

高出力UVレーザーのパルスコントロールで新しい微細加工が可能に

ラジェシ・パテル、ジェイムス・ボバツェク、アシウィニ・タマンカ

民生用モバイル電子機器の製造で、レーザーによる加工精度がますます厳しくなっている。これに応えるには、パルス幅制御、パルス分割、パルス整形をソフトウェアで調整できるハイブリッド超紫外(UV)ファイバレーザーが必要になる。

スマートフォンやタブレットなどの民生用モバイル電子機器は、世界の製造業で最大規模にして最速の成長分野の1つとなっている⁽¹⁾。半導体チップ、マイクロエレクトロニクス・パッケージ、タッチスクリーン・ディスプレイ、プリント基板などの重要コンポーネント向けに、最先端の高精度レーザー製造工程を構築するには、継続的な技術開発が必要になる。現行世代のダイオード励起固体(DPSS)レーザーは多くの場合、量販市場向けのコストで高度な製品を生み出す新技術を可能にする役割を担ってきた。しかし、モバイル機器の性能が一段と高度になり、複雑になっていくにつれて、製造工程も進化していかなければならない。

この製造分野でレーザーが対処できる多様な材料と工程を考えると、高品質、高速のマイクロマシニング(微細加工)でレーザー特性に大きな進歩を求めることが難しくなっている。そのような工程は、多くのレーザーパラメータの影響を強く受ける。例えば、波長、パルス幅、平均パワー、ビーム品質(M^2)、パルス繰り返し周波数(PRF)、パルス間のエネルギー安定性などだ。それに、パルス整形、パルス分割が登場するに及んで、最適化工程仕様の構成リストが長くなっている。

短波長、短パルス、低 M^2 のレーザーは、強く集束されたスポット、熱影響域

(HAZ)の最小化によりマイクロマシニング工程で優位性を出せている。一般に、波長が短波長になるほど吸収が強くなる材料が多いので、有機物、半導体、セラミック、金属などでそのようなレーザーは、機械加工に幅広く適用できることになる。短パルスによる高いエネルギー吸収、的確な照射レベルは、材料の酸化を速め、HAZや炭化を減らす。小さく、集束されたビームスポットは、より微細な加工を可能にし、加工精度も向上する。ハイパワー、高PRF、パルス整形、パルス分割、これらは全て微細加工のスループット向上に寄与する。また、一貫したパルス間の高い安定性により工程の再現性が保証され、加工の歩留まり向上に役立つ。

UV Qスイッチ(Q-SW) DPSS レーザーは製造の要求に応じてきたが、さらなる高速化達成では限界がある。加工

速度を上げる通常のアプローチは、他の加工パラメータを一定にして、レーザーのPRFを上げることだが、一般的なQ-SW DPSSレーザーでは、事実上、これが達成不可能になっている。このようなレーザーでは、繰り返し周波数(PRF)が増すと平均パワーやパルスエネルギー落ち方はかなり急速になる。また、レーザーのパルス幅やパルス間のエネルギー変動が著しく大きくなる傾向もある。

レーザーのパラメータのこのような変動は微細加工のスピード、形状、加工精度に影響を与えるので、単にPRFを高めるだけでは、スループットを上げながら加工結果を維持するには十分でないことがある。こうした限界を克服するために実際に求められているソリューションは、より高いPRFで高い平均パワーを維持するだけではなく、短パルスを出し続けなければ

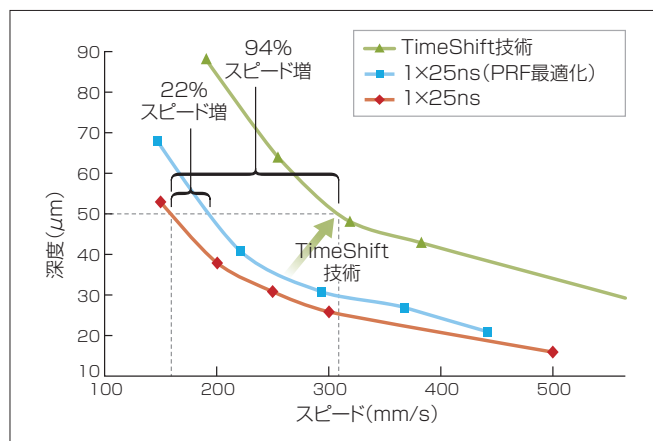
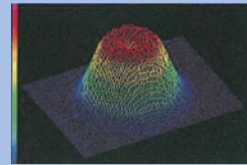


図1 シリコンのスクライブの深さ対スピード。TimeShift技術を使い、工程最適化メリットの可能性を示している。

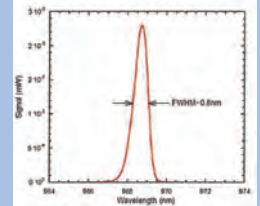
これが 高出力 VCSEL です

この高出力半導体レーザーはエッジエミッター方式に比べ数々の特徴があります！

◆ビームの質がよい



Far-field beam profile



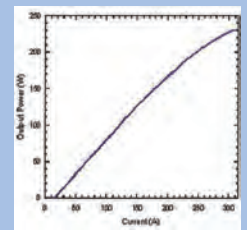
Emission spectrum

5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケラビリティ



100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



その他の特徴

- ◆ 温度依存性が低い
- ◆ 製品間のばらつきが小さい
- ◆ バックトークが少ない
- ◆ 波長の安定度が高い
- ◆ FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
 URL <http://www.autex-inc.co.jp>
 E-mail Sales11@autex-inc.co.jp

東京本社 〒162-0067
 東京都新宿区富久町16-5 新宿高砂ビル
 TEL. 03 (3226) 6321 FAX. 03 (3226) 6290
 大阪支社 〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
 TEL. 06 (6344) 6328 FAX. 06 (6344) 6342

ならない。低いパルス間のエネルギー変動、パルス整形、パルス分割機能があり、高いスループットときれいなアブレーション結果の両方とも達成しなければならない。

そのようなレーザー技術要求に応えるために、UVハイブリッド・ファイバレーザー、高いPRFとハイパワーを兼ね備えるQuasar 335-40が開発された。また、Quasar 335-40はパルスエネルギーとパルス幅を幅広く設定するためのTimeShiftと言う、ソフトウェアで調整できる技術の特徴としている。この技術によってプロセスエンジニアは、パルス整形、パルス分割、パーストモード動作などの技術によって時間領域でパルス強度波形を作り出すことができる。このレーザーは、250kHz PRF、波長355nmで出力は40W以上。パルス幅のPRFへの依存性はなく、繰り返しレートが上がりスループットが向上してもレーザー出力の全ての特性を安定維持することができる。

ハイパワーと高PRFを兼ね備え、独立に調整可能なパルス幅、パルス操作機能をもつことは、多様なマイクロエレクトロニクス材料の微細加工にはメリットがある。ここで、シリコン、ガラス、プリント基板(PCB)材料で得られた最初の成果を示しておこう。

半導体製造シリコンダイシング

マイクロエレクトロニクス製造では、何百、何千のIC、他のマイクロデバイスが1枚の半導体(シリコン)ウエハ上に作製され、最終的に分離、切断されて個々のチップになる。シリコンウエハのダイシングでは、精密ロータリーソーを使う従来のダイシングの代替として数年前からレーザーダイシングが使われている。ウエハが薄くなり、レーザーの信頼度が向上して効果が発揮できるようになるにつれて、ソーベースのダイシングに対するレーザーの利点が飛躍的に強まってきた。

さらに、現在の最先端機能が使えるようになったことで、マイクロマシニングの高スループットを維持しながら材料の熱負荷を制御することが容易になっている。これはシリコンダイシングでは特に重要である。シリコンウエハでは、熱の影響が切断したチップ端(これはダイの機械強度減少に影響)でのマイクロクラックにつながったり、電子デバイス自体の損傷につながる。

スルー・ダイシングの代替では、チップ間のウエハ「ストリート」に、レーザーで溝を造ったりラインをスクライブしたりする。これは二段階のスクライブ&クリーブ工程の最初の段階として、あるいは脆弱で壊れやすい材料が

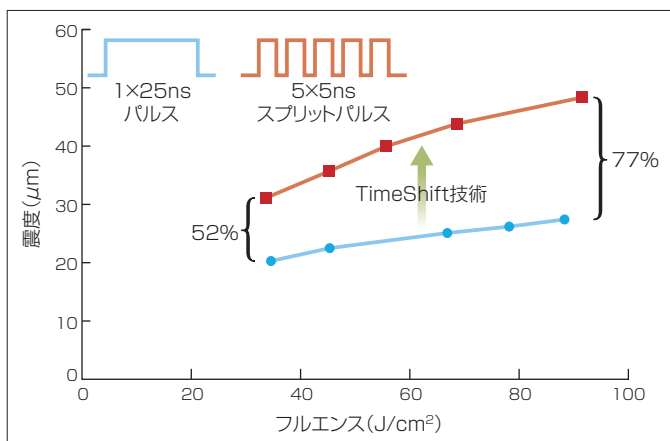


図2 シリコンのスクライブの深さ対フルエンス。TimeShiftの技術的優位を示す。

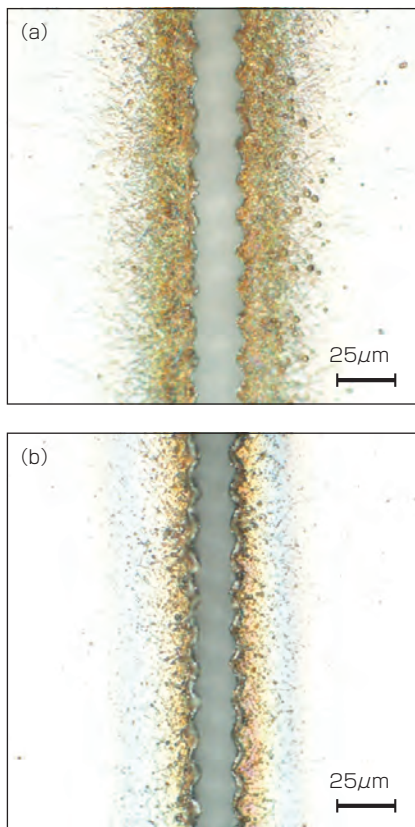


図3 Quasarレーザーを用いたシリコンスクライビング品質。a)シングルパルス、b)5個のサブパルス、それぞれのスクライブの上方視点画像。

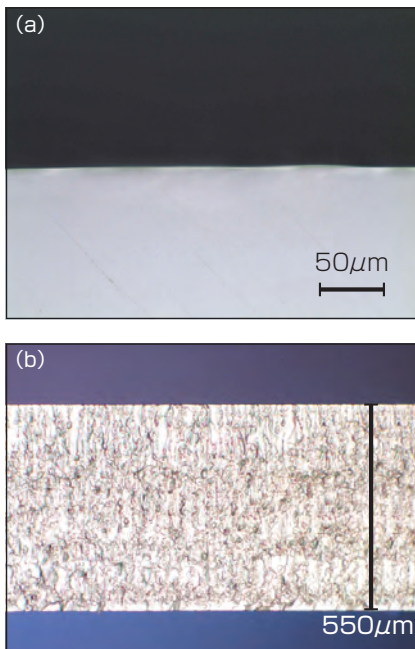


図4 ガラス切断品質：TimeShift技術を使用して切断したa)平面、b)切り口の粗さを示している断面。

ある場合にはソー・ダイシング前の段階として行われる。当社のアプリケーションラボでは、Quasar 355-40 レーザを用いて、約100 μ m厚の鏡面加工単結晶(<100>)シリコンウエハのスクライビングを実証した。

材料に対する熱損傷を完全に回避しながら、超高速スクライビングを達成した。最初の実験で3つの異なる条件で動作するレーザーで得られたスクライビングの深さを比較。(a)焦点位置あたりのシングルパルス、200kHz PRFで25nsパルス幅、(b)TimeShiftを使用して、より高い300kHz PRFでシングル25nsパルスを維持、(c)TimeShiftのパルス分割機能(5nsの10サブパルス、10ns分割)を使用したバーストパルス、255kHz周波数でバーストを繰り返した。

図1では、200kHzでシングル25nsパルスの曲線で、スクライブ速度が上がるにつれてスクライブの深さが減少するという基本的な傾向が成立することが示されている。レーザーの高いUV出力を用いると、これらのパラメータは見事な深さ対スピードの結果を残す。所定の深さを維持しながらスクライブ速度を増すと、300kHzを上回るPRFでもTimeShiftの機能を使用してシングル25nsパルスを生成。深さ50 μ mのスクライブでスクライブ速度22%増加を観測した。最後に、深さ50 μ mのスクライブでスピードがシングル25nsを上回るパルススクライビング条件で94%増を達成するためにパルスブリティングを用いて工程をさらに最適化した。調整可能なパルス幅やパルス形状などを最適化することでさらに改善が可能であると考えられる。

第2の実験では、パルス分割機能を用いて、様々な工作物面のフルエンスで得られるスクライブ深さを増やす可能性を調べた。パルスエネルギーを変

えて、スキャニング速度を250mm/s、PRF 200kHzに保ちながら様々なフルエンスレベルでレーザースクライブを行った。パルス幅25nsで1セットのデータを収集し、第2セットではパルスを10ns離して5個の5nsサブパルスに分割した。

図2は、シングルパルス加工でサブバーストマイクロマシニングを使うことのメリットを明確に示している。シングル25nsパルスで使えるエネルギーを5個のサブパルスに分割することで、フルエンスレベルに応じて、アブレーション深度が52~77%の範囲で増加した。これは、バーストモードアブレーションの材料除去率改良を見つけ出す他の研究とも一致する^{(2)~(5)}。

また、デブリ(崩壊堆積物)と熱影響域(HAZ)の外観を2例で比較した。図3は、スクライブの上方視点画像。バーストモードスクライブは、上面にデブリの散在が少なく高いアブレーション品質を示している。しかも、シングルパルスを利用した場合よりも深度は25%深い。バーストモード加工は、個々のサブパルスのエネルギーが低いのでアブレーションが穏やかになり、シングルパルスの場合と比較して材料への熱伝導は少ない。

FPDのガラス切断

ディスプレイ製造工程では通常、タッチスクリーンやLCDモジュールは大型の製造用パネルからガラスピースを個別切断して作製するが、その際にストレートカットが求められる。家電ディスプレイで使用されるガラス基板はますます薄く硬くなり続けているので、従来の機械的スクライブ&クリーブ加工にとまなう歩留まり損失を軽減しながら、高品質の切断、高スループットを実現するレーザーガラス加工機の大き

な潜在力が明らかになりつつある。

当社のラボ研究では、Quasarを使用して0.55mm厚ディスプレイガラスのきれいな直線切断を高スループットで実現した。パルスの時間的な特性制御によって個々のレーザーパルスの調整が容易になり、材料への熱負荷が軽減された。これによりスキニング速度を上げた高品質切断が実現し、加工全体のスループットが向上した。

当社は、製造工程で強く求められている直線切断速度1m/sを実現した。図4aは切り口をガラス前面から見た平面図である。きれいな切断面は歴然としており、チッピング(欠け落ち)は極めて少ない(<10 μ m)。図4bは切り口の側面を示しており、粗さは一般的な加工要件を満たしていることが認められた。

PCB加工

家電製品の製造では、レーザーはプリント基板(PCB)材料に、ごく普通に様々な機械加工を行う。これらの加工に含まれるのは、ブラインドビア穴開け、スルービア穴開け、デパネリング、プロファイル加工、レーザー直描、リペア、トリミング、マーキング、スカイピングなどだ。PCBの構成は、多様な材料、層、厚さがあり、さらに各材料タイプとプロセスは、適切なレーザーパラメータに対して特殊要件がある。したがって、レーザーパルスの柔軟な調整は重要である。

例えば、典型的なブラインドビア穴開けアプリケーションは、薄い樹脂材料をきれいに除去して下の銅層が露出するようにする必要がある。図5は、銅基板を50 μ m厚樹脂層で覆ったPCB材料に直径60 μ mブラインドビアをレーザーで穴開けした図である。この特殊材料では、パルス幅が短い(<20ns)方が樹脂をきれいに除去でき、

<20ns パルス → きれいな銅表面

>50ns パルス → 「汚れた」銅表面

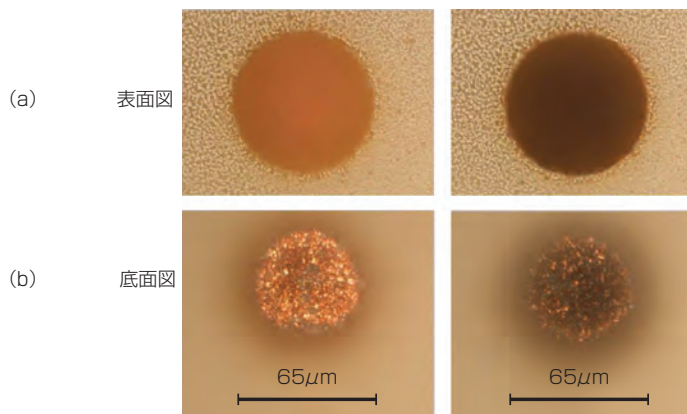


図5 PCB材料上の補強がない樹脂層に60 μ m径ブラインドビア穴開け。

ビア底部の銅が損傷なく完全に露出している。また、スループット向上にはハイパワーで高いパルス繰り返し周波数(PRF)が望ましい。

従来のQスイッチ UV DPSSレーザーでは、高いPRFではパルスエネルギーが十分でないためスループット向上に限界がある。最高パワーが低いPRFに制限されている場合、最大スループットはスプリットビームと並列加工手法の利用によってしか達成されない。これはシステムコストと複雑さと言う視点から望ましくないことが多い。Quasarレーザーでは、より高いPRFで、ハイパワーと短いパルス幅が利用できるため、より高いPRFでの動作と照

射時間の低減によってスループットの最大化が可能になる。

結果は、露出した銅基板の損傷、酸化は最小限であり、サイドウォールテーパーも最小限で、きれいなブラインドビアとなっている。これら両方の工程は、この後の銅メッキ層形成を確実にするために重要だ。ビア径と樹脂の厚さに依存するが、1秒間に4000個(holes/s)程度のスループットは可能である。

当社ラボテストの結果をまとめると、UVナノ秒パルスレーザー光源で、適切なパラメータの最適化により、高品質と高スループットが達成可能となり、家電製品の製造課題を満足するレーザー微細加工能力を拡張することができる。

参考文献

- (1) ReportLinker web site, "Global Consumer Electronics Market Outlook 2015"; <http://bit.ly/YHkfkE>.
- (2) P.R. Herman, R. Marjoribanks, and A. Oettl, "Burst-Ultrafast Laser Machining Method," US Patent No. 6,522,301 (2003).
- (3) B.R. Campbell, T.M. Lehecka, J.G. Thomas, and V.V. Semak, "A Study of material removal rates using the double pulse format with nanosecond pulse laser on metals," Proc. ICALEO 2008, 181?186.
- (4) W. Hu, Y.C. Shin, and G. King, "Modeling of multi-burst mode pico-second laser ablation for improved material removal rate," Appl. Phys. A, 98, 2, 407?415 (February 2010).
- (5) R. Knappe, H. Haloui, A. Seifert, A. Weis, and A. Nebel, "Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining," Proc. SPIE, Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly IV, 7585 (2010).

著者紹介

ラジェシ・パテル (Rajesh Patel)はセグメントマーケティング部長、ジェイムス・ボバツェク (James Bovatsek)はアプリケーションラボ主席研究員、アシュウィニ・タマンカ (Ashwini Tamhankar)は、シニアアプリケーションエンジニア。スペクトラフィジックス (Spectra Physics)、米国カリフォルニア州サンタクララ (3635 Peterson Way, Santa Clara, CA 95054); e-mails:raj.patel@newport.com, jim.bovatsek@newport.com, ashwini.tamhankar@newport.com; www.newport.com/spectra-physics.

LFWJ