

## UVナノ秒レーザーとIRフェムト秒レーザーを用いたシリコンカーバイドのアブレーション効率の比較

シリコンカーバイド (SiC) の利用は、電気自動車 (EV) システム、パワーエレクトロニクス、クリーンエネルギーの分野で増加し続けています。その理由は、優れた熱伝導率と広いバンドギャップ特性を備えるこの材料によって、さらに高い温度に耐え、さらに高速なスイッチング速度を実現し、さらに高い効率で動作するデバイスを可能にするためです。

SiCにはもう1つ、機械的硬度が高いという特性があり、これは、従来の機械的な加工方法に問題をもたらします。

レーザーによる加工は、この問題に対する1つの解決策となり得ます。しかし、どのような材料についても言えることですが、SiCに固有の特性と、スクライビング、ダイシング、アブレーションといったレーザーベースのプロセスに対する課題について、慎重に考察する必要があります。したがって、最善の結果を得るには、慎重かつ体系的なプロセスの最適化が不可欠です。

重要な最初のステップは、さまざまなフルエンス条件下での材料のアブレーションレートとアブレーション効率を調べることです。これらのパラメータは、与えられた材料に対する特定のレーザー技術の基本的な材料除去能力を表します。したがって、これらのパラメータをレーザー間で比較することが、特定のプロセスやアプリケーションに最適なレーザータイプを見極めるために役立つはずです。

このアプリケーションノートでは、UV (紫外) ナノ秒 (ns) パルスレーザーとIR (赤外) フェムト秒 (fs) パルスレーザーという2種類の異なるレーザープラットフォームを使用して、SiCのアブレーション効率の比較調査を行います。フルエンス、パルス幅、パルスバーストの調整が効率と除去レートに与える影響を調査し、SiCの精密な加工に最も適したレーザーを選択するための有益な指針を示します。

### UVナノ秒レーザーによるアブレーション

2種類の異なるナノ秒UVレーザーで、4H-SiC結晶のアブレーション実験を行いました。1つめは、MKS Spectra-Physics® Talon® UV15で、約20nsのパルスを出力する従来型の半導体励起固体 (DPSS) Qスイッチレーザーです。もう一方は、MKS Spectra-Physics Talon Ace™ UV100で、TimeShift™パルス制御機能を搭載するハイブリッドファイバレーザーです。こちらは、2ns未満から50ns以上までのパルス幅のシングルパルスに加えて、パルスバーストを出力するようにプログラム可能です。

いずれの場合も、2軸ガルバノスキャナを使用したポケットミリングを使いました。スキャン速度を毎秒2~4mmに保ち、スポットオーバーラップは約60%として、すべての実験を繰返し周波数50kHzで実行しました。20nsのシングルパルス (Talon)、2nsのシングルパルス (Talon Ace)、5×2nsのパルスバースト (5発の2nsパルスからなるバースト、Talon Ace) という、3つの異なるパルス構成を試験しました。

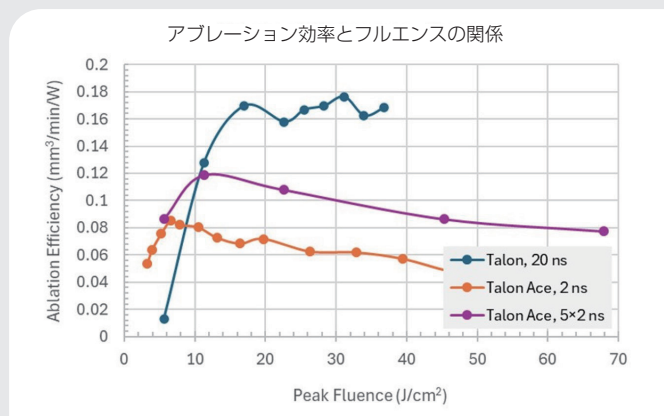


図 1. SiCのアブレーション効率と最適なフルエンスは、実験した3種類のナノ秒UVパルス出力によって大きく異なります。

図1は、このUVレーザー実験の結果をまとめたもので、アブレーション効率 (単位時間あたりレーザー

出力1Wにつきどれだけの材料が除去されるか)が、ピークフルエンスの関数として示されています。このデータは基本的に、レーザーエネルギーがどれだけ効率的に材料除去能力に変換されるかを表すもので、specific ablation rate (特定アブレーションレート)と呼ばれることが多いです。

最も長いパルス(ここでは20ns)によって、最も高いアブレーション効率を得られ、フルエンスレベルが高くなってもその効率は維持されました。この結果はおそらく、レーザーと材料の間の相互作用時間が長く、材料除去に好都合となる加熱が生じることを反映しています。

2nsのパルスは、最大アブレーション効率はそれよりも低いですが、20nsのパルスよりもはるかに低いフルエンスで最大アブレーション効率を得られます。これにより、材料全体の加熱が起こりにくくなるため、熱管理が重要なアプリケーションにおいて性能(品質)上の利点を得られるはずです。

5×2nsのバーストモードは、最大アブレーション効率とそのときのフルエンスの両方において、上記の2つの極端なケースの間のバランスを実現しています。これは、(可変の)バースト出力とシングルパルス出力を使用することにより、必要に応じてスループットと熱負荷が調整できることを示しています。

### IRフェムト秒レーザーによるアブレーション

MKS Spectra-Physics IceFyre® FS IR200レーザーを使用して、超短パルス(USP)によるアブレーション加工を行いました。このレーザーは、500フェムト秒未満のパルスを200 Wを超える出力で出射し、シングルパルスから50 MHzまでの繰返しパルス周波数で動作します。このレーザーには、非常に柔軟なバーストモード動作を可能にするSpectra Physics TimeShiftプログラマブルパルス機能が搭載されています。

このレーザービームを、5m/sでスキャンしました。この速度は、先のUVナノ秒レーザーでの実験に適用した速度よりもやや高速です。しかし、IceFyre FS IR200 (1MHz)の方がパルス繰返し周波数が高いために、スポットオーバーラップは大きくなり、ナノ秒レーザーの実験では60%だったのに対して、約90%になりました。

この高いオーバーラップ率は意図的なものでした。超短パルスは非常に急速にエネルギーを放出するため、材料内に著しい熱蓄積を生じさせません。その結果、熔融やその他の熱損傷を引き起こすことなく、高いオーバーラップ率を実現することが可能です。そしてオーバーラップ率が高いほど、所定量の材料を除去するためのスキャン回数は少なくなり、したがって、加速/減速サイクルに費やす時間は短くなります。

図2は、IR 超短パルスレーザーのアブレーション効率(橙色)とアブレーションレート(青色)のバーストパルス数の増加に伴う変化を示したものです。すべての実験において、平均レーザー出力は約200 Wでした。最適なフルエンスを特定するために、全体的な平均出力を調整するのではなく、バーストパルス数を単に増加させることによって、各パルスのエネルギーを低下させました。

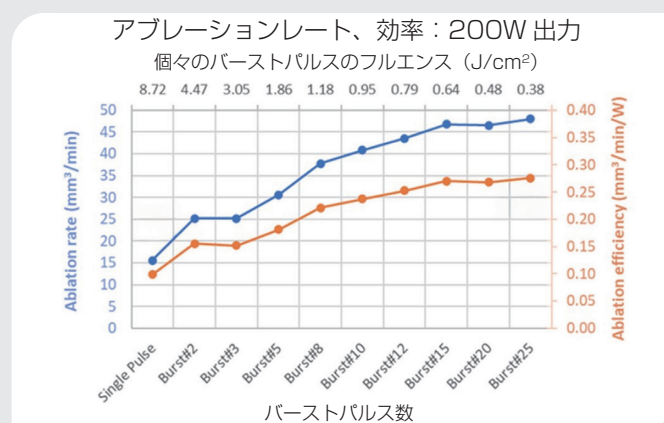


図 2. アブレーション効率は、バーストパルス数を徐々に増加させることによって最適化できます。バーストパルス数を増加させると、材料に印加される個々のパルスのフルエンスは低下します。

ここで得られたデータには、バーストモードの明らかな利点が見られます。アブレーション効率は、シングルパルスからサブパルス数が15個になるまで着実に向上し、それ以降はほぼ横ばいになります。その時点でプロセスは、約0.27mm³/min/Wの最大効率に達し、そのときのサブパルスのフルエンスはわずか0.4~0.6J/cm²です。シングルパルスのアブレーション効率は約0.1mm³/min/Wで、フルエンスは約9J/cm²であることに注意してください。平均出力を調整した先ほどのUVレーザーの実験結果(図1)では、最大効率は0.12mm³/min/Wで、そのときのフルエンスは1~2 J/cm²でした。

これは、バーストモードで発生することが確認されている最適フルエンスである約0.5J/cm²よりも依然としてはるかに高い値です。

つまり、バーストモードを適用することで、パルスあたりのエネルギーを大幅に抑えつつ、2倍以上のアブレーション効率が得られました。これは、超短パルスバーストプロセスによって、高エネルギーパルスをそれよりも小さくて扱いやすいサブパルスに分割することで、より制御された効率的なエネルギー利用が可能になるという概念を裏付けるものです。より広い観点で見ると、このデータは、バーストパルスのフルエンス最適化技術の利点を実証するものでもあります。この技術は、プロセス最適化を迅速に行うためのシンプルかつ単純明快な方法を提供します。

## 品質

今回の実験に使用したすべてのレーザーで、加工品質は極めて良好でした。ミリング加工によって得られた大きなポケット形状は、底面が滑らかに加工されており、溶融や亀裂などの不規則性は見られませんでした。オーバーラップ率が超短パルスレーザーよりも低かったナノ秒レーザーによる3枚の画像には、個々のアブレーションクレーターがはっきりと示されており、オーバーラップ率がそれよりも高かったUSPレーザーの画像では、滑らかで連続的なアブレーションラインが容易に見てとれます。

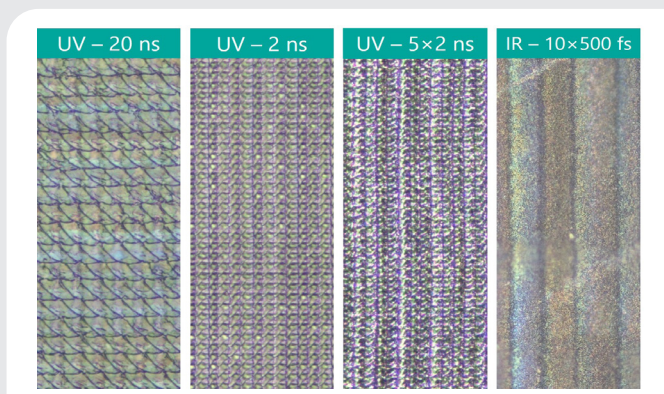


図 3. 実験に使用したすべてのレーザー出力タイプによる、それぞれの最適なフルエンス条件での加工表面。いずれも優れた表面品質が得られています。

## 比較と結論

本稿に示したアブレーション効率の結果は、貴重な洞察を提供するものですが、この結果が示すものは全体像の一部にすぎません。なぜなら、実際の材料除去レートは（アブレーション効率）×（平均出力）で算出されるためです。これは、効率が低くても出力が高い

レーザーを使用する方が、高い材料除去レートを達成できることを意味します。したがって、特定のアプリケーションに対する光源を選択する際には、各レーザータイプから得られる最大出力を考慮する必要があります。表1は、MKS Spectra-Physicsが提供するいくつかのレーザーについて、その出力を基に達成可能な実際の最大除去レートをまとめたものです。これらの製品は、現在販売されており入手可能なナノ秒UVレーザーとフェムト秒IRレーザーの代表的な例です。

レーザー	パルス幅	最大出力 (W)	最大効率 (mm³/min/W)	最大除去レート (mm³/min)
Talon UV45	20 ns	45	0.17	7.65
Talon Ace UV100	2 ns	100	0.085	8.5
Talon Ace UV100	5×2 ns burst	100	0.12	12
IceFyre FS IR200	500 fs	200	0.12	24
IceFyre FS IR200	25×500 fs burst	200	0.28	56

表1. それぞれのレーザープラットフォームで提供されている最大平均出力を考慮した場合に達成可能な実際のアブレーションレートの概要

この表は、これらの実際のレーザー源を全体的なプロセス効率で評価した場合のランク付けを示しています。例えば、Talon UV15 (20ns)は、UVレーザー実験で最も高いアブレーション効率を示しましたが、同プラットフォームで提供される最大出力は比較的低い(45W、Talon UV45)ため、除去レートは約7.65mm³/minに抑えられます。これに対してTalon Aceは、効率はそれよりも低いですが、100Wで動作させれば約12mm³/minの除去レートを達成できます。一方、IRフェムト秒システムであるIceFyre FSは、約200Wで動作させると最大で56mm³/minもの除去レートが実現可能です。これは、その高い出力と優れたバーストモードによるアブレーション効率の両方によるものです。

ただし、この表には示されていない実用的なプロセス因子がもう1つ存在します。それは、熱影響部 (HAZ) です。すべてのレーザーが良好な性能を示し、優れた加工表面品質が得られ、エッジのチッピングは生じず、デブリの生成は最小限に抑えられましたが、フルエンスを低くしてパルス幅を短くすれば、通常はHAZはさらに小さくなります。したがって、本稿の実験で使用したレーザーも、全体的なアブレーションレートが高いことだけでなく、パルス幅が短いことが、最良の全体加工品質を達成できる要因の1つであると考えられます。

以上のすべての情報を踏まえて、本稿のUV nsレーザーとIR fsレーザーによるSiCアブレーション実験から導き出される結論は、以下のとおりです。

- UV nsレーザーは、多くのアプリケーションに対して高い表面品質と十分なスループットを実現する、実用的かつ費用対効果の高いツールです。20nsのパルスを使用すれば、最適な効率が高いフルエンスで得られます。それよりも短いパルス（2ns、5×2ns）は、コストは高くなりますが、熱入力が抑えられるため、ダイレベルの加工や、隣接回路の損傷が懸念される場合に有効です。

- IR fsレーザーは、特にバーストモードを適用する場合に、最大限の効率、スループット、品質が得られますが、システムの複雑さとコストは増します。
- （どのようなレーザーにおいても）バースト制御は、有用なチューニングパラメータであり、これを利用すれば、平均出力を下げたりスポット径を変更したりすることなく効率を最適化することができます。

## 製品

### UVナノ秒レーザーとIRフェムト秒レーザー

#### Talon® UVおよびグリーンレーザー

Talonレーザープラットフォームは、ハイパフォーマンス、信頼性、低コストをかつてないレベルで兼ね備えた、UVおよびグリーンLD励起固体（DPSS）Qスイッチレーザーファミリーです。Spectra-PhysicsのIt's in the Box™デザインに基づき、レーザーとコントローラーが単一のコンパクトなパッケージに一体化されています。パルス間の安定性が高く、優れたTEM<sub>00</sub>モード品質が数万時間に及ぶ稼働時間にわたって維持されます。Talonレーザーは、システムのアップタイムが非常に重要となる、24時間365日稼働の製造環境における微細加工に特化して設計されています。

#### Talon® Ace™ UV100レーザー

Talon Ace UV100は、業界をリードする100Wを超えるUV出力を、小さな筐体と魅力的なコストパフォーマンスで提供する、強力なパルスナノ秒レーザーです。この新しいレーザーは、TimeShiftプログラマブルパルス機能や、広いパルス繰返し周波数範囲といった、前例のない柔軟性を備え、微細加工プロセスの最適化を可能にします。Talon Ace

UV100は、先端エレクトロニクスパッケージング、プリント回路基板、太陽電池、セラミックス、半導体、その他の材料やコンポーネントの微細加工における、高速かつ高品質の製造に最適です。

#### IceFyre® FS UVおよびIRフェムト秒レーザー

IceFyre FSファミリーは、産業用フェムト秒レーザー技術の飛躍的な進歩であり、業界をリードするパフォーマンス、汎用性、信頼性、所有コストを実現します。IceFyre FSフェムト秒レーザーは、要求の厳しい民生用電子機器、クリーンエネルギー、医療用デバイス、および産業用途に使われる、ガラス、ポリマー、金属、半導体、薄膜、複合材料などの難加工材料に対して、高いスループットと最高級の品質が求められる微細加工に最適です。Spectra-PhysicsのIt's in the Box™設計に基づき、レーザーと制御部が、設置容易な単一のパッケージに一体化されています。

	Talon UV45	Talon Ace UV100	IceFyre FS IR200
波長	355 nm	343 nm	1030 ±6 nm
出力	>45 W @ 150 kHz	>100 W	>200 W @ 1-50 MHz
繰返し周波数	0-500 kHz	0-5.0 MHz	シングルショット - 50MHz
パルスエネルギー	>300 μJ	>500 μJ	>200 μJ
パルス幅	<35 ns @ 150 kHz	<2 to >50 ns	<500 fs
パルスエネルギー安定性	<2% rms @150 kHz <3% rms up to 300 kHz <5% rms above 300 kHz	<3%, 1 σ	<2% rms