

レーザーの工業への応用

大阪大学工学部

山中千代衛
横山昌弘

福井大学工学部

北島巖

I まえがき

8年前にレーザーが出現して以来、いわゆるコヒーレントな光源、換言すれば電波と同様きわめて規則正しい波の性質をもつ光の発振器はいろいろの面で工業的な応用が始まり実用的な道具として定着して來た。

レーザーの工業への応用に関しては、空間的、時間的コヒーレンス、出力、出力の時間特性、波長、価格など考慮すべき因子がある。

レーザー光は空間的コヒーレンスがよいので集光すると非常に高いエネルギー密度が得られ、適当な出力のレーザーを用いると溶接、せん孔、切断などの加工処理が可能である。また小出力のガスレーザーではこの空間的コヒーレンスが非常によいので理想的なコリメートビームが得られ、直線の割り出しに効果を發揮する。

時間的コヒーレンスは強力な単色性を光源を与え、干渉法が工業計測に登場しうるようになった。またこれはホログラムの実用化をうながした。

この他強力なレーザー光源は光散乱の検出を日常茶飯事にしたため、これらを用いたいわゆる Active Spectroscopy が実用化した。

レーザー (Laser) は Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭字を連ねたものである。第1表に実用化されているレーザー系の一覧表を与える。表においてQスイッチ法とは非常に幅のせまい高出力パルスを発生する技術であって、瞬間にレーザーを動作させ、エネルギー放出を集中的に行なわせるものである。

II レーザー加工処理

レーザー光を一点に集光すると非常に大なるピークパワーとなるので集光点の物質は原子、分子の結合が解かれ高温下で相変化を生じる。集光時のパワー密度 P は

$$P=4E/(\pi f^2 \theta^2 t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここに E はレーザーの出力エネルギー、 f は集光レンズの焦点距離、 θ はビームの発散角、 t はレーザーのパルス幅である。また θ はコヒーレントビームに対しても最小値として

$$\theta_{\min}=1.22\lambda/R \quad \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる。ここに λ は波長、 R はビームの半径である。現実にはこの 2~3 倍と考えてよい。大体 2~10 mrad 位である。 $\theta=5$ mrad, $f=25$ mm とすると焦点内ではパワー密度は 2000 倍となり、出力 1 MW なら 2 GW/cm² に達する。

スポット径 S は

$$S=f\theta \quad \dots \dots \dots (3)$$

である。

以下に加工処理を略述しよう。

III 溶接 (Welding)

溶接はレーザー応用による重要な加工過程の 1 つである。しかしながら現在知られている溶接への応用は小規模のものであり、部分的断片的な報告があるにすぎない。レーザーエネルギーと物質との相互作用による短時間高温度の反応は、新しい物質観の下に、溶接分野へ応用されるべきものである。

物質とその性質

一般に金属はレーザー溶接に都合のよい物質であるが、その他にプラスチックも熱成形が可能である。溶接の規模は技術や薄膜の様なマイクロオーダのものから、上はレーザーエネルギーによっていくらでも大きくなる可能性がある。この場合、融解透過長 (fusion penetration depth) が問題になり、これは物質の熱的光学的性質によって左右される。

先づ最初に熱拡散 (Thermal Diffusivity) について考えてみよう。一般に熱拡散が大きいと部厚い物質を溶接できる。物質の熱浸透の深さは物体表面の温度と熱拡散度により推定される。線型熱流の微分方程式は次の様に

表1

種類	動作モード	波長	出力	応用
Ruby (Cr ⁺³ in Al ₂ O ₃)	パルス Qスイッチ	0.6943 μm	1-500 J 1-1000MW	溶接, ドリル, 蒸発 測距, 蒸発, パルスホログラフィー 散乱分光, ラマンプリラン
Nd in glass	パルス Qスイッチ モードロック	1.06 μm	1-500 J 1-600MW 1 MW	溶接, ドリル, 蒸発 測距, 蒸発, ラマンプリラン通信, 測距
Nd in YAG	Qスイッチ 連続	1.06 μm	1-50W 1-50W	測距, 蒸発, 分光 ラマンプリラン 蒸発
GaAs	パルス パルス (液体窒素温度)	0.900 μm 0.84 μm	95.0W 5. W	測距
CO ₂ -N ₂ -He	連続 Qスイッチ	10.6 μm 10.6 μm	1KW 100 KW	破碎, 蒸発, 分光 通信 蒸発, 溶接, 測距
He-Ne	連続	0.633 μm	1-1000mW	干渉, 回折, 軸合せ, ホログラフィ 散乱
Ar	連続 パルス	0.4880 μm 0.4880 μm 0.5145 μm	0.1-5W 25W	ホログラフィー, 加熱, 回折ラマン 分光
Kr	連続	0.3507 μm 0.3564 μm 0.4762 μm 0.5208 μm 0.5682 μm 0.6471 μm		ホログラフィー, ラマン分光
N ₂	パルス	0.3371 μm	1 KW	光化学
Neon	連続	0.3324 μm	50mW	

与えられる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \dots \dots \dots (4)$$

但し T は温度 x は時間 t における熱拡散深度であり, 热拡散係数 α は次式で表わせる。

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

ここで K は熱伝導度, ρ は物質の密度であり, C は比熱である。Carslaw と Yaeger は半ば無限大の物体に対して次のような境界条件で解を与えた。 $t=0, x=0$ の初期条件は $T=0$ であり, $t>0$ のときは表面温度 T_s は一定である。そのときの時刻 t における位置 x の温度は

$$T_x = T_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2\alpha t}} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{但し } T_s = \frac{2F}{K} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで F はレーザーエネルギーの吸収によって生じた物質表面の heat flux であり, (1)のレーザーエネルギー P

に比例する。Fairbanks と Adams は物質の表面に hot spot の中心をおいた場合を取り扱い, 次の関係を出した。

$$T_s - T_o = \frac{2F\sqrt{\alpha T}}{K} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{erfc} \frac{a}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで T_s は hot spot の中心における物質表面の温度であり, T_o は物質の表面の温度である。 a は円形 hot spot の半径でありレーザー光の focused spot size $S=f\theta$ から推定される。若し spot size が大きいか又はレーザーのパルス長が短かいときは, かつて内に第二項は無視できる程小さくなる。

高い熱拡散度の物質は熱エネルギーを速かに受け入れかつ伝導する。それ故熱的なショッククラックを受け難い。表 2 はいくつかの金属及び合金の熱拡散度を表示している。多くの物質は比較的熱拡散度は良くないが, レーザーのパルス巾を大きくし, 又 CW 発振を行なえば必要熱量が得られ簡単に溶接を行なうことができる。図 1 は厚さ 0.178 mm の 402 型ステンレス鋼の張り合せ溶接(futt

表2 各種金属の熱拡散係数

Material	Thermal Diffusivity α ($\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$)
Metals (commercially pure)	
Aluminum	0.91
Beryllium	0.42
Chromium	0.20
Copper	1.14
Gold	1.18
Iron	0.21
Molybdenum	0.51
Nickel	0.24
Palladium	0.24
Platinum	0.24
Silicon	0.53
Silver	1.71
Tantalum	0.23
Tin	0.38
Titanium	0.082
Tungsten	0.62
Zinc	0.41
Alloys	
Brass(70:30)	0.38
Phosphor bronze (5% Sn)	0.21
Cupro nickel (30% Ni)	0.087
Beryllium copper (2 % Be, δ phase)	0.29
Inconel (76% Ni, 16% Cr, 8% Fe)	0.039
6061, O temper aluminum alloy	
(1% Mg, 0.6% Si, 0.25% Cu, 0.25% Cr)	0.64
304 type stainless steel(19%Cr, 10%Ni)	0.041

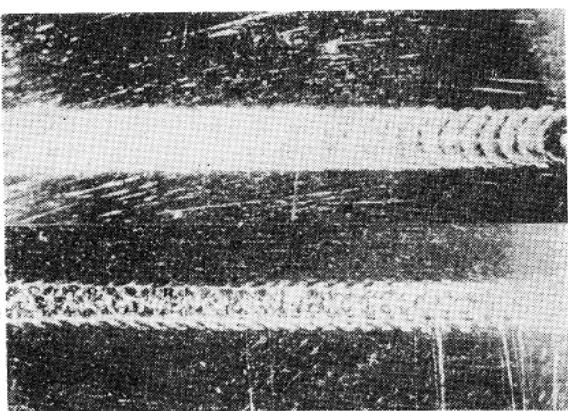


図1 比較的薄い金属板を張り合せ溶接した例.

上はレーザービームの照射側、下は肉厚0.18mmのステンレス鋼の裏面の溶接部。レーザービームスポットは1mm径で 6×10^5 w/cm^2 に絞られている、ビームエネルギー12 J/パルス、パルス長5.5 ms。

weld)の模様を示している。レーザーのパルス巾は5 msでビームエネルギーは1パルス当たり12 Jであり、1

mm の spot size で溶接を行っている。

その他に物質の潜熱、溶解点、沸点、蒸発温度など考慮する問題があり、又、機械的強度や熱膨張などもレーザー溶接には重要な事柄である。

冶金学及び化学上の問題点

レーザー溶接においては非常に速い加熱と殆んどそれと同じ程度の速い冷却があるので非平衡状態の固化が生じる。それ故焼なましのようなストレス解除の方策が必要である。レーザー溶接では普通の大気中動作でも間に合うが、完全さを確保するために表面反応の化学的処理が必要であろう。

金属表面と光子エネルギーの相互作用

反射の問題；大体の金属はレーザービームの大部分を反射してしまう。それ故比較的大きな出力のレーザービームが溶接過程に必要とされる。加熱された物質表面が大気と反応すると反射度が低下することがしばしばある。Anderson らはルビー光に対する溶解金属の吸収度 (absorptivity) を報告している。例えば Al = 0.20, Cu = 0.15, Fe = 0.45 そして 300 型 SS = 0.60 である。反射度の急激な減少は蒸発が始まったときに生じる。この減少は気化した物質による散乱と物質表面における光のトラッピングの結果だと思われる。大体の金属の反射は波長と共に増大するので、長波長のレーザー程、大きなビーム出力が必要である。例えば 0.69 μm と 1 μm のレーザーでは同じ物質を溶接するのに必要コネルギーは 1 衡違うことである。

リボンや薄膜の溶接にはレーザービームの強度やパルス巾が特に注意を用する。そうでないと急激な吸収の変化が上述の様な反対の変化を起りやすく、試料を蒸発させてしまうおそれがあるからである。物体表面の仕上げ具合が、光の反射度(逆には光の吸収度)を20~90%も変化させる。粗い表面が必ずしも良い吸収度を与えるとは限らない。又 Cu などは表面酸化により $0.6943 \mu\text{m}$ の波長で 95% から 20% までに反射率が落ちる。勿論表面仕上げはそのざらざら具合が光の波長の程度であるときに吸収に影響する。図 2 はルビー光を当てたとき Cu の表面の仕上げが溶解の浸透長に影響する様子を表わしている。

光エネルギーの吸収；

レーザー光が物質の表面に当ると、その一部は吸収され、熱エネルギーに変換される。そして残りの部分は反射される。物質にある光エネルギーの吸収は、価電子の平均自由行程の概念を用いて近似的に説明されている。即ち、光の浸透深さ x における光強度は

$$I_x = I_0 e^{-kx} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

で表わされ、深さ x によって光強度が exponential に減衰する。ここにおいて I_0 は入射光強度で、 k は吸収

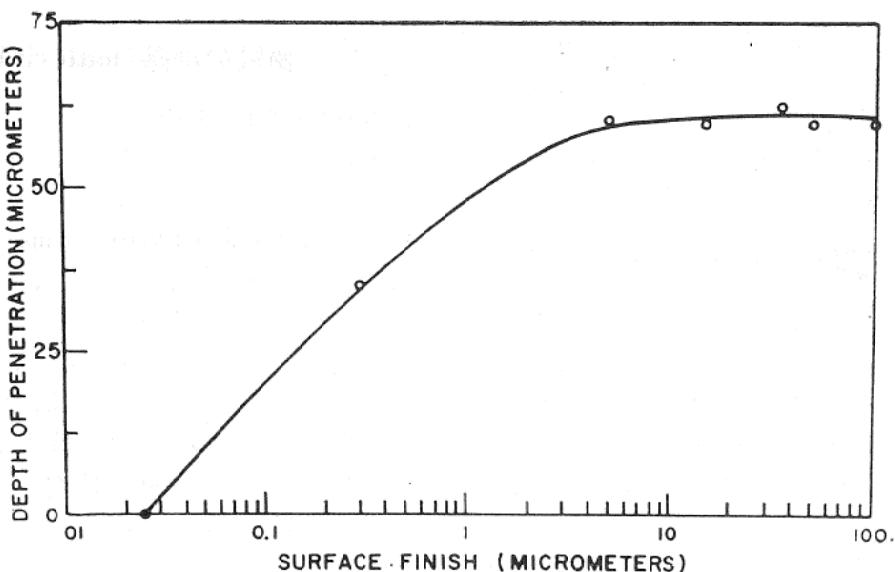


図2 銅の表面仕上げがルビーレーザー光の波長の吸収に及ぼす効果。

係数である。大体の金属では光透過深度はたかだか5から50 mm程度であり、この深さでエネルギーが熱に変換され熱伝導でレーザーのエネルギーは物質の内部に浸透していく。

レーザー光強度が十分大きいと物質を溶かし、更に蒸発が起り出す。又物質表面から早い速度で細かいイオン化された物質粉粒が噴出されてくる。幾人かの研究者は、レーザーが照射されている物質の表面温度をイオン放出状況の測定で計算している。Knechtは次の関係式を用いた。

$$\log W = C - 0.5 \log T - \frac{B}{T}$$

ここで W は蒸発速度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{S}^{-1}$) T は物質の表面温度 ($^{\circ}\text{K}$) で B と C は物質により定まる常数である。彼はイオン電流を測定して 30 ns 45.3 kW の Q スイッチレーザーで金 (gold) の表面温度が 1270°K になると計算した。

溶接パラメータ

溶接応用のパルスレーザーの system を考えた場合に、決められるべき要点はレーザーのエネルギー即ち出力の問題とレーザー発光持続時間の問題である。

レーザーエネルギー即ち出力；

ルビーレーザーとガラスレーザを比較すると、金属表面の反射を考えて波長の短いルビーレーザーの方が溶接効率は有利であるが、レーザー発振の threshold を考えると Nd ガラスレーザーの方が好ましい。どちらがより大きな出力を放出できるかが問題である。ガラス製法の向上により熱伝導が良くなり、ガラスレーザーの最大出力の限界が改善されている。

レーザー発光持続時間即ちパルス長

パルス長のパラメータがレーザー照射による金属の加工過程を左右する。溶接過程になるか穿孔機構になるかはレーザー照射時間によって決まる。一般にレーザーのパルス長が長い程、溶接作用は、エネルギーの吸収、熱の変換溶解、成分の混合そして凝固という順でより大きく行なわれる。レーザービームを調節すると、溶接部分の蒸発消散や粒子の噴散が最小限にいくとめられる。それ故レーザーパルスの形は矩形波ではなく、常に溶接部分の表面温度が一定であるような出力調節が望ましい。このような技術は仲々やっかいなものである。

レーザーエネルギーの密度

このパラメータは上記2つの事項と関連して決定されるものである。空間的エネルギー密度に限ればレンズ等による集光でエネルギーの単位面積当たりの大きさを変えることができる。

レーザー光の波長

波長は連続的に変化できるものではないが高調波発生の技術により離散的には変化せらる。波長はレーザー物質特有のものである。前述したように波長によってエネルギーの物質による透過吸収度が違ってくる。即ち波長により熱変換率及び溶接作用の効率が違う。又集光に際しては波長の大きさが spot の大きさを決めることになる。

集光作用

spot の大きさはビームの拡がりと用いた集光レンズの焦点距離により簡単にきまる。ただし、ビーム強度は中心軸をずれると小さくなり、どの辺の強度をもって spot size というか定義されなければならない。單一モ

ードの発振を仮定すると、強度最大点より $1/e^2$ まで強度が落ちる距離をもって spot size の半径とする。であるから、レンズによって集光されたレーザービームの直径が、丁度全光束をカバーしているときは、レーザー波長とレンズの f ナンバー（直径と焦点距離の比）に比例する。故に focal spot の直径は次の様になる。

$$S = \frac{2\lambda f}{\pi R} \dots \dots \dots (9)$$

ここで λ はレーザーの波長, f はレンズの焦点距離, R はビームがレンズに入射するときの半径である. 前に出てきた関係式 $S = f\theta$ と比較してみると, この式の意味するところは集光のプロフィルが Gauss 分布で近似されるということである. 故に波長程度の spot size が可能であろう.

その他の溶接におけるパラメータとして Defocusing の技術やフィルターの用意も考えなければならないし、又、溶接部分の形状や、溶接速度の問題もある。レーザー溶接が既存の技術と比べて経済的に合うかどうかは以上のパラメータを考察して決めなければならない。

現在の段階ではレーザーはミニアチア加工には全く有用であるが溶接対象が大きくなるとその有効性に限界がある。溶接道具としてのレーザーは一般的に冶金学的困難を解決はしない。スポンジのような多孔が溶接部に生ずることはめったに生じないことではあるが困難な問題である。合金の成分の中に高い蒸気圧即ち低い沸点をもったものがあると蒸発の傾向が著しく、明らかにこの困難の原因となる。しかしながら現在のパルスレーザーは溶接道具として限界はあるものの、その色々の特質から溶接応用にはすぐれた点が多い。溶接道具としてレーザーは以前に述べた、単色性コヒーレンス、出力強度などの利点の他に、次に列挙するような特長をもっている。

- 1) レーザー発光時間が短かく、物質の加熱時間が短かいので、溶接に際し他の部分が熱的影響を受けると困るものには有用性がある。例えば、半導体素子の電極づけなどには適している。
 - 2) 溶接時間の短かさは 1)項と同じではあるが、物性的に変化を望まない物体への溶接に適している。熱処理したものとか磁化された物体には好適である。
 - 3) 溶接道具を物理的に近づけることのできない部分でも、レーザー光の特質から、溶接は容易である。
 - 4) レーザー溶接は、光学的には透明であるが、物理的には閉じている物体や磁界中の物体に対して有効である。
 - 5) 溶接後の厚みや縮みが殆んどない。
 - 6) レーザー装置を溶接道具として用いても、さ程やっかいなものではなく、比較的簡単に set up や、

点検ができる。

IV 物質の削除 (material Removal)

レーザー穿孔 (drilling)

最初にレーザーが工業応用に使われたのは穴をあける(drilling)分野であり、もっと一般的には貫孔する操作であった。Western Electric Companyでは1965年にダイヤモンドダイスの作成のために、ルビーレーザーを使ってダイヤモンドに穴をあけている。レーザーする穿孔は次の事項を考慮して有効であろう。

- 1) 穿孔用レーザー装置と対象物体は直接的に物理的な接触はないので、機械的穿孔のように刃の損傷や磨耗などのトラブルが生じないので穿孔能力を同じ状態における。
 - 2) 光学系の微細調整により、穿孔位置を精確に指定できる。
 - 3) 大きな aspect ratio (穴の深さ／穴の径) が容易である。機械的穿孔と違ってレーザー光は穴の壁面と相互作用しないので穴の径が小さくても、いくらでも深く穿孔できる。

溶接の場合と同様に穿孔の場合にも当然対象物の特性がレーザーパラメータに影響してくる。Ready は $600\mu s$ と 44 ns のパレスレーザーを用いて、いくつかの金属に対して 1 回のパルス照射でどれ程の穴があくものかを実験と計算で表 3 のように報じている。いかにしてこの

表3 各種金属におけるレーザーパルス1回当たりに蒸発除去されてできた穴の深さ

Depth of Material Vaporized

Metal	5000J/cm ² 600μs Laser Pulse		10 ⁸ W/cm ² 44 ns Q-Switched Pulse	
	Calcu- lated (cm)	Obser- ved (cm)	Calcu- lated (μm)	Obser- ved (μm)
Aluminum	0.084	0.078	6.2	3.6
Copper	0.083	0.090	3.0	2.2
Nickel	0.068	0.058	2.4	1.2
Brass	0.089	0.078	2.0	2.5
Stainless steel	0.076	0.061	1.8	1.1

よう深い孔が穿けられるかということは興味のあることであるが、物体内に衝撃波が立つからだということを考えられている。Cohen はアルミニウムとニッケルでパルス 1 回当たりのレーザーエネルギーを変えたときの穿孔深さを調べた。図 3 の各点は数回の試行の平均値である。彼はアルミナのセラミックで穴の径 0.5 mm 穴の深さ 3.2 mm のレーザー穿孔を行なった。図 4 に穴の断面図を示す。小さな穴の穿孔にはレーザーが有効であることが分る。

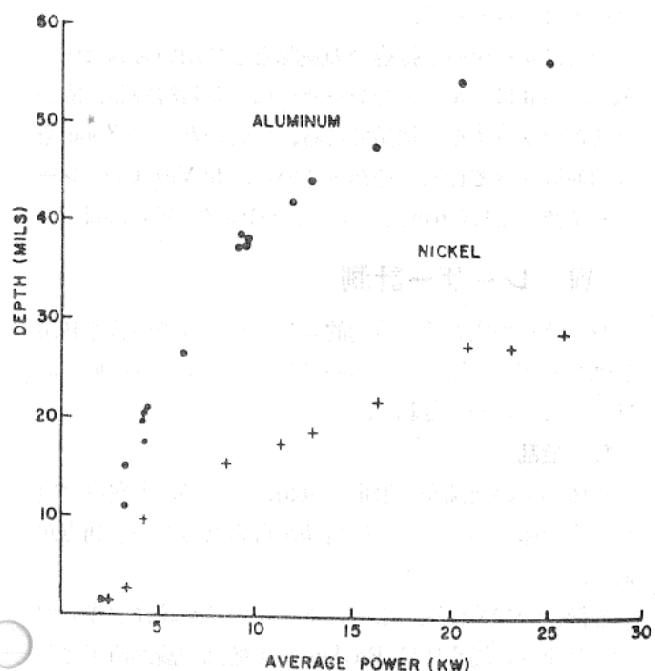


図3 レーザーパルス1回当たりのアルミニウムとニッケル穿孔の深さ、数回の実験の平均値がplotされている。レーザーエネルギーは75Jでレンズで集光され、 $10\text{MW}/\text{cm}^2$ である。

トリミング (Component Trimming)

レーザーは又選択蒸発や加熱によって電子部品の特性修正の方法として研究されている。高出力密度、小さいspot size、短かいパルス長は、レーザーによってのみ可能であり、この目的の道具として非常に有効である。

先づ物質の単位質量当たりどれだけのレーザーエネルギーが蒸発作用に必要かということである。密度と沸点及び蒸発熱が分れば計算できる。次に物質によるレーザー光の吸収度が問題である。光吸収は1つには表面仕上げの具合により随分違ってくるし、2つには、吸収は物質温度の函数であることである。一般には温度が上がれば、物質の光吸収性も増大する。(温度が上がれば物質の禁

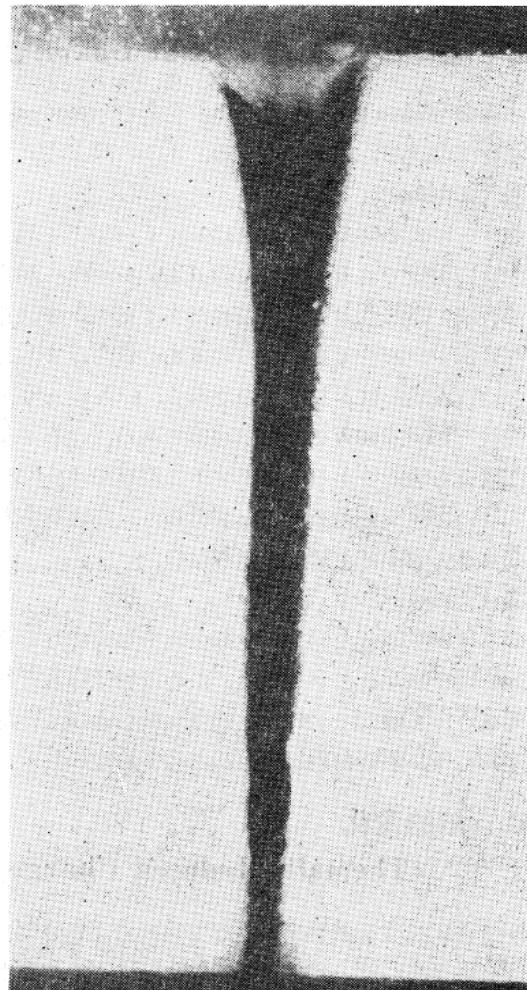


図4 ルビー レーザーパルス光を用いて肉厚3.2mmのアルミナのセラミックをドリルした断面図。

制限 energy gap が縮み、熱的励起が起りやすい、即ち吸収端が長波長側へ移動する。)

薄膜の成分を調節するには、レーザーは将来性のある道具である。Bell Telephone研究所ではQスイッチYAG:Nd レーザーを用いて薄膜のgap capacitorを作った。図5はその1例である。

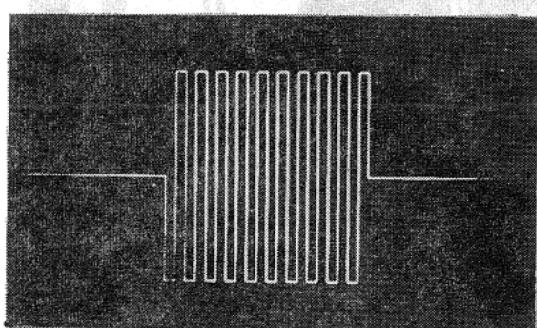
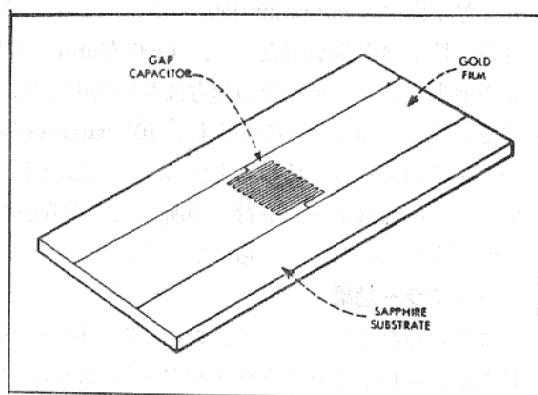


図5 サファイヤ上の金薄膜をレーザーで加熱刻溝した樹状間隙容量

V 物体の削形 (material Shaping)

前2節の welding 及び drilling を含む removal を除いた物体の成形、削形を述べる。

切断 (cutting)

レーザーによる切断や蒸発化はレーザー加工で最もなじみやすい現象である。大出力の CO₂ レーザーがこの分野で有望であろう。前にも述べたダイヤモンドに穿孔する技術がレーザーで得られるのであるから、ましてや一般の物質の成形は容易なものである。CO₂ レーザーは CW 発振で 100~250W の発生が可能である。これを集光すれば鋼をも切断できる。1/8 インチの鋼板を 40 インチ/分の割合で切断を進めることができる。焼き切られる巾はわずか 0.02 インチにしかすぎない。

刻字 (scribing)

石の上に字を刻むと同じように金属や半導体などの表面に線や図を描くことができる、この過程は穿孔と同じものであり、CO₂ レーザーの動作が最も適切に使用されるであろう、不要物削除の方法としても使われる。

VI 熱的変化

(Themally Induced Change)

レーザー光強度を調整することで熱浸透深さを制御できる。IC 用薄膜においてその電気的性質は加熱及び焼なましにより変化させたり、調整したりすることができる。IC の抵抗変化のためにおよそ 10⁶ MW/cm² で msec のパルスレーザーが必要である。レーザーによる加熱作用は金属や合金の再結晶機構の解明にも用いられる。即ち結晶粒の大きさを制御することができる。更にレーザー光線によって化学反応を起させることができるものである。イオン化、ガスの breakdown、光化学反応などがレー

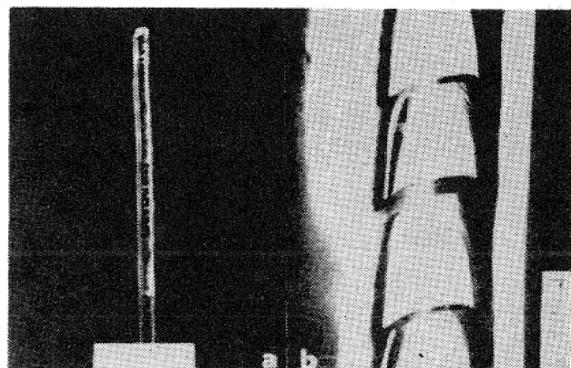


図 6 炭酸ガスレーザーによって多結晶性 Al₂O₃ をゾーン溶解で成長させたサファイヤロッド

- a. 全体の模様。
- b. ロッド上に発達している結晶面。

ザーにより行われる。

最後にレーザーが帯溶融の熱源として用いられた例を示す。図 6 はアルミナをレーザーにより帯溶融し、成長させたサファイヤの結晶である、精製のために Zone を 3 回通過させて種結晶を作っている。40W の CO₂ レーザーを使って 1.5 mm 径のサファイヤの結晶が作られた。

VII レーザー計測

レーザーの空間的、時間的コヒーレンスの性質を利用したレーザー応用計測について述べる。工業への応用測は次のように分類される。

1. 散乱

物体からの散乱光の振幅、位相、周波動、方向の測定から、物体との接触なしに情報が得られるという利点がある。

光散乱の理論は次のようにになっている。粒径が光の波長より小さい場合には Rayleigh の散乱理論が適用される。この場合、粒子は電気双極子として働きすべての方向に輻射を出す、粒子が光の波長より大きい時には Mie 散乱となる。この場合の特徴は前方散乱が大きいことである。

レーザーはコリメーションと強度が非常に優れた光源であるため、微少な散乱断面積を良好な角度分解能をもって測定可能である。さらに、単色性がよいため、狭帯域渦波器に適しており、検出にヘテロダイン技術を適用することができる。この一例としてルビーレーザーを用いたプラズマからのトムソン散乱の測定が筆者により行われ、プラズマからの光子雑音を最小にするため 0.3 μm のフィルターが用いられている。

Contamination 測定

光散乱を粒径や contamination の測定に応用する方法として、NBS では光源として He-Ne レーザーの 0.633 μm の光を用い 90° の散乱や光電子増倍管で 1 mmあたり数 100 個の粒子密度の測定に成功している。この他、清浄な室内の contamination コントロールのための大容量の粒子検出器が開発され、1400 l/min の割合で空気を抽出し、レーザー光の前方散乱を利用して、0.3 μm までの大きさのダストを検出し、10⁵ particles/sec の割合で粒子の大きさや数を測定する。将来は液体、固体の検査に応用されよう。筆者らの所で大気構造を超高層から低層大気にわたってしらべている。

ドップラー効果

よく知られているように、動いている粒子から散乱された光は波長がドップラー・シフトしている。現在までの所、装置の限界のため高速の物体だけが測定可能であったが、レーザーによる光ヘテロダイン法を用いると、

周波数シフトを非常に正確に測定できる、液体中に保持された粒子からの散乱光より液体の速度を求める一例では10 Hz の帯域巾の装置で0.004 cm/sec の速度を測定している。

工業と直接結びつくドップラー効果の応用には、振動をはかるためのドップラー・レーダー装置がある。この装置では、振動している物体からの散乱光とレーザー参照光とを光ヘテロダイン検波のため混合する。散乱ビームは、振動物体によって位相変調がかかっており、検知器のディスクリ回路で解析し、0.1 μm の変位に対して感度があったことが報告されている。

速度測定

ドップラー効果とは異なる原理で速度測定も可能である。これは物体の色々の部分から散乱されたレーザー光の局所的な干渉効果による散乱光のまだらのパターンを利用する。このパターンが検知器前面の回折格子を横切って動く時の光パルスの計数が物体の速度に直接比例している。測定精度は0.1%で流速よりは物体の速度測定に適している。

VII 回折

アラインメント（軸合せ）

レーザーの空間的コヒーレンスの最初の簡単な応用はコリメートビームを軸合せのために用いることで、既にトンネルのボーリングと測地学に利用されている。宇宙航空産業の応用の一例として 1.5 mW の単一横モード He-Ne レーザーの 0.633 μm の径 10 mm 平行平面コリメートビームが軸合せに用いられる。検出部は図7のように4分割の円盤で4個の検知器からなる。ビームが中心に入っている時は各部は等しい光を受けるが、軸がずれると各部の光の量が異なり、その変化から軸合せのズレの程度が分かる。精度は 10^{-6} rad である。これよりも複雑な軸合せ装置はスタンフォード大学の線型加

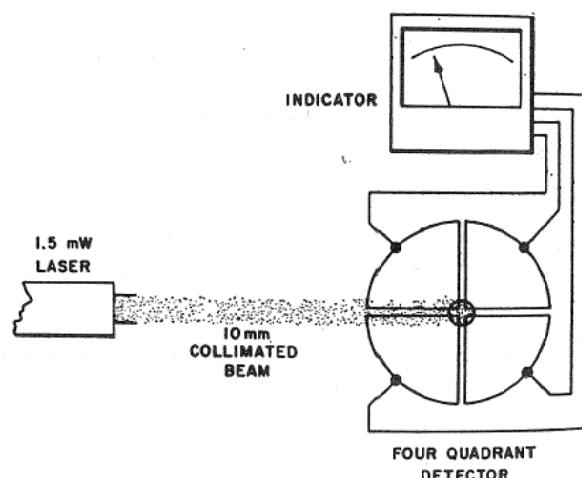


図7 レーザーを用いたアラインメント装置。

速器に利用されており、レーザービームの光路中の空気の乱流による影響をなくすため部分的に排気して 10^{-7} rad の偏差の測定に成功している。

回折効果

回折現象は古くから研究され、シュリーレン効果、位相差顕微鏡などに応用されているが、単色平面波光源の強度が微弱なため視覚又は写真記録技術に限られていた。所がレーザーは高輝度かつ空間的コヒーレントのよい光源であるため、回折パターン上で直接検出システムを動作させることができるようにになった。

簡単な回折効果

一つの応用は針金の直径の測定に回折パターンを利用することである。レーザービーム中の銅の 0.5 mil(12.5 μm) の針金でできた回折パターンはフラウンホーファーの far field pattern であり、図8に示すように中にスポットがあるもとのレーザービームの回折パターンと、中心からだんだんと強度の減少しているスリットの回折パターンの点の列からなり、その間隔は針金の直径に逆比例している。スリット回折パターンの強度は

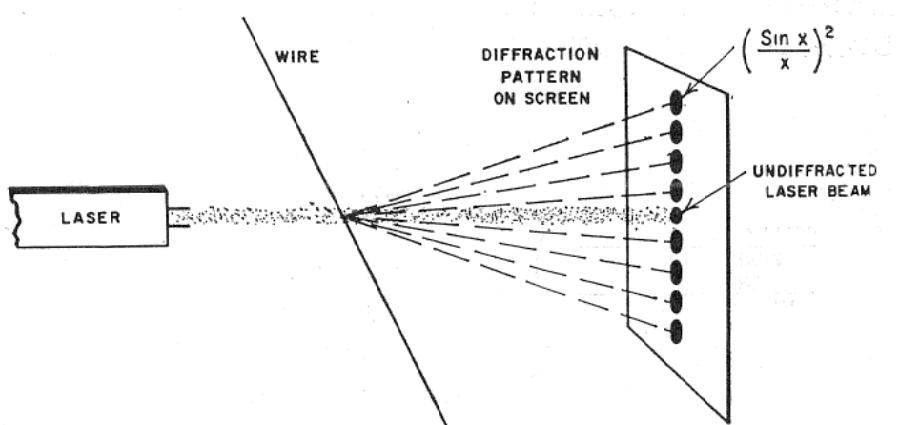


図8 空間コヒーレントビームによる針金の回折パターン。

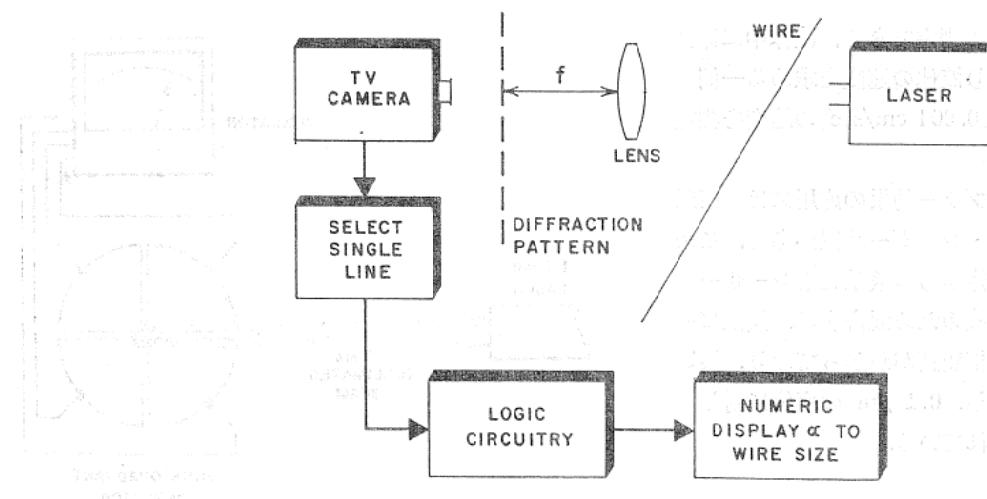


図9 TV vidicon を用いた針金の回折パターン検出装置

$I = \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2$

で与えられる。ここで $x = \frac{2\pi ar}{\lambda}$, α は回折パターンの張角, r は針金の半径, λ はレーザー波長である。測定精度は0.1 mil (2.5 μm) の針金で 0.5 %である。回折パターンを検出するには一列に並べた photodiodes か又は TV vidicon camera を用いて針金の太さを測定する。後者の例を図9に示す、この装置は 0.3 %のくりかえし精度でうまく動作している。

空間フィルター法

これは回折パターンを解析する代りに振巾と位相の増進の操作をパターン上で行なうもので、パターンは第2のレンズでもその物体の像に変換され、もとの物体の解析された像が見られる。

空間フィルター法はレーザーの出現以前から知られており、雑音の多い写真の像を改善するのに有効である。この場合像の鮮明度は画面の高周波成分を増すことで改良され、輪かくは高周波雑音をのぞくことではっきりする。これは電気フィルターときわめて類似している。

空間フィルター法はレーザーの出現により生じた光情報プロセスの新らしい分野の一つである。図10はその基

本を示すもので、1つの焦点面での光パターンが他の焦点面でのパターンのフーリエ変換であるというレンズの性質を利用しておあり、空間コヒーレントな光が透明な対象を通過した後レンズを通って回折パターンを作る。パターンの位置には対象の必要な空間周波数を減衰させるフィルターをおくレンズの軸上の中心部は直流成分であってパターンの外周へ行く程周波数は増大している。通過最大周波数はレンズ口径で制限される。また位相の増進は屈折率が 1 より大なる異なる厚さの媒質をフィルター上に挿入して実施する。フィルターを通った光は第2のレンズを通り、逆フーリエ変換をして、フィルターで修正をうけた物体のイメージにもどる。I.C. 製造に際して重要な問題の一つは photodiffusion masks のチェックである。写真のエマージョン又はガラス上のクロームで作られたこれ等のマスクは全視野にわたり 2 in (5.08 cm) をこえない大きさで $\pm 50 \mu\text{in}$ (1.3 μm) の許容度をもつていて、1500 パターンを含んでいる。この mask は同じ間隔でくりかえす一列の同じパターンで回折格子のように働くらしく、図11は photomask の典型的な回折パターンである。空間フィルターを用いることによって図12に示すように mask 中の誤差だけがあらわれ

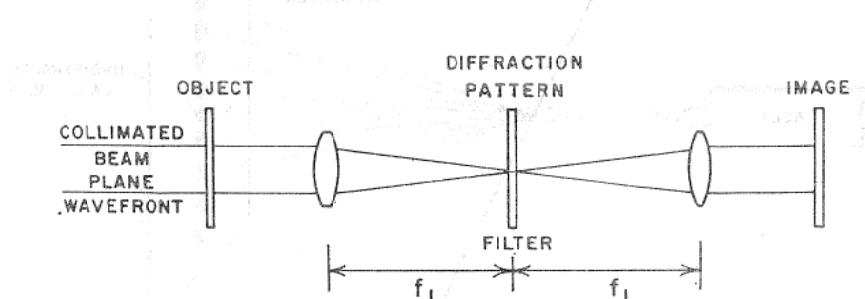


図10 空間フィルター実験配置

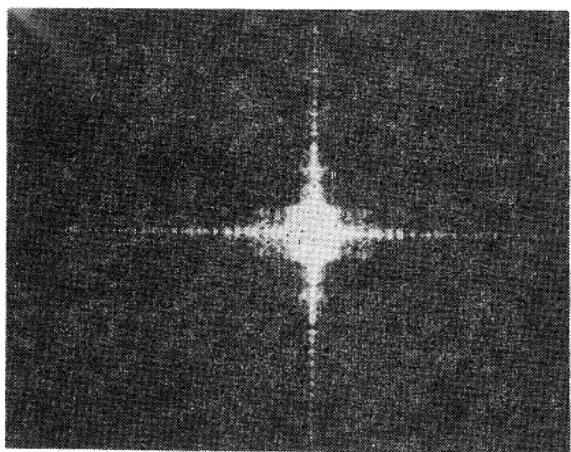


図11 半導体 photomask による回折パターン

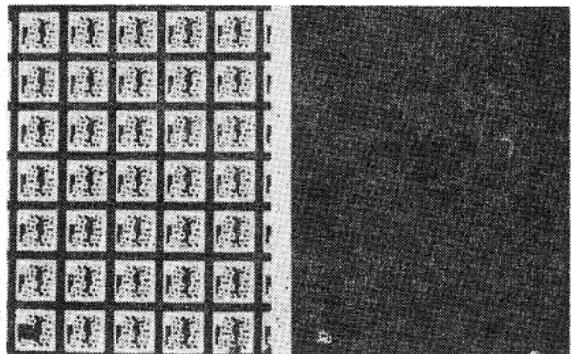


図12 空間フィルターを通して撮影されたガラス photomask の一部
 (左) ストップフィルターなしの場合
 (右) ストップフィルターありの場合
 パターンのくりかえしは 62 mils
 (1.57 mm)

る。レーザーは空間コヒーレントな光を与えるから、この種の操作の分解度は用いたレンズできる。He-Ne 0.633 μm レーザーで $f/9.5$ レンズを用いると誤差感度は 0.4 mil (10 μm) / 1.5 in (3.8 cm) field である。短波長のレーザーと大口径レンズを用いると分解度を 0.4 mil (10 μm) から 50 μin (1.3 μm) にあげることができよう。

VIII 干渉とホログラフィー

干渉

レーザーは干渉に対して時間的コヒーレンス長の増加と出力強度が大であるので特に有利である。大抵の干渉装置は He-Ne レーザーの赤の 0.633 μm を用いる。Ne 遷移のドップラー線巾は 1.5 GHz で、安定化されていないレーザーでは約 1.0 GHz の周波数の変化があり、これは測定で 1 対 10^6 の不確かさを意味する。又、レーザーの共振器は open-walled cavity で 1 つ以上の周波

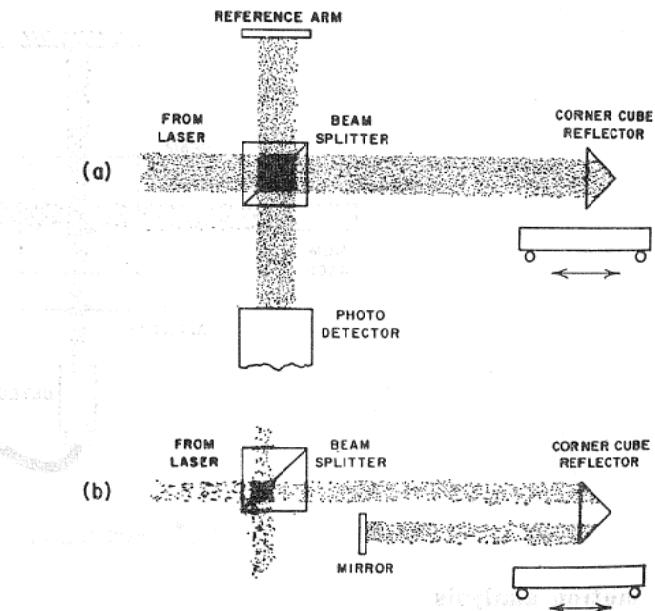


図13 Twyman-green 干渉計

- (a) 単一光路型
- (b) 复光路型

数で発振するので最適の動作ではレーザーは單一周波数安定化レーザーでなければならない。

図13は距離測定用に用いられた Twyman-green 干渉計を示す。測定用の光路は測定距離に平行で、移動物体にはビームをもとにもどす corner cube reflector が置かれている。検出器でうけた光の振巾は参照ビームと測定ビーム間の位相に依存し、測定光の光路長が 1 波長、即ち $0.6328 \mu\text{m}$ 変化するにつれて 1 周期を経過する。これは測定用アームのレフレクターの半波長の移動と対応する。ダブル・パスの測定で $\frac{1}{4}$ 波長の移動ごとに 1 周期を生ずるようにすることもできる。検出器は通常 $\frac{1}{4}$ 周期を計数し、そのあと計算機がこれを距離測定になおすのである。

干渉計の応用

種々の干渉計を用いると、機械工具の正確な制御、 x - y 板の較正や測定、30.5 m の直線距離を 1 対 10^8 の精度で測定することができる。最も精密な湿度、圧力、温度補正を施した干渉計システムでは 12 m の距離を 0.05 μm の精度で測定が可能である。

応用研究の盛んな分野には、I. C. photomask を作るために干渉計を用いて x - y 板をコントロールすること及び x - y 板を用いて検査 mask の軸合せなどが行なわれている。2 つの干渉計を用い各 dimension をモニターする。干渉計からの信号は x - y 板の運動と露光回路を制御する計算機に導かれる、カメラと x - y 板操作によって全システムは 60 masks/h の性能がある。

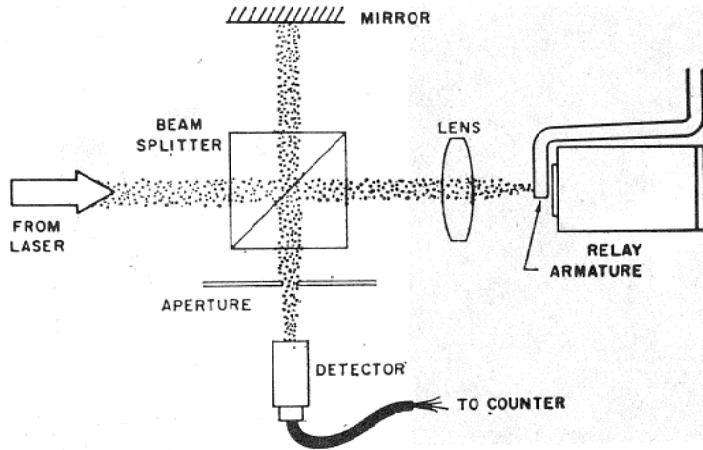


図14 粗面の運動を測定する干渉装置

motion analysis

干渉計の測定ビームを反射するのにミラーが不要である。一例として図14のようにレンズで測定ビームを粗面上に集光する。必要なことは焦点スポット上の位相変化が一波長以下のことである。粗面からの反射光はレンズで平面波にコリメートされ、これが参照ビームと普通のよう干渉する。このようにして Relay armature と plunge welder について距離と速度の測定が行なわれている。この方法の利点は機械的変換器と異なり、光学的変換器であるので運動の影響がないことである。

concentration 测定

干渉計によって光路長の測定を行うと距離の変化と、同様に屈折率の変化を測定し得る。図15のような Mach-Zehnder 干渉計を用いると屈折率の変化を測定することで、電鍍液中のイオン濃度分布を測定できる。

このように干渉計の応用は多種多様であって、レーザーの出現によって干渉計は研究室の測定機器から、工業の普通の器具にその領域をひろげつつある。

ホログラフィー

工業でのホログラフィーの応用は現在発展途上にあり、

その応用が経済的に可能になるまでは若干時間がかかる。けれども有望と思われる幾つかの応用がある。例えば、ホログラフィーは lens less photography で I. C. 製作過程での投影システムへの応用が考えられる。ホログラフィーは必要な大きな視野を投影するのに、球面収差などによる分解の損失も、歪なしにレンズの限界をのりこえることができ、大口径と同等に考えられるので分解の増加が期待される。これまでの所、He-Ne レーザーを用いて0.5 inch (1.3 cm) の視野いわたって1-2 μm の分解で投影が可能である。分解を改善するには青のアルゴンイオンレーザー又は UV ネオニオンレーザーを用いるとよい。

最近開発されたものにホログラフィー干渉顕微鏡がある。これは干渉顕微鏡のアームの1つを図16のようにホログラムで置きかえたので、このホログラムが干渉顕微鏡のための平面波か、又は、種々の干渉効果のための object phase wave のいずれかの干渉光ビームを発生する。このようにホログラムが任意の希望する干渉波を発生し得るのでこれははるかに多用途のもので例えば半導体工業の検査器具として有用である。

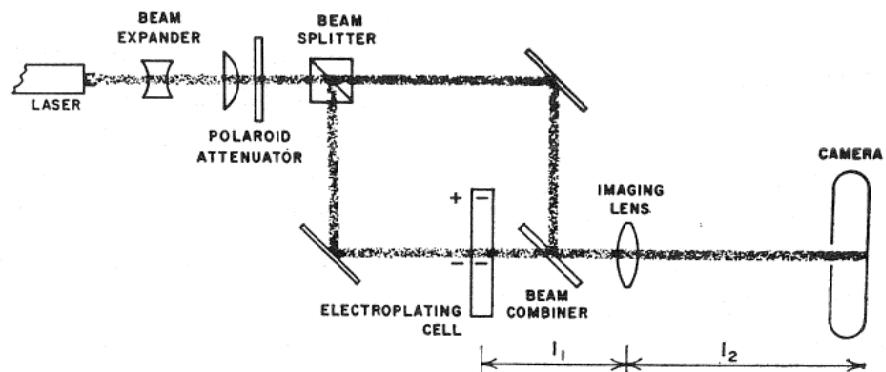


図15 Cu イオン濃度測定用 Mach-Zehnder 干渉計

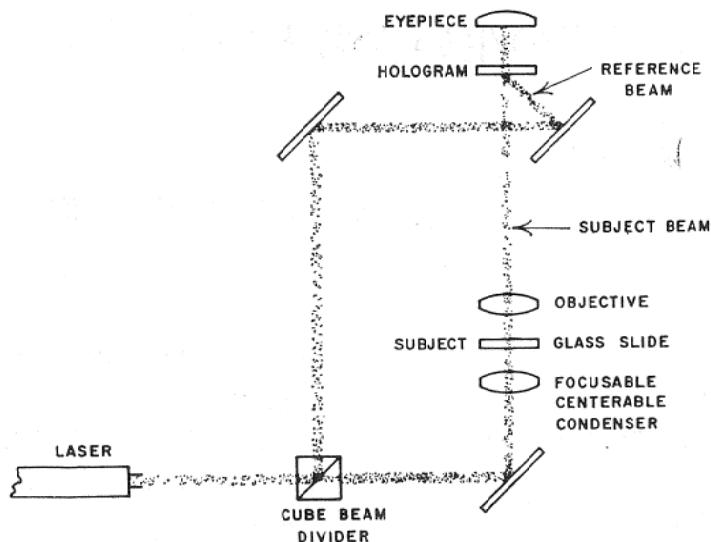


図16 ホログラフィー顕微鏡

光学の分野で考えられる1つの応用に大きな球面鏡の検査がある。ミラーから反射されたレーザ光を記録するためにパルスホログラムを用いる。それ故この装置では波長程度の安定度を有する構造を必要としない。そしてフーコーナイフェッジ試験又は干渉計を用いてミラーの不完全さによる歪の測定が可能である。

このようにホログラフィーはコヒーレント波を記録し、又それを忠実に再生する能力に優れているため干渉実験に新らしい多面性を導入し、非常に有効な方法であることは明らかである。

リングレーザー

これは図17に示すようにレーザーとしてリング型の共振器を用い、回転計又は光ジャイロとして用いるものである。レーザーは互いに反対方向に備わる独立なレーザーを発振している。もしこのレーザーがリング平面に垂直な軸のまわりに時計の針方向に回転角 Ω の割合で回転

するとすると、この方向のミラーの移動距離は光が1周する間において $2\pi A/C$ である。ここで A はリングでおおわれた面積、 C は光速である。そのため右回りと左回りのレーザー光の行路長が異なり周波数にわずかの差を生ずる。検出器で2つの周波数のビートをとることで差の周波数は、 L をリングの周回距離、 λ を光の波長とすると

$$f = \frac{4\pi A}{L\lambda}$$

で与えられ、回転の割合に比例している。

リングレーザーの誤差の原因は2つあり、その1つは時計針方向とその逆方向の発振光の間に僅かのcouplingにもとづく周期振動であり、もう1つはレーザーガス中の方向に依存したイオンドリフトなどによる分散である。

リングレーザーは機械的なジャイロスコープより大なる加速に耐え得るという利点をもっており、 $1200^{\circ}/s$ の回転の割合を $0.1^{\circ}/h$ のドリフトではかることができる。

相互作用効果

レーザーはその発振光のスペクトル線巾が非常に狭いこと、時間コヒーレンスと空間コヒーレンスに優れているので計測装置として数多く応用されている。レーザー光の電界が大きいことは第2高調波、ラマン散乱、ブリルアン散乱のような非線形現象の研究に用いられるし、スペクトル純度がすぐれていることは正確な周波数シフトの測定に適している。又、レーザー光の短かいパルス発振時間は過渡的な吸収分光のための光源として優れている。この他レーザーはラマン分光のはば理想的な光源でもある。

生産技術にこれ等を応用することはまだあまり発展し
以下24頁に続く

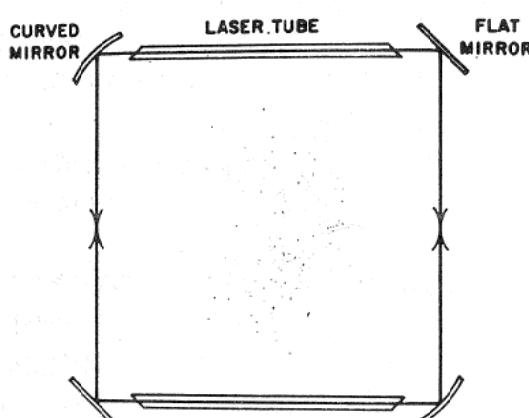


図17 リングレーザー共振器