レーザーノート 1

大口径高出力炭酸ガスレーザー用カロリメータ

中 塚 正 大・久 保 宇 市*

Calorimeter for Large Aperture High Power CO₂ Laser

Masahiro NAKATSUKA and Uichi KUBO*

1. まえがき

レーザー出力のエネルギー測定法として、従来より各種の光電効果や焦電効果を用いたもの、また熱的測定など極めて多くの手段と素子が開発されてきた^{1)~3)}。これらの中で熱的方法が最も製作容易であり、光吸収体が完全吸収特性を有する場合には、較正不要の絶対測定として容易に高い確度が得られる。較正された市販品もいくつか出されているが価格は安くない。測定範囲は、連続出力でmW~kW程度、パルス出力ではmJ~100Jが問題とされている。入射ビーム径は通常2cm程度である。

最近、レーザー核融合研究や熱加工技術開発研究の分野で、炭酸ガスレーザーの開発が急速に進められ、出力エネルギーでkJパルスや10kW-cw出力が得られるようになり、ビーム径も数cm~30cmに達している。大口径ビームの測定に際して入力限度の低いカロリメータでは、正確な値の低反射率ビームスプリッターや集光系を必要とするため測定が困難となる。本報告では、大口径高出力レーザー光の測定を目的としたカロリメータの試作結果について述べる。通常の直径のレーザー光（パルス又は連続出力）に対する測定への応用も勿論可能である。

2. 光吸収体

広い波長範囲で吸収率の高い黒化金やカーボンがよく用いられるが、これらはパルス入力に対して弱くまた機械的強度も小さい。高出力パルス用吸収体としては金属酸化物が用いられ光破壊強度は大きい⁴⁾が、炭酸ガスレーザーでの赤外線領域で吸収率は高くない。そこで光入射部は円錐形とし多重反射による実効的吸収率の増加をはかるのが通常の方法である。このため入口径は約2cm⁵⁾と制限され、入射光はコーン先端部に集光されるため、市販品ではCO₂レーザー光、0.5J (100ns) パルスに対し、コーン先端部で空気の絶縁破壊によるプラズマが発生し測定誤差の原因となる。

2-1. Al₂O₃の特性

高出力大口径レーザー光の測定には平面状の完全吸収体が望ましい。その他に要求される条件は光破壊強度が大きいこと、熱伝導率が大きいこと、そして汚れに対し強く洗浄可能なことである。

レーザー加工の分野では酸化アルミ（セラミックス）の赤外線吸収率が高く加工効率の良いことが知られている。受光面として用い得るものに陽極酸化膜（アルマイト）とセラミックスがある。まずアルマイトの作成法を述べる。硫

* 近畿大学理工学部（東大阪市小若江3-4-1）

* Faculty of Science and Technology, Kinki University, Higashiosaka, Osaka

酸15%水溶液中でAl板を陽極とし、約12mA/cm²の電流を通電する。酸化アルミ膜は通電時間30分で数μmの厚さになる。膜は極めて多孔質であり、汚染に弱くまた後に熱電付などを導電性接着材で固定する際に、基板のAlを通し短絡する恐れがある。熱湯中で約30分処理すると、酸化アルミ結晶の加水が行なわれ封孔効果がある。

アルミナセラミックスは、通常の蒸着基板として市販されており、5cm～30cm角、表面粗さ1μm程度である。

陽極酸化膜の反射率⁴⁾ (Fig. 1) は波長8～11μmで2%以下であり、拡散性反射を考慮しても5%以下である。反射率は膜厚依存性を持ち、約4μm以上で低反射率となる⁵⁾

炭酸ガスレーザー (10μm P(20) 線) を用いて方向性および拡散性反射率を測定した結果、陽極酸化膜で3%以下、セラミックスで2%以下、サファイア (鏡面研磨) で5%以下であった。これらの材料を使用することで較正不要のカロリメータが製作可能である。

Fig. 1 A infrared spectrum of the specular reflectivity of the surface of the anodized aluminium. (after ref. 4.)

2-2. 熱伝達時間と冷却時間

パルスレーザー光入射による吸収体の温度上昇時間がカロリメータとしての応答速度を与える。吸収体の厚さ方向の伝達時間 τ_1 は、簡単な解析により、厚さ d 、比熱 s 、比重 ρ および熱伝導率を k とすると

$$\tau_1 = d^2 \rho s / 4k \quad (1)$$

で与えられる。アルマイト表面のアルミナ層については $d=5\mu\text{m}$ に対し $\tau_1=0.57\mu\text{s}$ となり無

視できる。アルミ層 $d=1\text{mm}$ に対し、 $\tau_1=2.5\text{ms}$ 、セラミックスでは $\tau_1=23\text{ms}$ となる。入射エネルギー分布に不均一がある場合や孤立した点で温度測定を行なう場合は、吸収体の厚さに垂直方向の伝達時間が問題となる。同様の計算が出来、 l の距離に対し

$$\tau_2 = l^2 \rho s / 4k \quad (2)$$

となる。 $l=1\text{cm}$ に対し、アルミで $\tau_2=0.25\text{s}$ 、セラミックスで 2.3s である。

一方、温度上昇した受光面が空気の対流により冷却する特性時間は、対流による熱輸送係数を h として、

$$\tau_c = \rho s d / h \quad (3)$$

で与えられる。 ρ 、 d 、 s は、受光体基板の比重、厚さ、比熱である。アルミナ面に対し $h=6 \times 10^{-4} \text{J}/\text{scm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ であり、 $d=1\text{mm}$ でアルマイトまたはセラミックスで、 τ_c は約6～8分となる。

結局、応答時間は約1秒のオーダーであり、10分程度で元の温度に戻るものと考えられる。

3. 温度検出法

光吸収体の温度上昇を測定する方法として、熱電堆によるものと、金属薄膜抵抗を利用する方法を検討した。

3-1. 熱電対法

レーザー光を吸収する吸収板と同一のものを用意し、2枚の間に熱電対を多数取り付け。必要本数を見積る。一樣な入力密度 E のレーザー光が入射され、吸収体の厚さ d 、比熱容量 q 、熱電対 (電圧感度、 V) を単位面積当り n 本つけると、電圧測定限度 $V_{\min}$ より

$$n = V_{\min} d q / E V \quad (4)$$

最少入力 $E=50\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、 $V_{\min}=10\mu\text{V}$ 、熱電対出力 $V=50\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、 $d=1\text{mm}$ とすると、アルマイトで $n=0.94\text{本}/\text{cm}^2$ 、セラミックスで $n=1.23\text{本}/\text{cm}^2$ となる。

熱電対の取り付け位置は均一な分布を取り、間隔は冷却時間 τ_c に比べ温度の均一になる時間 τ_2 が無視できる程度に小さくする。取り付け方は、熱電対の熱容量が無視でき、熱伝導良効に

吸収体温度を測定できるようにする。小さな銅箔を貼り（または蒸着し）熱電対を半田付けるか、熱電対を直接に導電性接着材でつけてもよい。

セラミックスのように τ_2 がかなり大きいときは、入射ビーム径が受光面より小さい場合やビーム入射位置が不規則に変化する場合、 τ_c に比べて τ_2 が無視できなくなり、熱電対法では入出力の直線性が損なわれる。即ち、対流損失が無視できなくなる。

3-2. 薄膜抵抗法

出力電圧の入射ビーム径依存性や入射位置依存性を無くするには、吸収体裏面に一面に適当なパターンで金属薄膜抵抗体を蒸着し、その抵抗の温度変化をブリッジ検出する方法が考えられる。抵抗体がジグザグ線状のとき、単位長さ当りの抵抗を $R(T)$ とすると温度分布 $T(x)$ に対し、全抵抗値 R は温度係数を α として

$$R = \int R(T) dx = R_0 \int (1 + \alpha T(x)) dx$$

$$\therefore \Delta R = R_0 \alpha \int \Delta T(x) dx \propto \int E(x) dx \quad (5)$$

抵抗値変化分が全入力エネルギーに比例する。

金属薄膜の抵抗の温度係数は、バルクの場合とかなり異なるので注意が要る。実験では金を蒸着し温度係数を求めた。Fig. 2に800Å厚さの蒸着膜の抵抗の温度変化を示す。 $\alpha_0 = 2.59 \times 10^{-3}$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]であり報告された値 4.30×10^{-3} [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]と異なった。

Fig. 2 The resistivity of gold thin film as a function of temperature. Film thickness was about 800 Å.

この方式は後述するように長所を示すが、抵抗測定のため電氣的入力吸収体に与えられ、出力電圧のドリフトが大きくなる欠点を持っている。感度を上げ、電氣的入力を下げる点からロックインアンプとの併用が有効であった。

4. 試作カロリメータの特性

実験的検討を行なうため次の3つのものを試作した。(i) 陽極酸化膜（基板アルミ厚さ0.6 mm）を吸収面とし熱電対10対を持つもの。受光面は10cm×10cm。（以下Ⅰ型という）(ii) 5×5 cm²、厚さ0.6mmのセラミックスを受光面とし、20対の熱電対（太さ0.1mm^φ）を持つもの。（以下Ⅱ-T型という。）(iii) 同一の受光面で裏面に約1 kΩの薄膜抵抗（Au）をつけたブリッジをもつもの（以下Ⅱ-B型という）。

4-1. 入力に対する直線性

cwレーザー出力をシャッターで短形波とし、パルス幅を変化させて、カロリメータ出力を測定した。Ⅰ型の結果をFig. 3 (a)に、Ⅱ型の結果を同図 (b)(c)に示す。各タイプ共に直線性に優れ、入力エネルギーの約3桁程度にわたって問題はない。出力感度はⅡ-T型で計算値より数%低かった。

Fig. 3 Output voltage of the calorimeter as a function of the incident laser energy. (a) combination of anodized aluminium and thermopile, (b) alumina ceramics and thermopile and (c) alumina ceramics and gold thin film bolometer. The parameter in (a) is the incident beam width at the surface of the calorimeter.

4-2. 入射位置依存性

受光面より小さいビームを測定する際に問題となる入射ビーム位置に対する依存性を測定し

た。測定対象はⅡ-B型, Ⅱ-T型である。パルス出力 $\sim 0.3J$, ビーム径 $10mm^\phi$ のTEA CO_2 レーザー出力を入射した場合の結果をFig. 4 (a) (b) に示す。熱電対法では, 中央部分約 $15mm^\phi$ 以外では出力が大きく減少した。一方抵抗法では受光面全体にわたり出力は一定している。この結果はセラミックスを受光面とする場合は, 冷却時間に比べて温度一様に要する時間 τ_2 が無視できないことを示しており, ビーム径と検出器径を等しくする必要のあることがわかる。

Fig. 4 Output voltage of the calorimeter dependent upon the incident position of the laser beam which size is shown by a bar. Temperature sensors are thermopile (a) and bolometer (b).

4-3. ビーム径依存性

一定出力のレーザー光を Ge レンズで集光ま

たは拡散し、受光面でのビーム径を変化させた結果を示す。Fig. 3 (a) のパラメータは受光面上でのビーム径であり、200 mm ビームでは受光面にほぼ一様な分布で入射している。入射エネルギーに対し、どの径の場合も同一の出力を示しているの、アルミナ型ではビーム径依存性は無いと言える。Fig. 5 はⅡ-B型の場合であり、ビーム (TEAレーザー出力) 径約2 mm まではほぼ一定の出力を示した。2 mm^φ以下ではプラズマ発生のため出力は減少した。抵抗体法ではビーム径依存性は無いと言える。

Fig. 5 Output voltage as a function of the incident laser beam diameter at the surface of the calorimeter, II-B.

4-4. 光破壊強度

レーザー光による吸収体の破壊強度は、パルス幅、吸収率と吸収体の熱的特性で決定される。レーザーパルス幅 t_p が熱伝達時間 τ_1 に比べて充分短い場合には、瞬間平面熱源の熱伝導解析となる。入射面より深さ x で、入射時刻より時間 t 後の温度上昇は次式となる。

$$T(x, t) = \frac{E}{\rho s l} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \times \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 k}{l^2 \rho s} t\right) \right\} \quad (6)$$

E は吸収されたエネルギー密度、 s は比熱、 ρ は比重、 l は受光体厚さ、 k は熱伝導率である。 $x = 0$ での温度上昇は $y = \pi^2 k t / l^2 \rho s$ としてテータ関数で表わされ、

$$T(0, y) = \frac{E}{\rho s l} \Theta\left(\frac{y}{\pi}\right) \quad (7)$$

短パルス終了直後の温度はテータ関数の性質より、 $T(0, t_p) = E (\pi \rho s k t_p)^{-1/2}$ となる。従って熱的破壊に至る入力閾値は

$$E_{\max} = T_{\max} (\pi \rho s k t_p)^{1/2} \quad (8)$$

陽極酸化膜ではアルミナ層が極めて薄いので、アルミの融点で決まる。セラミックスではアルミナの融点または沸点で決まる。それぞれに対する計算値をパルス幅の関数として Fig. 6 に示した。但し完全吸収を仮定した。

$E_{\max}$ (アルミナ沸点) と $E_{\max}$ (アルミ融点) の比は2.28であり、セラミックス型が高出力パルスに対し優れていることがわかる。

Fig. 6 Thermal damage threshold energy density of alumina ceramics and anodized aluminium as a function of the laser pulse duration.

Fig. 7 Output voltage of the alumina ceramics calorimeter as a function of the incident laser energy density with a spot size of 15mm. Laser pulse duration was about 100 ns.

Ⅱ-T型カロリメータに、電子ビーム制御CO₂レーザー出力を集光(15mm^φ, 0.1μs)した場合、入射エネルギー密度に対する出力をFig. 7に示した。入力密度が2J/cm²を越えると、セラミックス面に弱い発光が見られ、熱的破壊に至っていると思われた。この値は計算値と良く一致している。しかし、入力密度14J/cm²まで入出力特性の直線性は±2%精度で保たれ、熱的破壊にも拘らず、使用可能なことが明らかになった。それ以上の入力に対しては吸収体面上で空気の絶縁破壊を誘起し、プラズマ発生により出力は約1/2に減少した。これはプラズマによるレーザー光の吸収または反射効果と思われた。

セラミックス表面の融解、蒸発に拘らず直線性が保たれるのは、極めて短時間で熔融セラミックスが再固化し、融解熱が再び放出されるためであり、熔融状態における対流、輻射損失が無視できる程度に小さいことを示している。

融解したセラミックス表面は、レーザービームパターンと同様の跡が残る光沢を持つ。実験データの再現性から見る限りでは表面の光吸収率に変化はないと考えられた。

一方、アルマイト面では、約1J/cm²(0.1μs)で熱的破壊が生じた。受光面は白い粉を吹きつけたようになり、それは簡単にはがれるので表面状態は変化していると思われる。

5. まとめ

大口径高出力炭酸ガスレーザー光のエネルギー測定について述べたことをまとめる。

1) アルミの陽極酸化膜、アルミナセラミックスは波長10μm近傍で吸収率が高くカロリメータ用受光体として優れている。

2) アルミナセラミックスを用いたカロリメータは0.1μsパルスで14J/cm²の入力限度を持つ。この値は赤外光学素子の破壊限度を越えているので大抵の高出力レーザー光は全て直接測定可能である。

3) 熱拡散時間を考慮すると温度検出法としてアルマイトに対して熱電対法、セラミックスに対して抵抗体法が適している。

以上、簡単なエネルギー測定法について記した。他に種々の改良点があると思われるが、炭酸ガスレーザーを扱っておられる方々に少しでも役立てれば幸いである。実験の一部に御協力頂いた大阪大学工学部レーザー工学研究施設の炭酸ガスレーザーグループの方々、セラミックスの供給に便宜をはかって頂いた京都セラミックス株式会社に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 三橋, 桜井: 電気試験所彙報³² (1968) 82.
- 2) S. R. Gunn: J. Phys. E. **6** (1973) 105. Rev. sci. Instru. **45** (1974) 936.
- 3) A. A. Offenberger, P. R. Smy, and N. H. Burnett: Rev. sci. Instru. **46** (1975) 317.
- 4) J. H. Jacob, E. R. Pugh, J. D. Daugherty and D. B. Northam: Rev. sci. Instru. **44** (1973) 471.
- 5) Y. Arata and I. Miyamoto: Trans. J. Welding Soc. **3** (1972) 1.

附 録

[簡単なcw用パワメータの製作法]

熱伝導の良いアルマイトを用い簡単にパワー

Fig. 8 (a) A cross-section of a simple power meter for cw CO₂ laser and (b) the pictures of ceramics calorimeter (right) and cw power meter (left).

メータが製作できる。cw入力に対するヒートシンクにはSCR用放熱フィンが利用できる。Fig. 8に図面（断面）と写真を示す。写真右側は前述したⅡ—T型である。

50W程度の放熱フィンの中央に約20mm ϕ の穴をあけ、アルマイトを金属板で押え着ける。熱電対は、アルマイト裏面中央部に、熱電対自身のバネ作用を利用して、導電性接着材で固定する。

試作結果では、0.6mm厚のアルミを陽極酸化

したもので、入力パワ密度 $\sim 100\text{W}/\text{cm}^2$ で受光面に何ら変化なく、入力パワ30Wで直線性が保たれていた。出力感度は $0.29\text{mV}/\text{W}$ であった。

（但し熱電対は金コバルト—アルメル）。アルマイトの厚さを変え、熱放散を小さくすることにより数 mV/W の出力が得られ、 mW 級のレーザー光を容易に検出できる。

この形式では較正を必要とするが、市販のものに比べて、極めて低価格（数千円）で出来る。