

# Lazerle Mikro-İmalatta Q-Anahtarlama

Serap ÇELEN<sup>1,♣</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir

Başvuru: 01/10/2014 Düzeltme: 25/11/2014 Kabul: 01/12/2014

## ÖZET

Q-anahtarlama, lazer malzeme işleme cihazlarında yüksek güçlü ve kısa süreli darbeler üretmek için kullanılan, temelde rezonatör kayıplarının ayarlanması prensibine dayalı bir yöntemdir. Yöntemin bulunmasının üzerinden 50 yıllık bir süre geçmiş olmasına rağmen, özellikle yeni geliştirilen fiber lazer cihazlarında etkin bir şekilde kullanımı söz konusudur. Q-anahtarlama yöntemi sayesinde üretilen kısa süreli yüksek enerjili darbeler, daha önce gerçekleştirilmesi mümkün olmayan bazı mikro-imalat proseslerine olanak sağlamıştır. Bu bakımdan bu yöntemin malzeme işleme boyutunda detaylı olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu makalenin amacı, lazer mikro-imalat uygulamaları için kullanılan Q-anahtarlama yöntemi hakkında bilgi vermek ve bu yöntemin hızlı gelişimini endüstriyel boyutta değerlendirmektir. Bu amaçla, makale içerisinde Q-anahtarlamanın tarihsel gelişimi, teorisi, çeşitleri ve güncel kullanım alanları verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Q-anahtarlama, Mikro-imalat, Lazer, Mod kilitleme

## ABSTRACT

Q-switching is a method to create high power- short pulses in laser material processing. Although fifty years passed after the development of this method, it is still used especially in the new developed fiber laser devices. High-energy pulses enable some micro-manufacturing applications which never been possible. For this reason, the importance of this technique can be emphasized for laser micro-machining applications. The aim of the present manuscript is to give beneficial information about Q-switch mechanism in laser micro-manufacturing applications and evaluate the rapid development of this technique from the viewpoint of industrial dimension. Thus historical development, theory, types and current usage fields of q-switching method were given in the paper.

**Keywords:** Q-switching, Micro-manufacturing, Laser, Mod Locking

## 1. Q-ANAHTARLAMAYA TARİHSEL BİR BAKIŞ

Q-anahtarlama, optik olarak sürekli uyarılan bir kaynaktan yüksek tepe gücüne sahip kısa lazer darbelerinin üretim tekniğidir. İlk deneysel uygulamaları Robert W. Hellwart tarafından 1961 yılında, Hughes Uçak şirketi Malibu Kaliforniya'da gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, [1] etkin Q-anahtarlama ilk defa 1980'lerin ortalarında, kristal ve cam fiberlerin içerisine nadir-elementlerin katkılanmasıyla ortaya çıkmıştır. İlk defa neodimiyum, erbiyum fiber lazerleri ve daha sonra iterbiyum, praseodimiyum ve tulyum fiber lazerleri kullanılmıştır [2]. Aslında uyarılmış emisyon ilk defa

tesadüfen 1962 yılında, bir ruby lazeri emisyonunda keşfedilmiştir. Çalışmada bir nitrobenzen hücresi kullanılmış ve yayılan frekans bileşeni Raman hattında 1931 yılında teorik olarak tahmin edilen uyarılmış Raman saçılmasının gösterdiği şekilde oldukça yoğun olarak belirlenmiştir. Daha sonra saçılma prosesinin tam kantitatif bilgisinin deneysel kanıtlarına dayalı olarak yüzlerce çalışma yapılmıştır. Buna karşın, bir çok çalışma kendisini dar bir alanla odaklamış ve uygulanan lazer darbelerinin özelliklerini ve uyarılmış Raman, Brillouin ve Rayleigh saçılmaları gibi karmaşık etkilerini açıklamaktan çok uzak kalmıştır [3-6].

Mears ve diğerleri, 1986 yılında, bir erbiyum katkılı fiber lazerle 1.55  $\mu\text{m}$ 'lik spektrumda, 120 Watt'lık tepe gücüne sahip, 800 Hertz darbe tekrar hızındaki Q-anahtarlamalı operasyonda 30 nanosaniyelik darbe ürettiklerini rapor etmişlerdir [7]. Morkel ve diğerleride, neodimiyum katkılı bir fiber lazerle, 1.053  $\mu\text{m}$ 'lik spektrumda Q-anahtarlamalı modda, 1 kW üzeri darbe gücüne sahip 2 nanosaniyelik darbeler üretmişlerdir [8]. Mylinski ve diğerleride, erbiyum-katkılı bir fiber lazerle 1 kHz darbe tekrar hızında çalışan Q-anahtarlamalı operasyonda 230 Watt tepe gücüne sahip 8 nanosaniyelik darbeler üretmişlerdir [9]. Q-anahtarlamadaki bu gelişmelerle beraber, çift kaplamalı fiberlerin icadı yeni araştırma alanlarının açılmasına sebep olmuştur. Çünkü, iç kaplama fiberin yüksek güçlü yarı iletken lazerlerle optik olarak pompalanmasına olanak sağlamıştır [2,10]. Çift-kaplamalı fiberlerin ve fiber-pompalama tekniklerinin adaptasyonu ile fiber lazerlerin çıkış güçleri sürekli operasyonlarda 1 kW'ın üzerine çıkmıştır. Darbeli operasyonlarda ise birkaç milijoulelik darbe enerjisi sağlayabilmekteyirler ve bu enerji mikro-imalat uygulamaları için yeterlidir [2].

## 2. DARBELİ LAZERLERDE ÇIKIŞ GÜCÜ TERMİNOLOJİSİ VE Q-ANAHTARLAMA TEORİSİ

Sürekli çalışan lazerlerin çıkış gücü ölçümleri darbeli lazerlere göre oldukça kolaydır. Lazerden gelen çıkış gücü saniyedeki joule miktarı veya watt olarak ifade edilmektedir. Darbeli lazerler yüksek güçleri küçük konsantrasyon edilmiş enerji paketleri şeklinde sağlayabildikleri için sürekli lazerlerin kullanılmadığı bir çok imalat uygulamasında tercih edilmektedirler. Bir darbeli lazer için iki güç ölçümü söz konusudur: tepe gücü ve ortalama güç. Ortalama güç tüm bir çevrim için lazerden verilen ortalama enerji hızının basit bir ölçümünü kapsamaktadır. Örneğin; bir lazer saniyede yarım jöüllük bir lazer gücü üretiyorsa ortalama gücü 0.5 Watttır. Tepe gücü ise darbe çıkış hızının bir ölçümüdür. Şayet bir lazer bir mikro saniye uzunluğundaki bir darbe ile yarım jöüllük bir çıkış sağlıyorsa, çıkış gücü 500 000 Watttır. Darbe frekansının lazerin saniyede oluşturduğu darbe sayısının bir ölçümüdür. Periyod iki darbenin başlangıç zamanları arasındaki süredir. Çevrim oranı ise darbe süresinin darbe periyoduna oranıdır. Örneğin; flaş pompalamalı Q anahtarlamalı bir Nd:YAG lazeri 100 milijöüllük 20 nanosaniyelik darbeleri 10 Hertz darbe frekansı ile üretiyor olsun. Bu lazerin tepe gücü 5 Megawatt iken, ortalama gücü 1 Watttır.

Q-faktör veya kalite faktörü  $Q_f$ , rezonatörde her bir çevrimde depolanan enerjinin kaybedilene oranıdır. Yüksek Q değerleri, lazer ortamı içerisinde depolanan yüksek enerjiyi belirtmektedir, bir başka deyişle Q değeri yükseldiğinde enerji lazer ışınması olmaksızın verimli bir şekilde depo edilebilmektedir. Düşük Q değerleri ise kısa zamanda yüksek enerjili olarak hızlıca yayılan lazer darbelerini göstermektedir.

Q değerinin artması rezonatörün yüksek kaliteli veya düşük kayıplı bir rezonatör olduğunu belirtmektedir. Aynası bloke edilmiş bir rezonatör çok yüksek bir Q değerine sahip olmadığı halde ayna blokajı kaldırıldığı

anda Q değeri aniden artış göstermektedir [11,12]. Böylece, bir Q-anahtarlama rezonatörün kalitesini düşük kaliteden yüksek kaliteye çevirebilir. Denklem 1'de Q faktörü bileşenleri verilmiştir, burada  $\omega_0$  titreşim ve geçiş frekansını,  $q_1$  güç kaybını göstermektedir [13]. Lazer darbesinin çıkış özellikleri rezonans boşluğunun özellikleri değiştirilerek modifiye edilebilmektedir. Genellikle katı-hal lazerleri için kullanılan bir tekniktir.

$$Q_f = \frac{\omega_0 \cdot \text{depolanan enerji}}{\text{birim zamanda kaybedilen enerji}} = \frac{\omega_0 \cdot Q}{q_1} \quad [1]$$

Enerjinin lazer ortamı içerisinde depolanması nüfus terslenmesi prensibi ile sağlandığından boya lazerleri ve bir çok gaz lazeri için kendiliğinden emisyon nüfus terslenmesi için gerekli enerji depolanmasına izin vermediği için bu tip lazerlerin Q-anahtarlanması mümkün değildir. Karbon dioksit lazerleri bu teknik için uygun oldukları halde uygulamada faydalı olduklarını destekleyen herhangi bir kanıt bulunmamaktadır.

Enerji belirli bir seviyeye kadar nüfus terslenmesi içinde depo edilir ve dev bir darbe şeklinde aniden serbest bırakılır. Bu noktada sorulabilecek en önemli soru enerjinin nüfus terslenmesinden hızlı bir şekilde nasıl tahliye edilebileceğidir. Tüm enerjiyi nüfus terslenmesi içerisinde tutarak bunu gerçekleştirmenin en iyi yolu lazer aynalarından bir tanesini bloke etmektir. Önce nüfus terslenmesi kavramını açıklayalım. Bir enerji seviyesindeki birim hacim başına düşen atom sayısına 'o seviyenin nüfusu' denmektedir. Nüfus terslenmesi atomların uyarılmış atom durumuna getirilerek alt enerji durumlarını boş bırakılmasıdır. Böylece üst enerji seviyesinde, alt enerji seviyesinden daha fazla atom bulunacaktır. Örneğin, iki-seviyeli bir sistem düşünelim. Alt seviye 1'in nüfusu ihmal edilebilir. Bu tipik bir 4 seviyeli sistem içinde uygun olacaktır. Kavite modları çok yüksek sayıda olabileceği halde, sadece birkaç modda çok yüksek kazanç elde edilecektir. Burada lazerin sadece bir kavite modunda salınım yapacağı kabul edilmektedir. Kavite modunda foton sayısını  $q_0$  olsun. Enerji yoğunluğu  $e(v)$ , fotonların sayısı ile ilişkili olacaktır.

$$e(v) = \frac{q_0 H_p v}{V_c} \quad [2]$$

Denklem 2'de  $V_c$  kavite hacmini  $H_p$  ise planck sabitini göstermektedir. Her bir seviyenin nüfusu denklem 3 ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde  $N_1$  ve  $N_2$  sırasıyla birinci ve ikinci seviyelerin nüfusudur.

$$N = N_2 - N_1 \quad [3]$$

Birinci seviyedeki nüfusu 0 olarak kabul edersek,  $N=N_2$  olacaktır. Böylece uyarılmış emisyon sonucu ikinci seviye nüfus değişim hızı denklem 4 ile hesaplanabilir.

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 B_{21} e(v) \quad [4]$$

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{c_1}{V_c} q_0 N \quad [5]$$

$C_1 = B_{21} H_p v$ ,  $V_c$  kavite hacmi için her moddaki her bir foton için uyarılmış emisyon hızıdır. Foton üretimi için,

kendiliğinden emisyon ihmal edilecektir. Kavite içerisindeki foton sayısı değişim hızı denklem 6 veya denklem 7 aracılığıyla hesaplanabilir.

$$\frac{dq_0}{dt} = N_2 B_{21} e(v) V_C - \frac{q_0}{\tau_c} \quad [6]$$

$$\frac{dq_0}{dt} = C_1 q_0 N - \frac{q_0}{\tau_c} \quad [7]$$

Denklem 8'de  $\tau_c$  kavitenin ömrüdür ve denklemin birinci terimi ikinci seviyeden uyarılmış emisyon sonucu foton sayısı artışına, ikinci terim ise kavite kayıplarına gönderme yapmaktadır. Lazer ortamı içerisindeki nüfus terslenmesi foton sayısının maksimum olduğu zamanda denklem 8 yardımıyla hesaplanabilir.

$$N_{max} = \frac{1}{C_1 \tau_c} \quad [8]$$

Denklem 5 ve denklem 7 aracılığıyla denklem 9 elde edilebilir.

$$\frac{dq_0}{dN} = V_C \left( \frac{1}{C_1 \tau_c N} - 1 \right) \quad [9]$$

$$\int_{q_{0i}}^{q_0} dq_0 = V_C \int_{N_{in}}^N \left( \frac{1}{C_1 \tau_c N} - 1 \right) dN \quad [10]$$

$N_{in}$  başlangıçtaki nüfus terslenmesini ifade eder ve bu anda hiç foton olmadığı kabul edildiğinde denklem 11'ye ulaşılır.

$$q_0 = \frac{V_C}{C_1 \tau_c} \ln \left( \frac{N}{N_{in}} \right) - V_C (N - N_{in}) \quad [11]$$

Böylece darbe boyunca toplam enerji çıkışı denklem 12 aracılığıyla bulunabilir.  $N_f$  darbe sonundaki nüfus terslenmesini göstermektedir.

$$Q_{out} = \frac{1}{2} (N_{in} - N_f) V_C H_P v f_q \quad [12]$$

Buradan itibaren belirli bir frekansla gelen foton, diğer fotonların yayılmasını tetikler ve olay zincirleme olarak devam eder. Sonuçta, aynı fazlı uyarılmış foton kümesi oluşur. Enerji yarı-kararlı atomlardan henüz ortaya çıkmakta olan ışık dalgasına aktarılır. Dalga aktif ortam içinde gidip gelerek gelişimini sürdürür. Bir flaş lambası milisaniyelik bir lazer güç çıkışı sağlarsa, lazer aynı şekildeki normal iç ortam kaybından yüksek bir kazanç (nüfus terslenmesi) elde edilebilir. Fakat Q-anahtarlama lazer oluşumunu engellemekte ve bu sayede kazanç normal doyma değerini aşmaktadır. Sonuç olarak, uyarılmış atomların kendiliğinden emisyon ömrü birkaç yüz mikrosaniye olduğundan dolayı kazanç düşmeye başlayacaktır.

Lambanın bu optik pompalama süresi sona erdiğinde ilk atomlar kendiliğinden yayılmaya başlarlar. Şayet Q-anahtarlama geçişi bu noktada açılırsa, iç ortam kaybı aniden azalır. Uyarılmış emisyon devreye girer ve rezonatörden yüksek güç temin edilir. Bu güç çıkış aynası aracılığıyla imalatın gerçekleştirileceği işlem yerine iletilir. Kazanç doyma değerinin altına düştüğünde ise, kazanç iç ortam kaybından çok daha düşük olacağından lazer gücünde düşecektir. Rezonatörün içinde halen çok

fazla foton vardır. Bir süre sonra tüm fotonlar çıkış aynası aracılığıyla rezonatörden tahliye edilecek ve darbe sonlanacaktır. Eğer flaş lambası henüz durmadıysa, lazer tekrar oluşturulabilir. Buradaki ilginç nokta, Q anahtarlama ile lazerin çalıştırılabilmesi fakat kapatılmamasıdır. Lazer rezonatördeki tüm fotonlar tahliye edildiğinde kapanmaktadır. Bu açıklamalardan sonra akla gelen ilk soru Q anahtarlama etki eden faktörlerin neler olduğudur. Faktörlerden ilki kazançtır. Yüksek kazançlı bir lazer düşük kazançlı bir lazere göre daha kısa darbe üretebilir. Darbe süresini etkileyen diğer bir faktör ise fotonların rezonatör içerisinde kalma süresidir. Darbe süresini arttırmak için aynaların yansıtıcılığını arttırmak veya aynalar arasındaki boşluğu uzatmak gerekmektedir. Rezonatördeki foton sayısının artmasında uyarılmış emisyonu artırır

Q anahtarlama bir katı hal lazerinin darbe süresi flaş pompalamalı bir lazer için birkaç nanosaniyeden yüzlerce nanosaniyeye kadar yükselebilir.

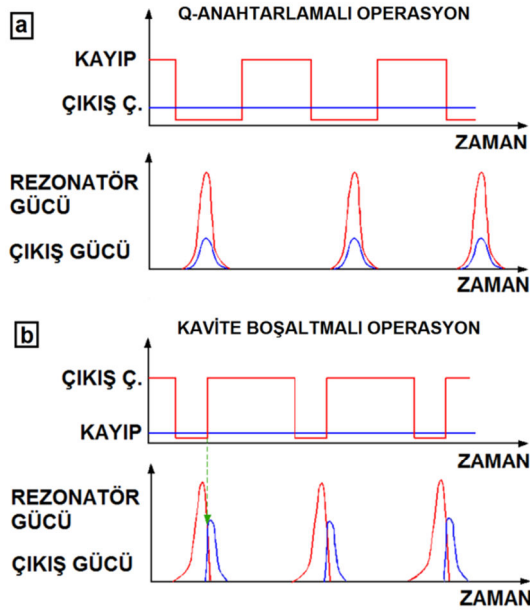
### 3. Q ANAHTARLAMA ÇEŞİTLERİ

Önceki bölümde bahsedildiği gibi, Q-anahtarlama rezonatör kayıplarını ayarlayarak kısa ve güçlü darbeler elde etmenin en etkin yöntemidir. Bu yöntem temelde, katı-hal rezonatörlerinde yüksek enerjili ve yüksek tepe gücüne sahip nanosaniye süreli darbeler üretmek için kullanılmaktadır. Q-anahtarlama operasyonda darbenin üretimi önceki bilgiler ışığında kısaca şöyle özetlenebilir. Q-anahtarlama bir operasyonda, kazanç ortamında belirli miktarda bir enerji depolanana kadar rezonatör kayıpları yüksek bir düzeyde tutulur. Bu durumda, şulanma gerçekleşmediğinden optik pompalama mekanizması ile kazanç ortamına beslenen enerji burada birikir. Depo edilen enerjinin miktarı kendiliğinden emisyon tarafından sınırlandırılır. Kayıplar, aniden küçük bir değere düşürüldüğünde, lazer rezonatörü içerisindeki lazer ışınının gücü aniden artar ve bu anda rezonatörden çıkışına izin verilir. Bu proses genellikle kendiliğinden emisyon ile başlar, güç rezonatör çevresi dönüşleri ile makroskobik güç seviyelerine artırılır. Böylece, milijoule- joule aralığında değişen enerjiye sahip kısa optik darbe elde edilmiş olur [2,14,15].

Q anahtarlama tekniğinin uygulandığı lazerler "Q anahtarlama lazerler" olarak adlandırılmaktadır. Geçici olarak entegre edilen rezonatör gücü, kazanç ortamının doyma enerji seviyesine ulaştığında işlem başlar. Maksimum tepe gücüne, kalan kazancın düşük rezonatör kayıplarına eşit olmasıyla erişilmektedir. Yüksek rezonatör gücü bu zaman boyunca daha ileri tüketime yol gösterir, güç düşüş durumuna geçer. Üretilen darbe enerjisi genellikle kazanç ortamının doyma enerjisinden daha yüksektir ve küçük lazerler için bile milijoule düzeyinde olabilir. Maksimum tepe gücü sürekli operasyonlarda elde edilebilenden çok daha yüksek seviyelerdedir [15]. Q-anahtarlama en çok kullanılan lazer ortamları neodimiyum depo edilmiş Nd:YAG, Nd:YVO4 ve Nd:YLF'dir. Q-anahtarlamanın en yoğun kullanıldığı uygulamalar yarı iletken ve bir çok elektronik sektörü için mikro-imalat yapan endüstrilerdir. Delme, kesme, kazıma ve hassas mikro imalat gibi minimum ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve çevreyen

malzemede ısıl hasar oluşturmaması önemlidir. ITAB daha kısa darbe süreleri veya daha kısa dalga boyları ile daraltılabilir. Daha kısa darbe süresi malzeme içerisine işleme darbeleri esnasında yayılan ısı miktarını azaltır bu sebepten bir çok Q-anahtarlamalı mikro imalat lazeri nanosaniye ve daha altı darbe üretmek için tasarlanmaktadır. Q-anahtarlama infrared yakını 1.06  $\mu\text{m}$ 'lik dalga boyunu 532 nm, 355 ve hatta 266 nm'ye çevirerek verimli harmonik dalga üretebildiği için büyük bir avantaja sahiptir [16]. Ultraviole gibi daha kısa dalga boyları doğrudan bağ kopararak malzeme işleme sağlayabilirler.

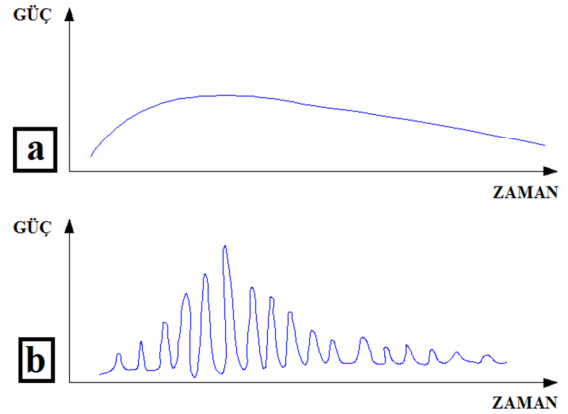
Q anahtarlama kısa süreli ve yüksek enerjili darbe paketleri elde etmenin bir yöntemidir. Bu amaçla kullanılan diğer yöntemler, kavite boşaltması ve mod kilitlemedir. Q anahtarlama çeşitlerine geçmeden önce bu yöntemleri tanıtmak faydalı olacaktır. Kavite boşaltması, Q anahtarlama ile elde edilmesi mümkün olmayan, çok kısa ve çok yüksek frekanslı darbe üretiminde kullanılmaktadır. Anahtar açıldığında, lazer hareketi sınırlandırılır ve enerji lazer ortamı içerisinde yapılandırılır. Anahtara gerilim uygulandığında ise ışığın polarizasyonuna sebep olur. Böylece, lazer darbesi aynalardan biri değil anahtar aracılığıyla çıkar. Darbe uzunluğu, lazer ortamı uzunluğu ve fotonların dönüş zamanı ile orantılıdır. Şekil 1'de Q-anahtarlamalı ve kavite boşaltmalı bir operasyonda çıkış gücü karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 1. Şematik darbe karakteristikleri a) Q-anahtarlamalı lazer operasyonu, b) Kavite boşaltmalı lazer operasyonu [17]

Mod kilitlemeli operasyonda, ultrakısa ve eş aralıklı darbe serileri üretilir. Mod kilitleme uzunlamasına modların etkileşimi sonucu olduğundan, lazer çıkışının salınımlı (titreşimsel) davranışının bir sonucudur. Lazer ortamındaki kayıp ve kazancın modülasyonu ile elde edilmektedir, bu durum uzunlamasına modların sabit faz ilişkisini sürdürmesi ile sonuçlanmaktadır. Darbe tekrar frekansları megahertz-gigahertz aralığındadır [18]. Mod

kilitleme ile oluşturulan darbe süresi, üretilen ışığın dalga boyunu ve rezonatörün veriminde içeren çeşitli faktörleri kapsamaktadır. Mod kilitleme Q-anahtarlama ile birlikte kullanılabilir. [Şekil 2] Nd:YAG lazerleri oldukça dar bant genişlikleri ile 30-60 pikosaniyelik darbe üretiminde, yüksek bant genişlikli boya lazerleri ise 0.1 pikosaniyelik değerle, Q-anahtarlama ve kavite boşaltmasına göre çok daha kısa darbe süreleri için kullanılabilirler [15].



Şekil 2. Şematik darbe karakteristikleri a) Q-anahtarlamalı lazer operasyonu, b) Q-anahtarlamalı ve mod kilitlemeli lazer operasyonu [19]

Q anahtarlama için arka yansıtıcı ayna önüne lazer oluşumunu engellemek amacıyla bir blok konulması kolay bir yaklaşım olarak görünmesine rağmen ışığın önündeki bloğun birkaç nanosaniyelik bir hızla çekilmesi kolay olmadığından pratik bir yöntem değildir. Mevcut lazerlerde dört tip Q anahtarlama söz konusudur: Mekanik Q-anahtarlama, Akusto-optik Q-anahtarlama, Elektro-optik Q-anahtarlama ve pasif (boya) Q-anahtarlama.

Mekanik Q-anahtarlama 1960'ların başlarında, dönen aynalar kullanılarak uygulanmasına rağmen mekanik güvenilirliğinin düşük olması nedeniyle günümüzde bu metod kullanılmamaktadır.

En çok kullanılan Q-anahtarlama cihazları elektro-optik ve akusto-optik modülatörlerdir. Elektro-optik Q-anahtarlama malzeme içinden geçen ışığın davranışına dayalı bir yöntemdir. Bir elektro-optik modülatörde gerilim uygulandığında ışığın geçiş polarizasyonuna göre dönen bir kristal mevcuttur. Bu kristal iki çapraz polarizer arasına konulduğunda ışık bu modülden sadece uygulanan gerilim polarizasyonu döndürdüğünde geçebilmektedir. Elektro-optik modülatörler birkaç kilohertz'e kadar olan düşük darbe frekanslarında ve yüksek enerjiler için kullanılabilirler. Genellikle milijoullük darbeler bu yöntem ile üretilir.

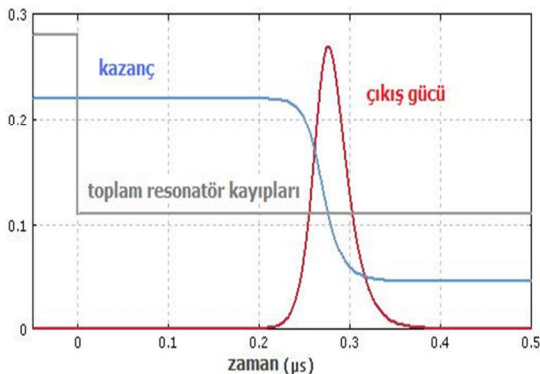
Daha yüksek darbe frekansları (kilohertz üstü) ve düşük darbe enerjileri için, akusto optik polarizerler tercih edilmektedir. Bir akusto-optik modülatör içerisinde, kristal radyo frekansı aracılığıyla lazer ortamı içindeki ışını sabit bir açıda sapıtmaktadır [16]. Pratik uygulamaları faz gecikmesi sağlayan Pokels hücresi,

potasyum dihidrojen fosfat (KDP) dalga plakası veya nitrobenzenden yapılan Kerr hücrelidir [16].

Boya ile Q-anahtarlama (doymuş-soğurucu ile Q-anahtarlama veya pasif Q-anahtarlama), iletimi giren ışık yoğunluğuna bağlı olan bir boya kullanılmaktadır. Bu boyayı taşıyan bir hücre lazer ile ayna arasına yerleştirilir ve bir aynayı bloke eder. Kazanç ortamından yayılan ışık yeterince yoğun olduğunda boya renksiz konuma geçer ve ışık çok az bir kayıpla geçer. Boya Q-anahtarları basit oldukları için ucuzdurlar, fakat darbe gecikmesi, boya bozulması ve senkronizasyon zorlukları gibi bazı dezavantajları söz konusudur. Kullanılmalarının kolay olması sayesinde geniş bir uygulama alanına sahip oldukları halde düşük kazançlı lazerlerde kullanılmamaktadırlar. Birçok durumda, Q anahtarlama lazerler tekrarlı Q anahtarlama olarak adlandırılan düzenli darbe serileri üretirler. Darbe tekrar hızı genellikle 1-100 kHz aralığında, hatta bazen daha yüksektir. Rezonatör kayıpları temel olarak farklı yollarla anahtarlabilir. Bunlar aktif ve pasif mod olarak iki gruba ayrılmaktadırlar [12]. Takip eden bölümlerde aktif ve pasif Q-anahtarlama şematik olarak verilmiştir.

### 3.1. Aktif Q Anahtarlama

Aktif Q-anahtarlama operasyonlarında, kayıplar bir aktif kontrol elemanı (aktif Q anahtarı) genellikle akusto-optik (AOM) veya elektro-optik modülatör (EOM) veya mekanik eleman (örneğin; dönen bir ayna) tarafından ayarlanmaktadır. Her üç durumda da darbe enerjisi ve darbe süresi rezonatör kaybına ve kazanç ortamında depo edilen enerjiye bağlıdır ve pompalama gücü ile darbe tekrar hızı ile ilişkilidir [2,14,15]. Darbe elektrikli tetik sinyalinin ulaşmasından çok kısa süre sonra şekillendirilmektedir. Şekil 3'de görülebileceği üzere, Q anahtarlama  $t=0$ 'da aktive edilmiştir, güç bu noktada ekponansiyel olarak artmaya başlamakta ve ancak  $\sim 0.2$   $\mu\text{s}$  sonra yükselmektedir. Ayrıca bu işlem lazer rezonatörünün son aynaları olarak eğimli aynalar kullanılmasıyla mekanik olarak gerçekleştirilebilir. Her durumda, ulaşılan darbe enerjisi ve darbe süresi temelde kazanç aracında depo edilen enerjiye bağlı olarak değişmektedir [15].

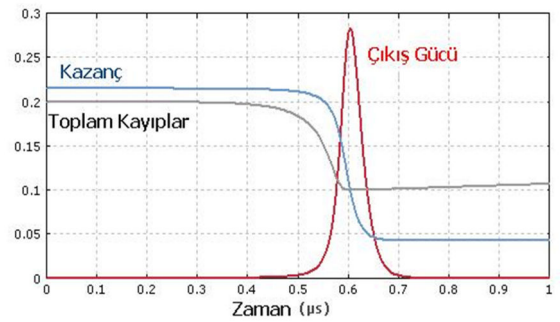


Şekil 3. Aktif Q anahtarlama lazerde kazanç ve kayıpların zamana bağlı olarak değişimi [15]

Aktif Q-anahtarlamanın avantajı darbe tekrar hızı ve sonuçta darbe genişliğinin kolay kontrolüdür, dezavantajı ise bir optik modülatör kullanma gerekliliğidir [2].

### 3.2. Pasif Q Anahtarlama

Pasif Q-anahtarlama, kendi kendine Q anahtarlama olarak bilinmektedir. Kayıplar otomatik olarak bir doymuş soğurucu kullanılarak ayarlanmaktadır. Şekil 4'de pasif Q anahtarlama bir lazerde kazanç ve kayıpların zamana bağlı değişimi görülmektedir. Kazanç ortamında depo edilen enerji yani kazanç, rezonatör kayıplarını aşan yeterli bir seviyeye ulaşır ulaşmaz optik darbe oluşur. Bir çok durumda, darbe enerjisi ve süresi sabitlenmekte ve pompalama gücünün sadece darbe tekrar hızını etkilemesi sağlanmaktadır [15].



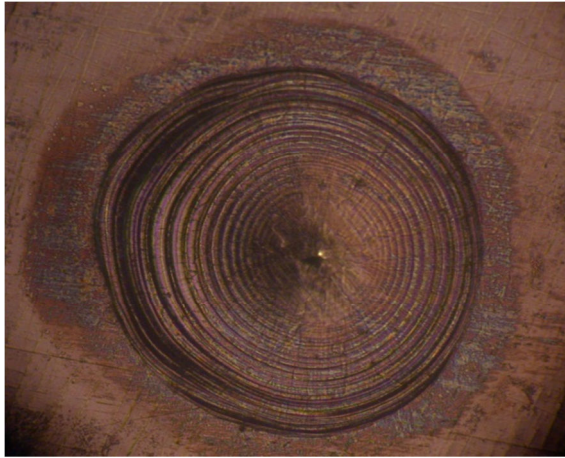
Şekil 4. Pasif Q anahtarlama lazerde kazanç ve kayıpların zamana bağlı değişimi [15]

Pasif Q-anahtarlamanın en büyük avantajı basit yapısı, dezavantajı ise darbe kontrolünün oldukça sınırlı olmasıdır [2]. Aktif Q anahtarlama ile karşılaştırıldığında, pasif Q anahtarlama modülatör ve onun elektrikli tertibatına ihtiyaç duyulmadığından oldukça basit bir yöntemdir. Bununla beraber, darbe enerjileri genellikle daha düşüktür ve darbelerin dışarıdan tetiklenmesi mümkün değildir [15].

## 4. ENDÜSTRİDE Q-ANAHTARLAMA

Nadir dünya elementi katkılı tek-modlu fiber lazerler, lazerle mikro-imalat, haberleşme ve tıp gibi bir çok alanda mükemmel ışın kaliteleri, üstün ısı performansları, yüksek verimlilikleri ve sistem güvenilirlikleri açısından konvansiyonel lazerlere tercih edilmektedirler [2, 20]. Ortak uygulama alanlarında kullanıldıkları zaman farklı lazer konseptlerini birbirleriyle karşılaştırmak oldukça doğaldır. Bu karşılaştırma, özellikle katihal lazerleri ve fiber lazerleri arasında yapılmaktadır. Günümüzde fiber lazerlere büyük talep vardır, yukarıda bahsedilen özellikleri sayesinde bir çok katihal lazerinin yerini almışlardır. Bununla beraber onlarla aynı hatta daha iyi performanslara ulaşabilmektedirler [21]. Lazerle mikro-imalat gibi yüksek güç, yüksek enerji ve kısa darbe süresi gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu uygulamalar genellikle 1-20 Watt ortalama güç, ve  $10^6$   $\text{W}/\text{cm}^2$  üzeri yoğunluk gerektirmektedirler [18]. Bahsedilen bu yüksek yoğunluğa ancak darbeli veya q-anahtarlama operasyonlarla ulaşabilmektedir. Darbeli operasyon önceki bölümlerde detaylı açıklandığı üzere optik

pompalama lambalarının veya diyodlarının çok yüksek güç seviyelerinde çalıştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Q-anahtarlama ise mikro-imalat uygulamaları için gerekli gücü üretmek için geniş çapta kullanılan bir yöntemdir. Lazer enerjisi 100 nanosaniyeden daha kısa bir zamanda  $10^4$  Watt'tan büyük bir tepe gücü ile bırakılmaktadır. Sürekli modda çalışan lazerlerde, Q-anahtarlama ile 50 kHz üstü darbe tekrar hızları elde edilebilmektedir [11,18]. Şekil 5'te yüksek güçlü bir Rofin diyot lazeri tarafından ticari saflıkta titanyum malzeme üzerinde oluşturulan darbeli operasyon sebebiyle bir spiral merdiven görüntüsündeki oyuk geometrisi verilmiştir. Yeni yüzey yapısı kemik-implant arayüzey stabilitesini artırıcı mikro-oyuk geometrilerinin deneme çalışmaları esnasında gerçekleştirilmiştir [22, 23].

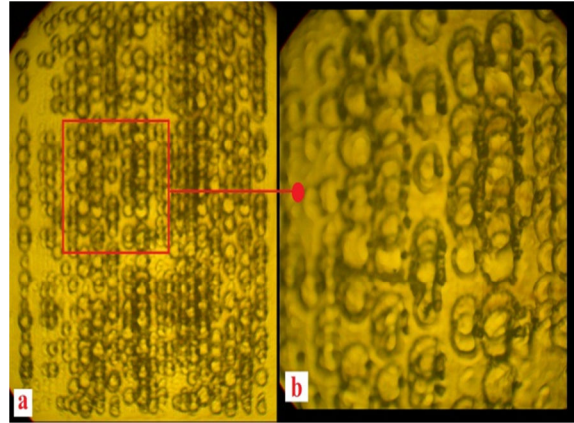


Şekil 5. Rofin diyot lazeri tarafından oluşturulan oyukun optik mikroskop görüntüsü [22, 23]

Lazerler doğrusal olmayan özellikler taşıyan dinamik sistemlerdir. Bu doğrusal olmayan etkiler, Q-anahtarlama fiber lazerlerde konvansiyonel lazerlere göre küçük fiber özlüklerinde tutulan çok yüksek güçten kaynaklanmakta ve lazer çıkışının geçici ve spektral karakteristiklerini önemli derecede etkilemektedir [2]. Fiber lazerlerin uzun boyu ve kısa etkin mod alanı Kerr nonlineerliğinin kuvvetli etkilerine yol açabilmektedir [21]. Özellikle tek frekanslı lazerler ve yükselticiler için ultrakısa darbe üretiminde, aşırı saçılma kayıpları (Raman, Brillouin saçılması gibi) gibi geçici etkilere sahip olabilmekte ve bu durum elde edilebilir darbe süresi veya çıkış gücünü sınırlamaktadır [2, 10, 21]. Bundan dolayı, nadir-element katkılı fiberlerin birim uzunluğundaki ortalama kazanç ve pompalama soğurması camın katkılandırma konsantrasyonuna bağlı olarak, bağıl olarak uzun kazanç ortamı kullanımı gerektirebilmektedir. Birçok fiber lazeri yüksek kazanç ve yüksek rezonatör kayıpları ile çalışmaktadır [11, 21]. Burada mikro-imalat açısından önemli olan bu kayıplardan proses amaçları doğrultusunda yararlanabilmektedir.

Günümüz Q-anahtarlama fiber lazerleri, 200 Watt' a kadar ortalama güç seviyeleri ve 150 Kilowatt'a kadar tepe güçleri ve nanosaniyede pikosaniyeye değişen darbe süreleri ile güneş enerjisi-fotovoltaik, mikro-imalat, tekstürleme ve ablyasyon gibi malzeme işleme uygulamaları için geniş kullanım alanına sahiptirler [20].

Şekil 6'da Telesis fiber lazeri tarafından ticari saflıkta titanyum malzeme üzerinde darbeli operasyon ile yüzey üzerinde oluşturulan eliptik geometrileri gösteren optik mikroskop fotoğrafları verilmiştir. Bu geometriler yeni nesil dental implant yüzeylerine yönelik akıllı şekil değiştirme aktüatörleri mikro-imalatı araştırması kapsamında elde edilmiştir [22, 24].



Şekil 6. Telesis Fiber lazeri tarafından oluşturulan yüzeyin optik mikroskop görüntüsü a)250X b)400X [22, 24]

Özellikle son on yıldır aktif bir araştırma konusu olan ve bu zaman diliminde geliştirilen nanosaniyenin altında da çalıştırılabilen mikroçip lazerleri gelecek vadede yüksek güvenilirliğe sahip uygun maliyetli cihazlardır. Uyarılmış Brillouin saçılması ve kendiliğinden faz modülasyonu gibi doğrusal olmayan etkilerin yükseltme prosesine zarar vermeyecek kadar düşük olduğu nanosaniye darbe süresi kullanımı önemlidir. Endüstriyel açıdan nanosaniye-altı darbe süreli lazerler ultrakısa darbe süreli lazerlere göre çok daha ucuzdurlar. Pasif Q-anahtarlama mikroçip teknolojisi bazit yükseltici mimarisi ile ömür ve imal edilebilirlik açısından edüstrinin ihtiyacı olan multiwatt güç seviyelerini rahatlıkla sağlayabilmektedir. Milimetre altı hassas kesim ve bir santimetre kalınlığındaki paslanmaz çelik levhaların kesim işlemleri ve metal yüzeylerin gravürlenmesine kadar bir çok imalat uygulamasında 140 kHz'e varan darbe tekrar frekansları ile rahatlıkla kullanılabilirler. Ultraviyole yükseltmeli pasif Q-anahtarlama lazerler elektronikte şeffaf malzemelerin işleme uygulamalarında ve yarı-iletken imalatında kullanılmaktadır [25].

Ayrıca yeni jenerasyon Q-anahtarlama diyot pompalamalı Nd:YAG lazerleri değişken darbe süresi opsiyonları ile çeşitli lazer materyal işleme uygulamalarında kullanılabilmektedirler [26].

## 5. SONUÇLAR

Yarım asır önce ilk bulguları yayınlanan Q-anahtarlama teknolojisi günümüzde lazerle mikro-imalat uygulamalarına yönelik olarak endüstride halen önemini koruyan faydalı bir teknolojidir. Geçtiğimiz haftalarda düzenlenen Gelişmiş Katıhal Lazerleri Kongresinde, q-anahtarlama teknolojisi ile 2500 Watt'lık tepe gücünü 10 kHz darbe frekansında üretebilen tulum-katkılı fiber lazer sistemi rapor edilmiştir [27]. Yüksek verimli Nd:YAG/Cr+4:YAG konveks-konkav rezonatör sistemleri ile q-anahtarlama operasyonda 30 milijöüllük

lazer darbe enerjisi sağlayabilen sistemler sunulmuştur [28]. Ancak nanosaniye-milisaneye aralığındaki darbe süreleri ile gerçekleştirilen Q-anahtarlamalı mikro-imalat işlemlerinde yüksek ısı iletimden kaynaklanan minimum üretilebilir yapı boyutu sınırlıdır. Halen tüm etkileri tam olarak açıklanamamış plazma korumasına bağlı ışınım kayıplarında üretim prosesini zorlaştırmaktadır. Bu durum femtosaniye-pikosaniye aralığında darbe üretebilen mod kilitlemeli sistemlerle önlenilse de bu sistemlerin altyapı maliyetleri oldukça yüksektir. Bu alanda pasif mod-kilitlemeli Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr:YAG lazerlerinde zamanın aktif kontrolüyle darbe dalgalanmalarının azaltılması üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [29]. 16 miliwattlık bir çıkış gücü ile 639.5 nanometrelik dalga boyunda 50 pikosaniyelik darbe süreleri sağlayan mod kilitlemeli praseodimiyum lazeri geliştirilmiştir [30]. Son önemli gelişmeler ise karbon nanotüp kullanımıyla mod kilitlemeli operasyonda ultrakısa darbe üretimi üzerine yapılmıştır [31]. Gelecekte mikro-imalat uygulamalarına yönelik olarak güvenilir ve stabil darbe sağlayan düşük maliyetli yeni rezonatör sistemlerine ve malzemeye göre hassas ayar yapabilen gelişmiş bilgisayar arayüz programlarına büyük gereksinim vardır. Bu sayede gelecekte insan yaşamını kolaylaştırabilecek mikro cihaz ve ekipmaların tıp, elektronik, makina ve diğer endüstrilere yönelik olarak mikro-imalatı mümkün olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde sağladıkları altyapı desteğinden dolayı METROSAN Şti., METEOR Medikal A.Ş., LAZER METAL Ltd. Şti., İKON Makina Şti.'ne teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- [1] Bertoletti M., Storia del Laser, Bollati Boringhieri Editore Torino, *Institute of Physics Publishing*, Bristol and Philadelphia, 2005.
- [2] Wang Y., Xu C.Q., "Actively Q-switched fiber lasers: Switching dynamics and nonlinear processes", *Progress in Quantum Electronics*, Elsevier, 31, s:131-216, 2007.
- [3] Weber H., Herziger G., Poprawe R., Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series / Editor in Chief: W. Martienssen, Laser Physics and Applications Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Volume 1, *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
- [4] McClung F.J., Hellwarth R.W., Giant optical pulsations from ruby, *J. Appl. Phys.*, 33, (3), 828, 1962.
- [5] Chiao R. Y., Townes C. H., Stoicheff B. P., Stimulated Brillouin Scattering and Coherent Generation of Intense Hypersonic Waves, *Phys. Rev. Lett.* 12, 592, 1964.
- [6] Boyd R.W., Nonlinear Optics: Past Successes and Future Challenges, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO: 2012), in San Jose, California, 2012.
- [7] Mears J.R., Reekie L., Poole S.B., Payne D.N., Low threshold tunable CW and Q-switched fibre laser operating at 1.55  $\mu\text{m}$ , *Electronic Letters*, 22, ss:159-160, 1986.
- [8] Morkel P.R., Jedrzejewski K.P., Taylor E.R., Payne D.N., Short-Pulse, High-Power Q-Switched Fiber Laser, *IEEE Photonics Technology*, Vol.4., No:6, 1992.
- [9] Myslinski P., Chrostowski J., Koningstein J.A., Simpson J.R., High Power Q-Switched Erbium Doped Fiber Laser, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.28, ss:371-377, 1992.
- [10] Hideur A., Chartier T., Brunel M., Salhi M., Özkul C., Sanchez F., "Mode-locked, Q-switch and CW operation of an Yb-doped Double-clad Fiber Ring Laser, Optics Communications, *Elsevier*, 198, ss:141-146, 2001.
- [11] Hitz B., Ewing J.J., Hecht J., Introduction to Laser Technology, third edition, *IEEE Press*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York, 2001.
- [12] Ion J.C., Laser Processing of Engineering Materials (Principles, Procedure and Industrial Application), Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [13] Kannatey-Asibu E., Principle of Laser Materials Processing, *Wiley Press*, 2009.
- [14] Paschotta R., Q-switched Lasers, Encyclopedia of Laser, Physics and Technology, [http://www.rp-photonics.com/q\\_switched\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/q_switched_lasers.html).
- [15] Paschotta R., "High Power Fiber Lasers and Amplifiers, Encyclopedia of Laser, Physics and Technology", [http://www.rpphotonics.com/q\\_switching.html](http://www.rpphotonics.com/q_switching.html).
- [16] Arrigoni M., Bengtsson M., and Schulze M., Solid-state lasers: Laser pulsing: The nuts and bolts of switching and modelocking, Laser Focus World. <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-06/features/laser-pulsing-the-nuts-and-bolts-of-q-switching-and-modelocking.html>
- [17] Stollhof J., Laser Based Manufacturing in Micro-Processing and Energy, Trumpf, [http://www.seas.virginia.edu/research/lam/pdfs/speaker%20presentations/Juergen20101109\\_Laser\\_application\\_energy\\_industry.pdf](http://www.seas.virginia.edu/research/lam/pdfs/speaker%20presentations/Juergen20101109_Laser_application_energy_industry.pdf)
- [18] Ready J.F. and Farson D.F., LIA Handbook of Laser Material Processing, Laser Institute of America, *Magnolia publishing*, Inc., 740 s., 2001.

- [19] Dahotre N., Harimkar S.P., Laser Fabrication and Machining of Materials, *Springer*, 2008.
- [20] Cheng X.P., Shum P., Tang M., Wu R., “Numerical Analysis and Characterisation of Fiber Bragg grating-based Q switched Ytterbium-doped Double-clad Fiber Lasers, Optics and Lasers in Engineering, *Elsevier*, 47, ss:148-155, 2009.
- [21] Paschotta R., “Fiber Lasers, Encyclopedia of Laser Physics and Technology”, [http://www.rp-photonics.com/fiber\\_lasers\\_versus\\_bulk\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/fiber_lasers_versus_bulk_lasers.html).
- [22] Çelen S., “Lazer Yüzey Yapılandırılması ile Oluşturulan İmplant Yüzeylerinin Mekanik Morfolojik Karakteristikleri”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011.
- [23] Çelen S., Efeoğlu C., Özden H., Pulsed Laser-Induced Micro-Pits: As Bone Stabilizers, *Physics Procedia*, Volume 12, Part B, s 245–251, 2011.
- [24] Çelen S., Ozden H. , Laser-induced novel patterns: As smart strain actuators for new-age dental implant surfaces, Applied Surface Science, *Elsevier*, Vol. 263, 579-585, 2012.
- [25] Thibault F., Passively Q-switched Microchip Lasers Enable Ultrashort Pulses, Internet.
- [26] Wiechmann W., Eyres L., Morehead J., Gregg J., Richard D., Grossmann W., Variable Pulse Duration Laser for Material Processing, [Proceedings of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing], *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol.2, No.1, s:64-68, 2007.
- [27] Gutty F., Grisard A., Joly A., Larat C., Papillon-Ruggeri D., Lallier E., kW-level tunable Q-switched thulium-doped fiber system, Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 Kasım 2014.
- [28] Huang Y.P., Huang Y.J., Chen Y.F., Efficient high-energy passively Q-switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG laser with a convex-concave resonator, Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 Kasım 2014.
- [29] Kausas A., Taira T., Timing jitter control by scanning coupled cavity in passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr:YAG laser, Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 Kasım 2014.
- [30] Maxim S. Gaponenko M.S., Metz P.W., Härkönen A., Heuer A., Leinonen T., Guina M., Südmeyer T., Huber G., Kränkel C., 50-ps Passively Mode-Locked Red Praseodymium Laser, Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 Kasım 2014.
- [31] Nishizawa N., Sakakibara Y., Kataura H., Carbon-Nanotube Mode-Locked Fiber Lasers and Their Applications to OCT, Advanced Solid State Lasers (ASSL) Congress, 16-21 Kasım 2014.