レーザ出力の測定†

井上 武海*

1. はじめに

レーザは、時間的、空間的コヒーレンシーの優れた光源であり、通信、情報、加工はじめ広い分野で多様な目的に利用されている。それは、レーザ光が時間的に単色性、すなわちスペクトル線の幅が狭く安定であること、空間的には、指向性が良く高エネルギー密度が得られること、さらに制御性にも優れているからである。これらレーザ光のパラメータに関して、従来の光測定技術以外にも多くの新しい測定技術が開発されてきた。このうちレーザ出力は最も基本的な量の一つであり、レーザ発明当初よりアメリカをはじめ西欧各国で研究開発が進められ、レーザ出力標準の確立も進んでいる^{1)~4)}。ここでは、レーザ出力の測定技術に関し、測定法の原理、測定における注意およびレーザ出力測定標準化等について概説する。

2. レーザ出力とは

レーザ出力は、時間的には、単色性すなわちスペクトル純度が良く、連続またはパルスとして得られる。空間的には平行または発散するビームとして得られる。これらレーザの出力は、連続波(CW)の平均パワー、パルスのピークパワーに対するワット(watt, W)とパルスのエネルギーに対するジュール(joule, J)の単位で表わされる。エネルギーに関連した量を測光における物理量と対比して表1に示す。

表1 レーザ出力、放射・測光量の対比

レーザ出力		放射・測光	
基本量	単位	基本量	単位
エネルギー	J	放射エネルギー(光量)	J(lm·S)
エネルギー密度	J/m ²		
パワー	W	放射束(光束)	W(lm)
パワー密度	W/m ²	放射発散度(光束発散度)	W/m ² (lm/m ²)
		放射照度(照度)	W/m ² (lx)
		放射強度(光度)	W/Sr(cd)
		放射輝度(輝度)	W/Sr·m ² (cd/m ²)

† Laser Power and Energy Measurement

* 電子技術総合研究所電波電子部高周波研究室 Takemi Inoue

〒305 茨城県つくば市梅園1-1-4 電話 0298-54-5152

1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305 Japan

今日、レーザの波長は200 nmの紫外域から1 mm程度のサブミリ波領域まで及んでおり、一方、出力範囲として、CWで10⁻¹²~10⁵ W、パルスで10³ J、ピークパワーで10¹² Wに達する。現在、実用的なレーザにはレーザ媒質により、固体、半導体、気体、液体レーザ等があるが、代表的な市販レーザの例を表2に示す。このようにレーザの出力は、W、Jの単位で表わされるが、多様な出力形態があるため、測定方法、測定器の種類が多い。またレーザ出力測定器は、光パワーメータ、エネルギーメータ、ジュールメータ等いろいろな呼び方をされるが、ここではレーザ出力計ということにする。

表2 代表的なレーザとその出力

レーザ	発振波長域(μm)	出力	
CO ₂	10.6	CW	1~5×10 ⁴ W
		パルス	5×10 ⁻³ ~2 J
YAG	1.06	CW	0.1~600 W
		パルス	10 ⁻³ ~100 J
ガラス	1.06	パルス	0.1~100 J
半導体	0.75~1.55	CW, パルス	~1 W
色素	0.38~0.95	CW	0.05~1 W
		パルス	~0.2 J
N ₂	0.337	パルス	~0.02 J
エキシマ	0.157~0.351	パルス	0.01~1.5 J

注) 市販レーザのカタログ値より

3. 測定法の原理

レーザの出力を測定する原理には、表3のように光電的、熱的、光化学的、非線形光学的および機械的のものが

表3 レーザ出力測定法の原理による分類

測定方法	原 理		特 徴
熱 的	温度検出	熱電対 サーマistor	・絶対値校正・高精度
		抵抗変化 体積変化	・広波長域・広いパワーレンジ
光 電 的	焦電効果		・安定である
	外部光電効果(光電管)		・高感度
		内部光電効果 { pnフォトダイオード p-i-nフォトダイオード アバランシェフォトダイオード	・高速応答 ・波長域は狭い
光化学的	光導電効果		
非線形光学的	写 真		・波長域は狭い・高感度
			・定量的測定に不適
機 械 的	非線形光学効果 (光整流効果)		・パルスに適する・低感度(大パワー用)
			・透過形
機 械 的	放射圧		・絶対測定・大パワーに適する

ある⁵⁾⁶⁾。しかし多くの市販測定器があって、実用的に重要なのは光電的方法と熱的方法であり、次節以下に述べることで他の方法を簡単に説明する。

光化学的方法は、写真フィルム、乾板等を用いて、光化学反応量と入射レーザエネルギーとの関係から出力を求める方法で、同時に照射時間を測定すればパワーを決めることができる。しかし波長依存性が大きく、線形性も良くないので出力レベルのオーダを推定する程度である。

非線形光学的方法は、光整流効果を示す反転対称のない光学結晶にレーザを照射すると、入射パワーに比例した直流分極が現われることを利用するものである。結晶の物理定数から瞬時パワーを計算することができるが、感度が低いこと、再現性が良くないこと等の問題点がある。

機械的方法は、光子の持つ運動量に比例した力積を標的鏡に与え、これが変位した量からレーザ出力を求める方法である。このような光の放射圧を利用する方法は、比較的高いエネルギーの測定が可能であり、原理的に絶対測定が行なえる特徴がある。

図 1 市販レーザ出力計の原理、構造による種類と分布⁷⁾

実際のレーザ出力計の現状は、昨年の調査によると図 1 のような種類の分布になっている⁷⁾。100 mW を境として、低出力側では光電形が主体であり、高出力側では熱形が主体となる。最近、光ファイバ用の出力計が数多く市販されるようになったが、レーザビーム用には輸入品が圧倒的に多い。

4. 光電的方法

光電的方法は、光によって半導体中で電子が伝導帯に励起されることを利用した光電検出器を、レーザ出力の測定に適用したものである。光電検出器には、光起電力効果、光導電効果等の半導体内部における現象（内部光電効果）を利用したものほかに、真空中への電子の放射（外部光電効果）を利用したものがある。代表的な光電検出器の例を図 2 に示す⁶⁾。レーザの出力測定では、半導体の PN 接合による光起電力効果によるフォトダイオード (PD) が多く用いられる。実際には、波長域、応答速度、感度等により材料、構成、動作回路等が異なる。この違いで太陽電池、PIN-PD、アバランシェ PD 等に分けられる⁶⁾。

一般に光電検出器は、感度が高く応答も早いので mW

図 2 各種の光電検出器⁶⁾

以下のパワーやパルス波形の測定には不可欠である。しかし、原理的に感度の波長依存性が大きく波長域全域での校正が必要であること、受光面上の位置による感度の違いが大きい等の短所がある。また素子表面のコーティングや窓材により反射や偏光特性の大きい場合があるので注意が必要である。

市販の出力計では、フォトダイオード (PD) を検出器とし、指示計でアナログまたはデジタル表示するものが多い。0.4~1.1 μm で Si PD, 0.8~1.7 μm で Ge PD がよく用いられてきたが、最近、0.8~1.65 μm で、InGaAs PIN-PD のような三元系検出器が実用化された。この検出器は、分光波長感度の変化が少なく暗電流も小さいため、特に光ファイバ系の微小出力の測定に適する。光電形の出力計は、ダイナミックレンジが 60 dB 程度と広く、分解能も 1/100~1/1,000 dB ある。光ファイバから放射される出力を測定するためのアダプタを備えた検出器もある。

一般に PD を用いた出力計は、使用できるパワーの上限が小さく、光減衰器を用いない場合、10 mW 程度までである。また、受光面の感度むらがあり、ビーム入射位置によって測定値の変化が数%に達する場合がある。

光電形のレーザ出力計は、0.4~1.7 μm の可視、近赤外域では上述のように多く用いられるが、紫外域、赤外域では感度が低下するため使えなくなる。これら波長域における光検出器には、紫外域で光電子増倍管、赤外域で InAs, InSb, HgCdTe 等をはじめ種々の原理によるものがあるが、実用的なレーザ出力計としては用いられていないようである。

5. 熱的方法

熱的方法は、レーザ光を反射の少ない吸収体に吸収させ、熱に変換しその温度上昇を利用して測定する方法である。これは、光学の分野で絶対放射の測定に用いられてきた方法と基本的には同じである。レーザ光の場合、はじめに述べたように単色であること、高出力ビームであること、発振モードによってビーム断面内の出力密度分布が大きいこと、パルスの場合があるなどいろいろな点で光学の分野における測定方法と異なる。

で黒化する。可視、近赤外域では、金黒*の反射率が1%程度と優れており、300 mW/cm²以下の低パワーレベルにおいて用いられるが振動に弱い欠点がある。市販の黒色ペイントの一種であるカーボン粒子を主要要素とするVelvet coating (Netel 社101-C10)は、反射率3%程度であるが、耐熱性に優れ、経時的にも安定であり、500 W/cm²までのレベルでよく用いられる。

図 5 は後者の例で、レーザ出力は水の温度上昇分と流量の計算により求める方法、または DC (AC) ヒータを内蔵して校正する方法がある。

図 5 フロー形カロリメータ

吸収エネルギーによる温度上昇を検出するための検出器には、熱電対、サーミスタなどを用いることが多いが、最近、焦電効果を利用した素子が普及してきた⁹⁾。焦電素子は、強誘電体の加熱による温度変化に比例した自発分極で生じる起電力を利用したもので、素子の温度がパルス状に変化する必要がある、CW パワーの測定では機械チョップにより、いったんパルス波に変換して測定する。TGS (triglycine sulphate)、PVF₂ (polyvinylidene fluoride) 等の素子が代表的で、薄片に電極を付けてコンデンサ状とし、受光面に黒化物を付着させた素子である。高速応答で感度が高く、広い波長域 (0.2~30 μm) の素子を製作することができる。

市販の熱形のレーザ出力計は、紫外から赤外の広い波長域で mW (J) ~ kW (J) の測定に用いられる。波長や受光面への入射位置による感度の変化が小さい反面、一般に測定数が長い、測定レベルが高く、ダイナミックレンジが狭い等の短所がある。数 W (J) 以上の高出力、紫外や赤外域波長のレーザ出力の測定には熱形が多く用いられる。

パルス出力の測定では、パルス 1 回当たりのエネルギー(J)とピークパワー(W)、または平均パワー等が対象となる。市販されているパルスレーザは、波長で 157 nm~10.6 μ m, エネルギーで 10^{-9} ~ 10^2 J, パルス幅で最小 10^{-13} sec, パルス繰り返して 1 ~ 10^9 pps の広いパラメー

分 数	形 式	備 考
面吸収 (Surface absorption)	<p>黒化物 (金属) ナノド ヒータ</p> <p>ヒータ</p>	<p>○構造が単純 ○感度良好 ○特定数、短い可 ○吸収率、耐パワー性に優れる</p>
	<p>コン(金属) パイプ ヒータ</p> <p>ヒータ</p>	<p>○耐パワー性大 ○大出力カロリータに適合する</p>
多量反射形 (multi- reflection type)	<p>ヒータ</p>	<p>○吸収率が高い ○波長依存性良好 ○特定数は長い</p>
	<p>パイプ</p> <p>受容器</p>	
体積吸収 (volume absorption)	<p>固 体</p> <p>ヒータ</p>	<p>○耐エネルギー性大 ○特定数が長い ○形状が任意にできる</p>
	<p>液 体</p> <p>ヒータ</p>	<p>○波長依存性が大きい ○足形式で冷却が容易 (フロー式)</p>
気 体	<p>ヒータ</p>	<p>○直流電流が難しい</p>

* 低圧ガス雰囲気 (例: 1 torr アルゴン) 中で金を蒸着して得られる微粒子の堆積物.

タ範囲にわたっている。またCW レーザ光を、チョッパや変調器でパルス状としたものもレーザ出力測定の対象となる。

単一パルスの出力測定の基本的な方法を、図 6 に示す。エネルギー E_p は、瞬時パワーを積分したものである。したがって、同図(a)の熱形受光器のように、一般にパルス幅より時定数が大きい場合には、受光器応答のピーク値がパ

図 6 単一レーザパルスの出力測定
(a) 熱的測定法 (b) 光電的測定法

ルスのエネルギーを与える。すなわち、単一パルスに対する熱形受光器の応答 $V(t)$ は、一対の熱容量と熱抵抗からなるとすれば、次式で表される¹⁰⁾。

$$V=K R_C P_p (1-e^{-\frac{t}{\tau}}) ; 0 \leq t \leq t_w \cdots \cdots (1)$$

$$=K R_C P_p (e^{-\frac{t-t_w}{\tau}}-e^{-\frac{t}{\tau}}) ; t_w < t \cdots \cdots (2)$$

ただし、 t_w はパルス幅、 τ は受光器の時定数、 K は受光器の温度に対する感度 ($V/^{\circ}C$)、 R_C は熱放散定数 ($^{\circ}C/W$)、 P_p はピークパワー (W) である。

τ が t より十分大きい場合には、 $t=t_w$ における応答 V_t は、

$$V_t \approx \frac{K R_C P_p t_w}{\tau} = \frac{K R_C}{\tau} E_p \cdots \cdots (3)$$

となる。実際には受光器の熱特性が高次の遅れ要素を含み、加熱時の特性が(1)式からずれる。このため、精密な測定を行う場合は(2)式の冷却特性を用いる¹⁾。(2)式でパルスの始点側へ外挿した値は、 $\tau \gg t_w$ ならば(3)式と同じ結果と

なり、 E_p を求めることができる。
一方、ピークパワー P_p は、同時に波形測定を行なってパルス幅 t_w を求め、 $P_p=E_p/t_w$ から決定する。

7. 測定における注意

レーザ出力は種々のパラメータを持っており、出力計の仕様として次のような項目が重要である。

(1) 波 長 範 囲

保証された精度で測定可能な波長の範囲を示す。光電形の測定器では、特定の波長において感度が調整されており、他の波長の光パワーを測定する場合には感度の補正が必要であり、自動補正機能を持たせたものも多い。熱形の測定器は一般に広帯域であり、 $0.4 \sim 10 \mu m$ 程度では波長依存性が微小として無視されることが多いが、吸収材料や製作方法によっては意外と大きい場合があり、注意を要する。

(2) 最大、最小パワー

保証された精度で測定可能な入射パワーの範囲である。測定可能な入力範囲は、測定原理、指示部の構造により大きく異なるが、簡便な指示部による 20 dB 程度から、種々の減光手段でシステム化した 140 dB に及ぶものもある。

(3) 最大パワー密度

受光面の単位面積当たりの最大許容パワーで、レンズでビームを絞ったときなど、指向性の良さから照射位置により思わぬ高パワー密度を生じ、受光器の局所的な飽和現象や劣化を引き起こす場合がある。

(4) 受光器の有効受光径と形状

有効受光径とは、検出器の機械的な開口寸法とかかわりなく、光の検出に有効な範囲の直径 (円形の場合) をいう¹¹⁾。受光径は被測定レーザビーム径について十分かどうかの判断に必要である。たとえばガウスビームの場合、中心強度の全パワーを P_0 、中心の強度を I_0 、ビーム直径 (I_0 の $1/e^2$ になる径)を $2W$ としたとき、受光器の直径 (受光径)が $2a$ であるとすれば、強度分布 I および受光器に入射するパワー P は図 7 で示される。同図から計算上 99 %以上のパワーを入射するためには、ビーム直径の約 1.5

図 7 ガウスビーム測定に必要な受光径

倍の受光径が必要である。位置合わせの容易さまで考慮すれば、3 倍程度であることが望ましい。

(5) 受光面の感度むら

受光面上の検出感度が位置により異なる程度をいう。熱形ではビームによる加熱と放熱の温度センサに及ぼす効果が異なることによる。光電形では、感度むらは素材や接合層の不均一により生ずるが、素子の周辺の電極に近いところで局部的に感度が高くなるものもある。いずれの場合も、被測定ビーム径に比して極端に大きい受光径は、感度むらの点から不適当である。

(6) 応 答 性

測定器としての応答速度は、光電形で数 μs ～数 ms ぐらいであるが、熱形では数秒から 1 分以上要するものがある。パルス測定用では、単発パルス入力後の再測定が可能となるまでの回復時間が必要であり（一般に立ち上がりより長い）、短縮機構を備えたものもある。

(7) 偏 光 依 存 性

入射光の偏光に対する受光器の感度変化を示す。熱形ではほとんど問題にならないが、光電形では受光器の表面処理、窓材、使用する光学系、減光機構などに関連して問題になる場合がある。精密な測定では受光器を回転して影響を調べておく。

(8) 精 度¹²⁾

測定器が表わす値または、測定結果の正確さと精密さを含めた総合的な良さである。製品としての測定器の校正は、標準（国家標準、二次標準など）* から製品に至るトレーサビリティ**に基づいて行なわれる。したがって測定器の精度は、これらの絶対値を値付けする段階での誤差と、個々の測定器が持つ系統的誤差***を加えて評価される。たとえば、レーザ出力測定器の製品の校正では、ふつう特定の波長、パワーレベルで行なわれるので、測定領域全体では、受光器の波長感度、非直線性等による誤差が加わる。

わが国では、電子技術総合研究所（電総研）のレーザパワー標準¹³⁾に基づき、財団法人機械電子検査検定協会（機電検）が製品の校正を行なっている。アメリカの製品はほとんどすべてが NBS (National Bureau of Standard) トレーサブル****を表示している。

市販測定器の多くは、 $\pm 3 \sim 5 \%$ の精度となっているが、光産業技術振興協会（光協会）が、最近行なったアンケート調査⁷⁾では $\pm 1 \%$ を希望する人が最も多く、光技術の高度な要求を反映していると思われる。

さて実際のレーザ出力測定でよく問題になるのは、ビームに対する受光器の位置決めである。正確な測定を行なう

には、校正されたと同じ条件（ビーム径、入射位置、角度など）に設定することが前提であるが、このずれは誤差の原因となる。受光器にこのための位置決め機構があることが望ましいが、実際にはマークした開口保護キャップがある程度である。

ビームの位置合わせは、校正の条件によって指示が最大となる位置、または開口とビームの中心を合わせるようにすることが多い。受光面の入射角依存性が大きいものでは、受光面に垂直な基準線（円筒形のものでは、その母線）にビームを照射し、垂直を確認して平行移動する。紫外、赤外光の場合は、あらかじめ可視のガイド用レーザビームにより開口の中心に合わせる方法もとられる。低いレベルの赤外域では、マークした蛍光板を開口にセットして合わせることもできる。これら種々の位置決め方法を図 8 に示す。現在審議中のレーザ出力測定方法の規格案¹¹⁾では、入射開口の外形を基準として、その中心にビームの中心を合わせることを原則としているが、ビームと受光器の多様性から現在のところ統一は難しく、個々の仕様に従う場合もあると述べている。

レーザ出力測定は、本来、高密度エネルギーを取り扱うので、危険を伴う場合も多く、安全には十分注意すべきである。具体的には、測定系の配置で、ビーム終端、反射、散乱光、操作部の保護と保護めがねの装着、誤照射の防止等に考慮を払う必要がある。

図 8 受光器のいろいろな位置決め方法

8. レーザ出力測定の標準化

レーザ技術の普及に伴い、測定に関する標準化の重要性が認識されるようになった。このうち、レーザ出力測定については、国内外において次のような標準化のための活動が行なわれている。

(1) 電総研におけるレーザパワー標準の研究と確立

電総研では、レーザパワー標準として、 μW ～ kW の広いパワーレベルにおいて研究され⁴⁾¹³⁾、一部について機電検へ標準の供給を行なっている。1 mW ～ 1 W に対する標準の精度は $\pm 0.3 \%$ (10 mW において) となっている。このレベルでは、He-Ne、Ar レーザを用いた国際比較により精度が確認された⁴⁾。また 1 W ～ 10 kW の高出力レーザパワーの精密計測技術も、すでに開発されている¹³⁾。最近では、10 μW ～ 1 mW の小出力で精度 $\pm 0.2 \%$ (100 μW レベル) の高感度レーザカロリメータが開発された¹⁴⁾。

* 測定に普遍性を与えるために決めた基準として用いる量の大きさを表わす方法。またはもの (JIS Z 8103)。

** 標準器または計測器がより高位の標準によって次々と校正され、国家標準につながる経路が確立していること (同上)。

*** 測定結果に偏りを与える原因によって生じる誤差。

**** 標準により校正可能または校正されていること。

(2) 機電検におけるレーザパワー測定器の校正業務

レーザパワーのトレーサビリティを確立し、実際の製品の校正を行なうため、機電検では電総研における方式に基づくレーザパワー自動校正システム¹³⁾を設置し、1983年から校正業務を開始した。その項目を表4に示す。

(3) レーザ出力測定方法のJIS規格案の作成

財団法人光産業技術振興協会では、工業技術院の委託を受け、昭和56年よりオプトエレクトロニクスの標準化に

表4 機電検における校正の範囲

波長(μm)	パワー範囲(mW)	備考
0.488	1~200	ビーム系のパワーメータ 精度 1%
0.515	1~200	
0.633	1~10	
0.837	1~3	
1.153	1~7	

関する調査研究を行なっている⁷⁾¹¹⁾。レーザ出力測定方法については、JIS規格素案がすでに作成され、規格化に向け審議中である。またレーザ出力測定器の規格案の審議が、光測定器の規格化の一環として昨年開始された。

(4) IECにおけるレーザ出力測定器の規格作成

国際的な動向としては、IECのTC76「レーザ装置」のWG(作業部会)3において、レーザ放射測定器(TC76S14)規格案が、昨年6か月ルールにより各国に提案することが決定された⁷⁾。TC86「光ファイバオプティクス」のWG4では、試験装置の校正を取り扱っているが、光パワーを含む光測定器の規格化についての審議が昨年から開始された。

9. おわりに

レーザ出力測定について、原理、測定器、測定上の注意、標準化等について述べた。レーザビームは多様なパラメータを持っており、技術の進歩も早いのでレーザ出力始め各種の光測定に対する要求も高度となってきた。より高精度で、かつ経済的な測定方法、測定器の開発が待たれる。また測定における信頼性を確保するための標準およびトレーサビリティ体制の拡充が必要である。わが国は、レ

ーザや光ファイバを中心とした光技術の分野で世界的水準にあるが、測定技術の面においてもリードしていくことが望まれる。

参考文献

(1) Jennings, D. A., West, E. D., Evenson, K. M., Rasmussen, A. L. and Simmons, W. R.: Laser Power and Energy measurement, NBS Technical Note 382 (1969)

(2) Möstl, V. K.: Empfängernormale zur Messung der Strahlungsleistung von Dauerstrich-Lasern, Feinwerktechnik & Messtechnik 86-2 (1978) 72

(3) Gunn, S. R.: Calorimetric Measurement of Laser Energy and Power, J. Phys. E: Sci. Instrum. 6 (1973) 105

(4) 本田辰篤: カロリメータ法によるレーザパワー精密測定に関する研究, 電総研報 837 (昭58)

(5) Heard, H. G.: Laser Parameter Measurements Handbook, John Wiley & Sons (1968) 93

(6) レーザ学会編: レーザハンドブック, (昭57) 322, 423, オーム社

(7) 光測定器専門委員会: 光測定器に関する標準化, オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究 I, 光産業技術振興協会 (昭62)

(8) 米津宏雄: 光通信素子工学一発光・受光素子, 工学図書 (昭59) 312~319

(9) Hamilton, C. A., Day, G. W. and Pheran, Jr. R. J.: An Electrically Calibrated Pyroelectric Radiometer System, NBS Technical Note 673 (1976)

(10) Premori, A. Rastelo, M. L.: An Analysis Algorithm for Thermal Detectors of Radiation, IEEE Trans. Instrum. and Meas. 35-4 (1986) 612~618

(11) レーザ出力測定法専門委員会: レーザ出力測定法に関する標準化, オプトエレクトロニクスの標準化に関する調査研究 I ~ V, 光産業技術振興協会 (昭57~61)

(12) 日本工業規格 JIS Z 8103 計測用語, 日本規格協会 (昭59)

(13) 電総研ニュース406 (昭58)

(14) Inoue, T., Yokoshima, I. and Hiraide, A.: Highly Sensitive Calorimeter for Microwatt-Level Laser Power Measurement, IEEE Trans. Instrum. and Meas. 36-2 (1987) 623~626