

# 光研磨による超平滑化技術の創成と応用展開

豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授

八井 崇

## 1. テーマ設定の背景

電子デバイスおよび光デバイスの発展には、素形材表面の平滑化が最も重要な鍵となる。これは、素形材表面の粗さによって、デバイス中のキャリアとなる電子や光が散乱され、その結果、エネルギーロスが加速度的に増大するためである。従来の表面平滑化技術は、化学機械研磨法（CMP）によって行われているが、平滑化に限度があること、平滑化された基板に機械的欠陥や異物が残留してしまうこと、などの深刻な問題を生じる。そこで、CMPを利用しない非接触かつ、原子レベルでの平滑化が可能な究極の加工技術の開発が求められている。

## 2. 素形材分野との関連性

全く新しい表面改質技術によるデバイス性能の飛躍的向上。さらには、従来不可能であった表面改質技術による新産業創出が期待される。

## 3. 研究開発の成果

著者は、CMPに代わる表面平滑化方法として、光研磨による非接触平滑化手法（近接場光エッチング、図1）を開発した<sup>1)</sup>。平滑化には、光解離によって活性化される分子を利用するが、一般に、照射する光の波長が分子の吸収端よりも短波長光の場合、分子は一樣に解離される。その結果加工対象物は一樣に削られるため、表面の平滑度は加工前と大きく変化しない。これに対して、候補者の開発した手法では、分子の吸収端よりも長波長の光を利用することが特長である。この長波長光を照射した場合でも、結果として、様々な材料、形状に対して原子オーダーでの平滑化が実現することに成功した。この原理については、物質表面の波長以下のより小さい微細構造が選択的にエッ

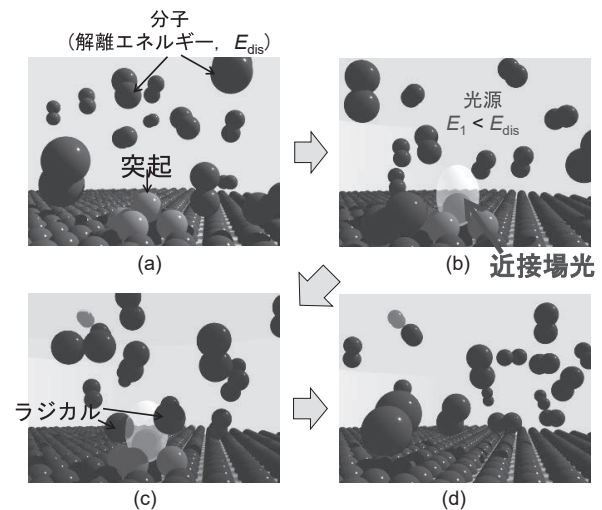


図1 近接場光エッチングの原理図

チングされて平滑化が実現していることから、以下の原理仮説が提唱されている。

すなわち、ナノスケールの表面凸部に光が照射されると、分子スケールで空間的に非一様な電場勾配が発生する。この領域に分子が存在すると、分子中に多重極子が新たに生じ、その結果、これまで光学禁制（双極子禁制）であった多段励起により本来吸収されない長波長の光が吸収され分子解離を引き起こすというものである<sup>2)</sup>。この仮説によれば、表面凸部のみで選択的に分子が解離し、凸部が選択的にエッチングされるため、自動的に原子オーダーでの平滑化が可能となる。第一原理による理論計算では、非一様な電場分布によって光学禁制の分子振動励起と、その結果による多段励起が発生することを示した<sup>3)</sup>。

本手法を用いて、様々な材料（ガラス、結晶、プラスチックなど）の表面平滑化を実証した(図2)。また非接触手法であるため、立体構造の平滑化にも成功した(図3)。

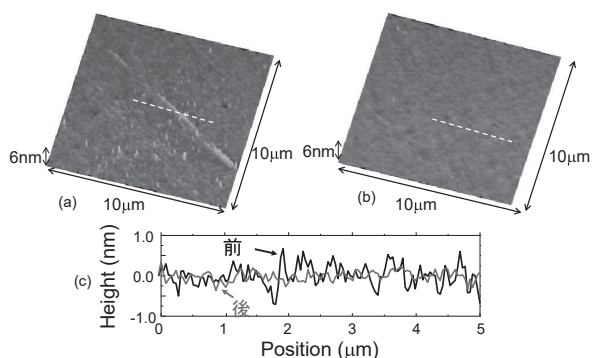


図2 近接場光エッチングによるガラス基板の平滑化。表面形状像:(a) エッチング前、(b) エッチング後、(c) 断面像

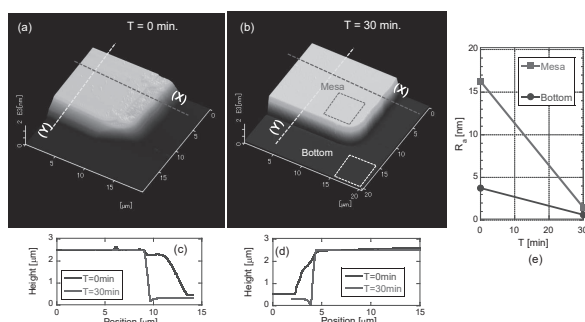


図3 立体構造の平滑化

#### 4. 訴求点

CMP法に変わる平滑化手法として、近年ガスクラスターイオンビーム (GCIB) 法が検討されている。これはイオン化された集団(クラスター)気体分子を対象物に照射して物理的に削る手法である。GCIB法により、CMP法よりも平滑化が可能で、表面に損傷が少なくなると期待されている。その一方で、真空チャンバー中に基板を導入する必要があることから生産性に問題がある。

これに対して、本手法は、提案者が世界に先駆けて開発した手法であり超平滑化、高生産性などの点において他の追随を許していない。下記にその特長を示す。

- (1) 超平坦化：表面凸部のみが選択的にエッチングされるため、最終的に得られる基板表面は原子寸法での平坦性を有し、GCIB法よりも平滑化が可能となる可能性を有する。
- (2) 高生産性：エッチング種を選択することで真空チャンバーが不要となること、平坦化の対象となる基板上の微細な凹凸において自発的に特異な光化学反応を作用させるため光源の

走査が不要であること、平滑化されるとエッチングが停止する自己制御型プロセスであること、などから生産性の高い手法である。また、透明基板の場合、複数枚重ねて同時にエッチングが可能であるため、生産性の大幅な向上が実現する。

- (3) 多種多用途性：砥石を用いた場合にはエッチングが不可能であるマイクロレンズなどの表面、円筒内壁面など多様な形状の表面に適用可能である。

#### 参考文献

- 1) T. Yatsui, K. Hirata, W. Nomura, Y. Tabata, and M. Ohtsu, "Realization of an ultra-flat silica surface with angstrom-scale average roughness using nonadiabatic optical near-field etching," *Applied Physics B*, Vol. 93, No. 1, pp.55-57 (2008)
- 2) T. Yatsui, M. Yamaguchi, and K. Nobusada, "Nano-scale chemical reactions based on non-uniform optical near-fields and their applications," *Progress in Quantum Electronics*, Vol. 55, pp. 166-194 (2017)
- 3) T. Yatsui, H. Saito, K. Nishioka, B. Leuschel, O. Soppera, and K. Nobusada, "Effects of a power and photon energy of incident light on near-field etching properties," *Applied Physics A*, Vol. 123, Iss. 12, 751 (2017)
- 4) T. Yatsui, *Nanophotonic Chemical Reactions*, Springer International Publishing, 2020 (137 pages).