

レーザーパルシング: ナットとボルトとして はたらく Q スイッチングとモード同期

マルコ・アリゴーニ、マグナス・ベントソン、マティアス・シュルツェ

2つの多目的パルシング技術、Q スイッチングとモード同期は、医療画像処理および診断からアト秒科学あるいは工業用の材料加工まで、今日幅広い範囲で使用されている多くの商用パルスレーザーの基盤技術である。

現在入手可能なパルスレーザーの選択肢は非常に多いが、そのほとんどは2つのパルシング技術、Q スイッチングとモード同期に基づくものであり、それぞれナノ秒またはピコ秒からフェムト秒のパルスを提供する。本記事では、各技術の基礎、出力特性、そしてそれぞれがサポートする多数のアプリケーションのうちのいくつかについて報告する。

Q スイッチング

Q スイッチングは本質的にはレーザー共振器内に配置された超高速応答シャッターである。低Q状態にすると、それは共振器損失を生み出してレーザー発振を抑制する。高Q状態にすると、実質的に損失がゼロになり、レーザー発振を起こす。

Q スイッチング過程の主要な段階は、時間の関数として、Q スイッチ状態(共振器損失)、エネルギー蓄積、出力パワーからなる(図1)。各サイクルの開始時に、Q スイッチング素子はレーザー発振を起こさない状態にセットされる。Q スイッチがこのモードを維持する間に、連続的に供給されたポンプエネルギーはレーザー結晶(上位状態寿命が長いと仮定される)内に蓄積される。次に、Q スイッチ状態を切り替えると共振器損失が急速に0まで下がる。その結果、蓄積されたすべての利得を使って短いパルスが生成される。蓄えら

れた利得と短いパルス立ち上がり／立ち下り時間との組み合わせによって、数ナノ秒長から最高数百ナノ秒長までの高ピーク出力パルスが発生する。

最も一般的に使用されているQ スイッチデバイスは、電気光学(EO)と音響光学(AO)変調器である。EO変調器では、結晶に電圧を印加して、そこを通過する光の偏光を回転させる。この結晶を2つの交差する偏光子間に挿入すると、光がこのアセンブリを通過

できるのは印加電圧が偏光を回転させる時だけになる。EO変調器は一般に低いパルス繰り返し速度(最高数kHz)と高いパルスエネルギー(パルスあたり数mJ)で使用される。

より高いパルス繰り返し速度(数十kHz以上)と低いパルスエネルギーの場合は、通常AO変調器が適している。AO変調器においては、結晶は高周波(RF)電力が印加されたときにだけ共振器内のビームを一定角度偏向させ、

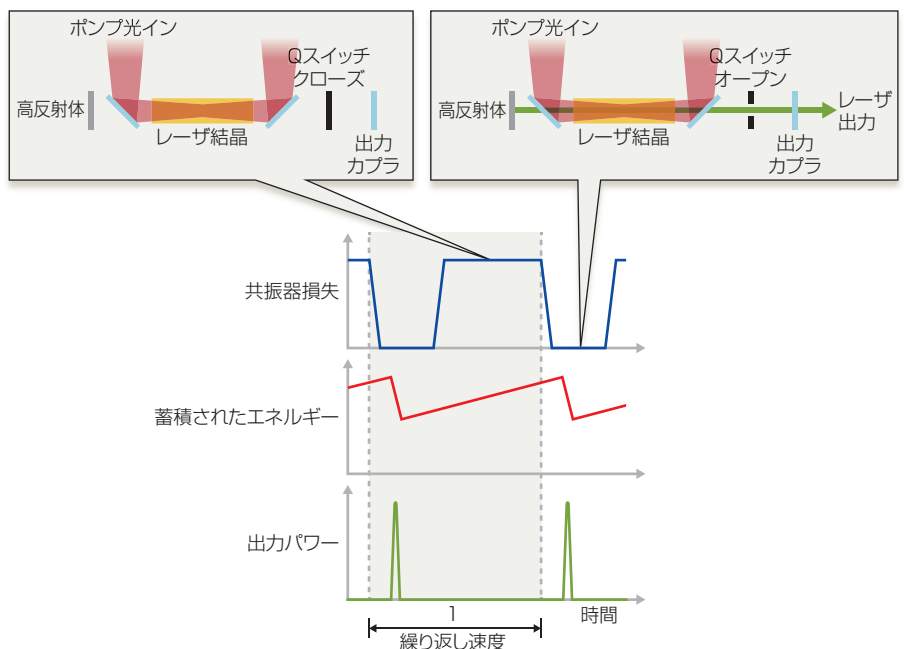


図1 Q スイッチレーザー共振器における共振器損失、蓄積されたエネルギー、および出力パワーが時間の関数としてプロットされている(下図)。縦の破線はこの過程の1つのサイクルを示し、この間に単一のレーザーパルスが発生する。このサイクルは一般に約10 μsから1ms続く。Q スイッチされたパルス発生が上図に描かれている。

レーザ発振を抑制する。

モード同期

モード同期は、連続波(CW)レーザ材料でフェムト秒またはピコ秒のパルス幅の出力を生成するための特別な動作条件である。Ti:サファイアなどの広い利得帯域幅を持つレーザ材料は数十nm以上の広帯域の出力を発生させることができる。詳細な試験の結果、この出力は数百、数千、または数万個もの個別の縦モードから成り、各モードは方程式

$$N\lambda = 2 \times \text{共振器長} \quad (N \text{ は大きな整数})$$

を満足することが明らかになった。

ほとんどのレーザにおいて、これらのモードは利得と損失の強度が無秩序であり、互いに相対的にランダムな位相関係を持っている。モード同期させると、すべてのモードの相対的位相が固定される。フーリエ解析によれば、結果としてのモードの重ね合せは光の速度で共振器周辺を進行する超短パルスとして現れる。このパルスが出力ミラーに到達するたびに、レーザがこのパルスの一部を放射する。

可能な限り短いレーザパルス幅(いわゆる変換限界パルス幅)は最終的に関係するモード数に依存する。パルス幅はレーザのスペクトルバンド幅のフーリエ変換に相当するため、より広いバンド幅はより短いパルス幅を支持し、逆もまた成り立つ。パルス繰り返し速度はレーザ共振器の往復時間で決まる。例えば、2m以下の共振器長と100nmより大きい帯域幅を持つTi:サファイアレーザ発振器では、繰り返し速度は76MHzであり、パルス幅は10fs近くなるだろう。

CWレーザは、レーザがCW自走方式ではない方式で動作するとき、低い光

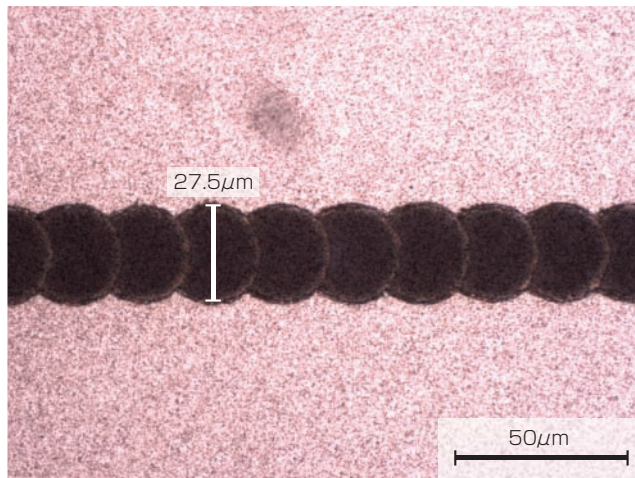


図2 QスイッチDPSSレーザを用いた薄膜ソーラパネルの製造では、コヒレント社のAVIAのようなナノ秒マイクロマシニングレーザの高いパルス繰り返し速度とパルス・パルス安定性が、一定の技術的理由で必要な均一な波形プロファイルをもつクリーンなスクライプを製造するために重要である。この画像は532nmで実行された「P2」スクライプを示す。

損失を提供する任意の機構によってモード同期動作を強制される。モード同期は使われ方によって能動と受動の2つのカテゴリーに分類される。能動モード同期は、共振器の往復速度(典型的な商用Ti:サファイア発振器では76MHz台)での、共振器(例えばAO変調器使用)の高速ゲーティングに帰せられる。

受動モード同期は利得材料におけるいわゆるカーレンズ効果によって実行可能である。ここで、モード同期動作に関連する高いピーク強度はレーザ結晶内に屈折率変化(レンズと等価)を誘起する。このレンズはビームを収束し、ビームがわずかな損失だけで内部開口を通過することを可能にする。対照的に、CW動作はクリッピングと減衰を誘起するであろう。別の受動モード同期技術は可飽和ブラッグ反射体(SBR)などの「消光可能な」光学系を使う。これは、その吸収半導体層がモード同期動作の高ピーク出力によって過負荷になった時に、100%の反射率に近づくだけの特別な共振器ミラーである。

材料加工用のQスイッチパルス

レーザビームの高効率のパルス化は、高エネルギーと高ピーク出力をもつ短

パルスを生成する。Qスイッチは最も一般的なNd:YAG、Nd:YVO₄、Nd:YLFなどのネオジウム(Nd)ドープレーザホストで使われる。これらのダイオードポンプQスイッチレーザの主要な用途は、多くの半導体・エレクトロニクス部門および関連産業の全域にわたる材料加工、特に精密マイクロマシニングである(図2)。コヒレント社のAVIAやMatrixシリーズなどのQスイッチダイオードポンプ固体(DPSS)レーザは、パワー、パルス繰り返し率、波長などを多様に取りそろえ、精密マイクロマシニング用途に柔軟に対応する。

穴あけ、切断、スクライビングのいずれかにかかわらず、精密マイクロマシニングには、周辺材料に対する熱損傷の程度を決める熱影響ゾーン(HAZ)の最小化が要求される。HAZは、より短いパルス幅またはより短い波長を使うことで最小化することができる。より短いパルス幅は材料除去パルス中に逃散または広がる熱の量を最小化する。そして、そのことがほとんどのQスイッチマイクロマシニングレーザが数十ナノ秒またはそれ以下のパルスを発生するように設計されている理由である。さらに、いくつかの材料においては、より短い(紫外)波長が結合を直接破壊し

て材料を除去する。こうした場合、Qスイッチングの高いピーク出力は有利である。なぜならば、近赤外(NIR; $1.06\mu\text{m}$)の基本波長を532nm、355nm、さらに266nmへと変換する高調波発生を高効率で実現するからである。実際HAZの最小化が最優先の要求になるので、NIRはマーキングなどのほんのわずかなマイクロマシニングにしか利用されていないが、そこではファイバレーザに比べて良好なビーム品質と安定性を提供する。

モード同期レーザはより多様に

モード同期レーザの用途は非常に多様であり、実のところ、Qスイッチレーザと比べてもはるかに多様なので、この記事の紙面の範囲内では簡単にしか概観することができない。また、これらの用途の多様性は入手可能なレーザ設計の多様性に負う。

フェムト秒Ti:サファイア発振器は、しばしば、数百GWの最大出力を達成するコヒレント社のLegendシリーズなどの再生増幅器と組み合わせられ、科学研究ツールとして広く使用されている。これらのシステムは、高エネルギー物理学における加速粒子生成、高強度テラヘルツパルス発生、時間分解光化学、単純生物における単一遺伝子の励起などの用途で利用されている。さらに、最先端フェムト秒発振器と増幅器は、キャリアエンベロープ位相(CEP)、すなわち、パルス光エンベロープと高次高調波発生(HHG)によってアト秒X線パルスの発生を可能にする、振動電場の位相と間の関係の最適制御における主流である。

生物学では、現在、コンパクトな閉ボックス型Ti:サファイア発振器と光パラメトリック発振器(OPO)などの波長拡張付属品が、生体組織の非線形顕微鏡

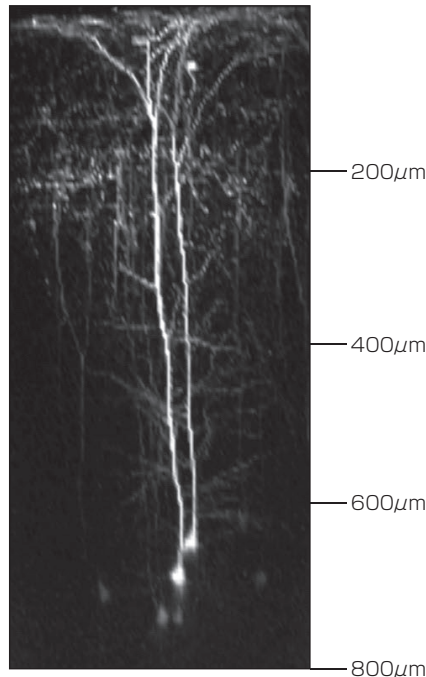


図3 このz軸画像スライスは160枚の個別x-y画像スライスのスタックから構成された。これは910nmの2光子励起を使って記録されたもので、緑色蛍光タンパク質(GFP)で遺伝子組み換えで標識化された、生きたマウスの皮質ニューロンを示す。(資料提供:カリフォルニア大学ロサンゼルス校のC・ポルテラ・カイヨー(C. Portera-Cailliau)氏のグループ)

撮像を可能にするターンキー光源として広く使われている。これらのイメージング様式には、多光子励起(MPE)と高調波発生顕微鏡法などがある(図3)。

とりわけ高度に成長した分野は、マイクロとナノマシニングでの超高速レーザパルスの利用である。特に、モード同期技術とファイバレーザ技術の組み合わせは、NIR、可視、UVの出力を選択できる新しい世代の増幅されたピコ秒レーザ(コヒレント社のTaliskerなど)を使用可能にした。このタイプのレーザは、短いパルス幅によって

HAZのないことを保証するため、薄い膜や繊細な材料からなる膜を加工するのに理想的であることが判明している。最近の用途は、ソーラーパネルのさまざまなスクライビング工程、有機LED(OLED)ディスプレイのパターンニング、次世代の医用ステントのカッティング、スマートフォンタッチスクリーン用の薄いガラスの精密穴あけなどがある(C・ムーアハウス、「ピコ秒レーザは新しいハイテクデバイスを使用可能にする」、Industrial Laser Solutions 2012年5月号の記事を参照; <http://bit.ly/JEWzZD>)。

まったく異なる用途だが、レーザ直接イメージング(LDI)技術が高密度多層PCB製造用として急成長中である。この場合、レーザはフォトリソ層内にパターンを直接描画するために使われる。この用途は名目上数十ワットのCWまたは準CW UVレーザパワーを低雑音TEM₀₀ビームに要求する。この要求はピコ秒領域で動作するモード同期Nd:YVO₄レーザによって満たされる。モード同期の高ピーク出力はレーザ共振器外での効率の良い周波数3通倍を可能にし、80MHzより大きい繰り返し速度を提供し、この最先端応用の高速走査でさえ完全なCWであるようだ。

Qスイッチングとモード同期のフレキシビリティは、パルスレーザを一層広い科学と産業の領域で利用するために、多様な選択肢を提供することを可能にする。これは、これらの技術がその多用途性ゆえに、DPSS、Ti:サファイア、ファイバレーザを含む多数のタイプのレーザに適用できるからである。

著者紹介

マルコ・アルゴニー(Marco Arrigoni)は米コヒレント社(Coherent Inc.)科学レーザセグメントのマーケティングディレクタ、マグナス・ベントソン(Magnus Bengtsson)は戦略的マーケティングディレクタ、マティアス・シュルツェ(Matthias Schulze)はOEMコンポーネント・インストルメンテーションのマーケティングディレクタである。e-mail: marco.arrigoni@coherent.com URL: www.coherent.com.