

Explorer® One™ コンパクトUVナノ秒レーザーによるSiCおよびGaNの高精度マーキング

SiCやGaNなどのワイドバンドギャップ (WBG) 材料は、パワーエレクトロニクス用途にメリットをもたらしますが、そのレーザーマーキングは、従来の材料よりも困難です。

電気自動車、再生可能エネルギーシステム、産業オートメーション、大規模データセンターといった複数の成長市場が、より高効率なパワーエレクトロニクスの需要を牽引しています。これらの用途はいずれも、従来のシリコンベースのデバイスでは効率的に実現が難しい、より高い電力密度、高速スイッチング、エネルギーの低損失に加えて、冷却要件の緩和が求められます。動作電圧やスイッチング周波数が高まり続ける中で、従来のシリコンの性能限界は、ますます顕著になりつつあります。

炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などのワイドバンドギャップ (WBG) 半導体材料はこれらのニーズに応えるものとして登場しました。シリコンと比べてこれらの材料は、はるかに高い電圧、温度、スイッチング周波数で動作するデバイスを実現できます。これにより、熱性能を向上させて電力損失を低減した、よりコンパクトでエネルギー効率の高い電子システムの構築が可能になります。こうした特長により、先進的なパワーエレクトロニクスの幅広い用途において、これらの材料の採用が急速に進んでいます。

しかし、ワイドバンドギャップ半導体をこれほど価値あるものにするその材料特性こそが、新たな製造上の課題ももたらします。その課題は、レーザーマーキングにおいて特に顕著です。

シリコンと比べてWBG材料は、多くの産業用レーザー波長における吸収率が低く、アブレーションを開始するためにより高い局所エネルギー密度を必要とします。加えて、機械的硬度が非常に高く、結晶構造が脆いため、レーザー加工時の局所的な熱ストレスや機械

的ストレスに対してより敏感です。

そのすべてが、マーキングのプロセスウィンドウを大幅に狭める要因となります。プロセスウィンドウの下限を下回るとマーキングは不十分となり、上限を上回るとマイクロクラック (微小な亀裂) や過剰な熱影響部 (HAZ) など、材料の損傷が発生します。デバイス構造の微細化が進み、マーキング可能なスペースがますます小さくなるにつれて、WBG材料のマーキングに伴う課題に対処することが、これまで以上に不可欠となります。このようなワイドバンドギャップ材料に対する有効なマーキング手法を評価するため、MKSは、自社の産業用途専用アプリケーションラボにおいて、コンパクトなUVレーザー (Spectra-Physics® Explorer One HP HE 355-200) を使用した一連の実験を行いました。



図 1. 炭化ケイ素 (SiC) などのワイドバンドギャップ (WBG) 半導体材料は、パワーエレクトロニクスにおいてますます重要性を増しています。

半導体製造ファブにおけるマーキング要件

半導体製造におけるウエハマーキングシステムでは、複数の工程を通して読み取り可能な恒久的な識別情報を生成する必要があります。これらのマーキングは、トラッキング、検査、プロセス検証に用いられます。一般的には、英数字の文字列やコンパクトなマトリクスコードとして、ウエハの表面に直接印字されます。ドットサイズ、間隔、均一性が、最終的な文字品質に直接的に影響を与えます。

グリーン波長または紫外線（UV）波長で動作するLD励起固体（DPSS）レーザーを活用するレーザーマーキングは、このような目的に対して広く採用されています。これらのレーザー光源は、スポットサイズ、パルス安定性、そして熱影響の低減といった要件を満たすために必要な特性を兼ね備えています。

しかし、製造工程の段階によってマーキングに求められる要件は異なります。いわゆる「ディープマーク（深彫り）」は、研削やコーティングなどの後処理工程を経ても消えずに残る必要があります。従来のシリコン材料の場合、ディープマークは一般に直径25～110 μmのドットで構成され、材料内部への浸透深さは50～150 μmです。

その他のケースとして、特に研磨済みウエハ（ポリッシュトウエハ）には、表面の乱れや汚染リスクを最小限に抑えつつ、光学的なコントラストや機械による読み取り性を維持するために、「ソフトマーク（浅彫り）」が用いられます。一般的に、そのドット径は約30～70 μmですが、深さはわずか0.3～5 μmです。

WBG材料における課題

これらの要件を満たすことは、SiCやGaNでは格段に難しくなります。使用可能なプロセスウィンドウはより狭くなり、フルエンス（照射エネルギー密度）やパルスの重なりのおよむわずかな変化が、マーキング品質に強く影響を与える可能性があります。そのレーザープロセスでは、エッジ部の破壊、再凝固層の過剰な形成、加工部周辺の局所的な損傷を回避しながら、一貫したドット形状を生成する必要があります。同時に、デバイスの微細化によって、トレーサビリティマーキングに利用できる面積はますます減少しています。

このようなプロセスの制約を検証するためにMKSは、Spectra-Physics Explorer One HP HE 355-200レーザーシステムを使用して、SiCウエハに対するUVナノ秒レーザーマーキングの評価を行いました。UV DPSSレーザーは、熱影響を抑えつつ高い空間分解能を提供するため、こうした用途に最適です。

Explorer One HP HE 355-200は、特に小型であること、消費電力が低く、発熱が少ないことから、半導

体製造のデリケートな環境への組み込みに非常に適しているため選定されました。また、このレーザーは波長355 nm、最大200 μJのパルスエネルギーで動作し、短いパルス幅と安定したパルスエネルギーを維持しながら、制御されたUVアブレーションに必要な高いピーク強度を提供します。さらに本システムには、微細加工時の精密なプロセス制御を支えるために、アクティブなパルスエネルギー安定化機能も搭載されています。

この調査の目的は、この種のコンパクトなUVレーザーが、ドット形状、マーキング深さ、熱影響を適切に制御しながら、高コントラストのSiCマーキングを安定して生成できるかどうかを確認することにあります。特に重点が置かれたのは、プロセスの再現性、シングルパルスによるマーキング性能、そして過度の表面損傷を引き起こすことなくマーキング深さを調整する能力です。

実験構成と結果

最初に、SiCに対するUVアブレーション閾値を特定するための実験を行いました。この値によって、プロセスの安定性を維持しながら、シングルパルスで確実に材料を除去するために必要な最小レーザーフルエンスが規定されるため、この値を明確にしておくことが重要です。

目標ドット径を約44 μmとして18×9のドットマトリックスパターンを生成するように、レーザーを設定しました。これらの値は、一般的な半導体マーキング寸法の代表値です。

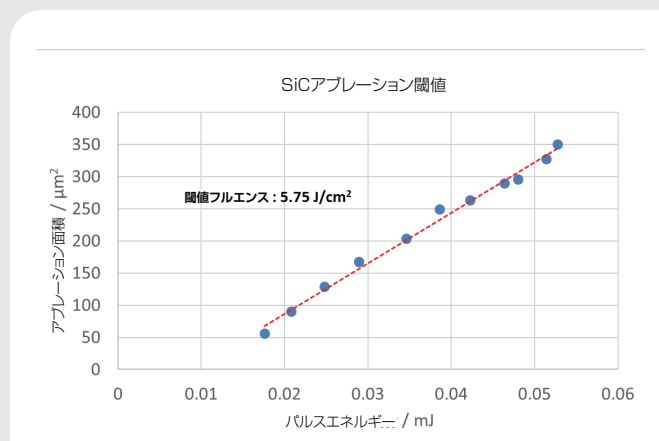


図 2. SiCウエハから材料を除去するには、少なくとも5.75 J/cm²以上のフルエンスが必要です。

アブレーション閾値を決定するために、入射パルスエネルギーを15~55 μJ の範囲で変化させました。得られたアブレーションスポットの直径を測定し、回帰分析の手法を用いて評価しました。

この処理により、SiCに対するUVアブレーションの閾値フルエンスは、約5.75 J/cm^2 であることがわかりました。この値が、その後のマーキング実験とプロセス最適化のための基準として用いられました。

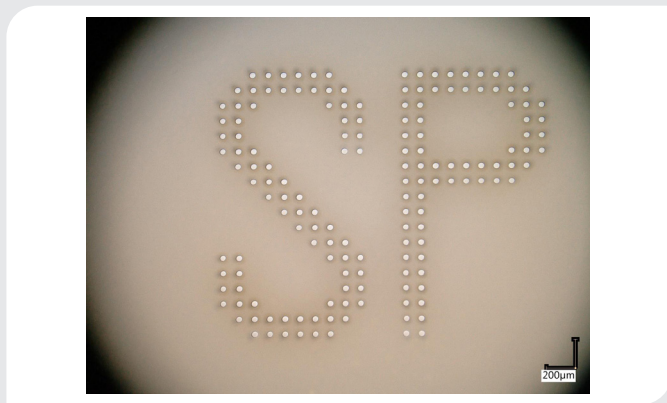


図 3. ソフトマークは、規則正しく整列したドットで構成されており、顕微鏡下で容易に読み取ることができます。

さらに加工形状の均一性を評価するために、マーキングは白色光干渉法を用いて解析されました。2次元の表面プロファイルと3次元のトポグラフィ測定の両方により、滑らかで均一なドットの形状が確認されました。また、これらの測定により、パルス間再現性も良好であることが明らかになりました。これは、量産時に器械による読み取り性を安定して維持するために重要な要素です。

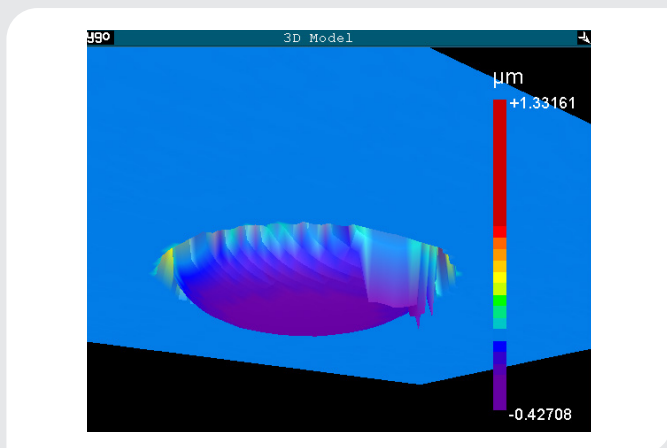


図 4. 白色光干渉法データから生成された、シングルショットによるマーキングドットの3Dモデル

Explorer Oneは、ドットあたり一発のレーザーショットでソフトマークを生成できることがはっきりと実証されたため、この調査の次のフェーズでは、ディープマークの性能評価が行われました。具体的には、各ドットに対して2発のショットを照射して、一連の実験を行いました。

2発のショットを照射することで、滑らかで対称的な加工形状を維持しつつ、マーキングの深さは約0.9 μm に増加しました。これは、過度の熱損傷を引き起こしたり加工形状の品質を損なったりすることなく、実用的な範囲でマーキング深さを調整できることを示しています。

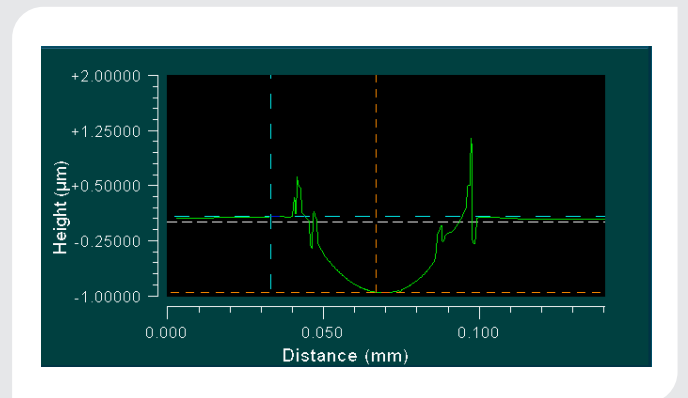


図 5. 2発のレーザーショットによって形成された孔の3Dプロファイル(白色光干渉法を使用して測定)。対称性を保ったまま、より深い穴が形成されています。

この深さ制御のスケラビリティにより、レーザーマーキングプロセスは非常に高い汎用性を持つことが示されています。熱影響を最小限に抑えたSiCウエハへのソフトマークを形成できるだけでなく、必要に応じてより深いトレーサビリティマーキングを行えるだけのプロセス柔軟性も備えます。

結論

SiCやGaNのようなワイドバンドギャップ半導体材料は、従来のシリコンよりもはるかに厳しい要件をレーザーマーキングプロセスに課します。これらの材料は従来のシリコンよりも光吸収率は低く、硬度は高く、脆いことから、精密なウエハマーキングに対して使用可能なプロセスウィンドウは著しく狭まります。

本稿に示した結果は、コンパクトなUV DPSSレーザー技術がこれらの要件を十分に満たし得ることを実証しています。Spectra-Physics Explorer One HP

HE 355-200を用いることで、良好な幾何学的均一性、最小限の熱影響、優れたパルス間再現性を維持しながら、高コントラストのSiCマーキングを実現することができました。

今回の実験では、マーキングの深さを制御しながらスケラブルに調整することが可能であり、かつ形状品質を維持できることも示されました。これらの特長により、この種のコンパクトなUVナノ秒レーザーは、次世代の半導体製造環境に非常に適したソリューションであるといえます。



図 6. MKS Spectra-Physics Explorerシリーズは、幅広い用途に対応するコンパクトなDPSSレーザーです。

製品

Explorer One

Explorer Oneレーザーシリーズは、UVで6W、532 nmで5Wまでの出力に対応する、最もコンパクトなアクティブQスイッチレーザーシリーズです。優れたビーム品質 (M²は典型値で1.1)、短いパルス幅、高いピーク出力といった高い性能水準に加えて、高速な出力変調と短い立ち上がり時間という能力を備え、お客様のアプリケーションにおける最良の加工品質

を実現します。また、装置間での仕様のばらつきが小さいこと、長寿命、堅牢な設計といった高い品質水準によって、所有コストを最小限に抑えます。ソフトウェア機能とコンパクトなサイズにより、迅速でコスト効率の高い装置組み込みが可能となり、お客様がそれぞれの製品を確実に短期間で市場に投入できるように支援します。

	Explorer One HP HE 355-200	Explorer One HP 355-4	Explorer One HP 355-6	Explorer One HE 355-100	Explorer One HE 532-200	Explorer One XP 532-5
波長	355 nm	355 nm	355 nm	355 nm	532 nm	532 nm
出力	>4 W @ 20 kHz	>4 W @ 80 kHz	>6 W @ 100 kHz	800 mW @ 10 kHz	1.8 W @ 10 kHz	5 W @ 80 kHz
最大パルスエネルギー	>200 μJ @ 20 kHz	>50 μJ @ 80 kHz	>60 μJ @ 100 kHz	80 μJ @ 10 kHz	180 μJ @ 10 kHz	63 μJ @ 80 kHz
繰返し周波数	シングルショット -200 kHz	シングルショット -500 kHz	シングルショット -500 kHz	シングルショット -60 kHz	シングルショット -60 kHz	シングルショット -500 kHz