CO₂ レーザビームの強度分布測定機の試作と PMMA のクレータしきい値の評価*

山 田 昭 政** 小 梶 好 隆*** 峰 田 進 栄**
池 田 正 幸** 安 永 暢 男** 川 手 康 郷***

Beam Profile Measurement of High Power CO₂ Laser

Akimasa YAMADA, Yoshitaka KOKAJI,
Shin'ei MINETA, Masayuki IKEDA,
Nobuo YASUNAGA and Yasukuni KAWATE

Power density distribution of high power CO₂ laser beam is successfully measured using a system designed especially. An infrared detector with single element of HgCdTe is used in the system. Incident beam is weakened to suit the sensitivity of the detector by applying a beam splitter of Si wafer coated with Au film. Scanning is carried out mechanically, in vertical direction by rectilinear motion of the detector and in horizontal direction by bran-

dishing of the beam reflected from a rotary prism. Micro processors and random access memories are used for data acquisition and processing. Items of representation by the system are such as graphic display of power density distribution, contour lines and a bird's-eye view. Actual value of power density is reckoned using whole power incidence and sum of all data. Threshold power density to evaporate PMMA is estimated by the contour of a crater formed at beam skirts where power density is inclined.

Key words: carbon dioxide laser, high power laser, beam profile, beam pattern, power density measurement, crater, burnt pattern, laser-produced vaporization.

1. ま え が き

CO₂ レーザは効率が高くて、連続発振で大出力が得られるために、材料加工の面から注目を集めている。通常、このレーザビームは光学系で反射・屈折され適当な大きさや形を持った光束に成形して用いられる。この光束内部の強度の分布状態は加工の結果に対して少なからぬ影響を与える。それゆえ、適切な光学系を設計するためには元のビーム内の強度分布が知らなければならない。ビーム内の強度分布の概略の形はメタクリル樹脂 (PMMA) にこのビームを照射して得られるクレータ (バーンパターン) から簡便に知ることができる。しかし、この方法ではクレータを生じるパワー密度のしきい値、熱の蓄積と伝導、噴出する蒸気による侵食などが複雑にからみ合うので、定量的な評価を行うことはできない。

本稿では、大出力 CO₂ レーザ用に製作された強度分布測定機の概要と適用例、およびこれによってパワー密度分布が測定されたレーザビームを照射された PMMA のクレータからこの材料を蒸発させるパワー密度のしきい

値を評価した結果について述べる。

2. 測定機の構成と作動原理

CO₂ レーザ光 (波長 10.6 μm) を検出できる素子は数種開発されているが、その中から HgCdTe 素子を用いた検知器 (HC-140 CH; 富士通) を選んだ。この検知器は、素子の作動温度が 77 K と他の素子より高く、ヒートシンクを介して背負っている冷媒用のデュワの中に液体窒素を入れておくだけで比較的容易に使え、一方、レーザビームはきわめて平行性が良く、その中の強度分布を調べるには、何らかの方法で検知器を走査してできるだけ直接的に観察する方がよい。走査には 3 とおりの方法が考えられる。第一の方法は素子の二次元アレイを用いて電子的に走査する方法であるが、これは現在開発段階にあり、画素数 32×32 程度のものが研究されている。第二の方法は二次元アレイを機械的に走査する方法で実用化の域にあるが、太い大出力レーザビームの直径全体を望むような大きなアレイを製作することはそれ自体難しく、またアレイの個々のエレメントの特性を均一にすることは至難である。そこで、この測定機では、第三の方法である単一素子を有する検知器を機械的に二次元走査する方式が採られている。鉛直方向は検知器の直進運動、水平方向は反射鏡を回転してビームを振ることによって走査を行っている。この方式では、全体を走査

* 原稿受付 昭和 57 年 1 月 29 日。昭和 56 年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和 56 年 11 月 3 日) にて発表。

** 正 会 員 電子技術総合研究所 (茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4)

*** 電子技術総合研究所

Fig. 1 Schematic diagram of beam profile measuring system

Scanning is carried out mechanically, in vertical direction by rectilinear motion of detector and in horizontal direction by brandishing of beam reflected from rotary prism

する時間は長くかかるが、感度の不均一の心配がなく、走査の刻みを変えることによって視野の大きさを変えられることが特長である。この測定機では 200 本の水平走査を行い、各走査の中で 200 点のサンプリングを行う。

この測定機の運動の制御、パラメータの設定、信号処理、演算および結果の表示は マイクロプロセッサ (M100 ACE; ソード電算機) をホストコンピュータとして、用意されたプログラムの中から対話形式によって適当なルーチンを選択して行われる。ホストコンピュータのプログラム言語は BASIC であるが、データの収集および多量のデータを扱う演算は高速を要するので、それらのプログラムはアセンブラで EPROM に書き込まれており、サブプロセッサによって実行される。

2.1 機 構

測定機の光学系の構成を図 1 に示す。入射レーザービームはまずビームスプリッターで分割される。赤外線検知器は高感度で 10 mW/cm^2 程度の入力 that 適当であり、一方、対象とする入射ビームは 1 kW/cm^2 程度であるので、このスプリッターの透過率は約 10^{-5} にしなければならない。直径 100 mm 、厚さ 0.53 mm の Si 基板に Au を約 60 nm 蒸着することによって、そのような透過率のスプリッターを得ることができる。スプリッターへの入射角はその偏光子または検光子としての作用が小さくなるようにできる限り小さくしなければならないが、配置上の制約のためこの測定機では 10° になっている。この場合の偏光による測定値のゆらぎは 5% より小さいことが簡単な実験で認められる。スプリッターの蒸着された面を入射側にすれば、Si 基板を透過するエネルギーはきわめて小さくなるので、スプリッターを強制冷却する必要はない。

スプリッターからの反射ビームは水冷式の吸収器で消費する。スプリッターでほとんどすべてのエネルギーが反射

されるので、吸収器の代わりにパワーメータを置けば、パワー計測と強度分布の測定を同時に行うことができる。

スプリッターを透過したビームは一辺が 100 mm の四角柱の側面で反射され検知器に達する。四角柱は高い精度を保つように石英で製作されている。その反射面には Cr の下地の上に Au が蒸着されており、全反射鏡となっている。四角柱への入射角は 22.5° である。この四角柱はモータで回転させられており、これによって水平方向の走査が行われる。すなわち、四角柱が回転することによって、反射面上の異なった位置からの反射が検知器に到達する。反射面から検知器までの距離は 185 mm あり、直径が 50 mm のビーム径を検知器から見込む角度は約 8° となる。四角柱がこの半分の約 4° 回転すればビームの直径を走査することができる。四角柱の回転角はこれに直結したロータリーエンコーダからの 0.01° ごとのパルス信号によって測られる。ビーム内の位置は検知器から四角柱の反射面への距離にこの回転角を乗じて近似的に算出される。この近似値と幾何学的に厳密に計算した値 (付録) との相違は直径 50 mm のビームの端で $\pm 0.7\%$ 以下である。検知器の視野 (FOV) は 60° あり、ビームの入射角を十分に包含する。検知器に対するビームの入射角が変わるので、アパーチャを設けることはできず、検出器は開放状態で使用されている。したがって、この測定機の分解能は一次的には検出器の素子の大きさ (0.4 mm 平方) によって定まる。有害な散乱光などが存在するときは水平方向のスリットを設ければよいであろう。

検知器の前方の減衰器は検知器出力を加減して増幅器のダイナミックレンジに適合させるためのもので、コーティングしない厚さ 0.37 mm の Si 基板で 30% に減衰される。検知器の応答速度は相当速いが、ロータリーエンコーダの制約のために四角柱の回転速度は約 2 rps 以下になっている。

鉛直方向の走査は、回転する四角柱と検知器を載せたステージをねじ送りすることによって行われる。ねじの回転はパルスモータによって行われ、1 パルスに対する送り量は $5 \mu\text{m}$ である。

2.2 信号処理

信号およびデータ処理システムの構成を図 2 に示す。

データ収集ルーチンでは、まずサブプロセッサにホストコンピュータからオフセット量、飛越し量、平均回数、鉛直送り量、水準値などが与えられる。オフセット量はエンコーダのゼロマークからデータのサンプリングを開始するまでのエンコーダの出力パルス数で、これを過ぎるとエンコーダのパルス信号に応じて検知器からのアナ

Fig. 2 Block diagram of electronic system for data acquisition and processing

Fig. 3 Time chart of sampling

ログ信号が8 bitのデジタル量に変換される。飛越し量は、所定の視野の水平幅が200点で表されるように、サンプリング時に読みとばすエンコーダ出力パルス数である(図3参照)。平均回数は一定の水平線上のサンプリングを繰り返す回数で、200点のサンプリングの値としてこの回数の平均値が与えられ、RAMに収録される。それが終わると鉛直送り量に相当するパルス列を発生し、パルスモータを駆動して1ステップ鉛直方向に送る。200ステップのデータ収集が終了すれば、以後はホストコンピュータとの対話に移行する。

2.3 データ処理と表示

収集したデータを用いて行う処理項目はどのようにも拡張可能であるが、基本的には、①強度の極大になる位置の検出、②実際のパワー密度の計算、③ビームに垂直な任意の線上での強度分布曲線、④ビームに垂直な面内の任意の強度の等強度曲線、⑤俯瞰図をCRT上に図示することである。このうち極大位置のサーチ、パワー密度を計算するためのデータの積分および等強度曲線の計算はサブプロセッサのルーチンになっている。

CRTに表示された図のハードコピーはビデオプロッタによって得られ、測定時の条件、パラメータおよび強度分布のピークの座標とその値、感度など測定結果はプリンタで出力される。2台あるミニフロッピーディスクのドライブのうち1台はBASICのプログラムのメディアとして使われ、もう1台は未加工のデータを記録する

Fig. 4 Explanatory diagram for integral calculus

Second difference of integral value gets a finite number when provisional level becomes equal to real level

ために使われる。RAMの記録は電源を切ったとき、または新しい測定を行うときに失われてしまうが、ディスクに書き込んでおけば、任意のときに読み出して処理を行うことができるのできわめて有効である。

2.4 パワー密度の計算

この測定機は兩次元とも尺度が可変である。すなわち視野の大きさを変えることができる。そこで、視野をビーム全体が含まれる大きさに設定して、その中の電圧で表示された全データの積分値と、同時あるいは別途に測定した同一のレーザビームの全パワーとからこの測定機の感度が決定される。HgCdTeの検知素子は抵抗型で、差動増幅されるため信号の水準(ゼロレベル)は一般に0Vとはならず、ドリフトもあるので積分値を求める場合には水準の決定に注意しなければならない。ここでは次の方法によってこの水準の決定が行われている。

計測時に検知器出力のアナログ信号を正の側に偏移させておき、積分値(水準以上のデータの総和)を計算するときに積分値の二次の階差に注目しながら水準を単位量ずつ上げていく。信号の真の水準に達するとこの階差が有限な値になることを利用して信号の水準を決定することができる(図4)。このときの積分値を全パワーで除してこの測定機の感度が計算される。一方、1サンプリング点に相当する面積が既知であるので、計測値をパワー密度に換算することができる。

このようにして感度を計算する場合には、ビーム全体

Fig. 5 Bird's-eye view of power density distribution
CO₂ laser beam, Power; 2 kW

Fig. 6 Profile of power density distribution
CO₂ laser beam, Power; 2 kW, a; Vertical, b; Horizontal

Fig. 7 Contour lines of power density
CO₂ laser beam, Power; 2 kW, a; Half value of peak, contour consistent with periphery of crater made by irradiation for one second onto PMMA, $1/e^2$ of peak and beam skirt respectively from the inner, b; Contours of $1/40$ steps of peak

が視野に完全に含まれていなければならない。ビームの一部が視野の外にある場合には、同一のビームスプリッターと減衰器を用いてあらかじめ上記の手続きで感度を定めておけばよい。

3. 測定例

この測定機によって 2 kW のレーザビーム (3.5 kW CO₂ レーザ; 三菱電機) を測定した例を以下に示す。ビ

Fig. 8 Crater on PMMA irradiated by CO₂ laser beam of 2 kW for five seconds

ームの強度分布の全体像を把握するために、強度分布の俯瞰図 (図 5) を最初に掲げる。次に、強度の極大の点を通る鉛直線上の強度分布を図 6 (a) に、また同じ点を通る水平線上の強度分布を図 6 (b) に示す。図 7 (a) はビームに垂直な平面の 4 本の等強度曲線を示す。この図で最も内側の曲線は極大値の半分の強さ、次の曲線はこのビームを 1 s 間照射された PMMA のクレータの縁辺の広がりにはほぼ相当する曲線である。その外側の曲線は極大値の $1/e^2$ の等強度曲線、最も外側の曲線はレーザビームの広がり範囲を示している。図 7 (b) は極大値の $1/40$ 刻みの等強度曲線群である。この図の中で曲線の密集しているところは強度分布の勾配の大きいところである。

4. PMMA に対する照射痕のしきい値

第 3 節で述べた同じ 2 kW のレーザビームを PMMA の表面に垂直に照射して得られたクレータの俯瞰写真を図 8 に示す。この場合の照射時間は 5 s 間である。これ

を強度分布測定機による俯瞰図 (図 5) と比較すると、クレータは測定機による俯瞰図の裾を切り取った形になっており、しきい値の存在を明らかに示している。

図 9 は照射時間が異なる場合のクレータの相違を示す写真である。上から順に照射時間が 1 s 間、5 s 間、10 s 間のクレータで、左の列はビームに垂直な平面への投影図、中の列は鉛直面への投影図、右の列は水平面への投影図である。照射時間を長くすると、クレータは深くな

Fig. 9 Projections of crater formed on PMMA by CO₂ laser irradiation
Power of laser beam; 2kW, Irradiation time; One, five and ten seconds respectively from the upper

りプロファイルは際立ってくるが、縁辺の輪郭が外に広がり境界が不明確になる傾向がある。これは、短い時間の照射ではクレータを生じないようなビームの外周のパワー密度の小さいところでも、照射時間が長くなると温度が上がりクレータを生じることを示している。すなわち、クレータを生じるパワー密度のしきい値は照射時間に依存すると考えられる。しかし、どのように小さいパワー密度でも照射時間を長くすればエネルギーの蓄積によってクレータを生じるかという点、熱の拡散、伝導があるのでそのようなことにはならない。すなわち、しきい値をパワー密度と照射時間の積すなわち単位面積への照射エネルギーで表すことはできない。それゆえ、このしきい値は一定の照射時間でクレータを生じるパワー密度で表すことが適当であると考えられる。

一定の照射時間で得られたクレータの縁辺におけるパワー密度すなわちしきい値は、このクレータを強度分布測定機によって得られた強度分布図あるいは等強度曲線と照合することによって求められる。図10はこのようにして得られたパワー密度のしきい値と照射時間の関係を示す。ここではビームに垂直な平面へのクレータの投影面積と等しい面積を囲む等強度曲線を求めることによって照合が行われている。

このように、クレータを生じるパワー密度にはしきい値があり、これが照射時間に依存するので、レーザー光の波長に対して吸収のよい材料（この場合には10.6 μmに対するPMMA）を照射することによってビームの太さ

Fig. 10 Relationship between irradiation time and power density threshold to evaporate PMMA for CO₂ laser beam

あるいは強度分布を調べる方法で直接に定量的な評価をすることは難しい。しかし、このような強度分布測定機でパワー密度分布が測定されたビームを一定時間照射して形成されるクレータを観測することによって、パワー密度とクレータの進行過程との相関をあらかじめ知っておけば、クレータによる方法でもある程度の定量的評価が可能になる。

クレータの輪郭の外にはしきい値以下のパワー密度のビームの裾が存在する。この部分に含まれるパワーの割合はパワー密度分布の形およびその極大値に依存する。例えば、ビームのモードがTEM₀₀でパワー密度分布が光軸に回転対称なガウス分布関数になっていると仮定すると、クレータの輪郭外に存在するパワーの割合はパワー密度の極大値に対するしきい値の比に等しい。PMMAの場合、照射時間が1 s間のクレータの輪郭部におけるパワー密度は約130 W/cm²であるので、ビームのパワー密度の極大値が1 kW/cm²であれば約87%のエネルギーがクレータの輪郭内に投入されているといえる。ビームがマルチモードであればこの割合はもっと大きくなって、クレータによってビームの断面積を評価する場合の誤差は小さくなる。

5. む す び

単一のHgCdTe素子の赤外線検知器を機械的に二次元走査する方式によって大出力CO₂レーザビーム用のパワー密度分布測定機を製作し、これを用いて3 kWまでのビームの測定を行った。この測定機の特長は

- (1) レーザビーム内のパワー密度分布を任意の断面で図示することができる。
- (2) 計測データの積分値を全パワーでノルマライズして感度を決定するので、パワー計測の精度に準じたパワー密度分布が求められる。

Fig. A1 Geometry of incidence and reflection for rotary prism

(3) 大出力レーザの場合にはビームスプリッタでほとんど100%のエネルギーを反射するので、パワーを同時に測定することができる。

(4) 光学系が単純で、どのような波長および強度のレーザに対しても検知器、ビームスプリッタ、減衰器を選ぶことによって適用することができる。

などで、パワー密度分布あるいはビームモードの測定にきわめて有用である。なお、CO₂ レーザに対するビームスプリッタとして、Si 基板上に Au を蒸着したものが3.5 kW まで強制冷却せずに使用できた。

PMMA に対する照射痕とこの測定機による測定結果との照合によって、この材料を蒸発させる CO₂ レーザ

のパワー密度しきい値と照射時間との関係を調べることができた。この方法は他の各種材料にもその損傷のパワー密度しきい値を決定するために適用できよう。

〔付 録〕

ある太さを有する平行光束がロータリープリズムで反射される場合、受光面の小さい検知器に入る光線の位置とプリズムの回転角の厳密な幾何学的関係を図 A1 によって示す。プリズムの回転中心 (O) から反射面への垂線 (長さ u) の足 (R_1) に入射する光線が検知器 (P) に達するプリズムの位相を基準とし、それから角 θ 回転したときに P に達する光線が R_2 で反射されるとする。基準位相における反射面に対するビームの角度を α 、 $\overline{PR_1}$ を v 、回転した反射面と基準位相における反射面との交点を Q、 R_1 への入射光線と $\overline{QR_2}$ との交点を S とする。 $\overline{PQ}$ を y 、 $\overline{QR_1}$ を w 、 $\angle QPR_1$ を β とすると、プリズムが θ 回転することによって検知される光線の部位の移動 x は次のように表される。

$$x = y \sin(\beta + 2\theta) - w \sin \alpha \quad (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} w &= u \tan \frac{\theta}{2} \\ y &= (v^2 + w^2 - 2vw \cos \alpha)^{1/2} \\ \beta &= \cos^{-1} \left(\frac{v^2 + y^2 - w^2}{2vy} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。

これは次のようにして導かれる。 $\angle PR_2Q$ と $\angle QSR_1$ はともに $\alpha - \theta$ に等しい。これを γ として

$$\left. \begin{aligned} x &= \overline{SR_2} \sin \gamma \\ \overline{SR_2} &= \overline{QR_2} - \overline{QS} \\ \overline{QR_2} &= y \frac{\sin(\beta + 2\theta)}{\sin \gamma} \\ \overline{QS} &= w \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

より (1) が得られる。