ÖZET

TARAMA HIZINA GÖRE TEKRARLAMA ORANI AYARLANABİLİR YÜKSEK GÜÇTE FEMTOSANİYE LAZER

Bu belgede, femtosaniye darbe lazerlerinin yapımı ve çalıştırılması için tasarımlar ve teknikler sağlanmıştır. Bir lazer motoru örneğinde, bir femtosaniye seed çekirdeği ışın demeti üreten ve veren bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini genişleten bir genişletici-kompresör; ve genişletilmiş seed darbelerini alan, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini amplifiye eden ve bir amplifiye edilmiş genişletilmiş darbe lazer ışın demetini sürelerini sıkıştıran genişletici-kompresöre üreten ve femtosaniye darbelerin bir lazer ışın demetini üreten bir amplifikatör içerir. Amplifikatör lazerin tekrarlama oranını prosedürler arasında veya tarama hızına göre ayarlanabilir hale getirerek, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir dispersiyonunu dengeleyen bir dispersiyon kontrolörü içerir. Lazer motor 500 metreden daha az toplam bir optik yol ile kompakt olabilir ve az sayıda örneğin 50'den az optik eleman sayısına sahip olabilir.

İSTEMLER

1. Bir lazer sistemi ile taramayla ilgili bir yöntem olup, özelliği yöntemin aşağıdakileri içermesidir:
bir osilatör (100, 100') tarafından femtosaniye seed darbeleri (211) üretilmesi;
seed darbelerinin bir süresinin bir genişletici (200, 200') tarafından genişletilmesi;
bir amplifikatör (300, 300') tarafından genişletilmiş seed darbelerinin (212), uç-aynaları (321, 322, 323, 324) içeren bir rejeneratif amplifikatör (300) ile lazer darbeleri (213) içine amplifiye edilmesi;
lazer darbelerinin 5.000 - 20.000 fs^2 aralığında bir grup geciktirme dispersiyonunu amplifikatörün bahsedilen uç-aynaları arasında bir dispersiyon kompensatörüyle dengelenmesi;
lazer darbelerinin (213) amplifikatörden (300) bir birinci tekrarlama oranında bir elektro-optik modülatör (330) ile üretilmesi;
lazer darbelerinin bir süresinin bir kompresörle (200, 400) 1-1,000 fs aralığına sıkıştırılması;
lazer darbelerinin, bir tarama lazeri iletim sistemi ile bir birinci hedef bölgedeki bir odak noktasına odaklanması;
birinci hedef bölgedeki odak noktasının tarama lazer dağıtım sistemi ile birinci tekrarlama oranı ile taranması;
birinci tekrarlama oranının tekrarlama oranı kontrolörü ile ikinci tekrarlama oranına değiştirilmesi; ve
ikinci hedef bölgedeki odak noktasının tarama lazer dağıtım sistemi ile ikinci tekrarlama oranı ile taranması;
burada lazer sistemi, 10 kHz ila 20 MHz aralığında bir tekrarlama oranına sahip bir lazer ışın demeti üretecek ve 0.1W'den daha büyük bir çıkış gücü lazer ışın demeti üretecek şekilde yapılandırılmıştır.

2. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği aşağıdakileri içermesidir:
birinci hedef bölgedeki odak noktasının bir birinci tarama hızıyla taranması;
tarama lazer iletim sisteminin bir işlemcisi tarafından birinci tarama hızının ikinci tarama hızına değiştirilmesi; ve
ikinci hedef bölgedeki odak noktasının bir ikinci tarama hızıyla taranması.

3. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği:
birinci tekrarlama oranının 100 kHz'ye eşit veya daha az olması; ve
ikinci tekrarlama oranının 100 kHz'den daha büyük olmasıdır.

4. İstem 3'e göre bir yöntem olup, özelliği:
ikinci tekrarlama oranının 150 kHz olmasıdır.

5. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği:
kompresör ve genişleticinin bir genişletici-kompresöre entegre edilmesidir.

6. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği:
elektro-optik modülatörün, bir geçiş yapabilir polarizer içermesi,
polarizer amplifikatörde genişletilmiş darbelerin polarizasyon düzlemini döndürmek için yapılandırılmasıdır,
geçiş yapabilir polarizer 5 ns'den daha az bir artış süresine sahiptir.

7. İstem 8'e göre bir yöntem olup, özelliği bir tarama lazer iletim sisteminin aşağıdakileri içermesidir:
geçiş yapabilir polarizere 5 ns'den daha az bir artış süresi ile geçiş yapması için kontrol sinyallerini geçiş yapabilir polarizere uygulamak üzere yapılandırılmış bir kontrol elektroniği.

8. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği birinci tekrarlama oranınının bir ikinci tekrarlama oranına değiştirmesinin aşağıdakileri içermesidir:
elektro-optik modülatör ile amplifikatörden lazer darbeleri üretilmeden önce bir dizi lazer darbesinin gidiş-dönüş sayısının değiştirilmesi.

9. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği birinci tekrarlama oranınının bir ikinci tekrarlama oranına değiştirmesinin aşağıdakileri içermesidir:
birinci tekrarlama oranının 1 µ saniye - 1 saniye aralığında bir sürede ikinci tekrarlama oranına değiştirilmesi.

10. Bir lazer tarama sistemi olup, özelliği aşağıdakileri içermesidir:
bir femtosaniye seed darbesi ışın demetini üreten ve veren bir osilatör (100, 100');

seed darbelerinin (212) bir süresini genişleten, bir amplifikatörden (300) amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri (213) alan bir genişletici-kompresör (200, 200'), amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini 1-1.000 fs aralığına sıkıştırır ve

bir femtosaniye darbeleri lazer ışın demeti üretir;

genişletici-kompresörden (200, 200') genişletilmiş seed darbelerini (212) alan uç-aynaları (321, 322, 323, 324) içeren, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeler (213) oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini amplifiye eden, amplifikatörün bahsedilen uç-aynaları arasında bir dispersiyon dengeleyici ile 5,000 - 20,000 fs^2 aralığındaki amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin (213) bir dispersiyonunu dengeleyen; ve

bir birinci tekrarlama oranında, bir elektro-optik modülatör (330) ile genişletici-kompresöre doğru amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri üreten bir rejeneratif amplifikatör olan amplifikatör (300); ve

lazer ışın demetinin odak noktasını bir birinci hedef bölgedeki bir birinci tekrarlama oranı ile taramak üzere yapılandırılmış bir tarama optiği; burada

lazer tarama sistemi, bir tekrarlama oranı kontrolörü ile birinci tekrarlama oranını ikinci tekrarlama oranına değiştirecek şekilde yapılandırılır ve

lazer ışın demetinin bir odak noktasını bir ikinci bir hedef bölgede bir ikinci tekrarlama oranıyla taramak üzere yapılandırılmış tarama optiği;

burada lazer sistemi, 10 kHz ila 20 MHz aralığında bir tekrarlama oranına sahip bir lazer ışın demeti üretecek ve lazer ışın demeti 0.1W'den daha büyük bir çıkış gücü ile üretilecek şekilde yapılandırılır.

11. İstem 10'a göre lazer tarama sistemi olup, özelliği birinci tarama bölgesindeki odak noktasını bir birinci tarama hızıyla tarama yapmak üzere yapılandırılmış tarama optiği ve ayrıca birinci tarama hızını bir ikinci tarama hızına değiştirmek üzere yapılandırılmış bir işlemci; ve ikinci tarama bölgesindeki odak noktasını bir ikinci tarama hızıyla tarama yapmak üzere yapılandırılmış tarama optiği içermesidir.

12. İstem 10'a göre lazer tarama sistemi olup, özelliği:

elektro-optik modülatörün, bir geçiş yapabilir polarizer içermesi,

amplifikatörde genişletilmiş darbelerin polarizasyon düzlemini döndürmek için yapılandırılmış olmasıdır,

geçiş yapabilir polarizer 5 ns'den daha az bir artış süresine sahiptir.

13. İstem 10'a göre lazer tarama sistemi olup, özelliği tarama lazer iletim sisteminin aşağıdakileri içermesidir:
geçiş yapabilir polarizere 5 ns'den daha az bir artış süresi ile geçiş yapması için geçiş yapabilir polarizere kontrol sinyallerini uygulamak üzere yapılandırılmış bir kontrol elektroniği.

14. İstem 10'a göre lazer tarama sistemi olup, özelliği birinci tekrarlama oranının, bir ikinci tekrarlama oranına değiştirilmesinin aşağıdakileri içermesidir:
lazer darbelerini amplifikatörden üretmeden önce lazer darbesinin gidiş-dönüş sayısının elektro-optik modülatör tarafından değiştirilmesi.

15. İstem 10'a göre lazer tarama sistemi olup, özelliği birinci tekrarlama oranının, bir ikinci tekrarlama oranına değiştirilmesinin aşağıdakileri içermesidir:
birinci tekrarlama oranının 1 µ saniye - 1 saniye aralığında bir sürede ikinci tekrarlama oranına değiştirilmesi.

TARİFNAME
TARAMA HIZINA GÖRE TEKRARLAMA ORANI AYARLANABİLİR YÜKSEK GÜÇTE FEMTOSANİYE LAZER

TEKNİK SAHA

Bu patent belgesi, ayarlanabilir tekrarlama oranına sahip yüksek güçte femtosaniye lazerler dahil femtosaniye lazerler ile ilgilidir.

ALT YAPI

Günümüzün oldukça zorlu lazer uygulamalarının çoğunda, darbe başına yüksek enerjiler taşıyan daha kısa darbelere yönelik sürekli bir arayış vardır. Bu özellikler, lazer uygulamaları için daha iyi kontrol ve daha yüksek çalışma hızı vaat etmektedir. Alanın evriminde kayda değer bir adım ise, femtosaniye lazer darbeleri üreten lazer sistemlerinin ortaya çıkması ve olgunlaşmasıdır. Bu femtosaniye lazerler, bu ultra kısa darbelerin iyi kontrollü doku modifikasyonu sunabildiği birkaç farklı oftalmik cerrahi türü dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için kullanılabilir.

TIBOR JUHASZ: "Corneal Refractive Surgery with Femtosecond Lasers", IEEE J. of selected Topics in Quantum Electronics, val. 5, no. 4, 1 August 1999; kornea refraktif cerrahisinde ultra kısa darbe (femtosaniye) lazer teknolojisinin kullanımının araştırılması ile ilgilidir. Uzun darbe genişliği nanosaniye veya pikosaniye lazer darbeleri ile karşılaştırıldığında, femtosaniye lazer-doku etkileşimleri önemli ölçüde daha küçük ve daha deterministik fotodisruptif enerji eşiklerinin yanı sıra azaltılmış şok dalgaları ve daha küçük kavitasyon kabarcıkları ile karakterizedir. WYNNE: "Regenerative Amplification of 30fs darbees in Ti:Sapphire at 5kHz",Optics Letters, val. 19, no. 12, 15 June 1994, pages 895-897, kip kilitli bir Ti:Sapphire lazerin 18-fs darbeleri, bir Ti:Sapphire rejeneratif amplifikatöründe genişletilmiş darbe amplifikasyonu ile 4.9 kHz'de 60 *f-LJ* enerjisine amplifiye edilmesi ile ilgilidir. Yeniden sıkıştırmanın ardından 30-35 fs, yakın-transform sınırlı darbeler elde edilir. US 2004/243112 A 1 (BENDETT) 2 Aralık 2004, saniyede en az yaklaşık 50000 darbe ve bir pikosaniyeden daha az bir darbe uzunluğuna sahip bir darbe tekrarlama oranına sahip bir darbe akımı üretmek ve işlemi birkaç saniyede tamamlamak için en azından yüksek sayıda darbesin kullanılması ile örneğin on saniyeden daha az bir sürede

100000 darbesin kullanılması ile bir cerrahi prosedür (örneğin, oftalmolojik) için doku şekillendirmek için uygun bir çıkış ışığı modeline akışı taramak ve odaklamak üzere bir aparatı ve yöntemi sağlamaktadır. Optik fiber kazanç ortamına sahip bir lazer, bir femtosaniye darbeleri akımı üretir. Bazı uygulamalar, tarama sisteminde pozitif dispersiyonu dengeleyen bir önkoşullanmalı negatif dispersiyon oluşturur. Bazı uygulamalarda, lazer ve tarama sistemi kullanılarak bir lentikül kesilir ve mekanik olarak kornea yüzeyinden oluşturulan bir yan yarıktan çıkarılır.

KISA AÇIKLAMA

Buluşun kapsamı istemler ile uyumludur. İstem 1'e göre bir yöntem ve istem 12'ye göre bir sistem sağlanmıştır. Bağımlı istemlere uygun olarak ayrıca isteğe bağlı özellikler temin edilmektedir.

Bu belgede, femtosaniye darbe lazerlerinin yapımı ve çalıştırılması için tasarımlar ve teknikler sağlanmıştır, bunlara genişletilmiş darbe amplifikasyonlu lazer sistemlerinin örnekleri ve uygulamaları dahildir, bunlardan bazıları düşük sayıda optik elemana sahiptir, bazılarında arıza sıklığı düşüktür, diğerleri, uygun şekilde küçük fiziksel genişliğe sahiptir ve diğerleri, önemli ölçüde yeniden ayarlanmadan sistemin tekrarlama oranlarının değiştirilmesine izin verebilir ve bazıları termal lensleme için düşük hassasiyete sahiptir.

Örneğin, bir lazer motorunun bazı örnekleri, bir femtosaniye seed darbe üreten ve veren bir osilatör, seed darbelerin süresini uzatan bir genişletici-kompresör ve genişletilmiş seed darbelerini genişletici-kompresörden alan bir amplifikatörü içerir, bu amplifikatör amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeler oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin genliğini amplifiye eder ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir lazer ışın demetini üretir, buradaki genişletici-kompresör, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini alır, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin süresini sıkıştırır ve 1,000 femtosaniyeden daha az bir darbe süresine sahip femtosaniye darbelerinin bir lazer ışın demetini üretir ve amplifikatör, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir dispersiyonunu azaltan bir dispersiyon kompansatörünü içerir.

Bazı örneklerde osilatör bir diyot pompalı fiber osilatördür ve transform sınırlı seed darbelerini üretir.

Bazı örneklerde osilatör, ışın demetini 1,000 femtosaniyeden daha az bir seed-darbe süresi ile üretir.

Bazı uygulamalarda osilatör, ışın demetini 10-100 MHz ve 20-50 MHz aralığında bir seed darbesi tekrarlama oranı ile üretir.

Bazı uygulamalarda, genişletici-kompresör bir gerilmiş Bragg optik ağ içerir.

Bazı uygulamalarda genişletici-kompresör bir fototermal refraktif cam içerir.

Bazı uygulamalarda genişletici-kompresör, femtosaniye seed darbelerinin bir süresini 10'dan büyük bir faktörle genişletir.

Bazı uygulamalarda, genişletici-kompresör, femtosaniye seed darbelerinin süresini, 1.000-200.000 femtosaniyelik genişletilmiş bir süreye uzatır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru ayarlanabilir bir genişletici-kompresör içermez.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, bir polarizer ve osilatör ile genişletilmiş seed darbelerinin ışın demetini amplifikatöre doğru yönlendiren genişletici-kompresör arasında bir λ/4 plakası içerir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, genişletici-kompresörden genişletilmiş seed darbelerinin ışın demetini alan, amplifikatöre doğru genişletilmiş seed darbelerinin ışın demetini üreten, amplifikatörden genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini alan, genişletici-kompresörün bir kompresör portuna doğru amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini üreten ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini osilatörden izole eden bir Faraday izolatörü içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör optik elemanlar içerir ve dispersiyon kompansatörü, amplifikatörün bir optik elemanı tarafından dahil edilen bir dispersiyona işaret olarak karşıt bir dispersiyonu dahil eder.

Bazı uygulamalarda, dispersiyon kompansatörü tarafından dahil edilen dispersiyon, esas olarak dispersiyon kompansatöründen başka bir amplifikatörün optik elemanları tarafından bir gidiş-dönüş içerisinde dahil edilen bir dispersiyona büyüklük olarak eşittir ve işaret olarak karşıttır.

Bazı uygulamalarda, dispersiyon kompansatörü en azından bir çirpli ayna, bir çirpli fiber, bir çirpli optik ağ, bir prizma veya bir çirpli aktarıcı optik eleman içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, seçilen genişletilmiş seed darbelerinin genliğini, bir rezonant kaviteyi tanımlayan iki uç-aynayı ve amplifikatör içindeki rezonant bir optik yolu katlayan iki katlama aynasını amplifiye eden bir kazanç materyali içerir; burada iki uç-aynadan ve iki katlama aynadan en az biri bir çirpli aynadır.

Bazı uygulamalarda, çirpli ayna, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelere negatif bir dispersiyonu dahil eder.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, lazer ışın demeti, bir birinci tekrarlama oranı ile ve daha sonra, lazer motorunun tüm optik elemanlarının esasen aynı kuruluma sahip büyük ölçüde farklı bir ikinci tekrarlama oranı ile üretecek şekilde yapılandırılmıştır.

Bazı uygulamalarda, birinci tekrarlama oranı ve ikinci tekrarlama oranı, 10 kHz-2 MHz, 50 kHz-1 MHz veya 100 kHz-500 kHz aralığından birine dahildir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, değiştirilmemiş lazer motoru, birinci ve ikinci tekrar oranları için optik elemanların farklı kurulumlarını kullandığında, birinci tekrarlama oranı ile olduğu gibi, tüm optik elemanlarda esasen aynı kurulumuna sahip lazer ışın demeti üretmek üzere göre modifiye edilebilir.

Bazı uygulamalarda amplifikatör, amplifikatörün optik kurulumunu değiştirmeden tutarken, bir tekrarlama oranı değiştirildiğinde amplifikatördeki amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir dizi gidiş-dönüşüne sahip olacak şekilde yapılandırılır.

Bazı uygulamalarda amplifikatör, 1 metreden daha kısa bir uç-aynadan uç-aynaya katlanmış optik yola sahiptir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör kavite boşaltma rejeneratif bir amplifikatör, bir genişletilmiş darbe amplifikatörü veya bir Q-anahtarlı amplifikatördür.

Bazı uygulamalarda, Amplifikatör, bir polarizasyon-ayarlama durumu ve geçiş yapabilir polarizerin esasen amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir polarizasyonunu ayarladığı bir polarizasyon-ayarlama durumu ile geçiş yapabilir polarizerin amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin polarizasyonunu ayarlamadığı bir polarizasyon-ayarlamama durumu arasında geçiş yaparak genişletilmiş darbeleri seçebilen uç-aynalar arasında bir optik yol içinde geçişli bir polarizer içerir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, polarizasyon-ayarlamama durumdan 5 nanosaniyeden az, 4 nanosaniye veya 3 nanosaniyede bir artış süresi ile polarizasyon-ayarlama durumuna geçiş yapmak için geçişli polarizeri kontrol eden yüksek voltajlı bir güç-anahtarını içerebilir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, femtosaniye darbelerinin lazer ışın demetinin birinci tekrarlama oranından, 1-120 saniye, 10-60 saniye ve 20-50 saniyeden biri olan ikinci tekrarlama oranına geçiş yapar.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, femtosaniye sinyallerinin lazer ışın demetinin bir birinci tekrarlama oranından, 1 µs - 1 s aralığında değişen bir süre içinde ikinci bir tekrarlama oranına geçiş yapar.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, odaklama aynasının bir odak noktasının yakınına yerleştirilmiş en az bir odaklama aynası ve bir lazer kristali içerir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, lazer motorunun bir tekrarlama oranı, birinci bir değerden ikinci bir değere geçiş yaptığında, her iki değer de 10 kHz - 2 MHz aralığında, daha sonra da üretilen lazer ışın demetinin çapı %10 ve %20'den daha az değişiklik gösterecek şekilde veya üretilen lazer ışın demetinin merkezi, ışın demeti çapının %20'sinden ve %40'ından daha az hareket edecek şekilde yapılandırılmaktadır.

Bazı uygulamalarda, lazer ışın demetinin femtosaniye darbeleri 1-100 µJ/darbe, 10-50 µJ/darbe veya 20-30 µJ/darbe aralığında bir enerjiye sahiptir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru 0,1 W, 1 W veya 10 W'dan daha büyük bir güce sahip bir lazer ışın demeti üretir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru bir oftalmik cerrahi sistemin parçasıdır.

Bazı uygulamalarda, bir lazer motoruna sahip bir lazer ışın demetinin üretilmesi için bir yöntem aşağıdaki adımları içerir: bir osilatör ile 1000 femtosaniyeden daha az bir süreye sahip bir seed darbeleri ışın demetinin üretilmesi; bir darbe genişletici ile seed darbelerinin bir süresinin uzatılması; amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin üretilmesi için bir amplifikatöre sahip seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğinin amplifiye edilmesi; amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresinin bir darbe kompresörü ile 1,000 femtosaniyenin altına sıkıştırılması; 10 kHz - 2 MHz aralığında bir birinci tekrarlama oranı ve 1,000 femtosaniyeden daha az bir darbe süresi ile bir femtosaniye darbeleri lazer ışın demeti çıkışı; tekrarlama oranını birinci tekrarlama oranından, lazer motorunun bir optik kurulumunu esas olarak değiştirmeksizin 10 kHz - 2 MHz aralığında ikinci bir tekrarlama oranına değiştirilmesi; ve ikinci tekrarlama oranına sahip femtosaniye darbelerinin lazer ışınının ve 1,000 femtosaniyeden daha az bir atım süresiyle üretilmesi.

Bazı uygulamalarda, amplifiye etme adımı, amplifikatörün bir optik bileşeninin neden olduğu amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir dispersiyonunu azaltmak için amplifikatörde bir dispersiyon kompansatörünün kullanılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, dispersiyon adımının azaltılması, amplifikatördeki en az bir çirpli aynası ile bir dengeleyici dispersiyonun dahil edilmesini içerir; burada dengeleyici dispersiyon, esas olarak, amplifikatörün tüm optik elemanları tarafından dahil edilen bir dispersiyona büyüklük olarak eşit ve gidiş dönüş başına dispersiyon kompensatörü dışında işaret olarak karşıtıdır.

Bazı uygulamalarda, tekrarlama oranı adımının değiştirilmesi, amplifikatörün bir optik kurulumunu esasen değiştirmeden tutarken amplifikatördeki bir dizi gidiş-dönüşü değiştirmeyi içerir.

Bazı uygulamalarda genişletme adımı ve sıkıştırma adımı aynı genişletici-kompresör tarafından gerçekleştirilir.

Bazı uygulamalarda, lazer ışınının birinci tekrarlama oranıyla üretilmesi tamamladıktan sonra, lazer ışınının 1-120 saniye, 10-60 saniye veya 20-50 saniye içinde ikinci tekrarlama oranı ile üretilmesi mümkündür.

Bazı uygulamalarda, tekrarlama oranı, birinci tekrarlama oranından, 1 µs - 1 s aralığında değişen bir sürede ikinci tekrarlama oranına değişmektedir.

Bazı uygulamalarda, bir lazer motoru, 1000 femtosaniyeden daha az bir darbe süresi olan bir darbeli ışık demeti üreten bir osilatör, ışık demeti darbelerinin süresini uzatan bir genişletici-kompresör; ve amplifiye edilmiş genişletici darbelerin üretilmesi için genişletilmiş ışık darbelerin bir genliğini arttıran bir amplifikatör içerir, burada genişletici-kompresör, amplifiye edilmiş genişletici darbelerin bir süresini sıkıştırır ve bir lazer darbe ışık demeti üretir ve lazer motoru, esasen lazer motorunun tüm optik elemanlarının aynı kurulumunu kullanarak, 10 kHz - 2 MHz aralığında bir birinci tekrarlama oranıyla ve daha sonra 10 kHz - 2 MHz aralığında ikinci bir tekrarlama oranıyla lazer darbelerinin ışın demeti üretilmesi ile çalışabilir, lazer darbelerinin bir süresi, birinci ve ikinci tekrarlama oranları için 1000 femtosaniyelik bir süreden daha azdır.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, amplifikatörün optik elemanları tarafından dahil edilen bir dispersiyonu en azından kısmen dengeleyen bir dispersiyon kompansatörü içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, geçiş yapabilir polarizerin, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir polarizasyonunu ayarladığı bir durum ve geçiş yapabilir polarizerin, 5 nanosaniye, 4 nanosaniye ve 3 nanosaniyeden daha az bir artış süresi ile amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin polarizasyonunu ayarlandığı bir durum arasında geçiş yapan amplifikatörün uç-aynaları arasında geçiş yapabilir bir polarizer içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör en az bir odaklama aynası ve odaklama aynasının bir odak noktasına yakın bulunan bir kazanç kristali içerir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, 60 saniye, 1 saniye ve 10 µs'den az bir zamanda birinci tekrarlama oranı ve ikinci tekrarlama oranı arasında geçiş yapar.

Bazı uygulamalarda, bir lazer motoru, femtosaniye seed darbelerini üreten bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini uzatan bir genişletici; genişletilmiş seed darbelerini amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelere yükselten bir amplifikatör içerir ve amplifikatörün optik elemanları tarafından indüklenen amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir dispersiyonunu dengelemek için bir dispersiyon kompansatörü içerir; ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri alan ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini sıkıştıran ve bir femtosaniye darbeleri lazer ışın demeti üreten bir kompresör içerir.

Bazı uygulamalarda, değişken tekrarlama oranı lazer motoru bir Q-anahtarlı kavite boşaltma rejeneratif amplifikatör içerir; iki uç-aynası içeren amplifikatör olup, burada lazer motoru femtosaniye lazer darbeleri üretir; ve uç-aynalar arasındaki bir optik yolun uzunluğu 2 metreden daha azdır.

Bazı uygulamalarda, uç-aynalar arasındaki optik yolun uzunluğu 1 metreden azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, amplifikatöre iletilen seed darbelerini üreten bir osilatör içerir; burada; seed darbelerinin fotonlarının osilatörde üretildiği noktadan toplam serbest alan optik yol uzunluğu; lazer motorunun lazer darbelerinin üretildiği noktaya kadar 500 metre, 300 metre ve 150 metreden daha azdır.

Bazı uygulamalarda, amplifikatörün bir kavitesinin tüm kenar boyutları, 1 metre veya 0.5 metreden daha azdır, burada amplifikatör kavitesi, amplifikatörün tüm optik elemanlarını barındırır.

Bazı uygulamalarda, amplifikatörün taban alanı 1 m^2 veya 0.5 m^2'den daha azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, gerilmiş hacim Bragg optik ağ içeren bir genişletici-kompresör içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, amplifikatörün optik elemanları tarafından dahil edilen bir dispersiyonu dengeleyen bir dispersiyon kompensatörü içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, lazer darbelerinin bir genliğini amplifiye eden bir lazer kristali ve amplifikatör içindeki rezonant bir optik yolu katlayan iki katlama aynası içerir; burada iki uç-aynanın ve iki katlanan aynanın en az biri, çirpli bir aynadır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, bir tekrarlama oranı aralığında bir birinci tekrarlama oranı ile; ve daha sonra tekrarlama oranı aralığında esasen lazer motorunun tüm optik elemanlarının aynı kurulumuna sahip ikinci bir tekrarlama oranı ile bir lazer ışın demeti üretecek şekilde yapılandırılmıştır.

Bazı uygulamalarda, birinci ve ikinci tekrarlama oranları 10 kHz-2 MHz, 50 kHz-1 MHz veya 100 kHz-500 kHz'lik bir aralıkta yer almaktadır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, birinci tekrarlama oranının 60 saniye, 1 saniye ve 1 µs'den az bir zamanda ikinci tekrarlama oranına değiştirilebileceği şekilde yapılandırılmıştır.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, geçiş yapabilir polarizerin amplifiye edilmiş darbelerin polarizasyonunu ayarladığı bir durum ve geçiş yapabilir polarizerin esasen amplifiye edilmiş darbelerin polarizasyonunu ayarlayamadığı bir durum arasında 5 ns, 4 ns veya 3 ns'den birinden daha az geçiş yapan uç-aynalar arasında bir geçiş yapabilir polarizer içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör en az bir odaklanma uç-ayna ve odaklama uç-aynasının bir odak noktasının yakınında konumlanan bir lazer kristali içerir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru bir femtosaniye seed çekirdeği ışın demeti üreten ve veren bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini genişleten bir genişletici-kompresör; ve genişletici-kompresörden genişletilmiş seed darbelerini alan, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini amplifiye eden ve bir amplifiye edilmiş genişletilmiş darbe lazer ışın demeti üreten bir amplifikatör içerir; burada genişletici-kompresör, amplifiye edilmiş

genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini alır, genişletilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini sıkıştırır ve 1,000 femtosaniyeden daha az bir darbe süresine sahip bir femtosaniye darbe lazer ışın demeti üretir; burada; seed darbelerinin fotonlarının osilatörde üretildiği noktadan toplam serbest alan optik yol uzunluğu; lazer motorunun lazer darbelerinin üretildiği noktaya kadar 500 metreden daha azdır.

Bazı uygulamalarda, optik yolun uzunluğu 300 metreden daha azdır.

Bazı uygulamalarda, değişken tekrarlama oranına sahip lazer motoru, bir femtosaniye seed çekirdeği ışın demeti üreten ve veren bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini uzatan bir genişletici-kompresör; ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeler oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini arttıran bir genişletilmiş darbe amplifikatörü içerir; burada amplifikatör 5 ns'den daha az bir geçiş süresine sahip geçiş yapabilir bir polarizer içerir; genişletici-kompresör, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini femtosaniye değerlerine sıkıştırır; ve lazer motoru 1 m^2'den daha az bir alan kaplar.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, bir cerrahi lazer sisteminin bir parçasıdır, cerrahi lazer sistemi, lazer motoruna ve cerrahi lazer sisteminin üst güvertesinde bir görüntüleme sistemine sahiptir.

Bazı uygulamalarda, değişken tekrarlama oranına sahip lazer motoru, bir femtosaniye seed çekirdeği ışın demeti üreten ve veren bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini uzatan entegre bir genişletici-kompresör; ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin oluşturulması için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini arttıran bir Q-anahtarlı kavite boşaltma rejeneratif amplifikatör içerir; buradaki genişletici-kompresör, femtosaniye lazer darbelerinin üretilmesi için amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini sıkıştırır ve lazer motorunun bir dizi optik elemanının sayısı 75'ten azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motorunun optik elemanlarının sayısı 50'den azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motorunun bir osilatör dışındaki bölümlerdeki optik elemanların sayısı 50'den azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motorunun bir osilatör dışındaki bölümlerdeki optik elemanların sayısı 35'ten azdır.

Bazı uygulamalarda bir optik eleman şunlardan biridir: bir ayna, bir mercek, bir paralel plaka, bir polarizer, bir izolatör, herhangi bir değiştirilebilir optik eleman, bir refraktif eleman, bir aktarıcı eleman veya bir yansıtıcı eleman.

Bazı uygulamalarda, optik bir eleman, havadan giren ve havaya çıkan ışığa sahiptir.

Bazı uygulamalarda, entegre genişletici-kompresör, bir gerilmiş hacim Bragg optik ağı içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, amplifikatörün optik elemanları tarafından sunulan bir dispersiyonu dengeleyen bir dispersiyon kompensatörü içerir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, bir rezonant kaviteyi tanımlayan iki adet uç-ayna ve amplifikatör içindeki rezonant bir optik yolu katlayan iki katlama aynası içerir; burada iki uç-aynanın ve iki katlanan aynanın en az biri, çirpli bir aynadır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, bir tekrarlama oranı aralığında bir birinci tekrarlama oranına sahip bir lazer ışın demeti üretecek şekilde ve daha sonra, lazer motorunun tüm optik elemanlarının esasen aynı kuruluma sahip büyük ölçüde farklı bir ikinci tekrarlama oranı ile üretecek şekilde yapılandırılmıştır, burada birinci tekrarlama oranı ve ikinci tekrarlama oranı, 10 kHz-2 MHz, 50 kHz-1 MHz veya 100 kHz-500 kHz aralıklarından birine dahildir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru, birinci tekrarlama oranının 1 saniyeden daha az değişen bir zamanda ikinci tekrarlama oranına değiştirilebileceği şekilde yapılandırılmıştır.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, geçiş yapabilir polarizerin amplifiye edilmiş darbelerin polarizasyonunu ayarladığı bir durum ve geçiş yapabilir polarizerin esasen amplifiye edilmiş darbelerin polarizasyonunu ayarlayamadığı bir durum arasında 5 ns, 4 ns veya 3 ns'den birinden daha az geçiş yapan uç-aynalar arasında bir geçiş yapabilir polarizer içerir.

Bazı uygulamalarda amplifikatör en az bir odaklama aynası ve odaklama aynasının bir odak noktasının yakınında bulunan bir lazer kristali içerir.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru bir femtosaniye seed çekirdeği ışın demeti üreten ve veren bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini genişleten bir genişletici-kompresör; ve genişletici-kompresörden genişletilmiş seed darbelerini alan, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini amplifiye eden ve bir amplifiye edilmiş genişletilmiş darbe lazer ışın demeti üreten bir amplifikatör içerir; burada genişletici-kompresör, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini alır, genişletilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini sıkıştırır ve 1,000 femtosaniyeden daha az bir darbe süresine sahip bir femtosaniye darbe lazer ışın demeti üretir; burada, lazer motorunun, osilatörden dışındaki bölümlerde bulunan birtakım optik elemanları sayısı 50'den azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motorunun optik elemanı sayısı 75'ten azdır.

Bazı uygulamalarda, bir lazer sistemi ile tarama yöntemi, bir lazer motoru ile değişken tekrarlama oranına sahip olan lazer darbelerinin üretilmesi; bir lazer tarama sistemi ile lazer darbelerinin hedef bölgedeki bir odak noktasına odaklanması; hedef bölgedeki odak noktasının tarama lazer dağıtım sistemi ile bir tarama hızında taraması; tarama hızının değiştirilmesi; ve tekrarlama oranı kontrol cihazıyla değiştirilen tarama hızına göre tekrarlama oranının ayarlanması adımlarını içerir.

Bazı uygulamalarda, üretme adımı bir osilatör tarafından femtosaniye seed darbelerinin üretilmesi; seed darbelerinin bir genişletici-kompresör ile genişletilmesi; seçilen genişletilmiş seed darbelerinin bir amplifikatör ile amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelere amplifiye edilmesi; ve genişletici-kompresör tarafından amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin femtosaniye lazer darbelerine sıkıştırılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem, seçilmiş bir değerin etrafında hedef bölgedeki lazerle üretilen kabarcıkların yoğunluğunu yaklaşık olarak korumak için tekrarlama oranının ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda kabarcıkların yoğunluğu, bir doğrusal yoğunluğu, bir alan yoğunluğu veya bir hacim yoğunluğundan biridir.

Bazı uygulamalarda, tekrarlama oranı adımının ayarlanması, tekrarlama oranının, tarama hızına orantılı olarak ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, tekrarlama oranı adımının ayarlanması, tekrarlama oranının 1 µ saniye - 1 saniye aralığındaki bir zamanda bir birinci değerden ikinci bir değere ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, odak noktasının taranması adımı, odak noktasının minimal bir hızlanma yolu boyunca taranmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem bir odaklama yolu boyunca odak noktasının XY taranmasını ve yolun dönemeç kısmına yaklaşırken tekrarlama oranının yavaşlatılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem lazer ışın demetinin bir spiral boyunca taranmasını ve tarama, spiralin merkezine yaklaştığında tekrarlama oranının yavaşlatılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, tekrarlama oranının ayarlanması, değişen tarama hızının algılanması ile değişen tarama hızı hakkında tekrarlama oranı kontrolörü tarafından bilgi alınması ve bir işlemciden veya bellekten değişen tarama hızı hakkında elektronik bilgi alınması ve değişen tarama hızıyla ilgili alınan bilgilere göre tekrarlama oranının ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, değişken tekrarlama oranına sahip lazer tarama sistemi, bir femtosaniye seed darbesi ışın demeti üreten ve veren bir osilatör; seed darbelerinin bir süresini uzatan, bir amplifikatörden amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri alan, genişletilmiş genişletilmiş darbelerin bir süresini sıkıştıran ve bir tekrarlama oranına sahip bir femtosaniye darbeleri lazer ışın demeti üreten bir genişletici-kompresör; genişletilmiş seed darbelerini genişletici-kompresörden alan, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeler oluşturmak için seçilmiş genişletilmiş seed darbelerinin bir genliğini amplifiye eden ve genişletici-kompresöre doğru amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeler üreten bir amplifikatör; ve fotodisruptif noktaları oluşturmak için değişken

tarama hızına sahip bir hedef bölgede lazer ışın demetinin odak noktasını tarayan bir tarama optiği içerir; burada lazer tarama sistemi, önceden belirlenmiş bir yoğunluk profiline sahip fotodisruptif noktaları oluşturmak için tekrarlama oranını değiştirir.

Bazı uygulamalarda, amplifikatör, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin bir dispersiyonunu azaltan bir dispersiyon kompensatörü içerir.

Bazı uygulamalarda amplifikatör, amplifikatördeki genişlemiş darbelerin polarizasyon düzlemini döndüren, bir geçiş yapabilir polarizer içerir, burada geçiş yapabilir polarizerin bir artış süresi 5 ns, 4 ns veya 3 ns'den daha azdır.

Bazı uygulamalarda, lazer tarama sistemi, geçiş yapabilir polarizerin 5 ns, 4 ns ve 3 ns'den daha az bir artış süresine geçiş yapması için kontrol sinyallerini geçiş yapabilir polarizere uygulayan bir kontrol elektroniği içerir.

Bazı uygulamalarda, bir lazer motoru ile tarama yöntemi, tekrarlama oranına sahip femtosaniye lazer darbelerinin üretilmesi, fotodisruptif noktaları oluşturmak için lazer darbelerinin bir hedef bölgedeki bir odak noktasına odaklanması; hedef bölgedeki odak noktasının bir tarama hızı ile taranması; ve bir yoğunluk profiline sahip fotodisruptif noktaları oluşturmak için tarama sırasında tekrarlama oranının ayarlanması adımlarını içerir.

Bazı uygulamalarda, ayarlama adımı, bir doğrusal nokta yoğunluğu, bir alan nokta yoğunluğu ve esas olarak bir hedef bölgede bile tutulan bir hacim nokta yoğunluğu ile fotodisruptif noktalarının oluşturulmasını içerir.

Bazı uygulamalarda ayarlama adımı, tarama hızının bir varyasyonuna göre tekrarlama oranının ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda ayarlama adımı, tekrarlama oranının, tarama hızına orantılı olarak ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, tekrarlama oranı ayarlanması adımı, 1 µ saniye - 1 saniye aralığındaki bir zamanda tekrarlama oranının bir birinci değerden ikinci bir değere ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, üretim adımı bir osilatör tarafından femtosaniye seed darbelerinin üretilmesini; seed darbelerinin bir genişletici-kompresör ile genişletilmesini; seçilen genişletilmiş seed darbelerinin bir amplifikatör ile amplifiye edilmiş amplifiye edilmiş darbelere amplifiye edilmesini; ve genişletici-kompresör tarafından amplifiye edilmiş amplifiye edilmiş darbelerin femtosaniye lazer darbelerine sıkıştırılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, odak noktanın taranması adımı, odak noktasının minimal bir hızlandırma yolu boyunca taranmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem odak noktasını bir değiştirme yolu boyunca taranmasını; ve yolun dönemeç bölümüne yaklaşırken tekrarlama oranının yavaşlatılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem lazer ışın demetinin bir spiral boyunca taranmasını; ve spiralin merkezine yaklaşırken tekrarlama oranının yavaşlatılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem, lazer ışın demetinin bir hattın bir ucu ve bir hattın bir köşesi boyunca taranmasını; ve çizginin sonuna ve çizginin köşesine yaklaşırken tekrarlama oranının yavaşlatılmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem tarama hızı hakkında saklanan veya algılanan bilgilerin alınmasını ve tarama hızına ilişkin alınan bilgiye göre tekrarlama oranının ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, yöntem, hedef bölge ile ilgili algılanan veya görüntülenen bilgilerin alınmasını ve hedef bölge ile ilgili alınan bilgiye göre tekrarlama oranının ayarlanmasını içerir.

Bazı uygulamalarda, bir lazer motoru, femtosaniye seed optik darbeleri üreten bir osilatör ve amplifiye edilmiş optik darbeler üretmek için seed optik sinyallerini amplifiye eden bir amplifikatör içerebilir. Bu amplifikatör, seed optik darbeleri almak ve dolaştırmak için bir optik kavite ve alınan seed optik darbelerinin ışığının optik kavite içine bağlanmasını kontrol etmek ve ışığın amplifikatörün çıkış ışığı olarak optik kavitenin içine bağlanmasını kontrol etmek için optik kaviteye bağlı bir optik anahtar cihazı içerir. Optik anahtar cihazı, amplifikatör tarafından üretilen amplifiye edilmiş optik

darbelerin bir darbe tekrarlama oranını kontrol etmek ve ayarlamak için optik kavitenin içine bağlanan ışığın bir dizi gidiş-dönüşünü kontrol etmek ve ayarlamak üzere yapılandırılmıştır. Amplifikatör ayrıca, seed optik darbelerinin amplifiye edilmiş optik darbelere amplifiye edilmesi için optik kavitenin içinde bir optik kazanç ortamını ve amplifikatör tarafından indüklenen amplifiye edilmiş optik darbelerin bir dispersiyonunu dengelemek için optik kavite içinde bir dipersiyon kompansatörünü de içerir. Lazer motoru, her bir seed optik darbesi amplifikatöre bağlanmadan önce seed optik darbelerinin bir süresini uzatmak ve amplifiye edilmiş optik darbeleri üretmek için amplifikatör tarafından üretilen amplifiye edilmiş optik darbelerin bir süresinin sıkıştırılması için amplifikatörün dışında bir veya daha fazla optik eleman içerir. Lazer motoru, amplifikatör tarafından indüklenen amplifiye edilmiş optik darbelerin dispersiyonunu dengelemek için sağlanan amplifikatörün dışındaki bir dipersiyon dengeleme cihazı olmaksızın yapılandırılabilir.

Yine başka uygulamalarda, femtosaniye optik darbeleri üretmek için bir lazer motorunun çalıştırılmasına yönelik bir yöntem, her darbede azaltılmış optik güce sahip, genişletilmiş seed optik darbeleri üretmek için, femtosaniye seed optik darbelerinin genişletilmesini; ve genişletilmiş seed optik darbelerinin amplifiye edilmesi için her bir genişletilmiş seed optik darbesinin optik gücünü amplifiye etmek üzere bir optik amplifikatörün optik kavitesine genişletilmiş seed optik darbelerinin bağlanmasını içerebilir. Optik amplifikatörün içinde, optik bir kompansatör, her bir optik darbeye dispersiyon dengelemesi sağlamak için kullanılır; burada optik kompansatör, amplifikatörün neden olduğu dispersiyon hariç işaret olarak karşıt ve amplifikatörün optik kavitesi içindeki ışığın gidiş-dönüşü amplifikatör tarafından indüklenen bir dispersiyon ile büyük ölçüde eşit olan bir dispersiyonu dahil etmek üzere yapılandırılır. Bu yöntem, genişlemiş seed optik darbelerinin ışığının optik kavite içine bağlanmasını ve amplifiye edilmiş gerilmiş optik darbelerin ışığının optik kaviteden bağlanmasını kontrol etmek için optik kaviteye bağlı bir optik anahtar cihazının çalıştırılmasını; lazer motorunun çıktısı olarak sıkıştırılmış amplifiye edilmiş optik darbeler üretmek için, optik kavite dışına amplifiye edilmiş gerilmiş optik darbelerin bir darbe süresinin sıkıştırılmasını; ve amplifikatör tarafından indüklenen dispersiyonu dengelemek için amplifikatörün dışında konumlanan bir dispersiyon dengeleme cihazı kullanılmadan, sıkıştırılmış amplifiye edilmiş optik darbelerin bir darbe tekrarlama oranını kontrol etmek ve ayarlamak için optik kavite içindeki bir dizi ışık gidiş-dönüşünü kontrol etmek ve ayarlamak üzere optik anahtar cihazının çalıştırılmasını içerir.

ŞEKİLLERİN KISA AÇIKLAMASI

ŞEKİLLER 1A-B, yüksek güçlü bir femtosaniye lazer motorunun (1) iki uygulamasını göstermektedir.

ŞEKİL 2, yüksek güçlü bir femtosaniye lazer motorunun (1) bir uygulamasını daha ayrıntılı olarak göstermektedir.

ŞEKİL 3A, bir lazer darbesinin gerilme konseptini göstermektedir.

ŞEKİL 3B, bir genişleticinin (200') ve bir kompresörün (400) bir örneğini göstermektedir.

ŞEKİL 3C, entegre bir genişletici-kompresörün (200) bir uygulamasını göstermektedir.

ŞEKİL 4, bir amplifikatörün (300) bir uygulamasını göstermektedir.

ŞEKİLLER 5A-B, bir lazer kavitesinin pompa-kazanç-boşaltma döngüsünü göstermektedir.

ŞEKİLLER 6A-D, sabit ve değişken tekrarlama oranlarıyla tarama modellerini göstermektedir.

ŞEKİLLER 7A-B, amplifikatörde (300) lazer kristalinin (310) iki farklı sıcaklığında termal lensleme ile ilgili tasarım zorluklarını göstermektedir.

ŞEKİLLER 7C-D, azaltılmış termal lenslemeye sahip amplifikatörün (300) iki uygulamasını göstermektedir.

ŞEKİL 8, ışın demeti optik gücünün çalışma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak bağımlılığını göstermektedir.

DETAYLI AÇIKLAMA

Erken femtosaniye lazerlerde, darbe uzunluğunun aşırı kısalığı, bu darbelerde aşırı yüksek bir güce yol açar. Ancak bu yüksek güç, lazerlerin kazanç ortamına zarar vermek tehdidine sahiptir. Çözüm, genişletilmiş darbe amplifikasyonu (CPA) şeklinde gelmiştir. Bu teknolojide femtosaniye seed darbeleri üretilir, daha sonra seed darbelerinin uzunluğu 10-1000 arasında bir pikosaniye aralığına kadar genişletilir, böylece bir darbe içindeki gücü büyük ölçüde azaltır. Bu genişletilen darbeler, hasarlı hale gelmeden kazanç ortamıyla güvenli bir şekilde güçlendirilebilir. Amplifikasyon, amplifiye edilmiş darbelerin uzunluğunu femtosaniyeye geri sıkıştırarak bir sıkıştırma ile devam eder. Bu CPA yaklaşımı, günümüzde çok sayıda uygulamaya dahil edilmiştir.

Bununla birlikte, CPA lazerlerinin dezavantajları vardır. Tipik olarak, bu lazerler çok sayıda optik elemente sahiptir ve dolayısıyla oldukça karmaşıktır. Bu faktörler, arıza sıklığını oldukça arttırır ve lazerlerin güvenilir bir şekilde açılıp kapanma sayısını azaltır. Ayrıca, CPA lazerlerinin olağandışı büyüklüğü, tıbbi cihazlara entegrasyonunu zorlaştırmaktadır, çünkü bunlar genellikle cerrahi ameliyathanelerin veya ameliyat odalarının sınırlı alanlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, farklı prosedürler, darbelerin tekrarlanma oranının değiştirilmesini gerektiriyorsa, bu değişim, çok sayıda optik elemanın uygulamalarının zaman alıcı şekilde yeniden düzenlenmesini gerektirir. Ek olarak, termal lensleme çoğu CPA lazerinin optik performansını önemli ölçüde etkileyerek, bunların lazerin çalışma gücüne karşı oldukça hassas olmasını sağlar. Bu hassasiyet tekrarlama oranı değişikliklerine karşı bir başka engeldir.

Bu belgede tarif edilen femtosaniye darbe lazerlerinin oluşturulması ve çalıştırılması için lazer tasarımları ve teknikleri, diğer femtosaniye darbe lazerlerinde de çeşitli teknik sorunlara yönelik olarak gerçekleştirilebilir.

ŞEKİL 1A, bir osilatör (100), bir genişletici-kompresör (200) ve bir optik amplifikatör (300) içeren bir genişletilmiş darbe amplifikasyonu (CPA) veya kavite sınırlandırıcı rejeneratif amplifikatör (CDRA) lazer motorunu (1) göstermektedir.

Osilatör (100) bir femtosaniye seed darbesi ışın demeti üretebilir ve verebilir. Genişletici-kompresör (200) bu seed darbelerinin süresini uzatabilir. Amplifikatör (300), genişletilmiş seed darbelerini genişletici-kompresörden (200) alabilir, genişletilmiş darbelerin bir genliğini artırabilir ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbenin bir lazer ışın demetini üretebilir. Bu amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeler, amplifiye edilmiş

genişletilmiş darbelerin bir süresini sıkıştırabilen ve bir femtosaniye darbelerinin bir lazer ışın demeti üreten genişletici-kompresöre (200) optik olarak bağlanabilir.

ŞEKİL 1B, bir başka CPA lazer motorunun (1') bir örneğini göstermektedir, burada optik bir osilatörden (100') aşağı yönde bir optik amplifikatör (300') ve bir optik darbe genişletici (200'), amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri sıkıştırabilen ve femtosaniye darbelerin lazer ışın demetini üretebilen ayrı bir kompresöre (400) bağlayabilir.

Lazer motorlarının (1 ve 1') tarifi birçok kontrol işlevini ve yöntem adımlarını içerir. Bu işlevler ve adımlar bir veya daha fazla kontrolör, işlemci ve diğer bilgisayar kontrolörleri tarafından denetlenebilir. Bu kontrolörler, işlemciler ve bilgisayar kontrolörleri, birbiriyle etkileşim içinde olan gelişmiş bir yazılımı kullanabilir. Sunumun açıklığı için, bu işlemciler, kontrolörler ve bunlara karşılık gelen yazılımlar, bu patent belgesinin şekillerinde gösterilmemektedir, fakat bazı uygulamalarda lazer motorlarının (1 ve 1') tarifinin bir bölümün olması amaçlanmıştır.

Bu başvurudaki örneklerin birçoğu, katarakt cerrahisi, kapsülotomi veya kornea prosedürleri gibi oftalmik uygulamalar açısından açıklanacaktır, ancak lazer motoru (1) uygulamaları, retinal ve kornea cerrahisi gibi çeşitli oftalmik prosedürler, aynı zamanda dermatolojik ve dental uygulamalar, farklı cerrahi uygulamalar ve lazer fotodisruptif veya başka bir lazer destekli işlem ile bir malzeme parçasını şekillendiren çeşitli malzeme işleme uygulamaları gibi oldukça geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir.

Yukarıda belirtildiği gibi, bazı genişletilmiş darbe amplifikasyonu CPA/CDRA lazer motorlarının çeşitli kusurları bulunmaktadır. Lazer motorunun (1) uygulamaları, aşağıdaki tasarım prensiplerinin bir bölümünü veya tamamını ve diğer tasarım hususlarını kullanarak bu sorunlara çözüm sunacak şekilde yapılandırılabilir:

(1) Birçok lazer, yüzlerce veya daha fazla gibi çok sayıda optik elemana sahiptir, bu da tasarımlarını karmaşık ve pahalı kılar. Bu bağlamda, lazer motorunun (1) uygulamaları, toplamda 50 kadar optik elemana ve osilatörün (100) dışında en fazla 35 optik elemana sahip olabilir.

(2) Çok sayıda optik elemana ve ilgili karmaşıklığa sahip olan lazerler yüksek bir arıza sıklığına sahip olabilir. Bazı CPA/CDRA lazerlerinde, lazer "devir" yaptıktan, diğer bir deyişle 30-40 kez açılıp kapatıldıktan sonra arıza olasılığı oldukça yükselebilir. Bu tür sistemler, 30-40 geçiş çevriminden sonra veya daha sıklıkla, lazerin normal çalışması sırasında meydana gelen fiili bir arızayı önlemek için önleyici bakım gerektirebilir.

Bu bağlamda, çok sayıda azaltılmış optik eleman ve yeni dispersiyon kontrol çözümleri nedeniyle, lazer motoru (1) uygulamaları, normal çalışma beklentisiyle 100, 120 veya daha fazla kez devir yapabilir, böylece gerekli servis sıklığı büyük ölçüde azalır ve genel güvenilirliği artar.

(3) Bazı CPA/CDRA lazerlerinin büyük fiziksel içeriği ve buna karşılık gelen gidiş-dönüşteki uzun süreleri, aşağıda tarif edildiği gibi uzun yeniden yükleme süreleri anlamına gelir, böylece tekrarlama oranlarını sınırlandırır, aynı zamanda alan sınırlı cerrahi cihazla kullanımına yönelik faydalarını sınırlar.

Bu bağlamda, lazer motoru (1) uygulamalar, bazı uygulamalarda bir metreden daha kısa ve diğerlerinde iki metreden daha kısa bir uç-aynadan uç-aynaya optik bir yola sahip olabilen kompakt bir rezonant kavitesine sahip olabilir. Aynı zamanda, 300, 500 veya hatta 1,000 kHz kadar yüksek olabilen lazer motoru (1) kompaktlığı, yüksek tekrar oranlarına katkıda bulunan bir faktördür.

Yukarıdaki kompaktlık, fotonların üretim noktasından çıkış noktasına kadar ölçülen ve bu lazerlerin yüksek tekrarlanma oranına rağmen, 150 metreye kadar düşecek şekilde, kavitenin tüm gidiş-dönüşlerini içeren genel bir optik yola dönüştürülebilir.

(4) Bazı CPA/CDRA lazerleri, belirli bir tekrarlama oranında çalışmaları için hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Bu ayarlama, genişleticinin (200) ve amplifikatörün (300), dispersiyonun (200/400) spesifik tekrarlama oranında dispersiyonunu içerebilir. Ancak, bir uygulama tekrarlama oranını değiştirmeyi gerektiriyorsa, genişletici ve amplifikatör bu yeni tekrarlama oranında farklı bir dispersiyona neden olur ve CPA/CDRA lazerin ince ayarlı dispersiyon dengelemesini bozar. Bu değişmiş dispersiyonu dengelemek için, tipik olarak genişleticinin (200) ve kompresörün (200/400) optik elemanlarının zaman alıcı bir prosedürle yeniden ayarlanması gerekir. Bu yeniden ayarlama, bu CPA/CDRA lazerlerini tekrarlama oranını değiştirmek suretiyle oftalmik cerrahi

prosedürlerin zaman skalası üzerinde teknik olarak hantal hale getirir. Bu nedenle, ticari oftalmik CPA lazerlerinin çoğu, değişken tekrarlama oranı işlevselliği sunmaz ve hiçbiri cerrahi prosedür sırasında değişken bir tekrarlama oranı sunmaz.

Bu bağlamda, lazer motoru (1) uygulamaları, amplifikatörün (300) neden olduğu lazer ışın demetinin bir dispersiyonunu azaltabilen ve hatta en aza indirgeyebilen bir dispersiyon kontrolörü veya dispersiyon kompensatörü içerebilir. Bu dispersiyonun en aza indirilmesi, tekrarlama oranının lazer motorun (1) optik elemanlarının zaman alıcı yeniden ayarlanması olmaksızın değiştirilmesine olanak sağlar. Bu nedenle, dispersiyon kontrolörünün dahil edilmesi, zamana duyarlı cerrahi prosedürler sırasında tekrarlama oranını değiştirmeyi mümkün kılar. Bir örnek, bir katarakt ameliyatı için birinci tekrarlama oranını ve bir kapsülotomi veya korneal prosedür için ikinci tekrarlama oranını kullanmaktır. Bilindiği gibi, bu ameliyatlarda zaman faktörü oldukça önemlidir.

(5) Bazı durumlarda, lazer ışın demeti sabit tekrarlama oranlarına sahip olduğunda, lazer noktalarını eşit olmayan bir yoğunluğa yerleştirmek için bir cerrahi prosedür içinde kesim modelleri kullanılabilir. Örnekler arasında bir tarama hızının, bir tarama veya tarama modelinin dönme noktası etrafında veya daraltma veya genişleme spiralinde yavaşlatılması bulunmaktadır.

Bu bağlamda, lazer motoru (1) uygulamaları, esasen sürekli olarak ayarlanabilen bir tekrarlama oranına sahip olacak şekilde ve tarama hızının varyasyonlarını dengelemek için değişen tarama hızıyla eşzamanlı olarak yakın tekrarlama oranını ayarlamak ve yakın sabit yoğunluğa veya önceden belirlenmiş yoğunluk profiline sahip lazer noktalarının oluşumuna olanak sağlamak üzere yapılandırılabilir.

(6) Ayrıca, termal lensleme bazı CPA/CDRA lazerlerinin optik performansını olumsuz yönde etkiler ve bunları lazer ışın demetinin güç ve tekrarlama oranındaki değişikliklere karşı istenmeyen şekilde hassas hale getirir. Bu bağlamda, lazer motoru (1) uygulamaları termal lensleme dengeleme tekniklerini kullanabilir ve bu uygulamaları uygulanan lazer ışın demetinin güç ve tekrarlama oranındaki değişikliklere karşı oldukça duyarsız hale getirir.

ŞEKİL 2, lazer motorunun (1) spesifik bir uygulamasını ayrıntılı olarak göstermektedir. Osilatör (100), lazer motoru (1) için seed darbeleri üretebilen ve veren çok çeşitli ışık kaynağı olabilir. Örnekler arasında diyot pompalanmış fiber osilatörleri bulunur. Osilatör, tek bir diyot içerebilir, örneğin 808 nm dalga boyunda çalışan bir GaAs diyotu veya çok çeşitli diğer diyotlar.

Fiber osilatörler, serbest alan ışın demeti yayılımına dayanan osilatörlerden çok daha küçüktür. Ameliyathanede, kalabalıklığın bastırma zorluğu olduğu cerrahi uygulamalarda, lazer motorunun mekansal boyutunu azaltmak, oldukça değerli bir tasarım özelliğidir.

Bazı örneklerde, osilatör yüksek kaliteli seed darbelerini üretir. Bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak belirtildiği gibi yüksek darbe kalitesine birkaç faktör katkıda bulunabilir.

(i) Bazı uygulamalarda, diyot, diyotun içinde yer alan bir Bragg optik ağı gibi bir frekans sabitleme çubuğu içerebilir. Bu tür optik ağlar düşük gürültü ve yüksek darbe-darbeye karşı stabilitesine sahip darbeler sağlayabilir. Fiber, Nd veya Yb ile katkılı camdan oluşturulabilir.

(ii) Osilatör (100) bir yarı iletken emici ayna veya SESAM içerebilir. Bir veya daha fazla SESAM'ın kullanılması, üretilen darbeler içindeki modların uyumunu geliştirir ve bu da esasen kip kilitli bir işlem ile sonuçlanır.

Yukarıdaki tasarım prensiplerine sahip olan osilatörler, esasen transforme sınırlı seed darbeleri, örneğin Gauss formuna sahip darbeler olabilir. Bazı örneklerde, düz tepeli darbeler de üretilebilir. Darbe süresi, 1,000 femtosaniyeden (fs) az olabilir. Bazı uygulamalarda, darbe süresi, 100-500 femtosaniyelik aralıkta, diğer bazı uygulamalarda 50-1,000 femtosaniyelik aralıkta olabilir. Seed darbe frekansı veya tekrarlama oranı, diğer uygulamalarda 20-50 MHz aralığında 10-100 MHz aralığında olabilir. Seed darbe frekansının 10 veya 20 MHz'nin altına düşürülmesi, bir dizi tasarım zorluklarını beraberinde getirir. Bu nedenle, çoğu osilatör 20 MHz'nin üzerindeki frekanslarda çalışır.

Seed darbelerinin ışın demetinin gücü, 100-200 mW aralığında olabilir, diğer uygulamalarda 10-1000 mW aralığında olabilir.

Birçok zamanlama sorunları için, osilatör (100) bir ana saat olarak kullanılabilir.

Genişletici-kompresör (200), darbenin farklı frekans bileşenleri için farklı gecikme süreleri getirerek seed darbelerini genişletebilir. Kısacası, genişletici-kompresör bir dispersiyon veya gerilme getirebilir.

ŞEKİL 3A bu gerilmeyi detaylı olarak göstermektedir. Genişletici-kompresör (200), frekans içeriği veya spektrumu, darbe süresinin çoğunda yaklaşık olarak tekdüze veya "beyaz" olan bir kısa darbe alabilir. Başka bir deyişle, darbenin başlangıcındaki farklı frekans bileşenlerinin genliği yaklaşık olarak eşittir ve darbe süresi boyunca kalır. Genişletici-kompresör (200), bu "beyaz" darbelerin kırmızı, yeşil ve mavi bileşenleri için farklı gecikme süreleri dahil ederek darbe uzunluğunu genişletebilir. Bu nedenle, genişletici-kompresör (200) tarafından üretilen darbenin frekans içeriği veya spektrumu zamana bağımlı hale gelebilir. Tipik bir konvansiyona göre, önde gelen bölüm kırmızı frekanslar tarafından domine edilen darbeler, takip eden bölümde mavi frekansların domine olduğu darbelerde pozitif bir dispersiyon veya gerilme olarak referans gösterilir.

Mevcut tarifname, zaman domainindeki, diğer bir deyişle yüksek ve düşük frekanslı bileşenlerin nispi gecikmesine karşı gerilme anlamına gelir. Mekansal gerilme, diğer bir deyişle, yüksek ve düşük frekanslı bileşenlerin ışın demeti içinde mekansal olarak ayrılması, çeşitli ek tasarım zorluklarını arttırır ve genişleticinin (200') veya genişletici-kompresörün (200) istenen işlevleri arasında değildir.

Genişletici-kompresör (200) veya genişletici (200'), darbenin önde gelen bölümündeki kırmızı içeriği arttırarak ve darbenin arka bölümündeki mavi içeriği arttırarak, başlangıçta beyaz seed darbelerine pozitif bir gerilme oluşturabilir. Benzer şekilde, beyaz olmayan darbeler, genişletici-kompresör (200) veya genişletici (200') tarafından da gerdirilebilir.

Genişletici-kompresör (200), 50 ila 1,000 femtosaniyelik bir aralıktan femtosaniye seed darbelerinin bir süresini, 1,000-200,000 femtosaniyelik bir süre veya 1-200 pikosaniye hatta 500 ps'ye kadar genişletebilir. Genişletici-kompresör (200), femtosaniye seed darbelerinin süresini 10'dan büyük bir faktörle uzatabilir. Bazı durumlarda, genişletme

faktörü, 10^2, 10^3, 10^4 veya 10^5'den daha büyük olabilir. Bu genişletme faktörlerinin her biri amplifikatör (300) için farklı tasarım kriterleri sunar.

ŞEKİL 3B, **ŞEKİL 1B**'de gösterilen tipte lazer motorlarının (1') göstermektedir, bunlar bir genişleticiyi (200') ve ayrı bir kompresörü (400) kullanabilir. Genişletici (200') bir birinci optik ağ (201), bir mercek (202), bir ikinci optik ağ (203) ve bir ayna (204) içerebilir. Kısa bir darbe (211) genişleticiye (200') girdiğinde, birinci optik ağ (201) farklı frekans bileşenlerini farklı yönlere çekebilir. Birinci optik ağdan (201) çıktıktan sonra, uzaklaşan ışın demetleri merceğe (202) yayılabilir ve ikinci optik ağa (203) yeniden yönlendirilebilir. Bazı uygulamalar mercek (202) yerine iki mercek kullanabilir. İkinci optik ağ (203) birinci optik ağ (201) ile bir açı yaptığından ve farklı frekans ışın demetlere farklı yönlerde yayıldığından, farklı frekans bileşenleri farklı mesafelere hareket eder ve bunu yapmak için farklı sürelere ihtiyaç duyarlar.

Örneğin, **ŞEKİL 3B**'deki genişleticide (200'), spektrumun mavi bölgesinde bulunan frekanslara sahip bileşenler, kırmızı bölgedeki bileşenlerden daha uzun bir mesafe kat eder ve gelen kısa darbenin kırmızı bileşenine göre bir gecikme elde eder. Burada ve genel olarak "mavi" ve "kırmızı" terimleri, açıklayıcı ve göreceli bir şekilde kullanılmaktadır. Darbe spektrumunun bileşenlerini sırasıyla daha kısa ve daha uzun dalga boylarıyla belirtmektedirler. Özellikle uygulamalarda, lazer ortalama dalga boyu 1000-1100 nm'de olabilir ve darbe bant genişliği, 2-50 nm aralığında, bazı durumlarda 5-20 nm aralığında olabilir. Bu örnekte, darbenin tüm spektrumu kızılötesi bölgedir. Bu örnekte, "mavi" ve "kırmızı" terimleri, sırasıyla, darbe bandının genişliği içinde daha kısa ve daha uzun dalga boylarına sahip olan kızılötesi spektrumun bölümlerini belirtmektedir.

İkinci optik ağın (203) fonksiyonları arasında kısmi gerdirme kontrolü, diğer bir deyişle mavi bileşenin kırmızı bileşene göre gecikmesi ve ayrıca ışın demetin ayna (204) tarafından yansıması için uygun hale getirilmesi için esas olarak paralel bir ışın demetine geri yüklenmesi yer alır. Ayna (204), ikinci optik ağ (203), mercek (202) ve birinci optik ağ (201) boyunca optik yolunu tekrar izleyen frekansla ayrılmış paralel ışın demetleri yansıtır. Darbenin birinci optik ağdan (201) çıktığı zaman, darbenin mavi bileşeni, oldukça uzun mesafeler kat eder ve böylece kırmızı bileşenin gerisinde kalır.

Bu gecikme, üretilen darbe üzerinde en az üç etkiye sahiptir: (i) darbe uzunluğu önemli ölçüde uzar, (ii) farklı frekans bileşenlerinin genlikleri, zaman içinde birbirine göre kaydırılır, kırmızı bileşenler darbenin önde gelen kenarı ve mavi bileşenler arka kenara doğru kayar veya tam tersi geçerlidir, (iii) darbenin toplam enerjisi, daha uzun bir darbe uzunluğuna dağıtılır ve üretilen darbesinin optik gücü azaltılır. Bazı durumlarda, darbe süresi 100, 1000 veya daha fazla bir faktörle genişletilebilir, buna karşılık gelen güç 100, 1000 veya daha fazla bir faktörle azaltılabilir. Özetle, genişletici-kompresör (200) veya genişletici (200') darbeyi genişletebilir, pozitif bir gerilme oluşturabilir ve böylece darbenin gücünü önemli ölçüde azaltabilir.

Daha önce tarif edildiği gibi, daha sonraki amplifikatörün (300) kavite optiğinin aşırı yüksek güçteki darbelere maruz kalmaması ve dolayısıyla ışın demeti tarafından hasar görmemesi için, darbenin pik gücünün azaltılması CPA/CDRA lazerlerinin faydalı bir yönüdür.

ŞEKİL 3B ayrıca üçüncü bir optik ağı (205), dördüncü optik ağı (207) ve aynayı (208) içerebilen bir kompresörün (400) bir örneğini göstermektedir. Bazı örneklerin bu optik ağlar arasında mercekleri yoktur, diğerleri ise bir veya iki merceğe sahip olabilir. Üçüncü optik ağ (205) yine, darbe spektrumunun farklı bileşenlerini, genişleticinin (200') birinci optik ağı (201) ile benzer şekilde farklı yönlere yönlendirir. Dördüncü optik ağ (207), ikinci optik ağ (203) ile benzer şekilde, mavi ve kırmızı bileşenlerin nispi gecikmelerini yönlendirme yoluyla kısmen kontrol eder. Bununla birlikte, dördüncü optik ağ (207) şimdi ikinci optik ağa (203) zıt olarak yöneldiğinden, mavi bileşenlerin optik yolu artık daha kısa, olumsuz bir gerilmeye neden oluyor. Bu negatif dispersiyon, genişletilmiş darbenin mavi bileşenlerinin kırmızı bileşenlerle yetişmesine ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin genel süresini yüzlerce pikosaniyeden yüzlerce femtosaniye kadar kısaltır. Ayrı genişleticiler (200') ve kompresör (400) ile yapılan tasarımlar, **ŞEKİL 1B**'deki lazer motorunun (1') uygulamalarıdır.

ŞEKİL 3B ayrıca, **ŞEKİL 1B**'deki ayrı bir genişleticiye (200') ve kompresöre (400) sahip tasarımların iki hassas yönünü göstermektedir.

(i) İlk olarak, genişleticinin (200'), amplifikatörün (300) ve kompresörün (400) birbiri ile hassas bir şekilde ayarlanması gerekir, böylece kompresör (400) genişleticinin (200') neden olduğu genişlemeyi ve yüksek hassasiyetli amplifikatörün (300) daha sonraki

dispersiyonun neden olduğu dispersiyonu geri alabilir. Bu nedenle, merceğin (202) konumunu ayarlamak ve birinci ila dördüncü optik ağların (201 - 207) yönelimi, amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin dispersiyonunu dengelemek ve bunları femtosaniye darbelerini geri sıkıştırmak için özellikle yüksek hassasiyet gerektirebilir. Ve elbette, yüksek hassasiyetli ayarlamalar pertürbasyonlara karşı oldukça hassastır: sıcaklıktaki küçük değişiklikler, gidiş-dönüşlerin sayısı ve mekanik stres hassas ayarlamayı zayıflatabilir, **ŞEKİL 1B**'deki mimariye sahip lazer motorunun (1') bakımı ve yeniden kalibrasyonunu gerektirir.

(ii) Bazı karmaşık veya çok aşamalı prosedürlerde, tekrarlama oranında değişiklik istenebilir. Bununla birlikte, tekrarlama oranındaki böyle bir değişiklik, tipik olarak, üretilen darbeleri optimize etmek için gidiş dönüş sayısında bir değişiklik ile birlikte bulunur. Buna karşılık, gidiş-dönüş sayısının değişmesi, termal lenslemede ve ayrıca amplifikatörün (300) neden olduğu birleşik dispersiyonda bir değişikliğe neden olur. Bu nedenle, tekrarlama oranı ve gidiş-dönüş sayısındaki değişim, dikkatli bir şekilde kalibre edilen genişletme, dispersiyon ve sıkıştırma dengesini bozabilir.

ŞEKİL 3B'de oklarla gösterildiği gibi, bu değişimlere karşı koymak için, lazer motorun (1') bazı uygulamaları, merceğin (202) konumunu, optik ağlarının (201, 203, 205 ve 207) bazılarının pozisyonunu veya yönünü, aynaların (204 ve 208) konumunu değiştirerek veya ışın demetinin merceğe (202) çarptığı yerde bir veya daha fazla aynayı hareket ettirerek yeniden kalibre edilebilir. Söylemeye gerek olmasa da, bu değişiklikler tipik olarak, her biri zaman alıcı müdahaleler olan dikkatle ve sıklıkla yinelenen mekanik ayarlamalar ve hassas kalibrasyon gerektirir.

Yeniden kalibrasyonun yavaşlığı, darbe tekrarlama oranının zamanında değişmesinin istendiği uygulamalarda bir sorun yaratabilir. Bu, zamanın kritik bir faktör olduğu uygulamalarda özellikle engelleyici olabilir, örneğin hastanın göz hareketlerini kontrol etme yeteneğinin 90 saniye kadar düşük olduğu oftalmik cerrahi uygulamalar sırasında. Tüm bu nedenlerden dolayı, çoğu lazer motoru değişken bir tekrarlama oranı ile ilgili işlevsellik sunmaz.

Ek olarak, lazer motorda (1') genişleticinin (200') kompresörden (400) ayrı olduğu ve her ikisinin birden fazla optik ağ ve mercek içermesi nedeniyle, genişleticinin mekansal

uzantısını ve **ŞEKİL 1B**'ye ait lazer motorunun (1') kompresörü tipik olarak mekansal olarak oldukça kapsamlıdır.

Genişleticinin (200') ve kompresörün (400) mekansal taban alanını azaltmak ve kalibrasyon sürelerini kısaltmak için, lazer motorunun (1') bazı uygulamalarında, genişleticinin (200') ve kompresörün (400) bir veya daha fazla optik elemanı paylaşması mümkündür. Bazı durumlarda, birinci optik ağ (201) ve üçüncü optik ağ (205) gibi bir optik ağı paylaşırlar.

Çoğul katlanmış örneklerde, genişleticinin (200') iki optik ağı aynı fiziksel optik ağ olabilir, mercekler ve aynalar aynı optik ağdaki ışın demetlerini farklı geçişler sırasında farklı yönlerden yönlendirir. Çoğul katlanmış örneklerde, genişleticinin (200) iki optik ağının ve kompresörün (400) iki optik ağının tüm fonksiyonları tek bir paylaşımlı optik ağ ile gerçekleştirilebilir.

ŞEKİL 3C, bu zorluklara sağlam bir çözüm sunan **ŞEKİL 1A**'daki uygulamalanın genişletici-kompresörünün (200) bir örneğini göstermektedir. **ŞEKİL 3C**'deki genişletici-kompresör (200), genişletme ve sıkıştırma işlevlerini bütünleştirir ve böylece **ŞEKİL 1A**'daki lazer motorunun (1) bir uygulamasında kullanılabilir. **ŞEKİL 3C**'deki örnekte uygulanan bu genişletici-kompresör (200), bir gerilmiş hacminde Bragg optik ağıdır (CVBG). Bu CVBG, örneğin bir fototermal refraktif (PTR) camda, tabakalar halinde bir yığın olabilir, katmanlar uygun kırılma indislerine ve tabakaların pozisyonu ile değişen bir optik ağ periyoduna sahiptir. Böyle bir tasarımda Bragg rezonans koşulu, bir darbenin farklı spektral bileşenleri için farklı konumlarda meydana gelir. Böylelikle farklı spektral bileşenler farklı konumlarda yansıtılmakta ve darbe içinde farklı zaman gecikmeleri elde edilmektedir.

ŞEKİL 3C'deki örnekte gösterildiği gibi, kısa bir "beyaz" darbe (211), genişletici-kompresöre (200) girdiğinde, kırmızı frekans bileşenleri, dalga boyu daha uzun olduğu ve bu yakın bölgelerdeki Bragg yansıma koşullarını karşıladığından dolayı, daha geniş katman aralıklarına veya optik ağ periyodlarına sahip olan yakın bölgelerden kırılmaktadır. Aksine, daha kısa dalga boylarına sahip olan mavi frekans bileşenleri, optik ağın daha uzak bölgelerinden döndürülür. Mavi bileşenler daha uzun bir optik yolu geçtiğinden, kırmızı bileşenlere göre bir gecikme elde ederler. Böylelikle, verilen kısa beyaz darbe (211), bu CVBG genişletici-kompresör (200) tarafından daha uzun bir

genişletilmiş darbeye (212) genişletilir. Spesifik örnekte, genişletilmiş darbe (212), mavi bileşenlerin kırmızı bileşenlere göre gecikmesi nedeniyle pozitif bir gerilme meydana getirir. Diğer uygulamalarda, bir CVBG'nin negatif bir gerilme oluşturarak, mavi renklere göre kırmızı spektral bileşenleri geciktirmesi mümkün olabilir.

Bu CVBG genişletici-kompresör (200), amplifikatör (300) tarafından amplifikasyondan sonra genişletilmiş darbelerin, karşı uç veya kompresör porttan aynı CVBG genişletici-kompresöre (200) enjekte edilmesi nedeniyle, herhangi bir ince ayar gerektirmeden, yüksek hassasiyette amplifiye edilmiş genişletilmiş darbeleri (213) sıkıştırabilir. Bir genişletilmiş darbe, karşı uçtan CVBG genişletici-kompresöre (200) girdiğinde, kırmızı bileşenleri, mavi bileşenlerinin, darbenin orijinal kısa uzunluğunu geri yükleyerek, genişletme adımı sırasında ertelendiği gibi, aynı dereceye kadar geciktirilir. Bu nedenle, bu genişletici-kompresör (200), genişletme sırasında ortaya çıkan dispersiyonu çok verimli bir şekilde dengeleyebilir ve uygun şekilde sıkıştırılmış bir amplifiye edilmiş darbe (214) üretebilir.

Ayrılmış genişletici (200') ve kompresöre (400) sahip lazer motorlarının (1') özel yönleri ile karşılaştırıldığında (i) lazer motorunda (1) hiçbiri olmadığı için hareketli optik elemanların hassas hizalanmasına karşı yüksek hassasiyet göstermez ve mekanik bozulmalara veya çalışma sıcaklığındaki değişikliklere karşı kayda değer bir sağlamlık gösterir ve (ii) amplifikatörün (300) yeni tasarımı, denklemler (1) - (2) ve **ŞEKİLLER 5A-B** ilgili olarak açıklandığı gibi, gidiş-dönüşlerin sayısıyla ilişkili olarak ek dispersiyonu indüklemediğinden lazer motoru (1), optik elemanlarının hassas yeniden kalibre edilmesini ve yeniden hizalanmasını gerektirmez ve tekrarlama oranı değiştirildiğinde kuruluma ihtiyaç duymaz. Bu özellikler, lazer motorunun (1), tekrarlama oranının hızlı veya zamanında değişmesinin önemli olduğu uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

Yukarıda tarif edilenlerden farklı başka tasarımlarda, amplifikatör (300) ilave dispersiyon dahil edebilir. Bu tasarımlarda genişletici-kompresörün (200) entegre mimarisi, kompresörün sadece genişleticinin dispersiyonunu değil, amplifikatörün (300) ek dispersiyonunu sıkıştırmak zorunda kaldığı şekilde yeniden ayarlama işlevselliği ile desteklenebilir. Bu eklenen görev, kompresör fonksiyonuna göre ayarlanabilir bir blok uygulamasını gerektirebilir.

ŞEKİL 2'de gösterildiği gibi, lazer motoru (1) ayrıca etkili bir polarize edici ışın demeti ayırıcı (150) içerebilir. Işın demeti ayırıcı (150), bir polarizer ve osilatör (100) ile genişletici-kompresör (200) arasında bir λ/4 plakası içerebilir. Diğer uygulamalarda, ışın demeti ayırıcı (150); bir ince bir film polarizeri olabilir. Bu kombinasyon (150), osilatörden (100) genişletici-kompresöre (200) giden seed darbelerinin içinden geçebilir, ancak genişletici-kompresörden (200) geri gelen genişletilmiş darbeleri amplifikatöre (300) doğru yönlendirir, çünkü λ/4 plakası polarizasyon düzlemini çift geçişte 90 derece darbeler ile döndürür. Polarizer, seed darbelerinin polarizasyon yönü için aktarılırken, lambda/4 plakasını ikinci kez geçtikten sonra, genişletilmiş darbelerin 90 derece döndürülmüş polarizasyon düzlemi için yansıtıcıdır.

Bazı uygulamalarda, lazer motoru (1), ışın demeti ayırıcı (150) ve amplifikatör (300) arasındaki optik yoldaki bir Faraday izolatörü (500) içerebilir. Faraday izolatörün (500) fonksiyonları, lazer ışın demetinin osilatöre (100) yüksek gücüyle hasar vermesini önlemek için, osilatörün (100) amplifiye edilmiş ışın demetinden izole edilmesini içerebilir. Böyle bir Faraday izolatörü (500), ışın demeti ayırıcıdan (150) genişletilmiş seed darbelerini alabilir, genişletilmiş seed darbelerini amplifikatöre (300) doğru iletebilir, amplifikatörden (300) amplifiye edilmiş genişletilmiş lazer ışın demetini alır ve amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelerin lazer ışın demetini, polarizerler (550 ve 560) aracılığıyla genişletici-kompresöre (200) doğru üretir.

Faraday izolatörleri (500), amplifikatörün (300), bunları aldığı aynı optik yoldan amplifiye edilmiş darbeleri ürettiği uygulamalarda faydalı olabilir, çünkü basit yeniden yönlendirici optikler, amplifiye edilmiş darbelerin çoğu zaman seed darbelerinden yüzlerce veya binlerce kez daha fazla yoğunluğa sahip olduğu izolasyon işlevi için oldukça yetersiz olabilirler. Basit yönlendirme optiği, bu amplifiye edilmiş darbelerin sadece bir bölümünden geçse bile, iletilen darbeler, halen osilatöre (100) zarar üretecek kadar yoğun olabilir.

Bazı uygulamalarda, Faraday izolatör (500), amplifikatörden (300) osilatöre (100) doğru bir lazer ışın demetinin 1/10,000 bölümünden daha azını sağlayacak şekilde yapılandırılabilir. Aynı izolasyon fonksiyonu, zayıflama açısından yakalanabilir: Faraday izolatörü, amplifiye lazer ışın demetini örneğin 40 dB veya bazı uygulamalarda 50 dB zayıflatabilir.

Faraday izolatörü veya polarizasyona bağımlı izolatör, üç bölüm içerebilir: bir giriş polarizeri, dikey olarak polarize edilmiş bir Faraday rotatörü ve 45 derece polarize edilmiş bir çıkış polarizeri veya analizörü.

İleri yönde hareket eden ışık, eğer o yönde zaten polarize edilmemişse polarize olur, örneğin giriş polarizeri tarafından dikey olarak. (Burada polarizasyon düzlemi, elektrik alan vektörlerinin bulunduğu düzlemi ifade eder. Ayrıca, "dikey" sadece bir konvansiyon veya bir referans düzlemi oluşturur. Çeşitli uygulamalarda, fiili polarizasyon düzlemi diğer spesifik yönlere yönlendirilebilir.) Faraday rotator, ışın demeti polarizasyon düzlemini yaklaşık 45 derece döndürerek, bunu analizörün polarizasyon düzlemi ile hizalar ve daha sonra polarizasyon düzleminin ek rotasyonu olmaksızın ışığı iletir.

Amplifikatörden (300) dönen kuvvetlendirilmiş darbeler gibi geriye doğru hareket eden ışık, analizörden çıktıktan sonra referans dikey düzleme göre 45 derecede polarize olur. Faraday rotatörü tekrar polarizasyonu yaklaşık 45 derece döndürür. Bu nedenle, Faraday rotatörünün giriş polarizerine doğru verdiği ışık yatay olarak polarize edilir. Giriş polarizeri dikey olarak polarize olduğu için, yatay polarize ışık, osilatöre (100) iletmek yerine, giriş polarizeri ile mükemmelliğe yakın şekilde yansıtılacaktır. Böylece, Faraday izolatörü (500), osilatörü (100), yüksek enerjiyle amplifiye edilmiş yüksek verim lazer darbelerinden koruyabilir.

Faraday rotatörü, tipik olarak, optik eksen yönünde bir manyetik alan oluşturarak işlevini gerçekleştirir. Bazı Faraday rotatörleri bu işlevselliği elde etmek için kalıcı mıknatıslar içerir.

Faraday rotatörlerde kullanılan optik materyaller tipik olarak yüksek bir Verdet sabitine, düşük bir emme katsayısına, düşük doğrusal olmayan kırılma indisine ve yüksek hasar eşiğine sahiptir. Ayrıca, kendi kendini odaklama ve diğer ısınma ile ilgili etkileri önlemek için, optik yol tipik olarak kısadır. 700-1100 nanometre aralığı için en yaygın kullanılan iki materyal terbium katkılı borosilikat cam ve terbiyum galyum granat kristalidir (TGG).

Lazer motorunun (1 veya 1'), amplifikatörün (300), girilen aynı optik yol vasıtasıyla amplifiye edilmiş darbeleri üretmediği uygulamalar, Faraday izolatörünün (500) kullanılmasını gerektirmeyebilir.

ŞEKİLLER 2 ve **4**, Faraday izolatörden (500) iletilen ışığın, amplifikatöre (300) girebileceğini göstermektedir. Amplifikatör (300), uç-aynalar (321 ve 322) arasında gidiş dönüşler yapan genişletilmiş seed darbelerini amplifiye etmek için bir lazer kristali veya kazanç ortamı (310) içerebilir. Amplifikatör (300), rezonant kavitenin mekansal uzantısını azaltmak için lazer ışın demetini katlanır aynalarla yeniden yönlendiren katlanmış bir optik yol (veya "z-kavite") içerebilir. **ŞEKİL 4**'deki amplifikatörün (300) dört aynası vardır: rezonant kaviteyi tanımlayan iki uç-ayna (321 ve 322) ve iki katlama aynası (323 ve 324). Bazı örneklerde, optik yol, bir geçiş modeli olarak görünecek şekilde kendi üzerine katlanabilir. Daha fazla katlanan ayna kullanıldığında, optik yolun daha kompakt bir alana katlanmasıyla amplifikatörün (300) boyutu daha da azaltılabilir, ek aynalar ise yanlış hizalama potansiyelini ve fiyatı artırır.

Lazer kristali (310) ve aynalara (321-324) ek olarak, amplifikatör (300), Q kalite faktörünü ve böylece amplifikatörün (300) amplifiye etme işlevini ve aynı zamanda kavitedeki darbeler için girdi/çıktı portu olarak hizmet eden bir ince film polarizerini (340) kontrol eden bir geçiş yapabilir polarizer (330) içerebilir. İnce film polarizeri (340), ışığı önceden belirlenmiş bir polarizasyonla yansıtan bir polarizasyon seçici aygıtın spesifik bir örneğidir ve ışığı önceden belirlenmiş birinci polarizasyona ortogonal olan ikinci bir polarizasyon ile iletir. Geçiş yapabilir polarizer (330), içinden geçen ışığın polarizasyonunu döndürmediğinde bir birinci çalışma durumu ve buna uygulanan bir kontrol sinyaline yanıt olarak ışığın polarizasyonunu döndürdüğünde bir ikinci çalışma durumu arasında geçiş yapan bir polarizasyon cihazı olabilir. İnce film polarizeri (340) ve geçiş yapabilir polarizer in (330) kombinasyonu, Faraday rotatöründen (500) gelen darbelerin amplifikatöre (300) bağlandığında ve aşağıda açıklandığı gibi amplifikatörün (300) içindeki amplifiye edilen darbeler amplifikatörden dışarı bağlandığında kontrol edilmesi için kullanılabilir.

İnce film polarizerinin (340) ve geçiş yapabilir polarizerin (330) **ŞEKİL 4**'teki bu kombinasyonu. amplifikatörün (300) rezonant kavitesi için bir optik anahtarın bir örneğidir. Bu optik anahtar için başka tasarımlar da kullanılabilir.

Amplifikatörün (300) çalışması ve yapısı aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Özellikle, tekrarlama oranının değiştirilmesine, uç-aynalar (321 ve 322) arasında amplifiye edilmiş bir darbenin yaptığı gidiş-dönüşlerin sayısının değiştirilmesinin eşlik

ettiği gösterilecektir. Biraz önce açıklanan optik anahtarın bir fonksiyonu, darbeler rezonant kavitenin içine veya dışına bağlandığında kontrol ederek bu gidiş dönüşlerin sayısını kontrol etmektir.

Amplifikatördeki (300) optik elemanlar, bu gidiş-dönüşlerin her biri sırasında belirli bir miktarda dispersiyonu başlatabilir. Böylece, tekrarlayıcı oranın değiştirilmesine ilişkin olarak amplifikatördeki (300) gidiş-dönüş sayısının değiştirilmesi, amplifikatör (300) tarafından üretilen amplifiye edilmiş darbelerin kümülatif dispersiyonunu değiştirir. Kompresör (400), belirli bir sayıda gidiş-dönüş için dispersiyonu dengelemek üzere ayarlanmış olsa bile, gidiş-dönüş sayısındaki değişimden kaynaklanan dispersiyonun değişmesi, genişletmenin hassas dengesini, dağınık amplifikasyonu ve genişleticinin (200'), amplifikatörün (300) ve **ŞEKİL 1B**'deki lazer motorunun (1') kompresörünü (400) bozar ve uzun zaman alan yeniden kalibrasyonu gerektirir. Lazer motorunun (1) daha yenilikçi mimarisi, **ŞEKİL 1A**'daki entegre genişletici-kompresör (200) ile birlikte, gidiş dönüş sayısı değiştiğinde ayarlanacak bir dengeleme elemanının kullanılmasını gerektirebilir. Bu özellik, bu lazer motorlarının kullanımını sınırlar.

Bazı lazer motorları, bunların faydasını genişletmek için, amplifikatörün (300) bir parçası olarak bir dispersiyon kontrolörü veya bir kompansatör içerebilir. Dispersiyon kontrolörünün bir fonksiyonu, gidiş-dönüş sırasında amplifikatörün (300) optik elemanları tarafından yerleştirilen dispersiyonun karşıt ve esas olarak eşit dispersiyonunu sunmaktır. Bu dispersiyon dengeleme veya kontrolünün bir sonucu olarak, darbeler, amplifikatörün (300) rezonant kavitesindeki gidiş-dönüşler sırasında çok az dispersiyon gerektirir veya hiç gerektirmez. Böylece, gidiş-dönüş sayısının değiştirilmesi, amplifiye edilmiş darbelerin sadece küçük bir dereceye kadar dispersiyonunu değiştirmekte veya hiç değişmemektedir.

Bu nedenle, lazer darbelerinin tekrarlama oranı dengelenmek üzere gidiş-dönüşler sırasında hiçbir dispersiyon birikmediğinden, kompresörün (400) veya genişletici-kompresörün (200) optik kurulumunun ayarlanması, yeniden hizalanması veya kalibrasyonu ile değiştirilebilir. Buna göre, tekrarlayıcı oranların değiştirilmesi üzerine, zaman alıcı yeniden hizalama görevi ile ilgili kompresörü (400) rahatlatmak için dispersiyon-kontrollü amplifikatör (300), **ŞEKİL 1B**'deki lazer motoruna (1') uygulanabilir. Ayrıca, bu dispersiyon-kontrollü amplifikatör (300), entegre genişletici-

kompresörün (200) **ŞEKİL 1A**'daki lazer motoru (1) içinde ayarlanabilir telafi edici işlevsellikler olmadan kullanılmasını sağlar.

Örneğin, lazer kristali (310) rezonant kavite içinde bir lazer darbesinin bir gidiş-dönüşü sırasında bir pozitif dispersiyon dahil ediyorsa, dispersiyon kontrolörü lazer darbe dispersiyonunu bastırmak, minimize etmek veya ortadan kaldırmak için aynı büyüklükteki amplifiye edilmiş genişletilmiş darbelere negatif bir dispersiyonu dahil edebilir.

Dispersiyonu ölçmek için yararlı bir ölçü, genellikle aşağıdaki gibi tanımlanan "grup gecikme dispersiyonu" veya *GDD*'dir:

$$GDD = \frac{\lambda^2}{c}\frac{d\ n(\lambda)}{d\lambda}L \qquad (1)$$

burada λ, ışığın dalga boyu, c ışık hızını, $n(\lambda)$, kırılma dalgasına bağlı kırılma indisidir ve L, kavitedeki optik yolun uzunluğudur. Optik elemanların (310, 330 ve 340) *GDD*'leri, aynalar (321-324) ve amplifikatörde (300) bulunabilecek herhangi bir diğer optik eleman, örneğin ölçüme ile veya tasarımdan çıkar. *GDD*'nin bilgisi ile donanmış olan bir dispersiyon kontrolörü, amplifikatörün (300) optik elemanlarının belirlenen *GDD*'sine yaklaşık olarak eşit ve zıt bir değerde bir *GDD* ile kaviteye uygulanabilir. Bu şekilde tasarlanmış kavite, darbelerin gidiş-dönüşü sırasında çok az veya hiç dispersiyon yaratmaz ve tarif edilen problemleri ortadan kaldırır ve lazer motorlarının (1 veya 1') faydasını genişletir.

Açıklayıcı bir örnekte, tipik bir CPA lazer motorunda (1'), bir 500 femtosaniyelik seed darbesi, genişleticiyle (200') genişletilmiş bir darbe uzunluğuna 200.5 ps 200 pikosaniye kadar genişletilebilir. Karşılık gelen kompresör (400), genişletilmiş darbeyi 200 ps geri sıkıştırmak üzere ayarlanıp kalibre edilebilir ve bu da ideal olarak yaklaşık 500 fs'lik bir sıkıştırılmış darbe uzunluğuna neden olur. Kusurlar nedeniyle, gerçekçi durumlarda sıkıştırılmış darbe uzunluğu 500-800 fs aralığında olabilir.

Bununla birlikte, amplifikatörün (300) rezonant kavitesindeki genişletilmiş darbelerin gidiş-dönüşleri sırasında, genişletilmiş darbelerin uzunluğu, kavitenin *GDD*'si tarafından temsil edilen, amplifikatörün (300) çeşitli optik elemanlarının dispersiyonu ile

arttırılabilir. *GDD*'nin tipik değerleri yüzlerce fs^2 ile yüzlerce bin fs^2 arasında değişebilir. Bazı durumlarda *GDD* 5,000 fs^2 -20,000 fs^2 aralığında olabilir. Tipik olarak, genişletici (200) ve kompansatör (400), birbirlerinin darbe uzunluğu üzerindeki etkisini iptal ettiğinden, aşağıdaki ilişkiye göre lazer motoru (1) tarafından üretilen darbe $\Delta t(out)$'un uzunluğu, osilatör (100) tarafından üretilen seed darbesi $\Delta t(seed)$'in uzunluğu ve *GDD* ile ilişkilidir:

$$\Delta t(out) = \frac{\sqrt{\Delta t(seed)^4 + (4\ln 2 \cdot N \cdot GDD)^2}}{\Delta t(seed)} = \Delta t(seed)\sqrt{1 + 7.69 N \cdot \left(\frac{GDD}{\Delta t(seed)^2}\right)^2} \quad (2)$$

burada N, kavitenin gidiş-dönüş sayısıdır.

Bu nedenle, örneğin, bir $\Delta t(seed)$ = 200 fs seed darbesinin uzunluğu, amplifikatörün optik elemanları tarafından tek bir gidiş-dönüş sırasında 7,000 fs^2'lik bir *GDD* tarafından 22 fs ila $\Delta t(out)$ = 222 fs kadar artırılabilir. Bununla birlikte, bu küçük görünen dispersiyon, tekrarlanan gidiş-dönüşlerde birleşir. N = 10 gidiş dönüşten sonra çıkış darbesinin uzunluğu yaklaşık 790 fs ila $\Delta t(out)$ = 990 fs, N = 30 dönüşten sonra yaklaşık 2,700 fs = 2,7 ps ila $\Delta t(out)$ = 2,920 fs = 2,9 ps ve N = 100 dönüşten sonra yaklaşık 9.5 ps ila $\Delta t(out)$ = 9.7 ps artar. Görünür şekilde, bir dispersiyon-kontrollü amplifikatör (300) olmaksızın, darbe uzunluğunun yaklaşık 50'ye kadar olan bir faktörle bu önemli ölçüde bozulması, lazeri bir femtosaniyelik lazerden bir pikosaniye lazerine dönüştürür.

Ayrıca, kompresör (200 veya 400) belirli bir sayıdaki gidiş-dönüşlerin neden olduğu ek dispersiyonu dengeleyecek şekilde kalibre edilmiş olsa bile, örneğin, uygulama gidiş-dönüşlerin sayısını N = 100 gidiş-dönüşe karşılık gelen 9.5 ps dispersiyonun N = 100'den örneğin N = 110'a değiştirmeyi gerektirdiğinde, başka bir 1 ps'lik dispersiyon, amplifikatör (300) tarafından indüklenir ve yine femtosaniye yerine, sıkıştırılmış bir pikosaniye darbe uzunluğuna yol açar.

Tersine, lazer motor (1 veya 1') uygulamaları, rezonans kavitesinin optik elemanlarının neden olduğu *GDD*'yi dengelemek için amplifikatörün (300) içinde bir dispersiyon kontrolörüne sahip olabilir. Bu dispersiyon kontrolörü, amplifikatördeki optik elemanlar tarafından indüklenen gidiş dönüş dispersiyonu başına birkaç fs'yi dengeleyebilir. Böylece, amplifikatör (300), 200 ps darbe uzunluğu ile genişletilmiş darbeleri alabilir ve

amplifikatörün çalıştırıldığı örneğin 50, 100, 200 veya 500 gidiş-dönüş sayısından bağımsız olarak yaklaşık 200 ps darbe uzunluğuna sahip olan genişletilmiş darbeleri yayabilir. Bu nedenle, lazer motorun (1) genişletici-kompresörü (200) veya lazer motorun (1') kompresörü (400), gidiş-dönüş sayısının (N) geniş bir aralığı için darbe uzunluğunu ve bu nedenle, amplifikatörün (300) içindeki dispersiyon kontrolünden veya dengelenmesinden yoksun olan diğer lazer sistemlerinin zaman alıcı yeniden ayarlanması ve kalibrasyonunu gerektirmeksizin, çok çeşitli tekrarlama oranları için femtosaniye aralığına geri sıkıştırabilir. Amplifikatörün (300) içindeki dispersiyon kontrolörü, amplifikatörün (300) dahili optik yolu içinde bulunmaktadır ve böylece optik amplifikatörün (300) dışındaki optik elemanların yeniden ayarlanması gerekmeden GDD/dispersiyonu otomatik olarak dengeler. Amplifikatörün (300) içindeki dispersiyon kontrolörünün uygun bir tasarımı ile, darbe tekrarlama oranını değiştirmek için yeniden ayarlanacak **ŞEKİL 3B**'deki dispersiyon dengeleme optik ağları gibi, optik amplifikatörün dışında ayarlanabilir dispersiyon elemanlarına sahip olma ihtiyacını ortadan kaldırılabilir.

Yukarıdaki tasarım değerlendirmelerinin etkisiyle, lazer motorları (1 veya 1'), 10 kHz - 2 MHz aralığında tekrarlama oranlarına sahip 1000 femtosaniyelik bir darbe süresine sahip bir lazer ışın demeti üretebilir ve temel olarak lazer motorunun, osilatörünkilerden (100) farklı olan tüm optik elemanların aynı kurulumunu yapabilir. Diğer uygulamalar, 50 kHz-1 MHz aralığında bir tekrarlama oranıyla, diğerleri ise 100 kHz-500 kHz aralığında çalışabilir.

Bu nedenle, bu lazer motorlarında, tekrarlama oranı, osilatör (100) dışındaki lazer motorunun optik elemanlarının kurulumunu değiştirmeden bir birinci değerden ikinci bir değere değiştirilebilir.

Tekrarlama oranlarının birinci değerinden ikinci değere değiştiği lazer motorlarına, optik elemanların kurulumundaki bir değişiklik eşlik eder. Bununla birlikte, bu lazer motorlarının bazıları, dispersiyon dengelemesine veya amplifikatörlerinin içindeki kontrole bağlı olarak modifiye edilebilir, böylece modifiye lazer motorları, ikinci tekrarlama oranına sahip lazer ışın demeti üretmek üzere modifiye edilmemiş bir kurulumla çalıştırılabilir.

Lazer motorunun (1) çeşitli uygulamalarında, tekrarlama oranı bir birinci değerden bir ikinci değere değişebilir, burada ikinci tekrarlama oranı birinci tekrarlama oranından en az %10, %50, %100 veya %200 farklıdır.

Rezonant kavitenin optik fiberleri kullandığı bazı tasarımlarda, tekrarlama oranının ayarlanması, bir sonraki kompresörün (400) yeniden akortlanması ve ayarlanması olmadan da mümkün olabilir. Bununla birlikte, bu fiber lazerler (i) darbelerin enerjisi üzerinde ciddi sınırlamalara sahiptir ve (ii) çoğu zaman dispersiyon kontrolörleri yoktur. Bunlar genellikle, fiber kaviteye zarar verme tehlikesini önlemek için her darbe başına sadece 10 mikro Jul'un (µJ) altındaki enerjiyle darbe üretirler. Aşağıda tarif edildiği gibi, birçok oftalmik ve cerrahi uygulama için, darbe başına bu enerji yetersiz olabilir, çünkü bu uygulamalar, çeşitli kayıplar için lazer muhasebesi tarafından çıkarılan 30 veya daha fazla µJ/darbeye çevrilen, hedef üzerinde 20 veya daha fazla µJ/darbe gerektirebilir.

Bir başka önemli nokta, fiber lazerlerde, ışın demetinin sapması, termal yükün değişmesinden dolayı, lazerin tekrarlanma oranı değiştiğinde kaçınılmaz olarak değişir.

Bunun aksine, amplifikatör (300) tipik olarak bir dispersiyon kontrolörü veya kompansatör içerir ve ışık serbest alanda yayılır, böylece lazer motorunun (1 veya 1') bazı örnekleri, 1 - 100 µJ/darbe aralığında bir enerji ile, diğerleri 10-50 µJ/darbe aralığında bir enerji ile, diğerleri ise 20-30 µJ/darbe aralığında bir enerji ile bir lazer ışın demeti elde etmek için çalıştırılabilir.

Bazı lazer motorları (1 veya 1'), tekrarlama oranının değiştirilmesinin, lazer motorunun (1) bir optik elemanının ayarlanmasıyla sağlanacak şekilde yapılandırılabilir. Bununla birlikte, dispersiyon kontrolörünün varlığı nedeniyle, bunlar bile somutlaşmış örneklerde, lazer motoru (1 veya 1'), tekrarlama oranı değiştirildiğinde esas olarak aynı optik elemanların kurulumunu kullanmak için modifiye edilebilir.

Yukarıda açıklanan örnekler birçok farklı şekilde uygulanabilir. Bazı uygulamalarda, optik amplifikatör içindeki dispersiyon kontrolörü veya kompansatörü, gelen ışığın dispersiyonunu değiştirebilen bir veya daha fazla çirpli aynalar, çirpli fiberler, çirpli optik ağlar, prizmalar veya çirpli aktarıcı optik elemanlar içerebilir.

Genel olarak, çirpli optik elemanlar, modüle edilmiş optik özelliklere sahip bir dizi katmana sahip olabilir. Örneklerde, tabakaların kalınlığı ve kırılma indekslerinin değişimi, farklı dalga boylarındaki ışığı farklı şekilde kontrol etmek için tasarlanabilir. Bir örnek, Bragg optik ağının (CVBG) gerilmiş hacmi, genişletici-kompresör (200) ile ilgili olarak halihazırda tarif edilmiştir. Çirpli aynalar gibi diğer örnekler, her bir dielektrik tabakanın veya kısa istif katmanlarının bulunduğu dielektrik malzemelerin katmanlarını içerebilir ve belirli bir dalga boyunun dar bir çevresini yansıtabilir. Çirpli ayna, bir birinci dalga boyundaki bir dalga boyundaki ışığı yansıtacak şekilde uygun bir kalınlığa sahip olan 5-10 dielektrik tabakaların bir birinci istifi oluşturularak yapılabilir. Daha sonra, ikinci bir dalga boyunun yakın çevresinde bir dalga boyu ile ışığı yansıtmak üzere farklı bir kalınlık ve/veya kırılma indisi ile birinci istifin üzerinde ikinci bir istifin 5-10 dielektrik tabakası oluşturulabilir. Uygun sayıda istife sahip yeterli sayıda katman ile oluşturulduğunda, çirpli ayna, diğer dalga boyları ile ışık iletirken, dalga boyu bileşenleri seçilen bir dalgaboyu bantının dalgaboyu bileşenleri ile ışığı yansıtabilir.

Amplifikatördeki dispersiyon kontrol fonksiyonu, aynalardan (321-324) bir veya daha fazla aynayı çirpli hale getirerek gerçekleştirilebilir. **ŞEKİL 4**'te dört aynanın tamamı çirplidir. Diğer tasarımlarda aynaların yalnızca bir veya ikisi çirplidir. Yine de diğerleri bir veya daha fazla çirpli optik eleman kullanabilir. Dispersiyon kontrolörünün olası gerçekleştirmeleri olarak, bu bir veya daha fazla çirpli ayna, amplifikatörün (300) rezonant kavitesi içinde bir amplifiye edilmiş genişletilmiş lazer darbelerinin gidiş-dönüşü sırasında, optik elemanlar (310, 330 ve 340) ve aynalar (321-324) tarafından indüklenen dispersiyonu kontrol edebilir, kompanse edebilir, minimize edebilir veya hatta ortadan kaldırabilir.

Lazer kristali (310) Nd veya Yb bazlı olabilir. Örnekler Nd: YAG ve Yb: YAG kristallerini içerir. Diğer uygulamalar Nd veya Yb katkılı camı kullanabilir. Ancak diğerleri $Yb:X(WO_4)_2$ formundaki Yb:tungstatlar veya $Yb:X_2O_3$ formundaki Yb:seskioksitlerdir. Bu durumlarda X; Y, Lu, Gd veya diğer uygun elementler olabilir. Nd veya Yb doping seviyesi %0.1-100 aralığında olabilir.

Lazer kristalinin mekansal doping profili, yüksek kaliteli tek modlu lazer darbelerinin emisyonunu sağlamak için seçilebilir. Bazı doping profilleri, pompalama ışığının olağan M^2 katsayısından daha büyük olarak ifade edilen sınırlı odaklanabilirliğe sahip bir pompalama ışık kaynağı ile uyumlu olabilir. Pompalama kaynağı bir yan pompalama

veya bir son pompalama düzeninde olabilir. Pompalama ışığı kaynağı, her biri 1-10 W güç ile yayan, 2-10 diyot gibi birden fazla fiber-bağlı diyot içerebilir. Pompalama diyotları esasen sürekli bir dalga (CW) çalışma modunda veya analog yüksek frekanslı darbe modunda çalışabilir. Farklı mekansal diziler, çubuklar veya diğer formlarda düzenlenebilirler. Diyotlardan gelen ışık, ışığın çok küçük bir yüzdesini diyotlara dönüştürebilen ve böylece ışığını kilitleyen faz olan ortak bir optik ağ vasıtasıyla yönlendirilebilir.

ŞEKİL 5A-B, **ŞEKİL 4**'te kavite sınırlandırıcı rejeneratif amplifikatör CDRA'nın (300) çalışması gösterilmektedir. İşlemin prensibi, rezonant kavitenin kalite faktörünün Q anahtarlanması ile ilgilidir, genellikle "Q-anahtarlama" olarak adlandırılmaktadır.

Bir "yeniden yükleme" veya "pompa" fazında, ince film polarizer (340), gelen ışığı geçiş yapabilir polarizer (330) içinden yansıtır. Geçiş yapabilir polarizer (330) bir kepenk, bir doğrayıcı tekerlek, bir dönen prizma veya ayna, akusto-optik cihaz, Pockels hücresi veya Kerr hücresi gibi elektro-optik bir cihaz veya değiştirilebilir bir λ/4 dalga plakası olabilir. Tarafsız veya düşük voltajlı bir durumda, geçiş yapabilir polarizer (330), uç-aynadan (322) iki kez geçerken polarizasyon düzlemini 90 derece döndürebilir.

Yeniden yükleme veya pompalama periyodu sırasında, Faraday izolatör (500), geçiş yapabilir polarizer (330) içinden yönlendiren ince film polarizeri (340) üzerine darbeler gönderir. Uç-aynadan (322) geri dönen darbeler, ikinci kez geçiş yapabilir polarizeri (330) geçer. Daha sonra kaviteye bir dönüş hareketi gerçekleştirir ve geçiş yapabilir polarizer den (330) uç-aynaya (322) iki kez daha geçer. Bu dörtlü turdan sonra, geçiş yapabilir polarizer (330) içinden geçerek darbelerin polarizasyon düzlemini 180 derece döndürür. Böylece, esas olarak amplifikasyon olmaksızın ince film polarizer (340) ile kavitenin dışına yansırlar.

Aynı yeniden yükleme ve pompalama periyodunda, amplifikatör (300), geçiş yapabilir polarizer (330) tarafından polarizasyon düzleminin 90 derece çift geçişli rotasyonunun kaliteyi sağladığı gibi, kavite içindeki pompalama diyotları tarafından üretilen ışığın lazer etkisini de bastırır, rezonans kavitesinin faktörü (Q), kaviteyi lazer eylemi için uygun hale getirir.

ŞEKİL 5A, bu yeniden yükleme/pompa fazında, lazer kristalinin (310), yukarıda tarif edilen pompa diyotlarından veya pompa lazer diyotlarından gelen ışığı, bir yan- veya son-pompalama düzenlemesinde emer. Pompalama, pompalama enerjisini veya "kazancı" emen ve depolayan, popülasyon-inversiyon yaratmak için lazer atomlarının veya komplekslerinin uyarılmış enerji seviyesinin popülasyonunu arttırır.

ŞEKİL 5B, bu yeniden yükleme/pompa fazında amplifikatör (300) tarafından hiçbir amplifiye edilmemiş lazer darbesinin üretilmediğini ve yayılmadığını göstermektedir. Elbette, reddedilen amplifiye edilmemiş darbeler, amplifikatör (300) tarafından yayılmaktadır.

ŞEKİL 5A-B, pompa/yeniden yükleme fazının ya önceden belirlenmiş bir zamanlama işlemine göre bitmesini veya lazer kristalindeki (310) enerji depolamasını izleyen bir algılama elektroniği tarafından sonlandırılabileceğini göstermektedir. Her iki durumda da, bir süre sonra t(recharge) bir kontrol ve sürücü elektroniği polarizasyon düzlemini 90 derece döndürmeyi durdurmak için geçiş yapabilir polarizere (330) yüksek voltaj uygulayabilir. Geçiş yapabilir polarizerin (330) diğer tipleri farklı yollarla değiştirilebilir. Bu değişiklik, kavitenin kalite faktörünü (Q), kaviteyi lazer eylemi için uygun hale getirmek üzere yeterince yüksek bir değere değiştirir.

Amplifikatörün (300) tek darbeli uygulamaları, tek bir darbe kavitenin içindeki gidiş-dönüşünü gerçekleştirirken, geçiş yapabilir polarizeri (300) değiştirebilir. Gidiş dönüşünün sonunda, tek darbe değiştirildikten sonra, geçiş yapabilir polarizere (300) geri döndüğünde, darbenin polarizasyon düzlemi artık döndürülmez ve bu nedenle darbe, ince film polarizer (340) tarafından kaviteden dışarı yansıtılmaz. Pompa fazında olduğu gibi reddedilmesinin yerine, uzunluğunun bir kazanım periyodu t(gain) için, darbe birkaç daha fazla gidiş-dönüş için darbe kavitesine tuzaklanabilir. **ŞEKİL 5B**'de t(gain) zaman skalası, netlik için büyütülmüştür.

ŞEKİL 5A-B, kazanç periyodunda, pompalama ve kaviteye depolanan enerjinin (veya kazancın) lazer ışın demetinden (310), lazer hareketini başlatmak için indüklenen emisyon denilen işlem vasıtasıyla, gidiş-dönüşleri yapan darbeye aktarıldığını göstermektedir. Buna göre, kavitedeki enerji, **ŞEKİL 5A**'da gösterildiği gibi azalır, burada **ŞEKİL 5B**'de gösterildiği gibi, lazer darbe enerjisi, bir kazanç işlemine dayanır. **ŞEKİL 5B**'de, t(gain) aralığındaki pikler, kavitedeki belirli bir noktadan geçerken lazer

darbesinin enerjisini temsil ederken, kesiksiz yükselen eğri, kayan bir gidiş-dönüş periyodu boyunca ortalama enerji kazancını temsil eden bir eğridir.

Kavitede tek bir gelen darbenin tuzaklandığı uygulamaların, lazer kristalinde (310) depolanan enerjinin hemen hemen tamamını, gidiş-dönüş sırasında tekli lazer darbesine aktarılabileceği belirtilmektedir. Aksine, bazı uygulamalar kaviteye birden fazla darbeye izin verebilir. Bununla birlikte, bu örneklerde, ortaya çıkan lazer ışın demeti, her bir darbe başına daha düşük bir enerjiye sahip olabilir ve böylece, ilgili fotodisruptif tipi için alışılagelmiş ve faydalı olan seviyelerin altındaki darbe başına enerjiyi azaltır.

Kaviteye pompalanan enerji, yeterli sayıda gidiş-dönüş sırasında yüksek bir verimle lazer darbesine transfer edildikten sonra, kontrolör-sürücü elektroniği, yüksek voltajı geçiş yapabilir polarizere (330) uygulamaktan vazgeçilebilir, bu da lazer darbe polarizasyon düzleminin dönmesini sürdürmesine neden olur. Polarizasyon rotasyonunun yeniden başlatılmasından dolayı, amplifiye edilmiş lazer darbesi daha sonra, bir sonraki gidiş-dönüşün sonunda, ince film polarizerinin (340) kavitesinden dışarı doğru, t(dump) olarak belirtilen bir zamanda yansıtılır.

Amplifiye edilmiş lazer darbelerinin durudurulması farklı yollarla kontrol edilebilir. Bazı durumlarda, boşaltma işleminin gerçekleştirileceği gidiş-dönüş sayısını belirlemek için tasarım hesaplamaları ve bilgisayar yöntemleri kullanılabilir. Diğerlerinde, önceden kalibrasyon, gidiş-dönüş sayısını ayarlamak için kullanılabilir. Yine başka durumlarda, rezonant kavitenin optik yoluna çok çeşitli sensörler bağlanabilir. Bu sensör veya sensörler, amplifiye edilmiş lazer darbelerinin enerjisi önceden belirlenmiş bir değere ulaştığında ve kaviteyi buna göre boşaltmak için bir kontrolöre bir kontrol sinyali gönderdiğinde algılanabilir.

Amplifiye edilmiş lazer darbesini kaviteden dışarı yansıtarak ve kompresöre (400) doğru ileterek pompa-kazanç-boşaltma döngüsünü tamamlar. Darbe boşaltma tamamlandığında, kavite düşük Q durumuna geri döner ve pompa-kazanç-boşaltma döngüsünü yeniden başlatır. Bazı tasarımlarda, darbe enjeksiyon portu ve darbe boşaltma portu farklı olabilir. **ŞEKİL 4**'te bu portların her ikisi de ince film polarizerinde (340) uygulanmaktadır.

Bazı uygulamalarda, lazer darbeleri 50-500 gidiş-dönüş gerçekleştirir, diğer örneklerde, lazer kristalinin (310) pompalanan fazından lazer darbesine enerji transferini mümkün kılmak için kavitenin içinde 100-200 gidiş-dönüş uygulanır. Daha önce tartışıldığı gibi, osilatör (100), 10-200 MHz aralığında, bazı durumlarda 20-50 MHz aralığında bir frekansa sahip bir seed darbe treni oluşturabilir. Bazı uygulamalarda, lazer motoru (1 veya 1'), 10 kHz - 2 MHz veya 50 kHz - 1 MHz veya 100 kHz - 500 kHz aralığındaki bir tekrarlama oranına sahip bir lazer darbe treni üretir. Böylelikle, geçiş yapabilir polarizer (330), gelen seed darbe trenini, amplifikasyon için sadece her 5. - 20.000 seed darbede tuzaklayarak yok eder. Bu tuzaklama dizilerinin zamanlaması, osilatör (100) bir ana saat olarak kullanılarak kontrol edilebilir.

Tekrarlama oranı, bir lazer motorunun merkezi bir özelliğidir. Daha büyük çeşitlilikte işlevler elde edilebilir: (1) tekrarlama oranı çeşitli frekanslarda değiştirilebilir ve (2) aralığın en üstü yüksektir. Örneğin, bir katarakt prosedürü, bir birinci tekrarlama oranında optimal olarak gerçekleştirilebilirken, ikinci tekrarlama oranı, korneal prosedür için daha iyi olabilir. Lazer motoru hem birinci hem de ikinci tekrarlama oranında çalışacak şekilde ayarlanabiliyorsa, bu işlevlerin her ikisi için tek bir lazer motoru kullanılabilir. Bu nedenle, lazer motorlarında (1 ve 1') tekrarlama oranı değişkenini ve üst aralığın üst limitini oluşturabilecek çeşitli tasarım konuları gözden geçirilecektir.

ŞEKİL 3B-C ve **ŞEKİL 4**'te görüldüğü gibi, amplifikatörde (300), aynalardan (321-324) herhangi biri için çirpli bir ayna gibi bir dispersiyon kontrol cihazının kullanılması, kavitedeki bir gidiş-dönüş sırasında amplifikatörün optik elemanlarının neden olduğu lazer darbesinin dispersiyonunu dengeleyebilir. Bu tasarım özelliği, lazer motorunun (1 veya 1') tekrarlama oranının, genişleticinin (200) ve kompresörün (200/400) optik ağları gibi (201, 203, 205 ve 207) optik elemanlarının, mercek (202) ve aynaların (204 ve 208) kalibrasyonunu, hizalanmasını veya ayarlanmasını değiştirmeden değiştirilmesine olanak sağlar.

Optik kurulumu değiştirmek yerine, tekrarlama oranı değişikliği, lazer motorun (1) zamanlamasını ve çalışmasını modifiye etmek için elektrik kontrol sinyalleri uygulanarak elde edilebilir. Örneğin, tekrarlama oranı, tekrarlama süresi t(rep) = t(recharge/pump)+t(gain)'ni azaltmak için kontrol sinyalleri uygulanarak arttırılabilir.

Tipik olarak, t(rep)'in azaltılması, hem t(pump) hem de t(gain) azaltılarak elde edilir. Pompalama süresi t(pump), örneğin pompalama diyotlarının/lazerlerinin pompalama yoğunluğunu arttırarak kısaltılır. Kazanç süresi t(gain), örneğin lazerleme darbesinin gidiş-dönüş sayısını azaltarak kısaltılır.

Lazer darbe enerjisi, örneğin, daha az sayıda gidiş-dönüşe rağmen gidiş-dönüş başına enerji kazancını artırarak korunabilir. **ŞEKİL 5B,** kavitenin gidiş-dönüş ile kavite gidiş-dönüşünde seçili bir referans noktasını geçtiğinden, kazanç periyodu boyunca lazer darbe enerjisinin artışını göstermektedir. Sonraki geçişlerdeki enerjilerin oranı genellikle ("küçük sinyal") kazanç faktörü g ile karakterize edilir. g kazanç faktörü, lazer kristalinin (310) uyarılan veya pompalanan seviyesinde depolanan toplam enerjiye duyarlıdır. Daha fazla enerji depolandığında, g faktörü de o kadar yüksektir. Bu nedenle, kazanç ortamının (310) pompalanan seviyesinde depolanan enerjiyi arttırmak için kontrol sinyalleri uygulamak, lazer darbesinin daha az sayıda gidiş-dönüşte aynı enerjiye ulaşmasını sağlayarak tekrarlama oranını arttırır.

Tekrarlama oranı aralığının üst sınırı, çeşitli yollarla da arttırılabilir. Daha büyük bir kazanç faktörüne sahip uygulamalarda, aynı amplifikasyona ulaşmak için daha az sayıda gidiş-dönüş gereklidir. Bu nedenle, bazı uygulamalar, daha yüksek bir kazanç faktörü g'ye sahip olan bir lazer kristali (310) kullanarak tekrarlama oranının yüksek bir üst limitini elde eder.

Ayrıca, kazanç faktörü g, lazer kristalinin (310) uyarılmış veya pompalanmış seviyesinde depolanan toplam enerjiye duyarlı olduğundan, uyarılan seviyenin daha fazla enerji ile pompalanması, daha kısa bir t(gain) elde etmenin başka bir yoludur ve böylece bir daha yüksek tekrarlama oranı elde edilir.

Tekrarlama oranını kontrol eden bir başka faktör de bir gidiş-dönüşün gerektirdiği süredir. Lazer darbesi, L'nin kavitedeki optik yolun uzunluğu ve c'nin ışık hızı olduğu zaman aralıklarında 2L/c'lik bir referans noktasından geçer. Bu nedenle, bazı uygulamalarda, optik yolun uzunluğu (L), bir gidiş-dönüş süresini azaltmak için azaltılabilir. Bu uygulamalarda aynı sayıda gidiş-dönüş ve dolayısıyla aynı miktarda enerjinin transferi daha kısa bir zaman alır t(gain), tekrarlama oranını bir başka şekilde artırır.

Yukarıda bahsedilen tasarım prensiplerinden bir veya daha fazlasının uygulanması, lazer motorunun (1 veya 1') uygulamaları, 500 kHz'e kadar, 1MHz veya bazı durumlarda 2 MHz tekrarlama oranı ile çalışabilir.

Ek olarak, bu uygulamalarda, t(gain) azaltılması, pompa ve boşaltma çevrimi için daha elverişli bir görevi desteklemek için toplam tekrarlama süresinin t(rep) daha büyük bir kısmının kullanılmasına olanak sağlar

Görevin sıkça kullanılan bir tanımı, toplam periyodun uzunluğuna bölünen düşük Q döneminin uzunluğudur. Bu tanımı kullanarak, örneğin 400 kHz tekrarlama oranı, 1 µ saniye ila 0,5 µ saniye arasında t(gain) oranını düşürürken, 0,6 ila 0,75 arasında bir artışa, dolayısıyla %25'lik bir büyük artışa neden olur.

Optik yolun L uzunluğunun kısaltılması tasarım prensibine dönersek, L'nin, diğerlerinin yanı sıra, geçiş yapabilir polarizerin (330) kavitenin içinde bir darbeyi tuzaklamaya ne kadar hızlı geçebileceği ile kontrol edildiği rapor edilmiştir. 1 metrelik bir optik yol kavitesinde, bir gidiş-dönüş süresi 2L/c = 6.6 ns'dir. Darbenin sonlu mekansal genişlik nedeniyle, tek darbeli uygulamaların, 5 ns'in altında, 4 ns'in altında, hatta 3 ns'in altında bir geçiş süresine sahip bir geçiş yapabilir polarizere (330) sahip olduğu anlaşılır.

Bazı amplifikatörlerde, geçiş yapabilir polarizer (330) bir Pockels hücresi olabilir. Pockels hücreleri, genellikle gelen ışık ışın demetlerinin polarizasyonunu döndürmek için güçlü bir elektrik alanı uygular. Polarizasyonun dönüşü, elektrik alanın birinci gücü ile orantılıdır ve bu nedenle oldukça güçlü olabilir. Pockels etkisi, lityum niobat veya galyum arsenit ve diğer noncentro-simetrik malzemeler gibi inversiyon simetrisinden yoksun kristallerde meydana gelir.

Bazen kilovolt voltajı uygulayarak, Pockels hücreleri polarizasyon dönüşlü bir durumdan, çok kısa bir artış süresine sahip bir polarizasyon-dönüşsüz duruma değiştirilebilir. Artış süresinin bir ölçüsü, "5-95 süre", polarizasyon düzleminin dönüşünün maksimum/doygunluk değerinin %5'inden %95'ine artması için gereken süredir. Bazı uygulamalarda artış süresi 5 ns'den az, diğerlerinde 4 ns'den az, diğerlerinde ise 3 ns'den az olabilir. Aslında, bazı uygulamalarda, artış süresi Pockels hücresinin kendisinin değil, geçiş elektroniğinin dinamikleriyle sınırlıdır. Bazı

uygulamalar bu hızlı geçiş işlemini sağlamak için yenilikçi bir kontrol ve sürücü devresi kullanabilir.

Yukarıda açıklandığı gibi, Pockels hücresinin geçiş süresinin kısaltılması, t(gain) kısaltmanın, daha hızlı bir tekrarlama oranını mümkün kılan etkili bir yoldur. Dahası, bu daha hızlı Pockels hücreleri ayrıca optik yolun uzunluğunun ve dolayısıyla kavitenin büyüklüğünün azaltılmasına olanak sağlar.

Ayrıca, lazer motoru (1) uygulamaları, mevcut lazerlerden daha az optik elemana sahip olabilir. Bu, kompresördeki ayarlanabilir optik elemanlara olan ihtiyacı ortadan kaldırarak ve entegre genişletici-kompresör (200) mimarisi yanı sıra dispersiyon kontrolörünün veya kompansatörün uygulanmasından kaynaklanır.

Bazı lazerler yüz veya daha fazla optik eleman içerebilirken, lazer motorun (1) bazı uygulamalarında optik elemanların sayısı 75'ten az olabilir. Diğerlerinde, 50'den azdır.

Bazı uygulamalarda, osilatör dışındaki bölümlerdeki optik elemanların sayısı 50'den az olabilir. Diğerlerinde, 35'ten azdır.

Burada "optik eleman" terimi, bir ışık demetinin bir optik özelliğini etkileyen herhangi bir eleman ile ilgilidir. Örnekler arasında bir ayna, bir lens, bir paralel plaka, bir polarizer, bir izolatör, herhangi bir değiştirilebilir optik eleman, bir kırılma elemanı, bir aktarıcı eleman ve bir yansıtıcı eleman bulunmaktadır.

Optik elemanlar, ışığın havadan girdiği ve havaya çıktığı yüzeyler tarafından tanımlanır. Bu nedenle objektif hareket ederken objektifler birlikte hareket etse bile, objektif gibi fonksiyonel bir blok, bir kaç mercek içerdiğinde bir "optik eleman" değildir. Bunun sebebi, ışığın havadaki yayılımı objektifler arasında gerçekleşmesidir, bununla birlikte ayrılma kısadır. İki mercek birbirlerine merkezlerinde hava boşluğu olmadan dokunsalar bile, merkez dışı ışın demetleri, diğerine girmeden önce bir merceği havada bırakırlar ve bu nedenle iki optik eleman olarak sayılırlar. Lazerlerin şematik açıklamalarının, genellikle lazerin fiili işlevi için gerekli olandan daha az optik eleman gösterdiği belirtilmelidir. Tipik olarak, tek bir mercek gösterildiğinde, işlevselliği, sadece fiili tek bir mercek tarafından gerçekleştirilemez, dikkatle tasarlanmış bir mercek

tertibatı ile gerçekleştirir. Dolayısıyla, bu türlü şematik tariflerin tipik olarak sadece açıklayıcı olması amaçlanmıştır ve tam anlamıyla uygulandığı takdirde uygulanamaz.

Hızlı Pockels hücreleri, hızlı geçiş elektroniği ve az sayıda optik elemanlı lazer motoru (1) uygulamaları, 2 metreden kısa, diğerleri de 1 metreden kısa olan kavite içinde optik bir yola sahip olabilir. Buna uygun olarak, lazer motorun, osilatör (100) içindeki fotonların üretiminden elde edilen toplam optik yolu ve amplifikatörün (300) kavitesinin içindeki tüm gidiş dönüşler dahil, 500 metreden az veya 300 metreden veya hatta 150 metreden az olabilir.

Mevcut femtosaniye lazerler, toplam 500 metrelik veya daha uzun bir optik yola ve bir kavite uç-aynadan uç-aynaya 3-4 metrelik veya daha uzun mesafeye sahiptir, çünkü burada açıklanan yenilikçi çözümler olmaksızın optik yolun bu değerlerin altında kısaltılması zordur.

Lazer motorun (1) boyutunun azaltılmasına katkıda bulunabilecek yenilikçi alt sistemlerin ve özelliklerin listesi aşağıdakileri içerir: (i) serbest alanlı bir osilatör yerine bir fiber bazlı osilatör (100); (ii) tekrarlama oranı değiştirildiğinde, ayarlanacak optik elemanlara sahip olmayan, tek bir Gerilmiş Hacim Bragg Optik ağına dayanan entegre bir genişletici-kompresör (200); (iii) tekrarlama oranını değiştirirken genişletici-kompresördeki (200) ayarlanabilir optik elemanlara olan ihtiyacı ortadan kaldıran bir dispersiyon-dengeleyici amplifikatör (300); (iv) alışılmadık bir şekilde hızlı geçiş yapan Pockels hücresi; (v) kilovolt aralığı dahil Pockels hücresinin yüksek gerilimlerinde hızlı artış süreleriyle çalışabilen alışılmadık şekilde hızlı bir kontrol elektroniği; ve (vi) yerleştirme için daha az yer gerektiren az sayıda optik eleman.

Bu özelliklerin bir kombinasyonunu veya tümünü uygulayan lazer motorları, 300 metreden az, bazı uygulamalarda 150 metreden daha az, diğerlerinde 500 metreden daha az bir toplam serbest alan optik yol uzunluğunu destekleyebilir.

Ayrıca, yukarıdaki ilgili özelliklerin bazıları veya tümü ile birlikte amplifikatör (300), bazı durumlarda 1 metreden daha az olan, 2 metreden daha az bir uç-aynadan aynaya optik yol uzunluğuna sahip olabilir.

Birçok uygulamada, optik yol katlanarak çoğalır, böylece rezonant kavitenin fiziksel kapsamı, yolun uzunluğundan önemli ölçüde daha kısa olabilir. Kısa ve katlanmış optik yollar, amplifikatörün (300) küçük bir toplam genişliğine dönüşebilir. Bazı durumlarda, amplifikatörün (300) kenar boyutlarının hiçbiri 1 metreyi geçmez, diğer durumlarda, 0.5 metreyi geçmez.

Buna karşılık, tüm lazer motoru (1), diğer bir deyişle bir lazer sisteminin güvertesinde kapladığı alan, 1 m^2'den az, diğerlerinde 0.5 m^2'den az, diğerlerinde 0.25 m^2'den ve muhtemelen 0.1m^2'den az olabilir. Bu alanların veya taban alanlarının her biri belirgin şekilde yeni avantajlar sağlayabilir.

Amplifikatör (300) ve lazer motoru (1), yukarıda tarif edilen tasarım prensipleri ve bileşenlerinden bir veya daha fazlasının kullanılması nedeniyle bu olağandışı şekilde küçük mekansal uzantıya sahip olabilir. Bu şekilde, mekansal uzantı amplifikatörü (300) ve lazer motorunu (1) bu tasarım prensiplerini ve bileşenlerini kullanmayan diğer lazerlerden meşru şekilde ayırt edebilir.

Bir başka kabul de burada bahsedilecek kadar önemlidir: bir lazer sisteminin üst güvertesinde bulunan alt sistemlere servis verilmesi çok daha basittir ve bu nedenle, bir kapağın çıkarılmasıyla ancak sistem bloklarının lazer sisteminin kasasından içeri ve dışarı hareket hareket ettirilmesi olmadan kolayca erişilebilir. Hassas bir ekipmanın eski hizalama durumuna getirilememesi durumlarında müşteri tesislerindeki (hastane gibi) sistem bloklarının hassas hizalamaları tehlikeye sokabilir. Bu nedenle, bir cerrahi lazer sisteminin çeşitli bileşenlerinin yığılması sırasında, üst üste gelmesi, taban alanının azaltılması için başka bir yol gibi görünebilir, bunun yapılması, lazer sisteminin hizmetine yönelik engelleyici zorluklar getirecektir.

Bu nedenle, lazer motorunun (1) büyüklüğünün azaltılması, lazer sisteminin üst güvertesinde diğer alt sistemlerin yerleştirilmesine olanak sağlar ve bu da bakım için erişim gerektirir. Bu ilave alt-sistemler, niteliksel olarak yeni işlevler getirebilir, böylece genel lazer sisteminin faydasını kritik ölçüde geliştirebilir. Bu ilave alt-sistemler, oftalmik cerrahiye kılavuzluk edecek bir görüntüleme sistemini içerebilir.

Özetlemek gerekirse, yukarıdaki özellikler fiziksel olarak kompakt lazer sistemleri oluşturmak için tek başına veya kombinasyon halinde uygulanabilir. Bu tür küçük bir

mekansal boyut, en azından aşağıdaki nedenlerden dolayı değerli bir varlık olabilir: (i) oftalmik cerrahi lazer sistemleri genellikle, yer ve erişimin önemli olduğu, küçük taban alanlarına sahip lazer sistemlerini destekleyen çok kalabalık ameliyathanelerde kullanılır; (ii) lazer sisteminin servis verilebilirliği, optik bileşenlerinin çoğu veya tamamı lazer sisteminin şasisinin üst güvertesine yerleştiğinde, niteliksel olarak daha iyidir; ve (iii) küçük lazer motorları, üst güvertede ek sistemlerin kullanılmasına olanak sağlayarak, oftalmik cerrahiyi yönlendirmek için görüntüleme sistemleri gibi genel lazer sistemine kritik yeni işlevler eklemektedir.

Amplifiye edilmiş genişletilmiş lazer darbelerinin yolunun izlenmesine geri dönersek, **ŞEKİL 2**, amplifikatör (300) yaydığı zaman, amplifiye edilen darbenin Faraday izolatörüne (500) geri iletilebileceğini göstermektedir. Faraday izolatörün (500) işlevlerinden biri, amplifiye edilmiş darbeleri osilatörden yaklaşık %100 verimlilikle yeniden yönlendirmek olabilir. Böylece, amplifiye edilmiş darbe ile osilatörün (100) hasar görmesini önler.

Bazı durumlarda, amplifiye edilmiş darbeler, polarizerler (550 ve 560) vasıtasıyla genişletici-kompresörün (200) bir kompresör portuna yönlendirilir. Yukarıda tarif edildiği gibi, genişletici-kompresör (200), amplifiye edilmiş darbeleri yeniden sıkıştırabilir ve femtosaniye darbeleri ile darbeli bir lazer ışın demeti yayabilir.

Yukarıda tarif edilen çeşitli çözümleri kullanan lazer motoru (1) uygulamaları, 1-1,000 femtosaniyelik (fs), bazı durumlarda 50-500 fs aralığında, hatta diğerlerinde 100-300 fs aralığında bir darbe süresi olan bir lazer ışın demeti üretebilir. Bu femtosaniye darbeler, olağandışı şekilde yüksek enerjilere ulaşabilir, örneğin 1-100 µJul/darbe, diğerlerinde ise 10-50 µJul/darbe, diğerlerinde ise 20-30 µJul/darbe aralığındaki enerjiler.

Bu darbe enerjileri, darbe enerjisi 1, 10 veya 20 µJul/darbeden daha az olan lazerler için erişilemeyen yararlı uygulamaları mümkün kılabilir, çünkü göz içinde bir eşik davranışı sergileyen birkaç farklı lazer-doku etkileşimi bulunmaktadır. 1 µJul/darbe enerjilerinin altındaki lazer darbelerinin cerrahi olarak istenen doku modifikasyonuna neden olmadığı cerrahi prosedürler bulunmaktadır. Diğer cerrahi prosedürlerde bu eşik 10 veya 20 µJul/darbe olabilir.

Örneğin katarakt ameliyatı, lazerin hedef dokuda derin olması, örneğin 10 mm'lik bir derinliğe yönlendirilmesini gerektirmektedir. Bu gereksinim, sayısal açıklığı sınırlandırır, böylece fotodisruptif üretmek için darbe değerleri başına daha yüksek enerji gerektirir. Bazı durumlarda 10-15 µJul/darbe enerjileri yeterli olabilir. Maksimum enerji değerlerinde çalışmayı önlemek için, 20 µJul/darbeye sahip cihazlar arzu edilebilir. Bu sayılar, hedefe yönelik enerjiler olduğu için, optik yol boyunca kayıpları hesaba katmak için, lazer sistemi 25-30 µJul/darbe çıkışlı lazerler içerebilir.

Örneğin, katarakt cerrahi uygulamasında, 1, 2, 3 veya 4 sertlikte kataraktlarının kesilmesi, karşılık gelen eşiklerin üzerinde lazer darbe enerjilerini gerektirebilir. Örneğin, belirli koşullar altında, 10-15 µJul/darbeden daha yüksek darbe enerjilerine sahip lazerler 1 sertliğinde kataraktları kesebilir, 10-20 µJul/darbeden daha yüksek darbe enerjilerine sahip lazerler 2 sertliğinde kataraktları kesebilir, 20 µJul/darbeden daha yüksek darbe enerjilerine sahip lazerler 3 sertliğinde kataraktları kesebilir ve 30-50 µJul/darbeden daha yüksek darbe enerjilerine sahip lazerler 4 sertliğinde kataraktları kesebilir. Bu eşik enerjileri, nabız uzunluğu, tekrarlama oranı, lazer noktasının genel hedef bölge içindeki yeri ve hastanın yaşı gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir.

Lazer darbelerinin etkisi, geniş hedef doku sınıflarında parametrelerinin yüksek oranda doğrusal olmayan bir işlevidir. Bu nedenle benzer enerji/darbe fakat farklı darbe süresine sahip lazerler cerrahi hedeflerde farklı sonuçlara ulaşabilir. Örneğin, belirli bir enerji/darbe değerine sahip olan pikosaniye darbeleri, kontrol edilemeyen şekilde genişleyen oftalmik dokuda kabarcıklar oluşturabilirken, benzer bir enerji/darbeye sahip femtosaniye darbeleri, kontrol edilen kabarcıklar oluşturabilir. Buna göre, yukarıda tarif edilen enerji/darbe değerleri, femtosaniye darbeleri, diğer bir deyişle bir pikosaniyeden daha düşük bir uzunluğa sahip darbeler yayan lazer motorları ile üretilebilir.

Lazer ışın demetinin mukavemeti, gücü bakımından da ölçülebilir. Örneğin 50 kHz tekrarlama oranına sahip 20 µJul/darbe lazeri 1W güç taşır. Güç olarak ifade edilen yukarıda açıklanan eşik değerler, karşılık gelen tekrarlama oranlarında 0.1 W, 1 W ve 10 W eşik güçlerine dönüşebilir. Bu nedenle, bu eşikleri aşan bir güce sahip lazer ışın demetleri yayabilen lazer motorları farklı işlevler sunar.

Örneğin, Gıda ve İlaç Dairesi tıbbi lazerleri kendi güçleriyle sınıflandırır. Lazer sınıfı 3B, etkileri yaygın olarak araştırıldığı için genellikle oftalmik prosedürler için kullanılır. 0.5 W güçten daha düşük bir güce sahip çıktıları üreten lazerler, 3B sınıfına aittir. Bu nedenle, 0,5 W'den daha düşük bir güce sahip lazerler, daha yüksek bir güce sahip lazerlere kıyasla büyük ölçüde farklı uygulamalar sunar.

ŞEKİL 6A-D, tekrarlama oranını yüksek bir hızda değiştirme özelliğinden yararlanarak, lazer motorun (1) bir işlevselliğini göstermektedir. Çeşitli uygulamalarda, cerrahi lazer ışın demeti, bir odak noktasında fotodisruptif neden olur, burada bozulan bölge, sonunda bir kabarcık halinde genişler. Odak noktası lazer sisteminin bir tarama optiğiyle bir tarama hızında tarandığında, bir dizi kabarcık oluşur. Bu kabarcık dizileri, kontrol edilebilir bir şekilde çizgiler veya yüzeyler oluşturabilir. Çok sayıda kabarcık, bu doku veya yüzeyler boyunca hedef dokunun mekanik bütünlüğünü azaltır, bu da hedef dokuyu, çizgiler veya yüzeyler boyunca kolayca ayırmayı mümkün kılar. Gerçekte, taranan lazer ışın demeti bu dokular veya yüzeyler boyunca hedef dokuyu "keser".

Temsili bazı durumlarda kabarcıklar, çapı 10 - 50 µ veya daha fazla olan mesafelerle ayrılan birkaç mikron (µ) çapında olabilir. Cerrahi lazer sistemi tipik olarak tekrarlama oranının tersine, her tekrarlama süresinde bir balon oluşturur. Bu nedenle, lazer sisteminin tarama hızı sabit olduğu sürece kabarcıklar esas olarak eşit aralıklıdır.

Kabarcıklar, lazer darbesi ile oluşturulduktan sonra genişler. Çeşitli koşullar altında bu genişleme kontrolsüz hale gelebilir. Böyle bir kontrolsüz kabarcık genişlemesi, hedef bölgedeki lazer darbelerinin şiddetli bir şekilde saçılmasına neden olarak, oftalmik cerrahinin kesinliğini ve kontrolünü ciddi ölçüde zayıflatabilir. Birbirine çok yakın kabarcıklar oluşturmak, kabarcıkların birleşmesine neden olabileceğinden, kontrolsüz bir genişlemenin tetikleyicilerinden biridir. Diğer muhtemel prosesler, bir kabarcığın genişlemesinin, daha sonra oluşan kabarcıkların oluşumuna müdahale etmesini içerir, bunlar arasında bir çapraz-karışmaya neden olur, bir kez daha kabarcıkların kontrolsüz genişlemesine yol açar. Bu nedenle, tarama sırasında önceden belirlenmiş bir kabarcık ayrımının sağlanması, oftalmik cerrahi lazer sistemleri için kabarcık genleşmesi üzerinde kontrolü sürdürmek için yüksek bir öncelik olabilir.

Bununla birlikte, odak noktasının taranması tipik olarak aynalar ve galvolar gibi hareketli bölümleri içerir. Çok kısa tekrarlama süreleri göz önüne alındığında, bu

hareketli parçaların en küçük eylemsizliği ve mekanik gecikmesi bile kabarcık yoğunluklarını etkileyebilir. Örneğin, bazı cerrahi modellerde tarama yapılırken, tarama hızı dönme noktalarında ve köşelerde yavaşlayabilir, bu da muhtemelen artan yoğunlukta lazer noktaları ve kabarcıklarına yol açar. Diğer durumlarda, cerrahi modelin geometrisi, lineer kabarcık yoğunluğu sabit tutulmuş olsa bile, kabarcıkların geliştirilmiş alan yoğunluğuna yol açar.

ŞEKİL 6A, sabit bir tekrarlama oranı lazerin hedef dokuda bir ayırma tabakası oluşturmak için bir dönemeç cerrahi tarama modelini taradığı zaman göstermektedir. Bununla birlikte, geri dönüş veya dönemeç noktalarına yaklaşırken, tekrarlama oranı sabit kalırken tarayıcı yavaşlar ve böylece gösterildiği gibi doğrusal ve dolayısıyla hava kabarcığı yoğunluğunu arttırır. Böyle bir kabarcık yoğunluğu, yukarıda tarif edildiği gibi ciddi kontrol problemlerine yol açabilir.

Bu teknik konu, mevcut olan lazer sistemlerinde, yüksek kabarcık yoğunluklu bölgelerin oluşumunu önlemek için bu dönüş noktalarına yaklaştıkça lazer ışın demetini kesen bir ışın demeti engelleyici gibi ek elemanlar dahil edilerek ele alınmaktadır. Bununla birlikte, bu tür ışın demeti engelleyicilerinin dahil edilmesi, lazer sistemi içinde işlemin kontrol edilmesi ve tarama ile senkronizasyonu yapacak olan ilave elemanların eklenmesi anlamına gelir. Bu eklemelerin tümü, daha fazla zorluk ve artan karmaşıklık anlamına gelir.

Tarama, tarama modelindeki bir hattın sonuna geldiğinde ve yine tarama hızının yavaşlatılmasında ve artmış doğrusal kabarcık yoğunluğuna neden olduğunda bile benzer problemler ortaya çıkar.

ŞEKİL 6B, "hızlanma-minimize eden" tarama modellerini takip ederek bu türlü keskin dönüş noktalarının önlenebileceğini göstermektedir. Hızlanma-minimize eden bir modelin örneği, keskin bir dönemeci olmayan bir spiraldir. Bununla birlikte, spiral bir model bile hızlanmayı azaltır ancak ortadan kaldırmaz. Bu nedenle, tarama hızı halen bu sistemlerde değişir ve bu nedenle sabit tekrarlama oranı, kabarcık yoğunluğunun, modelin en düşük hız kesitlerinde bile bir eşik değerinin üzerine çıkmayacak şekilde seçilmesi gerekir. Bununla birlikte, bu tasarım prensibi, modelin çoğunda, tarama hızının, kesme veya ayırma işlevine ulaşmak için gerekli olan kabarcık yoğunluğunu elde etmek için destekleyebildiğinden daha düşük olduğu anlamına gelir. Aynı şekilde,

daha yüksek bir tarama hızı kullanıldığında, kabarcıkların ayrılması daha küçük hale gelebilir, bu da kabarcıkları şekillendirme arasında bir parazite veya çapraz-karışmaya yol açabilir. Tüm bu etkiler kontrol edilemez veya belirlenemeyen kabarcık genişleme tehlikesini artırır.

Lazer motoru (1) uygulamaları, bu bağlamda kullanışlı bir işlevsellik sunacak şekilde tasarlanabilir. Genel olarak benzersiz tasarım ve özellikle amplifikatörün (300) dispersiyon kontrolörü, değişen tarama hızıyla esas olarak eşzamanlı olarak tekrarlama oranını değiştirmeyi mümkün kılmaktadır. Bazı lazer motorlarda tekrarlama oranı, 10 µs – 1s aralığında bir değişim-süresi içinde değiştirilebilir, bu bazı özel durumlarda 1 µs - 1s aralığındadır. Bu nedenle, bazı uygulamalar, hedef bölgede yakın bir sabit kabarcık yoğunluğunu muhafaza etmek için, cerrahi model boyunca tarama hızının tasarlanan veya ölçülen yavaşlamasına göre lazer motorun (1) tekrarlama oranını yavaşlatmak için kontrol elektroniklerini içerebilir. Bu tür yaklaşık olarak sabit kabarcık yoğunluğu, örneğin, değişen tarama hızıyla orantılı olarak tekrarlama oranını değiştirerek elde edilebilir. Bu işlevsellikle, lazer motorları (1 veya 1'), düz hatta doğrusal veya yoğun bir kabarcık yoğunluğuna veya ayrılmasına sahip kabarcıklar oluşturabilir ve böylece kontrolsüz bir kabarcık genişlemesini önleyebilir veya bunlara karşı koyabilir.

ŞEKİL 6C, **ŞEKİL 6A**'daki ile aynı değişmelere sahip bir tarama cerrahi modelini göstermektedir, burada tekrarlama oranı, tarama, dönemecin etrafında hareket ettikçe azalır ve kabarcıklar arasında esasen doğrusal bir ayrım ile bir kesim oluşturur.

ŞEKİL 6D, spiral, merkeze yakınlaştıkça, bir indirgenmiş tekrarlama oranına sahip spiral bir cerrahi modeli göstermektedir; burada kabarcıklar, bu indirgeme olmaksızın birbirine çok yakın olabilir. Bu uygulama bu nedenle esasen bir kez daha düz bir kabarcık yoğunluğu oluşturma yeteneğine sahiptir.

Elbette, tekrar oranının hızlı değişkenliği, sadece sabit bir yoğunluk ile değil, önceden belirlenmiş bir yoğunluk profili ile de kabarcıkların oluşturulmasına olanak sağlar. Örneğin, gözün çekirdeği merkeze doğru daha zordur. Bu nedenle, bazı uygulamalarda, tarama, çekirdeğin merkezini geçtikten sonra merkezden bir düşüşle arttıkça kabarcık yoğunluğu arttırılabilir. Çok sayıda farklı yoğunluk profili, farklı tıbbi avantajlara ve faydalara sahip olabilir. Yoğunluk profili, önceden belirlenmiş bir şekilde

değil, hedef bölgenin bir görüntülenmesi veya algılanmasına yanıt olarak da ayarlanabilir.

ŞEKİL 7A-D, lazer motorlarının, tarama ile esasen eşzamanlı tekrarlama oranını içeren veya en azından oftalmik cerrahinin zaman ölçekleri içinde, örneğin; 60-120 saniye içinde değiştirmesine yardımcı olan bir başka tasarım özelliğini göstermektedir.

ŞEKİL 7A-B, termal lensleme olarak adlandırılan olguyu ve lazer tasarımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Lazer kristali (310), pompa diyotları tarafından pompalandığında ve daha sonra lazer darbesini amplifiye ederek enerjisini transfer ettiğinde, sıcaklığı (T) yükselir. Sıcaklık T genellikle eşit olmayan şekilde yükselir: tipik olarak sıcaklık, pompalanan orta bölgede en yüksektir, muhtemelen optik eksende veya etrafında pik yapar ve artan radyal mesafe ile azalır.

Bu eşit olmayan sıcaklık artışının en az iki etkisi vardır: (i) kırılma indisi n, sıcaklık ile arttığından: $n = n(T)$, lazer kristalinin (310) merkez bölgesinde maksimum bir değer sergiler; ve (ii) artan sıcaklık, lazer kristalinin (310) merkez bölgesini, çevreleyen bölgeden daha yoğun bir şekilde genleşmiş hale getirir ve bu nedenle daha soğuk dış bölge tarafından tutulan bir çıkıntı yapar. Bu etkilerin her ikisi de verilen paralel ışın demetlerini odaklama eğilimindedir. Bu olguya termal lensleme denir. Bu termal mercek, lazer kristalini bir mercek (310') ile sembolize etmek suretiyle ifade edilir. Termal mercek birkaç diyoptri ile kırılma sergileyebilir ve böylece lazer motorunun performansını önemli ölçüde değiştirebilir.

ŞEKİL 7A, bir lazer motorunun tasarımının tipik olarak, işlem tekrarlama oranı ve ışın demeti gücü ile belirlenen T = Top çalışma sıcaklığında lazer kristali tarafından termal lenslemenin refraktif etkilerinin belirlenmesini ve lazer motorunun diğer optik elemanları ile termal lensleme yoluyla refraktif dengelemenin sunulmasını içerdiğini göstermektedir. Bir örnek, yakınlaştırılmış ışın demetini termal mercek (310') tarafından odaklandıktan sonra paralel bir ışın demetine geri yükleyebilen bir ek mercek (312) sunmaktır.

ŞEKİL 7B, böyle bir refraktif dengelemenin, belirli bir çalışma sıcaklığı T=Top için ve dolayısıyla sadece belirli bir tekrarlama oranı ve ışın demeti gücü için uygun olduğunu göstermektedir. Gerçekten de, eğer bir uygulama tekrarlama oranının veya gücünün

değişmesini gerektiriyorsa, değişen tekrarlama oranı ve/veya değişen güç, lazer kristalinin (310) T değerini T = Top'tan T = Top' a değiştirir. Sıcaklıktaki bu değişiklik, termal merceğin odaklanmasını (kesikli çizgilerle temsil edilen yakınsama ışın demetinden kesiksiz çizgilerle olana doğru) değiştirerek, T = Top'da paralel olan ışın demetini daha zayıf yakınsama özelliklerine sahip T = Top' da tersine çevirir.

ŞEKİL 7B aynı zamanda, refraktif dengelemenin ayarlanmasıyla yakınsama özelliklerinin geri yüklenebileceğini göstermektedir. Refraktif dengelemenin değiştirilmesi tipik olarak, bir merceği hareket ettirmek, bir optik ağı döndürmek veya ışın demetini optik eksene göre hareket ettirmek gibi lazer motorunun bir veya daha fazla optik elemanının ayarlanmasını gerektirir. **ŞEKİL 7B**, okla gösterildiği gibi optik eksen boyunca dengeleyici merceğin (312) bir ayarını göstermektedir. Önceden dispersiyon dengelemesine benzer şekilde, mekanik ayarlamalar yoluyla bu refraktif dengeleme de yavaştır ve ince ayar ve kalibrasyon gerektirir. Bu nedenle, çoğu lazer bu sorunu tamamen tersine çevirir ve tekrarlama oranının değiştirilmesine izin vermez. Değişebilir bir tekrarlama oranı sunan lazerlerde bile, kompansatörün ayarlanmasının yavaşlığı nedeniyle, oftalmik cerrahi süreler dahil olmak üzere, lazer motorlarının taranmasıyla eş zamanlı olarak değiştirilemez. Ve değişken bir tekrarlama oranı sunan lazerlerde bile, dengeleyici optik elemanların ayarlanmasının yavaşlığı nedeniyle, oftalmik cerrahi süreler dahilinde bile, lazer motorlarının taranmasıyla eşzamanlı olarak oran değiştirilemez.

ŞEKİL 7C-D, lazer motorun (1) termal merceğin etkisini en aza indirmek için çeşitli tasarım prensiplerini kullanan uygulamalarını göstermektedir. Termal merceğin (310') kırılması, çoğu veya tüm ışın demetlerinin termal mercek (310') merkezine doğru veya çok yakın olması durumunda önemli ölçüde azaltılabilir, çünkü merkezindeki bir merceği geçen ışın demetleri geometrik optik yaklaşım seviyesinde kırılmamaktadır. Dalga optiği seviyesinde ve merceğin sonlu uzantısına da dahil ederken, bu merkezi ışınlar ancak sadece minimum düzeyde kırılır.

ŞEKİL 7C, ışın demetlerinin, örneğin merceğin merkezine vurmak için sıkıştırılabileceğini göstermektedir. (i) bir odaklanma etkisine sahip olan uç-ayna (322) bir uygulamasını kullanarak; (ii) termal mercekli lazer kristalinin (310/310') odaklanan uç-aynaya (322) odak noktasına çok yakın yerleştirilmesi, böylece odaklama son-aynadan (322) gelen ışın demetlerinin çoğunun termal mercek lazer kristalinin

(310/310') merkezine çarpması sağlanır; ve (iii) diğer uç-aynanın (321), aynı zamanda, odaklanan uç-aynanın (322) odak noktasına çok yakın ve böylece ışın demetin ıraksak olmaktan ziyade kendi kendine geri yansıtmasını sağlamak için mercek kristaline (310) yerleştirilmesi. Bu tür tasarımlarda, tekrarlama oranı veya ışın demetinin gücü değiştiğinde, lazer kristalinin (310) sıcaklığı T = Top'dan T = Top' a değişir, lazer kristalinin (310) kırılma etkisi en aza indirildiğinden lazer motorunda (1) herhangi bir mekanik veya optik elemanın yeniden ayarlanması için herhangi bir acil ihtiyaç yoktur. Böylelikle, tekrarlama oranı veya ışın demetin gücü, bir refraktif dengeleyicinin karşılık gelen bir ayarlaması olmaksızın değiştirilebilir.

ŞEKİL 4'te görüldüğü gibi, çeşitli uygulamalarda, uç-aynaların ve katlama aynalarının (321-324) herhangi biri veya daha fazlası tarif edilen odaklama etkisine sahip olabilir.

Bu uygulamanın tasarım parametreleri, uç-ayna (321) ve mercek kristalinin (310), mesafesi *d1*, mercek kristalinin (310) ve odaklanan uç-aynanın (322) mesafesi *d2* ve delikler, mercek kristalinin (310) kalınlığı ve odaklanan uç-ayna (322) yarıçapı gibi diğer parametreler, zaten azaltılmış termal merceğin daha da küçültülmesi için optimize edilebilir.

ŞEKİL 7D, ilgili bir tasarımı göstermektedir. Bu uygulamada, tüm uç-aynaları (321 ve 322) odaklama tipindedir. Bu örnek, lazer kristali (310), iki uç-aynanın ortak odak noktasına daha yüksek hassasiyetle yerleştirilebildiğinden termal lenslemeyi daha da azaltır. Yine, diğer parametreler ek bir tasarım optimizasyonuna tabi tutulabilir.

ŞEKİL 8, lazer motorunda (1) termal merceğin baskılanmasının niceliksel bir karakterizasyonunu göstermektedir. Yatay eksen, kristalinin merkezinin çalışma sıcaklığının Toperating=Top ortam sıcaklığına Tambient oranını göstermektedir. Dikey eksen, lazer motoru (1) tarafından yayılan lazer ışın demetinin optik gücünü göstermektedir. Grafik, lensleme işlemi, lazer motorunu ortam sıcaklığının %10-50'si üzerinde ısıtsa bile, optik gücün Toperating/Tambient = %150'de, sadece %10'a kadar değişeceğini göstermektedir. Lazer kristalinin (310) optik gücü, çok çeşitli çalışma sıcaklıklarında çok az değişiklik gösterir, çünkü lazer kristalinin (310) termal merceğinin kırılma etkisi, **ŞEKİL 7C** ve **ŞEKİL 7D**'ye ait tasarımlar ile verimli bir şekilde en aza indirilir.

Yukarıdaki detaylı açıklama, (i) amplifikatörün (300) içindeki dispersiyon dengelemesinin kullanılması; (ii) entegre bir genişletici-kompresörün (200) kullanılması; ve (iii) termal lenslemeyi ve ayrıca yukarıda açıklanan diğer tasarım hususlarını en aza indiren kavite mimarilerinin kullanılması dahil olmak üzere, osilatör (100) dışındaki optik elemanların ayarlanmasını gerektirmeden tekrarlama oranını değiştirme işlevini elde etmek için kullanılabilen tasarım prensiplerini ve örneklerini sağlar. Yukarıdaki tasarım özelliklerinden veya analoglarından bir veya daha fazlasını kullanan lazer motorları, tekrarlama oranı aralıklarında tekrarlama oranındaki değişmeyi mümkün kılarak, sadece sınırlı lazer ışın demeti modifikasyonuna neden olabilir.

Burada tekrarlama oranı aralığı 10 kHz - 2 MHz veya 50 kHz - 1 MHz veya 100 kHz - 500 kHz olabilir, bu aralıkların her biri özel işlevler sunar.

Değişen zaman, cerrahi tipine bağlı olarak, 1-120 saniye veya 10-60 saniye veya 20-50 saniye aralığında, çok adımlı bir oftalmik cerrahinin zaman ölçeği olabilir. Bu aralıklardaki değişen zamana sahip lazer motorları, birinci cerrahi prosedür için gerekli bir orandan ikinci bir cerrahi prosedür için gerekli orana geçmek için tekrarlama oranını değiştirebilir.

Diğer durumlarda, örneğin **ŞEKİL 6A-D**'de, değişen zaman, lazer sisteminin tarama hızı tarafından belirlenen bir zaman ölçeği olabilir, örneğin çoklu tekrarlama sürelerinin 1-10,000 veya 100-1,000 aralığında olduğu süreler. Tekrarlama süresi, 10 kHz'de 100 mikrosaniye (100 µs) ve 1 MHz'de 1 µs olduğu için, bu "tarama değiştirme süreleri" veya "tarama-eş zamanlı değişim süreleri" 1 µs - 1s aralığında olabilir.

Tarama hızının değişmesine karşılık olarak tekrarlama oranını değiştirerek, bazı uygulamalarda kabarcıkların doğrusal yoğunluğu korunur, böylece tarama hızının ve tekrarlama oranının esas olarak sabit kalır.

Lazer ışın demeti tekrarlama oranı değişikliği ile sınırlı bir dereceye kadar modifiye edilebilir. Bu modifikasyon çeşitli şekillerde yakalanabilir: (i) ışın demeti çapı %10 veya %20'den daha az değişir; veya (ii) ışın demeti merkezi, ışın demeti çapının %20'sinden veya %40'ından daha azına hareket eder. Burada ışın demeti çapı, ışın demeti yoğunluğunun, ışın demeti merkezindeki yoğunluğun %50'sine düştüğü çap gibi farklı şekillerde tanımlanabilir. Diğer tanımlar da kullanılabilir.

Bir örnek, lazer ışın demetinin tekrarlama oranı 100 kHz ve ışın demeti çapı 3 mikronluk odak noktasında yayılabilen bir lazer motorudur (1), burada sadece osilatör (100) 15 saniyelik değişen bir süreye ayarlanarak lazer ışın demetinin tekrarlama oranı 150 kHz'ye değiştirilebilir ve bu önemli değişime rağmen, ışın demeti sadece sınırlı bir dereceye kadar modifiye edilir: odak nokta çapı sadece %15 ila 3.45 mikron arasında değişir ve merkezi, optik eksene göre, sadece ışın demeti çapının %30'u kadar, diğer bir deyişle 0.9 mikron kadar hareket eder. Böyle bir lazer motoru 100 kHz tekrarlama oranıyla katarakt cerrahisi yapmak için kullanılabilir, tekrarlama oranı 15 saniyede 150 kHz olarak değiştirilir ve 150 kHz tekrarlama oranıyla bir sonraki kornea prosedürünü gerçekleştirmek için tekrar kullanılır, tüm prosedür çok iyi bir ışın demeti kalitesini korurken, 100 veya 120 saniyeden fazla zaman almaz.

Başka bir örnekte, lazer motoru (1), 100 kHz'lik bir tekrarlama oranına ve 4 mikronluk ışın demeti çapına sahip bir lazer ışın demeti yayabilir. Tarama, tarama hızının, normal tarama hızının yarısına düştüğü bir cerrahi modelin keskin bir geri dönemecine yaklaştığında, tekrarlama oranı, kademeli olarak, değerinin yarısı kadar, diğer bir deyişle 100 kHz ila 50 kHz arasında ve oluşturulan kabarcıkların veya noktaların yakın sabit doğrusal yoğunluğu sağlamak için yavaşlatılabilir. Bu yavaşlama örneğin 100 kHz tekrarlama oranının 10 tekrar zamanında gerçekleştirildiğinde, bu durumda tekrarlama oranını değiştirmenin toplam süresi yaklaşık 100 µs'dir.

Tekrarlama oranı birkaç adımda veya kademeli olarak değiştirilebilir, net sonuç, tekrarlama oranının, lazer ışın demetinin tarama süresi ölçeğinin değişmesiyle eşzamanlı olarak değiştirildiği, 100 kHz'den 50 kHz'ye kadar yaklaşık 100 µs'de değiştirilebilmesidir. Lazer motoru (1) tasarımı, yüksek bir lazer ışın demeti kalitesini korurken, tekrarlama oranını bu olağanüstü hızlı sürede değiştirmeyi mümkün kılar. Bir örnekte, lazer ışın demeti çapı 100 kHz'de 4 mikron olabilir; bu, tekrarlama oranı 50 kHz'e düştüğünde sadece %10 ila 3.6 mikron arasında değişir ve lazer ışın demetinin merkezi sadece optik eksenden ışın demeti çapının %20'si, diğer bir deyişle 0.8 mikron uzaklaşır.

Yine, lazer motorunun (1) tekrarlama oranını değiştirirken yüksek ışın demeti kalitesini koruyabilmenin bir başka yolu, iyi bilinen g1-g2 stabilite düzlemi açısındandır. Lazer motorunun (1) uygulamaları, g1 ve g2 ışın demeti parametrelerini hiperbolik stabilite

bölgesi içinde çok çeşitli tekrar oranlarında, örneğin 10 kHz-2MHz veya 10 kHz-500 kHz veya 50 kHz-200 kHz aralığında tutabilir.

Az sayıda optik eleman, lazer motoru (1) uygulamalarının bir başka bakış noktasından kritik ve ayırt edici bir özelliği olabilir. Femtosaniye lazerler genel olarak çevresel etkenlere göre çok hassas ve kolayca yanlış hizalanan, farklı kullanım talimatlarına sahip kendi kendine ısınma etkilerine sahip, kolay aşınan son teknoloji cihazlardır. Bu nedenle, femtosaniyelik lazerlerin optik elemanları, düzenli kısa zaman aralıklarında ince ayar, yeniden düzenleme ve bakım gerektirebilir. Tipik femtosaniye lazerler yüz veya daha fazla optik element içerebilir ve bu optik elemanların herhangi birinin arızalanması tüm lazerin arızalanmasına neden olabilir.

Bazı tipik lazerler, genellikle 30-60 "çevrim"den sonra, diğer bir deyişle lazer motorunun gücünü açma ve kapamadan sonra arızalanabilir. Operasyonda meydana gelen arızaları önlemek için, bazı lazer sistem operatörleri, tüm masrafları ve düşük maliyetleri ile düzenli ve masraflı bakım ziyaretleri planlamak zorundadırlar ve gene de yıkıcı sonuçlara neden olan yüksek arıza riskiyle karşı karşıya kalabilirler.

Aksine, lazer motoru (1) uygulamaları, lazer motorunun (1) herhangi bir optik elemanını yeniden ayarlamaya gerek kalmadan gücü açıp kapatarak 120'den fazla kez tekrarlanabilir. Bazı uygulamalarda, döngü sayısı 180'den hatta 240'dan fazla olabilir.

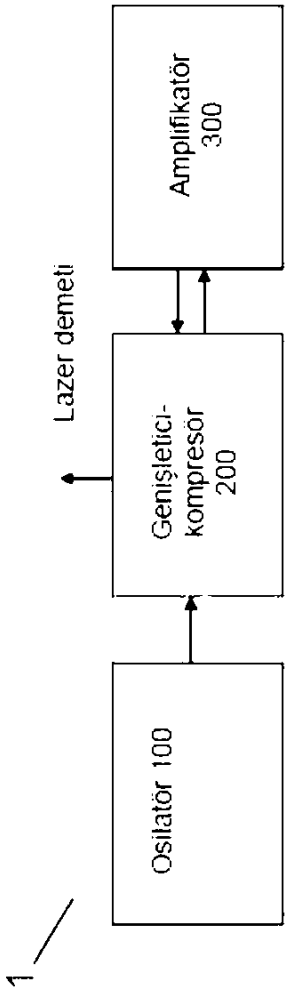
Cerrahi operasyonlarda, lazer kristalinin (310) ısıtılması ve soğutulması ile ilgili problemleri en aza indirgemek için, genellikle lazer sabah bir kez açılır ve sadece akşamları kapatılır, diğer bir deyişle cerrahi lazerler genellikle günde bir kez açılır. Basit bir tahminde, lazerler haftada beş kez, bu nedenle ayda yaklaşık 20 kez kullanılıyorsa, 30 çevrim 1,5 ay ve 60 çevrim 3 ay sonra yüksek bir arıza olasılığına neden olabilir.

Aksine, lazer motorun (1) bazı uygulamaları, 6 aylık düşük arıza olasılığına 120'den fazla kez çevrim ile ulaşır. Diğer uygulamalar, 180 veya 240 kez çevrim ile, 9 ay veya tam bir yıl düşük arıza olasılığına dönüşebilir. Bu nedenle, lazer motoru (1) uygulamaları, kullanıcı ve servis sağlayıcı üzerinde önemli ölçüde daha düşük bir yük oluşturan önleyici bir bakım programı ile çalıştırılabilir. Ayrıca, bu gibi düşük frekanslı bakım programı, lazer sisteminin tüm bölümlerinin değiştirilmesi gibi farklı bakım tiplerini mümkün kılmaktadır. Bazı durumlarda, tüm lazer motoru (1), yerinde tutulan bir

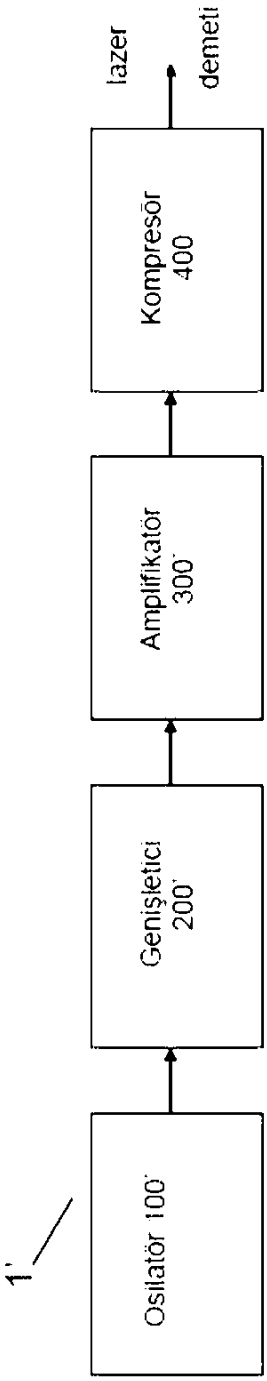
yenisiyle kolayca değiştirilebilir ve lazer motorun (1) bakımı, cerrahi işlem ortamının daha düşük teknoloji ortamı yerine, bir servis sağlayıcı tesisinin yüksek teknoloji ortamında gerçekleştirilebilir.

Bu belge birçok özelliği içermekle birlikte, bunlar bir buluşun kapsamı veya talep edilebilecekleri sınırlamalar olarak değil, buluşun özel uygulamalarına özgü özelliklerin tanımları olarak yorumlanmalıdır.

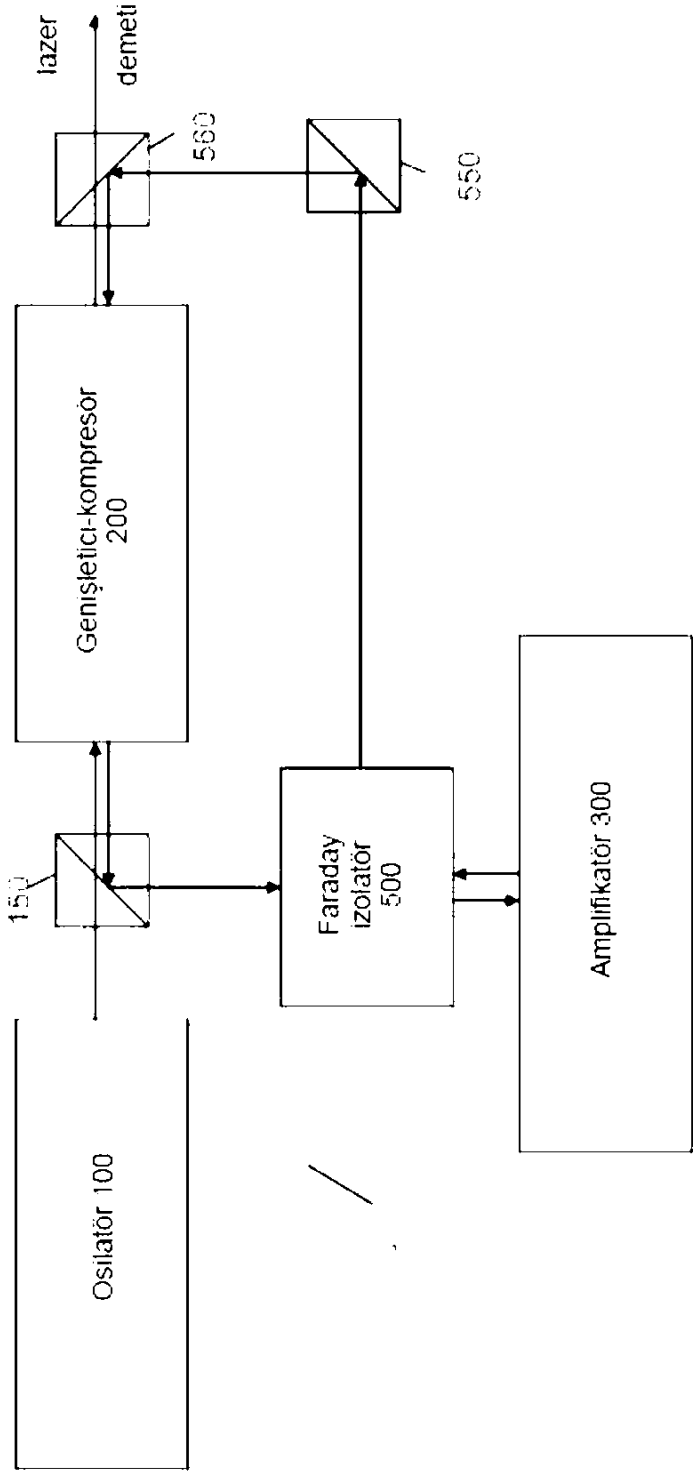
Görüntüleme eşliğinde lazer cerrahi tekniklerin, aparatların ve sistemlerin birtakım uygulamaları açıklanmaktadır. Bununla birlikte, tarif edilen uygulamaların çeşitlemeleri ve geliştirmeleri ve diğer uygulamalar, açıklananlara dayanarak yapılabilir.



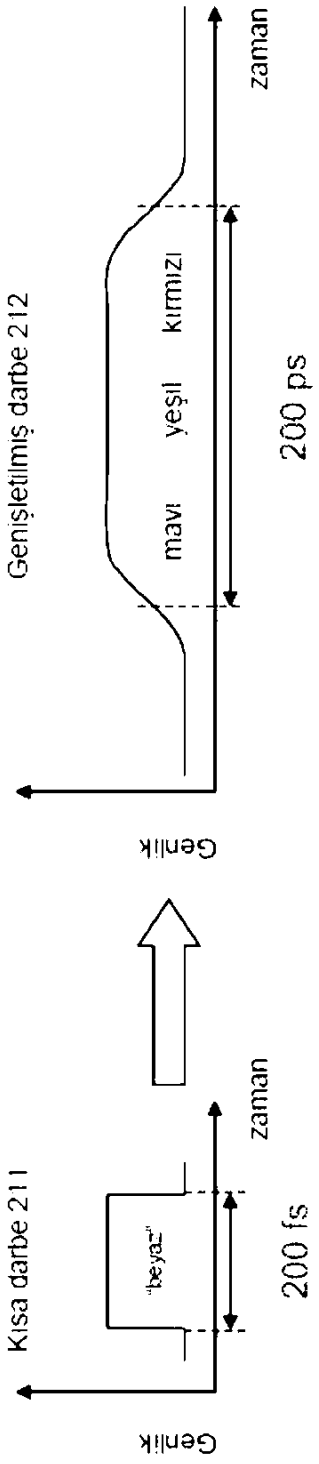
ŞEKİL 1A



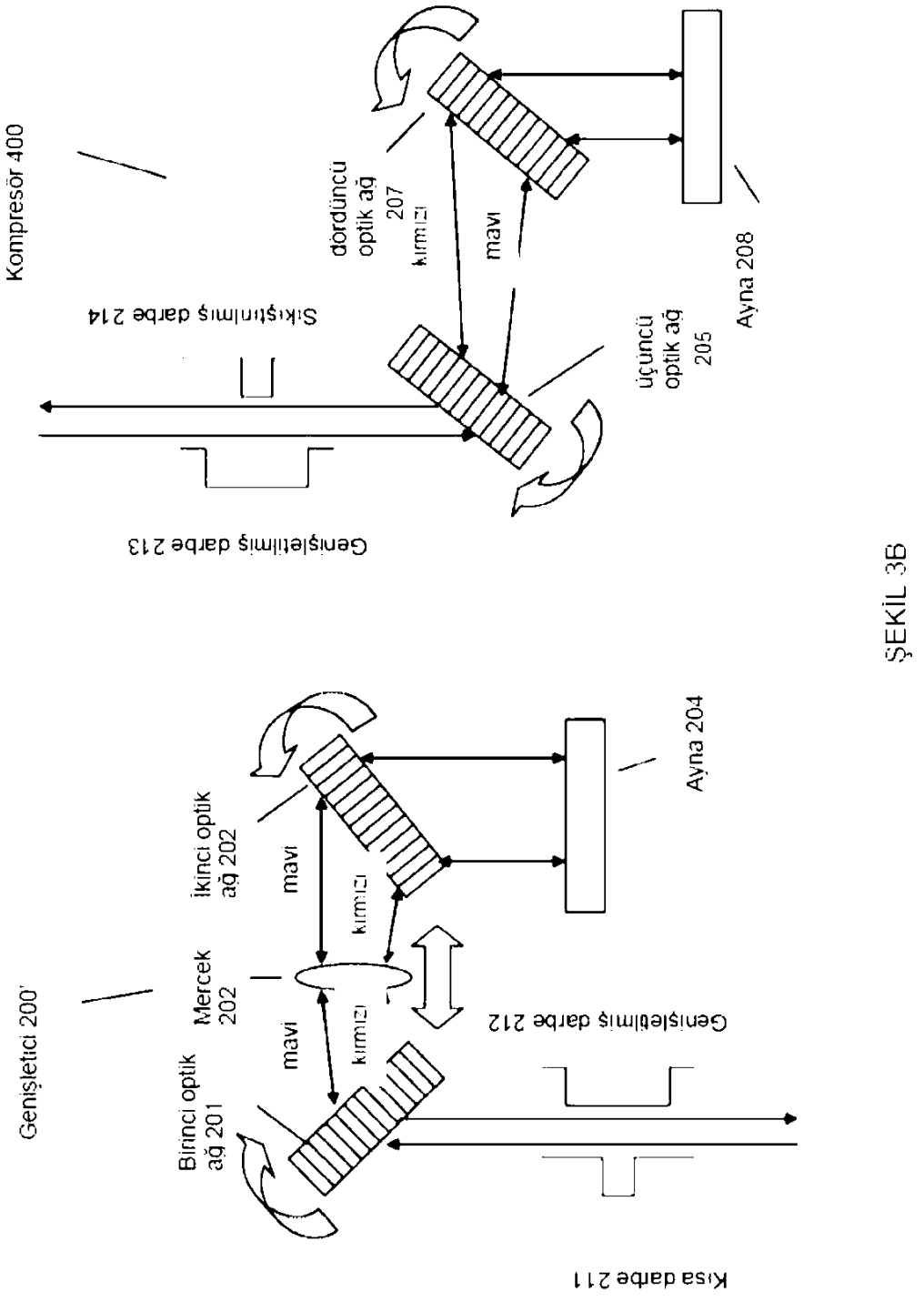
ŞEKİL 1B


lazer
demeti
560
550
Genişletici-kompresör
200
Faraday
izolatör
500
Amplifikatör 300
Osilatör 100

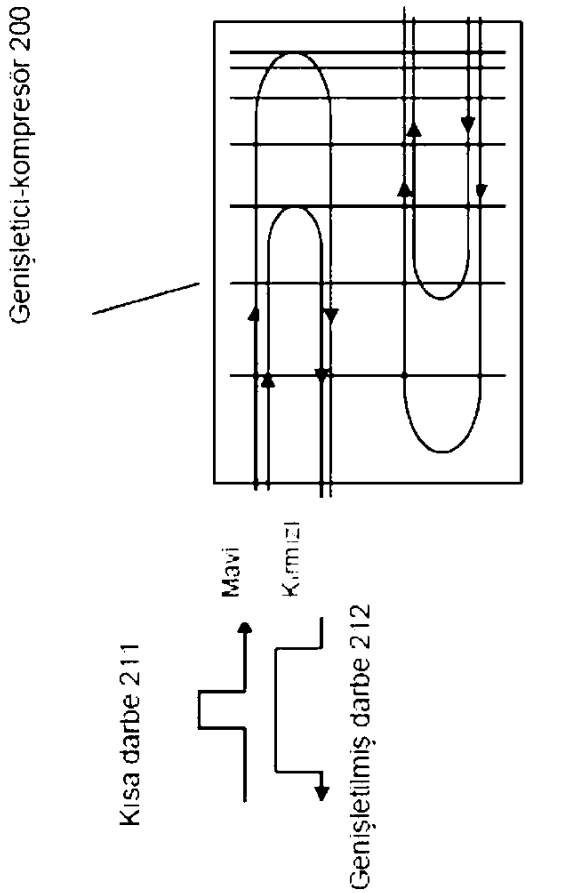
ŞEKİL 2


Kısa darbe 211
"beyaz"
Genlik
zaman
200 fs
Genişletilmiş darbe 212
mavi
yeşil
kırmızı
Genlik
zaman
200 ps

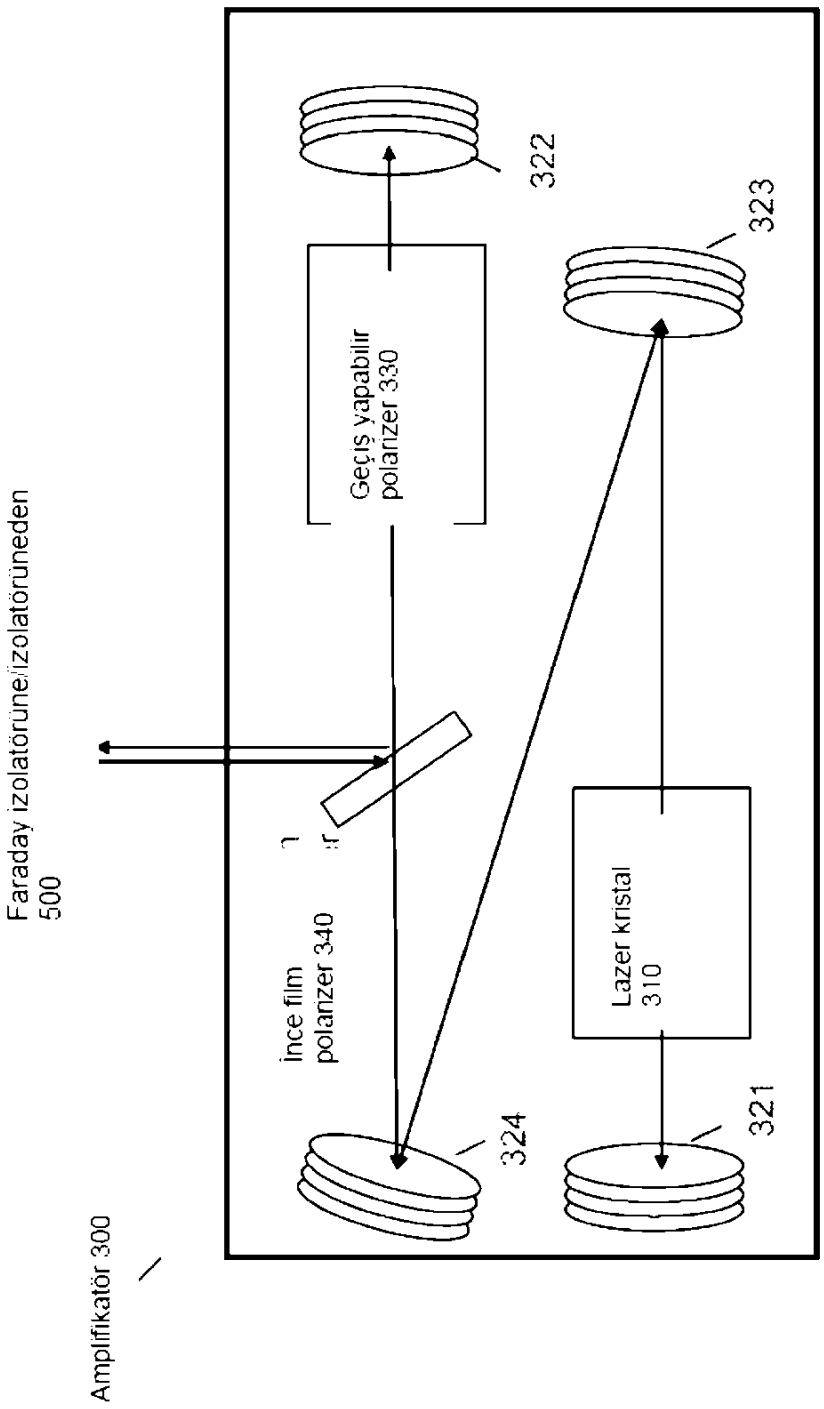
ŞEKİL 3A


Kompresör 400
Sıkıştırılmış darbe 214
Genişletilmiş darbe 213
dördüncü optik ağ 207
kırmızı
mavi
üçüncü optik ağ 205
Ayna 208
Genişletici 200'
Birinci optik ağ 201
Mercek 202
mavi
kırmızı
İkinci optik ağ 202
mavi
kırmızı
Genişletilmiş darbe 212
Ayna 204
Kısa darbe 211

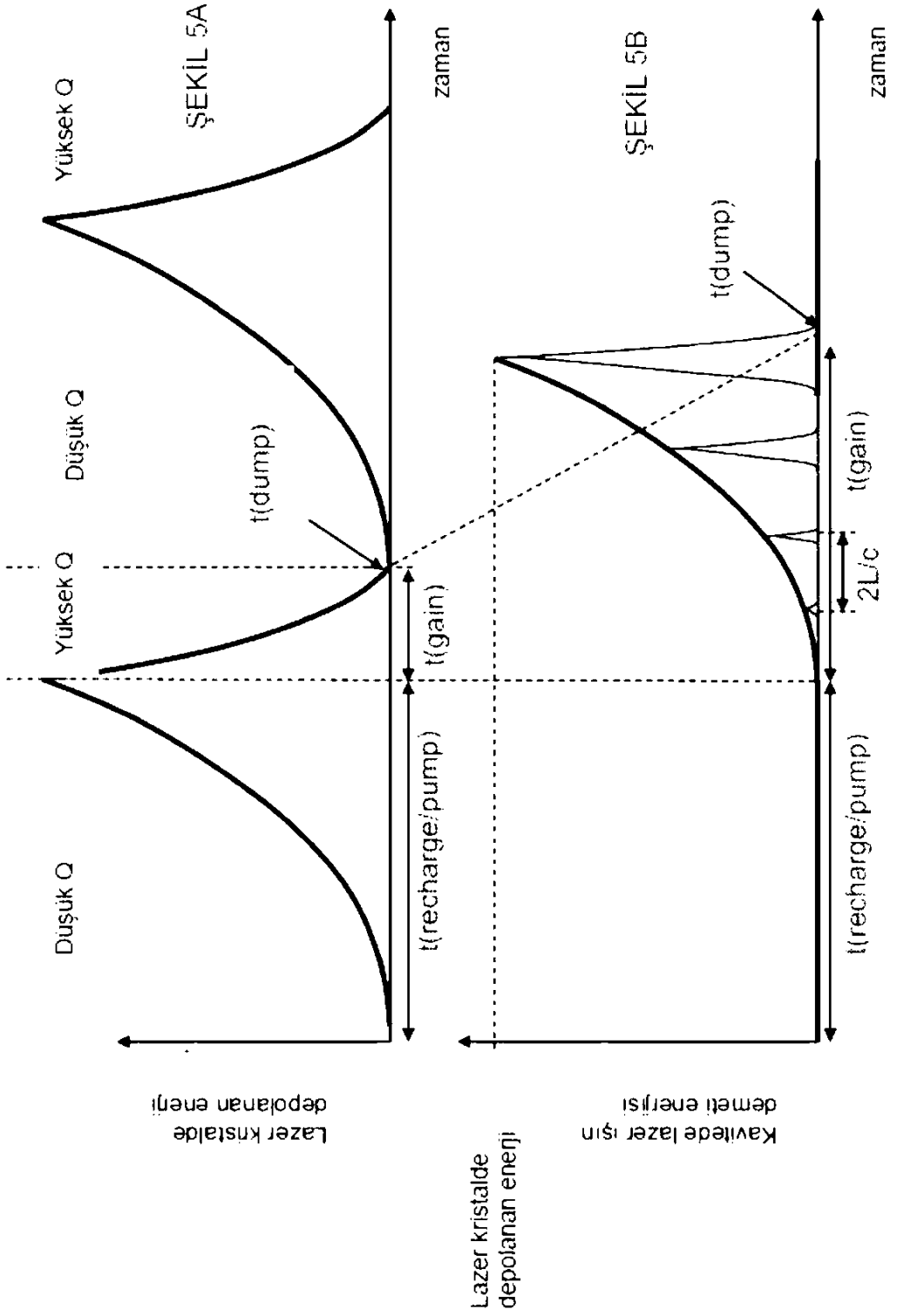
ŞEKİL 3B

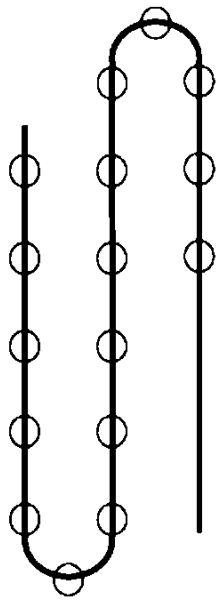

Genişletici-kompresör 200
Kısa darbe 211
Mavi
Kırmızı
Genişletilmiş darbe 212
Amplifiye edilmiş sıkıştırılmış darbe 214
Mavi
Kırmızı
Amplifiye edilmiş genişletilmiş darbe 213

ŞEKİL 3C

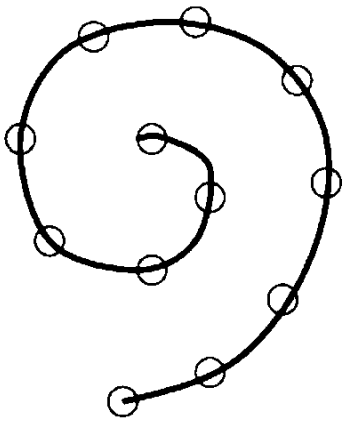

Amplifikatör 300
Faraday izolatörüne/izolatöründen
500
İnce film
polarizer 340
Geçiş yapabilir
polarizer 330
Lazer kristal
310
321
322
323
324

ŞEKİL 4

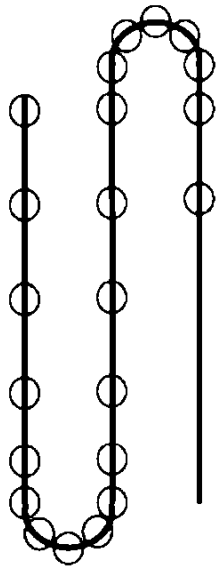

ŞEKİL 5A
Yüksek Q
Düşük Q
Yüksek Q
Düşük Q
t(dump)
t(gain)
t(recharge/pump)
zaman
Lazer kristalde depolanan enerji
ŞEKİL 5B
t(dump)
t(gain)
2L/c
t(recharge/pump)
zaman
Kavitede lazer ışın demeti enerjisi
Lazer kristalde depolanan enerji



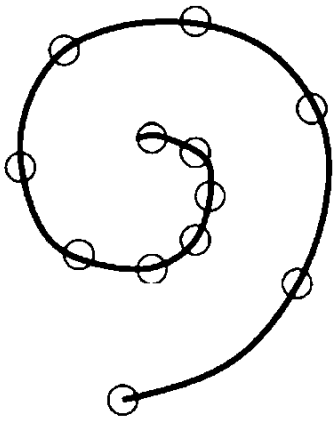
ŞEKİL 6C



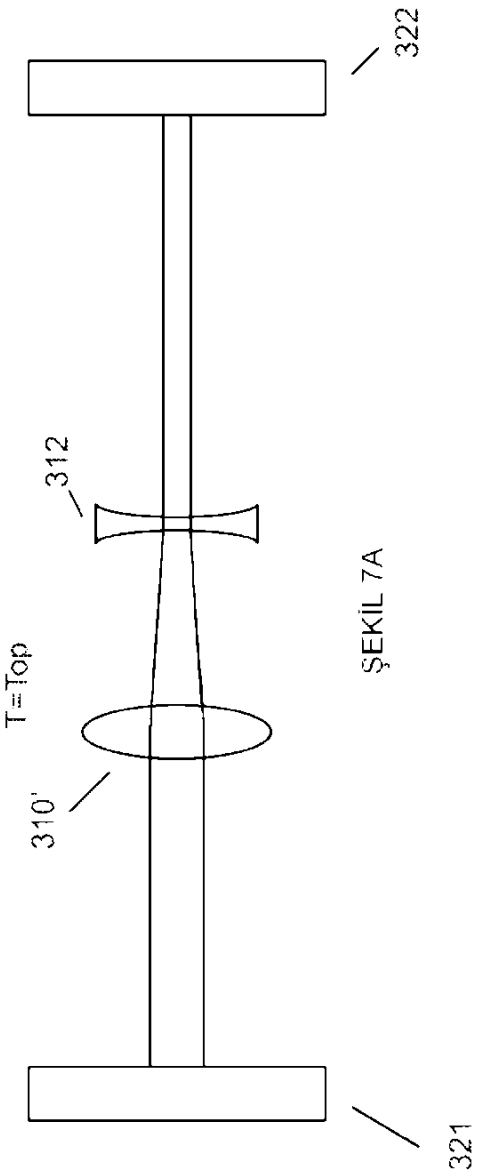
ŞEKİL 6D



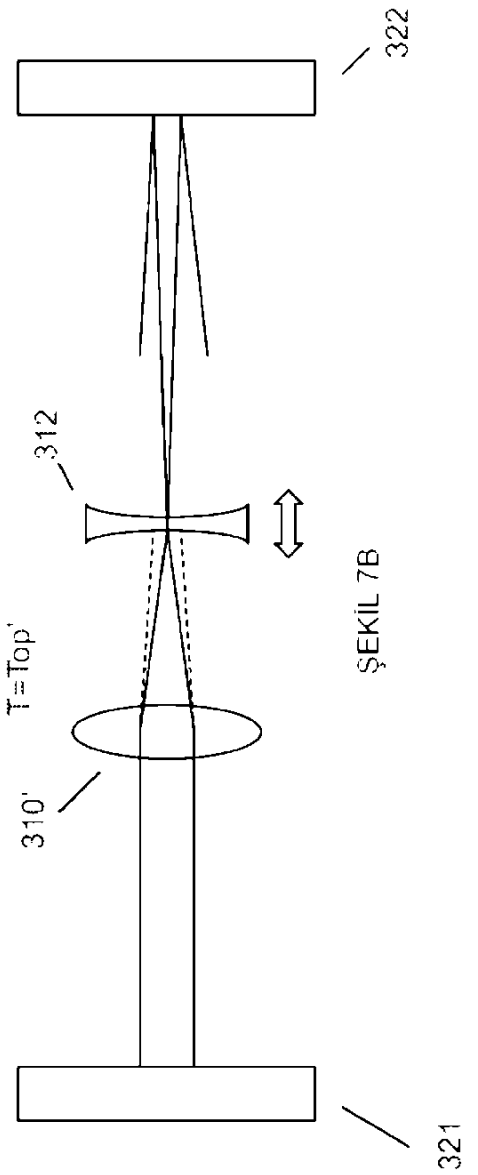
ŞEKİL 6A



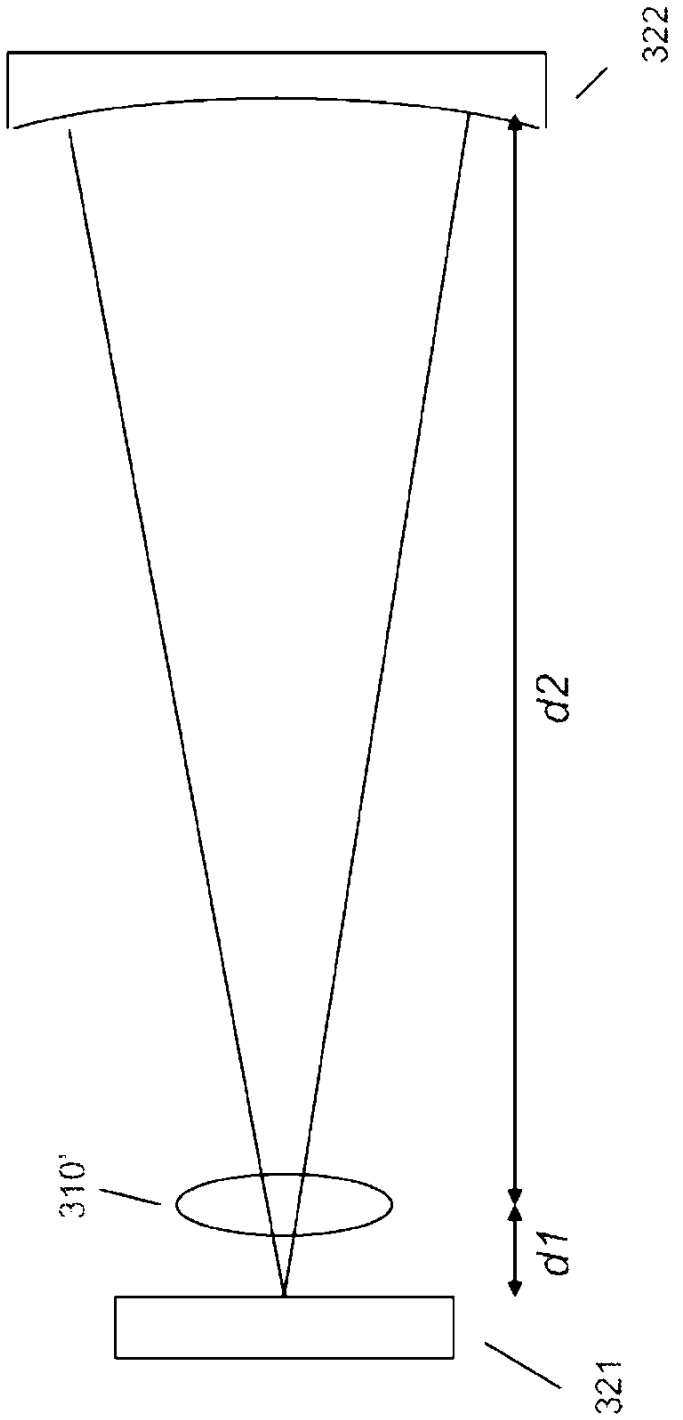
ŞEKİL 6B



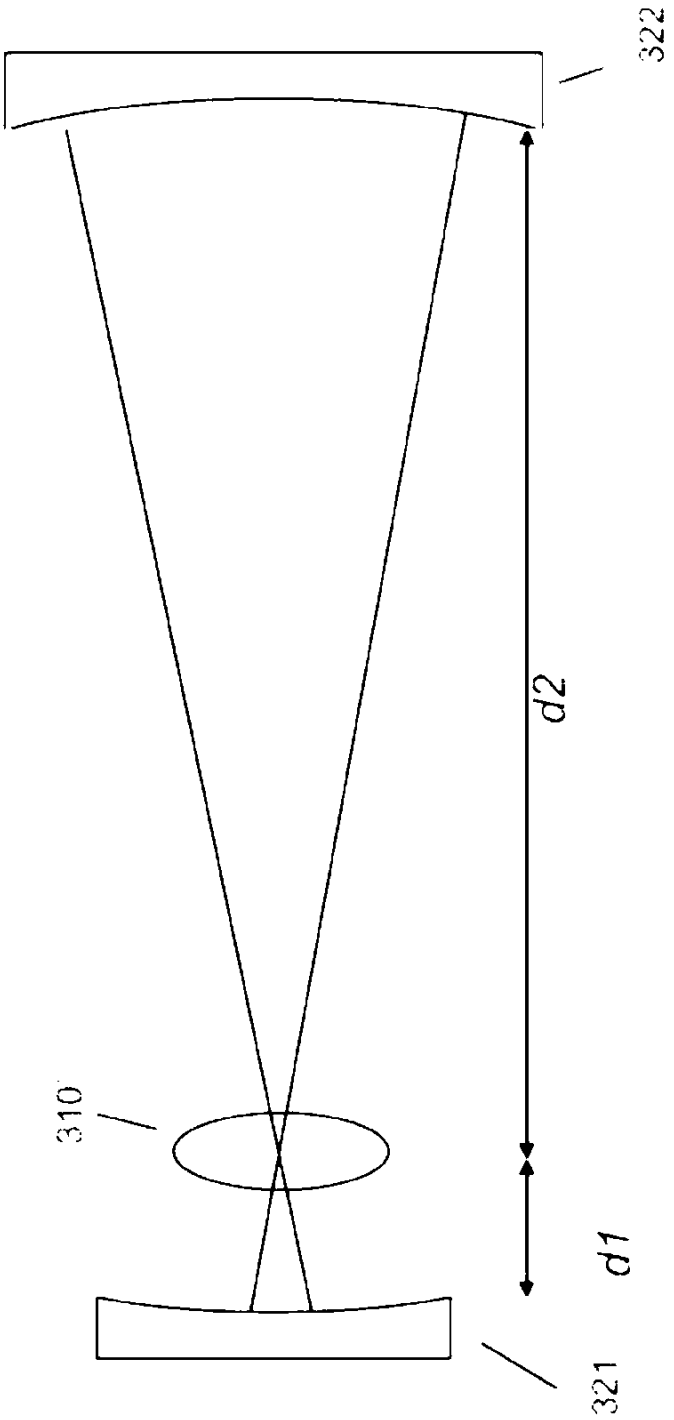
ŞEKİL 7A



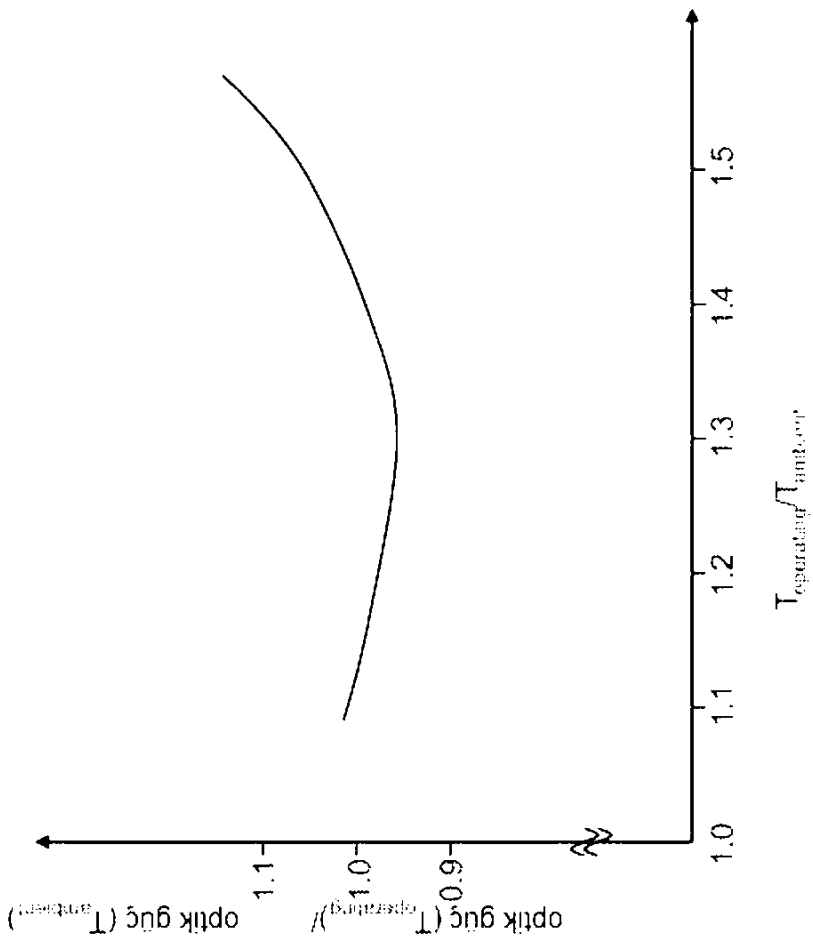
ŞEKİL 7B



ŞEKİL 7C



ŞEKİL 7D


optik güç ($T_{operating}$)/ optik güç ($T_{ambient}$)
0.9
1.0
1.1
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
$T_{operating}/T_{ambient}$

ŞEKİL 8