



名古屋大学
NAGOYA UNIVERSITY

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2025 年 8 月 19 日

報道機関 各位

世界初成功！ハロゲンフリーのプラズマプロセスで 次世代半導体材料を原子レベルで微細に加工・制御

【本研究のポイント】

- ・ハロゲンフリープラズマ^{注1)}を用いた原子層エッチング(ALE)^{注2)}を開発した。
- ・最先端半導体デバイスに用いられ、難エッチング材料である酸化ハフニウム(HfO_2)の異方性原子層エッチング^{注3)}を室温で実現した。
- ・SDGs(持続可能な開発目標)に向け、次世代半導体デバイスの実用化を支えるプラズマエッチング技術^{注4)}の推進が期待される。

【研究概要】

名古屋大学低温プラズマ科学研究センターの蕭 世男(シャオ シーナン)特任教授、堀 勝 特任教授らの研究グループは、台湾の明志科技大学との共同研究で、ハロゲン(フッ素、塩素など)を使用しないプラズマプロセスにより、最先端半導体デバイスにおける強誘電メモリやゲート絶縁膜に用いられている酸化ハフニウム(HfO_2)の異方性原子層エッチングに世界で初めて成功しました。

半導体デバイスの高集積化、高性能化のために、回路パターンの微細化が進められており、それに応じて新しい材料やデバイス構造の開発も進められています。近年、超微細トランジスタにおける最先端ゲート絶縁膜や強誘電体メモリの分野においては、 HfO_2 の原子層エッチング技術の研究開発が不可欠です。しかし、ハロゲン系ガスを用いたプラズマエッチングでは、生成されるハフニウムのハロゲン化物の揮発性が低いことに加え、Hf と O の結合エネルギーが高いため、 HfO_2 は「難エッチング材料」と言われています。ハロゲン系プラズマによるエッチングモデルの観点から、高温によって揮発性を高めること、あるいは高エネルギーのイオンを利用し、物理的な衝撃により反応生成物を除去(スパッタリング)する方法しか取れないと考えられています。

本研究では、独自に開発したリアルタイム表面構造分析装置を利用し、表面のエッチング反応機構を解明しました。この成果により、最先端半導体デバイスの実用化に対し、難エッチング材料である HfO_2 の最先端微細加工技術を実現できました。さらに、ハロゲン系ガスを使わないことで、持続可能性な開発目標の達成に向けたプラズマ技術が推進されることが期待されます。

本成果は、2025 年 7 月 22 日付の学術誌「Small Science」に掲載されました。

【研究背景と内容】

シリコン半導体デバイスの微細化、高集積化の進展に伴い、パターン寸法^{注5)}のスケーリングが極限まで進められ、さらに三次元構造の採用など素子の構造が複雑となり、エッチングプロセスに関する技術的要求が高まっています。また、デバイス性能のさらなる向上に向けて高性能材料の導入が活発に議論されています。近年、強誘電性である酸化ハフニウム(HfO_2)は、超微細トランジスタのゲート絶縁膜として広く使用され、次世代の非揮発強誘電体メモリ^{注5)}への応用が注目されています。一方、原子レベルの加工制御が可能な原子層エッチング(Atomic Layer Etching: ALE)技術が注目を集め、実用化に向けた研究開発が世界中で盛んに行われています。このような背景を踏まえ、次世代半導体デバイスの実用化に向けて HfO_2 に対する高精度なプラズマエッチング技術の開発が急務です。

HfO_2 のプラズマエッチングでは、ハロゲン化合物の揮発性が低く、(例えば、フッ化物の沸点は 970°C)、また Hf と O との結合エネルギーが高く、 HfO_2 はいわゆる難エッチング材料と言われています。室温ではハロゲンを含む反応性の化学種が HfO_2 とは反応しにくく、自発的なエッチング反応は困難です。そのため、高エネルギーイオンを表面に衝突させ、反応生成物を物理的に除去する方法が不可欠と考えられています。しかし、高エネルギーのイオン衝突によって生じるダメージが、電子デバイスの性能を劣化させる原因にもなります。

本国際共同研究グループは、低圧高密度プラズマ生成装置を使用し、窒素プラズマ照射と酸素プラズマ照射を交互に行うことによって、室温で HfO_2 の異方性原子層エッチングを実現しました。

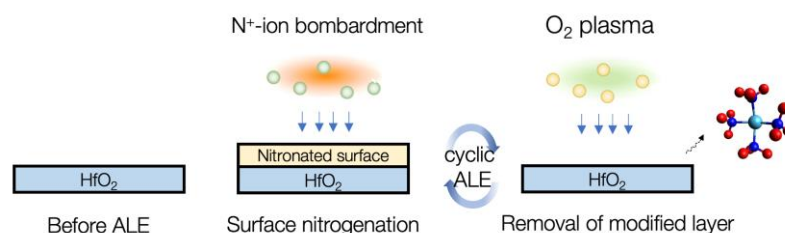


図 1. HfO_2 の ALE の概念図

本手法では、図1に示すように、窒素プラズマ照射により、窒素イオンが HfO_2 膜表面の酸素原子を窒素原子に入れ替え、窒化ハフニウム(HfN_4)の表面層が形成されます。その後、酸素プラズマ照射によって、この表面層が室温で揮発性の高い反応生成物となり、除去されます。これらの反応をリアルタイム赤外線吸収分光法による表面分析装置を使用して観察し、反応生成物の構造解明と各ステップの反応モデルの構築を行いました(図2)。さらに、窒素イオンのエネルギーを低く制御することで、ALE プロセス処理前よりも、表面の粗さが低下する結果(図3)が得られ、低ダメージ ALE を実現できることが確認されました。

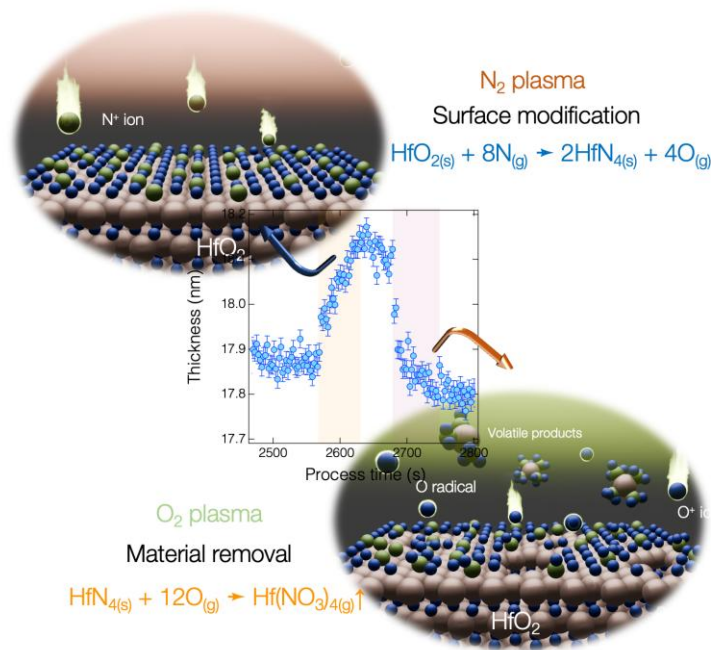


図2. HfO₂ の ALE プロセス処理のリアルタイム膜厚変化と表面反応モデル。(真ん中のグラフはエッチングプロセス時間(横軸)経過に伴う膜厚(縦軸)の変化。窒素プラズマ照射で HfN₄ の表面層が形成した。その後、酸素プラズマ照射で、揮発性の生成物が除去され、膜厚が減少してきた。)

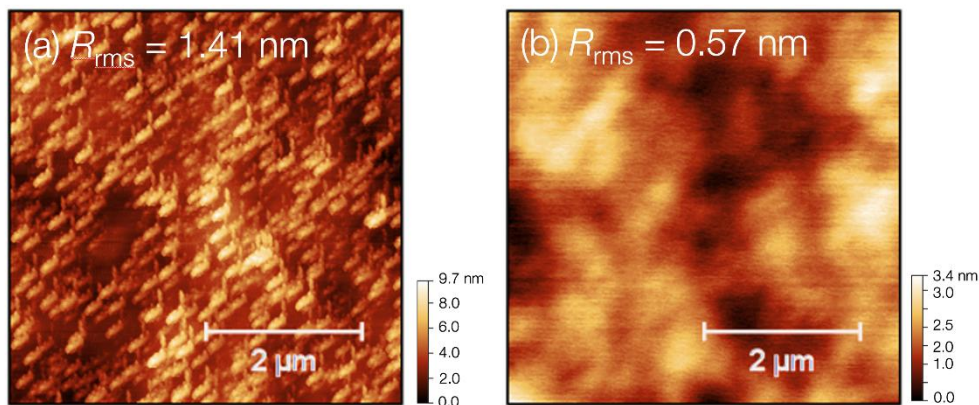


図3. 原子間力顕微鏡(AFM)による表面荒さ (a)ALE 前 (b)ALE 後。

【成果の意義】

本研究は、国際連携共同研究により、ハロゲンフリープラズマを用いた HfO₂ の異方性原子層エッチングプロセスを室温で創出することに成功しました。これまで難エッチングとされてきた HfO₂ に対し、実用的な ALE プロセスを確立したことは、次世代半導体デバイスの製造技術の発展において、極めて重要なマイルストーンとなると考えられます。さらに、本手法では環境に有害なエッチングガスを使わず、持続可能な開発目標(SDGs)の達成にも貢献が期待されます。

【用語説明】

注 1)ハロゲンフリープラズマ:

ハロゲン系ガス(フッ素、塩素、臭素などを含むガスの総称)を用いる通常のプラズマエッチングでは揮発性が高い反応生成物を生成し、それらが除去されることによって、材料をエッチングする。しかし、ハロゲン系ガスは、種類によって環境に有害になり、毒性が強く、燃焼もしにくいという特徴がある。ハロゲンフリープラズマは、ハロゲン系ガスを使わない、環境に優しいプラズマプロセス。

注 2)原子層エッチング(ALE):

エッチング技術の一つで、化学種を表面に吸着させる反応過程と反応生成物を脱離・除去する過程を分離し、それぞれのステップを繰り返すことによって、原子層レベルの微細加工を可能にする技術。最先端の半導体デバイス製造で広く使用されるようになってきている。

注 3)異方性原子層エッチング:

異方性エッチングは、マスクの下まで反応が進まず、マスク寸法通りにパターンを形成するエッチング。

注 4)プラズマエッチング技術:

真空容器の中に導入したガスを高周波放電などにより解離、電離して、活性な化学種(イオン、およびラジカルと呼ぶ電荷中性の化学種)を用いて、基板温度を比較的低温のままで、機能性材料をエッチング(所望する部分の材料を除去してパターンを形成する)方法。

注 5)パターン寸法:

ナノメートル (nm) のオーダーで表示される。現在、量産されている半導体の回路幅は、数 nm から数十 nm 程度。

注6)強誘電体メモリ:

半導体メモリの一種であり、強誘電体材料が持つ分極特性が電界を加えることにより変化することをデータ記憶に運用するデバイス。利点としてフラッシュメモリよりも高速であり、消費電力も小さいことがあげられる。

【論文情報】

雑誌名: Small science

論文タイトル: Halogen-Free Anisotropic Atomic-Layer Etching of HfO_2 at Room Temperature

著者: Shih-Nan Hsiao, Pak-Man Yiu, Li-Chun Chang, Jyh-Wei Lee, Makoto Sekine, and Masaru Hori

※下線は本学関係教員

DOI: 10.1002/smssc.202500251

URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/smssc.202500251>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。

東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

