レーザーの計測および加工への応用

三菱電機株式会社 生産技術研究所 稲 荷 隆 彦
三菱電機株式会社 応用機器研究所 吉 田 寿 夫

1. ま え が き

レーザーが発明され、その応用が期待されて久しいがその展開は期待にくらべて比較的遅いといわれている。計測と、加工への応用は、レーザーの応用分野の中で、最も現実的に進んでいるといえる。この分野ではレーザーによって初めて可能となった機能をもつ装置が開発され、実際の工業現場に使用されている。本文ではそのいくつかの例を紹介する。

計測においては、レーザーのもつ特有の干渉、回折作用、光線の直進性、装置の取扱い易さ、信頼性等の性質が有効に利用されている。加工においては微小点へ集光できることも含めてエネルギーの集中度が高いこと、大気中で使用でき、クリーンであること、光線であることによる取扱い易さ、制御性の良さ等が注目され、利用されている。

2. 計測への応用

計測への応用という観点でレーザーの特長を考えるとよくいわれるように、直進性、可干渉性と単色性があげられる。ここでは前の2つを有効に利用した応用について述べる。単色性という意味では分析機器、公害監視機器等があるが、工業界ではまだ実用段階に至っていないのでここでは割愛する。

2.1 アライメント用機器

レーザー光線の直進性を利用し、これを測量や機械の計測の場合の基準線として用いるという考えは相当古くからあり、現実には特殊な場合に相当利用されている。これは計測の対象に対応して、それぞれのやり方が異なり、それぞれに対して特有の方式が工夫されている。し

図1 レーザーセオドライトの構成

たがって明確な機器という形はとりにくい。基本的にはレーザー光線を従来のピアノ線等の代りに用い、これを基準に各種の作業を行う場合、またこれを利用して三角測量を行う場合に分けられよう。対象によって4分割検出器等を利用し、精度を上げたり、自動化する等の工夫がなされている。ただしレーザーを用いる場合でも基本的には従来のトランシットの精度を超えることはできない。このため、測量や大型機械の計測のための新しい手段と期待されながら、実用化がそれほど進んでいないのが現状である。図1は高性能トランシットの光学軸と合わせて、He-Ne 小型レーザー光線を送出するようにしたレーザーセオドライトの構成である。この装置はトランシットによる作業を効率化するために工夫され、実用されている装置である。

2.2 測距装置

レーザーを電波技術の一環として応用した代表例が測距装置である。測距の方式は大別すると2種類ある。ひとつはレーザーを鋭いパルスとして送り出し、反射パルスの帰ってくる時間により測距するもので、もうひとつは連続のレーザー光に高周波変調をかけ、反射波の位相遅れから距離を計測する方式で、いずれも電波技術として従来からよく知られたもので、電波と違った特徴をもっている。

"Laser and Its Applications; Application to Measuring and Machining" by Takahiko Inari (Manufacturing and Development Laboratory, Mitsubishi Electric Co., Ltd., Hyohgo) and Hisao Yoshida (Products Development Laboratory, Mitsubishi Electric Co., Ltd., Hyohgo)

写真1 光波測距装置の外観

前者の方式は測距精度が悪く(測定範囲 0.3~7km で ± 10 m), 後者の方がより高い精度(光源に He-Ne レーザーを用いる場合, 測定範囲 50m で 0.5mm)をもつ。ただし一般の計測からは, もう少し高い精度が要求される。写真1は後者の位相遅れによる測距装置(これは光源に発光ダイオードを用い, 小型化されている)の例を示す(精度は, たとえば 1.6km で ± 10 mm)。

2.3 干渉測長機

光の干渉を利用すれば, 波長を単位として精度の高い測定ができることは以前から知られていたが, 高い干渉性をもつレーザーが出現して, 初めて現実の工業計測器として実用できるものになった。

干渉測長機の原理はマイケルソンの干渉計として古くから知られている¹⁾。図2はその基本構成で, 光源より出た光波は半透明鏡(HM)により分けられ, 固定反射鏡により反射され, 光検知器に至る光波 E_1 と, 移動反射

図2 レーザー干渉測長機の原理

図3 レーザー干渉測長機全体の構成

鏡 (M_2) を経る光波 E_2 とが検知器上で相互に干渉する。いま,

$$E_1 = Ae^{i(\omega t + kx_1)}, \quad E_2 = Ae^{i(\omega t + kx_2)}$$

とすると, 光検知器に入る光の強度 I は,

$$I = |E_1 + E_2|^2 = 2A^2 [1 + \cos k\Delta l] \quad (1)$$

で与えられる。ただし, A は振幅, ω は光の角周波数, k は波数 ($2\pi/\lambda$: λ は波長), x は光路の長さ, Δl は光路差 ($x_1 - x_2$) である。(1)式から移動反射鏡 (M_2) が移動するのに伴い, Δl が変化し移動距離が $\lambda/2$ だけ変化すると強度変化のピークが繰り返しあらわれる。このピークの数进行数することにより, 精密な距離計測が可能となる。これが基本的な原理である。

実際の干渉測長機の構成を図3に示す。図1の移動反射鏡として, 光の入射角の方向に反射光を返すコーナキューブを用い, これが, 被測定体の上にとりつけられる。干渉測長機はきわめて精密であるため, 温度による膨張や, 光波が伝搬する大気諸条件を考慮する必要がある。特に注意が必要なのはレーザー光自身の周波数の安定度であって, 通常工業用に使われるのは, レーザーの空間共振器の長さに対する光の出力変化に固有の鋭い落ちこみ(ラムディップ: Lamb dip と呼ばれる)を利用して周波数を制御する周波数安定化レーザーで, ほぼ $1 \times 10^{-8}/\text{day}$ の安定度をもっている。

レーザー式の干渉測長機は, 精密な計測を必要とする場所, たとえば半導体工業とか, 精密な機械加工などでは相当幅広く用いられている。

2.4 速度計

レーザーを速度計測に応用することも古くから提案されてきた。ただしその大部分は電波や音波との対応からドップラー効果を用いることが考えられてきた。レーザーを用いる場合には, 他にもスペック

図4 ドップラー効果の原理

ルパターン (Speckle pattern) を利用する方式もあり、現在では後者が大幅に実用化される段階にある。

(1) レーザードップラー効果による速度計 (LDV)

ドップラー効果はよく知られた現象で、簡単に述べておくと、いま図4のように小さい散乱体に入射光（波数ベクトル $\vec{K}_0$ ）が照射され、直進する光（ $\vec{K}_0$ ）と散乱される光（ $\vec{K}_s$ ）に分かれる。散乱体は速度（ $\vec{V}$ ）で運動するとし、直進光（参照光） $\vec{K}_0$ と、散乱光 $\vec{K}_s$ が適当な光学系により導かれて重ね合わされると、この2つの光は干渉しあうため、次式で与えられるドブラー周波数 f_D が観測される。

$$f_D = \frac{(\vec{K}_s - \vec{K}_0) \cdot \vec{V}}{2\pi} \quad (2)$$

または

$$f_D = \frac{n}{\lambda} (\vec{u}_s - \vec{u}_0) \cdot \vec{V} \quad (3)$$

ここで、 n は屈折率、 $\vec{u}_s$ 、 $\vec{u}_0$ はそれぞれ散乱光、参照光の進む方向の単位ベクトルである。

光波 $\vec{K}$ 、 $\vec{K}_0$ を重畳させる光学系として多くの例が発表されているが、工業用計測器としてはまだ本格的な実用段階ではない。詳細については参考文献を参照されたい¹⁾。

(2) スペックルパターンによる速度計 (LSV)

これはレーザー光を金属板等の粗面に照射した場合、その反射光にあられる粒状の回折像 (Speckle pattern) を用いる方法である。この回折像は粗面の表面粗さにより光波が回折することにより生じたもので、粗面の移動

に伴い、ある短い時間だけ回折像も移動する。この移動を検知することにより粗面の速度を計測する。具体的には回折像の観測面に格子状スリット（空間フィルター）を置き、透過光量を光検出器に集めると、回折像の移動に比例した周波数をもつ交流信号が光検出器にあらわれる。この周波数を周波数追尾装置により検知する方式をとる。この空間フィルターは、ランダム図形の平行移動速度の検出法として古くから知られたものである。

このLSVは初期の提案²⁾は1966年であるが、最近になって速度精度 $\pm 0.2\%$ 以上、速度範囲 18m/min 以上の実用レベルの速度計として実用化された³⁾。図5はこの装置の概略構成を示す。レーザー光を被測定体に照射し反射光を前述の格子状スリット（空間フィルター）を通して光検出器に受光するのみの簡単な構成で、この光学系の簡単さがドップラー効果による方式にくらべ、実用化を可能にした点である。写真2に実際の装置の外観を示す。

2.5 表面検査装置

最近の工業における自動化にとって、人間の目視に頼っている作業の自動化は重要な課題である。金属表面等の欠陥の自動検査装置はその意味からも、最も注目されるものである。

写真2 レーザースペックルパターンによる速度計の外観

図5 レーザースペックルパターンによる速度計の構成

図6 粗面からの直接回折像の観測系の構成

この表面自動検査装置としてレーザーは相当大幅に利用されている。レーザーの用い方としては、ひとつには単純に光源として用い、通常光源による方式より扱い易く、小さく集光し易いという便利さを特長とする方式であり、他のひとつはやはりレーザーのもつ回折効果を利用する方式⁴⁾である。ここでは後者の方式で、生産工程中の金属板の表面検査装置の例を述べる。

4.2 節で述べたように、金属表面にレーザー光を照射した場合、その反射光には表面粗さによる回折像が現われる。一般に表面 (x, y) 面とする)と観測面 (u, v) 面とする)が図6のように配置されているとし、表面上での反射光波分布 $U(x, y)$ 、観測面上での光波分布 $\Psi(u, v)$ との間には、フーリエ関係が成り立ち、したがって、観測面上での強度分布 $I(u, v)$ は、 $U(x, y)$ のパワースペクトルで与えられる⁵⁾。数学的には (x, y) 、 (x', y') をそれぞれ散乱点の座標として、

$$I(u, v) = |\Psi(u, v)|^2 \\ = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint \rho(s, t) \exp[i(us + vt)] ds dt \quad (4)$$

$$\rho(s, t) = \iint U(x, y) \bar{U}\left(x - \frac{k}{h}s, y - \frac{k}{h}t\right) ds dt \quad (5)$$

ここで、 $s = (k/h)(x - x')$ 、 $t = (k/h)(y - y')$ 、 $\bar{U}$ は U の複素共役関数となる。 $\rho(s, t)$ は $U(x, y)$ の自己相関関数に相当する。

上に述べたことから、観測される回折像は、表面の統計的性質を示すものであり、この形状からこの統計的性質をモニタリングすることができる⁶⁾。

図6の x, y 面に走行する金属板をおき、その走行方向(圧延方向)を y 軸とすると、金属面は圧延傷のため y 軸方向に方向性をもつため、上述の結果から、そのパワースペクトルとして、観測面の u 軸方向にのびた帯状の回折像が現われる(写真3)。いまレーザー光を金属板の板幅方向に走査すると、この帯状の回折像も板幅方向に平行移動する。もし金属板に欠陥がある場合、この帯

写真3 帯状反射像の例

図7 レーザーの回折効果を用いた表面検査装置の構成

状の像が乱れ、帯の幅の方向(v 軸方向)の分布が変化する。この変化を検知すれば欠陥が検知できることになる。

図7に、この原理を用いた表面検査装置の構成を示す⁴⁾。レーザー光は電磁振動鏡(ガルバノミラー)で走査され、反射光は受光器で直接受光される。受光器は、上述の帯状回折像の幅よりやや大きい幅をもつ細長い開口をもち、開口より入った光をオプティカルファイバーにより光検知器に導いている。レーザー光の走査により帯状回折像はこの開口の中をその長手方向に移動する。欠陥があった場合回折像の幅方向分布が変化して、細長い開口を通る光量が急激に減少するため、欠陥が検知されることになる。このような方式をとる場合、きわめて高い検査分解能を得ることができ、きれいな金属表面では0.1 mm以下の欠陥も検知できる。

同様な原理を用い、細い金属線やその他の対象に対し自動検査を行う例が知られている⁴⁾。また、このような回折現象を用いないで、単純な光源として、その便利さのために用いられている例も多い。特に小さい歯車などの機械部品の自動検査器として有効に用いられる例が報告されている⁴⁾。写真4はこのような自動検査機で検査される歯車の歯先の欠陥例である。

写真 4 レーザーを用いた小形歯車検査機により検知された欠陥例

3. レーザー加工の基本概念

レーザー加工の基本概念を理解するためには、1)レーザービームの集光特性、2)レーザービームが照射されたときの加工材料の温度分布、3)そのとき加工材料に発生する熱応力、ひずみについて基本的な考え方を理解する必要がある。

3.1 集光特性

図8に示すように、鏡面の曲率半径 r 、鏡面間隔 d の対称鏡面系よりなる共振器から発振する波長 λ の単一モードのレーザービームを焦点距離 f のレンズで集光したときのレーザービームの伝搬特性を求める。共振器内の位相の対称面におけるスポットサイズ r_0 は次式で表わされる。

$$r_0^2 = \sqrt{d(2r-d)/k} \quad \text{ただし、} k = 2\pi/\lambda \quad (6)$$

発振するレーザービームの半頂角 θ は $\theta = 2/k r_0$ で表わされる。集光レンズからの距離 d_2 における単一モードのレーザービームのスポット径 r_2 は次式になる⁸⁾。

$$r_2 = \frac{r_0 d_2}{d_1} \left[1 + (f_F^2/d_1^2) \right]^{-1/2} \left[1 + \frac{d_1^4}{f_F^2} \left(1 + \frac{f_F^2}{d_1^2} \right)^2 \times \left\{ \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f} + \frac{1}{d_1 \left[1 + (f_F^2/d_1^2) \right]} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

ただし、 $f_F = \pi r_0^2/\lambda$ 、 d_1 は集光レンズと共振器内の位相の対称面との距離である。

焦点面上 ($d_2 = f$) におけるスポット径 r_{20} は上式より次式で表わされる。

$$r_{20} = f \lambda / \pi r_0 = \sqrt{2} \lambda^{1/2} f / \sqrt{\pi} d^{1/4} (2r-d)^{1/4} \quad (8)$$

図 8 レーザービームの集光特性

鏡面の曲率半径 r 、鏡面間隔 d を大きくすること、レンズの焦点距離 f 、発振波長 λ を小さくすることによって焦点面上におけるスポット径 r_{20} を小さくすることができる。たとえば、 $r=50\text{m}$ 、 $d=1\text{m}$ 、 $f=20\text{mm}$ 、 $\lambda=1.06\mu\text{m}$ のとき r_{20} は $r_{20}=5.36\mu\text{m}$ になる。

3.2 温度分布

レーザーパワー P_0 が物質に照射されたとき、物質表面から深さ z におけるレーザーパワー $P(z)$ は、

$$P(z) = \beta P_0 e^{-\alpha z}$$

(β : 表面の吸収率, α : 吸収係数)

で表わされる。一般に加工物質の吸収係数 α はきわめて大きいので、物質の表面層でのみレーザービームが吸収され、そこで熱エネルギーに変換される。物質中の熱の拡散は熱伝導による。

半無限体の加工材料表面にパワー P_0 のレーザービームを半径 a のスポット（強度は均一分布）に集光して時間 τ で照射したとき、レーザービーム軸上 (z 軸上) における上昇温度 $T(z)$ は次式で表わされる⁹⁾。

$$T(z, \tau) = \frac{2\beta P_0 \sqrt{k_D \tau}}{\pi a^2 K} \left(\text{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{k_D \tau}} - \text{ierfc} \frac{\sqrt{z^2 + a^2}}{2\sqrt{k_D \tau}} \right) \quad (9)$$

ただし、

$$\text{ierfc} x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x \text{erfc} x$$

$$\text{erfc} x = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

K は熱伝導率、 k_D は熱拡散係数である。

表面の吸収率 β を大きくすること、レーザーパワー P_0 を高くすること、レーザービームのスポット径 a を小さくすることにより、レーザービーム照射面近傍 ($z \ll \sqrt{k_D \tau}$) を効率よく加熱することができる。

各材料のレーザービーム照射面中心を蒸発させるに必要なエネルギー $P_0 \tau$ は、低炭素鋼 98mJ、モリブデン 229mJ、タングステン 137mJ、銅 928mJ である。ただし、 $a=0.1\text{mm}$ 、 $\tau=1\text{ms}$ 、吸収率 β は波長 $1.06\mu\text{m}$ に対する各材料の室温における吸収率を用いている。

3.3 熱応力

レーザービームによって加熱された加工材料の温度分布が $T(r, z, t)$ のときの熱応力分布（半径方向応力 σ_r 、切線方向応力 σ_θ 、 z 方向応力 σ_z ）は次式になる¹⁰⁾。

$$\sigma_r = \left(\frac{\alpha E}{1-\nu} \right) \frac{1}{r^2} \left[- \int_0^r T(r, z, t) r dr \right]$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\alpha E}{1-\nu} \right) \frac{1}{r^2} \left[\int_0^r T(r, z, t) r dr - T(r, z, t) r^2 \right]$$

$$\sigma_z = - \left(\frac{\alpha E}{1-\nu} \right) T(r, z, t)$$

(10)

ただし、境界条件 $\sigma_r=0$, $r=g$; $\sigma_r=0$, $r=\infty$, α :

線膨張係数, ν : ポアソン比, E : ヤング率

加工材料に発生する熱応力を小さくするには、加工領域外 ($r \geq g$) への熱拡散を少なくする必要がある。すなわち、熱源のパワー密度を高くし、短時間で加工することによって加工材料に発生する熱応力 (ひずみ) を小さくすることができる。

4. レーザー加工機

レーザー加工機は、図9に示すようにレーザー発振器および加工系からなっている。レーザー発振器は、レーザー物質、共振器から構成されている。レーザー物質が固体のときはフラッシュランプによりレーザー物質を光励起する。レーザー物質が気体のときは放電によりレーザー物質を励起する。レーザー出力はこれらの電気入力によって制御される。加工光学系は、レーザービームを絶えず被加工物の表面に集光するための平面鏡、レンズ、球面鏡、放物面鏡などによって構成されている。

レーザー加工を支配するレーザービームパラメーターはレーザー発振波長、スポット径、パワー密度、照射時間、レーザー平均出力などである。レーザー発振波長は加工材料の吸収率、吸収係数を、パワー密度は加工の種類 (除去加工、溶融加工、変態加工) および加工速度を、

スポット径はレーザービームに垂直な加工面の大きさを、照射時間は加工深さを決定する因子である。

各種レーザー加工機の特長とその用途について表1に示す。Nd ガラスレーザー、ルビーレーザー加工機は、集光スポット径が大きく (直径 0.1~0.5mm)、1パルス当りの照射エネルギーが大きいので、金属材料のスポット溶接 (溶込み深さ 4mm 以下)、金属・非金属材料の穴あけ (直径 0.1~0.5mm、深さ 10mm 以下) に用いられる。YAG レーザー加工機は、集光スポット径が小さく (直径 0.02~0.1mm)、1パルス当りの照射エネルギーは小さく、くり返し周波数が高く、平均出力が高く、発振の ON, OFF が高速制御できる。したがって、YAG レーザー加工機は、半導体、アルミナなどのスクライビング、ダイヤモンド、超硬合金などの精密微細穴あけ、金属薄板の連続溶接および電子回路素子のトリミングに用いられる。

CO₂ レーザー加工機は、発振波長が遠赤外 (10.6 μ m) であるので非金属材料に対するレーザービームの吸収率はきわめて高いが、金属材料に対する吸収率は低い。CO₂ レーザービームは、集光ビームのパワー密度が低く、スポット径が大きい (直径 0.1~0.5mm) が、高効率 (約 10%) で大出力の連続発振、高くり返しパルス発振ができる。したがって、CO₂ レーザー加工機は、加工限界パワー密度の低い非金属材料を高効率、高速で切

図9 レーザー加工機の構成図

表1 レーザー加工機の特長と用途

レーザー	波長 (μ m)	発振形態	出力	パルス幅	くり返し 速度	開き角 (mrad)	効 率 (%)	用 途
Nd ガラス ルビー	1.06 0.69	パルス	~30 J*	0.3~8 ms	~1 Hz	6~10	2 1	スポット溶接、穴あけ
Nd YAG	1.06	連 続 パルス	~200W 平均出力 100W	∞ ~0.3 μ s	0~50 kHz	2~10	2	連続溶接、切断 { スクライビング、穴あけ、切断、溶 接、トリミング
CO ₂	10.6	連 続 パルス 連 続	~2kW ~1kW 20kW	~0.1ms	1kHz	1.5	10	{ 表面焼入れ、切断、溶接、穴あけ、 光ファイバー加工 スクライビング、切断、穴あけ 溶接、切断、表面焼入れ
Ar	0.49 0.51	連 続	~10W			0.5	0.1	薄膜の除去加工

* 1パルス (パルス幅 0.3~8ms) あたりの発振エネルギー。

断、スクライビング、穴あけ加工するのに用いられる。また、鉄鋼材料の微小歪切断、溶接、表面焼入れ加工にも用いられている。

Arレーザーはレーザー出力は低い、集光スポット径はきわめて小さい（直径 $1\sim 10\mu\text{m}$ ）ので、ガラス基板に蒸着されたクロムなどの金属薄膜の超精密除去加工に用いられる。

5. 各種加工

5.1 穴あけ

高パワー密度のレーザービームが被加工材料に照射されると、レーザービームはその表面層で吸収され、熱エネルギーに変換される。レーザービーム照射面近傍は高温になり、被加工物から蒸発原子、分子とともに、多数の小さな溶融塊を噴出しながら、穴あけ加工が進行する。この現象を高速度カメラで観察すると写真5のようになり、蒸気雲と飛散粒子が認められる¹¹⁾。写真6にガラスレーザーによる黄銅の穴あけ例を示す¹²⁾。レーザービームは加工された穿孔の壁面で多重反射しながら穿孔の先端まで伝搬する。穿孔内のレーザービームの伝搬特

写真5 シュリーレン法によるシリコンの穿孔写真

照射エネルギー 17J/パルス
左から右へ 20, 25, 30, 35, 50 shots

写真6 黄銅の穴あけ断面

性について幾何光学的に解析されている¹³⁾。

ガラスレーザー、ルビーレーザー、YAGレーザーを用いて各種材料に直径 $0.005\sim 1\text{mm}$ 、深さ $0\sim 5\text{mm}$ の穴あけ加工ができる。レーザーによる穴あけ加工は、耐熱合金、超硬合金、セラミック、ダイヤモンドなどの機械加工が困難な材料に威力を示している。穴の径は、集光レンズの焦点距離、レーザービームの開き角、照射エネルギーによって制御される。穴の深さは、照射エネルギー、照射回数によって制御される。

レーザー加工機は、時計用軸受石、ダイヤモンドダイス、ジェットエンジン・タービンのノズル・ガイド・ベイン、化繊ノズルの穴あけ加工に実用化されている¹⁴⁾。

現在、ビデオディスクはポストカラーテレビとして、家庭用娯楽機器の地歩を占めると期待されている。厚さ $200\sim 400\text{\AA}$ のビスマス、クロム、アルミニウムを蒸着したガラス円板に Ar レーザーを用いて、ピッチ $2\mu\text{m}$ のら旋状の情報トラックに幅 $0.8\mu\text{m}$ 、長さ $2\mu\text{m}$ の細長い孔をあける（金属薄膜を除去することによって所定の絵および音の情報を記録してビデオディスクマスターを製作している¹⁵⁾。

CO_2 レーザーによるアクリル板の穿孔現象¹⁶⁾、アルミナの穴あけ加工における応力解析¹⁰⁾、薄膜の穴あけ¹⁷⁾、サファイアの穴あけ¹⁸⁾、金属の穴あけ⁶⁾ などについて報告されている。

5.2 スクライビング

レーザーによるスクライビングは、大別して2種類ある。

①YAG レーザーによるシリコンなどの半導体のスクライビング、②パルス CO_2 レーザーによるセラミックス基板のスクライビング。

シリコンウエハーのスクライビングとは、シリコンウエハーのストリート上に Q スイッチ YAG レーザービームを照射し、被照射物質を溶融、蒸発させ、幅 $20\sim 25\mu\text{m}$ 、深さ $50\sim 170\mu\text{m}$ の鋭い V 字型の溝をつくることである。加工される溝の深さ、幅は、レーザー平均出力、パルスくり返し周波数、ウエハーの送り速度、集光レンズの焦点距離などによって制御することができる。

現在、IC 産業で実用化されている YAG レーザースクライバーは、ウエハーが大口径で厚い LSI のスクライビングに最適である¹⁹⁾。レーザースクライバーの特長は、①生産性が高い、②ほとんどの作業が自動化され、作業方法が簡単である、③マイクロクラックができず、熱影響が微小であるので信頼性が高い、④ウエハーの表面が酸化膜、窒化膜などいかなる状態であってもスクライビングが可能である。

CO_2 レーザーの発振波長 $10.6\mu\text{m}$ に対するセラミック

スの吸収率はきわめて高いので、セラミックス基板のスライビングにはパルス CO₂レーザーが用いられる。平均出力 50W、パルス幅 0.5ms のパルス CO₂レーザーを用いることによって、穴直径 76 μ m、穴深さ 200 μ m、速度 50~100mm/s で、セラミックス基板をスライビングすることができる²⁰⁾。CO₂レーザースクライパーは従来の加工方法と比較して高速で経済的である。セラミックス基板のエッジを精度良くスライビングする必要があるときは、Q スイッチ YAG レーザーが使用されるときもある²¹⁾。

5.3 トリミング²²⁾

抵抗、コンデンサなど回路素子の製作時における設定値からの偏差を補正すること、電子回路中のトランジスタ、ダイオードなど半導体素子の特性上のばらつきによる設計時の不確定性を回路素子に若干の補正を加えて回路として所定の特性を発揮させるトリマ抵抗、トリマコンデンサなどの調整は、回路素子製造および回路調整には不可欠な技術である。

レーザートリミングは、YAG レーザービームのもつすぐれた集束性によって得られる高いエネルギー密度により、回路素子を形成する物質（セラミック基板上のタンタル、ニッケル、クロム蒸着膜など）を瞬時に気化し除去することによって行われる。最も適用例の多い抵抗トリミングの場合には、抵抗体の一部を除去し抵抗値を上昇させて調整を行う。また水晶発振子の周波数調整の場合には、水晶板上の金蒸着膜を除去することによって行う。

レーザートリミングが他のトリミング方法と比較してすぐれている点として、

- (1) 加工径が 20~40 μ m であるため、微小回路素子のトリミングが可能である。
- (2) トリミング速度が速い。
- (3) 清浄なトリミングができる。
- (4) レーザービームの ON, OFF 制御が高速度であるため、高精度である。

(5) 回路と直接電氣的接触がないため、回路を動作状態にしたままのトリミング、すなわち、ファンクショナルトリミングが可能である。

(6) 自動化が容易である。

などがあり、ハイブリッド IC 製造の最も強力な製造技術のひとつとなりつつある。

5.4 溶接

レーザービームのパワー密度が高く（鉄鋼材料の場合 10⁶W/cm² 程度）なると蒸発原子・分子の反作用による深くて細い穿孔が溶融部に発生する。この穿孔内をレーザービームが伝搬するために、被溶接物中のエネルギー輸送に指向性が与えられるために、溶込みの深い溶接ができる²³⁾。TIG、電子ビーム、レーザーによるニッケル合金 Pene 41 の突合せ溶接例を写真 7 に示す²⁴⁾。

スポット溶接には、ガラスレーザー、ルビーレーザーが用いられ、連続溶接には、YAG レーザー（薄板）、CO₂ レーザー（厚板）が用いられる。レーザー溶接は次の特長をもっている。

(1) 被溶接物に投入される全エネルギーが微小であるので熱影響部の狭い、変形が微小な溶接ができる。

(2) 大気中で所定の箇所にレーザービームを簡単に輸送することができるので、形状が複雑な箇所の溶接ができる。

写真 8 高解像度ブラウン管の電子銃

写真 7 ニッケル合金の突合せ溶接例

現在、電子部品の組立て工程にガラスレーザー、YAGレーザーが実用化されている。軸から発散した電子流を吸収するためのモリブデンがステンレス板とガラスレーザースポット溶接されている高解像度ブラウン管の電子銃を写真8に示す。

5.5 光ファイバーの加工

大量通信の時代を迎え、良質な光ファイバーの量産、光ファイバーの接続などの要求が高まっている。CO₂レーザーは、①ガラスに対する吸収率が高い、②不純物のない熱源である、③加熱の面積や熱量の制御が容易である、④熱量の安定性にすぐれている、などの特長があるので、CO₂レーザーは光ファイバーの製造および加工熱源として主力になると見られている。

出力 150~310W の CO₂ レーザービームを空冷回転 GaAs レンズ、円錐鏡などからなる光学系を用いて、直径 6.4~12.7mm の円柱状の母材に、母材の直径の 60~90% の直径のレーザービームを 180~1,200rpm で回転させながら照射し、直径 150 μ m の光ファイバーを 30~50 cm/s の速度で製造している²⁶⁾。

出力 0.5~0.8 W の CO₂ レーザービームを焦点距離 11.8cm のレンズを用いて石英ガラスファイバー（コア直径 50 μ m、クラッド直径 150 μ m）の接続部に 2~5s 照射することによって、接続損失の小さい（0.5dB 以下）スプライスが得られる²⁷⁾。

Kimble R-6 ガラスファイバー（直径 250 μ m）の端に出力 1.8W の CO₂ レーザーを 4s 照射することによって、ファイバーの端を半球面レンズに形成することができる。直径 83 μ m の石英ガラスファイバーでは、出力 1.8W、照射時間 0.1~0.3s の CO₂ レーザーが必要である²⁸⁾。

5.6 他の加工

上記以外のレーザー加工機の実用化例として、高出力 CO₂ レーザーによる切断加工²⁹⁾、表面焼入れ加工³⁰⁾などがある。

〔参 考 文 献〕

- 1) 安東：レーザー応用計測，日刊工業新聞社，東京（1971）
- 2) G. Davis: Optical Diffraction Velocimeter, Instr. Cont. Syst., **39**, 9 (1966) 99
- 3) 稲荷ほか：レーザー・スベックルパターンによる非接触速度計の試作，計測自動制御学会論文集，投稿中

- 4) 稲荷ほか：生産自動化のための新しい計測及び加工技術，三菱電機技報，**49**, 11 (1975) 743
- 5) R.B. Crane: Use of Laser-Produced Speckle Pattern to Determine Surface Roughness, JOSA, **60**, 12(1970) 1658
- 6) T. Inari: Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent Diffraction Patterns, 16th S.P.I.E Meeting (1972) 47
- 7) G.D. Boyd and H. Kogelnik: Generalized Confocal Resonator Theory, Bell System Tech. J., **41** (1962) 1347
- 8) L.D. Dickson: Characteristics of a Propagating Gaussian Beam, Appl. Opt., **9** (1970) 1854
- 9) H.S. Carslaw and J.C. Jaeger: Conduction of Heat in Solid, Clarendon Press, Oxford (1959)
- 10) U.C. Peak and F.P. Gagliano: Thermal Analysis of Laser Drilling Process, IEEE J., **QE-8** (1972) 112
- 11) 植村，山本，宮崎：高速度写真によるルビーレーザー加工の解析，金属，**34** (1964) 44
- 12) 吉田，荒井：ガラスレーザー加工機，三菱電機技報，**47** (1973) 653
- 13) 秋葉，吉田，若林：レーザー加工（第2報），S48，精機学会秋季大会前副集，235
- 14) 島川，長野：レーザー加工技術の現状，応用物理，**43** (1974) 882
- 15) K.D. Broadbent: A Review of the MCA Disco-Vision System, J. SMPTE, **83** (1974) 268
- 16) 荒田，宮本：大出力炭酸ガスレーザーの熱源的研究（第6報），溶接学会誌，**43** (1974) 554
- 17) 中山：薄膜のレーザー加工，応用物理，**39** (1970) 970
- 18) 島川，長野：レーザーによる微細穴あけ加工，精密機械，**37** (1971) 52
- 19) 渡辺，布施：スクライビング・ダイシング工程の自動化，電子材料，**7** (1975) 44
- 20) Coherent Raation 社，カタログ（1971）
- 21) U.C. Paek and V.J. Zaleckas: Scribing of Mini-Substrates Using CO₂ and YAG Lasers, Plating and Surface Finishing, **63** (1976) 62
- 22) 関口，梶川：レーザーによる自動トリミングシステム，電子材料，**7** (1975) 62
- 23) 吉田，荒井：レーザーによる加工，電気加工学会誌，**7** (1973) 1
- 24) M.J. Adams: Tech. Paper, 1970
- 25) 吉田，野阪：未発表
- 26) R.E. Jaeger and W. Logen: Laser Drawing of Glass-Fiber Optical Waveguides-Filing Case, Bell Labo. Tech. Paper, 1973
- 27) 藤田，洲崎，橋：Optical Fiber Splicing Technique with a CO₂ Laser, Appl. Opt., **14** (1975) 294
- 28) U.C. Paek and A.L. Weaver: Formation of a Spherical Lens at Optical Fiber Ends with a CO₂ Laser, Appl. Opt., **14** (1975) 294
- 29) 荒田，宮本：レーザー切断，溶接学会誌，**43** (1974) 832
- 30) F.D. Scaman and D.S. Gnanamuthu: Using the Industrial Laser to Surface Harden and Alloy, Metal Progress, **103** (1975) 67