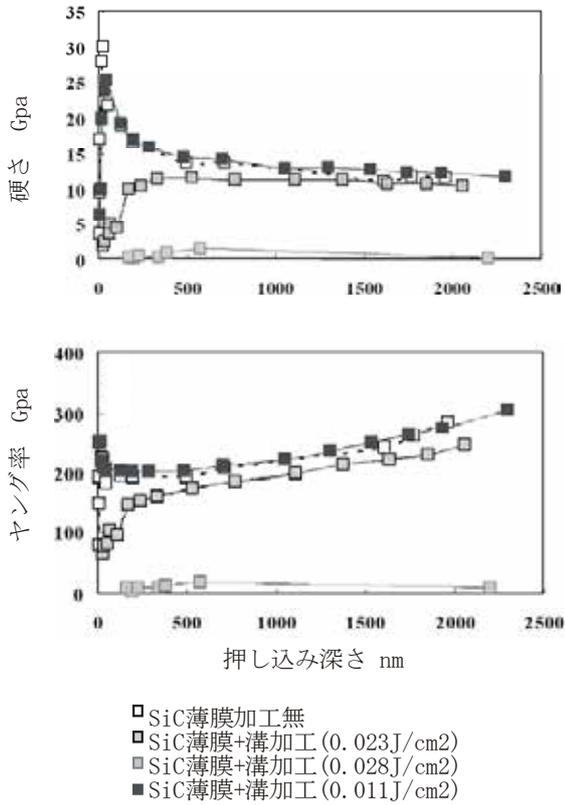


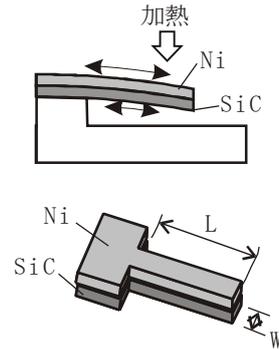
図7 マイクロ溝加工結果の原子間力顕微鏡観察像

ルエンスが高くなると、加工部周辺の材料特性や機械的特性になんらかの影響を与えていると考えられる。化学結合状態になんらかの変化をもたらしている可能性があるため、XPS (X線光電子分光) 分析などの解析を考慮中である。

5. マイクロ構造体の試作

単結晶 SiC 薄膜を材料として、数十 μm オーダの微細片持ちはり構造のバイモルフ形式熱型マイクロアクチュエータの作製を試みた。高ヤング率の SiC 材料を用いることで、一般に発生力が小さい熱型アクチュエータの問題を改善し、さらに高温環境下での使用も可能となり、また微細化により応答性の改善も期待できる。

バイモルフ構造を構成する一方の薄膜には、SiC 薄膜と同様に高ヤング率、高融点で同膜との熱膨張率の差が大きい材料として Ni (ニッケル) を選択した。Ni 薄膜の膜厚は、SiC 薄膜 (膜厚 180 nm) と組み合わせた場合に理論上最大変位が得られる膜厚を選択した (膜厚 200 nm)。作製したマイクロアクチュエータの概略仕様を図 8 に示す。また、作製したはり幅 20 μm のマイクロアクチュエ



W μm	10	20
L μm	10~50	20~100

図8 試作マイクロアクチュエータの概略

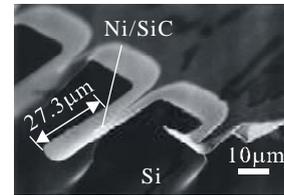


図9 試作マイクロアクチュエータの一例

ータの一例の観察結果を図 9 に示す。

6. まとめ

355nmUV レーザを用い、単結晶 SiC 面にナノレベルの加工をするに際しての加工条件とナノレベルの表面性状との関係について実験的に評価し、適切な加工条件を選択すれば、ナノレベルの穴や溝の加工ができることを示した。

謝辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の一般研究開発助成により実施した。援助下さった財団および関係各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Y. FURUKAWA, H. SASAHARA, et al.; Principal Factors Affecting the Sub-Micrometer Grooving Mechanism of SiC Thin Layers by a 355 nm UV Laser, Annals of the CIRP, Vol. 55, No. 1, 2006, pp. 573-576