



## 収束レーザー光線のスポットサイズ測定法

木村 茂治・棟方 忠輔

(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1989年10月31日受理)

### Methods for Measuring the Spot Size of Focused Laser Beam

Shigeharu KIMURA and Chusuke MUNAKATA

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,  
1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

#### 1. はじめに

レーザー光線は、レンズで絞りこんだとき強度の大きい微小な光スポットを得ることができ、このような性質を利用することによりいろいろな計測あるいは加工が行われている。このとき、レーザー光線の正確なスポットサイズが必要になることが多い。たとえば、レーザースポットを観察物体上で走査するレーザー測長機<sup>1)</sup>あるいはレーザー走査顕微鏡<sup>2)</sup>などでは、レーザー光線のスポットサイズは空間的な分解能を決める重要な因子である。またレーザー光のエネルギーを利用して照射物体に化学変化などを起こさせる装置では、エネルギー密度を決定する因子でもある。とくに、蛍光相関分光法<sup>3)</sup>では、蛍光でラベルした分子の拡散係数を決めるために、微小に絞りこんだレーザー光線のスポットサイズを正確に測定しなくてはならない。

レーザー光線のスポットサイズ測定方法は旧来いろいろなものが提案されており、多岐にわたっている。そのなかで微小なスポットサイズを直接測定できる方法を中心に解説し、最後に境界回折波を利用してスポットサイズの測定を行う新しい方法を紹介する。

#### 2. 回折限界におけるレーザー光線のスポットサイズ

実際の応用で使用されるレーザー光の発振モードはTEM<sub>00</sub>であり、レーザー光線内の強度分布はガウス分布をしている。本解説で測定対象とするのはこの基本発

振モードにおけるスポットサイズである。スポットサイズの定義は、スポットの中心の光強度ピーク値に対して $1/e^2$  ( $e$ : 自然対数の底) となる強度での半径とする。コリメートしたガウスレーザー光線を凸レンズで、図1に示すように収束する。有限径レンズの開口によるけられの効果は、その開口の半径が入射光のスポットサイズの2倍以上あれば、無視しうることが示されており<sup>4)</sup>、この条件は満たされているものとする。このような場合、収束されたレーザー光線もガウス分布をしており、ビームウエストの位置での強度分布  $I$  は次のように表される<sup>5)</sup>。

$$I(x, y) = (2P_i / \pi \omega_s^2) \exp \{-2(x^2 + y^2) / \omega_s^2\} \quad (1)$$

上式で、 $x$  および  $y$  はレーザー光線の光軸に垂直な面内で光軸を原点とする直交座標であり、 $P_i$  はレーザー光の全光量、 $\omega_s$  はビームウエストでのスポットサイズである。さらに、ビームウエストの位置での回折限界のスポットサイズ  $\omega_s$  は次のように表される<sup>4)</sup>。

$$\omega_s = f \lambda / \pi r_0 \quad (2)$$

(2)式で、 $f$  はレンズの焦点距離であり、 $\lambda$  はレーザー光の波長、 $r_0$  はコリメートした入射レーザー光線のスポットサイズである。けられのある場合のガウスレーザー光線の収束特性は、龍岡ら<sup>6)</sup> が詳しく論じており、ここでは詳細を省く。

#### 3. スポットサイズの測定方法

スポットサイズはいろいろな方法で測定できるが、最も一般的なのはレーザー光線を移動可能な遮蔽物体で遮

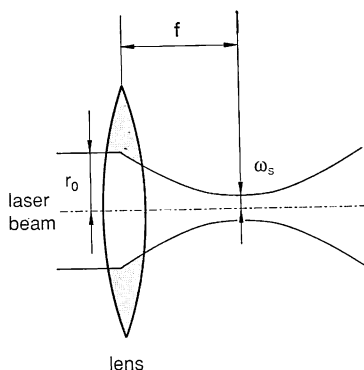


図 1 ガウスレーザー光線の収束状態

り、透過光の変化からスポットサイズを測定する方法である。遮蔽物体としてピンホールあるいは直線エッジを有するものが用いられる。直線エッジを有する遮蔽物体のなかで最も簡単なものがナイフエッジであり、スリット、ロンキルリングと複雑化していき、直線エッジの数が増えていく。その他の方法として、レーザー光のエネルギー分布を温度上昇あるいは蛍光に変換してスポットサイズを測定するもの、撮像素子を使用するものなどがあるが、蛍光を利用するもの以外は、微小なスポットサイズを対象としていない。

### 3.1 ナイフエッジ法<sup>7-17)</sup>

レーザー光線の光軸に対して垂直に移動するナイフエッジでレーザー光線を遮っていく。このときの全透過光量を測定し、その変化からスポットサイズを求める。ナイフエッジは  $y$  軸の方向にあるものとし、 $x \leq a$  の範囲でレーザー光線が遮蔽されると、検出される全透過光量  $P(a)$  は

$$P(a) = \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_a^{\infty} dx I(x, y) \\ = (P_t/2) \operatorname{erfc}(a\sqrt{2}/\omega_s) \quad (3)$$

と表され、誤差関数である  $\operatorname{erfc}$  は次式で定義される。

$$\operatorname{erfc}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_a^{\infty} \exp(-t^2) dt \quad (4)$$

(3)式から解析的にスポットサイズを求めることはできないので、得られたデータを処理する必要があり、その処理方法によってナイフエッジ法に誤差が生じる。

スポットサイズは、ナイフエッジの2点の走査位置での透過光量がわかれば、誤差関数の数値計算の結果から算出することが可能である。Suzaki らはナイフエッジがない場合の全透過光量に対して 10%、90% となる距離からスポットサイズを求めている<sup>9)</sup>。図 2 (a) に示すように、その距離を  $\Delta d$  とすると、スポットサイズ  $\omega_s$

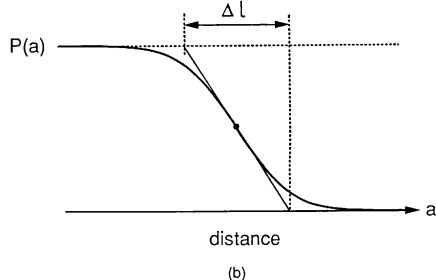
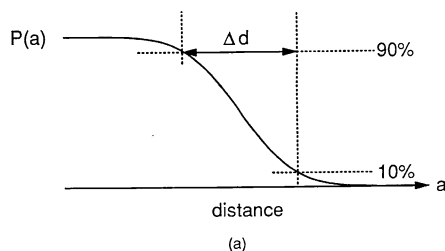


図 2 ナイフエッジ法の信号処理  
(a) Suzaki らの方法<sup>9)</sup>, (b) 中点における接線を利用する方法

との間には

$$\omega_s = 0.7803 \times \Delta d \quad (5)$$

の関係がある。この方法は観測データの2点しか使っていないので、実験的なランダムエラーを含み、またビームがどの程度ガウス分布に近いかわからない。これを解決する方法として、Khosrofiyan らは、スポットサイズの計算のためのデータポイントを多数にした<sup>14)</sup>。それらの2点の組合せからそれぞれスポットサイズを求め、最小乗法を適用する。これにより最適なガウス分布、すなわちスポットサイズを求めることができる。また、(3)式で表される理論プロファイル  $P(a)$  を実際に得られる全透過光量変化にベストフィットさせる方法がある<sup>8,16)</sup>。この場合は、パラメータとして  $P_t, \omega_s$  等を変化させ、最小乗法を用いる。この方法も、実際のレーザースポットが理論的なガウス分布から離反している程度がわかる。

観測される信号は、(3)式で表される誤差関数の形をしているので、微分をすることによりガウス分布に戻ることができる。Mauck および Brost は数値的に微分して、スポットサイズを求めている<sup>11,15)</sup>。Arnaud らは透過光信号を RC 微分回路で電気的に微分する方法をとり、微分信号の最大値と誤差関数で表される検出信号の最大値との比の値を利用する簡単なスポットサイズ測定方法を行った<sup>7)</sup>。

ナイフエッジからの透過光信号の波形の傾き  $\{dP(a)/$

da} は

$$\frac{dP(a)}{da} = -\frac{P_t}{\omega_s} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{2a^2}{\omega_s^2}\right) \quad (6)$$

で表される. 図2(b)に示すように, その波形の midpoint で接線を引き, 最大値と最小値間の距離を  $\Delta l$  とすると, スポットサイズは

$$\omega_s = \Delta l \sqrt{2/\pi} \quad (7)$$

と表される. この方法は接線を引くときに誤差が入りやすいので注意を要する.

ナイフエッジ法はサブミクロンオーダーのスポットサイズの測定が可能であるが, ナイフエッジの移動距離精度が測定精度を決定する大きい要因である. ナイフエッジの移動距離を正確に測定するために, ファブリー・ペローやレーザー干渉計を用いて測定した例があり,  $1/8\lambda$  以上の精度を得ている<sup>10,13)</sup>. また, ナイフエッジの透過率が0から1へステップ状に変化しない場合, すなわち透過率が徐々に変わる場合も測定精度が悪くなる. Cannon らは, 透過率が0から1へ変化するエッジの幅が広がると, 測定されるスポットサイズが実際の値よりしだいに大きくなることを示した. さらにエッジの幅がスポットサイズの40%以下ならば, 測定精度が5%程度であることを計算によって示した<sup>17)</sup>. 光検出器の大きさも測定精度を悪くする要因であるが, それほど重要でないことを Firester らが示している<sup>10)</sup>. すなわち, 光検出器の検出面積はできるだけ大きいほうが測定精度が良くなるが, 0.9の開口数のレンズで絞ったレーザースポットを開口数が0.3の入射角で検出した場合, 測定されるスポットサイズは正確なものに比べて10%程度しか大きくならないことを示し, さらに光軸上の透過光のみを検出した場合ですら, 測定されるスポットサイズは15%程度しか大きくならないことを示した.

### 3.2 スリット法

スリットをレーザー光線に対して移動させ, スリットから透過してくる光量変化を測定する. スリット幅が無限に狭いと仮定すると, 透過してくる光量の変化はガウス分布をしておりスポットサイズがわかる. 測定精度を上げるためには, スリット幅をできるだけ狭くする必要があるが, 実際はスリット作成に限界があり, サブミクロンオーダーのスポットサイズを測定する場合スリット幅はスポットサイズに対して相対的に大きいものになってしまう. McCally はスリット幅の効果を評価しており, スリット幅がスポットサイズの0.14倍の場合, スポットサイズは0.33%大きく計測されることを示している<sup>18)</sup>.

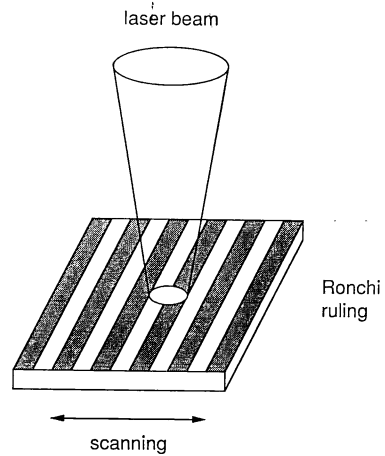


図3 ロンキールリング法

Letalick らは, 測定されたスポットサイズとスリット幅の比に対して, 正確なスポットサイズを求めるための補正係数を数値計算し, テーブルを作成している<sup>19)</sup>. これを使用するためにはあらかじめスリット幅がわかっているなければならない.

### 3.3 ルーリング法<sup>20-25)</sup>

透過タイプのロンキールリング (Ronchi ruling) でレーザー光線を走り, 図3に示すように走査する. 透過するレーザー光線を検出したとき, ルーリングには透明部分と遮光部分が等間隔にあるので, その光量はロンキールリングの位置によって変化する. このときの最大値と最小値を  $P_{\max}$  および  $P_{\min}$  とし, ルーリングの1本のバーの幅を  $w$  としたとき, Dickson は数値計算により次の関係を得ている<sup>20)</sup>.

$$2\omega_s/w = 2.2K + 1 \quad (8)$$

上式で,  $K = P_{\min}/P_{\max}$  である. ただし, (8)式には条件

$$1.3 \leq 2\omega_s/w \leq 2.7 \quad (9)$$

が付く. スポットサイズが(9)式を満たす範囲にあるならば, これを1%以内の精度で測定できる. この方法の絶対精度はルーリングの製作精度にも依存する. この方法はスポットサイズがあらかじめ特定の範囲に入っていることがわかっているようなルーチンワークにおいては, ルーリングの位置精度を必要としないので非常に簡便な測定方法となる.

Broockman らは, 不透明なロンキールリングのバーの幅および間隙の幅を変化させ, かつそれぞれの反射率を考慮して, Dickson の行った計算の一般化を図った<sup>21)</sup>. Karim らはロンキールリングの代わりに透過率

が三角波状あるいは正弦波状に変化するルーリングによる測定方法を提案し、これらのルーリングは測定可能範囲がロンキールリングの場合よりも広がり、ルーリングの周期と比較して小さいスポットサイズの測定が可能になることを示した<sup>25)</sup>。

### 3.4 ピンホールや蛍光を利用する方法

ピンホールを使用する測定方法<sup>12,19,26,27)</sup>は、ピンホール作成に限界があり、微小なスポットサイズを直接測定するのにそれほど適していない。ピンホールを使用する場合は、微小なビームスポットを拡大した後、その拡大像をピンホールで走査し、透過光量の変化を測定する<sup>6)</sup>。一方、ピンホールに代わるものとして蛍光でラベルした直径  $0.038 \mu\text{m}$  のポリスチレン球を使用した例がある<sup>13)</sup>。スポットサイズと比べて十分小さいポリスチレン球を走査するので直接レーザー光線のプロファイルがわかる。

蛍光薄膜を使用してスポットサイズを測定する方法がある。蛍光薄膜にレーザー光線を照射し、発生した蛍光の像を作る。蛍光の強度分布がレーザー光線の強度分布に対応するので、この蛍光の像面上でピンホールを走査することによりスポットサイズがわかる<sup>28)</sup>。この方法は、蛍光像を作るので、直接的な方法ではないが、レーザー光線の強度の2次元分布がわかる。その他の蛍光薄膜を使用する方法として、蛍光退色の回復を利用するものがある<sup>13)</sup>。レーザー光線の光軸に垂直に蛍光薄膜を移動させながら、レーザー光強度を突然変化させる。このときの蛍光退色の回復過程からスポットサイズを求める。

### 3.5 その他の方法

その他の測定方法として、温度上昇を利用する方法<sup>29-32)</sup> やリボン<sup>33)</sup>、ワイヤー<sup>34,35)</sup>、撮像素子<sup>36-38)</sup> を用いる方法等がある。これらの方法は回折限界まで細く絞りこんだスポットサイズを測定することを目的にしているため、本稿では割愛する。

## 4. 境界回折波法

開口後方における光の回折は、キルヒホッフの回折公式において開口上での積分を実行することにより計算できるが、Young に源を発する考え方として、開口の縁から反射した回折光と入射光とが干渉するという学説がある<sup>39)</sup>。反射半平面での平面波の回折の厳密解が、Sommerfeld によって、両者の重ね合わせで表されることが示されたことにより、この考え方の正しさは支持された<sup>40)</sup>。Miyamoto らはこの境界回折波理論を一般化

し<sup>41,42)</sup>、Otis はガウスビームに対してもこの境界回折波理論が有効であることを示した<sup>43)</sup>。

境界回折波理論によると、ガウスビームが半平面のスクリーンで回折されたとき、観測点  $P$  における回折場  $U_K(P)$  は

$$U_K(P) = U_B(P) + U_0(P) \quad (10)$$

のように表される。ここに、 $U_B(P)$  は境界回折波 (boundary diffraction wave) である。また、 $U_0(P)$  は幾何光学波 (geometrical wave) であり、観測点  $P$  がスクリーンの影に入っていないときにはスクリーンに影響されない光波となり、また観測点  $P$  がスクリーンの影に入るときは存在しなくなる項である。

上述した境界回折波を利用してスポットサイズを測定する方法 (BDW 法)<sup>44,45)</sup> がある。この方法の特徴は直線エッジからの境界回折波のみを検出することである。すなわち、直線エッジを使用する点ではナイフエッジ法と類似しているが、ナイフエッジ法は透過光を検出するのに対して、BDW 法ではレーザー光線を直線エッジに対して走査したときの境界回折波の強度変化を検出する。

反射率の異なる二つの鏡面状の物体 A, B が直線エッジを形成しているものとし、そのエッジに測定すべきレーザー光線を照射しているものとする (図4)。極端な場合は、一方の物質が存在しなくてもよい。反射による回折の場合も、境界回折波と幾何光学波に回折場を分けることができる。そもそもガウス分布をしたレーザー光線の強度は光軸周辺に局在しているので、観測点  $P$  が光軸から十分離れると、 $U_0(P)$  は無視できるほど小さくなる。このため、観測される光は境界回折波のみとなる。

次にレーザー光線あるいは直線エッジを走査したと

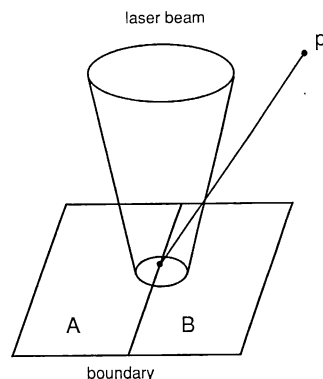


図4 境界回折波法の光学配置

き、観測点  $P$  で検出される境界回折波の光量がどのように変化するかを考える。理論的には、レーザー光線のスポットサイズ  $\omega_s$  がレーザー光の波長  $\lambda$  より十分大きいという条件のもとで、観測される光量変化がスポットサイズ  $\omega_s$  で表されるガウス分布で近似できることが証明できる。したがって、観測された波形の最大強度の  $1/e^2$  となるところの半幅を測定すれば、それがスポットサイズとなる。

しかし、レーザー光線を波長程度のスポットに絞るとき理論解析の条件を満たさなくなるので、そのスポットサイズが測定しうるか否かはわからない。すなわち、境界回折波の強度変化とスポットサイズとの関係が不明である。このため、ナイフエッジ法で決定されるスポットサイズが正しいと仮定して、ナイフエッジ法とBDW法で得られるスポットサイズを実験的に比較して、BDW法の評価をしている<sup>45)</sup>。

透明基板上に作成した直線エッジのパターンを使用して、同時に両者の測定を行う。その実験装置を図5に示す。両者の測定方法は直線エッジを共有でき、かつ異なる信号光を検出するので、両方法を同時に実行可能である。顕微鏡対物レンズ(50倍)を使用してレーザー光線(波長633nm)を絞るときに得られる検出信号を図6に示す。横方向は直線パターンの移動距離に対応している。(a)に示す曲線がナイフエッジ法による結果であり、スポットサイズは(5)式により  $0.73\mu\text{m}$  と計算され、(b)の曲線が境界回折波による結果であり、スポットサイズは  $0.77\mu\text{m}$  となる。このようにスポットサイズが波長程度に小さくとも両者のスポットサイズの値はほぼ等しい。対物レンズの倍率を変えてスポットサイズの大きさを変えることができる。

このようにして変化させたスポットサイズに対して、両測定方法で測定して両測定値を比較した結果を図7に

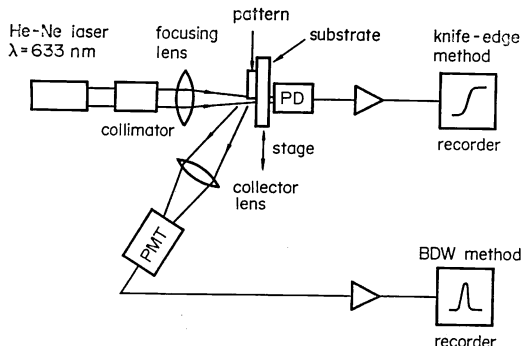
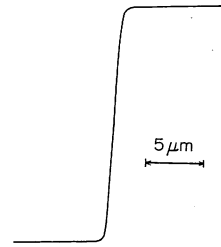
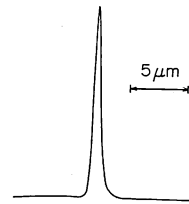


図5 境界回折法とナイフエッジ法を同時に行う実験装置の概略



(a)



(b)

図6 検出信号の比較

(a) ナイフエッジ法, (b) 境界回折波法

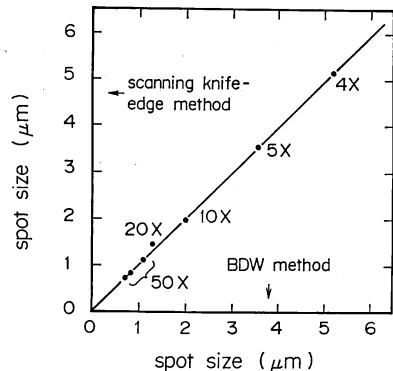


図7 境界回折法とナイフエッジ法の比較

横軸が境界回折法、縦軸がナイフエッジ法に対応している。図中の数字は対物レンズの倍率を意味し、同倍率を変えることでスポットサイズを変化させている。

示す。広い範囲で両測定結果は一致することがわかる。したがって、BDW法のスポットサイズの測定範囲は広いことが実験的に立証されたといえる。

BDW法は、直接、簡単にスポットサイズがわかるという利点がある。類似した方法であるナイフエッジ法では数値計算の結果を使用したり、信号を微分したりする。BDW法はこのような操作を必要としない。収束したレーザー光線の強度分布がガウス分布から外れた場合は、信号波形もガウス分布から外れるので、この方法でスポット形状の監視も容易にできる。

BDW法は、直線エッジを構成する二つの物質の表面

が鏡面ではなく、梨状の突起がある場合、あるいは細かい傷がある場合、誤差が入ることがある。すなわち検出される光に直線エッジからの境界回折波以外の散乱光が混入するので、正確なスポットサイズ測定ができない。たとえば、安全カミソリの刃を使用する場合は、表面に細かい傷があるので、検出器を安全カミソリの刃より後方に配置し、散乱光を避けるようにして境界回折波を検出するのがよい。

## 5. おわりに

回折限界まで絞こまれた微小なレーザー光線のスポットサイズを測定する方法を紹介したが、それぞれに長所と欠点がある。たとえば、ルーリング法は簡便さの点において優れているが、測定範囲が狭い。したがって、それぞれの測定方法の特徴を考慮して、目的に合った測定方法を適用する必要がある。

レーザー光線のスポットサイズを測定する技術は、絞りこんだレーザー光線を使用する機器が増加するにつれてますます必要とされる。しかし、この測定技術だけを研究目標としている研究者は少ない。この技術は基本的なものなので、この研究が主たる研究目標にならないまでも、多くの研究者が関心をもち、簡単に便利な計測方法が提案されることを大いに期待する。

## 文 献

- 1) 中沢喜和雄, 谷元昭一, 吉田庄一郎: 精密機械, **44** (1978) 380-385.
- 2) C. J. R. Sheppard and T. Wilson: J. Microsc., **114** (1978) 179-197.
- 3) D. Magde, W. W. Webb and E. L. Elson: Biopolymers, **17** (1978) 361-376.
- 4) L. D. Dickson: Appl. Opt., **9** (1970) 1854-1861.
- 5) H. Kogelnik: Appl. Opt., **4** (1965) 1562-1569.
- 6) 龍岡静夫, 杉浦幸雄: NHK 技術研究, **27** (1975) 10-19.
- 7) J. A. Arnaud, W. M. Hubbard, G. D. Mandeville, B. de la Clavière, E. A. Franke and J. M. Franke: Appl. Opt., **10** (1971) 2775-2776.
- 8) D. R. Skinner and R. E. Whitcher: J. Phys. E, **5** (1972) 237-238.
- 9) Y. Suzuki and A. Tachibana: Appl. Opt., **14** (1975) 2809-2810.
- 10) A. H. Firester, M. E. Heller and P. Sheng: Appl. Opt., **16** (1977) 1971-1974.
- 11) M. Mauck: Appl. Opt., **18** (1979) 599-600.
- 12) M. S. Scholl: Appl. Opt., **19** (1980) 3655-3659.
- 13) M. B. Schneider and W. W. Webb: Appl. Opt., **20** (1981) 1382-1388.
- 14) J. M. Khosrofiyan and B. A. Garetz: Appl. Opt., **22** (1983) 3406-3410.
- 15) G. Brost, P. D. Horn and A. Abtahi: Appl. Opt., **24** (1985) 38-40.
- 16) H. R. Bilger and T. Habib: Appl. Opt., **24** (1985) 686-690.
- 17) B. Cannon, T. S. Gardner and D. K. Cohen: Appl. Opt., **25** (1986) 2981-2983.
- 18) R. L. McCally: Appl. Opt., **23** (1984) 2227.
- 19) D. Letalick and I. Renhorn: Rev. Sci. Instrum., **58** (1987) 765-767.
- 20) L. D. Dickson: Opt. Eng., **18** (1979) 70-75.
- 21) E. C. Broockman, L. D. Dickson and R. S. Fortenberry: Opt. Eng., **22** (1983) 643-647.
- 22) D. K. Cohen, B. Little and F. S. Luecke: Appl. Opt., **23** (1984) 637-640.
- 23) R. Csomor: Appl. Opt., **24** (1985) 2295-2298.
- 24) M. A. Karim: Electron. Lett., **21** (1985) 427-429.
- 25) M. A. Karim, A. A. S. Awwal, A. M. Nasiruddin, A. Basit, D. S. Vedak, C. C. Smith and G. D. Miller: Opt. Lett., **12** (1987) 93-95.
- 26) P. J. Brannon, J. P. Anthes, G. L. Cano and J. E. Powell: J. Appl. Phys., **46** (1975) 3576-3579.
- 27) P. J. Shayly: Appl. Opt., **17** (1978) 2673-2674.
- 28) A. H. Stolpen, C. S. Brown and D. E. Golan: Appl. Opt., **27** (1988) 4414-4422.
- 29) C. Courtney and W. M. Steen: Appl. Phys., **17** (1978) 303-307.
- 30) J. M. Liu: Opt. Lett., **7** (1982) 196-198.
- 31) Y. C. Kiang and R. W. Lang: Appl. Opt., **22** (1983) 1296-1297.
- 32) T. Baba, T. Arai and A. Ono: Rev. Sci. Instrum., **57** (1986) 2739-2742.
- 33) A. Yoshida and T. Asakura: Opt. Laser Technol., **8** (1976) 273-274.
- 34) E. Stijns: IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 1298-1299.
- 35) A. Weis: Rev. Sci. Instrum., **54** (1983) 1635-1637.
- 36) J. G. Edward, H. R. Gallantree and R. M. Quilliam: J. Phys. E, **10** (1977) 699-702.
- 37) W. L. Smith, A. J. DeGroot and M. J. Weber: Appl. Opt., **17** (1978) 3938-3944.
- 38) J. T. Knudtson and K. L. Ratzlaff: Rev. Sci. Instrum., **54** (1983) 856-860.
- 39) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, Oxford, 1980) pp. 449-453.
- 40) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, Oxford, 1980) pp. 565-570.
- 41) K. Miyamoto and E. Wolf: J. Opt. Soc. Am., **52** (1962) 615-625.
- 42) K. Miyamoto and E. Wolf: J. Opt. Soc. Am., **52** (1962) 626-637.
- 43) G. Otis: J. Opt. Soc. Am., **64** (1974) 1545-1550.
- 44) S. Kimura and C. Munakata: Opt. Lett., **12** (1987) 552-554.
- 45) S. Kimura and C. Munakata: Appl. Opt., **27** (1988) 84-88.