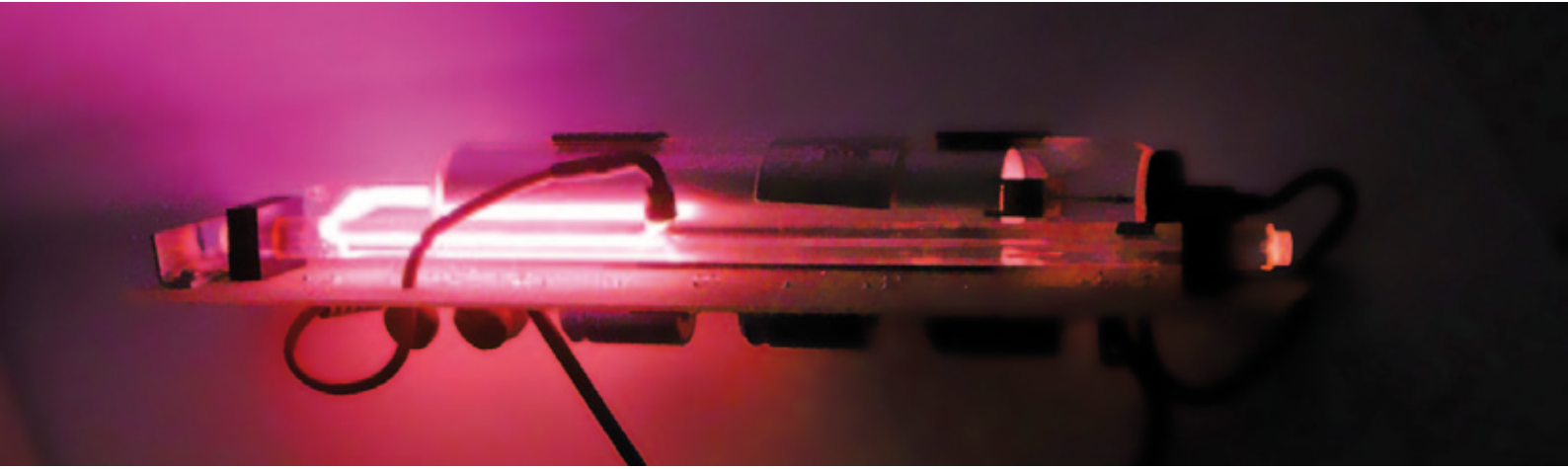


Uçuşurken Işıyan Atomları ve Molekülleri Sıraya Sokmak

Gaz Lazerleri



Bir HeNe lazer tüpü ve devre kartının altında güç kaynağı.

Lazer dediğimiz şey aslında ışık kaynağını, kuantum sınırları içerisinde gürültüden arındırılmış, parlaklığı yüksek, yani dar bir dalga-boyu aralığında yüksek güçte ışımaya yapan, eşvreliliği uzay ve zamanda korunmuş veya yükseltilmiş duruma sokmaktır. Bunun hayalini yüzyıl başında iletişim mühendisleri kuruyordu: Radyo vericilerindeki osilatörlerin sağladığı temizlikte ama ışık dalgaboyunda elektromanyetik dalga üreteçleri. Işık kaynaklarını hızla gözünüzün önüne getirin ve gaz boşalma tüplerine yani floresan lambalarına yoğunlaşın. Kapalı bir cam tüpte veya odacıkta genellikle iki metal elektrot ve ortamı dolduran gaz bulunur. Gaz basıncı yine birçok değerde olabilir. Yüksek basınçlı ark lambaları, düşük basınçlı katot tüpleri, metal buharlı olanları, asal gaz dolu neon tüpleri (argon, kripton, zenon da içerebilirler, hepsine neon diyorlar nedense), bazen camın iç yüzeyini kaplayan bir fosfor tabakası, bazen elektrotlardaki fitiller (termoiyonik elektron kaynağı olarak filamentler) çeşitliliği sağlar. En iyi bildiklerimiz reklamcılıkta kullanılan neon lambaları ve evlerde, ofislerde kullandığımız floresan lambalardır. Hızla artan verimli lambalar, eko lambalar denilen elektronik sürücüsü tabana gömülü küçük floresan tüp-

ler de yeni yakınlarımız. Neyse, işte bu lambalar nasıl çalışıyorlar, buradan başlayabiliriz. Kapalı ortamda bir gaz veya gaz karışımı bulunur. Oda sıcaklığında, bu gazın atomlarının ya da moleküllerinin hareket denklemlerini istatistiksel fizik ve termodinamik yöntemleriyle çözebiliriz. Bu makroskopik özelliklerini kestirmemizi sağlar. Gaz sıcaklığını, molekül enerjilerini, gaz basıncını, çarpışma arakesitini böyle hesaplayabiliriz. İçerde, oda sıcaklığında belli sayıda gaz molekülü kendi kendilerine titreşim hareketleri yapar, oradan oraya gezinirler, çarpışırlar. Ortama hızlı elektronlar salarsak bu moleküllerle çarpışmaya başlarlar, belli oranlarda. Bu elektronları da, en yaygın ve basit şekliyle iki elektrot arasında uyguladığımız gerilimle sağlarız. Eğer yeterince yüksek bir elektrik alanı uygularsak, iki elektrot arasında bir akım oluşur, yani elektronlar katottan anoda doğru akmaya başlar. Saniyede geçen elektron sayısı da akımla orantılıdır. Bunu sağlamak bazı koşullarda güç olur. Kolaylaştırmak için yöntemler bulunmuştur gerçi. Örneğin elektrotlardan birini ısıtarak, yüksek sıcaklıklarda ısıl etkiyle kopan elektron sayısını artırıp bunları elektrik alanında hızlandırarak akım elde edebiliriz. Ya da radyo frekans uyarımıyla, yüksek gerilimli bir değişken

alan oluşturup gazı iyonize edebiliriz. Daha değişik teknikler olsa da bunlar çok bilinmediği için şimdilik gözardı edebiliriz. Hatta floresan lambayı bırakıp tekrar lazere dönelim.

Maiman, sentetik yakut kristalini flaş lambasıyla uyarıp ilk lazeri (optik maser) yapmadan çok önce, 1954'te Townes, Gordon ve Zeiger amonyak moleküllerinin titreşimlerini kullanarak tek renkli ve eşvreli mikrodalga kaynağını (maser) kurmuşlardı. İlk lazer, bir katihal yakut lazeriydi ve ışıkla pompalanıyordu. Yani birincil enerji kaynağına elektrik dersek (su, kömür, fosil ve Güneş diyerek dallandırmadan), elektriksel dönüşümlerle flaş lambası (zenon çakarlamba) birkaç yüz mikrosaniyelik kısa bir zamanda yüksek ışık enerjisini yakut kristaline doğru salar (bunu akıllı fotonlar yapmaz elbette, tasarımcının görevi, flaş lambasından çıkan fotonların çoğunu yakut kristaline yönlendirecek yapıyı hesaplamak ve kurmaktır). Işıklı pompalanan bir lazerden daha verimli elektrikle pompalanan olmalıdır diye, Ali Javan ve W. R. Bennet ilk gaz lazerini helyum neon karışımıyla 1961'de gerçekleştirdiler. (Verimlilik demişken, birincil kaynağı ışığa dönüştürme çabaları bitmek bilmedi. Shelkov'un grubu Rusya'da bir kömür madeni yakınındaki metalurji fabrikasında 100kW sürekli ışık veren gazdinamik karbondioksit lazeri kurdu. Lawrence Livermore grubu atom bombasıyla pompalanan bir x-ışını lazeri yaptı. Özbekistan'da güneş ışığıyla pompalanan en büyük lazer yapıldı). Genel olarak gaz lazerleri iki ayna arasında bir cam (ya da metal ya da seramik) tüp içinde düşük basınçlı gaz olan optik kovukla yapılır. Tüp içindeki gaza "lazer ortamı" denir ve atomlar, metal buharları veya moleküller içerir. Gaz parçacıkları, çoğunlukla elektrik akımıyla uyarılır. Yüksek enerjili elektronlarla çarpışan gaz parçacıkları, daha yüksek enerji düzeylerine çıkar ve buradan da kendiliğinden yayınımla bir foton salarak düşük enerji düzeyine geçerler. Optik kazanç koşulu, lazer etkisinin gözlenmesi için sağlanmalıdır. Bu da, uyarılmış düzeydeki parçacık sayısının, düşük düzeydeki parçacık sayısından büyük olmasını gerektirir. Çıkış gücünü

yükseltebilmek için de yüksek enerji düzeyindeki parçacık sayısını artırmak gerekir. Düşük düzeydeki parçacıkların da kısa zamanda toprak düzeyine düşmeleri istenir. Düşük enerji düzeyinden, toprak düzeyine geçişin lazer çıkış gücüne bir katkısı olmayacağı için, bu kayıp enerjiye denktir. Üstelik, elektronlarla çarpışarak yeniden uyarılmış enerji durumuna çıkabilmeleri için de toprak düzeyinde olmalı. Bir parçacığın (atom ya da molekül) saldığı fotonun enerjisinin yüksek enerji düzeyine çıkarmak için gereken enerjiye oranı, bu lazerin çalışma verimini gösterir. Aslında bu, diğer tüm kayıpları gözardı eder, enbüyük verimi gösterir. Bu orana kuantum verimi de denir. Bir gaz lazerinin verimi, beklenen kuantum veriminden daha düşük olacaktır. Çünkü gaz parçacıklarını seçici bir şekilde uyaracak elektron çarpışma koşullarını yaratamayız. Elektriksel gaz boşalmasında yer alan elektronların kinetik enerjileri geniş bir aralıkta dağılır. Böylece yalnızca lazer çıkışına katkıda bulunacak düzeye değil, başka enerji düzeylerine de yükselmiş gaz parçacıkları bulunur ortamda.

Bell Laboratuvarları'nda kurulan ilk gaz lazeri, neon atomlarının uyarılmış iki seviyesi arasındaki geçişle sağlanmıştı. Lazer çıkışı 1,15 mikrometre dalgaboyundaki fotonlardan oluşuyordu. O günden sonra, sayılması zor sayıda ortam kullanılan lazerler yapıldı. Dalgaboyu aralığı, 3,9 nm ile radyo dalgalarına kadar uzanmaktadır.

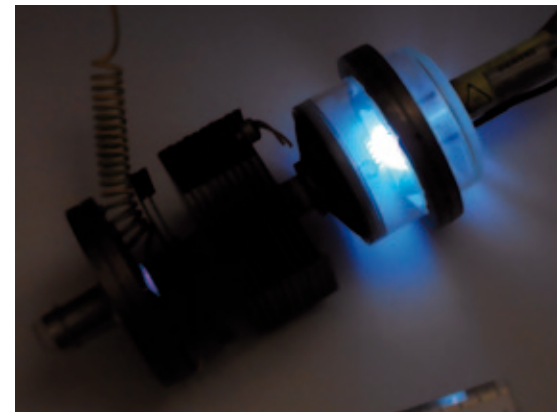
Gaz lazerlerinden bazıları çok yaygınlaşmıştır. HeNe (Helyum Neon) lazeri ucuz ve kaliteli, düşük güçte en çok 40mW



1977'den bu yana çalışan bir HeNe lazeri. Sağda, yüksek gerilim trafosu. Işıldama yapan gaz tüpünün iki ucunda çınlanım kovucunu oluşturan aynalar var. Çıkış gücü 1mW'dan küçüktür.

kırmızı ışık verir; argon lazeri 50W güce kadar çıkabilir, birçok dalgaboyunda ışık yapabilir ama ençok yeşil ve mavi renkleriyle tanınır, eksimer (excimer) lazerleri morötesinde darbeli çıkış verir, darbe başına 1-2 Joule kadar yüksek enerjiye çıkabilir, göz saydam tabakasını (kornea) şekillendirme ve mikro malzeme işleme alanında çok kullanılır. Karbondioksit lazerleri, diyot lazerlerinden düşük olsa da %16 kadar yüksek bir elektriksel dönüşüm verimi sağlar. Üstelik rahatlıkla ölçeklenebilirler, darbeli ya da sürekli çalıştırılabilirler, dalgaboyları ayarlanabilir olarak da tasarlanabilirler. Güçleri 100kW mertebesinde olanları yapılmıştır. Malzeme işleme, makina mühendisliği ve endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez araçları olmuşlardır. Diğer gaz lazerleri daha az sayıda kullanılır; bazıları yalnızca araştırma çalışmalarında kullanılır, metal buharı lazeri gibi bir kısmı ise kısa ömürlü olmuştur. Ortak özellikleri arasında, gaz akışıyla soğutma sorununun kolay çözülmesi, ışın kalitesinin çok yüksek olabilmesi, izge (tayf) aralığının çok dar yapılabilmesi, zamansal ve uzaysal eşvreliğin çok yüksek olması sayılabilir.

Eksimer lazerleri, morötesi bölgede yüksek enerjili ve kısa darbeli ışınlarıyla endüstride ve tıpta kalıcı bir alan bulmuştur. Morötesi ışık, izgenin kısa dalgaboyu bölgesindedir. Kuantum mekaniği hesaplarına göre de, bu dalgaboyundaki ışık fotonunun enerjisi kırmızıya doğru -uzun dalgaboyuna doğru- olan fotonlara göre daha yüksektir. Bu iki değer, yani dalgaboyunun ve foton enerjisinin makroskopik et-



Baskı makinaları ve renk ayırım sistemlerinde yaygın kullanılan, hava soğutmalı argon lazeri. Çıkış gücü 10mW kadardır.

kileri, uygulamada önem kazanır. Foton enerjisi yüksek olduğunda, moleküller arasındaki bağları koparmak olasıdır. Böylece malzemeyle etkileşim fotokimyasal olacaktır. Dalgaboyu kısa olduğunda, ışın çok daha küçük bir alana odaklanabilir. Bu da, birim alandaki ışık akısını daha yüksek yapacaktır. Kısa dalgaboyu ince ayırtılı, yüksek çözünürlüklü malzeme işlemeye olanak tanır. Kaba bir metaforla, kalın uçlu kalem ve ince uçlu kalemle yapılan resimler gibi farklılık gösterir. Eksimer lazerleri saniyede 2000 atım yapabilen, ortalama 200W çıkış gücüne sahip, 1 Joule atım enerjisine ulaşabilen, 10-250 nanosaniye arasında darbe genişliği olan sınırlı seçenekler arasında seçilebilir. Yaygın kullanılan dalgaboyları ArF (argon florid) için 193 nm, KrF (kripton florid) için 243 nm, XeCl (zenon klorid) için 308 nm'dir.

Eksimer lazerindeki gazın etkin ögeleri asal gaz ve halojen (halojenler, metallere oluşturduğu bileşik "tuz" olan atomlardır: F, Cl, Br, I, At) atomlarıdır. Eksimer, excited dimer -uyarılmış ikiparçalı- sözcüklerinden türetilmiştir. XeCl gibi iki atomlu bir molekül, ancak elektiriksel uyarılmış düzeylerde oluşabilir. Zenon atomları, elektron çarpışmalarıyla elektron yitirdiğinde, eksi değerlikli klor atomlarıyla yüksek enerji düzeyinde, elektiriksel Coulomb çekimiyle geçici bir bağ oluşturur. Bu düzeyden, yer düzeyine lazer geçişi yaparak ayrılırlar. Bu, çok büyük optik kazanca sahip bir lazer tasarımı olanaklı kılar. Eksimer lazerleri, kullanımı zor ve tehlikeli gazlar içerir. Üstelik yüksek saflıktaki bu gazların kısmi basıncının düzenlenmesi, plazma dirençlerinde oluşan dengsizlikler, yüksek akım darbeleri altında aşınmaya uğrayan elektrotlar güvenilir ve kararlı sistemler yapmayı zorlaştırır. Tıbbi ve endüstriyel uygulamalardaki yaygınlığı, yine de kaliteli ve kullanımı güvenli lazer sistemi üretimini sağlamıştır. Diğer yandan, yüksek optik kazanç ortamı ve hızlı darbeler, optik geribildirimini sağlayan Fabry-Perot çınlanım kovuğunun ayarlanmasını kolaylaştırır. Bilimsel uygulamalarda, spektroskopik uygulamalar için boya lazerleri (sıvı lazerleri grubundan) pompalamasında, morötesi uyarım spektroskopisinde, ince film üretiminde hedef malzemenin vakum içinde kontrollü olarak buharlaştırılmasında, yanma ve ateşleme araştırmalarında, özellikle jet motorlarının eniyilenmesinde kullanılırlar. Endüstriyel uygulamalar, eksimer lazerinin yüksek foton enerjisini ve kısa dalgaboyunu öne çıkarır. Gaz bileşenlerine bağlı olarak 3,53 eV ile 7,9 eV arasında foton enerjisine sahip eksimer lazeri ışınları, birçok malzemenin molekül bağlarını bozarak çözündürür. Birçok organik malzemenin temel bileşeni olan C-H bağı enerjisi 3,5 eV değerindedir. Fotoablasyon denilen bu yöntemle plastik malzemeler, teflon, kemik, kuvarz, deri, kornea işlenebilir.

Helyum Neon lazerleri, düşük çıkış güçlerine karşın, yüzlerce dolar mertebesindeki fiyatları ile en yaygın kullanılan lazerler

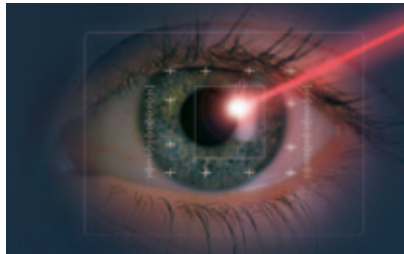


Adnan Kurt: Boğaziçi Üniversitesinde Elektrik Mühendisliği ve Fizik okudu. Boğaziçi Fizik Bölümü ve Psikoloji Bölümü'nde çalıştı. İstanbul Üniversitesi İstanbul Tıp Fakültesi Fizyoloji AD'da uzman araştırmacı olarak beyin ve sinirbilim araştırmaları yaptı. Koç Üniversitesi Fizik Bölümü'nde lazer araştırmaları, nano-optik ve mikrofotonik laboratuvarlarında araştırma mühendisi olarak çalıştı. Teknofil'de, telekardiyoji, elektiriksel beyin uyarımı, laser sistem tasarımı konularında çalışmaktadır.

oldular. Artık ucuz-çok ucuz ve kolay üretilen di-yot lazerleri bir çok uygulama alanında yerini aldıysa da, HeNe lazerleri hâlâ aranan lazer türlerindedir. Laboratuvarlarda ölçüm çalışmalarında -uzunluk, girişimölçümü, yüzey düzgünlüğü ölçümleri gibi- optik araştırmalarında, holografi (tümçizi) uygulamalarında vazgeçilmezdir. Çok kaliteli (yani ışın kesiti mükemmel bir Gauss eğrisine çok yakın olan) ışın şiddeti dağılımı, uzun zamansal ve uzaysal eşvreliliği, ince izge çizgisiyle kullanışlı bir araçtır. Yaygın kullanılan dalgaboyu 632,8nm'deki kırmızı olsa da yeşil ve turuncu renkte çıkış verenleri de bulunur. Gelişmiş üretim teknikleri sayesinde bu tür lazerler 10bin-50bin saat kadar sorunsuz çalışabilir. Plazma tüpü, içinde yedek gaz hacminin de bulunduğu geniş bir cam silindirden ve bunun içinde yer alan daha ince bir cam borudan oluşur. İnce cam boruda, elektiriksel boşalmayla plazmanın oluşturulduğu, çapı 1mm kadar olabilen bir kanal vardır. Dış silindirin her iki ucuna, vakuma dayanıklı yapııştırıcılarla, birbirine paralel Fabry-Perot çınlanım aynaları yapıştırılır. Bir floresan lambada ve neon tüpünde olduğu gibi, cam tüp içinde boşalma elektrotları vardır. Yüksek gerilimli doğru akım kaynağıyla bu tüp içindeki plazma kanalında elektiriksel uyarı gerçekleşir. Neon, etkin lazer ortamıdır. Helyum, çarpışmalarla neon atomlarının yüksek enerji düzeylerine çıkmasını sağlayan tampon gazdır. Bu lazerlerin yaygın kullanılanları 1-10mW arasında çıkış gücü verir, 1-2 mA

plazma akımı sağlamak için de 10-20W arasında elektiriksel giriş gücü kullanılırlar.

İyon lazerleri, çoğunlukla argon ve kripton gazları kullanan sistemlerdir. 5mW ile 60W arasında sürekli çıkış gücü verebilen türleri olan bu lazerler tıp uygulamaları, holografi, baskı teknolojileri (matbaacılık ve baskı öncesi hazırlık), kompakt disk kalıpcılığı, lazer gösterileri, bilimsel araştırmalar, spektroskopik ölçümler için çok kullanışlıdır. Di-yot pompalı katı hal lazerlerindeki gelişmeler, görünür bölgedeki dalgaboylarının üretimi, az güç harcamaları/verimleri, soğutma sorunsuzlukları, küçük olmaları nedeniyle, iyon lazerleri hedef uygulamalar dışındaki birçok alandan silindi. Diğer gaz lazerlerinde olduğu gibi iyon lazerleri de, içinde etkin gaz karışımı olan cam (aslında berilyum oksit gibi çok zehirli seramikler kullanılıyor) bir silindir çevresinde kurulur. Bu cam tüpün uzunluğu, lazerin gücüne bağlı olarak 30cm ile 150cm arasında değişebilir. Tüp içinde yedek gaz, elektrotlar ve her iki ucunda da aynalar ya da Brewster pencereleri (bunlar ışığın dalgaboyuna bağlı olarak belli bir açıda yansıma kayıpsız geçişini sağlayan kutuplayıcı cam plakalardır) yapıştırılmıştır. Tüp düşük güçlü lazerlerde hızlı hava akımıyla, 1W üstünde çıkış veren sistemlerde suyla soğutulur. Ayrıca, yüksek güçlü olanların tüpleri, iyonların çarpışma ke-



sit alanını artırmak için güçlü bir elektromıknatısla sarılmıştır. Böylece elektriksel olarak yüklü parçacıklar manyetik alanda hareket halindeyken Lorentz kuvvetleriyle sıkışır ve daha yoğun plazma kanalı oluştururlar. Tüp dışında ayna tutuculara ve ayar mekanizmalarına bağlı çınlanım kovuğu aynaları, ısıl değişimlere bağlı olarak yer değiştirmesinler diye, Super Invar denilen malzemenin yapılmış, sıcaklıkla çok az büyüklük değiştiren silindirik çubuklarla yataklanır. İyon lazerlerinin çıkış dalgaboyu aynaların yansıtıcı kaplamalarıyla belirlenir. Eğer geniş bant yansıtıcı kaplamalar kullanıldıysa, birden fazla dalgaboyunda lazer ışını elde edilebilir. Çınlanım kovuğuna yerleştirilen bir prizma veya kırınım ağıyla, dalgaboyu ayarı da yapılabilir böylece. Daha çok lazer gösterileri ve yansıtma için kullanıldığında, lazer etkin ortamı argon ve kripton gazı karışımından oluşturulur. Bu da kırmızı, mavi ve yeşil dalgaboylarında ışın sağlanarak “beyaz ışık lazeri” diye adlandırılır. En çok kullanılan argon lazeri dalgaboyları 488 nm, 514,5 nm, kripton lazeri dalgaboyları da 647,1 nm’dir.

İyon lazerleri, ilk günlerden beri, göz ağtabakasının cerrahi uygulamaları için kullanılmıştır. Cerrahi girişimin olanaksız olduğu durumlarda, göz küresine mekanik bir girişim yapmadan göz merceğinden gönderilen lazer ışınıyla kanamalar durdurulmakta, kopmalar yapıstırılmaktadır. Özenel görüşüme göre, her şey bir yana, bu lazerlerin insan sağlığına en önemli katkısıdır. Yine bu uygulamalarda da daha küçük, kullanışlı ve enerji tüketimi az olan katı hal lazerleri yaygınlaşmaktadır. Enerji kullanımına örnek vermek gerekirse, soğutma harcamasını gözardı edersek, 12W argon lazeri yaklaşık 25kW elektrik harcayacaktır.

Karbondioksit lazerleri endüstriyel vazgeçilmezlerdendir. General Motors Üretim Sistemleri yöneticisi F. A. DiPetro, bir konuşmasında (kişisel not defteri, 1993, Laser Applications for Mechanical Industry, NATO ASI at Erice), otomobil üretiminde ilk devrimin “perçinle” başladığını (bir uçağın penceresinden kanada doğru bakınca, perçinlerin yaygın kullanımı ve önemi bir anda anlaşılır), ikinci devrimin de “lazerle kay-

nak” olduğunu anlatmıştı. Hem farklı metal tabakaları birbirine sürekli olarak yanal olarak kaynatmak mümkündür, hem de yalnızca bir yüzeyden kaynak yapmak mümkündür. Elbette bu üretim tasarımını, kalitesini, hızını çok yükselten bir yöntemdir ve alternatif, klasik bir çözümü de yoktur.

Karbondioksit lazerleri, yine tüm gaz lazerlerinde olduğu gibi bir plazma tüpündeki gaz karışımını etkin ışın ortamı olarak kullanır. Yine, yüksek gerilimle elektron akışı ve çarpışmalarla lazer geçişleri sağlanır. Ama yüksek güçlü sistemlerde, bu plazma odası çok büyük olabilir, çok uzun olabilir, hızlı gaz akışı gerektirebilir. Böyle parametrelerle de farklı lazer güçleri sağlanır ve tasarımları şekillenir. Karbon dioksit lazerlerinin en çok kullanılan ve verimli dalgaboyu çıkışı 10,6 mikrometredir. Uzak kızılatı bölgede yayınının zorluklarından biri ışın taşıma araçlarıdır. Yeni geliştirilen daha dayanıklı ve kullanışlı ışıklipleri taşıma (Bilkent’ten Mehmet Bayındır Grubu, http://www.nano.org.tr/lazer_fibers.html, ve MIT’den Joannopoulos / Fink grubu <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/cable-1218>), cerrahi uygulamalarda kullanılan 10-20W ışık gücü için uygun olsa da, endüstride kullanılan kilowatt ölçeğindeki lazerler için yetersizdir. Işın taşıma, çok eklemli kollarla, robot kollarına yerleştirilen soğutmalı aynalarla ya da uçan aynalı (iki ya da üç boyutlu kartezyen eksenlere yerleştirilen kayar ayna düzenekleri) optik düzeneklerle sağlanır. %16 enerji dönüşüm verimi olan karbondioksit lazerleri, diyot lazerleri dışında en verimli lazerlerdir. Ölçeklenebilir lazer geçişleriyle de çok yüksek güçlerde yapılabilirler. 200W altındaki güçlerde, çok uzun süre dayanabilen elektrot malzemeleri ve radyofrekans uyarmalı plazmayla çalışan lazerler, bakım gerektirmeden 10-20 bin saat kadar çalışabilirler. Bu gruptakiler küçük malzeme işleme, metal olmayan malzeme kesimi, ürünlerin



Küçük bir azot lazeri, 1987.



Gazete saymakta kullanılan bir aygıtın çıkarılmış HeNe lazer tüpü.

markalanması, cerrahi girişimler için kullanılır. 1kW çıkış gücü ve üstündeki lazerlerle metal kesimi, kaynak, ısıl işlem yapılabilir. Malzemelerin lazerle işlenmesinde, özellikle metal plaka kesimi ve kaynağındaki en önemli bileşenlerden biri de süreç denetimidir. Bu kadar büyük güçte enerji kaynağının düzgün iş yapabilmesi için, ışın odaklamasının sürekli denetlenmesi, malzemenin hem etkin işleme hem de soğutma için uygun gazlarla üflenmesi, ışın yörüngesinin hız ve konum denetlemesinin hem düzgün yapılması hem de optimize edilmesi zorunludur. Makine mühendisliği uygulamalarındaki lazer araştırmalarının büyük kısmı bu otomasyon ve denetim konusunda yapılmaktadır. Diğer yandan da, lazer ve malzeme etkileşiminin temellerinin iyice anlaşılması, ısı aktarımı ve malzeme dönüşümü modellerinin yapılması araştırma konularındandır.

Kaynaklar

- Hecht, J., “History of Gas Lasers, Part 1: Continuous Wave Gas Lasers”, *Optics and Photonics News*, Cilt. 21, s. 16-23, 2010
- Javan, A., Herriott, D. R., Bennett, W. R., “Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture”, *Physical Review Letters*, Cilt 6, s. 106-110, 1961.
- W. R. Bennett, “Background of an inversion: the first gas laser”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, Cilt 6, Sayı 6, s. 869, 2000.
- Walter, K., “The X-ray Laser: From underground to tabletop”, *Science & Technology Review* (Lawrence Livermore National Laboratory): 21-3, Eylül 1998.
- Bridges, W. B., “Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum”, *Applied Physical Letters*, Sayı 4, sayfa 128, 1964.
- http://www.ut.uz/eng/today/uzbek_scientists_created_a_powerful_solar_laser.mgr
- Duncan, G. R., “Solar-Powered Laser: A new solar laser could be instrumental in the quest to use magnesium as a source of energy”, *Technology Review*, 19 Eylül 2007.
- The Photonics Design and Applications Handbook*, Laurin Publishing, 2003.
- Editor: Marvin J. Weber, *Handbook of Laser Wavelengths*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 27 Temmuz 1998.