

# Laser Işını ile Metal İşleme ve Gelişme Eğilimleri

Lutz DORN\*)

Selâhaddin ANIK\*\*)

Bahadır GÜLBAHAR\*\*\*)

## 1 — GİRİŞ

Birkaç yıl öncesine kadar laser yalnız bazı özel işler için imalâtta kullanılırken, şimdi artık laser teknolojisinin hızlı gelişimi, laser ışınından metallerde ve plastik malzemelerde birçok imalât probleminin çözümü için bir vasıta olarak faydalanma imkânını vermektedir. Gelişme eğilimi hem cihaz hem de kullanma tekniğinde hiçbir şekilde kapanmış olarak görülmeyeceğinden, gelecek için artan bir uygulama alanı beklenebilir.

Laserle işleme herşeyden önce, şimdiye kadarki imal usullerinin ya teknik nedenlerle uygulanamadığı ya işleme sonuçlarının tatmin edici olmadığı ya da laserle işleme donanımlarıyla bir maliyet ekonomisinin amaçlandığı yerlerde kabul edilmiştir. Bu şartlara özellikle elektroteknik ve hassas cihaz tekniğindeki işlemlerde sık raslanmaktadır.

## 2 — CİHAZ TEKNİĞİ

Bir laser sistemi esas olarak iki parçadan oluşur: Optik resonatör (laser kafası) ve kumanda düzenli enerji menbaı.

Laser kafasının içerisine sevk edilen enerjinin bir bölümü laseraktif madde (ortam) tarafından hacim ve zamana bağlı olarak elektromagnetik bir ışına çevrilir. Aktif madde katı, sıvı ve gaz şeklinde olabilir. Sıvı hal laseri, malzeme işlemek üzere şimdiye kadar hiç kullanılmamıştır. Katı hal laserinin uygulamada en ağır basanları Neodin - YAG ve Neo-

(\*) Technische Universität Berlin. Gütechnik - Schweisstechnik, Professor.

(\*\*) İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Profesör.

(\*\*\*) İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Mühendis.

din - Cam, ender olarak da Rubin (Yakut) dir (YAG: Yttrium - Aluminium - Granat). Katı hal laserleri optik olarak yani ışık şeklinde tahrik edilir. Gaz hali laserlerinde malzeme işlemek için genellikle karbondioksit ender olarak da argon laser aktif gaz olarak kullanılır. Enerji girişi, elektriksel olarak bir gaz boşalımı şeklinde olur.

Laserler ya sürekli yada darbeli olarak çalışabilir. Farklı laserler, ışını farklı dalga boylarında açığa çıkarırlar (ihraç ederler). Bu durum işlenen malzemelerin absorpsiyon derecesi için etkilidir ve erişilebilen en küçük odak çapını sınırlar (1).

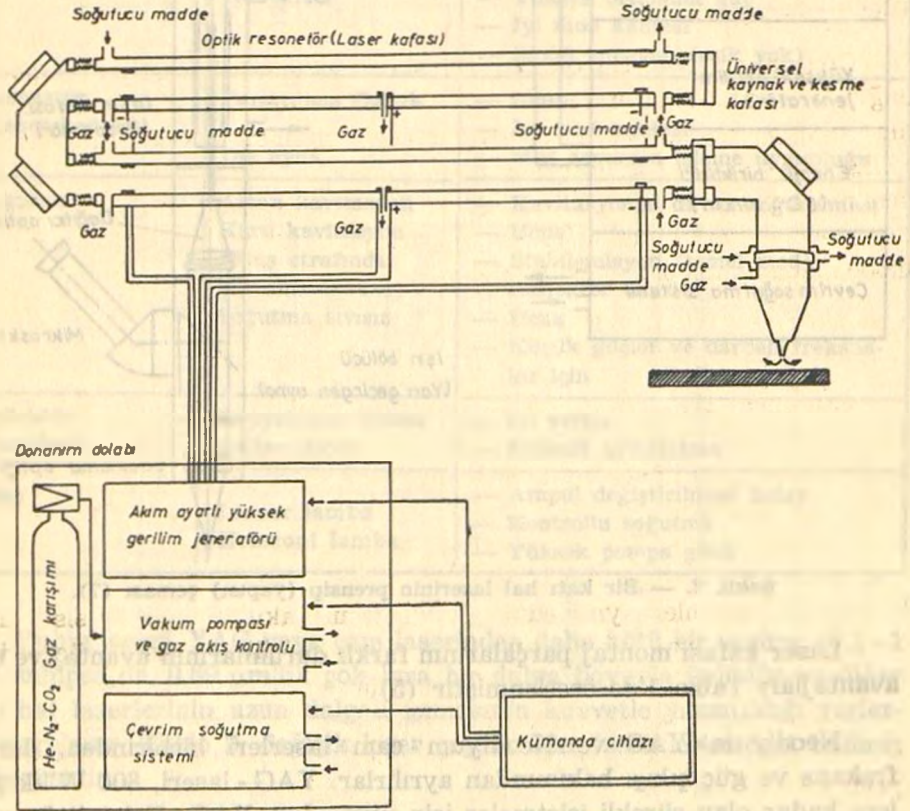
Çıkış gücü, demetin ortasında (ışın ekseninde) bir Gauss amplitüd dağılımına sahipse, ışın Fauss ışını olarak adlandırılır ve işletme durumu «Single - mode» veya «TEM<sub>00</sub> - Mode - İşletme» olarak tarif edilir. (TEM: Transversal Elektromagnetik (optik) dalga). Yüksek mertebeden modlar ortaya çıkarsa, ışın kesiti üzerinde birden fazla odak noktası (Güç yoğunluk maksimumu) oluşur. İşletme durumu böylece «Multi - mode - işletme» si olarak adlandırılır (2).

### 2.1. — Gaz hali laseri

CO<sub>2</sub> - laserinin avantajları % 10 - 20 lik oldukça yüksek veriminde ve teorik olarak 50 - 1000 W'lık, istisnai hallerde de 10 kW'ın üstüne çıkan yüksek çıkış gücündedir. Elde edile ışın, 10 µm'lik dalga boylu infraruj bölgesindedir. Odak çapı 0,05 - 1 mm kadar olabilir. CO<sub>2</sub> - Laseri esas itibariyle sürekli çalışır; darbeli çalışma ancak darbeli tahrik veya özel şalterlerle (Q - swich) mümkündür. Boylamasına ve enlemesine akımla tahrikli sistemler ayırd edilir. Boylamasına akımla tahrikli sistemlerde metre boru uzunluğu başına 50 - 70 W'a erişilir. Yüksek güçler için yapı boyunu azaltmak amacı ile rezonatörler katlanır. Enlemesine akım tahrikli sistemlerde laser gazının varionizasyon imkânı oluşur; böylece gaz boşalımı için ölçülen gerilim azalır. Bir CO<sub>2</sub> - laserinin prensip şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Malzeme işlemek için enteresan diğer bir laser sistemide Argon - İyon - Laser'idir. 0,51 µm'lik bir dalga boyunda çalışır ve dolayısıyla de iyi odaklanabilme ve metal yüzeylerinde absorbe edilebilme avantajlarına sahiptir. Piyasaya 20 W'a kadarlık sürekli çıkış güçlü sistemler sunulmuş ve deneysel olarak 200 W civarındaki güçler artık gerçekleştirilmiştir. Düşük verimi iyileştirme (<0,1 %) başarılı olduğu takdirde, endüstriyel uygulama için iyi ümit ortaya çıkacaktır (3).

Süregelen gelişmeler, yüksek güçleri ve küçük dalga boylarını amaçlar. Bir CO<sub>2</sub> dinamik gaz laserinin (4) 100 kW'a kadar olan güç bölgesindeki gelişmeler, 30 mm'nin üzerindeki kaynak nüfuziyetini ümit edilir hale getirir. Halen kısa dalgalıdan ultraviyole bölgesine ( $\lambda=0,2 \mu\text{m}$ ) kadar her dalga boyundan ışığı açığa çıkaran ve böylece daha iyi odaklanabilen metal buharı - İyonu - laserinin güç artışı üzerinde çalışılmaktadır. Ayrıca işleme enerjisi metalik malzemeler tarafından iyi absorbe edilmektedir.

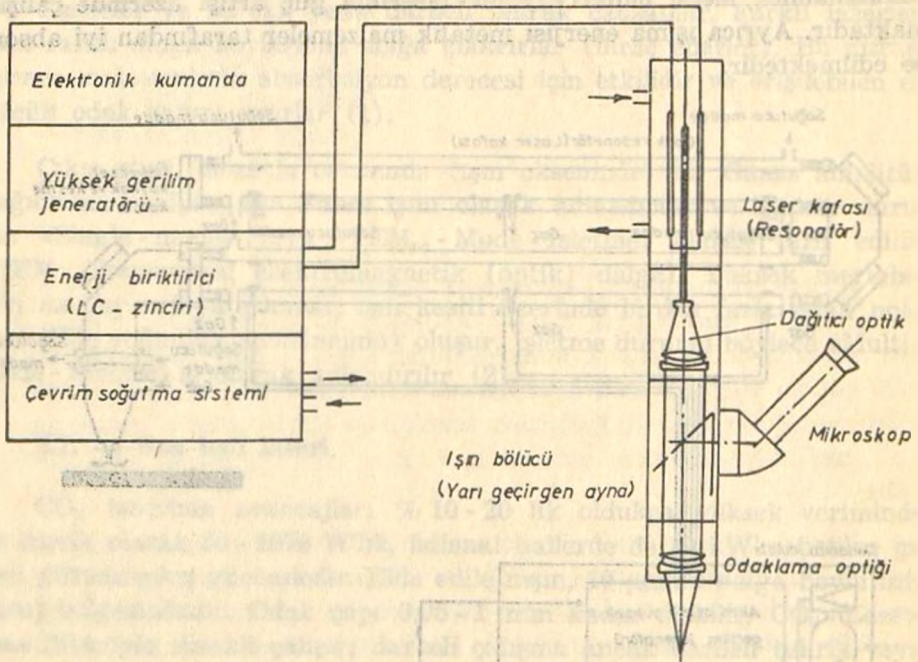


Şekil. 1. — Bir CO<sub>2</sub> Gaz laserinin prensip şeması (13).

## 2.2. — Katı hal laseri

Neodyum - YAG ve Neodyum - cam - laserinde birim hacim başına depolanan laseraktif Neodyum - iyonlarının sayısı CO<sub>2</sub> - laserindeki laseraktif gaz moleküllerininkinden çok daha büyüktür. Buna göre laser kafaları aynı çıkış gücünde daha küçük ve hafiftir. Bu laserler tarafından

açığa çıkarılan dalga boyu  $1,06 \mu\text{m}$ 'dir. Dalga boyundan ötürü odak çapı  $0,02$  ila  $0,5 \text{ mm}$ 'ye kadar erişebilir. Bir laser kafası kendine özgü laser çubuğu, resonatör, flaş ve buna ait reflektörden oluşur. Güç değerine göre laser çubuğu ayrıca soğutulmalıdır. Şekil 2'de bir katı hal laserinin prensip şeması yapısı verilmiştir.



Şekil. 2. — Bir katı hal laserinin prensip (yapısı) şeması (7).

Laser kafası montaj parçalarının farklı durumlarının avantaj ve dezavantajları Tablo-1'de özetlenmiştir (5).

Neodyyum - YAG ve Neodyyum - cam laserleri birbirinden, darbeli frekans ve güç çıkışı bakımından ayrılırlar. YAG - laseri,  $800 \text{ W}$ 'lık güçlere kadar olan sürekli işletmeler için uygundur. YAG - Kristalinin cama göre avantajı, çok iyi ısı iletme yeteneğinden dolayı daha iyi soğuma imkânıdır. Verim, darbeli çalışmada % 1 ve sürekli çalışmada ise % 2'dir. İkaz için gerekli ışık, darbeli çalışmada bir flaş ve sürekli çalışmada da sürekli olarak yanan bir lamba tarafından sağlanır. Kristal laserine kıyasla Neodyyum - Cam laseriyle, cam çubuklar büyük boyutlarda daha iyi optik süreklilikle imal edilebildiklerinden, daha yüksek impuls enerjilerine erişebilir; ayrıca YAG - Kristallerinden daha ucuzdur. Camın kö-

tü ısı iletime kabiliyetinden dolayı, cam laseri oldukça kısa bir darbe sırasıyla ( $<4$ .Hz) çalışır.

**Tablo. 1.** — Katı hal laserinde, laser kafaları farklı montaj şekillerinin avantaj ve devazantajları (5).

Yapı elemanları	Usul	Avantajları
Çubuk	Nd - Cam Nd - YAĞ	— Ucuz — Yüksek ortalama güç — İyi mod kalitesi — Stabil emisyon (eşik yok)
Resonatör (Laser kafası)	Parlatılmış Çubuk Dış ayna	— Ucuz — İyi mod kalitesi — Mod sayısının işleme uygunluğu
Soğutma	Artan kavitasyon Kuru kavitasyon (Flaş etrafında soğutma borusu) Soğutma sıvısız	— Kavitasyonun direkt soğutulması — Ucuz — Stabilizasyon (temel mod) — Reflektör ömrü — Ucuz — Küçük güçler ve darbell frekanslar için
Reflektör (yansıtıcı)	Kopyalayan sistem Difüze sistem	— İyi verim — Düzenli aydınlatma
Flaş	Lineer lamba Helezoni lamba	— Ampul değiştirilmesi kolay — Kontrollü soğutma — Yüksek pompa gücü

Rubin laseri, YAG veya cam laserinden daha kötü bir verime (0.1 - 1 %) sahipse de, 0,69  $\mu$ m'lik çok kısa bir dalga boyuyla ünlüdür ve diğer katı hal laserlerinin uzun dalgalı ışımalarının kuvvetle yansıtıldığı yerlerde uygulanır. Tablo 2, değişik laser çeşitlerinin özelliklerini özet halinde vermektedir.

Katı hal laserlerinde devam eden gelişmeler, yüksek impuls enerjisi ile hızlı darbe sonuçlarını amaçlar. Özellikle YAG - laserinde, sürekli ve kuazi - sürekli çalışmada, yüksek ortalama bir güç, sızdırmaz dikişlerin kaynağı için artan bir uygulama sahası vaat etmektedir. Metal kaynağında absorpsiyon kabiliyetini yükseltmek için, frekansı iki katına çıkarılan vasıtalarla küçük dalga boylarını görünen bölgede elde etme imkânı da vardır.

Tablo 2. — Farklı laser çeşitlerinin karakteristikleri.

Laser	Genel datalar			Darbeli işletme				Sürekli işletme	
	Dalga Boyu ( $\mu\text{m}$ )	Odak çapı (mm)	Işın iraksaması (m rod)	Verim	Güç yoğunluğu ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	Enerji süresi (ms)	Darbe frekansı	Güç (W)	Güç yoğunluğu ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )
Argon	$\approx 0,43$ (Yeşil)	$>0,01$	$<1$	$<0,1$	Kumandalı darbe	imkanı		$\approx 120$	$>10^6$ $f=10$ cm
$\text{CO}_2$	$10^6$	$0,05-1$	$<5$	$10-20$	Kumandalı darbe	imkanı		$10^2-10^4$	$>10^6$ $f=10$ cm
Rubin	$0,69$ (Kırmızı)	$0,02-0,5$	$<10$	$\approx 1$	$10^7$	$<50$	$<120$	—	—
Nd-YAG	$1,06$	$0,03-0,5$	$<10$	$1-2$	$10^8$	$<100$	$1800$ $fW_3$ de	$10^1-2 \cdot 10^2$	$10^6$
Nd-Cam	$1,06$	$0,03-0,5$	$<10$	$\approx 1$	$10^7$	$>100$	$120$ $5W_3$ de	—	—

### 3 — USULLER

İşlenebilirlik, esas olarak iş parçası yüzeyinin yansıtma derecesine bağlıdır. Yansıtma derecesi ise, yine malzemeye, yüzey pürüzlülüğüne, malzemenin sıcaklığına ve laser ışınının dalga boyuna bağlıdır. (Şekil 3). Aynı laser cinslerinin farklı işletme durumlarındaki uygulamaları için örnekler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo. 3. — Laser cihazlarının işletme şekli ve işleme usulleri.

İşletme çeşitleri	Tek darbeler	Kuazi - Sürekli	Sürekli
Laser			
Rubin	Nokta kaynağı	Dikiş kaynağı	—
Nd - Cam	Delme	—	—
Nd - YAĞ	Noktasal sertleştirme	Kaldırma (tesviye) Dikiş kaynağı	Kaldırma (tesviye) Dikiş kaynağı
CO <sub>2</sub>	—	Kaldırma (tesviye) (Dikiş kaynağı)	Dikiş kaynağı Kesme Kaldırma Çizgisel sertleştirme

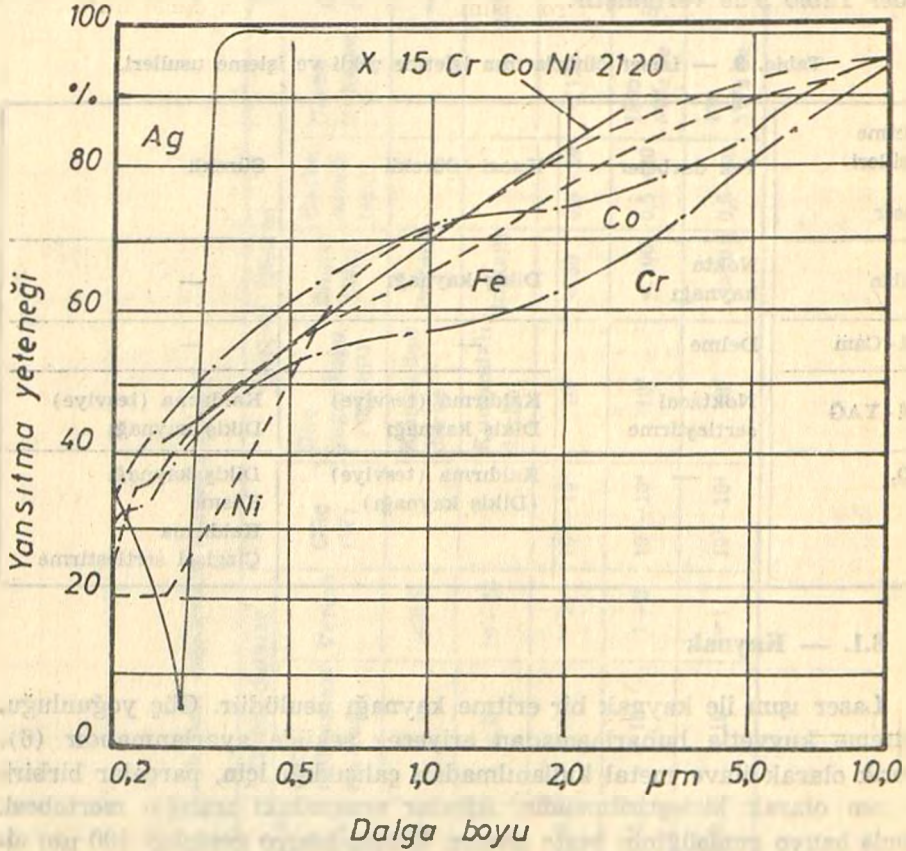
#### 3.1. — Kaynak

Laser ışını ile kaynak bir eritme kaynağı usulüdür. Güç yoğunluğu, malzeme kuvvetle buharlaşmadan eriyecek şekilde ayarlanmalıdır (6). Teorik olarak ilave metal kullanılmadan çalışıldığı için, parçalar birbirine tam olarak birleştirilmelidir. Ağızlar arasındaki aralığın mertebesi erimiş banyo genişliğinin beşte biridir. Erimiş banyo genişliği 100 µm civarındadır (7).

Laser kaynağının önemli üstünlükleri :

- Enerji sevkini ve zamana bağlı kumandanın basitliği nedeniyle hemen hemen bütün malzemeler birbirleriyle kaynak edilebilir.
- İyi bir şekilde otomatize edilebilir.
- İş parçasının üzerine hiçbir kuvvet tesiri yoktur.
- Atmosferde çalışma imkânı mevcuttur.

- Hiçbir takım aşınması yoktur.
- Büyük çalışma aralıkları imkânı sağlanır.
- Isının tesiri altındaki bölgeler küçüktür.
- Zor ulaşılan yerlerde kaynak yapma imkânı vardır. Örneğin girintili yerlerde veya cam kaplamalı kapalı yerlerin arkasında.



Şekil. 3. — Yansıtma yeteneğinin dalga boyuna bağımlılığı (3).

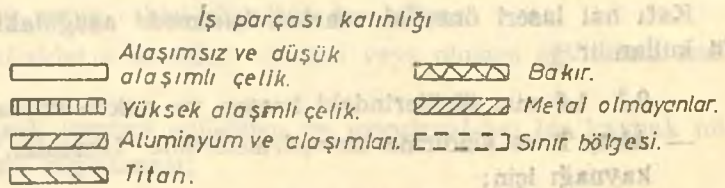
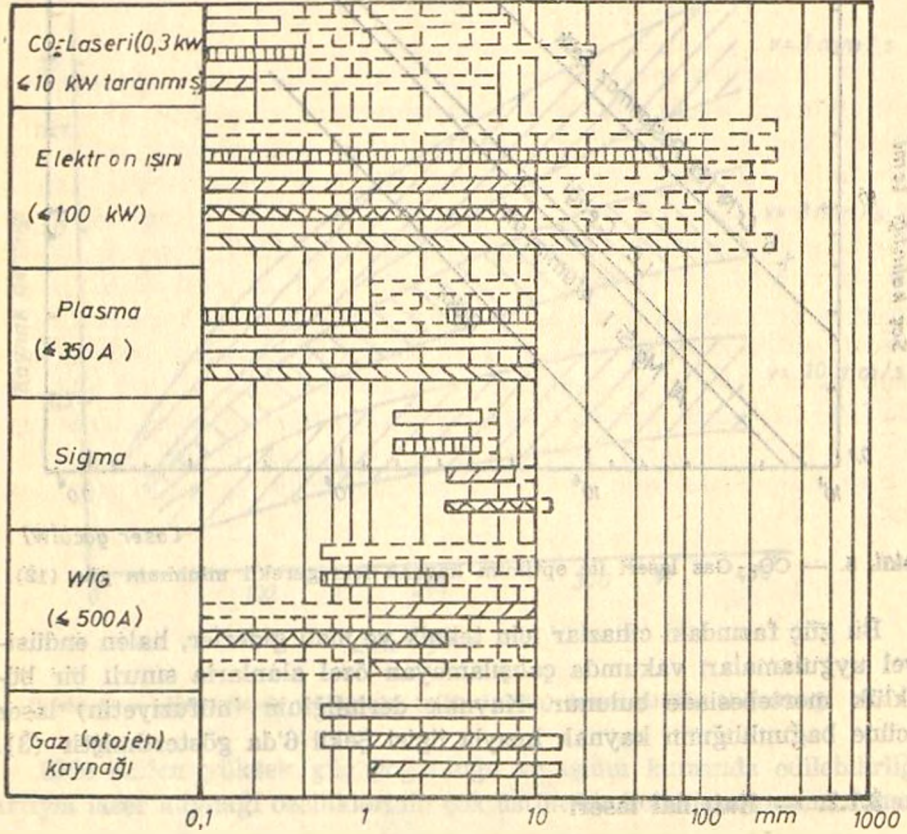
### 3.1.1. — CO<sub>2</sub> - Laseri

Diğer kaynak usullerine kıyasla, eritme kaynağında, CO<sub>2</sub> laserinin uygulama sınırları Şekil 4'de gösterilmiştir (8).

CO<sub>2</sub> - laserinin şimdiye kadarki uygulama alanında, ≤3 mm sac kalınlığına kadar alın dikışı üzerinde sınırlı olduğu görülür. Böyle kaynak

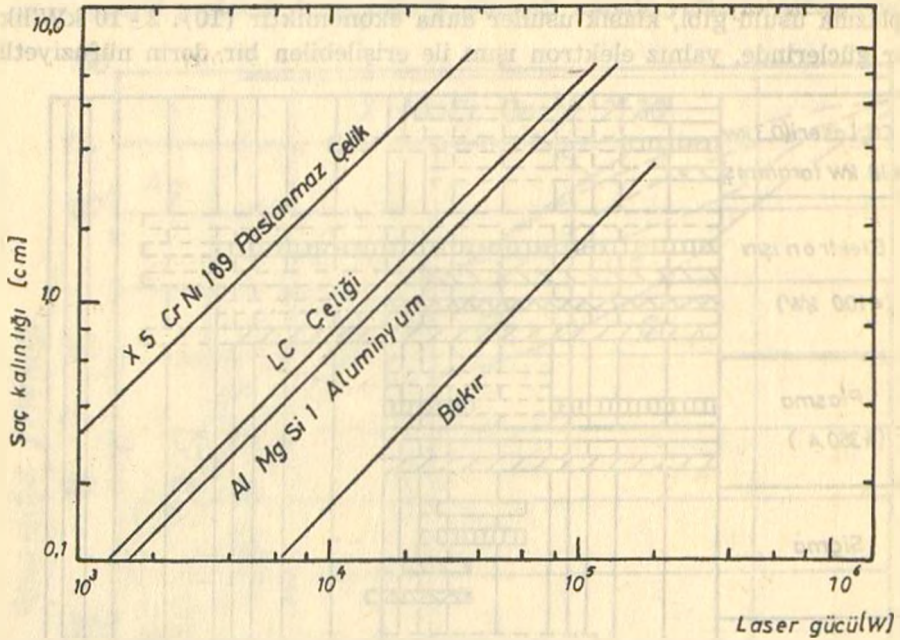


işleri daha fazla ince sac işlerinde (örneğin ev cihazları ve karoseri inşası gibi) bulunmaktadır. Burada laserin bir avantajı, malzemedeki küçük termik zorlamalardır (9). Fakat konsantre edilmiş küçük bir ışın girişi, hassas kaynak ağızı hazırlığı ve malzeme sevki gerektirir. Laser kaynağının kendine özgü özelliklerinden vazgeçilebildiği yerlerde, TIG (WIG) ve plazma usulü gibi, klasik usuller daha ekonomiktir (10). 2 - 10 kW'lık laser güçlerinde, yalnız elektron ışını ile erişilebilen bir derin nüfuziyetli



Şekil 4. — Kaynakta CO<sub>2</sub>-laserinin uygulama sınırlarının diğer metotlarla mukayesesi (21).

kaynak etkisi amaçlanır (11). Kaynak tecrübeleri, şimdiye kadar yüksek alaşımli çeliklerde yürütülmüştür. Dört farklı malzemeye ait bir optimum I - alın dikisinin kaynağı için CO<sub>2</sub> - laserinin gerekli minimum gücü Şekil 5'den çıkarılabilir (12).



Şekil. 5. — CO<sub>2</sub> - Gaz laseri ile optimum kaynak için gerekli minimum güç (12).

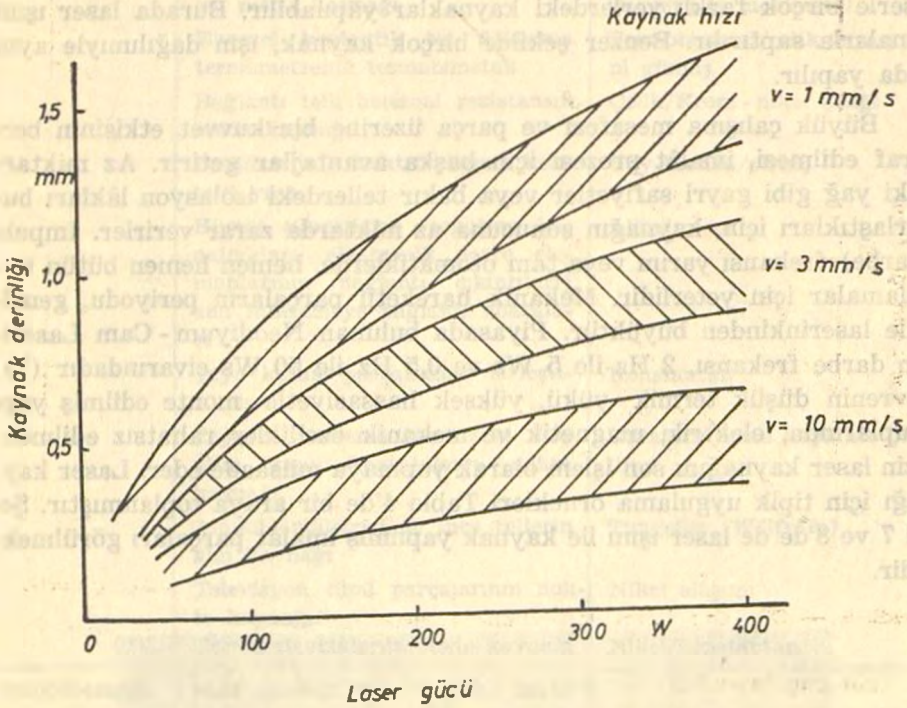
Bu güç fazındaki cihazlar için teknik ve mali giderler, halen endüstriyel uygulamaları vakumda çalışılmayan özel alanlarla sınırlı bir büyüklük mertebesinde bulunur. Kaynak derinliğinin (nüfuziyetin) laser gücüne bağımlılığının kaynak hızıyla ilgisi Şekil 6'da gösterilmiştir (3).

### 3.1.2. — Katı hal laseri

Katı hal laseri öncelikle darbeli işletmede aşağıdaki kaynak işleri için kullanılır.

- 0,1 - 1,0 mm ölçülerindeki hassas ve mikro kaynaklar için;
- Alın, T ve bindirme birleştirmelerinde temassız nokta ve dikiz kaynağı için;
- Klâsik olarak hiç veya yalnız istenmeyen şekilde kaynak kabiliyetine sahip malzeme veya malzeme çiftleri için;

- Tamamen işlenmiş hassas parçaların birleştirilmesi için;
- Çok farklı kalınlıktaki parçaların kaynağı için;
- Zor ulaşılan yerlerdeki kaynaklar için;
- Yüksek kalışma hızında hacimsal dağılımla birçok noktanın aynı anda kaynağı için;



Şekil 6. — Kaynak derinliğinin (nüfuziyetin) laser gücüne bağlılığı (3).

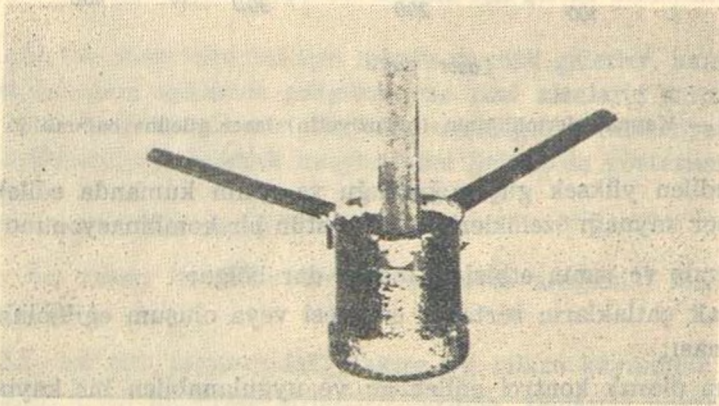
Elde edilen yüksek güç yoğunluğu ve ışının kumanda edilebilirliği gartıyla laser kaynağı özelliklerinin çok üstün bir kombinasyonunu sunar.

- Erimiş ve ısının etkisi altındaki dar bölge;
- Sıcak çatlakların bertaraf edilmesi veya oluşum eğiliminin azaltılması;
- Tam olarak kontrol edilebilen ve uygulanabilen bir kaynak nüfuziyetinin sağlanması;

Katı hal laserleriyle (YAG - ve Cam laseri) laser kaynağı çok defa hassas cihazlarda ve elektroteknikte küçük parçaların ve farklı malze-

melerin kaynağında kullanılır (14 - 18). Genellikle nokta kaynağı bağlantıları mukavemet için yeterlidir (19). Fakat kaynak dikişleri, darbeleri laserle nokta kaynağı bağlantılarının yanyana dizilmesiyle yapılabilir (20). En iyi sonuçlar, kaynak noktalarının % 50 - 70'lik üstüste bindirme derecesiyle sağlanır. Darbeleri laserin iyi kumanda edilebilme yeteneğinden dolayı, otomatik imalât akışına kolayca entegre edilebilir. Tek bir laserle birçok farklı yerlerdeki kaynaklar yapılabilir. Burada laser ışını aynalarla saptırılır. Benzer şekilde birçok kaynak, ışın dağılımıyla aynı anda yapılır.

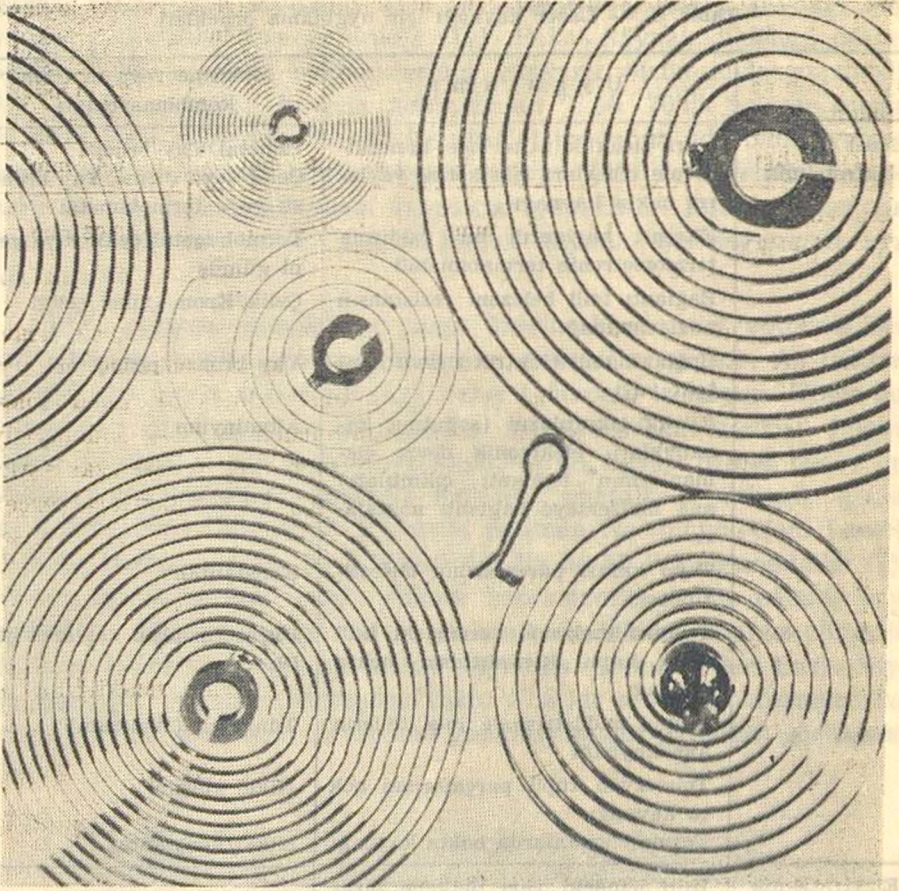
Büyük çalışma mesafesi ve parça üzerine bir kuvvet etkisinin bertaraf edilmesi, imalât prozesi için başka avantajlar getirir. Az miktardaki yağ gibi gayri safiyetler veya bakır tellerdeki izolasyon lâkları buharlaştıkları için, kaynağın sonucuna az miktarda zarar verirler. Impuls (darbe) frekansı yarım veya tam otomatiklerde, hemen hemen bütün uygulamalar için yeterlidir. Mekanik hareketli parçaların periyodu, genellikle laserinkinden büyüktür. Piyasada bulunan Neodiyum - Cam Laserinin darbe frekansı, 2 Hz ile 5 Ws ve 0,5 Hz ile 50 Ws civarındadır (7). Çevrenin düşük termik yükü, yüksek hassasiyetle monte edilmiş yapı gruplarında, elektrik, magnetik ve mekanik özellikler rahatsız edilmeksizin laser kaynağını son işlem olarak yapmaya müsaade eder. Laser kaynağı için tipik uygulama örnekleri Tablo 4'de bir araya toplanmıştır. Şekil 7 ve 8'de de laser ışını ile kaynak yapılmış imalât parçaları görülmektedir.



Şekil 7. — Laserle kaynak yapılmış üç ayaklı bir renkli televizyon tüpünün katodu. (LASAG, Thun - İsviçre).

Tablo. 4. — Laser kaynağı için uygulama örnekleri.

	U y g u l a m a	Malzeme veya malzeme kombinasyonları
Genel elektroteknik	<p>Aşırı sıcaklık şalterinde kantakt</p> <p>Ölçme cihazları için spiral yayların nokta kaynağı</p> <p>Eksenel bağlantılı bir daldırma termometrenin termobimetal</p> <p>Bağlantı telli helezon rezistansın nokta kaynağı</p> <p>Bağlantı telli elektrik fişinin kantakt yayı.</p> <p>Küçük çıkıntılarının (soğutma kantaçlıkları, elektronik devre elemanlarının bağlantı çıkıntılarını) ana malzemeye bağlantı noktaları</p> <p>Teyp kafası parçalarının birleştirilmesi.</p> <p>Taşıyıcı malzeme üzerindeki ikili altın kaplı kontaktların nokta kaynağı.</p> <p>Ampul endüstrisinde ince tellerin alın kaynağı</p> <p>Televizyon tüpü parçalarının nokta kaynağı.</p> <p>Termo elemanlarda nokta kaynağı</p>	<p>Bimetal/Yay bronz</p> <p>Çelik veya Piring/Yay bronz veya termobimetal</p> <p>Termobimetal/çelik veya yeni gümüş</p> <p>Çelik/Krom - nikel çelği</p> <p>Yay bronzu/piring</p> <p>Alüminyum</p> <p>Konstantan</p> <p>Duraterm/altın kaplama çelik</p> <p>Tungsten (Wolfram)</p> <p>Nikel alaşımı</p> <p>Nikel/konstantan</p>
Elektroteknik	<p>Kılıf içindeki yarı iletkene zarar vermeden diodların nokta kaynağı</p> <p>Fişlerin bir solar (güneş) hücresi ile kontaktı</p>	<p>Gümüş/Gümüş</p>
Saatçilik tekniği	<p>Oynak yayın makara üzerine nokta kaynağı</p>	<p>Bronz/Piring</p> <p>Paşlanmaz çelik/demir - nikel alaşımı</p>
Cihaz tekniği	<p>Nükleer teknolojiye kovanların ve zarların sızdırmaz dikiş kaynağı</p> <p>Kalp pili kılıfının dikiş kaynağı</p> <p>Cam imalatında kıvrık dikiş kaynağı</p> <p>Dışçılık takımlarının imalatı.</p>	<p>Krom - nikel çelği</p> <p>Krom - nikel çelği</p> <p>Krom - nikel çelği</p>



Şekil. 8. — Saatlerin spiral ve ölçü cihazı yaylarında lazer ışını ile yapılmış kaynak noktaları. (Haas/Schramberg).

### 3.2. — Kesme

Laserle kesmede avantaj, klâsik kesme usullerine nazaran, küçük kesme genişliğinin ve ısının tesiri altında dar bir bölgenin elde edilmesidir. Hemen hemen yalnız  $\text{CO}_2$ -Gaz laseri kullanılır (1). Tablo 5 çelik (kurşun, kalay, çinko, nikel, kromla kaplanmış çelik), titanyum, zirkonyum, niobiyum, tantal, nikel ve bu malzemelerin alaşımları gibi, teknikte kullanılan metallere, kesilmeye elverişlidir. Buna karşılık Alüminyum, pirinç bakır, gümüş ve altın gibi yüksek yansıtımlı malzemeler, hiçbir şekilde  $\text{CO}_2$ -laseriyle kesilemezler (21).

**Tablo. 5.** — Diğer termik kesme usullerine nazaran CO<sub>2</sub>- laseri ile yapılan kesmede, kesme ağızı ve ısının tesiri altındaki bölgenin genişliği.

Termik kesme usulleri	Oksijenle kesme	Plâzma kesmesi	CO <sub>2</sub> - Laseri ile kesme
Kesme aralığı	1,0 mm	1,5 mm	0,4 mm
Isının etkisi altındaki bölge	3,2 mm	0,24 mm	0,06 mm

Laserle yapılan termik kesmeler, eriterek kesme ve yakarak kesme olarak ikiye ayrılmaktadır. Laserle elde edilen kesme hızının, eriterek kesmeye göre on katına kadar yükseltilebildiği yakarak kesmede oksijen demetinden dolayı ek bir ısı oluşur (eksotermik reaksiyon dolayısıyla). Ayrıca cüruf oksijen demet vasıtasıyla kesme ağızından uzaklaştırılır. Yakma suretiyle kesilebilen malzemelerin, aşağıdaki şartları gerçekleştirmesi gerekir :

- a — Malzeme oksitlenebilmelidir.
- b — Reaksiyon ekzotermik olmalıdır.
- c — Malzemenin tutuşma (yanma) sıcaklığı, erime sıcaklığının altında olmalıdır.
- d — Malzeme yüksek sıcaklıkta eriyen oksitler oluşturmamalıdır.

Yukarıdaki şartları % 2'den az karbon ihtiva eden hafif alaşımli çelikler, titanyum ve molibden gibi malzemeler sağlar.

Kesilebilen, metal olmayan malzemeleri organik ve anorganik maddeler kapsar (22, 23).

#### Organik malzeme :

Akril Cam, PTFE, PMMA, P - etilen, P - propilen, P - karbonat, PVC, GFK, deri, ahşap, lastik, yün ve pamuk.

#### Anorganik malzeme :

Cam, seramik, kuvarz, porselen, asbest, mika, taşlar, alümina ve grafit.

Tablo 6'da, 230 W güçlü CO<sub>2</sub> - laseri ile yapılan farklı malzemelerin kesilmesine ait, pratik dotalar verilmiştir (28).

Tablo. 6. — 230 W güçlü sürekli çalışan CO<sub>2</sub>-Lazeriyle farklı malzemelerin kesilmesine ait datalar (28).

Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme gazı	Kesme hızı (mm/dak)	Kesme ağız genişliği (mm)
Çelik sac (St 37)	1,00	Oksijen	3000	0,1
Çelik sac (St 37)	3,00	Oksijen	600	0,2
Çelik sac (iki tarafı galvanizli)	0,75	Oksijen	3500	0,1
Ostenitik çelik (18 Cr, 8 Ni)	1,00	Oksijen	1600	0,1
Titanyum alaşımı	2,00	Oksijen	18000	0,2
Titanyum alaşımı	10,00	Oksijen	2800	1,5
Titanyum alaşımı	40,00	Oksijen	500	3,5
Baskılı pleksiglas	3,00	Azot	4500	0,4
Şeffaf pleksiglas	10,00	Azot	800	0,7
Polipropilen	5,50	Azot	700	0,5
Polistrol	3,20	Azot	4200	0,4
Sert PVC	7,00	Azot	1200	0,5
Cam elyaf (sunî madde)	3,30	Azot	600	0,3
Poliyester nahı	10,00	Azot	2600	0,5
Keçe nahı	5,50	Azot	8000	0,3
Tekstiller: Naylon	0,1	Azot	2×10 <sup>3</sup>	0,1
Pamuklu dokuma (çok katlı)	15,00	Azot	900	0,5
Ahşap	18,00	Azot	200	0,7
Alüminyumoksit	1,0	Oksijen	3000	0,1
Kuvarz camı	1,90	Oksijen	600	0,2

Kolay yanan malzemelerde (sun'i malzeme) bir koruyucu gazın (azot) kullanılmasıyla, oksidasyon ve kesme ağızlarının renk değiştirilmesi geniş ölçüde önlenir. Ayrıca tehlikeli gazların oluşumu da engelle-



nir. Laserle kesmenin bir diğer uygulaması da sualtında yapılan kesmedir. Gaz olarak oksijen veya basınçlı hava kullanılır. Bu kesme işleminde çapak ve oyuk oluşumu azaltılır.

Laserle işleme makinelerinde laser kafası ve iş parçası hareket ettirilir. Esas olarak, usulün türü, çalışma alanına bağlıdır. Küçük çalışma alanlarında, laser ışını saptırma imkânı vardır. Fakat büyük boyutlar için odak noktasının pozisyonu, iş parçasının yüzeyiyle ilgili olarak çok değişir. Böylece düzgün bir işleme, büyük sapmalarda artık garanti edilemez. Bunun için büyük çalışma alanlarında laser kafası hareket ettirilir. Genellikle bütün kumanda sistemleri kullanılabilir. Endüstriyel olarak, uygulamada kılavuz makineler için, fotoelektrik kopya kumandaları ile bunun yanında NC - kumandaları da yerleştirilir. İlerleme hızında bir sınırlama, laser kafasının  $\leq 1$  kW'den küçük güçleri için  $\leq 100$  kg kütesinden dolayı ortaya çıkar. Bu arada sevk toleransı genel olarak 0,1 - 0,3 mm'dir. Bütün kesitleri katedebilmek ve pürüzleri de giderebilmek için kapasitif ve pnömatik yükseklik ayarlayıcı düzenler kullanılır. Kapasitif yükseklik ayarlayıcı elektriği ileten bütün malzemelerde kullanılabilir ve maksimum % 6'lık artmaları (yükselteleri) 3 m/dak'lık kesme hızıyla işleyebilir. Reflektör memeli pnömatik kumanda, hiçbir delik veya diğer girinti çıkıntıyı ihtiva etmeyen sürekli düzgün yüzeye sahip bütün malzemeler için uygundur (8, 21).

10 mm'ye kadar sac kalınlıklarında, sac makası ile kesme, laserle yapılan kesme ile yarışmaktadır. Giyotinle kesmede ve zimbalamada takım imali daha ucuzdur. Giyotinle kesme usulünde ekonomiklik ortala-

Tablo. 7. — Laserle yapılan kesme için uygulama örnekleri.

Uygulama	Malzeme veya malzeme kombinasyonları
Oto parçalarının ön fabrikasyonu için preslenmiş kroseri parçalarının kesilmesi	St 37 - 2
İklimlendirme ve havalandırma tekniklerinde konstrüksiyon parçalarının kesilmesi	Galvanizli veya plastikle (sun'li malzeme ile) kaplanmış St 37 - 2 çelik sacı
Işıklı reklâmlar için harf ve sembollerin imali	Pleksiglas St 37 - 2
Uzay ve havacılık endüstrisi için üst üste konan plâkaların kesilmesi	Titanyum ve Titanyum kaplı malzeme
Gözlük çerçevelerinin şekilli kesilmesi	Sun'li malzeme (plastikler)

ma 1000 parçalık minimum sayıdan itibaren başlar. Bu parça sayısının altında laserle kesme daha ekonomik olup, bu nedenle küçük ve orta seriler için uygundur. Ayrıca laserle kesme, zımbalamaya kıyasla daha az gürültülü olduğundan, çevre sağlığını korur (10).

Sac işlemede, laserle yapılan kesme için tipik uygulama örnekleri Tablo 7'de verilmiştir.

### 3.3. — İşleme usulleri

İşleme usullerinde, geniş bir çevreyi eritmeden, malzemeyi buharlaştırma denenir. Bunun için çok yüksek güç yoğunlukları gereklidir (24).

#### 3.3.1. — Delme

Laserle delmede 0,1 - 1 mm arasındaki delik çaplarına erişilir. Boy/çap oranı  $\leq \frac{40}{1}$  değeri ile sınırlıdır. İşleme işlemi, parçacıkların kısmen sıvı kısmen de buhar fazında delikten dışarı atıldığı bir olaydır. Bundan ötürü, açılan deliklerin, tamamen yuvarlak, düzgün ve silindirik olmaları nedeniyle, daha sonra klasik usullerle işlenmeleri gerekir. Buna rağmen laserin uygulanmasıyla önemli miktarda zaman ve maliyet ekonomisine ulaşılır. Laserle delme, başlıca mekanik delme ve zımbalama usullerinin başarılı olmadığı yerlerde uygulanır. Örneğin,  $\leq 0,1$  mm çaplı çok küçük deliklerin delinmesi gibi. Malzemenin işleme kabiliyeti üzerine hiçbir etkisi olmadığı için bu usul, molibden, tungsten, sertleştirilmiş çelik, seramik, elmas, safir v.b. gibi malzemelerde, başlıca uygulama alanı bulur. Kullanılan laser cihazları teorik olarak temel mod işletmesinde darbelendirilmiş katı laserlerdir. Büyük çaplı deliklerin delinmesinden darbelendirilmiş CO<sub>2</sub> - laseri kullanılır (25, 26, 27).

#### 3.3.2. — Çizme (yivlendirme)

Çizme işlemi için, çizik izinde kör delikler halinde sürekli bir dizi denen darbeleri laser kullanılır. Bu, elmasla çizilen çizige göre avantajlıdır. Bir defa, malzeme iz boyunca daha iyi bir şekilde kırılır ve ayrıca dakikada birkaç metrelik çizme hızlarına erişilir.

Laser uygulamaların en önemlilerinden biri; yarı iletken yapımında silisyum tabakaların çizilmesidir. Laser, çalışma hızı ve güvenilirlik bakımından, klâsik mekanik usullerden üstündür. Çizme hızı 10 - 20 cm/s mertebesindedir. Bu uygulama için Q - Switchli YAG - sürekli çizgi laseri öncelikle kullanılır.

Elektronik endüstrisinde alüminyumoksit ( $Al_2O_3$ ) çizilmesi artan bir önem kazanmaktadır. Alüminyumoksit, elmadan biraz yumuşaktır ve bundan ötürü mekanik usullerde, kuvvetli bir takım aşınması meydana gelir. Alüminyumoksit, amorf fazda seramik olarak, katı laserin kısa dalgalı ışınıni hemen hemen tamamen yansıttığı için, uygulamada 10,6  $\mu m$  dalga boylu  $CO_2$  - laseri sözkonusudur. Seramik hem sürekli çizgiyle hem de daha iyi sonuçlar veren darbelerle çizilir. 50 W güçlü  $CO_2$  - laseriyle  $Al_2O_3$  seramiği, 0,6 mm derinliğinde 10 cm/s'lik bir hızla çizilir. Burada 1 - 2 Hz'lik darbe frekansında 0,1 ms'lik darbe süresi seçilir.

### 3.3.3. — Gravür yapma, helezon açma, hakketme

Metal, oksit, seramik, ferrit ve benzer malzemeleri, belirli noktalar-da önce veya sonradan işleyerek istenen miktarda malzeme kaldırebiliriz. Burada, yüzeylerin düzgün veya eğri olması, köşelerin, oyukların ve benzeri arızaların bulunması pek önemli değildir.

Malzeme kaldırarak işleme usulü, mika, lastik, alüminyum, sert metal ve kağıda hak etme yoluyla baskı yapılmasında, kalın ve ince tabaka tekniğinde dirençlere benzer olarak karbon, metal veya metal oksit tabakalarındaki gizli dirençlere helezon açılarak işlenmesinde kullanılır. Laser, istenilen direnç değerine erişildikten sonra bir direnç ölçme düzeni tarafından gecikmeksizin kapatılır. Çok yüksek bir hassasiyet sağlamak için serigrafi usulü ile elde edilen tabaka dirençler sonradan laserle tesviye edilir.

Hibrid devrelerdeki gerilim, akım - frekans, kapasiteler ve filtre karakteristiklerinin ayarı, işletme şartlarında daima büyük bir önem taşır. Frekans dengeleme sistemi ile, örneğin yüzeysel tutunmanın kaldırılması ile kuvarzları sonuna kadar tesviye etmek imkânı vardır. Ayar hassasiyeti  $\pm 0,5$  Hz'dir (25).

## 4. — EKONOMİKLİK

Çıkış gücüne göre,  $CO_2$  - laseri için yatırım maliyeti 80.000.— ilâ 500.000.— DM arasındadır. 200 W'lık çıkış güçlü bir  $CO_2$  - laserinde elektrik, soğutma suyu, kesme ve laser gazı dahil olmak üzere saatte 5.— DM'lik bir işletme masrafı bahis konusudur. Laser gazının kısmî rejenerasyonu ile işletme masrafı düşer (8).

Katı hal laserinde bir makina saati için maliyet yatırım maliyeti ile belirlenir. Bunla r60.000.— ilâ 250.000.— DM'lik bir bölgeyi aşar 15.—

ilâ 40.— DM'a kadar makina saati devrelerinde ve 0,5 ilâ 5 saniyelik per-yotlarda, kaynak noktası başına parça maliyeti 0.002 ilâ 0,06 DM'dır (7).

Laser donanımlarında % 90'lık bir ekonomi elde edilme imkânı hesaba katılır. Işın akışına göre gerçek yükleme % 75'in üzerine ender olarak çıkar (tabaka başına 6 saat) (28).

## 5. — SONUÇ

Laser ışınıyla imal usulünün sınırları en iyi şekilde, el ile yapılan usulle rekabet ettiği zaman görülür. Bugün 3 mm'lik bir sac kalınlığı laserle kesme için bir sınırdır. Bu değer in üstünde klasik metotlar daha ekonomik çalışırlar. Aynı şekilde, laserin kendine has özellikleri dolayısıyla belirli birleştirme işleri için doğrudan doğruya seçildiği görülür. İmalâtın ilerleyen otomatizasyonu, laser uygulamasını daha uygun hale getirir. Laserin mümkün olan uygulama alanları, gelecekte artan bir laser tatbikatı beklendiğinden, şimdiye kadar geniş olarak daha iyice incelenmemiştir.

## L I T E R A T Ü R

- (1) — Roess, D. und Rauscher, G.: Materialbearbeitung mit Laserlicht. Schweizerische Technische Zeitschrift, H. 36/37, S. 765/772 und H. 38, S. 805/812.
- (2) — Von Grothe, K. H. und R. Stemme: Technologie und Ökonomie bei Puls-laser-Schweißanlagen. DVS - Berichte 40 «Löten und Schweißen in der Elektronik» Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1976, S. 93/100.
- (3) — Sepold, G.: Möglichkeit und Grenzen des lasers in der Schweißtechnik. Fachtagung Laser - Schweißen und - Abtragen am 6.12.1978 im Haus der Technik, Essen.
- (4) — Hügel, H.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Gas- und plasmadynamischen Laser-Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. DVS - Berichte 44, Strahltechnik VIII» Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1977, S. 88/95.
- (5) — Schwob, H. P.: Geräte- und verfahrenstechnische gntwicklungen zum Schweißen mit Festkörperlasern. Fachtagung Laser - Schweißen und - Abtragen am 6.12.1978 im Haus der Technik, Essen.
- (6) — Panzer, S.: Die Anwendung des Lasers für die Materialbearbeitung. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik 16 (1965), H. 1, S. 138/155.
- (7) — Seiler, P.: Beispiele erhöhter Qualität, Produktivität und Wirtschaftlichkeit durch Laser - Schweißen. Fachtagung Laser - Schweißen und - Abtragen am 6.12.1978 im Haus der Technik, Essen.

- (8) — Herbrich, H.: Neuester Stand der industriellen Anwendung des Lasers zum Schneiden und Schweißen von Blechen. VDI-Bericht Nr. 330 (1978).
- (9) — Baardsen, E. L. und Schmatz, D. J.: High Speed Welding of Sheet with a CO<sub>2</sub>-Laser. Welding Journal (1974), H. 4, S. 227/229.
- (10) — Born, K., Dorn, L. und Herbrich: Plasma-, Laser-, Elektronenstrahl-drei Strahl-, Schweiß- und Schneidverfahren im Vergleich. Blech, Rohre, Profile (1973), H. 9, S. 363/76.
- (11) — Locke, E., Haag, E. und Hella, R.: Deep Penetration Welding with High Power CO<sub>2</sub>-Lasers. Welding Research Supplement (1972). H. 5, S. 245/49.
- (12) — Avco Averett: Research Corp. Laser Focus 8/71.
- (13) — Herbrich, H.: Wirtschaftliches Schneiden, Bohren, Schweißen und Wärmebehandeln mit mobilen Hochleistungs-CO<sub>2</sub>-Glaslasern. Fachtagung Laser-Schweißen und Abtragen am 6.12.1979 im Haus der Technik, Essen.
- (14) — Seller, P.: Laserschweißen - ein Schmelzschweißverfahren für Feinpunktschweißungen. DVS-Berichte 40 «Löten und Schweißen in der Elektronik», Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1976, S. 101/104.
- (15) — Puchinger, E.: Automatisches Laserstrahlschweißen von Kathodentellen einer Fernsehabbildröhre. Der Praktiker 30 (1978), H. 4, S. 72/75.
- (16) — Früngel, F. und Kuper, G.: Bearbeitung von Kleinbauteilen der Feinwerktechnik mit Impulslaser-Schweißgeräten. Feinwerktechnik 74 (1970), H. 4, S. 155/62.
- (17) — Laser in der Praxis. Automatisches Laserschweißen von Kontakten für Telefonmikrorelais. Laser+Elektro-Optik (1975), H. 14/18.
- (18) — Drake, K. H., Litfin, G., Sikorski, P. u. V. Bödecker: Kontaktieren von Halbleiterbauelementen mit Laserstrahlen nicht-gaussförmiger Intensitätsverteilung. DVS-Berichte 40 «Löten und Schweißen in der Elektronik», Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1976, S. 105/109. (1978), S. 13 - 17.
- (20) — Sepold, G. und Drake, K. H.: Schweißen mit Riesenimpulslasern hoher Repetitionsfrequenz. DVS-Berichte «Strahltechnik VIII», Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1977.
- (21) — Herbrich, H.: Wirtschaftliches und industrielles Anwenden von CO<sub>2</sub>-Lasern. Maschinemarkt (1976), H. 45, S.
- (22) — Rauscher, G. und Rosen, H. G.: Schneiden von Glas und Keramik mit CO<sub>2</sub>-Laser. DVS-Berichte 12 «Strahltechnik IV», Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1971, S. 101/104.
- (23) — Brand, G., K. De Kegel und J. Van Hulle: Einige Ergebnisse von Scheid- und Schweißversuchen mit einem 900-W-CO<sub>2</sub>-Laser. Schweißen und Schneiden 24 (1972). H. 7, S. 255/257.

- (24) — Drake, K. - H. und Sepold, G.: Theoretische Untersuchungen zum Seblimierschneiden mit Laserstrahlen. DVS - Berichte 44 «Strahlschweissen VIII», Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1977, S. 96.
- (25) — Buchholz, J.: Anwendungsmöglichkeiten des Laser - Abtragens in der Feinbearbeitung. Fachtagung Laser - Schweißen und - Abtragen am 6.12.1978 im Haus der Technik, Essen.
- (26) — Stich, M. L. und Weiner, M. J.: Lasergeräte zur Bearbeitung und Feinstbearbeitung. Werkstatt u. Betrieb 104 (1971), H. 4, S. 209/212.
- (27) — Kuper, G. und Steffen, J.: Präzisionsbohren mit Laserstrahlen. DVS - Berichte 34 „Strahltechnik VII“, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1975, S. 110/114.
- (28) — Skublich, J. und Stöckermann: Laser - und Elektronenstrahlbearbeitung in der Fertigung. Werkstatt und Betrieb 108 (1975), H. 7, S. 425/80.