パルス幅100ps、ピークパワー 50kWのファイバレーザ

角井 素貴

パルス式ファイバレーザにおいては、非線形効果によってピークパワーは通常制約を受ける。しかし、新たに開発したパルス整形方法を用いて、直接変調された半導体レーザを主発振器としたMOPA構成により、従来得られなかったパルス幅とピークパワーが実現できた。

パルス式ファイバレーザ（PFL）は、優れたビーム品質、高効率、省サイズ、メンテナンスフリー等の多くの利点を有し、微細加工の分野で既に広く普及している。特に直接変調された半導体レーザを主発振器とするMOPA（Master-Oscillator Power-Amplifier）構成を使ったPFLは、パルス幅と繰返し周波数を広い範囲で可変できる特長を有する[(1)、(2)]。しかし多くの場合、ファイバ中の非線形効果によって、ピークパワーは10～20kWの範囲にとどまり、パルス幅の可変範囲も10nsから数100nsの範囲であることが多く、レーザ加工におけるドロス、デブリなどの熱影響は免れない。こうした熱影響を回避するためには、フェムト秒、ピコ秒領域のいわゆる超短パルスレーザの使用が有効と考えられた。

今日、多くの超短パルスレーザはモードロック式で実現されており、例としてTi: サファイアレーザや、米イムラアメリカ社（IMRA America）、米レイディアンス社（Raydiance）、カナダのジェニアフォトニクス社（Genia Photonics）、米ポーラーオニキス社（PolarOnyx）など各社のファイバレーザが挙げられる。しかしながらTi: サファイアレーザはサイズと消費電力が大きく高価であることが知られる。また総じて、モード同期は精密な調整を要し、パルス幅は共振器の構造（共振器長、利得帯域）によって制限される。再生増幅器とチャープパルス増幅（CPA）機構を併用すれば、構成は更に複雑となり、サイズ、コスト、消費電力に影響が生じる。また注意すべきは、実際のレーザ加工においては加工対象は金属、樹脂、ガラス、セラミックと多様であり、かつこれらが複合的に用いられるケースも多く、超短パルスが必ず良い結果につながるとは限らないことである。例えば薄膜太陽電池の1層目として一般的に用いられるSnO_2膜の除去に際しては、むしろナノ秒パルスが適することが知られている[(3)]。

多様な加工対象に対して最適な加工品質を得るには、パルス幅がピコ秒からナノ秒領域まで広く可変で、かつサイズ、コストの実用的なレーザが求められる。このために住友電気工業は、サンフランシスコにて開催されたPhotonics West 2011において、多様な動作モードを特長とするパルス式ファイバレーザSumiLasを発表した。本ファイバレーザは1060nmで動作し平均出力は15Wである。標準モード、短パルスモード、長パルスモードの3つの動作モードを備え、標準モードにおいてはパルス幅を1nsから20nsの範囲で、短パルスモードでは60psから1nsの範囲で可変である。更に長パルスモードでは、1μsのパルス幅で動作が可能である。いずれのモードでも繰返し周波数は100kHzから1MHzまで設定可能である。更にパルス幅1nsから2nsで動作する530nm版のラインナップも有している。

パルス整形方法

SumiLasにおける主発振器（MO）を

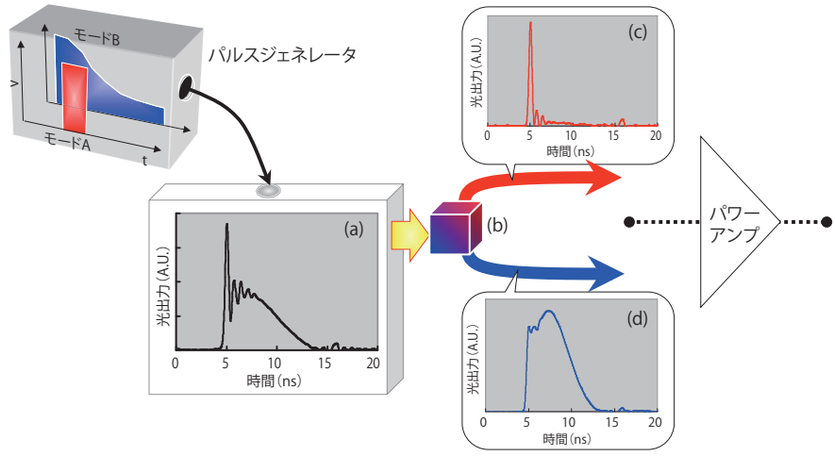

図1　直接変調されたMO部の光出力パルス（a）、及びダイクロイックミラーによって分離された主要部分（b）と、初期立上がり部分のパルス（c）。

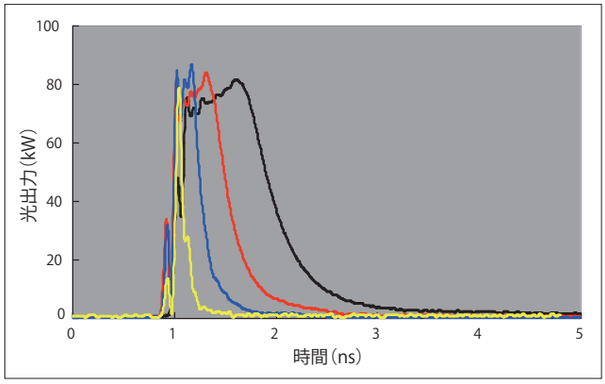

図2　短パルスモードにおけるFWHM＝60ps(黄),270ps(青),530ps(赤)、960ps(黒)の光出力パルス。

図3　SumiLasの外観写真。外寸は460(奥行き)×482(幅)×200 mm(高さ)である。

変調するパルスジェネレータ(PG)は、高速デジタル信号を出力するモードAと、100nsの時定数で任意の振幅を設定できるモードBの2つの動作モードを備えている。前者は、上述の標準モードと短パルスモードに使用される一方、長パルスモードでの動作には後者が必要となる。

標準モードと短パルスモードは、図1に示されるように、MOの出力光から、ダイクロイックミラーで各々に適正な波長成分を切り出す事で実現される。最初のオーバーシュート気味の立ち上がり成分は、半値全幅(FWHM)が1ns以下となり短パルスモードに使用される一方で、それ以降の部分は標準モードと長パルスモードに使用される。これらのモードにおいては、パルス幅の調整は、MOに印加される電気信号のパルス幅調整、或いはパルス波形の調整によって行われる。標準モードにおいては出力光パルスのFWHMは、1nsから20nsまで可変となる。一方、PGのモードBを用いて非常に緩やかな立ち上がりの電気信号により光ファイバ増幅部(以下パワーアンプ:PA)の過渡応答を補償することで、1μsのFWHMも実現できる。短パルスモードでは、図1(c)に見られるダイクロイックミラー後のFWHMは1nsより短く、通常は100psから200psの間となる。

光ファイバ増幅部

上記のダイクロイックミラー後の短パルスを、最適設計されたPAで増幅することで、パルス幅60psから1nsの動作領域において、ピークパワーは50kW以上に増幅可能である。尚、ダイクロイックミラー直後では、立上がり部の主要パルスと、これに続く数nsの裾の部分が存在するが、小信号利得を高く設定したPA部の過渡応答により前者のみが選択的に増幅される。更に後者は利得スペクトルの波長依存性により実効的に抑圧される。

注意すべきは、図1(c)のダイクロイックミラー後の光出力の平均パワーは、図1(b)の平均パワーと比較して20dB以上低く、PAは無入力に近い状態で動作することになる。その結果、自励発振の危険は非常に高くなり、通常ならファイバヒューズも含め何らかの光損傷を惹起しかねない。更にYbイオンの反転分布率も高くなり、フォトダークニング[4]も促進される背景損失の急増が懸念される。これら種々の困難を解決すべく、PA部においては入射端から出射端に向かう各ポイントにおいて、光出力レベルとYb濃度を最適化した[5]。この結果、図2に示すとおり、ピークパワー80kWに及ぶFWHMが最短で60psとなる光出力パルスが得られている。

これまで述べたSumiLasにおけるPG, MO, PAと、これらを駆動する電気回路は図3に示す19インチラックに搭載可能な筐体に収納されている。標準モード、短パルスモード、長パルスモードの各々のモードの中で、パルス幅は添付された制御用プログラムを用いて調整可能である。例えば短パルスモードにおいては、FWHMは図2に示されるとおり、60psから1nsまで変えられる。またいずれの動作モードにおいてもビーム品質は良好でM^2は常に1.3以下である。

SumiLasは、薄膜太陽電池の加工、表面改質、金属箔の微細溶接、透明材料の加工など種々の分野で有用と考えられる。更にライダーなど新用途への適用も現在検討中である。

参考文献
(1) K.T. Vu et al., Opt. Exp., 14, 23, 10996-11001(2006).
(2) S.T. Hendow et al., ICALEO 2009, Orlando, FL, paper M209(2009).
(3) S. Tamaoki et al., ICALEO 2010, Anaheim, CA, paper M1306(2010).
(4) J. Koponen et al., CLEO/Europe 2005, Munich, Germany, paper CP2-2-THU(2005).
(5) United States patent #7532391.

著者紹介
角井素貴は住友電気工業 光通信研究所 光部品研究部のプロジェクトリーダー。
e-mail: kakui-motoki@sei.co.jp URL: www.sei.co.jp

LFWJ