超精密加工専門委員会

次世代の超精密加工 原子制御製造プロセスの創出に向けて*

Atomically Controlled Fabrication Process as the Next Generation Ultra-precision Machining Technology

山内和人**

Kazuto YAMAUCHI

Key words

ultra-precision machining, atomically controlled fabrication process, atmospheric pressure plasma chemical vapor deposition, catalyst referred etching, functional materials

1. はじめに

本専門委員会の歴史は、昭和39年、初代の委員長である故津和秀夫先生（大阪大学名誉教授、精機学会元会長）がミシガン大学に留学され、調査研究の中で Ultra-Precision Machining と称する $0.2\sim0.02\mu\text{m}$ の加工精度を目指す研究を多く見つけられたのが出発点である。わが国においても早急に進めるべきだとの認識のもと、昭和41から42年の間に活動した超精密加工分科会を経て、昭和43年に、現在の超精密加工専門委員会が発足している。この後、日本の工業技術は目覚ましく進歩し、本専門委員会が当初掲げた目標は達成され、平成を迎えるころには、目指すべき精度に1nmが挙げられていた。このころ、材料の分野では、分子線エビタキシーなどを駆使した薄膜材料の開発が主たる研究対象になり、計測の分野でも、走査型トンネル顕微鏡や高分解能透過電子顕微鏡などによる原子直視技術が一般化した。そして、加工の分野でも、半導体デバイス基板や光学デバイスなどにおいて、nmレベルの精度が要求され始めたのである。平成元年、こうした時代の要求に応えるべく、Sub-nm、すなわち原子サイズの精度の先端加工技術を目指して活動することを新たな趣旨に掲げ、森勇藏先生（大阪大学名誉教授）へと委員長が引き継がれた。さらに20年を経て、本分野は、「原子・分子スケールのモノづくり」を共通のキーワードとして、現在も幅広く発展を続けている。

こうした中、本専門委員会は、本年度より、森勇藏先生から小生へと委員長が交代する。「原子・分子スケールの

モノづくり」をキーワードとしながら、既存の体系に基づく製造技術が直面している高度化の限界を突破できる「新たな原理に基づいた原子制御製造プロセス」の実現を目標に掲げている。特に、精度の追求や装置の大型化が極限に達する中で、大面積における原子レベルの制御性や、環境調和性をもった高機能化製造プロセスの創出を目指し、このために必要な学問や技術の体系化を進めたいと考えている。

2. 産学連携の要

今後、是非とも進めたいのが、産学連携のさらなる強化である。すでに使い古された言葉ではあるが、まさに、これからが、真の結実を見る時期にあると考えられる。製造技術において、世界No.1の地位にあるわが国の企業であっても、グローバルな競争に曝され、リスクを伴う新プロセスの開発や、これを担う人材の育成は、後手に回っている現状がある。すなわち、既存の製造技術を利用することを前提とし、その中で選択されたプロセス技術の改良と改善が、生産技術研究の中心にならざるを得ない事情がある。この時期にこそ、大学は、大学でしかできない「大学ならではのモノづくり」にチャレンジする必要がある。すなわち、従来の加工技術や計測技術の枠にとらわれることなく、新たな原子・分子レベルの物理・化学現象の探索とその応用によって、サイエンスオリエンテッドな、真にオリジナリティーの高い研究を進める必要がある。

本専門委員会は、次の時代を拓くモノづくりイノベーションの核となる原子・分子レベルの製造技術を、従来の分野にとらわれることなく体系化し、産業界に見える形で提供していきたいと考えている。また、日本の企業が、将来にわたってトップランナーであるためには、サイエンスオリエンテッドな生産技術研究を支える博士研究者の育成が不可欠である。本専門委員会は、人づくりにおける産学連携の要としても、大学で研鑽を積む博士課程学生の研究成果や研究者としてのパーソナリティーが、産業界から見える場を提供していきたいと考えている。

*原稿受付 平成20年8月28日

**正会員 大阪大学大学院工学研究科（大阪府吹田市山田丘2-1）

山内和人

1981年大阪大学工学部卒。1884年大阪大学大学院工学研究科博士課程中退。博士（工学）。大阪大学助手、助教授を経て、2003年大阪大学教授（工学研究科精密科学・応用物理学専攻）。超精密加工・計測、表面物性、X線光学などの研究に従事。

図1 大気圧プラズマ発光の様子（ギャップ 0.8 mm, 直径 105 mm）

図2 大気圧プラズマ CVD によりエピタキシャル成長した 4 インチ Si エピウエハ外観（左），断面 TEM 像（右）

図3 触媒基準エッチングされた 4H-SiC (0001) 面の光干渉顕微鏡による観察（領域 $64\ \mu\text{m} \times 48\ \mu\text{m}$, PV: 1.083 nm, RMS: 0.104 nm）

図4 触媒基準エッチングされた 4H-SiC (0001) 面の AFM 像（領域 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, PV: 0.731 nm, RMS: 0.086 nm）（左）と STM 像（領域 $3.5\ \text{nm} \times 3.5\ \text{nm}$ ）（右）

3. 原子制御製造プロセス

本専門委員会が目指す原子制御製造プロセスの例を 2 つ紹介する。1 つ目は、大気圧プラズマを用いた成膜プロセスである。大気圧下での高密度なラジカルの生成による高速成膜に加え、ラジカルによる表面の局所加熱（極めて効率のよい化学アニール）により、低温下でも、物性の優れた薄膜の形成が可能である。2 つ目は、機能材料の表面創成プロセスとして開発が進む触媒基準エッチング法である。機械研磨では、ポリシャーを基準面とし、これを加工物表面に平均化して転写することによって、高精度平面を得ている。本手法では、結晶学的ダメージが導入されることのない化学エッチングに基準面を導入し、SiC や GaN において、極めて高精度な表面の創製に成功している。以下に、それぞれの内容を示す。詳細は、末尾に示した文献などを参照されたい。

3.1 大気圧プラズマ CVD 法

大気圧プラズマは、高ラジカル密度、低イオンエネルギーという特性をもった新しいプラズマである。図 1 に、励起周波数 150 MHz, He ベース大気圧プラズマの発光の様子を示す。これに SiH_4 , H_2 などを反応ガスとして混合した大気圧プラズマ CVD 法では、低温・高速で、しかも高品質な半導体薄膜の形成が可能である。図 2 左は、直径 100 mm の (001) Si ウエハ全面に、従来法と比べて 600°C 以上低い温度 ($470\sim 570^\circ\text{C}$) で高速形成したエピタキシャル Si 膜の集光灯下写真である。右図は、試料断面

の透過電子顕微鏡 (TEM) 像であり、まったく欠陥のない良質の単結晶 Si が成長していることが分かる。また、非常に高純度であること、電気特性は市販の Si ウエハよりも優れていることが明らかになっている¹⁾²⁾。

3.2 触媒基準エッチング法

化学エッチングには異方性があり、通常、平滑面の創成に用いることはできない。本手法では、「基準平面上でのみ化学エッチングを誘起」することで、化学的手法によるダメージレスな平滑化を目指している。そのような加工法は次の 3 つの特徴を満たすことによって実現すると考えられる。①基準面上でのみ反応種がつくられる、②反応種の寿命が短い、③基準面の物性は長時間変化しない、である。基準面上で反応種が作られ、その反応種の寿命が短ければ、反応種を基準面近傍に局在化させることができる。その基準面を加工物表面に近づければ、基準面近傍に局在している反応種が加工物表面凸部と選択的に反応し、「基準平面上でのみ化学エッチングを誘起」することができる。基準面の物性は長時間変化しないことが必要であり、触媒材料を基準面に用いることによって、これを達成している。本加工法は、触媒基準エッチング法 (Catalyst-Referred Etching; CARE) と名付けられている³⁾。CARE では、その原理から、結晶欠陥や結晶面方位の影響を受けにくく、多結晶材や焼結材の平坦化も可能である。

触媒基準面に Pt を用い、エッチャントに HF 水溶液（そのままでは SiC に対して不活性）を用いて 4H-SiC (0001) を平滑化した例を示す⁴⁾。光干渉顕微鏡による $64\mu\text{m} \times 48\mu\text{m}$ 領域の観察では、図 3 に示すように RMS 0.104 nm であり、極めて平坦である。微視的には、図 4 左の AFM 像から、広狭のテラスが繰り返す高度に組織化したステップ・テラス構造が見て取れる。また、ステップ高さは、最小の 1 bilayer である。図 4 右の STM 像から、テラス内は平滑であり、 1×1 構造を有することが分かる。 1×1 の原子像は、4H-SiC (0001) のウェットプロセス表面では、世界で初めて観測されたものである。

4. お わ り に

委員長交代の時期を迎え、本専門委員会の歴史や今後の抱負、対象とする製造技術の実例などを紹介した。本専門委員会では、研究会を年数回程度、定期的に開催し、学界と産業界が一体となって、次世代の原子制御製造プロセスの創出を目指すとともに、新たな学問分野の開拓と、その体系化を進めていきたい。同時に、モノづくりを担う若手

研究者育成においても、学界と産業界の連携の要としての役割を果たしていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Low-Temperature Growth of Epitaxial Si Films by Atmospheric Pressure Plasma Chemical Vapor Deposition Using Porous Carbon Electrode, H. Ohmi, H. Kakiuchi, N. Tawara, T. Wakamiya, T. Shimura, H. Watanabe, and K. Yasutake, Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 8424-8429.
- 2) Photoluminescence Study of Defect-Free Epitaxial Silicon Films Grown at Low Temperatures by Atmospheric Pressure Plasma Chemical Vapor Deposition, K. Yasutake, N. Tawara, H. Ohmi, Y. Terai, H. Kakiuchi, H. Watanabe, and Y. Fujiwara, Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 2510-2515.
- 3) Novel abrasive-free planarization of 4H-SiC (0001) using catalyst, H. Hara, Y. Sano, H. Mimura, K. Arima, A. Kubota, K. Yagi, J. Murata, and K. Yamauchi, J. Electron. Mater., 35 (2006) L11-L14.
- 4) Atomic-scale flattening of SiC surfaces by electroless chemical etching in HF solution with Pt catalyst, K. Arima, H. Hara, J. Murata, T. Ishida, R. Okamoto, K. Yagi, Y. Sano, H. Mimura and K. Yamauchi, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 202106-1-3.