

CO₂ レーザ – 多様な過去からアプリケーション特化の未来へ前進

ヨン・チャン、ティム・キリン

他の技術では簡単には達成できない独特の波長でCO₂ レーザは平均出力値をうたう提案からアプリケーションに特化した市場に前進している。こうした市場では、超高ピークパワー、特殊波長、動作安定性が顧客の期待に応えることになる。

1964年ベル研のチャンドラ・クマール・パテル氏 (C. Kumar N. Patel) が発明した二酸化炭素 (CO₂) レーザは、フォトニクス業界の基準では古典的技術である。しかし長い歴史にも関わらず、CO₂ レーザ技術は存続しつづけ力強く成長している。理由は、波長、パワー、スペクトル純度の独自の組み合わせにある。

多くの自然材料および合成材料は、CO₂ レーザの及ぶ9~12μm スペクトル範囲に、強力な吸収特性を持つので、材料加工や特殊分析で多くのチャンスが存在する。これらの波長は大気透過率でも重要なウインドウに含まれ、多くのセンシングや広範なアプリケーションにとって理想的である (図1) ⁽¹⁾。

一般的なCO₂ レーザは、CO₂ 分子を含むガス混合の大量放電からなる。分子振動と回転のエネルギー準位が密接しているので、これらの準位間の遷移の結果として放出される光子は、可視や近赤外 (NIR) 光と比べてエネルギーが低く、波長が長い。

二酸化炭素レーザーのパワーレベルはミリワットから数十キロワットが可能であるので、計測あるいは強力な切断に同じように適している。CO₂ レーザは非常に高いスペクトル純度であり、放射線幅は<1kHzでパワートレドオフはなく、変換効率10%が可能である。こうした特徴があるのでCO₂ レーザは、

新興のアプリケーションに取り組むことができる、材料加工、光検出や測距 (ライダ)、熱視覚補助、標的治療アプリケーションである。

発明以来数十年で数十万のCO₂ レーザが、医療、製造、化学研究で使用さ

れてきた。その範囲は中国の高速製造ラインで水のボトルに印字する4ケタコードからドイツではメルセデスベンツ車用のコンポーネントパーツの溶接までである。ファイバレーザが類似のアプリケーションで人気を博しており量

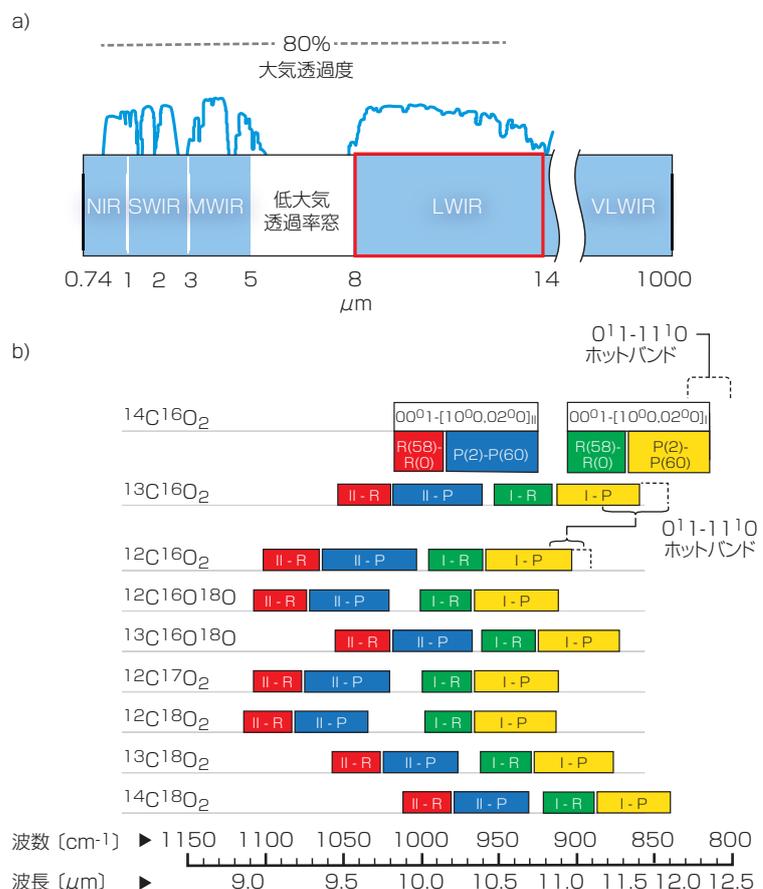


図1 二酸化炭素 (CO₂) レーザは、大気透過率の共通ウインドウ、電磁スペクトル内の赤枠 (a) で発光する。周波数および波長範囲は、9個のCO₂ 同位体のレーザー遷移 (b) で示している (出典: C. Freed⁽¹⁾)。

子カスケードレーザ(QCL)によって構築された新しい最前線がある今日でも、CO₂レーザがアプリケーション特化の領域に前進できれば、市場で最も広範に導入されるレーザの1つにCO₂レーザはとどまることになる。

競争に挑む

こうした長期的な優位性にも関わらずCO₂レーザはいくつかの前線で挑戦を受けている。以前にCO₂レーザが優位を占めていたアプリケーションの一部に、ファイバレーザやQCLが進出してきた。

産業用アプリケーションでは、ハイパワーファイバレーザの方が、安価で価格競争力があり、高効率で、金属による吸収も優れている。しかし非金属材料はファイバレーザのNIR波長を吸収しないため、CO₂レーザは多くの非金属材料の加工では唯一の方法である。

量子カスケードレーザ(QCL)もコンパクトサイズであり、2~12 μ mの波長を出力でき、分光学の最適ツールとなっている。しかし、8~12 μ mの長波赤外(LWIR)域の多くのセンシング、スペクトル感度のある産業及び医療アプリケーションは、ハイパワー、スペクトル純度、優れたコヒレンス、安定した空間モードの組み合わせを必要としており、これはCO₂レーザしか提供できない。

技術的な課題に加えて、主に中国の拡大を続けるレーザ産業からの価格低下圧力が価格をますます押し下げている。標準的なCO₂レーザは完全なコモディティになりつつあり、参入障壁も利益も急速に低下している。わずか3年前、中国の企業は米国製の30W CO₂レーザを4500ドルで購入していた。今では、中国のレーザメーカーが、2000ドルのCO₂レーザで市場に参入し

てきた。

これらの事実は、「ワットあたり1ドル」時代の終わりを告げている。こうした時代で企業が製造するレーザは、特殊な平均パワー、数え切れないほどの作業をこなす能力、供給するワットに比例する価格を特徴とする。この戦略を利用して大きな成功を収めているシンラッド社、コヒレント社、ロフィン社などの企業は、数ワットから数十キロワットのレーザ群を開発し、CO₂レーザが使用される、プラスチック製造工場、歯科医院、携帯電話組み立てラインなどの産業を生み出している。

万能ソリューションとして競争するCO₂レーザの能力は終わりに近づきつつあるが、われわれは新しい世界が突きつける課題に直面している。それは新材料であり、ますます要求が厳くなる産業および科学的加工である。こうした加工には、新しいアプリケーションに特化したレーザパラダイムがあり、ここではレーザが提案する真の価値に対する非常に深い理解が求められる

ており、CO₂レーザをどのように製造して市場に出すかについて別のアプローチが必要とされている。

製造面では、この新しいパラダイムはCO₂レーザの幅広い仕様を活用して特殊な顧客要件に厳密に適合させる。マーケティング面では、優勢な価値提案としての平均パワーや1ドル・パー・ワットから、顧客固有のソリューションにシフトしていく。ここでは、パルス整形、ピークパワー、波長特化、運用の安定性が特殊材料やアプリケーションのニーズに適合する。

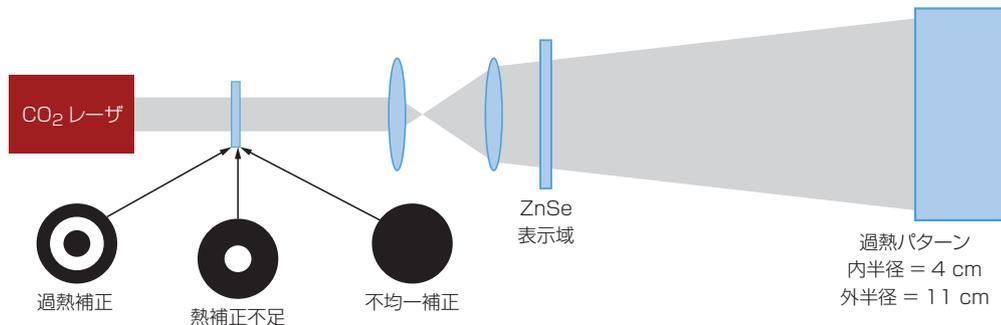
EUVリソグラフィを可能にする

ムーアの法則の拡大では、CO₂レーザはレーザ生成プラズマ(LPP)により極紫外線(EUV)発生の最適ツールと認識されている。13.5nm EUV光はスズの溶解液滴を気化することで生成する。ネオジウム・イットリウム・アルミニウム・ガーネット(Nd:YAG)のような他のレーザがこのアプリケーション用にテストされたが、CO₂レーザと比



図2 EUV光生成用のCO₂レーザは、最新の製造施設で厳しいテストを受ける(画像提供:アクセス・レーザ社)。

図3 二酸化炭素レーザーはLIGO測定システムの光学歪を補正するために使用されている(出典:S. Ballmer et al.⁽³⁾)。



べて効率が劣ることが証明されている。CO₂は、高速でプラズマ特性が優れた、光学的に薄いブリウムを生成する。これはCO₂レーザー照射に対するスズの反射率が遥かに高いからである⁽²⁾。

EUV光を生成するには、CO₂レーザーは単一波長(10.6μm)で、実質的に完璧な光品質の同じパルス的高速ストリームを供給しなければならない。半導体産業では、クリーン、正確さ、再現性の全てが要求される。

こうした厳しい要求に応えるために、EUV用のCO₂レーザーはISOクラス7クリーンルームで、未加工の部品の加工から最終テストまでが完璧に行われる(図2)。すべてのレーザーは、テスト仕様を完全に守って、連続12時間のテストをパスする、少しでも逸脱があると数千の半導体チップが機能不全に陥るからである。

LIGO歪除去

レーザー干渉計重力波天文台(LIGO)とわれわれの10年に及ぶ提携プロジェクトは、重力波の存在を確認するための重要技術を提供した。アインシュタインはかなり前に重力波の存在を予言したが、重力波の理論的な信号は小さすぎるのでアインシュタインは、宇宙の非常にかすかなざわめきを検出できる

感度の装置の実現に懐疑的であった。

われわれに接触してきたLIGOの研究者たちは非常に特異的な問題を持っていた。干渉計光学が吸収するわずかな光子、たとえ330万のうちの一つでも、光学をゆがめ、検出しようとしている信号を埋もれさせるだけの熱雑音を発生した。LIGOは熱歪を考慮して光学を設計したが、実際にはそれをリアルタイムで微調整してメインビームのパワーと個々の光部品の個別の品質に適合させなければならなかった。

二酸化炭素レーザーは、光学の調整にとって当然の方法であった。レーザービームはLIGOの光学によって強く吸収され、レーザーの波長純度と出力安定性が高かったからである。仮にそうでなかったら、計測にもっと多くのノイズが入っていたと考えられる。

LIGOの厳しいアプリケーションに特化したニーズを扱う仕事をする中でわれわれは単一波長安定化CO₂レーザーを開発した。このようなレーザーは、主要動作ビームからの熱による光学歪を的確に打ち消す、リアルタイム適応システム内の極めて正確な制御ループに適している(図3)⁽³⁾。熱歪に対して光学部品の補償が不十分な時、CO₂レ

ザービームはさらに補償を追加(過熱補正)するためにリング形状となり、それに対して光学が過剰に補償されているならば、CO₂レーザービームは中央がディスク状になり、補償を弱めた(熱補正不足)。

歯科手術

最近になって研究者たちは、ヒトの硬組織(骨や歯)が、9.3~9.6μm範囲で強い吸収があることを発見した(図4)^{(4)~(6)}。研究によると、CO₂レーザーが硬組織と軟組織の両方で口腔外科に比類なく適していることも分かっている。また、虫歯予防にも適している。

2.94μmなど、他の波長で軟組織と硬組織の両方に有効である波長も見つかっているが、9.3μmと9.6μm波長のCO₂レーザーは付加的利点として、虫歯予防と除去がある⁽⁷⁾。カリフォルニア大サンフランシスコ校(UCSF)歯科部長、ジョン・フェザーストーン(John Featherstone)教授は、その発見をレーザー歯科時代の幕開けにまでなぞらえていた⁽⁸⁾。

マルチミリジュールのパルスエネルギー、パルス幅5~20μs、数千時間の高信頼動作のCO₂レーザーは、他に類を見ないほど、歯科手術や診療現場(POC)環境に適している。この技術は大量採用には程遠いとは言え、9.3μm

ベースのパルスCO₂レーザー商用歯科システムは現在、硬組織と軟組織アプリケーション向けに販売されている⁽⁹⁾。

新材料の加工

製造が世界的に完全プロセスオートメーションの方向へ移行し続けるに従い、レーザーはパッケージングのような産業において、材料のナイフ切断やパンチプレスなどの従来の加工に対する価値提案を変えつつある。アマゾン (Amazon) などの企業は剛性包装、つまり従来の段ボール箱の既定サイズから、フレキシブルパッケージングへの変更を推進している。これは新しいプラスチック材料でできており、現場で特定出荷のニーズに正確に適合するように作られる。

フレキシブル包装は軽量であり、埋め立て地で安全に生物によって分解される。すなわち出荷と包装の固定費用および環境への影響が低減され、アマゾンにとっては、重要な未来のパフォーマンス基準である。このような移行を可能にするのは、レーザーは決して鈍化せず、機械システムを上回る再現性と正確さがあるという事実である。

多層プラスチックの新タイプは、CO₂スペクトルの1つの特定ラインで非常に強い吸収ピークがある。あるいは、切断工程で層から層へ移行する際に直ちに波長を変えられるレーザーさえ必要としている。大型ナイフ切断システムを置き換えるには、ほとんど熱影響域 (HAZ) のないアブレーションができるレーザーアレイが必要になり、同時に1秒に数百フィートのウェブ移動をトラッキングすることが必要になる。このアプリケーションに特化したレーザーは、スペクトルの単一波長で高い精度を必要としており、100:1、あるいはそれ以上の潜在的に非常に高いピークパ

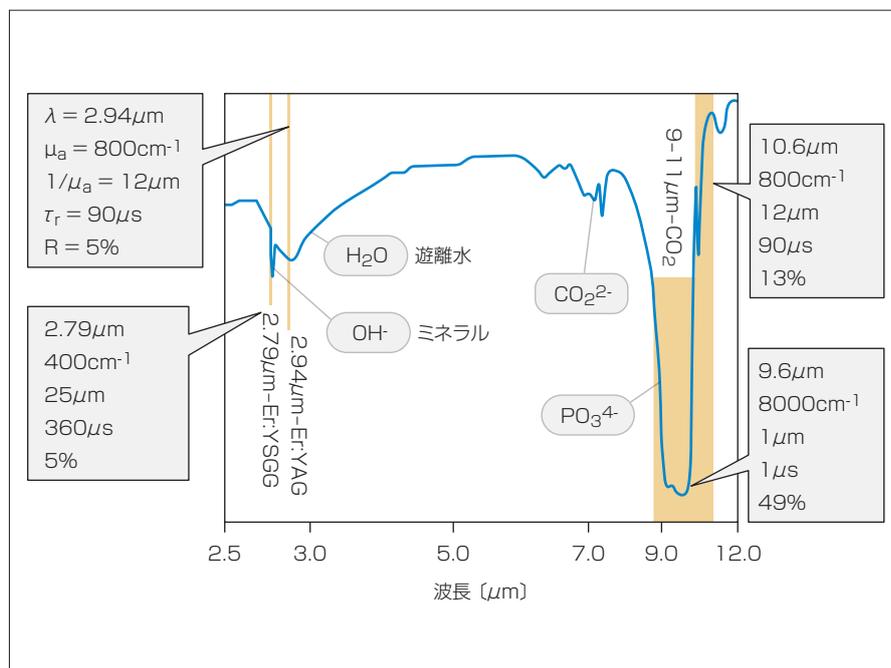


図4 エナメル粉体の赤外透過は、9.6 μm 付近の強い吸収を示している。これはCO₂レーザー放射と重なる(出典:D. Fried et al.)⁽⁶⁾

ワー対平均パワー比と高速 (>10 kHz) パルスが特徴である。

伝統的に、そのようなピークパワーと高速パルスは、Qスイッチングか他の外部変調技術を必要とする。こうした技術は、パッケージング産業で経済的に大量導入に向けて拡大するには、あまりに高価すぎる。しかし、われわれは、こうした要求を満たす小型形状

で、外部変調を用いることなくキロワットのピークパワーを出すCO₂レーザーを開発している。実際、製造、医療、材料科学における最新のトレンドにより、CO₂レーザーは、歴史的な1ドル・パー・ワットの過去半世紀における価値提議から顧客中心、アプリケーション特化の時代に進化せざるを得なくなっている。

参考文献

- (1) C. Freed, LLabJ, 3, 3, 479-500 (1990).
- (2) A. Hassanein, V. Sizyuk, S. S. Harilal, and T. Sizyuk, "Analysis, simulation, and experimental studies of YAG and CO₂ laser-produced plasma for EUV lithography sources," Proc. SPIE, 7636, 76360A (2010).
- (3) S. Ballmer et al., "Thermal compensation system description" (2005); see <http://bit.ly/2dwiUNf>.
- (4) P. Rechmann et al., Lasers Surg. Med., 45, 302-310 (2013).
- (5) N. M. Fried and D. Fried, Lasers Surg. Med., 38, 335-343 (2001).
- (6) D. Fried et al., J. Biomed. Opt., 6, 2, 231-238 (2001).
- (7) S. Parker et al., J. Laser Dentistry, 20, 2, 46-51 (2012).
- (8) J. Featherstone, Invited speech at the Annual Conference of Academy of Laser Dentistry (2013).
- (9) See <http://www.convergentdental.com>.

著者紹介

ヨン・チャンはアクセス・レーザー社の社長/CTO、ティム・キリーンは販売・マーケティング部長。
e-mail: tkilleen@accesslaser.com URL: www.accesslaser.com