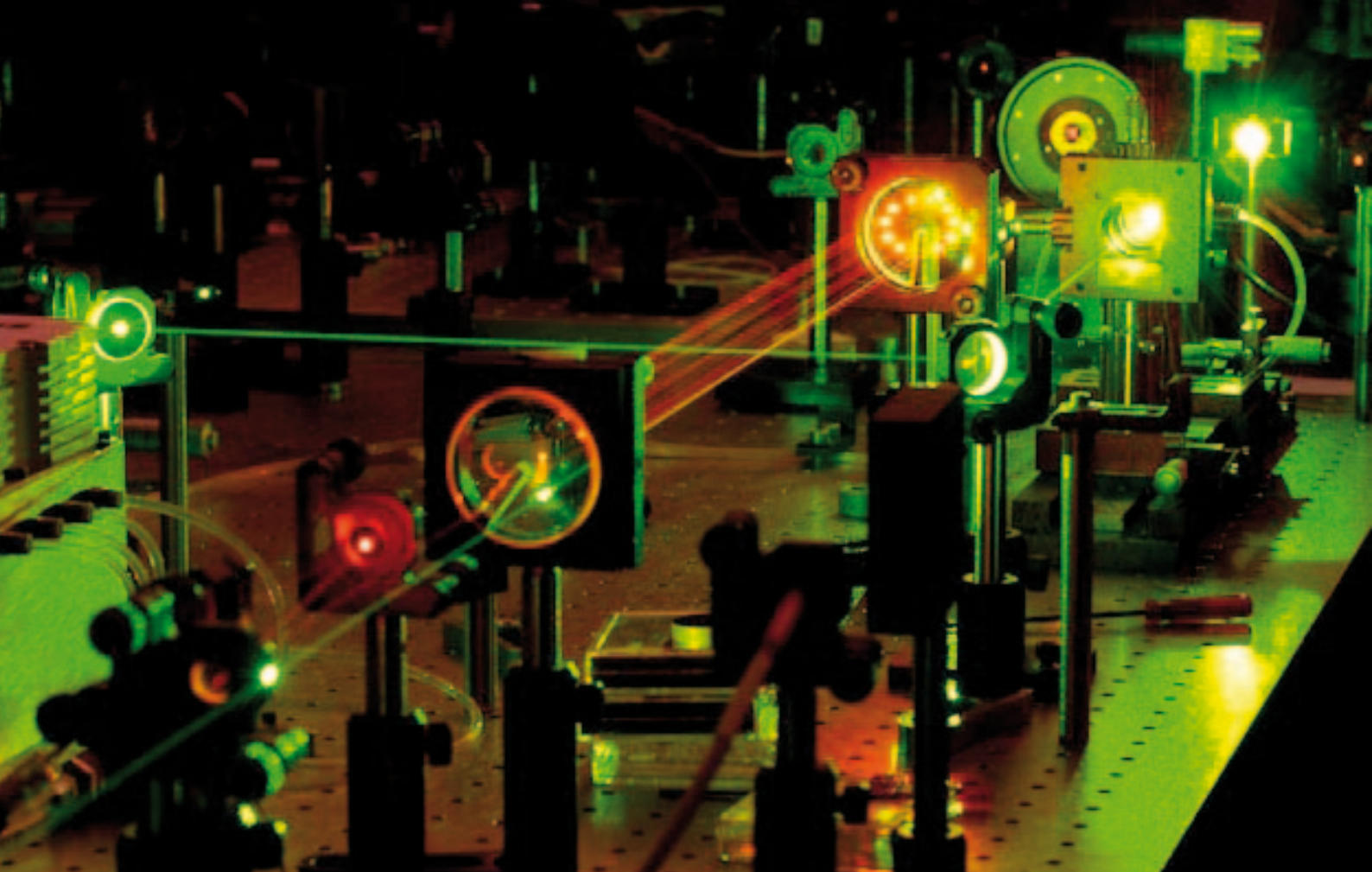


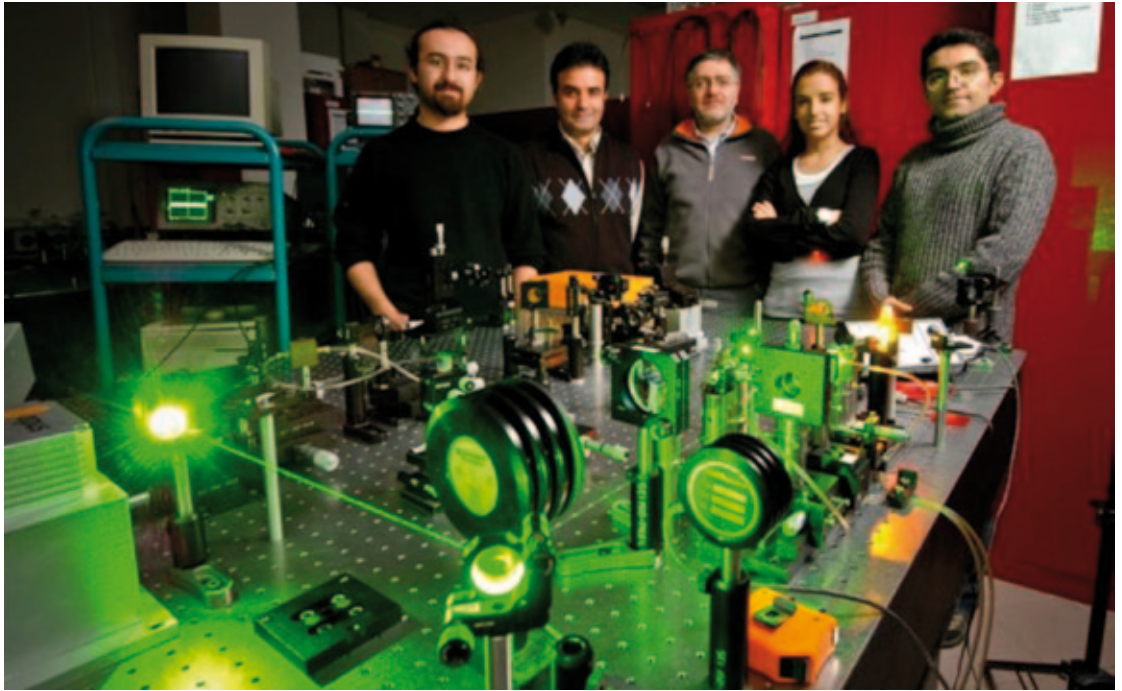
Katıhal Femtosaniye Lazerleri

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-



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

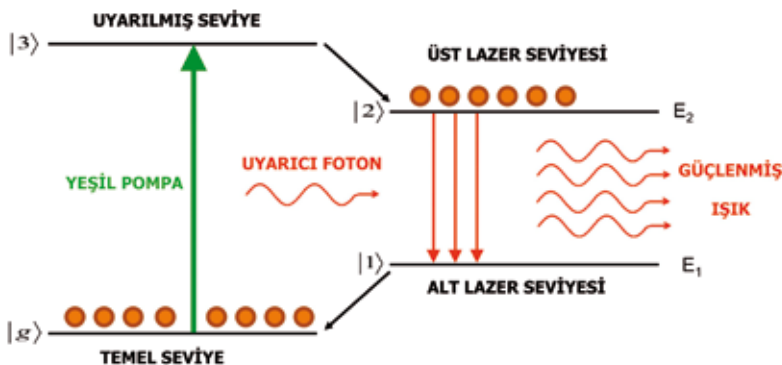
Lazer, optik frekanslarda eş evreli ışınım üretimi için kullanılan bir salıngaçtır (osilatör) ve dört ana öğeden oluşur. Bunlar 1) optik kazanç ortamı, 2) optik kovuk veya diğer adıyla rezonatör, 3) uyarı (pompa) kaynağı ve 4) çıkış aynasıdır. Dolayısıyla, çalışma prensibi, örneğin sayısal saatlerin 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

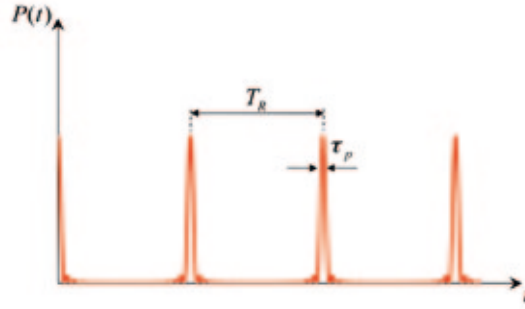
Katihal lazerlerinde kullanılan kazanç ortamının fiziksel özellikleri yarıiletken, sıvı, ve gaz lazerlerinininkinden farklıdır. Bu tür lazerlerde optik kazanç elde etmek için, içerisine ışık veren iyon katkılanmış kristal, seramik veya camlar kullanılır. 1960 yılında ilk icat edilen yakut lazeri de katihal lazerleri grubuna aittir. Yakut, safir, peridot gibi mücevher taşlarının yanısıra yüksek safılıkta 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 ışınımı 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 ışına ile 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 ardsık iki darbe arasındaki süre, τ_p ise darbe genişliğidir.

Kip Kitleme ve Femtosaniye Lazerleri

Önceki bölümde de bahsettiğimiz gibi, geçiş metal iyonu katkılı katihal 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 içerisnde değiştirilir. İkinci çalıştırılış biçiminde ise, geniş ışınım bandı aynı anda kullanılarak çok kısa süreli bir optik darbe katarı elde edilir. Bunu sağlamak için "kip kitleme" 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

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 salınımına 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 Katihal 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

