第71回 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2024年 3月 18日

GHzバーストパルスの三倍波によるシリコン精密加工
Laser processing of silicon with the third-harmonic of GHz burst pulses

GHzバーストパルスを用いた新たなレーザー加工技術を開発 フィードバック加工への応用も

東大院理
○櫻井 治之，小西 邦昭
E-mail: sakurai@ipst.s.u-tokyo.acjp

【発表概要】

- **市販のレーザー光源を用いて、GHzバーストパルスの三倍波を使用したシリコン精密加工の新たな技術を開発**
- **通常の三倍波レーザーでの加工に比べ、高い表面反射率と、デブリの少ない加工を実現**
- **バーストモードに対応した高精度フィードバック加工も実証**

東京大学大学院理学系研究科・理学部の櫻井治之助教、小西邦昭准教授らは、シリコンの微細加工技術である超短パルスレーザー加工技術の一種であるGHzバーストモード加工において、GHzバーストパルスの三倍波を使用したシリコン精密加工の新たな技術を開発し、その性能を評価した。櫻井氏らは、市販のGHzバーストモード搭載の近赤外超短パルスレーザー光源（波長1030nm、パルス幅230fs、繰り返し周波数100kHz、バーストパルス間隔400ps）を三倍波に変換し、実際にシリコン精密加工を行った。結果として、通常の三倍波レーザーでの加工に比べ、高い表面反射率と、デブリの少ない加工を実現した。さらにその加工技術を応用し、バーストモードに対応した高精度フィードバック加工技術を開発した。この技術は、シリコンを用いた光学デバイスや半導体デバイスの製造において、性能向上と生産効率の向上に寄与することが期待される。

【詳細】

高精度・高品質の加工を実現する、GHzバーストモード加工

レーザー光を材料に照射し、その表面の一部を蒸発させることにより、材料を微細加工する技術「レーザーアブレーション」は、さまざまな微細加工に用いられている。レーザーアブレーションの一種である超短パルスレーザー加工は、フェムト秒（fs、1fsは1,000兆分の1秒）からピコ秒（ps、1兆分の1秒）という非常に短いパルス幅のレーザーを使用する加工技術だ。超短パルスを使用する利点は、加工部分の熱影響を最小限に抑え、精密な加工が実現できることにある。半導体デバイスで多用されるシリコンを含む様々な材料に対し、高精度かつ微細な加工を可能にする。

櫻井治之助教らは、レーザーアブレーションを用いたシリコンの微細加工技術に注目し、研究を進めてきた。「シリコンは一般的に半導体デバイスに用いられる材料として知られていますが、光の吸収や透過性に特有の性質を持つことから、光学デバイスとしても幅広く応用が可能な材料です。シリコンの加工技術には、半導体デバイスなどの小品種多量生産技術に『リソグラフィ（※）』が広く知られますが、加工環境やプロセスに大規模な投資が必要です。一方のレーザー加工は多品種少量生産に向いています。この利点を生かし、製造技術の柔軟化に貢献できるのではないかと考えて研究を進めてきました。その中で注目してきたのが、『GHzバーストモード加工』です」と櫻井氏は話す。

従来の超短パルスレーザー加工よりも精密な加工が可能で、デブリ（加工プロセス中に生成される微細な廃材や粒子）の発生も抑えられることから、GHzバーストモード加工は注目を集めてきた。従来の超短パルスレーザー加工ではkHz（キロヘルツ、1kHzは1000ヘルツ）や、MHz（メガヘルツ、1MHzは100万ヘルツ）の繰り返し周波数が用いられてきた。一方のGHzバーストモード加工では、GHz（ギガヘルツ、1GHzは10億ヘルツ）のフェムト秒レーザーパルスを用いる。つまり1秒間に数十億回（GHz）の速度で小さなパルス群を放出し、連続的に材料へ照射する。これによって、材料への熱影響を最小限に抑えながら、高精度かつ効率的な加工が可能になる。
「GHzバーストモード加工によって生じる物理過程は、熱拡散のタイムスケールと一致します。つまり、レーザー加工によって発生した熱が材料内で拡散する時間スケールと、レーザーパルスが連続して照射される時間スケールが同じであることを意味します。これにより、材料が適切に冷却される間に連続的に加工を行うことができ、熱による損傷を最小限に抑えつつ、高効率で表面品質が良い加工が可能になります」（櫻井）

※**リソグラフィ**　半導体製造において、微細な回路パターンをシリコンウェハなどの基板に転写する技術。基板上に感光性の化学物質（フォトレジスト）を塗布し、紫外線やX線などの光を照射（露光）することで、所定の回路パターンを形成することができる。

短波長化によって、レーザー加工の「いいとこどり」を実現

これまでのGHzバーストモードを用いたレーザー加工研究は主にバースト光発生技術が発達している近赤外領域で行われてきた。しかし、より微細な加工を実現するためには、波長変換技術を用いてレーザー波長を短波長化することが重要だ。「近赤外から紫外線への波長変換により、バースト加工技術の利点を活かしつつ、紫外線の微細加工能力の高い吸収率と短波長による細かな集光が可能になります。本研究では、近赤外光を紫外線に変換する波長変換技術を用いて、バースト加工の利点と紫外線の微細加工能力を組み合わせた新しいGHzバースト加工法を世界で初めて試みました」と櫻井氏は話す。

櫻井氏らは、GHzバーストモードを備えた市販の近赤外超短パルスレーザー光源を用いて、シリコンの精密加工実験を行った。さらに加工結果を評価するために、加工の深さと表面反射率の変化を測定するためのポイントセンサー（白色変位計）を加工機内に設置した。使用したレーザーは波長1030 nm（ナノメートル）、パルス幅230fs、繰り返し周波数100 kHz、バーストパルス間隔400psの基本波を、波長変換ユニットで三倍波（光波長の三倍の周波数を持つ光）に変換した。加工は、様々なバーストパルス数とパルスエネルギーを用いて行われ、白色変位計で系統的に調査された。結果として、バースト加工は通常の三倍波レーザー加工に比べて表面反射率が高く、加工品質が向上し、デブリが少ないことが確認されたという（図1）。「今後は、より詳細な時間分解をした計測などを行い、実際にどのような物理現象が起きているかを探っていきたい」と櫻井氏は話す。

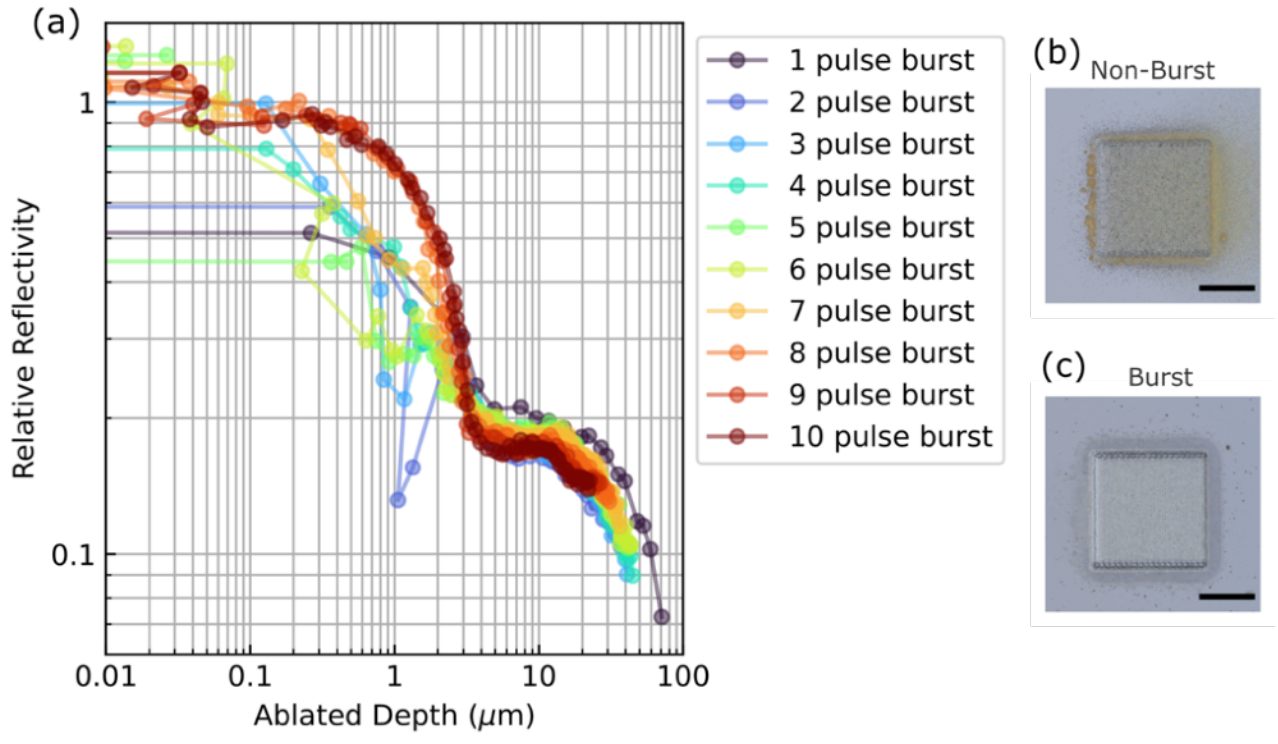

図1：（a）さまざまなバーストパルス数とパルスエネルギーで加工したピットのアブレーションの深さと反射率。(b)非バースト処理および (c)バースト処理ピットの代表的顕微鏡像。

レーザー加工の新しい未来としての高精度フィードバック加工

さらに櫻井氏は今回開発した精密な加工が可能なGHzバーストパルスの三倍波と加工機を応用し、バーストモードに対応した高精度フィードバック加工を研究した。フィードバック加工とは、加工プロセスの結果を即座に測定し、再び加工にフィードバックして制御することで、高精度な加工を行うものだ。「最近のレーザー加工業界では、現場での即時計測とフィードバックを用いた高精度で高品質な加工技術の実現に向けた動きがあります。この動向は、IoTやAI技術を活用し、操作者が特別な設定をしなくても自動で最適な加工が行えるシステムへの期待を反映していると考えられます。この研究では、シリコン上に半球状のプロファイルを加工することを対象とし、実際に、高精度フィードバック加工を試みました」と櫻井氏は話す。

実験では、シリコン材料上で半球形状の構造（シリコンマイクロ構造）のミリング加工（レーザー等を用いて材料から一部を削り取る加工方法）を行い、その結果を比較した。50回の反復加工を通じて、レーザーは2μm（マイクロメートル）間隔の同心円リング上を200mm/sの速度でスキャンした。最終的に半球形のシリコン構造を残すように、反復のたびに加工結果が測定され、フィードバックされた。スキャン速度は一定の200 mm/sで維持され、バースト条件下では単一パルスに対して0.13 μJ（マイクロジュール）、バーストパルスに対して0.87 μJのエネルギーが使用され、各反復により約1μmの深さで材料が加工されるように設定された。削除作業の後、端部のデブリが除去された後、点センサーを使用して表面プロファイルが測定された。その結果、フィット半径206μm（設計値200μm）、標準偏差は球面全体で0.76 μmという非常に高精度でなめらかな加工が実現したという（図2）。

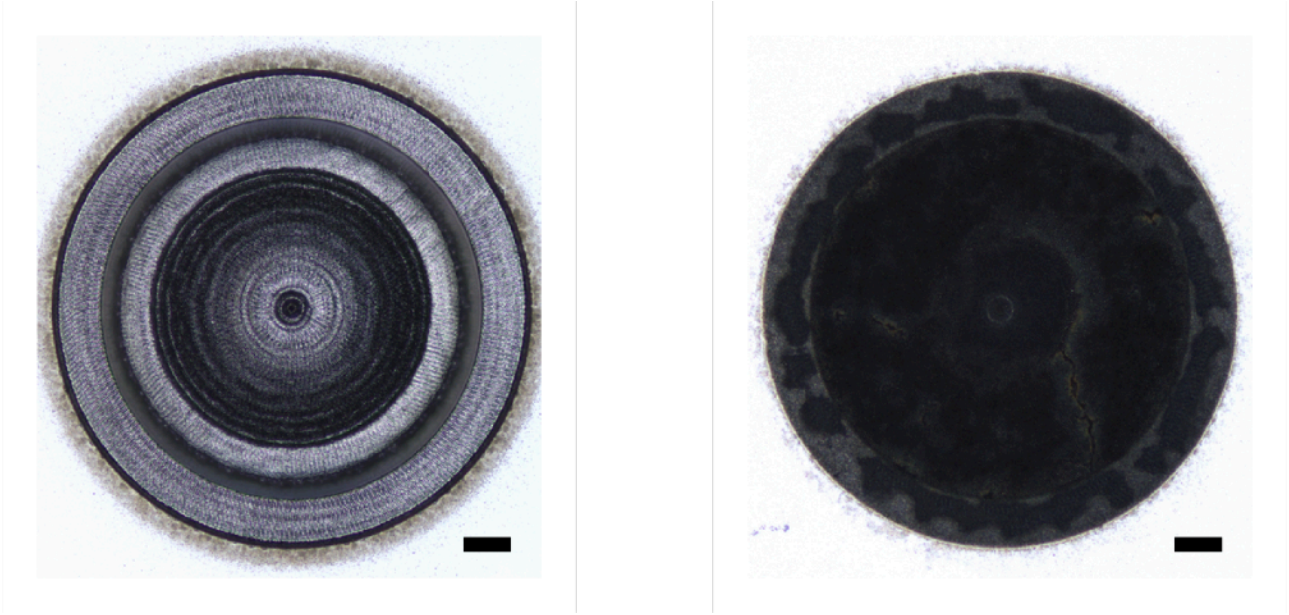

図2: バーストモードに対応した高精度フィードバック加工を用いた、バースト処理（左）および非バースト処理（右）による加工結果の顕微鏡画像。

「この研究では、センサーによる測定とフィードバックを用いて実際に加工の精度を上げることに成功したという点が重要だと感じています。レーザー加工をより高精度に行うための方法として、従来の最適条件の模索から、センサーのモニタリングを活用したフィードバック加工へとシフトする、ひとつの未来が提示できたと感じています」と櫻井氏は振り返る。応用物理学会の注目講演では、より詳細な計測データが紹介される予定だ。