

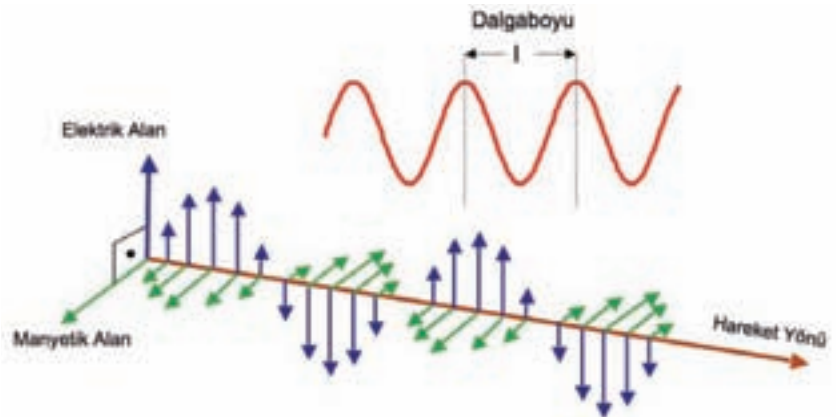
# FOTONİK VE KATIHAL LAZERLERİ

## Fotonik: Optiğin Rönesans Dönemi

Optik konusu, 1960 yılından bu yana üstel hızda bir yenilenme sürecinden geçmiş, bilim ve teknolojide geniş yaygın etkisi olan birçok özgün alan ortaya çıkmıştır. Bu yenilenmenin ivme kazanmasında etken olan önemli aşamalardan bazıları, 1960 yılında ilk lazerin icadı, 1960'lı yıllarda yarıiletken optik aygıtların geliştirilmesi, eş evreli ışığın kuantum ya da bir başka deyişle foton kuramının geliştirilmesi, ve 1970'lerde yüksek saflıkta optik liflerin üretimidir. Optikte yaşanan bu rönesans döneminin ürünlerini bugün birçok bilimsel ve teknolojik alanda görmemiz mümkündür. Örneğin, atom ve molekül fiziğini ele alalım. Femtosaniye lazerleri ve ileri algılama yöntemleriyle artık pikosaniye (1 pikosaniye= $10^{-12}$  saniye) ve femtosaniye (1 femtosaniye= $10^{-15}$  saniye) ölçeklerinde oluşan çok hızlı fiziksel olayları gözlemek mümkündür. 1 pikosaniyenin, saniyenin trilyonda biri olduğunu düşünersek, incelenebilen olayların ne kadar kısa sürelerde gerçekleştiği konusunda daha iyi bir fikrimiz olur! Bilimsel çalışmaların yanı sıra, foton kaynakları

ve algılayıcılarından oluşan birçok teknolojik ürün de artık günlük hayatımızın önemli bir parçası haline gelmiş bulunuyor. Yine örnek verecek olursak, yarıiletken lazerler, algılayıcılar, ve optik liflerden oluşan fiberoptik sistemler, hızlı ve düşük gürültülü iletişimde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, bu çok yönlü teknoloji alanı için Fotonik adı kullanılmakta ve kapsamı daha geniş bir tanımla verilmekte: Fotonik, bilimsel ve teknolojik problemlere, foton üreten, ileten, ve algılayan özgün sistemler kullanılarak çözüm üretmeyi hedefleyen bir bilim dalıdır.

Yeni lazer kaynaklarının geliştirilmesi, Fotonik konusunun önemli alt dalları arasında her zaman yer almıştır. Bunun başlıca nedeni, birçok teknolojik ve bilimsel uygulamada, belli bir dalgaboyunda çalışan lazer sistemlerine gereksinim duyulması. Örneğin, bir fiber optik haberleşme sistemine baktığımızda, yakın kızılaltı dalgaboylarında (1300-1550 nm) çalışan ışık kaynakları kullanıldığında, işaret bozulma ve kaybının en düşük, bilgi aktarım verimininse en yüksek düzeyde olduğunu görürüz. Fiber optik teknolojisindeki bu talepten dolayı, yakın kızılaltı bölgesinde çalışan lazer sistemlerinin geliştiril-



Şekil 1: Boşlukta hareket eden bir elektromanyetik dalga için elektrik ve manyetik alanlarının konuma göre değişimi. Dalga şeklinin tekrarlandığı en küçük mesafeye dalgaboyu ( $\lambda$ ) denir.

mesi konusunda yoğun çalışmalar sürdürülmüştür. Günümüze dek yapılan çalışmalarda, katı, sıvı, ve gaz ortamlarında lazer ışığı üretilebileceği gösterilmiş. Ancak, pratik uygulamalarda kullanılacak lazer sistemlerinin, kimyasal kararlılık, gürbüzlük, mekanik dayanıklılık gibi özelliklere de sahip olması tercih edilmekte. Bu şartları sağlayabilen sistemlerin başında yarıiletken, katihal, ve fiber lazerleri geliyor.

## Lazerlere Genel Bir Bakış

Katihal lazerlerine ayrıntılı olarak geçmeden önce, lazerler konusunda sık sık sorulan bazı soruları yanıtlayarak genel özelliklerine kısaca bakalım:

**-Kaç değişik lazer vardır?** Şaşırabilirsiniz ama, saymakla bitiremeyeceğimiz kadar çok değişik lazer sistemi vardır. Yukarıda bahsedilen ve 1960 yılında icad edilen ilk lazer, yakut kristaliyle yapılmıştı. Burada, safir kristali içerisine katılan krom iyonlarının kırmızı bölgedeki ışıması kullanılarak lazer ışığı üretildi. Yakutun yanısıra birçok başka ışyan kristaller, yarıiletkenler (elektron ve delikler tarafından sağlanan elektriksel iletkenliği, sıcaklık ve katkılama ile değişen kristaller), camlar, fiberler (camın ısıtılarak çekilmesi sonucunda oluşturulan ve ışık aktarımı için kullanılan ince lifler), gazlar, ve sıvılar ile de lazer ışığı üretilebilmiş bulunuyor. Şimdiye kadar geliştirilmiş olan tüm lazerleri tabii ki günlük hayatımızda görmek mümkün değil. Bu lazerlerin bir kısmı yalnızca çok özel laboratuvar ortamlarında çalıştırılabilir, bazılarıysa birçok elverişli özelliğe sahip olduklarından ticarileştirilip yaygın kullanıma girdi.

**-Bir lazerle ne kadar güç elde etmek mümkündür?** Öncelikle güç, birim zamanda üretilen enerjiye karşı gelir ve Watt cinsinden ölçülür. Örneğin 1 Watt gücü olan bir lazer, sürekli çalıştırıldığında, saniyede 1 Joule optik enerji üretecektir. Lazerlerle elde edilebilen güçler, kurulan düzeneğin büyüklüğü, kullanılan ortamın fiziksel özellikleriyle çok değişir. Birkaç somut örneğe bakarak ne düzeyde güçler elde edilebileceğini görelim. Örneğin, sürekli-dalga helyum-neon gaz lazerleriyle miliwatt (1 Watt'ın binde biri) düzeylerinde güç elde etmek mümkün. Öte yandan, iterbium katkılı YAG (itriyum alüminum garnet kristali) kristal lazerleriyle 5 kiloWatt'a varan ( $10^3$  Watt) çıkış güçleri elde edilmiş



Şekil 2: Lazer ışınımı üretmek için kullanılabilen peridot ya da diğer adıyla forsterit ( $Mg_2SiO_4$ ) kristali.

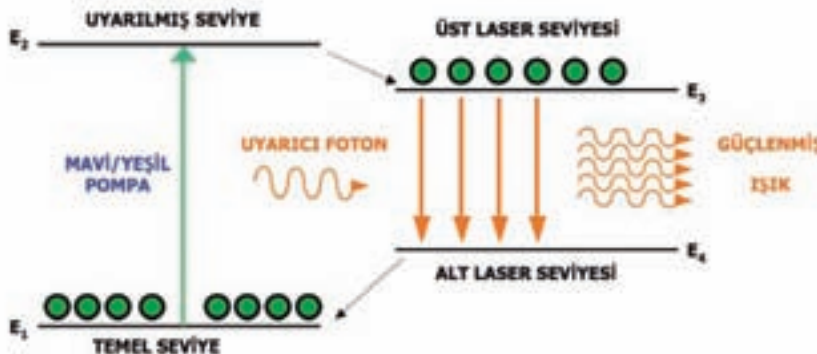
bulunuyor. Burada önemle vurgulamamız gerekir ki, bu bahsedilen örneklerdeki güç sınırlarının dışına çıkılamaz gibi bir sonuca varmak çok yanlış olur. Yalnızca mertebeler konusunda bir fikir vermesi için bu örnekleri seçtim. Yeni yöntemler ve malzemeler geliştirildikçe, bu düzeylerin altında ya da üstünde güç üretebilen lazerler de sürekli olarak ortaya çıkmakta. Ayrıca, bir lazerin pratikte ne kadar işe yaradığını değerlendirmek için de yalnızca ürettiği güce bakmak doğru olmaz. Ör-

neğin çok duyarlı frekans ve uzunluk ölçümlerinde kullanılan lazerler genellikle düşük güç üretirken, endüstride metal kesme ya da işleme uygulamaları için kiloWatt düzeyinde güç üreten sistemler daha elverişli. Yukarıdaki örneklerde, sürekli olarak çalıştırılan lazerlerin ürettiği güçlere baktık. Bunun yanısıra, sürekli olarak çalışmayan ve çıkış ışınımını kısa darbeler şeklinde üreten lazerlerle çok daha yüksek tepe güçleri elde edilebilir. Örneğin, günümüzde terawatt (yani  $10^{12}$  Watt) düzeyinde tepe gücüne sahip femtosaniye süreli darbeler üretebilen lazer sistemleri mevcut.

**-Bir lazer ne büyüklükte olur?** Burada da çok geniş bir yelpazede birçok değişik boyutlu lazerin olduğunu görüyoruz. Örnek verecek olursak, CD okuyucularında kullanılan yarıiletken lazerleri toplu iğnenin başından daha küçük bir yer kaplar. Öte yandan, birçok endüstriyel lazer sisteminin santimetre boyutlarında olduğunu görüyoruz. Daha uç örneklere bakacak olursak, füzyon yöntemiyle enerji üretiminde kullanımı ön görülen ve Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı'nda (ABD) kurulan morötesi lazer sistemi, bir stadyum büyüklüğünde.

**-Lazerlerin değişik çalıştırılış şekilleri var mı?** Lazerler, ürettikleri ışığın zamanla değişimine göre ikiye ayrılırlar: sürekli-dalga lazerleri ve darbeli lazerler. Sürekli-dalga lazerlerinden elde edilen güç, zamana göre (belli sınırlar içerisinde) yaklaşık olarak sabit kalır. Oysa, darbeli lazerlerde, üretilen ışık, kısa süreli darbeler şeklinde. Yine darbe uzunlukları farklı ölçeklerde olabilir. Örneğin, ürettiği darbe uzunluğu femtosaniye sürelerindeyse, yukarıda da bahsettiğimiz gibi bunlara femtosaniye lazeri denmekte. Yine yukarıda bahsettiğimiz ve füzyon deneylerinde kullanılacak olan dev morötesi lazeri, süresi saniyenin milyarda biri düzeyinde olan ışık darbeleri üretecek.

**-Lazerin ürettiği ışığın özellikleri nelerdir?** Lazerle üretilen ışık, yaklaşık olarak eş evrelidir. Çok basitleştirilmiş olarak açıklayacak olursak, lazer ışık dalgaları arasında sabit bir faz ilişkisi vardır ya da bu dalgalar eş zamanlıdır diye düşünebiliriz. Dolayısıyla, böyle bir ışın demetini ikiye ayırıp uzun bir mesafeden sonra birleştirirseniz (bunu pratikte yapmanın birçok yolu vardır



Şekil 3: Safir içerisine katılan titanyum iyonlarının basitleştirilmiş enerji seviyeleri. Ortamdan geçen fotonlarla etkileşim sonucunda uyarılı ışımaya ve optik kazanç elde edilebilir.





Şekil 4: Yüksek yansıtıcı aynalar ve kazanç kristalinden oluşmuş bir lazer kovuşu.

ve bu tür düzeneklere girişimölçer ya da interferometre adı verilir), düzgün bir girişim deseni (yani ışık şiddetinin belli konumlarda sıfıra, belli konumlarda da maksimum değere ulaştığı dağılım) elde edebilirsiniz. Eğer ışık eş evreli değilse, elde edeceğiniz girişim deseni daha bulanık olacak ya da tümüyle yok olacaktır. Lazer ışığının bu temel fiziksel özelliğini açıklayan eş evrelilik (koherens) kuramının teknik ayrıntılarını burada anlatmayacağız.

Lazer ışığının daha gözle görülür, elle tutulur özelliklerine bakacak olursak, üretilen ışığın normal şartlarda, belli bir renkte olduğunu görürüz. Bir başka deyişle, üretilen ışık dar bir dalgaboyu aralığındadır. Bu özellik de temelinde eş evreli oluşuyla ilintilidir. Rengini belirleyen, ışığı üretmek için kullanılan ortamın (katı, sıvı, ya da gaz olabilir) spektroskopik yapısıdır. Buna ileride daha ayrıntılı olarak döneceğiz. Bu söylediğim özellikle ters düşen, yani ürettiği ışığı geniş bir dalgaboyu aralığında olan lazerler de var. Bunu elde etmek için özel yöntemler kullanmak gerekir. İleride anlatacağımız femtosaniye lazerleri geniş dalgaboyu aralığında ışık yayabilen lazerlerin en önemli örnekleri arasında yer alırlar. Lazer ışığının bir başka önemli özelliği, yönlü olması ve uzun mesafelerden sonra bile göreceli olarak toplu kalması. Böyle bir ışık demetini odakladığımız zaman, ortalama güçler düşük olsa bile çok yüksek güç yoğunlukları elde etmek mümkün. Yine femtosaniye lazerlerinden örnek verecek olursak, odaklandığı zaman, bir

cm<sup>2</sup>'lik birim alanda 10<sup>22</sup> Watt'lık güç yoğunluğu oluşturabilen sistemler deneysel olarak gösterilmiştir.

#### -Lazerlerin uygulamaları nelerdir?

Günümüzde, lazerler birçok uygulamalarda kullanılıyor. Öne çıkan örnekler çok kısaca bakalım. Yukarıda da bahsettiğimiz yarıiletken lazerleri, CD okuyucu sistemlerinde ve optik bilgi işlemede çok yaygın olarak kullanılmakta. Fiber optik haberleşme sistemlerinde de bilgi aktarımı lazerler ile gerçekleştirilmekte. Lazer ışığı odaklandığında çok yüksek güç yoğunluğu oluşturabildiğinden, endüstride kesme, kaynak ve malzeme işleme uygulamaları için de çok elverişli. Bir başka önemli uygulama alanı, tıbbi görüntüleme ve cerrahi. Son yıllarda, lazerlerin metroloji ve standard belirleme konularındaki kullanımı da artmış bulunuyor. Örneğin, frekansı çok kararlı olan lazerler, frekans standardı ve hatta 'hassas optik saat' olarak da kullanılıyor.

## Işığın Temel Dalga Özellikleri

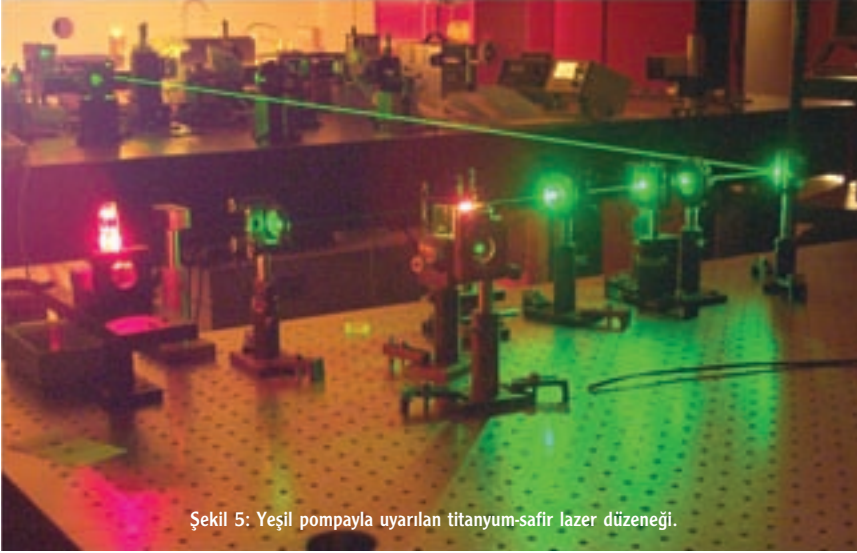
Yukarıda ışığın dalgaboyundan ve frekansından bahsettim. Bunu biraz daha açmak istiyorum. Klasik elektromanyetik kuramından da bildiğimiz gibi ışık hareket ederken dalga özellikleri gösterir. Buna göre, ışık dalgaları, birbirine dik olan ve hem zamanla hem de konumla değişen elektrik ve manyetik alanlardan oluşurlar. Elektromanyetik dalga adı verilen bu dalgalar boşlukta 3x10<sup>8</sup> m/s hızında ilerler.

Bu hızın ne kadar büyük olduğunu görmek için şu çarpıcı örneğe bakalım. Dünyanın eşlek (ekvator) çevresi 40.000 km'dir. Işık hızında hareket eden bir elektromanyetik dalga, saniyede Dünya çevresinde yaklaşık 7 dönü tamamlayabilir.

Boşlukta, böyle bir dalganın hareket yönü, elektrik ve manyetik alan yönlerine de diktir. Şekil 1'de, boşlukta hareket eden bir elektromanyetik dalga için, alanlarının belli bir andaki konum dağılımı gösteriliyor. Buradan da görüleceği gibi, dalganın şekli belli bir mesafeden sonra tekrarlamakta. Şeklin tekrarlandığı en küçük uzunluğa dalgaboyu adı verilmekte ve  $\lambda$  sembolüyle gösterilmekte. Sabit bir konumda duran bir gözlemci, hareket eden dalganın birim zamanda  $f$  tane tam salınımının yanından geçtiğini görecektir.  $f$ 'e sıklık ya da frekans adı verilmekte ve Hertz birimiyle ölçülmektedir. Boşlukta, sıklık ( $f$ ) ve dalgaboyu ( $\lambda$ ) arasındaki ilişki,  $c = f\lambda$  denklemiyle verilir. Burada  $c$  ışığın boşluktaki hızıdır. Görünür bölgedeki farklı renkler, farklı dalgaboylarına sahip elektromanyetik dalgalara karşı gelmektedir. Örneğin, mavi ışığın ortalama dalgaboyu 400-450 nanometre (1 nanometre=10<sup>-9</sup> metre, yani bir metrenin milyarda biri) civarındayken, kırmızı ışığın dalgaboyu 650 nanometre kadardır. Kızılaltı (infrared), dalgaboyu 700 nanometreye yaklaşık olarak 300 mikron (1 mikron=10<sup>-6</sup> metre) arasında olan ve gözle göremediğimiz elektromanyetik dalga bölgesidir. Sınır dalgaboylarının kabaca verildiğini ve farklı referanslarda farklılık gösterebileceğini burada belirtmek gerekir. Yukarıda verilen denklemi kullanarak, yakın kızılaltı bölgesinde, dalgaboyu 1000 nm olan bir ışık dalgasının frekansının 3x10<sup>14</sup> Hertz olduğunu görüyoruz. Bir başka deyişle, böyle bir dalga hareket ederken, sabit konumda duran bir gözlemcinin yanından, saniyede 300.000.000.000.000 tane tam dalga salınımı geçecektir.

## Katıhal Lazerleri Nedir?

Şimdi, yazımın ana konularından olan katıhal lazerlerinin genel özelliklerine kısaca değinelim. Katıhal lazer-

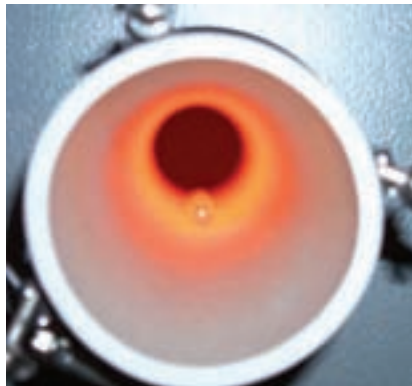


Şekil 5: Yeşil pompayla uyarılan titanyum-safir lazer düzeneği.

lerini diğer türlerden ayıran en önemli özellik, optik kazanç için kullanılan ortamın fiziksel yapısı. Bu tür lazerlerde, optik kazanç elde etmek için, içerisine ışık yansıtabilen iyon katkılanmış yalıtkan kristal ya da camlar kullanılır. 1960 yılında ilk icad edilen yakut lazeri de bu tür lazerlere bir örnek. Yakut, safir, peridot (forsterit, Şekil 2) gibi mücevher taşlarının yanısıra, yüksek saflıkta birçok sentetik kristal ve cam da bu amaçla kullanılmaktadır.

Optik kazancın nasıl ortaya çıktığını anlamak için safir kristalini ele alalım. İçerisinde hiçbir katkı bulunmadığı durumda, belki şaşırabilirsiniz ama, saf safir, kimyasal açıdan saf yakut taşından hiçbir farkı olmayan ve *corundum* diye adlandırılan saydam bir kristaldir. Her ikisinin de kimyasal formülü  $Al_2O_3$ 'tür. Buna karşın, safir kristali içerisine az miktarda titanyum iyonu katkılı olduğu zaman, pembemsi bir renk aldığı görürüz. Bunu, çok temel kuantum mekanik ilkeleriyle anlamamız mümkün. Serbest titanyum iyonunda üst üste örtüşen enerji seviyeleri, kristal içerisine girdikten sonra komşu iyonlarla etkileşim sonucunda ayrışmakta, bu enerji seviyeleri arasında da optik geçişler ortaya çıkmaktadır. Oluşan enerji seviyelerinin yapısı çok basitleştirilmiş olarak Şekil 3'te gösteriliyor. Safir içerisindeki titanyum iyonları, üst enerji seviyelerine mavi ve yeşil dalga boylarındaki fotonları soğurarak çıkarlar. Görünür bölgedeki tayfın yalnızca kırmızı kısmı kristal tarafından soğurulmadığından, titanyum iyonları böylece safir kristaline pembe-kırmızı bir renk kazandırır. Optik kazanç elde etmek

için, kristal içerisindeki iyonların önce üst enerji seviyesine çıkarılması gerekir. Titanyum katkılı safir kristalinde, bunu mavi-yeşil bölgede ışınım üreten flaş lambası ve başka bir lazerle gerçekleştirebiliriz. Buna optik pompalama adı verilir. Optik pompalama sonucunda, temel enerji düzeyindeki titanyum iyonları önce üst enerji seviyelerine çıkarılırlar. Üst enerji seviyesindeki iyonlar, ortamdaki geçmekte olan fotonlar tarafından uyarılarak alt enerji seviyesine geçiş yapabilir ve böylece foton salımı gerçekleşir. İlk kez Einstein tarafından 1916-17 yıllarında incelenen bu etkiye 'uyarılı ışımaya' adı veriliyor. Uyarılı ışımaya gerçekleşebilmesi için uyarıcı fotonun enerjisinin, üst ve alt seviyeler arasındaki enerji farkına ( $E_3-E_4$ ) yakın olması gerekir. Kuantum mekaniğinin temel ilkelerinden olan Planck yasasından da bilindiği gibi, bir fotonun enerjisi ( $E$ ),  $E = hf$  denklemiyle verilir. Burada  $h$  Planck sabiti ve  $f$  ışığın frekansıdır. Bir başka deyişle, frekans arttıkça, foton enerjisi de artmaktadır. Dola-



Şekil 6: Isıl difüzyon ile krom iyonu katkılama için kullandığımız yüksek sıcaklık fırını.

yısıyla, soğurulan ya da yayılan ışık fotonunun rengini, enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı belirleyecektir. Tıf safir örneğinde,  $E_1$  ve  $E_2$  seviyeleri arasında geçiş elde etmek için mavi ya da yeşil bölgedeki fotonlar kullanılmaktadır. Buna karşın, lazer geçişinden elde edilen ve daha düşük bir enerjiye sahip olan fotonlar, kırmızı ya da yakın kızılaltı bölgesinde yer alırlar.

Uyarılı ışımaya sonucunda yayılan fotonların frekansı ve yönü, uyarıcı fotonla aynı olduğundan, ortamdaki geçen ışın yoğunluğu (şiddeti) artmış olur. Bu etkiye 'uyarılı ışımaya optik kazanç' adı verilmektedir. 'Lazer' adı da bu etkinin İngilizcesi olan 'light amplification by stimulated emission of radiation' ifadesinin kısaltmasıdır.

Esasında, buraya kadar optik kazancın nasıl oluştuğunu anlattık. Henüz lazer ışın demetini elde etmiş değiliz. Güçlü ve yönlü bir lazer ışın demeti oluşturmak için, uyarılı ışımaya sağlayan kristal, yüksek yansıtıcı aynalarla oluşan kovuk içerisine yerleştirilir (Şekil 4). Böylece, kristalin ürettiği ışık, aynalar arasında birçok kez yansyarak güçlenir. Eğer bir döngüdeki optik kazanç, kayıplardan daha fazlaysa optik salınım başlar ve yüksek parlaklığa sahip, yönlü lazer ışığı üretilebilir. Kısacası lazer, optik kazanç ve geri beslemenin birleşimi sonucunda oluşan bir optik salınıdır ya da bir başka deyişle osilatördür. Örnek olarak, Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı'nda kurmuş olduğumuz titanyum-safir lazer düzeneği Şekil 5'de gösteriliyor.

## Orta Kızılaltı Bölgesindeki Katihal Lazerleri

1994 yılında kurulan Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı'nda, yukarıda bahsettiğimiz türde yeni katihal lazer sistemlerinin ve yükselticilerinin geliştirilmesi konusunda deneysel ve kuramsal çalışmalar sürdürülmüştür. Yazımızın bu kısmında, son yıllarda üzerinde çalıştığımız ve orta kızılaltı (2000-3000 nm) bölgesinde çalışabilen katihal lazerlerinin geliştirilmesi konusunda yaptığımız deneysel çalışmalarımızı kısaca anlatacağız. Orta kızılaltı

lazerleri, hava kirliliği ölçümü, moleküllerin titreşimlerinin spektroskopik olarak incelenmesi, ve atmosferik görüntüleme gibi uygulamalarda kullanılmakta.

2001-2004 yılları arasında TÜBİTAK tarafından da desteklenen bu projemizde 2000-3000 nm bölgesinde çalışabilen yeni katihal lazer malzemelerinin sentezi ve eniyileştirilmesi konusunda deneyler yaptık. Projede, Kimya Bölümü öğretim üyelerimizden Prof. Dr. Mehmet Somer, araştırma mühendisimiz Adnan Kurt, ve yüksekisans öğrencimiz Ümit Demirbaşa da görev aldılar. Deneylerde, malzeme sentezinden lazer sisteminin kurulması ve karakterizasyonuna kadarki tüm aşamalar Koç Üniversitesi'nde gerçekleştirildi.

Üzerinde çalıştığımız sistem, içerisine krom katılanmış çinko selenid (Cr:ZnSe) lazeri. Saf çinko selenid, görünür bölgeden orta kızılaltı dalgaboylarına kadar saydam olan bir katı. Bir başka deyişle, görünür ve orta kızılaltı bölgesindeki ışık ZnSe tarafından soğurulmamakta. Krom iyonları ZnSe içerisine katıldığında, daha önce de anlattığımız gibi, iyon enerji seviyeleri ayrışmakta ve bu seviyeler arasında optik geçişler meydana gelmektedir. ZnSe

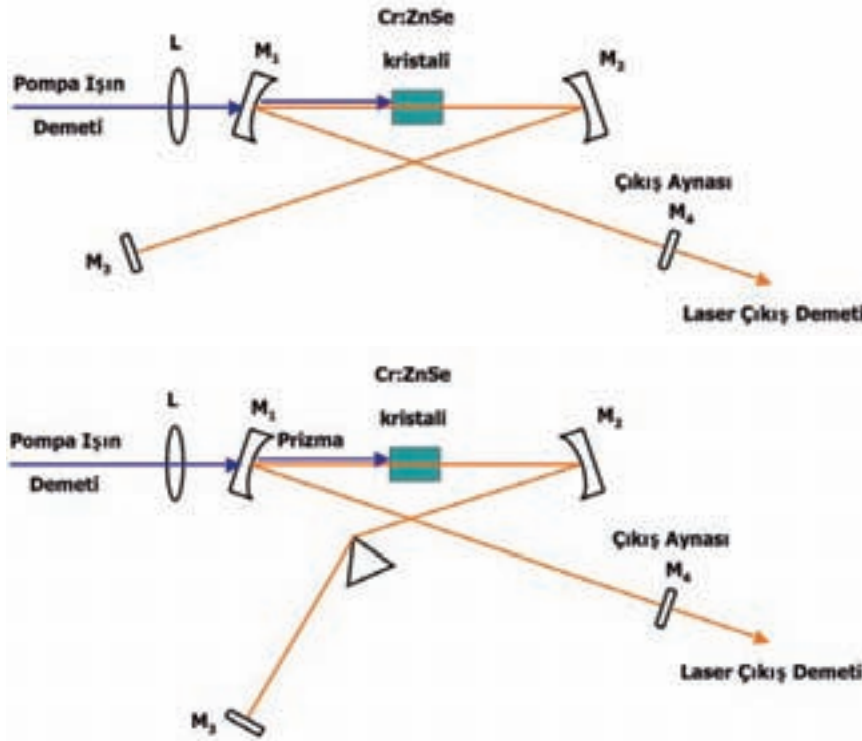
içerisindeki krom miktarı arttırıldıkça, 1500-2000 nm arasında kuvvetli bir soğurma bandı oluşur. Projenin ilk aşamasında, ısıl difüzyon yöntemi kullanılarak krom iyonları ZnSe ortamına katıldı. Bunu gerçekleştirmek için önce, ZnSe örneği ve krom tozu, vakum altında cam tüpler içerisine konur ve 800-1100 °C sıcak aralığında ısıtılır. Bu ısıtma sırasında buharlaşan krom, ZnSe kristali içerisine difüzyonla girer. Isıl difüzyon deneyleri sırasında kullanılan yüksek sıcaklık fırını ve krom-ZnSe içeren cam tüp, Şekil 6'da görülmekte. Elde edilen Cr:ZnSe örneklerinin spektroskopik ve lazer özellikleri daha sonra deneysel olarak incelenmiş bulunuyor. Bu çalışmalar sonucunda, en iyi ışınım ve lazer verimini veren krom yoğunluğu ve sentez koşulları belirlenmiş bulunuyor.

## Katihal Lazerlerinin Tasarım Esasları

Şimdi kısaca Cr:ZnSe gibi bir katihal lazer düzeneğinin nasıl kurulduğuna değinelim. Öncelikle, optik kazanç için kullanılacak olan Cr:ZnSe kristalinin yüksek yansıtıcı aynalardan

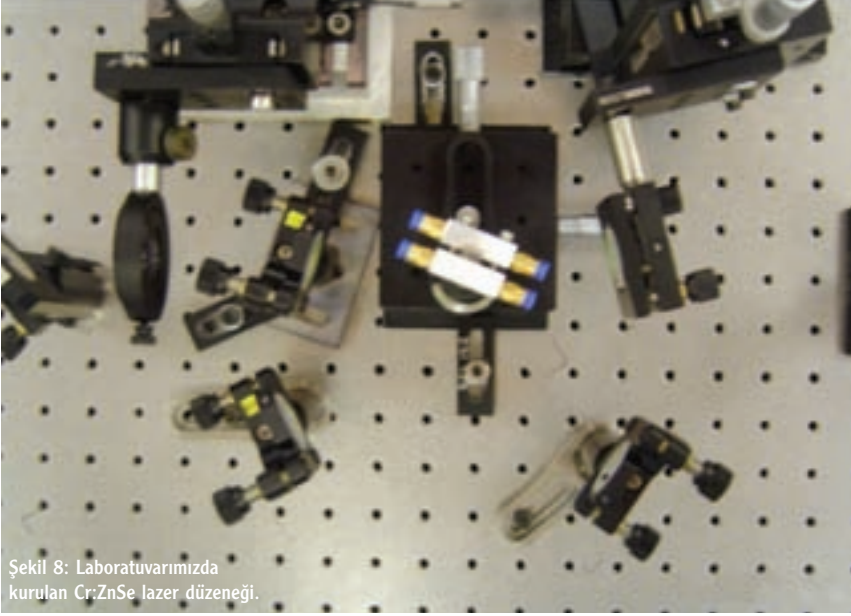
oluşan bir optik kovuk içerisine yerleştirilmesi gerekir. Burada değişik optik kovuk tasarımları kullanmak mümkün. Bu tür lazerlerin yapımında yaygın olarak kullanılan ve 4 tane aynadan oluşan optik kovuk düzeneği Şekil 7(a)'da basitleştirilmiş olarak gösteriliyor. Burada Cr:ZnSe kristali, iç bükey  $M_1$  ve  $M_2$  aynalarını arasına yerleştirilir. Önceki bölümden de hatırlanacağı gibi, kristalin pompa ışığıyla uyarılması ve temel seviyedeki iyonların üst lazer seviyesine çıkarılması gerekir. Bunun için kullanılan pompa ışın demeti L merceğiyle kristal içerisine odaklanır. Odaklama sonucunda, kristal içerisinde daha yüksek pompa ışın yoğunluğu elde edilir ve lazerin daha kolay bir şekilde çalışması sağlanır. Cr:ZnSe kristalinin soğurma bandı 1500-2000 nm dalgaboyu aralığında olduğundan bu bölgede çalışan başka bir lazer bu amaçla kullanılabilir. Bandın ortası 1800 nm civarında olduğundan, pompa dalgaboyunun da 1800 nm'de olduğunu varsayalım. Uyarılmış Cr:ZnSe kristalinin de yaydığı fotonların dalgaboyu 2500 nm civarındadır.  $M_1$  aynasının, aynı anda hem 1800 nm dalgaboyundaki ışığı geçirmesi, hem de 2500 nm'dekini %100'e yakın bir oranda yansıtması gerekir. Bunu sağlamak için  $M_1$  ayna yüzeylerinin özel olarak çok ince katmanlarla kaplanması gerekir. Bu tür optik kaplamaların tasarımı, imalatı ve uygulamaları Fotonğin başlı başına önemli bir uzmanlık alanıdır.

Buraya kadar Cr:ZnSe kristali içerisine pompa ışığını odaklamış olduk. Uyarılan kristal, 2500 nm dalgaboyu etrafında foton yaymaya başlayacak. Kovuk kurulmadan önce, uyarılmış iyonlar yalnızca kendi başlarına geçişler yapıp rastgele yönlere foton yayarlar. Buna kendi başına (spontane) ışınma adı da verilir. Kovuğu oluşturan  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  ve  $M_4$  aynaları hizalanınca, optik eksen yönünde giden fotonlar,  $M_3$  ve  $M_4$  aynaları arasında tam bir döngüyü tamamlayabilirler. Bunu sağlamak için içbükey aynaların ( $M_1$  ve  $M_2$ ) odak uzaklıkları ve aynalar arasındaki mesafelerin doğru seçilmesi gerekir. Bunu gerçekleştirmek için yapılan kovuk tasarımının teknik ayrıntılarına burada girmeyeceğiz. Odak uzaklıkları ve aynalar arasındaki mesafeler ayarlandığı zaman, kovuk içerisinde gidip



Şekil 7: (a) Dört yansıtıcı aynadan oluşmuş bir lazer kovuğu. (b) Çıkış dalgaboyunu ayarlayabilmek için, bir koluna prizma yerleştirilmiş bir lazer kovuğu.



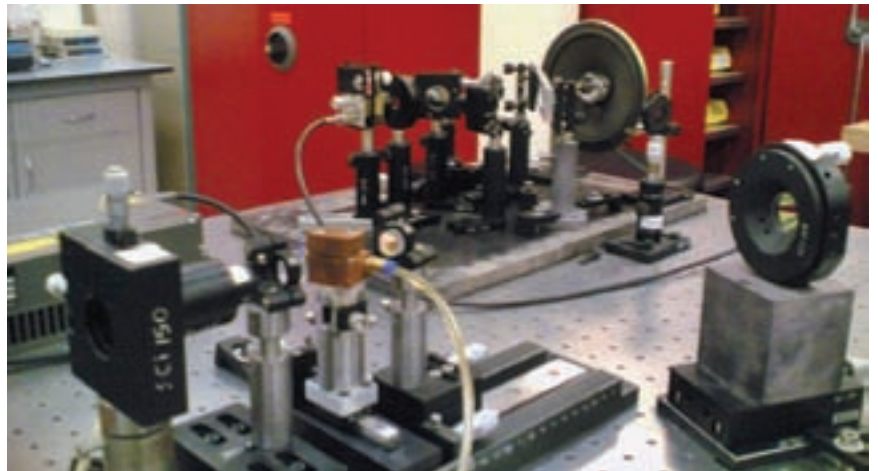


Şekil 8: Laboratuvarımızda kurulan Cr:ZnSe lazer düzeneği.

gelen fotonlar, krom iyonlarının uyarılı ışımaya yoluyla yönlü foton yaymalarını sağlarlar. Eğer pompa ışın yoğunluğu yeterince yüksekse, üst lazer seviyesine çıkarılan iyon sayısı da yüksek olacak ve uyarılı ışımaya sonucunda yeterli optik kazanç elde edilecektir. Yeterli derken neyi kastediyoruz? Optik kazanç yeterli olduğu zaman, kovuk içerisindeki bir döngüde elde edilen güç artışı, ışığın uğradığı kayıplardan (örneğin saçılma ve istenmeyen soğurulma gibi etkilerden dolayı) daha büyük olacak ve optik salınım başlayacaktır. Peki, optik salınım başlayınca kurduğumuz lazerin ışın demetini nasıl kovuk dışına çıkaracağız? Bunu sağlamak için, kovuğun aynalarından bir tanesini (ya da arzu edilirse birden fazlasını) kısmi geçirgen yapmak gerekir. Bu özelliğe sahip olan aynaya kovuğun çıkış aynası denir. Şekil 7(a)'de  $M_4$  aynası kovuğun çıkış aynası. Bu ayna, önüne konacak bir güç ölçerle lazerin ne kadar güç ürettiği ölçülebilir.

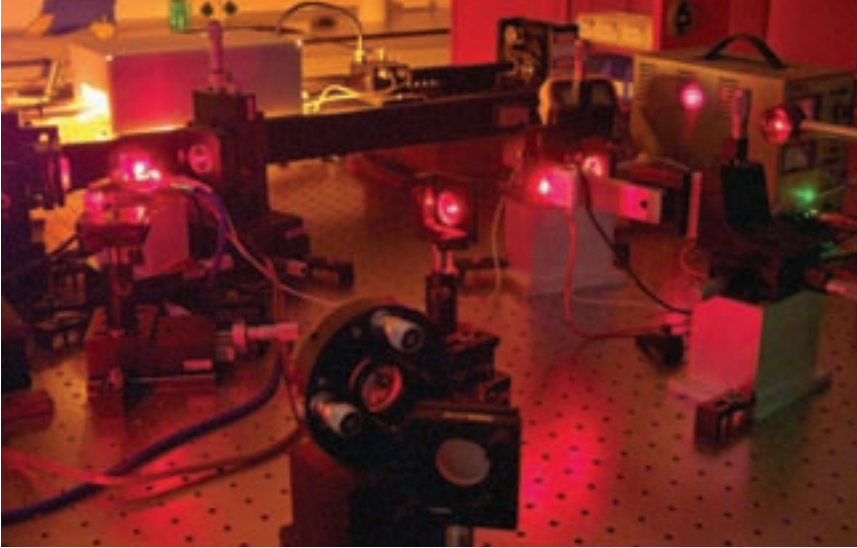
Optik salınım başladıktan sonra, lazerin farklı çalıştırılış biçimleri vardır. Örneğin sürekli dalga durumunda çalıştırıldığı zaman, kristal sürekli olarak sabit bir pompayla uyarılır ve gücü zamana göre değişmeyen bir lazer ışın demeti üretilir. Darbeli olarak çalıştırıldığı zaman, lazerden elde edilen güç sürekli değil, kısa darbeler halinde olur. Darbeli lazerler de, oluşan kazanç dinamiğinin zaman ölçeğine göre farklı gruplara ayrılırlar. Aşağıda sürekli dalga durumunda çalışan Cr:ZnSe lazerini kısaca inceleyeceğiz.

Isıl difüzyonla hazırlanan ve sürekli-dalga durumunda çalıştırılan Cr:ZnSe kristalleri içerisinde bir  $\text{cm}^3$ 'lük birim hacimde yaklaşık olarak  $10^{18}$ - $10^{19}$  mertebesinde krom iyonu bulunur. Sürekli-dalga lazer ışınımı elde etmek için Watt mertebesinde gücü olan pompa lazerleri kullanılabilir. Kovuk içerisindeki yüksek yansıtıcı aynaların yansıtma katsayısı genellikle %99'dan daha yüksektir. Cr:ZnSe lazerlerinde, çıkış aynasının yansıtma oranıysa %80-%98 arasında değiştirilebilir. Genellikle, pompa gücüne de bağlı olan bir optimum çıkış geçirgenliği vardır. Sürekli-dalga Cr:ZnSe lazerinden miliWatt ve Watt mertebesinde güç üretimi mümkündür. Bir lambayla karşılaştırıldığı zaman, toplam güç az görünse de, lazer ışın demetinin yoğunluğu ve parlaklığı çok daha yüksek olabilmekte.



Şekil 9: Laboratuvarımızda kurulan ve 70 femtosaniye süreli optik darbeler üretebilen krom katkılı forsterit lazeri. Lazerin çıkış dalgaboyu  $1.3 \mu\text{m}$  civarındadır.

Son olarak, Cr:ZnSe lazerinin bir başka ilginç özelliğine dikkatinizi çekmek isterim. Bu lazerin merkez çalışma dalgaboyu  $2500 \text{ nm}$  civarında olmasına karşın, çeşitli yöntemlerle çıkış dalgaboyunun  $2000$  ve  $3000 \text{ nm}$  arasında değiştirilebilmekte. Bu tür lazerlere dalgaboyu ayarlanabilen katıhal lazeri denir. Bunun başlıca nedeni krom iyonunun elektronik yapısı. Bilindiği gibi, krom bir geçiş metalidir. Geçiş metal iyonlarında, lazer ışığı üretiminde etkin olan elektron, iyonun içerisinde bulunduğu kristal örgü atomlarıyla kuvvetli bir etkileşim içerisinde bulunur. Bundan dolayı, örgü titreşimleri lazerin geçiş dalgaboyunu değiştirebilmekte ve ışınım bandının genişlemesine sebep olmaktadır. Yazımızın önceki bölümlerinde bahsettiğimiz titanyum-safir lazeri de benzer özelliğe sahip. Bu tür lazerlerde, optik kovuk içerisine dalgaboyu seçici optik elemanlar koyarak, çıkış dalgaboyunu ayarlamak mümkün. Bunun bir yolu, Şekil 7(b)'de gösteriliyor. Cr:ZnSe lazer kovuğunda,  $M_2$  ve  $M_3$  aynaları arasındaki kola bir prizma yerleştirilirse,  $M_2$ 'den gelen ışın demeti içerisindeki farklı renk bileşenleri farklı yönlerde kırılacaktır. Böylece,  $M_3$  aynasını, düzleme dik bir eksen etrafında döndürerek, kovuk içerisindeki döngüyü tamamlayabilen ve dolayısıyla salınabilen ışığın dalgaboyunu ayarlamak mümkün. Deneylerimizde, eniyileştirilmiş Cr:ZnSe örnekleriyle  $1880$  ve  $3100 \text{ nm}$  dalgaboyu aralığında verimli lazer ışınımı elde edilebileceğini gösterdik. Laboratuvarımızda kurulan Cr:ZnSe lazer düzeni Şekil 8'te görülmüştür.



## Katıhal Femtosaniye Lazerleri

Bir önceki bölümde de bahsettiğimiz gibi, geçiş metal iyonu katkılı katıhal ortamlarının, çok geniş ışınım bantları bulunur. Bu tür bir lazeri iki farklı durumda çalıştırmak mümkün. İlkinde, lazer dar bir dalgaboyu aralığında ışınım üretir ve kovuk içerisine yerleştirilen bir dalgaboyu seçici elemanla çıkış dalgaboyu ışınım bandı içerisinde değiştirilebilir. İkinci çalıştırılış biçimindeyse, geniş ışınım bandı aynı anda kullanılarak çok kısa süreli bir optik darbe elde edilebilir. Bunu sağlamak için 'kip kilitleme' adı verilen bir yöntem kullanılır ve pikosaniyeyle femtosaniye zaman ölçeklerinde uzunluğu olan ve tepe gücü çok yüksek optik darbeler üretilebilir.

Kip kilitleme yönteminin temel fikrini anlamak için lazer kovuğuna yine bir göz atalım. Bu kovuğun uç aynaları arasında, sınır şartlarını sağlayan ve frekansı farklı olan birçok elektromanyetik dalga dağılımı oluşabilir. Bunların her birine kip (ya da mod) adı verilir. Ardaşık iki kip arasındaki frekans farkı, kovuğun uzunluğuna bağlıdır. Örnek olarak, 150 cm uzunluğunda, iki düz aynalı bir kovuk içerisinde salınabilen kipler arasında 100 MHz civarında bir frekans farkı olacaktır. Kip kilitleme yöntemleriyle, ışınım bandının altında bulunan kipler, yaklaşık olarak aynı fazla ya da bir başka deyişle eş zamanlı bir şekilde salınma sokulur. Bunun sonucunda, lazer çok kısa süreli darbelerden oluşan bir periyodik darbe treni üretmeye başlar. İki ardaşık darbe arasında-

ki zaman, kovuk içerisindeki bir döngünün süresine eşittir. Yukarıda verilen 150 cm'lik kovuk için bu süre 10 nanosaniyedir. Ne kadar sayıda kipi kilitlenip aynı anda ve senkronize bir şekilde salınacağı, optik kazanç bandının genişliğine bağlıdır. Burada örnek olarak içerisine krom katkılanmış forsterit (Cr:forsterit) ortamını ele alalım. Bu kristal içerisine krom katkılanması zaman, 1.3 mikron dalgaboyu etrafında geniş bir ışınım bandı oluşur. Elde edilebilen bant genişliği 10 terahertz (1 terahertz=10<sup>12</sup> Hertz) civarında olabilir. Bir başka deyişle, aynı anda 100 bin civarında kip kovuk içerisinde salınabilir. Salınabilen kip sayısı arttıkça elde edilen darbe uzunluğu da kısalmır. 10 terahertz bant genişliğine sahip bir darbenin uzunluğu 30-50 femtosaniye civarında olacaktır. Burada, kip kilitleme yöntemini elden geldiğince basitleştirerek anlatmaya çalıştım. Bunu yaparken de kullanılan yöntemlerin ayrıntılarına girmedim. Ayrıca, pratik bir sistemde dikkat edilmesi gereken birçok husus daha vardır. Örneğin kullandığımız kristallerin kırınım endeksi dalgaboyuyla değiştiğinden, ortamdaki geçen çok kısa süreli darbeler genişlemeye uğrayabilir. Bu tür darbe dağılımına neden olabilecek etkileri dengelemek ve en kısa darbeleri elde edebilmek için birçok yöntem kullanılmaktadır. Son olarak, kip kilitleme yönteminin başka çarpıcı bir özelliğine bakalım. Kip kilitleme gerçekleştirildiğinde, lazerden elde edilen ortalama güç yaklaşık olarak aynı düzeyde kalır. Fakat darbelerin tepe gücü, kilitlenen kip sayısı oranında artar. Yine yukarıdaki örneğe dönersek, sü-

rekli-dalga durumunda çalıştırılan bir lazerden yaklaşık olarak 100 miliWatt ortalama güç elde edildiğini varsayalım. 100 bin kipi kilitlendiği durumda, darbe tepe gücü 10 kiloWatt olacaktır. Kip kilitli femtosaniye lazerleriyle kiloWatt ile teraWatt aralığında tepe gücü olan darbeler üretilebilmiştir. Bu tür lazerler çok kısa süreli fotokimyasal olayların ölçümünde, biyomedikal görüntüleme, ve hassas malzeme işlemede kullanılmaktadır. Laboratuvarımızda geliştirdiğimiz ve 1.3 µm dalgaboyunda yaklaşık olarak 70 femtosaniye uzunluğunda darbeler üretebilen Cr:forsterit lazerinin düzeni Şekil 9'da gösterilmiştir.

Alphan Sennaroğlu\*

Lazer Araştırma Laboratuvarı, Fizik Bölümü,  
Koç Üniversitesi

\* Prof. Dr. Alphan Sennaroğlu Koç Üniversitesi'ne 1994 yılında katılmış ve Fizik ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümlerinde öğretim üyesi olarak görev yapmıştır. Araştırma konuları arasında katıhal lazerleri, spektroskopi, ve femtosaniye optiği yer almaktadır.

### Kaynaklar

- T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature* 187(4736), 493-494 (1960).
- R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Solty, and R. O. Carlson, "Coherent light emission from GaAs p-n junctions," *Phys. Rev. Lett.* 9, 366 (1962).
- R. J. Glauber, "Quantum Theory of Optical Coherence," *Phys. Rev.* 130, 2529-2539 (1963).
- F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.* 17, 423 (1970).
- A. Zewail, "Femtochemistry: Atomic-scale dynamics of the chemical bond," *JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY A* 104, 5660-5694 (2000).
- A. Giesen, "High-Power Thin-Disk Lasers," presented at the Advanced Solid-State Photonics 2007, Vancouver, British Columbia, Canada, 2007.
- V. Chvykov, P. Rousseau, S. Reed, G. Kalinchenko, and V. Yanovsky, "Generation of 10(11) contrast 50 TW laser pulses," *Opt. Lett.* 31, 1456-1458 (2006).
- "National Ignition Facility, web sitesi," <http://www.llnl.gov/nif>.
- S. Bahk, P. Rousseau, T. Planchon, V. Chvykov, G. Kalinchenko, A. Maksimchuk, G. Mourou, and V. Yanovsky, "Characterization of focal field formed by a large numerical aperture paraboloidal mirror and generation of ultra-high intensity (10(22) W/cm<sup>2</sup>)," *APPLIED PHYSICS B-LASERS AND OPTICS* 80, 823-832 (2005).
- G. J. Tearney, M. E. Brezinski, B. E. Bouma, S. A. Boppart, C. Pitris, J. F. Southern, and J. G. Fujimoto, "In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography," *Science* 276, 2037-2039 (1997).
- V. Knappe, F. Frank, and E. Rohde, "Principles of lasers and biophotonic effects," *Photomedicine and Laser Surgery* 22, 411-417 (2004).
- T. Fortier, A. Bartels, and S. Diddams, "Phase-stabilized ultrafast lasers signal new era in measurement and research," *Laser Focus World* 42, 65 (2006).
- J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," *Proceedings of the Royal Society of London* 13, 531-536 (1863-1864).
- A. Pais, *Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, Oxford, 1982). U. Demirbas, A. Sennaroğlu, and M. Somer, "Synthesis and characterization of diffusion-doped Cr<sup>2+</sup>:ZnSe and Fe<sup>2+</sup>:ZnSe," *Optical Materials* 28, 231-240 (2006).
- A. Sennaroğlu, U. Demirbas, A. Kurt, and M. Somer, "Concentration dependence of fluorescence and lasing efficiency in Cr<sup>2+</sup>:ZnSe lasers," *Optical Materials* 29, 703-708 (2007).
- U. Demirbas and A. Sennaroğlu, "Intracavity-pumped Cr<sup>2+</sup>:ZnSe laser with ultrabroad tuning range between 1880 and 3100 nm," *Optics Letters* 31(15), 2293-2295 (2006).
- A. M. Kowalevicz, V. Sharma, E. P. Ippen, F. J. G., and K. Minoshima, "Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator," *Optics Letters* 30, 1060-1062 (2005).