

SiC ウェハ表面のステップアンバンチング現象

ステップアンバンチング現象の発見 ～半導体表面を原子レベルで平坦にする新技術～

発表のポイント

- 従来の半導体製造技術では、SiC ウェハ表面を非常に平坦にできるものの加工によるダメージ層が残ったり、ダメージ層はないものの表面が荒くなったりしてデバイス特性に悪影響を及ぼすという課題がありました。
- SiC ウェハ表面を単一のシンプルなプロセスで、ダメージ層もなく原子レベルで平坦にする新技術として応用可能な**ステップアンバンチング現象**を発見しました。
- 半導体製造工程において、化学機械研磨を含むプロセスが不要になり、コストと時間を大幅に削減できる可能性があると期待されます。

早稲田大学理工学術院の乗松 航（のりまつ わたる）教授（名古屋大学客員教授）らの研究グループは、名古屋大学博士後期課程学生の榊原 涼太郎（さかきばら りょうたろう）、中国内モンゴル民族大学講師の包 建峰（ほう けんほう）、日本原子力研究開発機構研究員の寺澤 知潮（てらさわ ともお）、名古屋大学未来材料システム研究所名誉教授の楠 美智子（くすのき みちこ）らとの共同研究で、半導体表面を原子レベルで平坦にする新技術として応用可能な、**ステップアンバンチング現象**を発見しました。

パワーデバイス材料として使われる半導体である SiC において、ウェハの表面を原子レベルで平坦にすることは、デバイス特性や新材料作製に関して極めて重要です。SiC ウェハ表面は、ステップと呼ばれる原子 1 個程度の高さ（約 0.25 nm）の段差を持っています。SiC を加熱すると、表面の原子が移動することでステップが集まり、はじめに 1～1.5 nm の高さステップを形成し、さらに高温で加熱すると数 nm～数十 nm のステップになります。これはステップバンチングと呼ばれ、ステップが次第に高くなっていくことはあっても、低くなることはないと言われてきました。このたび本研究グループは、ある特定の条件下に置くと、一旦高くなったステップが低くなることを見出しました。これを**ステップアンバンチング現**

象と名付けました。

従来の半導体製造技術には、表面は非常に平坦にできるものの加工によるダメージ層が残る手法や、ダメージ層はないものの表面が少し荒くなる手法はありました。それに対して本研究の手法では、単一のシンプルなプロセスで、ダメージ層もなく原子レベルで平坦な表面を得ることができます。従って、半導体製造工程のコストと時間を大幅に削減できる可能性があるかと期待されます。

本成果は、2023年7月19日（水）付（現地時間）で、米国物理学協会が発行する『Applied Physics Letters』誌に掲載されます。従って、本件の報道解禁を日本時間2023年7月20日（木）午後1時といたします。本研究は、文科省科研費基盤研究Bや、早稲田大学各務記念材料技術研究所共同利用・共同研究拠点事業などの支援のもとで行われたものです。

（1）これまでの研究で分かっていたこと（科学的・歴史的な背景など）

半導体材料の中でも炭化ケイ素（SiC^{※1}）は、現在パワーデバイスの基盤材料として、非常に多岐にわたって利用されています。例えば、東海道新幹線N700S系では、SiCパワーデバイスを使ったコンバータ・インバータにより、大幅な小型化・省電力化を実現しています。急速に開発が進む電気自動車でも、SiCパワーデバイスは中核になるとされています。SiCパワーデバイスにおいて、SiCウェハの表面形態は非常に重要です。表面に凹凸が存在すると、熱酸化膜の厚さが不均一になってしまい、デバイス特性に重大な悪影響を及ぼします。

一方でSiCは、新規2次元材料を作製する際の基板としても用いられます。例えば我々は、SiC熱分解法によって、ウェハースケールで単一方位のグラフェンを作製する技術を開発してきました。SiC表面の原子レベルの凹凸は、グラフェンの電子物性にも深刻な影響を与えます。

SiCウェハを機械的に研磨すると、肉眼では鏡面に見えても、原子レベルでは図1(a)のようにランダムな研磨痕が存在しています。このような凹凸は、SiCデバイスやグラフェンデバイスにとって致命的です。そこで、化学機械研磨（CMP^{※2}）や水素エッチング^{※3}と呼ばれる手法で、表面の平坦化が行われてきました。CMPでは、研磨痕を除去し、図1(b)のような高さ0.25 nmのステップと呼ばれる段差のみにすることができますが、表面近傍に加工によるダメージ層が残ると言われています。一方で水素エッチングでは、水素雰囲気中、高温で加熱することで、研磨痕や加工ダメージ層を除去することができますが、高温での処理によってステップバンチング^{※4}と呼ばれる現象が起こり、図1(c)のようにステップの高さが5-10 nm程度以上と大きくなってしまいます。従って、表面加工ダメージのないように、かつステップ高さを1 nm程度以下に抑えることが重要です。

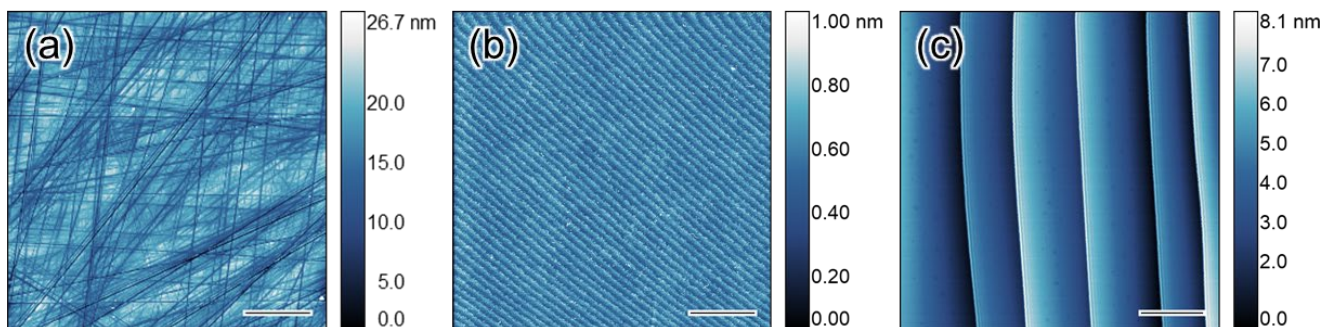


図1 SiC表面の原子間力顕微鏡像。(a) 機械研磨後、(b) CMP後、(c) 1600℃での水素エッチング後。スケールバーは2 μm。

（2）今回の研究で新たに実現しようとしたこと、明らかになったこと

本研究では、SiC 単結晶基板に対して、比較的シンプルなプロセスで、ステップ高さ 1 nm 程度以下の原子レベルで平坦な表面を得ることを目指しました。

ステップバンチング現象は、高さ 0.25 nm のステップが集まって 1~1.5 nm のステップになるミニマムステップバンチング (MSB) と、MSB 後のステップがさらに集まって数 nm 以上の高さになるラージステップバンチング (LSB) に分けられます。一般的には、MSB が生じた後に LSB が生じるので、これらは不可逆な現象だと考えられてきました。それに対して、本研究で明らかになったのは、LSB が生じて 5~10 nm の高さになった後、ある特定の条件下に置くと、1~1.5 nm の低い高さに戻るという現象であり、これを本研究グループはステップアンバンチング現象と名付けました。

(3) そのために新しく開発した手法

本研究グループは、SiC 熱分解グラフェンの研究において SiC 表面形態を制御している過程で偶然、ステップアンバンチング現象を発見しました。4%程度の水素を含むアルゴンガス (Ar/4% H_2) 雰囲気中で SiC を加熱すると、1600℃では図 2(a)のように LSB が起こります。LSB が生じた SiC を 1400℃で保持すると、5~10 nm の高さであったステップが、図 2(b)→(c)→(d)のように次第に 1~1.5 nm の低いステップの集合に分かれていきます。この一連の現象が、ステップアンバンチングです。原子レベルで模式的に表すと、(e)の状態から(f)のように変化していくことに対応します。すなわち、Ar/4% H_2 雰囲気中で、はじめに高温で保持した後に低温で保持することで、LSB の後に MSB が生じることがわかりました。なお、水素を含まないアルゴンガス雰囲気中で同じ実験を行っても、ステップアンバンチング現象は起こりませんでした。

従来不可逆だと思われていた現象が、特定の雰囲気では可逆現象であることを見出したと言えます。これにより、1~1.5 nm 程度のステップのみからなる、原子レベルで平坦な表面を得ることを可能としました。

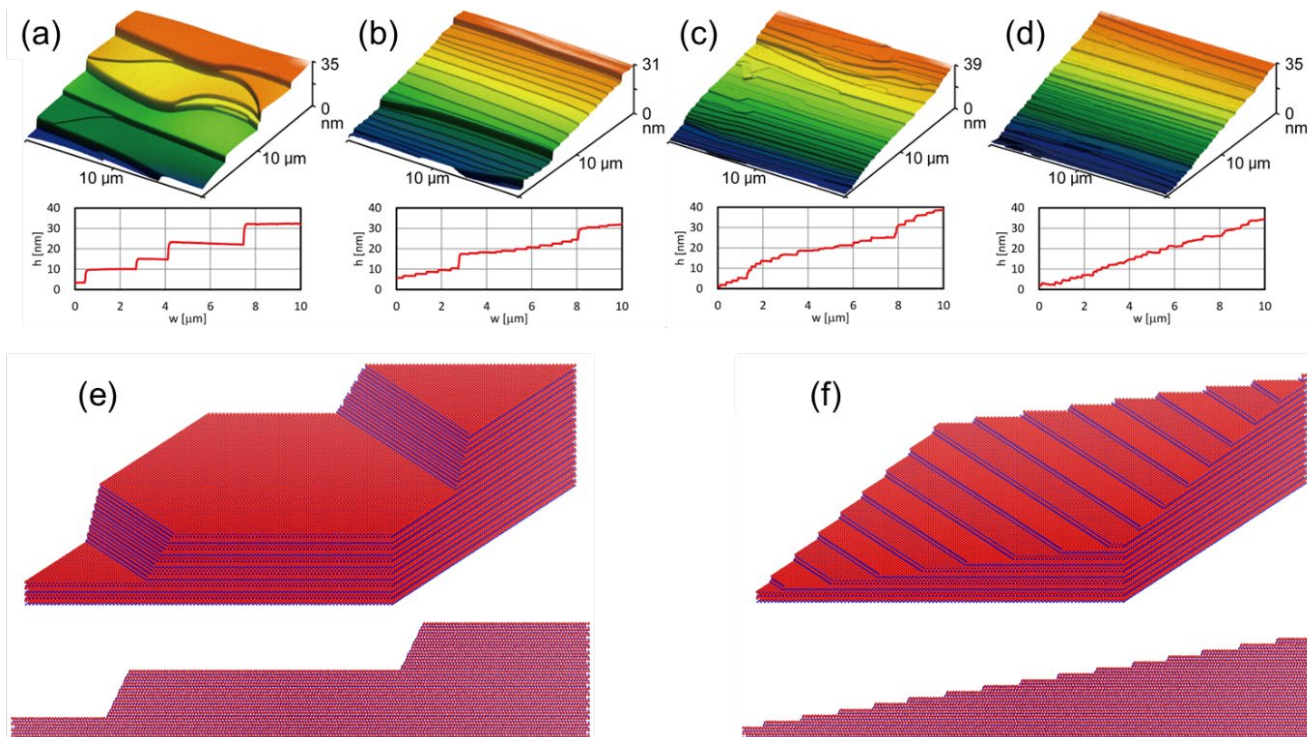


図 2 ステップアンバンチング現象。Ar/4% H_2 雰囲気中で、(a) 1600℃で 10 分加熱、(b) その後 1400℃で 10 分保持、(c) 20 分保持、(d) 60 分保持した試料の表面形態。(e, f) (a)から(d)の変化の模式図。

(4) 研究の波及効果や社会的影響

SiCのステップバンチング現象に関して、MSB、LSB共にこれまで多くの議論が行われ、様々なメカニズムが提案されてきました。それらのメカニズムに基づくと、LSBが生じた後にMSBが生じる現象を単純に説明することはできません。そのため、本成果は表面科学理論に一石を投じるものと考えられます。

また、一般的な半導体製造プロセスにおいて、インゴットを切断してウェハとし、その表面を機械研磨した後で、CMPと水素エッチング処理が施されます。CMPだけでは加工ダメージ層が残り、単純な水素エッチングだけではLSBが生じてしまいます。それに対して、研磨痕の残るSiC表面に対して、Ar/4% H_2 雰囲気中でまず高温で処理することで研磨痕を除去し、その後低温で保持すれば、原子レベルで平坦な表面を得ることができます。すなわち、本技術によって、加工ダメージ層もなく原子レベルで平坦な表面を得られる上に、CMPを含むプロセスを削減できる可能性があります。これは、半導体製造工程をシンプルにすることができるため、大幅なコスト・時間の削減が可能になることも期待されます。

(5) 今後の課題

本研究では、半導体としてSiCのみを対象としました。一方で、半導体としては窒化ガリウム(GaN)やヒ化ガリウム(GaAs)など、他にも様々な物質があります。これらに関しても、結晶構造が類似していることからステップアンバンチングが生じる可能性があります。他の半導体物質への本技術の適用が今後の課題です。

(6) 用語解説

※1 SiC

ケイ素Siと炭素Cからなる半導体物質。Siよりバンドギャップが大きいためワイドギャップ半導体と呼ばれ、耐電圧性が高いことから電力変換などのパワー半導体として用いられている。

※2 化学機械研磨(CMP)

半導体基板表面を機械的に研磨する際に、研磨液に酸・アルカリなどを含めることで、その化学作用によって極めて平坦な研磨面を高速で得る技術。SiCでは、最小構造単位である高さ0.25 nmのステップのみで形成された図1(b)のような表面を得ることができる。半導体製造プロセスに必須の技術であるが、室温で機械的に加工するため、表面近傍に加工ダメージ層が残ることが課題。

※3 水素エッチング

SiやSiCなどの半導体を、水素を含む雰囲気中で、千数百度で加熱すると、表面からSiやCが水素によって除去される現象。加工ダメージ層も合わせて除去することができるが、ステップバンチング現象が同時に起こるため、ステップの高さは図1(c)のように数nm~数十nmとなってしまう。

※4 ステップバンチング

高さの低いステップが集まって高いステップになる現象。bunchとは、束になるという意味。SiCにおいて、最小高さ0.25 nmのステップが4あるいは6つ集まって1.0あるいは1.5 nmの高さのステップになるMSBと、それらがさらに複数集まって数nm~数十nmの高さになるLSBに分かれる。MSBはエネルギー

ギー論的に安定な表面が現れることで生じ、LSB は外因性の速度論的な効果で生じると考えられている。

(7) 論文情報

雑誌名 : Applied Physics Letters

論文名 : Step unbunching phenomenon on 4H-SiC (0001) surface during hydrogen etching

執筆者名 (所属機関名、役割) : Ryotaro Sakakibara (名古屋大学、実験・解析・論文執筆)、Jianfeng Bao (名古屋大学・内モンゴル民族大学、実験・解析・論文編集)、Keisuke Yuhara (名古屋大学、実験)、Keita Matsuda (名古屋大学、実験・解析)、Tomo-o Terasawa (名古屋大学・日本原子力研究開発機構、実験・解析・論文編集)、Michiko Kusunoki (名古屋大学、解析・論文編集)、and Wataru Norimatsu (名古屋大学・早稲田大学、総括・解析・論文執筆)

掲載予定日 (現地時間) : 2023 年 7 月 19 日 (水)

掲載 URL : <https://pubs.aip.org/aip/apl/issue/123/3>

DOI : <https://doi.org/10.1063/5.0153565>

(8) 研究助成

研究費名 : 科研費基盤研究 B

研究課題名 : 半絶縁性 SiC 上ウェハスケールグラフェンはエレクトロニクス応用に最適なのか?

研究代表者名 (所属機関名) : 乗松航 (名古屋大学 : 助成当時)

研究費名 : 新学術領域研究公募研究

研究課題名 : 固体電解質/ナノカーボン界面での Li 挿入脱離機構解明と新機能創出

研究代表者名 (所属機関名) : 乗松航 (名古屋大学 : 助成当時)

研究費名 : 科研費新学術領域研究「原子層科学」計画研究

研究課題名 : グラフェン関連原子層の新規合成法および大面積合成法の開発

研究代表者名 (所属機関名) : 楠美智子 (名古屋大学 : 助成当時)

研究費名 : 早稲田大学各務記念材料技術研究所環境整合材料基盤技術共同研究拠点共同研究プロジェクト

研究課題名 : 低環境負荷ナノカーボン材料の作製と評価

研究代表者名 (所属機関名) : 乗松航 (名古屋大学 : 助成当時)