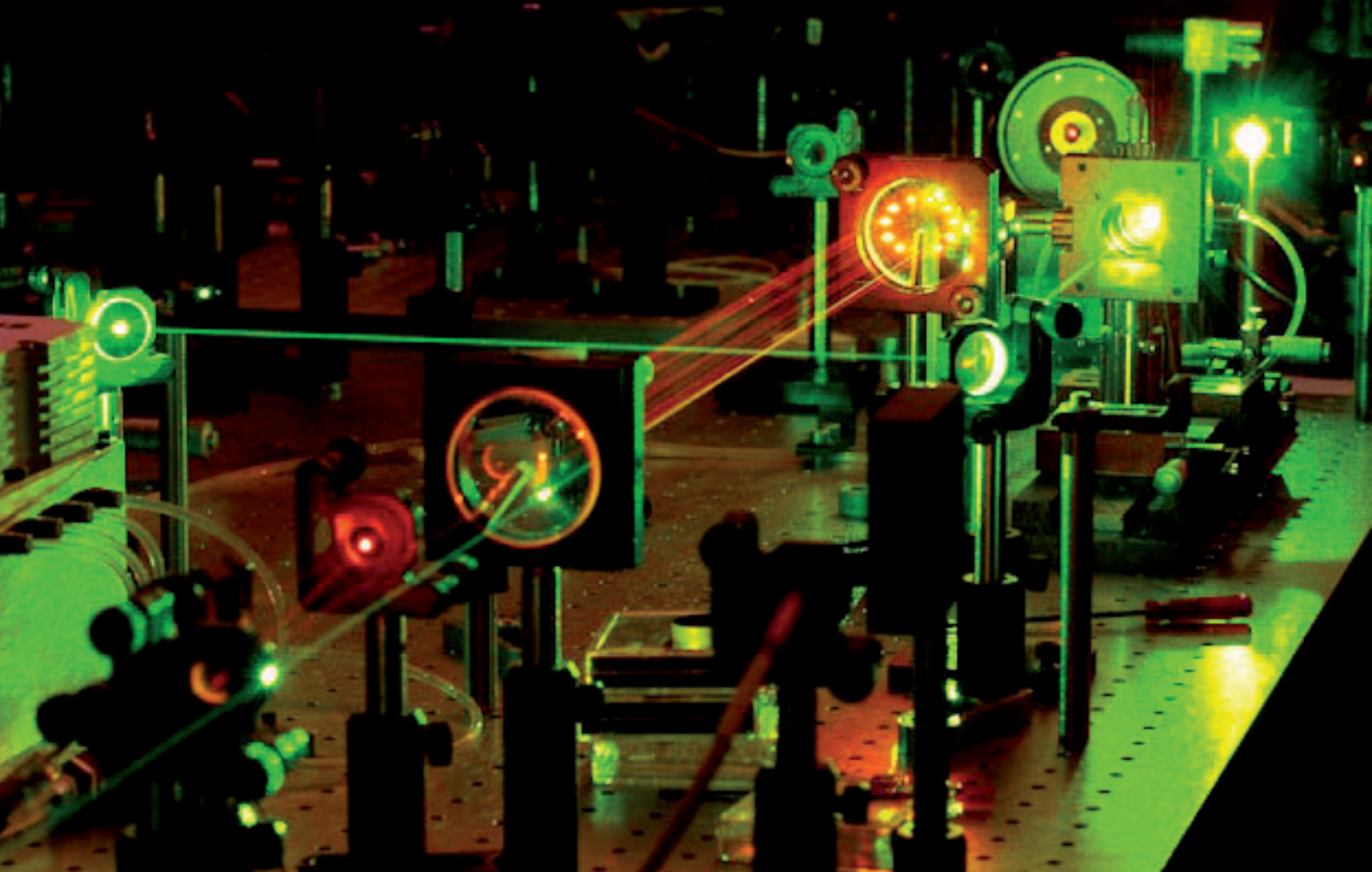


Katıhal Femtosaniye Lazerleri

Femtosaniye lazerleri, uzunluğu femtosaniye (1 femtosaniye= 10^{-15} saniye, bir başka deyişle saniyenin katrilyonda veya 1000 trilyonda birine karşı gelen zaman aralığı) mertebesinde olan optik darbe üretiminde kullanılır. Bu tür lazerlerin kullanım alanları arasında, biyomedikal görüntüleme, çok hızlı fotokimyasal olayların ölçümü, hassas malzeme işleme, faz uyumlu x-ışını üretimi ve metrolojik uy-

gulamalar (örneğin hassas frekans ve zaman ölçümü) yer almaktadır. Geçtiğimiz 50 yıllık dönemde, yeni femtosaniye lazerlerinin geliştirilmesi, fotonik konusunun önemli alt dalları arasında her zaman yer almıştır. Bunun başlıca nedeni, birçok teknolojik ve bilimsel uygulamada, belli bir dalgaboyunda çalışan ve kısa süreli darbe üretebilen lazer sistemlerine gereksinim duyulmasıdır. Örneğin, biyomedikal doku gö-



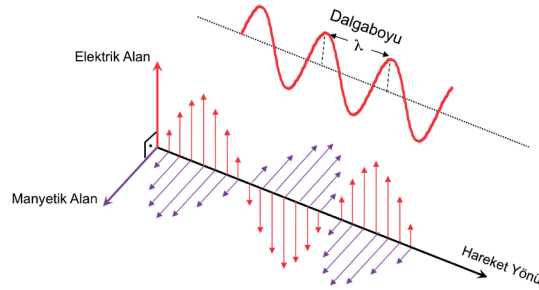
rüntülemeyen bir örnek verecek olursak, kullanımı artmakta olan çok foton mikroskopisi sistemlerinde, yakın kızılaltı dalgaboylarında (800-1400 nm) çalışan lazerler kullanıldığında, doku içerisindeki saçılmanın en aza indirgenemediğini, daha yüksek çözünürlükte ve derinden görüntü alınabildiğini görüyoruz. Ayrıca, bu sistemlerde, çok foton soğurma verimini yüksek tutmak için, yeşinliği (şiddeti) yüksek olan lazer ışınımı tercih edilmektedir. Bu talepten dolayı, yakın kızılaltı bölgesinde çalışan verimli, düşük maliyette femtosaniye lazerlerinin geliştirilmesi konusunda yoğun çalışmalar sürdürülmektedir. Femtosaniye darbe üretmek için katı, sıvı veya gazdan oluşmuş optik kazanç ortamları kullanmak mümkündür. Ancak, pratik uygulamalarda kullanılacak lazer sistemlerinin kimyasal kararlılık, uzun çalışma ömrü, mekanik dayanıklılık gibi özelliklere de sahip olması tercih edilir. Bu şartları sağlayabilen sistemlerin başında yarıiletken, fiber ve katıhal lazerleri gelmektedir.

Bu yazımızda, femtosaniye katıhal lazerlerinin genel özelliklerini, çalışma prensiplerini ve tasarım esaslarını ele alacağız. Femtosaniye lazerlerinin ayrıntılarına girmeden önce, lazerlerin değişik çalıştırılış durumları konusuna kısaca değinelim. Lazerler, ürettikleri ışığın zamanla değişimine göre iki gruba ayrılır: Sürekli-dalgalar lazerleri ve darbeleri lazerler. Sürekli-dalgalar lazerlerinden elde edilen güç, zamana göre yaklaşık olarak sabit kalır. Yaklaşık, çünkü önlenemeyen gürültü kaynaklarından dolayı çıkış gücünde az da olsa daima salınımlar olabilir. Oysa, darbeleri lazerlerde, üretilen ışık kısa süreli darbeler şeklinde rezonatörden çıkar. Değişik yöntemler kullanarak lazerlerden ışık darbeleri üretmek mümkündür. Femtosaniye süreli darbe üretmek için kip kilitleme adı verilen yöntem kullanılır. Kip kilitleme femtosaniye lazerleri ile tepe güçleri kiloWatt (10^3 W) ile petaWatt (10^{15} W)⁷ aralığında olan darbeler üretilebilir. Kip kilitleme yönteminin ayrıntılarına geçmeden önce, ışığın elektromanyetik dalga özelliklerine ve genel lazer mimarisine kısaca bakalım.

Işığın Elektromanyetik Dalga Özellikleri

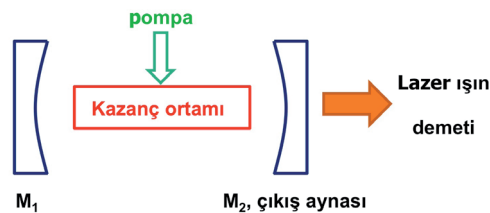
Klasik elektromanyetik kuramından da bildiğimiz gibi ışık ilerlerken dalga özellikleri gösterir. Buna göre, ışık dalgaları, birbirine dik olan ve hem zamanla hem de konumla değişen elektrik ve manyetik alanlardan oluşur. Elektromanyetik dalga adı verilen bu dalgalar boşlukta 3×10^8 m/s hızında ilerler. Bir başka deyişle, 1 saniyede 300,000 km kat ederler. Yine bu hızın ne kadar büyük olduğunu görmek için şu çarpı-

cı örneğe bakalım. Dünya'nın ekvator çevresi 40,000 km'dir. Işık hızında hareket eden bir elektromanyetik dalga bir saniyede, Dünya çevresinde yaklaşık 7 dönü tamamlayabilir.



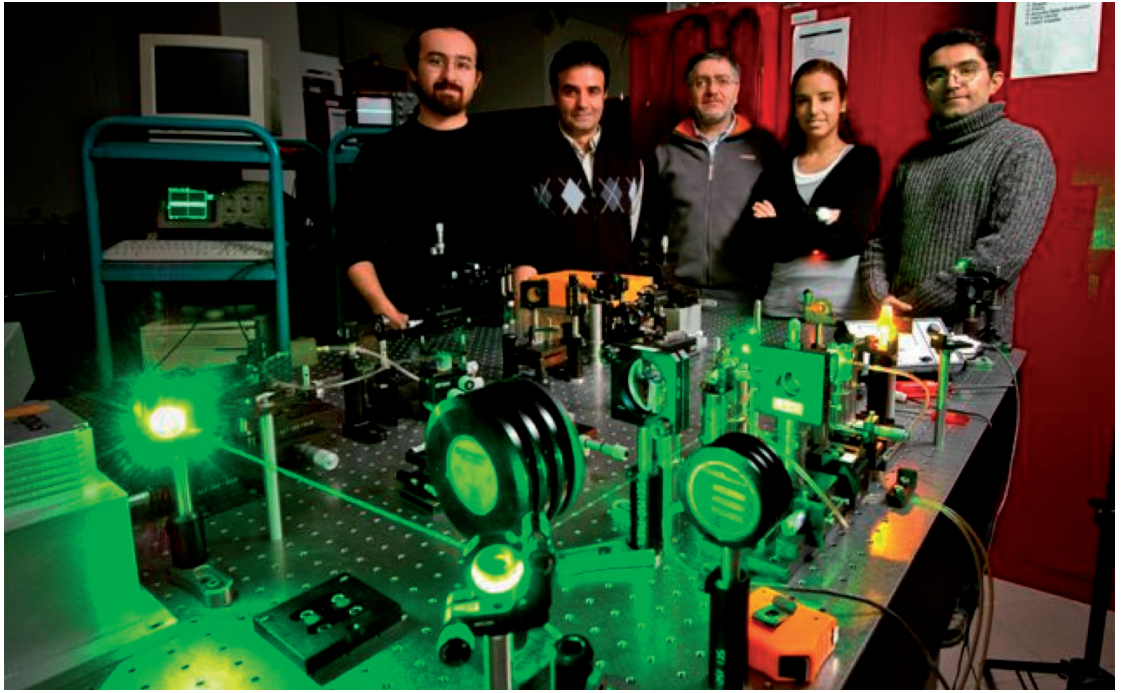
Şekil 1. Boşlukta hareket eden bir elektromanyetik dalga için elektrik ve manyetik alanlarının konuma göre değişimi. Dalga şeklinin tekrarlandığı en küçük mesafeye dalgaboyu (λ) denir.

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 konuma göre değişimi gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi, dalganın şekli belli bir mesafeden sonra periyodik olarak tekrarlanmaktadır. Dalga şeklinin tekrarlandığı en küçük uzunluğa dalgaboyu (λ) adı verilmektedir. Sabit bir konumda duran bir gözlemci, hareket eden dalganın birim zamanda f tane tam salınımının yanından geçtiğini görecektir. f 'ye frekans adı verilmektedir. f 'ye Hertz birimiyle ölçülmektedir. Boşlukta, frekans (f) ve dalgaboyu (λ) arasındaki ilişki, $c = f\lambda$ denklemiyle verilir. Burada c ışığın boşluktaki hızıdır. Görünür bölgedeki farklı renkler, farklı dalgaboylarına sahip elektromanyetik dalgalara karşılık gelmektedir. Örneğin mavi ışığın ortalama dalgaboyu 400-450 nanometre (1 nanometre= 10^{-9} metre, yani bir metrenin milyarda biri) civarındayken, kırmızı ışığın dalgaboyu 650 nanometre kadardır. Kızılaltı (infrared) ise dalgaboyu 700 nanometre ile yaklaşık olarak 300 mikron (1 mikron= 10^{-6} metre) arasında olan ve gözle göremediğimiz elektromanyetik dalga bölgesidir. Yukarıda verilen denklemi kullanarak, yakın kızılaltı bölgesinde, dalgaboyu 1000 nm olan bir ışık dalgasının frekansının 3×10^{14} 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 geçer.



Şekil 2: Genel bir lazer kovuk düzeni
M1: yüksek yansıtıcı ayna
M2: çıkış aynası

Şekil 3: Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı'nda kurduğumuz femtosaniye Ti:safir düzeneği ve proje ekibimiz (soldan sağa: Hüseyin Çankaya, Alphan Sennaroğlu, Adnan Kurt, Natali Çizmeciyan ve Arif Mustafazade)



Lazer Mimarisine Genel Bakış

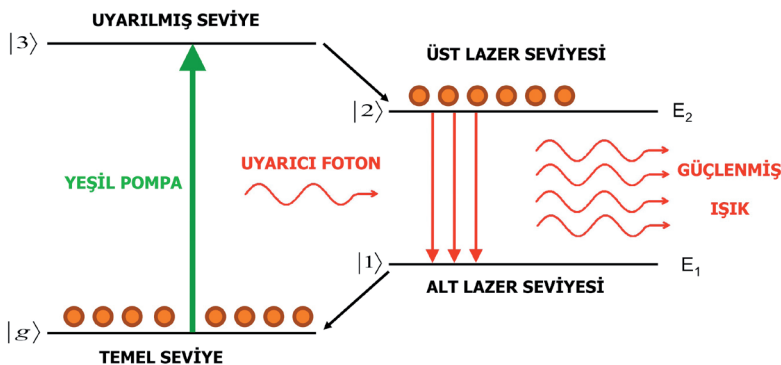
Lazer, optik frekanslarda eş evreli ışınım üretimi için kullanılan bir salıngaçtır (osilatör) ve dört ana öğeden oluşur. Bunlar 1) optik kazanç ortamı, 2) optik kovuk veya diğer adıyla rezonatör, 3) uyarı (pompa) kaynağı ve 4) çıkış aynasıdır. Dolayısıyla, çalışma prensibi, örneğin sayısal saatlerin içerisinde bulunan kuvarz salıngaçtan hiç de farklı değildir. Her salıngaçta olduğu gibi, salınım elde etmek için kazanç ile artı geribeslemenin birleştirilmesi gerekir. Bunun optik dalgaboylarında sağlanması için, Şekil 2'de gösterilen lazer düzeneği kullanılmaktadır. Optik kazanç ortamı, yüksek yansıma katsayısı olan aynalardan (M_1 ve M_2) kurulu optik kovuk içerisine yerleştirilir. Optik kazanç elde etmek için, kazanç ortamını dışardan bir enerji kaynağı (Şekil 2'de pompa olarak gösterilmiş) ile uyarmak gerekir. Bu uyarı çeşitli şekillerde (elektiriksel, optik veya başka türlü) yapılabilir. Kazanç ortamından geçerken güçlenen sinyalin bir kısmı, aynalar tarafından ortama tekrar gönderilir. Kovuk içe-

risindeki ışık, aynalar arasında birçok kez yansırarak güçlenir. Eğer bir döngüdeki optik kazanç, kayıplardan daha fazla ise, optik salınım başlar ve yüksek parlaklığa sahip, yönlü lazer ışığı üretilebilir. Bu ışık, yukarıda bahsettiğimiz elektromanyetik dalga özelliklerine sahiptir. Kısacası lazer, optik kazanç ve artı geri beslemenin birleşimi sonucunda çalışan bir optik salıngaç yani diğer adıyla osilatördür. Elde edilen ışınımın en önemli özellikleri arasında, zaman ve uzayda eş evrelilik, yönlülük ve yüksek parlaklık sıralanabilir. Örnek olarak, Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı'nda kurmuş olduğumuz femtosaniye Ti:safir lazer düzeneği Şekil 3'de gösterilmiştir.

Katihal Lazerleri ve Optik Kazanç

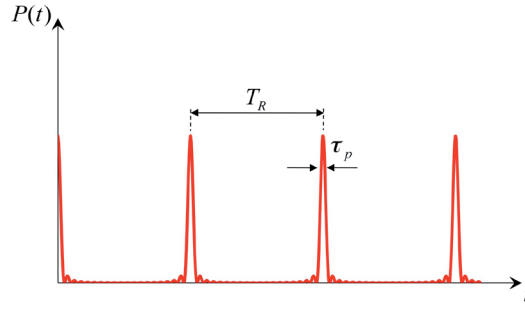
Katihal lazerlerinde kullanılan kazanç ortamının fiziksel özellikleri yarıiletken, sıvı, ve gaz lazerlerinininkinden farklıdır. Bu tür lazerlerde optik kazanç elde etmek için, içerisine ışık veren iyon katkılanmış kristal, seramik veya camlar kullanılır. 1960 yılında ilk icat edilen yakut lazeri de katihal lazerleri grubuna aittir. Yakut, safir, peridot gibi mücevher taşlarının yanısıra yüksek saflıkta birçok sentetik kristal, seramik ve cam da bu amaçla kullanılmaktadır. Ortama Er^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} gibi nadir toprak iyonları veya Cr^{4+} , Ti^{3+} , Cr^{2+} gibi geçiş metal iyonları katkılanmış zaman, geniş bir dalgaboyu aralığında lazer ışını üretmek mümkündür. Bu tür "dalgaboyu ayarlanabilir katihal lazeri" ile birazdan değineceğimiz gibi, femtosaniye darbe üretimi de mümkündür.

Şekil 4: Dört enerji düzeyi olan bir atomik sistemde, uyarılı ışımaya optik kazanç



Yukarıda lazerin genel mimarisini anlatırken optik kazanç ortamından bahsettik fakat ayrıntılarına girmedik. Optik kazancın nasıl ortaya çıktığını anlamak için Ti:safir kristalini ele alalım. Saf safir kristalinde hiçbir katkı bulunmadığı durumda saydamken, içerisine az miktarda titanyum iyonu katıldığında zaman pembemsi bir renk alır. Bu renk değişimini, çok temel kuantum mekanik ilkeleri ile anlamamız mümkündür. Serbest titanyum iyonunda üst üste örtüşen enerji seviyeleri, kristal içerisine girdikten sonra komşu iyonlarla etkileşim sonucunda ayrılmakta, bu enerji seviyeleri arasında da optik geçişler ortaya çıkmaktadır. Oluşan enerji seviyelerinin yapısı çok basitleştirilmiş olarak Şekil 4'de gösterilmiştir. Safir içerisindeki titanyum iyonları, üst enerji seviyelerine mavi ve yeşil dalgaboylarındaki fotonları soğurarak çıkar. Görünür bölgedeki tayfin sadece kırmızı kısmı kristal tarafından soğrulmadığından, 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 lazer ile gerçekleştirebiliriz. Buna optik pompalama adı verilir. Optik pompalama sonucunda, temel enerji düzeyindeki titanyum iyonları önce üst enerji seviyelerine çıkarılır. Üst enerji seviyesindeki iyonlar, ortamdan geçmekte olan fotonlar tarafından uyarılarak alt enerji seviyesine geçebilir ve böylece foton salımı gerçekleşir. İlk kez Einstein tarafından 1916-17 yıllarında açıklanan bu etkiye "uyarılı ışımaya" adı verilmektedir. Uyarılı ışımaya gerçekleşebilmesi için uyarıcı fotonun enerjisinin, üst ve alt seviyeler arasındaki enerji farkına ($E_2 - E_1$) yakın olması gerekir. Kuantum mekaniğin 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 değişle, frekans arttıkça, foton enerjisi de artmaktadır. Dolayısıyla, soğurulan veya yayılan ışık fotonunun rengini, enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı belirleyecektir. Ti-safir örneğinde, $|g\rangle$ ve $|3\rangle$ seviyeleri arasında geçiş elde etmek için mavi veya yeşil bölgedeki fotonlar kullanılmaktadır. Buna karşın, lazer geçişinden elde edilen ve daha düşük bir enerjiye sahip olan fotonlar, kırmızı veya yakın kızılaltı bölgesinde (690-1050 nm) yer alır.

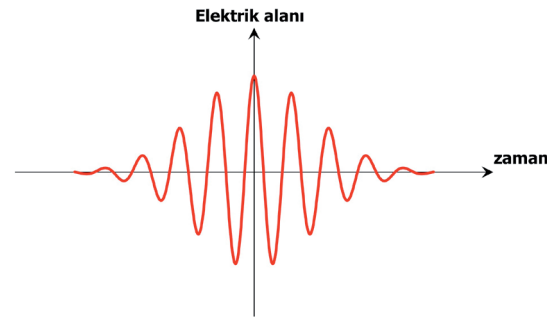
Uyarılı ışımaya sonucunda yayılan fotonların frekansı ve yönü, uyarıcı foton ile aynı olduğundan, ortamdan geçen ışın yoğunluğu artmış olur. Bu etkiye "uyarılı ışımaya ile optik kazanç" adı verilmektedir. "Lazer" adı da bu etkinin İngilizcesi olan "light amplification by stimulated emission of radiation"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



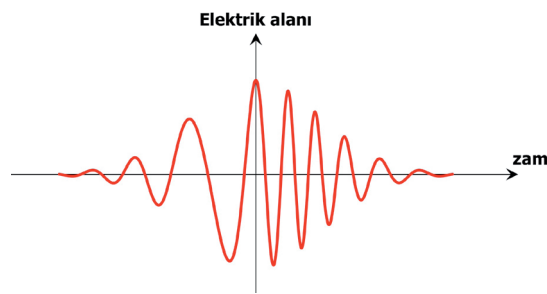
Şekil 5: Kip kilitli bir lazerin ürettiği optik darbe katarı. TR ardışık iki darbe arasındaki süre, τ_p ise darbe genişliğidir.

Kip Kilitleme ve Femtosaniye Lazerleri

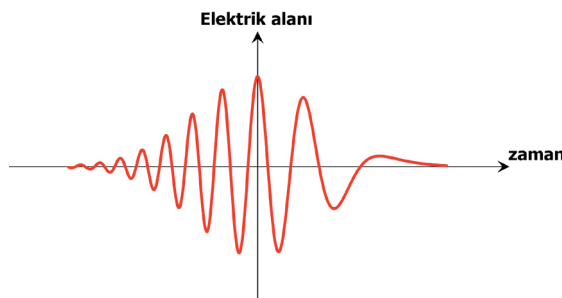
Önceki bölümde de bahsettiğimiz gibi, geçiş metal iyonu katkılı katıhal ortamlarının ışınım bantları çok geniştir. Bu tür bir lazeri iki farklı biçimde çalıştırmak mümkündür. İlkinde, lazer dar bir dalgaboyu aralığında ışınım üretir ve kovuk içerisine yerleştirilen bir dalgaboyu seçici eleman ile çıkış dalgaboyu ışınım bandı içerisinde değiştirilir. İkinci çalıştırılış biçiminde ise, geniş ışınım bandı aynı anda kullanılarak çok kısa süreli bir optik darbe katarı elde edilir. Bunu sağlamak için "kip kilitleme" adı verilen yöntem kullanılır ve uzunluğu pikosaniye ile femtosaniye zaman ölçeklerinde olan, yüksek tepe gücüne sahip optik darbeler üretilebilir.



Şekil 6: Birçok kipin bileşeninden oluşan bir optik darbenin zamana bağlı elektrik alan dağılımı



Şekil 7: Kerr ortamında ilerlerken, kendi başına faz kiplemesi sonucunda değişime uğrayan optik darbenin elektrik alan dağılımı



Şekil 8: Dağılımı değeri eksi olan bir ortamda ilerlerken değişime uğrayan optik darbenin elektrik alan dağılımı



Prof. Dr. Alphan Sennaroğlu, lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini Cornell Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladıktan sonra, 1994 yılında Koç Üniversitesi'ne katılmış ve Lazer Araştırma Laboratuvarı'nı kurmuştur. Halen Koç Üniversitesi Fizik ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümlerinde öğretim üyesi olarak görevini sürdürmektedir. Araştırma konuları arasında katı hal lazerleri, femtosaniye lazerleri, doğrusal olmayan optik ve spektroskopik yer almaktadır. Prof. Sennaroğlu Türkiye Bilimler Akademisi asosiy üyesidir.

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 (veya mod) adı verilir. Ardışık iki kip arasındaki frekans farkı kovuğun uzunluğuna bağlıdır. Örneğin 150 cm uzunluğunda, iki düz aynalı bir kovuk içerisinde salınabilen ardışık kipler arasında 100 MHz civarında bir frekans farkı vardır. Kip kilitleme yöntemleri ile, ışınım bandının altında bulunan kipler, yaklaşık olarak aynı fazla veya bir başka deyişle eş zamanlı salınımaya sokulur. Dolayısıyla, "kilitleme" teriminden kast edilen, kovuk içerisindeki her elektromanyetik kipi fazının kilitlemesi veya bir başka deyişle sabit tutulmasıdır. Bunun sonucunda, lazer çok kısa süreli darbelerden oluşan bir periyodik darbe katarı üretmeye başlar. Kip kilitli bir lazerin ürettiği darbe katarı Şekil 5'te gösterilmiştir. İki ardışık darbe arasındaki zaman (Şekil 5'te T_R olarak gösterilmiş), kovuk içerisindeki bir döngünün süresine eşittir. Yukarıda verilen 150 cm'lik kovuk için bu süre 10 nanosaniyedir. Yine Şekil 5'te gösterilen τ_p darbe genişliğidir, genellikle pikosaniye-femtosaniye aralığındadır.

Elde edilebilecek en kısa darbe uzunluğu, optik kazanç bandının spektral genişliğine, kovuk içerisinde kullanılan aynaların yansıma aralığına, ortamdaki doğrusal olmayan etkilere ve ortam kırınım endeksinin dalgaboyuna bağlılığından kaynaklanan dağılım miktarına bağlıdır. Belli bir kazanç bant aralığı olan lazer ile elde edilebilecek en kısa darbeye, dönüşüm sınırlı darbe adı verilmektedir. Örneğin 2400 nm civarında çalışan Cr:ZnSe lazeri için, dönüşüm sınırlı optik darbe uzunluğu 20 femtosaniye civarındadır.

Dağılımın ve doğrusal olmayan etkilerin darbe uzunluğu üzerindeki etkisine kısaca değinmek için, femtosaniye süreli bir optik dalganın kazanç ortamı içerisindeki ilerleyişine bakalım. Birçok kipi bileşeninden oluşan bu darbenin elektrik alanı Şekil 6'da gösterilmiştir. Görüleceği gibi taşıyıcı frekansında olan hızlı salınımlar, darbenin şeklini belirleyen bir zarf altında yer alır. Bu darbe, kazanç ortamında ilerlerken birçok etki altında şekil değiştirebilir. Bu etkilerden

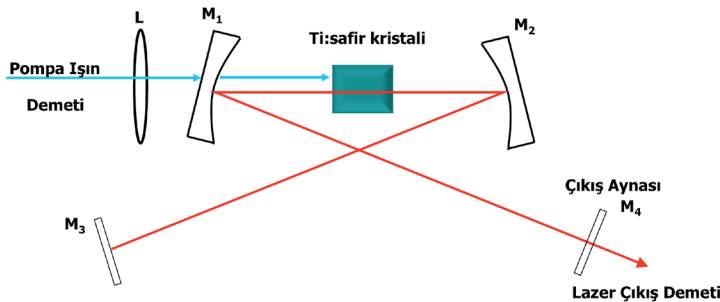
önemli olan ikisine burada kısaca bakacağız. Birincisi, ortamın doğrusal olmayan kırınım endeksidir. Bu etki aynı zamanda Kerr etkisi olarak da bilinir. Darbeler Kerr ortamında hareket ederken, kendi başına faz kiplenmesi (*self-phase modulation*, SPM) adı verilen etki altında, yerel zamana bağlı bir faz değişimi kazanır. Buna göre, darbenin öncü salınımlarının frekansı düşerken, artçı salınım frekansı yükselir. Bu etki Şekil 7'de gösterilmiştir. SPM etkisi darbe şeklinin bozulmasına neden olur. Öte yandan, ortamın kırınım endeksindeki frekans bağımlılığı eksi grup gecikmesine neden oluyorsa, bunun tam tersi ortaya çıkar ve darbenin öncü salınımlarının frekansı yükselir. Bu da Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu durumda, malzemenin dağılım değeri eksi olur. Dolayısıyla, SPM'yi dengelemek için kontrollü olarak bir miktar eksi dağılım kullanıldığı zaman bu iki etki birbirini dengeler ve darbe şekil değiştirmeden ilerleyebilir. Doğrusal olmayan bir ortamda, şeklini koruyarak ilerleyen darbeler soliton adı verilir. SPM ve eksi dağılımı dengeleyerek darbe üretimine soliton kip kilitleme adı da verilmektedir. Soliton kip kilitleme yöntemi ile femtosaniye darbe üretimi çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Son olarak, kip kilitleme yönteminin başka bir çarpıcı özelliğine bakalım. Kip kilitleme gerçekleştirildiğinde, lazerden elde edilen ortalama güç yaklaşık olarak aynı mertebede kalır. Fakat darbelerin tepe gücü, kilitlenen kip sayısı oranında artar. Örneğin, sürekli-dalga durumunda çalıştırılan bir lazerden yaklaşık 100 miliWatt ortalama güç elde edildiğini varsayalım. 100 bin kipi kilitlendiği durumda, darbe tepe gücü 10 kiloWatt olacaktır. Bu tepe güçleri ile birçok doğrusal olmayan optik etkiyi (örneğin harmonik üretimi) gözlemek mümkündür.

Femtosaniye Kathal Lazerlerinin Tasarım Esasları

Şimdi, yukarıda anlatmaya başladığımız Ti:safir örneğine devam edip femtosaniye lazerinin pratikte nasıl kurulduğuna kısaca bakalım. Önceki bölümde, lazerin sürekli-dalga ve darbeli olmak üzere iki tür çalıştırılış biçimi olduğunu söylemiştik. Önce lazerin sürekli-dalga durumunda çalıştırılması gerekir. Böyle bir düzenek Şekil 9'da gösterilmiştir. Öncelikle, optik kazanç için kullanılacak olan Ti:safir kristalinin yüksek yansıtıcı aynalardan oluşan bir optik kovuğa yerleştirilmesi gerekir. Burada değişik optik kovuk tasarımları kullanılmaktadır. Bu tür lazerlerin yapımında yaygın olarak kullanılan ve Şekil 9'da gösterilen kovuk, 4 aynadan oluşur. Ti:safir kristali iç bükey M_1 ve M_2 aynalarının arasına yerleştirilir. Temel seviyedeki iyonla-

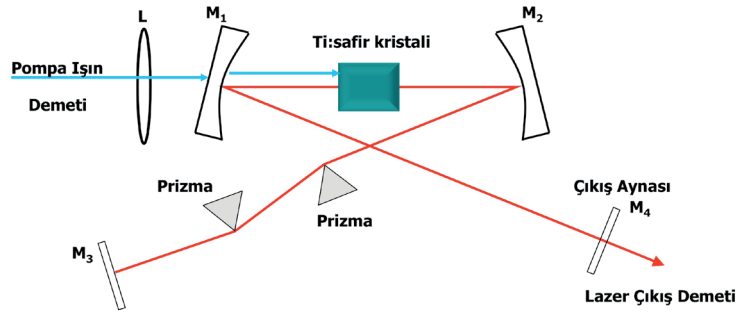
Şekil 9: Dört yansıtıcı aynadan oluşmuş bir sürekli-dalga lazer kovuğu



rın üst lazer seviyesine çıkarılması ve optik kazanç elde etmek için, pompa ışın demeti L merceği ile kristal içerisine odaklanır. Odaklama sonucunda, kristal içerisinde daha yüksek pompa ışın yoğunluğu ve optik kazanç miktarı elde etmek mümkündür. Ti:safir kristalini uyararak için genelde 532 nm civarında çalışan yeşil lazerler kullanılır. Uyarılmış Ti:safir kristalinin yaydığı fotonlar 650-1050 nm arasındadır. M_1 aynasının, aynı anda hem 532 nm dalgaboyundaki ışığı geçirebilmesi hem de 700-1000 nm aralığındaki ışığı %100'e yakın bir oranda yansıtması gerekir. Özel kaplama yöntemleri kullanarak bu tür aynaların yapımı mümkündür. 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 tamamlayabilir. Bunu sağlamak için içbükey aynaların (M_1 ve M_2) odak uzaklıklarının 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 gelen fotonlar, titanyum iyonlarının uyarılı ışımaya yoluyla yönlü foton yaymasını sağlar. Eğer pompa ışın yoğunluğu yeterince yüksekse, kovuk içerisindeki bir döngüde elde edilen güç artışı, ışığın uğradığı kayıplardan (saçılma ve istenmeyen soğurulma gibi etkilerden dolayı) daha büyük olacak ve optik salınım başlayacaktır. Optik salınım başlayınca kurduğumuz lazerin ışın demetini kovuk dışına çıkarmak için kovuğun uç aynalarından bir tanesini kısmi geçirgen yapmak gerekir. Bu özelliğe sahip olan aynaya kovuğun çıkış aynası denir. Şekil 9'daki M_4 aynası kovuğun çıkış aynasıdır. Eğer uyarı için kullanılan lazer sürekli-dalga durumunda çalışıyorsa, lazerin çıkışı da sürekli-dalga biçiminde olacaktır.

Femtosaniye süreli darbe üretmek için, Şekil 10'da gösterilen düzenek kullanılabilir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi, soliton darbeleri üretmek için, ortamdaki doğrusal olmayan faz birikimini dengelemek gerekir. Bunun için gerekli eksi dağılımı kovuk içerisine katmak için prizma çifti kullanılabilir. Prizma çiftinin arasındaki mesafe veya ışığın prizmalar içerisindeki yol miktarı değiştirilerek eksi dağılım miktarı ayarlanabilir. Özel tasarlanmış yalıtkan katmanlardan oluşmuş aynalar ile de eksi dağılımı üretmek veya belli bir dağılımı değerini elde etmek mümkündür.

Femtosaniye darbe üretimini başlatmak için yine Kerr etkisinden faydalanabiliriz. Buna Kerr odaklamalı kip kilitleme adı verilir. Bu yöntemde, ortam içerisindeki pompa ve lazer ışın demetlerinin odaklanması hassas bir şekilde ayarlanır ve odaklanan lazer ışın demetinin daha fazla kazanç görmesi sağlanır. Kerr odaklanma miktarı da lazerin yoğunluğu ile art-



Şekil 10 Kerr odaklama yöntemiyle femtosaniye darbe üretiminde kullanılan ve dört yansıtıcı aynadan oluşmuş lazer kovuğu

tığından, bu ayar dikkatli bir şekilde yapıldığında, lazerin kip kilitli konumda çalışması başlatılabilir. Burada bahsettiğimiz Kerr odaklamalı kip kilitlemenin yanı sıra birçok başka darbe üretim yöntemi de bulunmaktadır.

Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı'nda farklı birçok katıhal femtosaniye lazeri ile araştırmalar sürdürülmektedir. Üzerinde çalıştığımız kip kilitli lazerler arasında Nd:YVO₄, Cr:forsterite, Ti:safir ve Cr:ZnSe lazerleri bulunmaktadır. Geçtiğimiz yıl içerisinde Natali Çizmeciyan, Hüseyin Çankaya ve Adnan Kurt ile ortak yapmış olduğumuz bir deneysel çalışmada, Kerr odaklama yöntemini kullanarak Cr:ZnSe lazeri ile 2400 nm dalgaboyunda (yani orta kızılaltı bölgesinde) yaklaşık 100 femtosaniye genişliği olan optik darbeler ürettik. Yine geçtiğimiz yıl kurmuş olduğumuz çok yansımali kovuk içeren Cr:forsterite lazeri ile 1270 nm dalgaboyunda 90 femtosaniye genişliğinde darbeler üretebildik. Yakın ve orta kızılaltı bölgesinde çalışan femtosaniye lazerlerinin, önümüzdeki yıllarda verimli yüksek harmonik ve x-ışını üretiminde yaygın olarak kullanılması beklenmektedir.

Kaynaklar

- Huang, D., Swanson, E. A., Lin, C. P., Schuman, J. S., Stinson, W. G., Chang, W., Hee, M. R., Flotte, T., Gregory, K., Puliafito, C. A. ve Fujimoto, J. G., "Optical Coherence Tomography", *Science*, Sayı 254, s. 1178-1181, 1991.
- Sakadzic, S., Demirbas, U., Mempel, T. R., Moore, A., Ruvinskaya, S., Boas, D. A., Sennaroglu, A., Kartner, F. X. ve Fujimoto, J. G., "Multi-photon microscopy with a low-cost and highly efficient Cr:LiCAF laser", *Optics Express*, Cilt 16, Sayı 25, s. 20848-20863, 2008.
- Zewail, A., "Femtochemistry: Atomic-scale dynamics of the chemical bond", *Journal of Physical Chemistry A*, Sayı 104, s. 5660-5694, 2000.
- Schaffer, C. B., Brodeur, A., Garcia, J. F. ve Mazur, E., "Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy", *Optics Letters*, Cilt 26, Sayı 2, s. 93-95, 2001.
- Rundquist, A., Durfee, C. G., Chang, Z. H., Herne, C., Backus, S., Murnane, M. M. ve Kapteyn, H. C., "Phase-matched generation of coherent soft X-rays", *Science*, Cilt 280, Sayı 5368, s. 1412-1415, 1998.
- Udem, T., Holzwarth, R. ve Hansch, T. W., "Optical frequency metrology", *Nature*, Cilt 416, Sayı 6877, s. 233-237, 2002.
- Lazerfest, "Celebrating 50 years of laser innovation," <http://www.lazerfest.org/>.
- Maxwell, J. C., "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", *Royal Society of London Bildiri Kitabı*, 13, s. 531-536, 1863-1864.
- Sennaroglu, A., "Fotonik ve Katıhal Lazerleri", *Tübitak Bilim Teknik Dergisi*, Mart 2007.
- Moulton, P. F., "Spectroscopic and Laser Characteristics of Ti:Al₂O₃", *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, Cilt 3, Sayı 1, s. 125-133, 1986.

- Pais, A., *Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982.
- Einstein, A., "Quantum theory of radiation", *Physikalische Zeitschrift*, Sayı 18, s. 121-128, 1917.
- Krane, K., *Modern Physics*, İkinci Basım, Wiley, 1996.
- Haus, H. A., "Mode-locking of lasers", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Cilt 6, Sayı 6, s. 1173-1185, 2000.
- Spence, D. E., Kean, P. N., Sibbett, W., "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser", *Optics Letters*, Cilt 16, Sayı 1, s. 42-44, 1991.
- Keller, U., Weingarten, K. J., Kartner, F. X., Kopf, D., Braun, B., Jung, I. D., Fluck, R., Honninger, C., Matuschek, N. ve derAue, J. A., "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Cilt 3, Sayı 3, s. 435-453, 1996.
- Haus, H. A., Fujimoto, J. G. ve Ippen, E. P., "Analytic Theory of Additive Pulse and Kerr Lens Mode-Locking", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Cilt 28, Sayı 10, s. 2086-2096, 1992.
- Siegman, A. E. ve Kuzenga, D. J., "Active mode coupling phenomena in pulsed and continuous lasers", *Opto-electronics*, Sayı 6, s. 43-66, 1974.
- Çizmeciyan, M. N., Çankaya, H., Kurt, A. ve Sennaroglu, A., "Kerr-lens mode-locked femtosecond Cr²⁺:ZnSe laser at 2420 nm", *Optics Letters*, Cilt 34, Sayı 20, s. 3056-3058, 2009.
- Çankaya, H., Fujimoto, J. G. ve Sennaroglu, A., "Low-threshold, 12-MHz, multipass-cavity femtosecond Cr⁴⁺:forsterite laser", *Laser Physics*, Cilt 19, Sayı 2, s. 281-284, 2009.