OA1808-01

ファイバレーザー技術と固体レーザー技術の融合が新たなソリューションを提供

スペクトラ・フィジックス㈱　江橋　信俊

1．はじめに

Specra-Physicsは1961年に米国シリコンバレーにおいて世界初の商用レーザーメーカーとして設立されて以来、常に最先端のレーザーを提供し続けてきた。現在は2016年５月の買収により、MKS InstrumentsのSpectra-Physics、Newport、Ophirブランドにおけるレーザーサプライヤとして事業を展開している。

近年、レーザーは各種産業での加工分野において応用・導入の拡大を続けており、レーザー加工は欠かせない存在となってきている。ファイバレーザーはkWクラスにおける大出力化、WPE（電源－光出力変換効率）の向上など、性能・コストにおける進化を続け、設置台数は増加の一途をたどっている。その中で、ファイバレーザーは微細加工用途でも重要な役割を担いつつある。

当社ではファイバレーザー製品としてVGENシリーズ、そしてファイバレーザー技術と固体レーザー技術の融合による新たなソリューションとして、2013年にナノ秒高出力ハイブリッドファイバレーザーQuasar、そして2017年にピコ秒高出力ハイブリッドファイバレーザーIceFyreをリリースした。本稿では、これらについて紹介する。

2．微細加工用レーザーに求められるもの

微細加工用レーザーへの要求事項として、微細加工精度の向上は当然のことながら、生産タクトの向上、初期およびランニングコスト低減、コンパクト化などがある。特に近年、微細化が高度に進み、従来の加工方法では製造のできないようなデバイスが増加を続けており、材質・特性の異なる最良の積層材、特殊な化学処理やコーティング、光吸収の少ない材料などへの加工と複雑化・高度化し、レーザーの選定が難しい対象物が増えてきた。しかし見方を変えると、進化を続けるファイバレーザーをうまく活用することにより、デバイス製造におけるブレークスルーをもたらす可能性も増えてきたとも言える。

また、微細加工の分野においては、非熱加工というキーワードをよく耳にするようになってきた。レーザー加工部位の周囲に熱影響が残ると部品としての価値・性能を満たせなくなることが多いため、部材に与える熱影響を抑えた加工を施すことのできるパルス幅の短いレーザーへの注目が増している。

3．Spectra-Physicsのファイバレーザー製品例

当社は長年の産業用レーザーにおけるソリューションプロバイダーとして、ナノ秒、ピコ秒、そして　フェムト秒などの微細加工用レーザーを提供しているが、その中で、今後そして将来の微細加工ニーズに答えるファイバレーザーをコアとした製品群がある（図１）。

本稿では、昨年より発売のピコ秒高出力ハイブリッドファイバレーザーIceFyre、これまでの常識を超えた可変パルス幅、高繰返し領域での安定性などにより発売以来約５年、既に市場において多くの実績を上げているナノ秒ハイブリッドファイバレーザーQuasarシリーズ、そしてSHGのファイバレーザーとして好

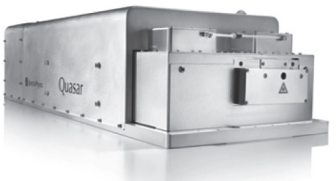
IceFyre ピコ秒 ハイブリッドファイバレーザー TimeShift™ps機能 バーストパルス形状可変機構 高出力＞50 W、高エネルギー＞200 μJ 高繰返し～10 MHz可変 AOM搭載（オプション）		IceFyre 1064-50 ＞50 W @ 1,064 nm、@400 KHz Rep rate 0～10 MHz Pulse width＜20 ps TimeShift™ps Function • Adjustable number of pulses in burst • Programable burst shape • Adjustable burst mode separation
Quasarシリーズ ハイブリッドファイバレーザー 高出力　UV ・グリーン 高繰返し ナノ秒ショートパルス～ロングパルス パルス幅可変、パルス形状可変 TimeShift™機能		Quasar 355-60/45 60 W @ 300 KHz、10 nsec/45 W @ 250 KHz、10 nsec Rep rate 0～3.5 MHz/0～1.7 MHz Pulse width ＜2 ns to ＞100 ns/＜5 ns to ＞100 ns Quasar 532-95/75 95 W @ 200 kHz、10 ns/75 W @ 200 KHz、10 nsec Rep. rate 0～3.5 MHz/0～1.7 MHz Pulse width ＜2 ns to ＞100 ns /＜5 ns to ＞100 ns TimeShift™ Function
VGENシリーズ ハイパフォーマンス　ファイバレーザー 汎用 高平均出力バージョン 高エネルギーバージョン パルス幅可変 パルスオンデマンド	VGEN-QS Wavelength：1,060～1,080 nm Power：50～100 W Pulse Width：125±25 nsec VGEN-ISP-POD Pulse-On-Demand Power：20～75W Pulse Width：3～250 nsec 	VGEN-G-10/20 Wavelength：532 nm Energy：100 μJ Pulse Width：3～20 nsec VGEN-G-HE-10/20/30 Wavelength：532 nm Energy：200 μJ Pulse Width：3～20 nsec

図１　スペクトラ・フィジックス　ファイバレーザー／ハイブリッドファイバレーザーのラインアップ

評を博しているVGEN-Gシリーズの空冷ファイバレーザーを紹介する。

4．ピコ秒高出力ハイブリッドファイバレーザーIceFyre

IceFyreはファイバレーザーと固体レーザーの技術を融合させたハイブリッドレーザーである。ナノ秒のQuasarで蓄積された技術・ノウハウを十二分に生かし、従来のピコ秒レーザーに対する常識を覆すコンセプトレーザーとして開発された、パルス幅20 ps以下、1,064 nmにて出力50 W、繰返し周波数はシングルショットから10 MHz迄可変のレーザーである。目下基本波のみとなっているが、更なるラインアップ構築に向けて検討中である。

優れた性能、柔軟性、汎用性を重視し、導入を容易にするため価格も戦略的に低く設定されている。またレーザーヘッドと電源を一体化するSpectra-Physics独自のデザインコンセプトである“It's in the Box”を採用、市場にあるピコ秒レーザーとしては最もコンパクトなレーザーとなっている。産業の製造工程での24/7の連続量産ラインでの稼働を前提とした信頼性重視の設計がなされており、その実現には高度なファイバレーザー技術と、固体レーザーの高出力化で培われた先進の光出力増幅技術がベースとなっている。

従来のピコ秒レーザーは、モードロックレーザーをシードレーザーとしているが、IceFyreではファイバレーザーを採用している。これにより従来のピコ秒レーザーでの常識を超えたバースト波形での出力が可能となっている。バーストパルス間の最小間隔は10 nsと業界最小となっており、非常に小さなタイミングジッター≦10 nsにより実用上、本来のPSO（パルスオンデマンド）加工が可能となっている。さらに、ナノ秒のQuasarで培われた独自のTimeShift™機能をピコ秒である本IceFyre用に最適化したTimeShift™ps機能により、そのバースト波形は自由度が高く、柔軟性に富んだプログラミングが可能である。IceFyreの主な仕様を表１に、繰返し周波数に対する出力、パルスエネルギーを図２に示す。

5．TimeShift™ps機能とバースト加工の優位性

IceFyreは前述のような先進のレーザー発振器構成により、非常に高い汎用性を有しており、TimeShift™psを使ってプログラミングすることにより、非常に自由度の高いバースト発振が可能である。以下のことが可能であるため、高いフレキシビリティをもって、加工対象物に対し最適な加工方法を実現することができる（図３）。

表１　IceFyre 主な仕様

Parameter	Specification
Wavelength	1,064 nm
Output Power at Optimization Repetition Rate	＞50 W @ 400 kHz
Maximum Pulse Energy at 400 kHz	＞125 μJ
Maximum Pulse Energy at 200 kHz (informational)	＞200 μJ
Repetition Rate Range	Single Shot－10 MHz
Pulse Width, FWHM	＜20 ps
Burst Mode	Yes, with TimeShift™ps
Pulse-to-Pulse Energy Stability	＜1.5% rms
Power Stability (after warm-up、%、1σ)	＜1% over 8 hours
Polarization	＞100:1、vertical
Spatial Mode（M^2）	TEM_{00}（M^2＜1.3）
Beam Divergence, full angle	＜0.75 mrad
Beam Diameter（D4σ）	3.0 mm±10%
Beam Asymmetry	1.0±10%

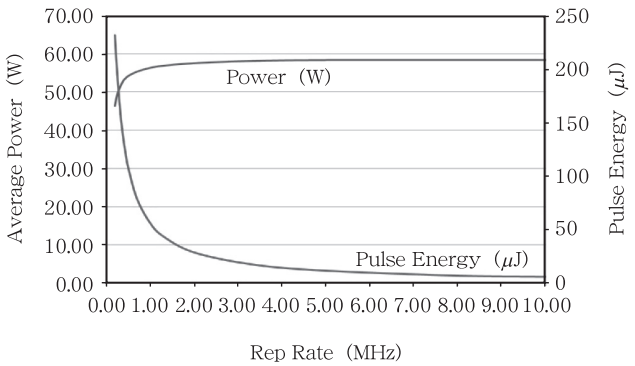


図２　Icefyre各繰返し周波数における平均出力、パルスエネルギー

- バースト内のパルス数を自由に設定
- バースト内の各パルスのエネルギーを自由に設定
- バースト内の各パルスの間隔を自由に設定
- バーストエネルギーを最大限に引き出すバースト波形を生成

以下にバースト加工により材料加工レートに著しい改善が見られる例を示す。図４は、ステンレス鋼、銅への削り込み加工における、パルスを分割しパルス数を増やすことによる加工速度（時間当たりの除去体積）の向上を示したものである。パルス数だけではなく、バーストパルスの間隔を狭くすることによっても加工速度が向上することが示されており、IceFyreの最小パルス間隔10 nsはこのようなバースト加工において理想的なレーザー源であることが分かる。

例えば最先端のデバイス製造においては、材料やその構成・構造は日進月歩に進化していると思われる。そのような加工対象物の変化に対し、このTimeShift™psを駆使することにより、同一のレーザーで最適な加工条件および加工速度を追及し続けられる柔軟性をもつことが可能となる。

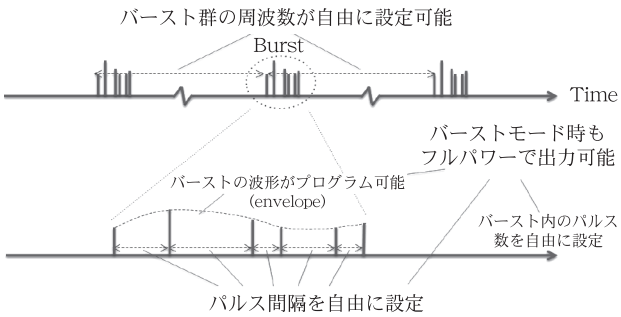


図３　IceFyre TimeShift™psにおけるバーストモード成形

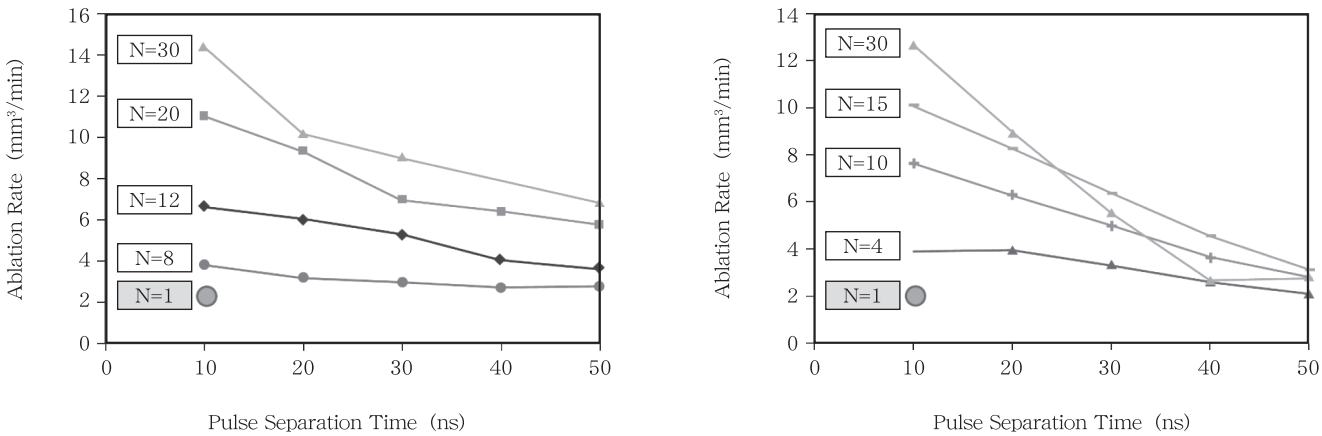


図４　パルス間隔およびパルス数を増やした場合の加工速度の向上

6．ナノ秒高出力ハイブリッドファイバレーザーQuasar

Quasarは、IceFyreの先駆けとして、ナノ秒レーザーとして従来の常識を超えたパルス幅、高繰返し周波数域での出力、繰返し可変を可能にしたナノ秒ハイブリッドファイバレーザーであり、既に精密加工用途において多くの実績を上げている。355 nmにて60 W、＞300 μJ、532 nmにて95 W、＞475 μJを出力する。Qスイッチレーザーとは発振原理が全く違うため、MHz域までも安定して高い出力が可能である。本レーザーのオプションであるTimeShift™では、前述のTimeShift™psでできることに加え、各々のパルス形状も調整することが可能である。図5に代表的なパルス出力例を示す。TimeShift™でのプログラミングにより、パルス幅は2～100 nsにて可変、パルススプリット、バーストモード等の多彩なパルス成形を実現し非常にフレキシブルな動作が可能となっている。QuasarとTimeShift™機能を駆使することにより、加工品質と加工スピードをともに最適化させた加工条件の達成が容易になり、従来のQスイッチレーザーの限界をはるかに超えた領域での加工品質・速度を得ることが可能となっている。

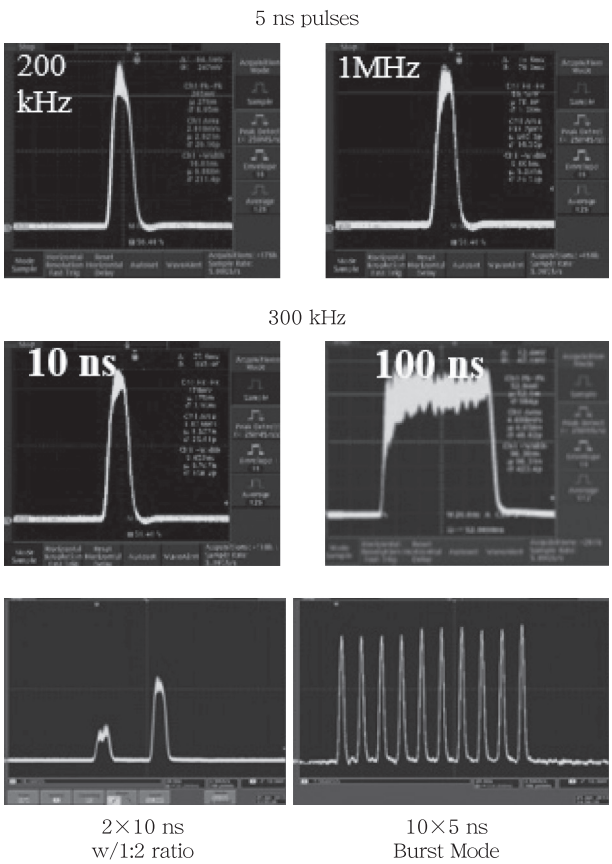
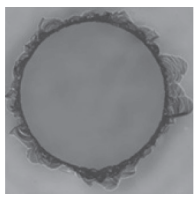
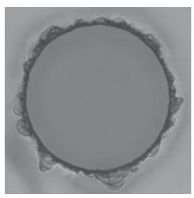
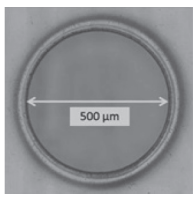


図5　Quasar、TimeShift™機能を使用して形成されたパルス波形例

このTimeShift™によるバーストパルス加工の最適化の好例として、ガラスへの穴あけの例を紹介する。表2は、50 μm厚のホウケイ酸ガラスSchott社D263に直径500 μmの穴をあけた場合の例である。単純にパルスをスプリットするだけでなく、バースト内のパルス幅の分布も最適化することにより、チッピング無しに加工速度を上げることができている。

表2　バースト加工によるホウケイ酸ガラス穴あけの最適化

10 ns	2×10 ns	2 ns+2×10 ns
		

Pulse Pattern	10 ns	2×10 ns	2 ns+2×10 ns
Chipping Size	80 μm	73 μm	20μm
Drill Time	0.31 s	0.13 s	0.14 s
Process Fluence	62 J/cm^2	90 J/cm^2	31 J/cm^2+ 90 J/cm^2

次に、Quasarの特徴を生かした応用例としてCFRPの切断、穴あけ等が注目される。近年自動車や航空機での応用が期待されるCFRPだが、成形後の加工は難しい。様々な加工方法の開発が精力的に行われているが、耐熱性など物性が非常に異なるカーボンファイバとレジンの複合材であるため、レーザーによる加工対象としても難しい材料である。いずれもUV域には吸収のある材料であるため、まだ最適解がない状態である。図6は、250 μm厚のPANタイプCFRPを70 mm/sで切断した際の切断部位をSEMにて観察した写真である。

7．ファイバレーザーVGENシリーズ

VGENシリーズは、MOPA方式、Qスイッチ方式、シングルモードCWなどの出力100 Wまでの各種ファイバレーザーをラインアップしている。パルスファイバレーザーにおいては従来困難とされていた優れたビ

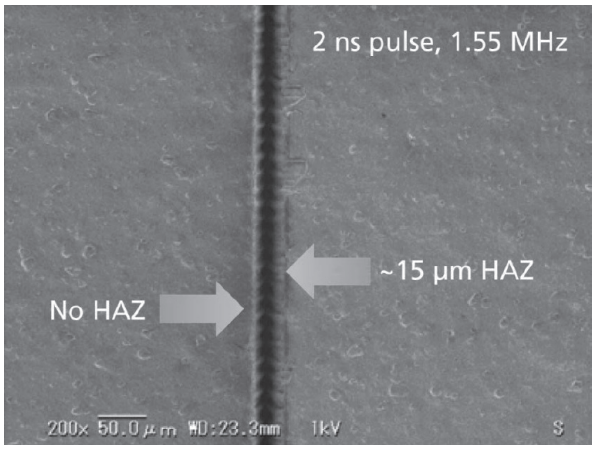


図6　CFRP加工サンプルのSEM画像

ームプロファイル（M^2＜1.3）を実現している。またMOPA方式の基本波のファイバレーザーではパルス幅を3 nsから250 nsの間でソフトウェア上の設定により可変となっている。最高2.5 MHz（IRモデル）までの運転が可能で、パルスエネルギーも最大1 mJと様々な微細加工へのフレキシブルな加工対応が可能である。このMOPAのモデルでは任意のタイミングで発振が可能なPOD（パルスオンデマンド）機能を有しており、複雑な発振タイミングにも対応でき、均一な加工結果をもたらすことに貢献する。ショートパルス、高ピークパワー（＜30 kW）により熱影響の少ない非熱加工を実現することが可能である。

また、第二高調波によるグリーンファイバレーザーVGEN-Gシリーズでは、30 Wまでのモデルがあり、空冷式でありコンパクトであるため装置組み込みが容易である。また、前述の基本波モデルと同様にパルス幅が可変（3～50 ns）であり、シングルショットから1.5 MHzまで発振可能となっており、高品質な材料加工が求められる場合に非常に高い柔軟性を有している。

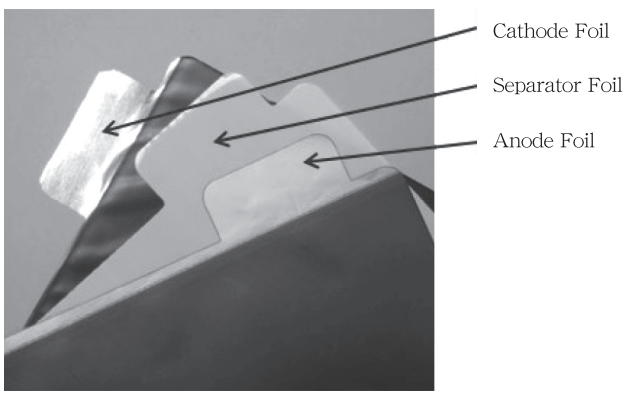


図7　リチウムバッテリーのフォイル素材加工例

主なアプリケーションとしては、各種マーキング（微細マーキング、ブラックマーキング、カラーマーキング）、太陽電池、FPD、プリント基板などへの微細加工などが挙げられる。最近注目の応用例としては、リチウムイオンバッテリーの電極箔の切断があり（図7）、V-GENシリーズの75～100 Wのレーザーを用い1 m/秒程度の加工速度での切断が可能としている。

8．おわりに：まとめ

本稿では、当社が提供しているファイバレーザーおよびハイブリッド型のファイバレーザーをアプリケーション例とともに紹介した。昨今のモバイル機器、IOTそしてクリーンエネルギー関連で使用される各種デバイスの需要は高まるばかりであり、その製造において求められる微細化、生産性、品質への要求は高まるばかりである。本稿で紹介したレーザーは、そのようなニーズに答えるべく開発されてきたものであり、当社は今後も市場の要求に真摯に耳を傾け、最先端のものづくりに貢献できる性能・機能、そして高信頼性のレーザーを提供していくことを使命と考え、産業界ひいては社会発展に資する企業として製品およびサービスを提供していく所存である。

〈参考文献〉

(1) J. Bovatsek, R.Patel, et al.：Pulse Tailoring with UV Laser Source Improves Throughput and Quality for High-Density Packaging Glass Interposer Drilling, Proceedings of LPM2016
(2) https://www.spectra-physics.com/assets/client_files/files/documents/Apps41_IceFyre%20Burst%20Machining.pdf
(3) https://www.spectra-physics.com/assets/client_files/files/documents/SP-AP-20160707-Temporal%20Pulse%20via%20UV%20Laser.pdf

【筆者紹介】

江橋信俊
スペクトラ・フィジックス㈱
産業・OEMレーザー営業部　アシスタントマネージャー