

光の中で半導体のナノ運動とフォースを読む！ ～光による構造的強さの変化を測るために～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科の中村 篤智 准教授、松永 克志 教授らの研究グループは、独ダルムシュタット工科大学の Xufei Fang (シューフェイ・ファン) 博士および東京大学大学院工学系研究科総合研究機構の幾原 雄一教授、栃木 栄太 助教との共同研究で、半導体に外部から光(フォトン)と力(フォース)を同時に入射する手法を新たに開発し、結晶のシワ(転位^{注1)})の運動が光照射で変化する現象をナノスケールで計測することに初めて成功しました。

高度に情報化された現代社会において、半導体材料の重要性は非常に高いものとなっています。半導体には壊れないこと、つまり、高い信頼性や耐久性が求められます。半導体の構造的な強さが光環境に強く依存することが発見されて以来、各種半導体の本当の強さを知るための手法開発が期待されてきました。本研究では、完全にコントロールされた光(フォトン)と力(フォース)をナノスケールで同時に半導体に入射し、半導体の強さに及ぼす光の効果をナノスケールで計測する手法の開発に成功しました。この研究成果により、多種多様な先進半導体の構造的な強さを正しく評価できるようになります。

本研究成果は、2021年2月17日付(日本時間2月18日午前9時)米国科学雑誌『Nano Letters』オンライン版に掲載されました。

本研究は、主に、2019年度から始まった科学技術振興機構(JST)『さきがけ研究「力学機能のナノエンジニアリング」研究領域(JPMJPR199A)』の支援で行われたものです。また、研究の一部では、『新学術領域「機能コア科学(19H05786)」』ならびに『特別推進研究(17H06094)』をはじめとする日本学術振興会科学研究費助成事業の支援を受けました。

【ポイント】

- 本研究は半導体材料の構造的な強さに関するものである。モバイルデバイスに半導体が多数用いられるようになり、半導体の構造的な強さを正しく評価することの重要性が増している。
- 半導体の構造的な強さは、周囲の光環境に依存して、より強くなったりより弱くなったりする。
- 半導体の構造的強さは内部のシワ(転位)のナノスケール運動が支配している。これまで、その運動を計測する手段が限られており、実態の多くは未解明だった。
- 本研究では、光ファイバーを通して光(フォトン)と力(フォース)を同時に入射し、半導体内部のシワのナノスケール運動を計測する手法(光インデンテーション法)を開発した(図1)。
- その結果、シワの発生に光はあまり影響せず、光はもっぱらシワの平行移動に強く影響していることを初めて発見した。
- ナノスケールでシワの動きを計測する方法が確立できたことで、多種多様な各種半導体の強さを正確に評価することが可能になった。
- 半導体の強さを正しく理解できるようになると、半導体の信頼性や耐久性の向上につながるほか、使用する材料の量を減じた省元素設計が可能になる。

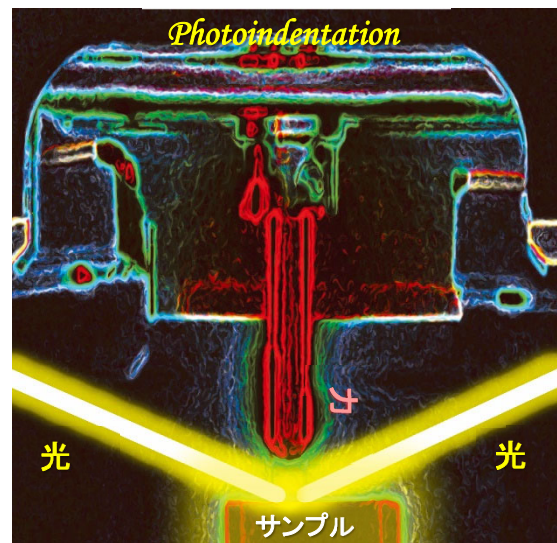


図1. 光と力を試料に同時に入射できるように新開発された装置のイメージ図。

【研究背景と内容】

現代の半導体製品はナノスケールの構造を持ちます。そのため、材料の信頼性を評価する上で、ナノスケールで構造的強さを評価することが必要です。最近、半導体材料の可塑性^{注2)}(加工性)や破壊特性などの構造的強さに光環境が影響することが明らかになりつつあります。この影響は予想以上に大きいため、各種半導体材料の強さに関する過去の計測結果を再検討する必要があります。

また、光環境を考慮した半導体の強さの性質(特に可塑性)を計測するにあたって、従来手法には限界がありました。特に、従来の研究が通常の実験室(環境光のある明るい部屋)で行われ、光環境が制御されていなかったことで実験結果の信頼性が失われていました。先進半導体は小型化が進み、表面積が増大し、光の影響がますます大きくなっています。

こうしたことから、実際のナノスケールの構造物に対応でき、かつ光環境を完全に制御が可能な、ナノスケールの強さの計測手法の確立が求められています。そこで本研究では、光制御環境下で材料のナノスケールの強さを評価する手法の開発に挑戦しました。特に、圧子と呼ばれる力を発生させる部位自身によって影を生じたりしないように、低角かつ2方向から

光を照射できる装置を開発しました。その結果、結晶内部のシワ(転位)の発生と運動に対して、光環境依存性を正確に評価することが可能となりました。

その結果、非常に重要な科学的新発見がありました。転位の発生には光があまり影響しないという事実、一方で転位の運動には光が強く影響するという事実の発見です(図2)。結晶の形状変化(塑性変形)を担う転位に、このような性質があったことが初めて明らかとなりました。

この原因は以下のように考えられます。転位の発生時は、転位源から転位が張り出す必要がありますが、この張り出しを支配する転位の線張力は転位のひずみエネルギーに依存します。このひずみエネルギーに、光励起キャリア(過剰な電子やホール)と転位の相互作用はほぼ影響しません。一方、転位のすべり運動時には、光励起キャリアが静電的相互作用により転位に引きずられるため、光励起キャリアと転位の相互作用が強く影響する過程となっています。こうした過程の違いが光に対する応答の違いを生じた原因と考えられます。

【成果の意義】

光環境制御下で表面近傍の構造的強さ(特に転位の運動)を計測する手法を確立したことにより、非常に小さなサンプルから、もしくは材料の表面から、材料の強さに及ぼす光の影響を評価することが可能となりました。

また、統計的な手法を組み合わせることで、小さな荷重(数十 μN)と非常に小さな変位(数 nm)で半導体の強さの評価に成功し、半導体においても、転位の発生応力が理論せん断強度^{注3)}とほぼ一致することが明らかとなりました。これは変形や破壊といった力学的性質に関して、半導体材料も金属材料とほぼ同じ取り扱いが可能であることを意味します。これまで、多くの場合、半導体は単に脆く壊れやすいと考えられ、力学的性質を深く検討されていませんでした。今後は本手法により理解が進み、壊れにくい半導体の開発やより小さな半導体構造の実現に繋がると考えられます。

今回開発された実験装置は、半導体だけでなくあらゆる固体材料に適用可能ですので、今後、半導体以外の材料についても光の影響を調べていくことができます。とりわけ、変形や破壊の起点は材料表面であることが多く、また表面は酸化などにより半導体的性質を併せ持つ材料が多いことが知られています。この点で、材料表面のナノメートルスケールの領域から光環境制御下の材料の強さを正確に測る手法を確立できた意義は大きく、従来考慮されていなかった材料表面の力学的性質の解明が進むと期待されます。

また、本研究は、固体材料の強さを原子配置から考えるという一般的な考え方に一石を投じています。従来は、原子の分布とシンプルな弾性論で材料の強さをおおよそ理解できると

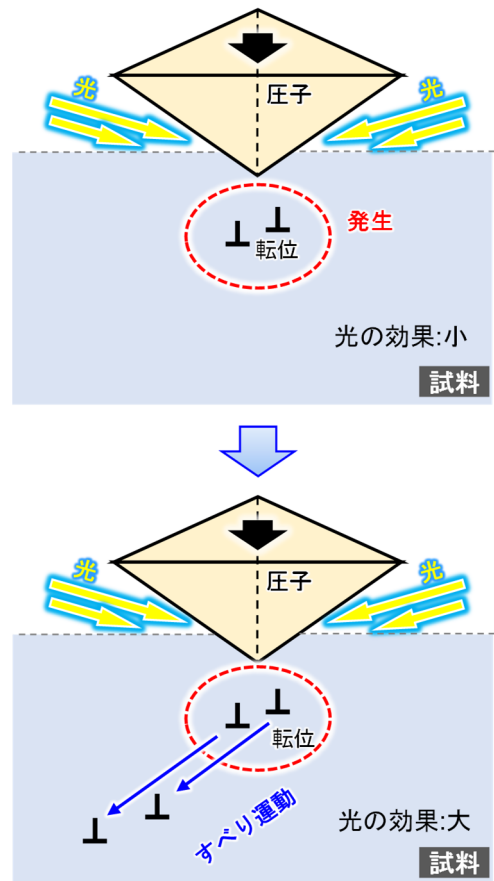


図2. 光の効果は結晶のシワ(転位)の発生には効果が小さく、運動には効果が大きいことが分かった。

いう前提がありました。しかし最近、光や電界などの外場により材料の強さが大きく変化することが報告されつつあり、原子より小さな「電子」や「光子」の運動を固体材料の強さを考える学術分野に加える必要性が認められつつあります。本研究では、そうした材料の強さにおける量子レベルの効果をあらためて証明するとともに、その評価手法を確立しています。この点で、材料の強さ分野の急展開(パラダイムシフト)において、大きなマイルストーンを達成したと言えます。

【手法の概要】

- 光環境制御下荷重負荷： ナノインデンテーション試験機(エリオニクス製 ENT-NEXUS)に光照射機能を特殊改造により付加して、半導体に光と力を同時に入射した。
- 光源： キセノン光源(朝日分光製 MAX-350)を用いて、ナノインデンテーション試験機の外側で、波長と強度が制御された光を作り出している。
- 表面観察： 表面におけるナノスケールの形状変化を調べるために、走査型プローブ顕微鏡(島津製作所製 SPM-9700HT)を利用した。
- 内部組織観察： 集束イオンビーム装置(Thermo Fisher Scientific 製 Helios G4 UX)と透過型電子顕微鏡(日本電子製 JEM-2010HC)により、内部組織の観察を行った。

* なお、手法の詳細は、論文の Supporting information に記載されている。

【用語説明】

- 1) 転位(てんい)：結晶における原子配列連続性の乱れ(シワ)の一種。正式には1次元の結晶格子欠陥と呼ばれ、結晶の塑性(形状変化能)を支配している。
- 2) 可塑性(かそせい)：物を変形させた際、変形後の形状が保持される能力。言い換えると、物質・材料が形状を変化させる能力。可塑性が高いほど大きな形状変化に耐えることができ、壊れにくくなる。破壊に至るまでの変形量で特徴付けることができる。
- 3) 理論せん断強度(りろんせんだんきょうど)：結晶において、特定の結晶面に沿って一斉にせん断(特定の結晶面に沿って横ズレ)を起こすのに必要な応力のこと。理論せん断には、マクロスケールの結晶の塑性変形臨界応力よりはるかに大きな力が必要になることが知られている。

【論文情報】

雑誌名： Nano Letters

論文タイトル： Photoindentation: A New Route to Understanding Dislocation Behavior in Light

著者： Atsutomo Nakamura*, Xufei Fang*, Ayaka Matsubara, Eita Tochigi, Yu Oshima, Tatsushi Saito, Tatsuya Yokoi, Yuichi Ikuhara, Katsuyuki Matsunaga

DOI: 10.1021/acs.nanolett.0c04337