加工用CO₂レーザーとその光伝送技術

永井 治彦

三菱電機(株) 生産システム本部 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

CO₂ Lasers for Material Processing and the Optical Transmission Technology

Haruhiko NAGAI

Corporate Total Productivity Management and Environmental Program, Mitsubishi Electric Corporation
8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661

(Received January 5, 1999)

Configurations and optical resonators of CW and pulsed CO₂ lasers are reviewed together with their output characteristics. Characteristics of a laser beam and a propagating gaussian beam are also reviewed theoretically, and the optical transmission technologies for a CO₂ laser beam are described.

Key Words: CW CO₂ laser, TEA CO₂ laser, Beam propagation, Beam transmission

1. はじめに

CO₂レーザーは1964年、米国のC. K. N. Patelにより発明された¹⁾。波長10.6μmの目に見えない赤外線レーザーであり、数あるレーザーのなかでも、もっとも高出力・高効率のレーザーである。

歴史的にみると、CO₂レーザーには放電励起の他に、化学励起、熱(燃烧)励起、衝撃波励起、あるいはこれらの励起法と断熱膨張ノズルとの組合せによるGDL(Gas Dynamic Laser)など、多様な励起方法によるCO₂レーザー発振が知られている。このうち、今日、加工用や医療用として実用化されているタイプはすべて放電励起CO₂レーザーである。

本論文では、主に加工用を対象にした放電励起CO₂レーザーに絞って話を進める。

2. 放電励起 CO₂ レーザー

放電励起CO₂レーザーは、連続発振(CW: Continuous Wave)をベースとした高繰返しパルス発振のタイプと、ハイピークパルス発振を低繰返しで動作させるTEAレーザー(Transversely Excited Atmospheric pressure laser)とに大別される。種々の構成・構造の放電励起によりレーザー発振が実現されており、前者は切断、穴あけ、溶接、表面改質などに、後者はマーカーなどに実用化されているレーザーである。

2.1 放電励起連続発振CO₂レーザー

2.1.1 構造

放電励起CO₂レーザーには、光軸を基準として放電、ガス

流などとの組み合わせ構成の違いにより、さまざまな構造のものがある。Fig.1に、放電励起連続発振CO₂レーザーの構成を示す²⁾。

光軸に対してガス流方向が平行か直交かにより、軸流型と横流型とに分けられる。軸流型には高速軸流型と低速軸流型がある。横流型は、ガス流と放電方向が平行な2軸直交型と、それらが直交する3軸直交型とに区別される。Fig.1は、これらの分類による構成を、ガス冷却の観点からFig.1 (i)の拡散(壁面)冷却形とFig.1 (ii)の高速ガス流型とに分けて示した。

Fig.1 (i) -(a)に示した同軸型・低速軸流型は、CO₂レーザーが発明された初期の頃の構造であり、CO₂レーザーの基本構造である。これは外周を冷却された二重ガラス管構造のレーザーで、放電管内の混合ガス(10~20Torr)を直流や交流のグロー状放電で励起し、ガスの循環と一部ガスの廃棄・補給を常時行う方式のものである。この構造のレーザーでは、ガスの冷却が十分でないため、レーザー下準位に分子が滞留し、低い放電入力において出力の飽和が生じる。この結果、放電長1m当たりCW50~70Wのシングルモード(TEM₀₀モード)出力しか得られず、大出力機では装置の長大化を招く。

このような自己拡散による冷却方式では小型化に限界があるため、高速ガス流型のガス冷却法を採用したCO₂レーザーが開発され、産業用レーザーの主流になっている。この方式のレーザーの構成をFig.1 (ii)に示す。高速ガス流型CO₂レーザーでは、光軸に対して放電方向が平行であるか、あるいは直交するかにより、同軸型(Fig.1 (ii) -(a))と横励起型(Fig.1 (ii) -(b), (c), (d))とに分けられる。さらに横励起型は、ガス流と光軸あるいは放電が平行な2軸直交

Fig.1 Various configurations of CW CO₂ laser excited by electrical discharge.

型と、これらの方向が直交する3軸直交型とに分けられる。

また近年、小型・大出力化を狙って開発が進み、製品化されている方式がFig.1 (i)-(b)に示した横励起の拡散(壁面)冷却型である。これは、送風機を使って高速ガスを流すことをせず、拡散でのみガス冷却を行う方式であり、歴史的に見れば、Fig.1 (i)-(a)に示した最初的方式と同じコンセプトに回帰している点が興味深い。

加工用として実用化されている0.5～3kW級のCO₂レーザーには、150～200m/s程度の放電部ガス流速を有する高速軸流型が多い³⁾。横励起・横流(3軸直交)型も主要な実用機に採用されている方式であり、比較的低いガス流速(30～80m/s)で、小型・大出力の装置を実現できる⁴⁾。

このような高速ガス循環方式の開発により、単位放電長当たりのレーザー出力は0.5～10kWまで高められ、飛躍的な出力の増大がもたらされた。Fig.2は、通産省の大型プロジェクト「超高性能レーザー応用複合生産システム」で開発された最大出力CW26.5kW(発振効率16.5%)のCO₂レーザーで、横励起形・横流(3軸直交)形の装置である⁵⁾。

CO₂レーザーの出力は、発振線の上準位(00⁰1)と下準位(10⁰0)との間の分子数密度の差、すなわち反転分布数に比例するので、これを大きくすることが基本的に重要である。上準位あるいはN₂の振動準位への励起を効率よく行わせるためには、放電プラズマ中の電子エネルギー分布を最適にする必要がある。この最適電子エネルギー分布に近い分布を与える放電形態が、直流のグロー放電、あるいは

Fig.2 CW 20-kW CO₂ laser (transversely excited cross-flow type ... 3 axes orthogonal).

交流の無声放電SD(Silent Discharge)やRF(Radio Frequency)放電であり、アーク放電はエネルギーが高すぎて低いエネルギー準位のCO₂レーザーの励起には適さない。初期の段階では直流放電が多用されたが、近年は、制御性の良さを生かした交流放電(数百kHz～数MHz)が実用機の主体になっている。

2.1.2 共振器とモード

加工用CO₂レーザーの共振器には、安定形共振器と不安定形共振器が使用されている。通常、安定形共振器は1～5kWの小・中出力機に、不安定形共振器は5kW以上の大出力機に採用されている。これらの共振器から得られるビームモードと集光特性の概念図をFig.3に示す。最も集光特性の良いビームは、シングルモード(TEM₀₀モード)発生 of 安定形共振器から得られる。これはガウス型の強度分布を持ち、切り幅が狭く、断面が滑らかな切断、いわゆる

Fig.3 Optical resonators and beam patterns of CO₂ laser.

ファインカッティングに不可欠なビームである。このほかにも、安定形共振器のマルチモードは溶接や切断に、不安定形共振器のリングモードは大出力の溶接や表面改質などに主に用いられる。

2.1.3 CO₂レーザーの特性

加工用CO₂レーザーの特性をTable 1に示す。最大の連続発振出力は、先に述べた通産省の大型プロジェクトで開発された26.5kWであるが、実用化レベルでは10kW級が最大出力である。技術的には20kW出力を常時、長時間発生させる技術がすでに開発されている。しかし、出力が15kW以上になると、ビーム取出し用のZnSe窓の光学的歪(optical distortion)が原因となり、ビームモードの変形や発散角の増大が起り、ビーム品質が低下する。この結果、加工性能の再現性が乏しくなる。これが実用化の壁となり、実用レベルの最大出力が10kW級にとどまっている原因である。光学的歪を避けるために、このような固体材料の透過窓の代わりに、高速ガス流のエアカテンでレーザーガスを大気から隔離するエアロダイナミック窓の技術も開発されている。

2.2 放電励起TEA CO₂レーザー

CW CO₂レーザーのパルス化尖頭出力は、ただ数10kWである。これに対してTEA CO₂レーザーでは、MW級のハイピークパルスが得られる。しかし、TEA CO₂レーザーでは高繰返し発振が行えず、通常は10Hz以下の低繰返し動作である。スイッチング素子としてサイラトロンを使った高繰返し発振のものでも、最大300Hz程度の繰返し動作である。

TEA CO₂レーザーの発振原理は、基本的にはCWのCO₂レーザーと変わらない。しかし、動作ガス圧力はCWの0.1気圧以下に対して1気圧以上と高いため、励起・発振のプロセスが異なる。その結果、出力特性も異なってくる。ガス圧力が高くなると分子間の衝突頻度が高くなり、上準位(00⁰1)に存在するCO₂の緩和が激しくなる。このため、励起を速くしなければ衝突による減衰に勝てず、レーザー発

Table 1 Characteristics of CO₂ Laser for material processing.

Wavelength: 10.6 μm
CW Power: 26.5 kW Max.
Pulse power: CW & Pulse discharge excitation (Enhanced pulse or Super pulse)
Peak power: 2.5 ~ Several 10 kW Max.
Repetition: 1 ~ 10 kHz Max.
Pulse width: 100 μs ~ CW
TEA CO ₂ laser
Peak power: 1 ~ 2 MW Max.
Repetition: 200 ~ 300 Hz Max.
Pulse width: 100 ~ 150 ns
Average power: ~ 300 W Max.
Beam divergence angle:
TEM ₀₀ mode: 1 ~ 2 mrad.
TEM _{mn} mode: > several mrad.
...Stable resonator
Ring mode: 1 ~ 3 mrad.
...Unstable resonator
Focusing spot Size: 50 ~ 500 μm

振を起こすことができない。したがって、TEA CO₂レーザーでは0.5~1μs程度の立上りの速い放電電流、すなわちハイピーク電力の放電励起が必要となる。

TEA CO₂レーザーの放電部と回路部の構成例をFig.4に示す。光軸方向は紙面に垂直な方向である。主放電用の電極は平板状の金属の陽極と陰極とからなる。材料には、加工が可能で酸化されにくいステンレスなどが用いられる。TEA CO₂レーザーの励起では、空間的に均一・一様な高気圧グロー放電を起こし、大電力密度の大断面放電を安定に維持することが最大の課題である。そのため、Fig.4 (a), (b)の例では、主放電の前にあらかじめ主放電空間を電離させる予備電離機構を備えている。これは、Fig.4 (a)の例では、光軸に沿って主放電電極の両側に対向して配置された多数の予備電離用ピン電極からなり、これらの対向電極間で生じるスパーク放電が発する紫外線により、主放電空間を主放電に先だてて予め電離させるものである。Fig.4 (b)の例では、上側の主放電電極に埋め込まれたコロナ放電電極がこの役目を果たしている。

3. CO₂レーザービームの伝送技術

レーザー加工では発振ビームを、その特性を低下させずに被加工物へ誘導・伝送する技術が不可欠である。例えば、大出力CO₂レーザー加工ではビーム伝送路長が20m前後に及ぶこともあるので、品質を低下させることなくビームを伝送させる技術が極めて重要となる。

波長1.06μmのYAGレーザーでは、光通信に開発された光ファイバを使用できることが大きな利点となっている。しかも、光ファイバではフレキシブルにビームの方向を変えられ、かつビームの並列伝送も可能である。従って、複数箇所での同時加工、あるいは被加工物への入射ビームの切換による時分割加工などのシステム構成が組めること等、伝送光学系の設計の自由度が大きい。

しかし、光ファイバで伝送されるビームは結像光学系により被加工物に集光された場合、そのスポット径はファイバのコア径と出射側光学系の拡大率で決定され、高々0.2~0.3mm程度までしか絞れない。これは光ファイバを通ったレーザー光がコヒーレンシーを失ったためであり、拡大光学系を使って集光したYAGレーザービームが通常10μm程度まで絞れる水準に比べて、大幅な特性劣化を余儀なくされる。

一方、CO₂レーザー用の光ファイバは損失が大きく、高出力用のファイバが開発されていないので、もっぱらミ

Fig.4 Configurations of TEA CO₂ laser showing electrical circuit connected with discharge section.

ラーを用いたビーム伝送系が実用化されている。ミラー系によるビームの伝送や方向制御は構造的に複雑なうえ、ビームの不安定性や出力減衰のもととなるものの、レンズでの集光により、波長の10倍程度すなわち100 μm 程度のビーム径が容易に得られる利点がある。

3.1 ビーム伝搬の特性

安定形共振器から得られるビームパターンは、マクスウェルの方程式を基にヘルムホルツの波動方程式から導かれる。軸対称の円筒座標系 (r, ϕ, z) の場合、ビーム伝搬方向の座標 $z = z_1$ において径方向 (r) 及び角方向 (ϕ) のモード数がそれぞれ p 及び l の電界振幅分布 $E_p^l(r, \phi, z_1)$ は、式(1)に示すように、指数関数(ガウス分布)とラゲールの多項式 L_p^l との積で表される⁶⁾。直交座標系では、この式はエルミートの多項式で表される。式(1)は、いわゆるラゲール・エルミートガウス分布を表しており、 TEM_{00} モード($p=l=0$ の基本ガウシアンビーム)であれ、 TEM_{mn} モード(高次モード)であれ、伝搬距離 z_1 に関係なく、常に同じパターンが保たれる、レーザービームの大きな特長を示している。

$$E_p^l(r, \phi, z_1) = \left(\sqrt{2} \frac{r}{w_1(z_1)} \right)^l \frac{w_0}{w_1(z_1)} L_p^l \left(2 \frac{r^2}{w_1^2(z_1)} \right) \times \exp \left\{ -\frac{r^2}{w_1^2(z_1)} - i \left[\frac{k}{2R(z_1)} r^2 + kz_1 + (l\phi - \Phi) \right] \right\} \quad (1)$$

ここで、Fig.5に定義するように、 z_1 は安定形共振器から伝搬するビーム方向の座標、 r, ϕ はそれに直交する径方向と角方向の座標、 w_0 は安定形共振器のビームウェストのスポットサイズ、 $k = 2\pi/\lambda$ (λ : 波長)は伝搬定数、 Φ は位相シフトである。 $w_1(z_1)$ は、座標 z_1 における TEM_{00} モード(基本ガウシアンビーム)のビームスポットサイズ(ビーム径の1/2)であり、 $R(z_1), \phi$ とともに次のように表される。

$$w_1(z_1) = w_0 \left[1 + \left(\lambda z_1 / \pi w_0^2 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$R(z_1) = z_1 \left[1 + \left(\pi w_0^2 / \lambda z_1 \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\lambda z_1 / \pi w_0^2 \right) \quad (4)$$

さらに、ビーム伝搬光路に集束用のレンズが配置された基本ガウシアンビームの伝搬特性については、フレネルの回折理論を基に、次に記す条件の下での解析解がデイクソン(L. D. Dickson)により導かれている⁷⁾。

- (a) 伝搬空間の媒質は一様である。(b) ビーム径に対してレンズの直径が充分大きく、ビームのすその蹴られない。(c) 伝搬ビームの拡がり角が小さい(安定形共振器からのビームはこれを満たす)。(d) レンズの収差がない。

Fig.5 Beam propagation and collimation from a stable resonator.

Fig.5に示した定義に従って得られた解析解は次式(5)のようになる。

$$w_2(z) = \frac{w_0 z_2}{z_1} \left[1 + \left(\frac{z_0}{z_1} \right)^2 \right]^{-1/2} \times \left\{ 1 + \frac{z_1^4}{z_0^2} \left[1 + \left(\frac{z_0}{z_1} \right)^2 \right]^2 \left[\frac{1}{z_2} - \frac{1}{f} + \frac{1}{z_1 \left[1 + \left(\frac{z_0}{z_1} \right)^2 \right]} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 w_2 は $z = z_1 + z_2$ 地点でのビームスポットサイズ(ビーム径: $2w_2$)、 f はレンズの焦点距離、 $z_0 = \pi w_0^2 / \lambda$ (confocal length)である。

伝搬光路にレンズがない場合は、式(5)に $z_2 \rightarrow 0, f \rightarrow \infty$ として次式(6)

$$w_2 = w_0 \left[1 + \left(z_1 / z_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

が得られ、式(2)と同じ式になる。 $z_1 \ll z_0$ の時 $w_2 \doteq w_0$ 、 $z_1 = z_0$ の時 $w_2 = \sqrt{2} w_0$ 、 $z_1 \gg z_0$ の時 $w_2 = (z_1 / z_0) w_0$ となる。

一方、不安定形共振器から得られる平面波ビームを使用する場合は、回折により伝送距離に依存して波面の状態が変化するので、これを考慮した伝送光学系と集光光学系の設計が不可欠である。この場合、フレネルの回折理論を基に z 軸に対して直交する面の電磁界分布を計算し、伝送光学系を設計する必要がある。

3.2 ビーム伝送技術

レーザービームを被加工物へ誘導・伝送する際、ビームの方向を変えたり、ビーム径を変換させる光学系が不可欠である。 CO_2 レーザーでは、吸収が少ない、実用的なファイバがないので、もっぱらミラーやミラーの組み合わせ、あるいはミラーの移動等の方法により、これらの機能が具現化されている⁸⁾。

3.2.1 ビーム伝送光学系

レーザー光は本来発散角(拡がり角)の小さなビームであるが、伝送距離が長くなるとともにビーム径が大きくなり、使用する光学素子にも大口径のものが必要とされる。例えば、 CO_2 レーザービームの発散角は TEM_{00} モードで1~2mrad、高次モードでは次数の増大とともに発散角が大きくなる。標準的な加工システムでは5~10mの伝送距離が必要であり、 TEM_{00} モードでもビーム径は10~20mm拡大する結果、光学素子の大きさによるビーム径の制限や非点収差の発生によるビーム品質の低下等の問題が発生する。

このようなビームの拡がりを抑制し、適正な大きさの光学素子を用いた伝送系を構成するために、ビームコリメーション用の透過レンズや球面の反射ミラーが用いられる。Fig.6にビームコリメーションの原理図を示す。光路中に配置された凸レンズ(コリメーションレンズ)により、ビームの拡がりが抑制され、光学素子の大きさに応じた、適切な径のビームに変換される。具体例としてFig.7に、加工システム用のコリメーション光学系を示す。Fig.7(b)に示したレンズを使用する場合は、耐光強度に問題が発生する高出力ビームの場合は、Fig.7(a)に示す球面ミラーが使用される。この場合、球面ミラーへのビームの入射角

Fig.6 Principle for beam collimation.

Fig.7 Optical systems for beam collimation.

を出来る限り小さくし、すなわち垂直入射に近い構成として、非点収差の発生を出来るだけ小さくする必要がある。非点収差が大きいと、反射後のビーム断面形状が楕円形、ひいては集光スポットも楕円形となり、加工精度に大きな影響を与える。

また、光走査形加工システムでは、バンドミラーを可動させる方法によりビームを走査する方法が採られるが、この場合、コリメーションレンズにより集束されたビーム径の変化が小さい範囲をバンドミラーの可動領域とすることが、非点収差を小さく抑える点から重要である。バンドミラーの可動範囲は、Fig.6に示したように、コリメーションレンズにより集束されるビームがそのウェストと余り変わらないビーム径の範囲、 $\pm l/2$ の間になるように光学系を設計することがポイントである。

3.2.2 ビーム伝送用光学素子

CO₂レーザービームの伝送用や集光用のレンズに使われる、透過型光学部品材料としては、10.6 μ mの波長に対して吸収の少ない材料、すなわちZnSeやGaAsなどの半導体、あるいはKCLやNaClなどのアルカリハライドなどの材料がある。このうち、光軸調整用のHe-Neレーザーなどの可視光を透過し、比較的吸収係数の小さいZnSeが一般的に最も多く使用されている。KCLは吸収係数が極めて小さく、また、屈折率の温度係数が負であることなど透過型光学材料として最も優れた特性を有しているが、潮解性があるので防湿対策が必要であり、さらに、単結晶であるため割れやすいのが難点である。

ビーム径の変換やビーム方向の制御には、Fig.7に示したように、凹球面の金属の全反射ミラーあるいは透過型のZnSeレンズが平面の金属の全反射ミラーとの組み合わせで使用されている。伝送光学系で使用される光学素子のう

ち、かなりの割合が平面あるいは球面の全反射ミラーで占められるが、これらのミラーには銅、タングステン、モリブデンなどの材料で製作された金属ミラーが使用されることが多い。なかでも、切削での仕上げが可能な銅ミラーは安価で、最も多用されている全反射ミラーである。但し、酸化されやすいので、表面に金メッキや金蒸着等の金コーティングが保護膜として施されたものが多く使用されている。

3.2.3 ビーム伝送光路の雰囲気

レーザービームを空気中で伝搬させると、伝送空間に存在する不純ガスや塵埃の吸収作用、あるいは空気の揺らぎなどにより、モード劣化等ビーム品質が著しく損なわれる場合がある。例えば、伝搬光路中に微量のSF₆ガスが存在する場合、CO₂レーザービームはこれに吸収されて減衰されるばかりでなく、不均一な温度分布に起因した屈折率分布の影響(thermal blooming)を受けて、そのビームが著しく発散し、ひどい時には加工ヘッドに全く届かなくなる事態も発生する。

このようなビーム品質の劣化を避けるために、通常、伝送路は光路ダクトにより周囲の雰囲気と遮断され、その中を清浄な乾燥空気や吸収のない窒素ガスなど、レーザー光を吸収しないガスが充填・循環されている。このように処置された光路ダクトの中を通してビームを伝送させる技術は、実用上極めて重要である。

4. 終わりに

加工用をベースに、光パワーの観点からCO₂レーザーとビームの伝搬・伝送技術の要点について述べた。CO₂レーザーの技術開発は既に基礎的な段階を過ぎ、応用の拡大と歩を揃えて発展する段階に入っていると思われる。しかし、近年、切断を中心とした加工機市場が飽和気味であることも加わって技術進歩が少なくなっており、穴あけ、溶接、表面改質など他の応用技術の発展を伴った、今後の技術革新を期待したい。

伝送技術については、YAGレーザーの場合のように、損失の少ない実用的光ファイバの出現が望まれる。これが実現されれば、加工システム設計の自由度が増すとともに、装置のコンパクト化が図られ、更なる応用市場の拡大・発展を期待できる。

参考文献

- 1) C. K. N. Patel: Appl. Phys. Letters 7 (1965) 15.
- 2) 永井 治彦：レーザー技術の新展開(レーザー学会編(霜田光一監修), 1994) p.97.
- 3) 軽部 規夫, 中田 嘉教, 江川 明, 森 敦, 前田 道徳: FANUC Tech. Rev. 10 (1997) 29.
- 4) 三菱電機(株): レーザー加工機カタログ
- 5) H. Nagai, M. Hishii, M. Tanaka, Y. Myoi, H. Wakata, T. Yagi, and N. Tabata: IEEE J. Quantum Electron. QE-29 (1993) 2898.
- 6) H. Kogelnik and T. Li: Proc. of the IEEE 54 (1966) 1312.
- 7) L. D. Dickson: Appl. Optics 9 (1970) 1854.
- 8) 柴山 耕三郎, 小嶋 泰博: レーザ加工技術実用マニュアル(小林昭編, 新技術開発センター, 1987) p.312.