TÜBİTAK

Malzeme İşleme Amaçlı Küme Modlu Fiber Lazer Sistemi Geliştirilmesi Ve Kullanımı

Program Kodu: 1001

Proje No: 112T980

Proje Yürütücüsü:

Dr. Hamit Kalaycıoğlu

Araştırmacı:

Doç. Dr. F. Ömer İlday

Danışman:

Raşit Turan

TÜBİTAK

İçindekiler

1. ŞEKİL LİSTESİ 3

2. ÖNSÖZ 5

3. ÖZET 5

4. GİRİŞ 6

5. LİTERATÜR ÖZETİ 7

6. GEREÇ VE YÖNTEM 10
6.1 Küme-Modlu Lazer Sisteminin Özeti 10
6.2 Küme-Modlu Lazer Sisteminin Geliştirilmesi 11
6.2.1 Küme Enerjisinin Yükseltilmesi Yönündeki Çalışmalar 11
6.2.2 Yüksek Enerjili Atımların Zaman Boyutunda Sıkıştırılması 17
6.2.3 Küme İçi Atım Tekrar Frekansının 3.5 GHz'e Çıkartılması 20
6.3 Küme-Modlu Lazer Sistemi ile Malzeme İşleme Çalışmaları 21
6.3.1 Malzeme İşleme Deneyleri 21
6.3.2 Lazer ile Malzeme Etkileşimi Konusunda Teorik Çalışmalar 22
5.3.2.1 Oyuncak Model 22
5.3.2.2 Tek ve Çift Sıcaklık Modellerine Göre Simülasyonlar 23

7. BULGULAR VE TARTIŞMA 25
7.1 Lazer Sisteminin Geliştirilmesi 25
7.1.1 Küme Enerjisinin Sınırları 25
7.1.2 Atımları Zaman Boyutunda Sıkıştırma Sonuçları 27
7.2 Malzeme İşleme Sonuçları ve Ablasyon Soğutmalı Rejimin Keşfi 30
7.2.1 Oyuncak Modelin Öngörüleri 31
7.2.2 Ablasyon Soğutmalı Malzeme Kaldırma Etkisinin Direkt Kanıtlanması 31
7.2.3 Simülasyon Sonuçları 33
7.2.4 Bakır ve Silikon Örnekleri Üzerinde Deneyler 34
7.2.5 Ablasyon Soğutmalı Malzeme İşleme Deneyleri Sonuçları - Diğer 36
7.3 Sonuç 36

8. PROJE ÇIKTILARI 36
8.1 Makaleler 37
8.2 Konferans Bildirileri 37

9. EKLER 37

10. KAYNAKLAR 38

1. ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Yüksek tekrar frekanslı atımları içeren kümelerden oluşan küme modlu sinyalin zamansal görünümü. 7
Şekil 2. Sistemin genelini gösteren işlevsel şema 10
Şekil 3. ASE'nin zamansal yapısı, kullanılan pompa darbesi 65 µs uzunluğundadır, sinyal 1000. mikrosaniyede gelmektedir, çünkü küme tekrar frekansı 1 kHz'dir. 13
Şekil 4. Sistemin güçlendirilmiş halinin şeması. 14
Şekil 5. Güç yükseltecinin (a) birinci kademesinin çıkışında (b) ikinci kademesinin çıkışında (c) son kademesinin çıkışında, pompa enerjisine göre ölçülmüş yükseltilmiş net sinyal enerjisi (yukarı yönlü üçgenler), ASE (aşağı yönlü üçgenler), toplam çıkış enerjisi (daireler). Güç yükseltecinin her kademesi için (d) çıktı içerisindeki ASE oranı (e) pompanın net sinyale çevrim oranı. (d) ve (e)'de ikinci kademenin çıktısı, kümülatif yükseltmeyi belirtmek amacı ile "Kademe 1&2" olarak tanımlanmıştır. (f) Sistemden 1.7 mJ enerjili 40 µs uzunluğunda pompa darbesi ile 400 µJ net yükseltilmiş sinyal enerjisi ve %20 ASE/Sinyal elde edildiği durumda ASE oluşumunun zamansal karakterizasyonu. ASE oluşumu (aşağı yönlü üçgenler) üzerine $I(t)=0.017 \times e^{(t-989)/2.43}$ formülü ile üstel eğri (kırmızı kesik tireler) uydurulmuştur. Pompa darbesi ve 1 ms noktasında fibere giren sinyal atımının da ölçüm sonuçları gösterilmektedir. 17
Şekil 6. (a) CFBG'li sistem için 20 µJ enerjili atımların 1800 çizgi/mm kırınım ağları ile sıkıştırılmasının simüle edilmiş sonuçları ve (b) 0.5^{o} sapma ile sıkıştırılmasının simüle edilmiş sonuçları 19
Şekil 7. (Sol taraf) Atım sıkıştırıcı sonrası Uzaysal Işın Modülatörü (SLM) yerleştirilerek sıkıştırılmış atımların iyileştirilmesine yönelik düzenek. G: Kırınım Ağı (grating), M: Ayna (mirror), DM: D-yapılı ayna (D-shaped mirror), CL: Silindirik ayna. (Sağ taraf) Sıkıştırılmış atımları SLM ile iyileştirme çabalarını gösteren otokorelasyon ölçümleri: SLM öncesi sıkıştırıcı çıkışı (mavi eğri), SLM çıkışı (kırmızı kesik çizgili eğri). 19
Şekil 8. (a) Küme içi atım tekrar frekansı 3.5 GHz'e çıkarılan lazer-yükselteç sisteminin şeması, (b) fiber atım tekrar frekansı yükselticisinin şeması. 21
Şekil 9. Küme-modlu lazer-yükselteç sistemi ve galvo tarayıcıdan oluşan malzeme işleme düzeneği. 22
Şekil 10. CFBG'li sistemde (a) salıngaç çıkışıda CFBG ile 2.3 ns'ye genişletilmiş atım, (b) 25 µJ'luk atımların sıkıştırma sonrasında otokorelasyön ölçümü sonuçları 28
Şekil 11. (a) 40 µJ'luk atımların sıkıştırma sonrası ölçülmüş (kesintisiz eğri) ve Picasso algoritması ile yeniden oluşturulan otokorelasyon. (b) 40 µJ'luk atımlar için simülasyonla elde edilmiş sıkıştırma sonucu. Üst sağ köşede bu atım enerji değerindeki dalgaboyu tayfı bulunmakta. (c) 40 µJ atım enerjisi içeren lazer çıkışının dalgaboyu tayfı. (d) Picasso algoritması ile 40 µJ'lük atımın ölçülmüş otokorelasyon ve dalgaboyu tayfı kullanılarak oluşturulmuş zamansal formu. 29
Şekil 12. Sıkıştırılmış atımları SLM ile iyileştirme çabalarını gösteren otokorelasyon ölçümleri: SLM öncesi sıkıştırıcı çıkışı (mavi eğri), SLM çıkışı (kırmızı kesik çizgili eğri). 30
Şekil 13. Ablasyon soğutmalı lazer ile malzeme kaldırmanın temel prensipleri. (a) Sırası ile, düşük (geleneksel rejim) ve yüksek (ablasyon-soğutmalı rejim) atım tekrar frekanslarında malzeme buharlaştırma (ablasyon) sürecinin temsili görüntüleri. Sıcaklık profilleri (i) $\boldsymbol{t = \tau 1}$ için, ilk atımın malzemeye

varışından hemen sonrası için; (ii) $\boldsymbol{t = \tau 2}$ için, yüksek tekrar frekansı (düşük tekrar frekansı) için son varan (ikinci) atımdan hemen sonrası (öncesi); which is shortly after (before) the arrival of the last (second) pulse for the high-repetition-rate; (iii) $\boldsymbol{t = \tau 3}$ için, düşük tekrar frekanslı lazer için son gelen atımdan hemen sonrası. Hedef malzemenin renkleri, (b)'de gösterilen hesaplama sonuçları (renk çubuğu ve $\boldsymbol{\tau 1}$, $\boldsymbol{\tau 1}$, and $\boldsymbol{\tau 3}$ zaman aralıkları) baz alınarak belirlenmiştir. (b) 10 MHz (mavi çizgiler) ve 1,600 MHz (siyah çizgiler) atım tekrar frekansları için oyuncak model kullanılarak hesaplanmış yüzey (kesintisiz çizgi) ve yüzey altı (optic penetrasyon derinliğinin 30 katı) sıcaklık değişimi. Atım enerjileri ve atım sayısı her iki durumda aynıdır. Görüldüğü gibi yüksek tekrar frekans ı yüzey altındakayda değer oranda daha düşük ısınmaya yol açmaktadır. (c) (b)'deki gölgeli alanine genişletilmiş görüntüsü. (d) 100 MHz (yeşil çizgiler), 400 MHz (mavi çizgiler) ve 1,600 MHz (kırmızı çizgiler) için hesaplanmış yüzey sıcaklığı değişimi (kesintili çizgiler) ve buharlaştırılan malzeme miktarları (kesintisiz çizgiler). Atım enerjisi ve tekrar frekansının çarpımı değişmediği durumda buharlaştırma hızının yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir. Sıcaklık eğrilerindeki çıkıntılar atımların varışına denk gelmektedir. (e) Ablasyon soğutma olgusunun dolaysız olarak teyit edilmesi için kurulmuş deneysel düzenek. (f) Termoelektrik Levha (Modül) 1 (hedef malzeme, kesintisiz çizgiler) ve Termoelektrik Levha (Modül) 2 (hedef malzemenin yukarısında kaldırılan partiküllerin bir kısmının yapışması için konuşlandırılan levha, kesintili çizgiler) üzerinde, lazeri ablasyon soğutmalı (siyah çizgiler) ve geleneksel (kırmızı çizgiler) rejimde çalışan lazer ışını ile uyarılmış sıcaklık artışının ölçüm sonuçları. 32

Şekil 14. (a) Tek-sıcaklık ve (B) çift-sıcaklık modeline göre yapılmış Nikel üzerinde ablasyon soğutma etkilerini gösteren simülasyon sonuçları. 34

Şekil 15. Yükselen atım tekrar frekansı ile atım enerjisinin düşürülmesi. Farklı küme-içi atım tekrar frekanslarında, toplam isabet eden enerji ve ışın akışı (fluence) göre, tek bir atım kümesi ile buharlaştırılan (a) Cu (bakır) and (b) Si (silikon) hacimleri. Oyuncak modelimizin ablasyon soğutmalı rejim içerisindeki en düşük ve yüksek tekrar frekansları için öngörüleri de (kesintisiz çizgiler) gösterilmiştir. Farklı tekrar frekanslarında, isabet eden foton başına buharlaştırılan (c) Cu ve (d) Si atomu sayıları cinsinden ablasyon veriminin atım enerjisi ve atım akışına göre değişimi. Verilerin alt ve üst sınırları, sırası ile, ablasyon eşiği ve mevcut olan lazer enerjisinin üst sınırına tekabül etmektedir. Tüm grafiklerde, herbir very noktası için örnek büyüklüğü 20 olup, merkez ortalama değere ve hata çubukları da standart sapmya eşittir. Renkli data noktaları, atım enerjisinin tekrar frekansına (108 MHz üstü) ters orantılı düşüşünü vurgulamaktadır. 36

2. ÖNSÖZ

İçerisinde yüksek enerjiye sahip ultrahızlı (pikosaniye ve altı genişliğinde) atımları yüksek tekrar sıklığında barındıran ve kendileri nispeten düşük frekansta tekrarlanan kümelerden oluşan lazer ışını üreten tümleşik fiber yapıda küme-modlu lazer-yükselteç sistemi geliştirilerek malzeme işleme alanında uygulanmasını içeren 112T980 No'lu projemiz, 1001 programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

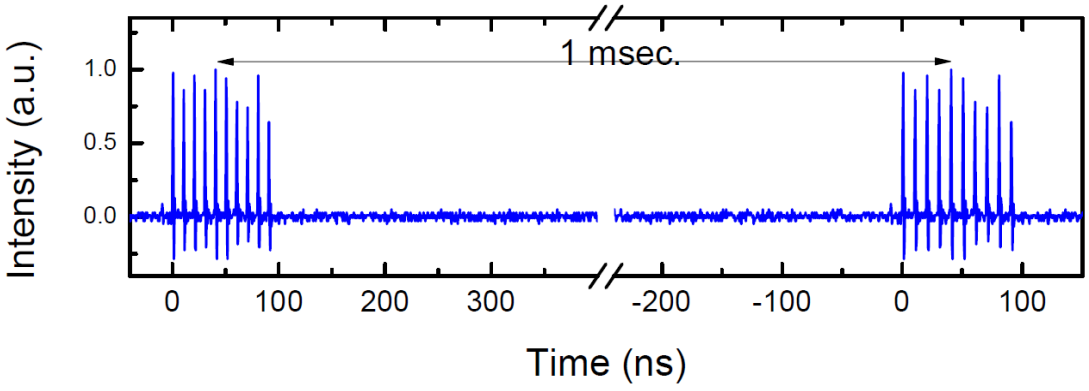
3. ÖZET

Gurubumuz tarafından dünyada ilk kez geliştirilen küme-modlu fiber lazer teknolojisini, bu proje kapsamında yapılan çalışmalar ile küme içi tekrar frekansı 3.5 GHz ve 250 ns genişliğinde atım kümelerini 700 mikrojül düzeyinde üretebilen ve 40 mikrojül atımları 500 fs düzeyine sıkıştırabilen seviyelere ilerlettik. Geliştirdiğimiz küme-modlu lazer-yükselteç sistemi ile kapsamlı malzeme deneyleri yaparak ablasyon soğutmalı lazerle malzeme kaldırma (ablation-cooled material removal) fikrini keşfettik. Ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma kavramı, yüksek tekrar frekanslı (malzemeye göre değişmekle birlikte 10 MHz mertebelerinden GHz'ler mertebeleri) ultra kısa lazer atımları ile malzemeye aktarılan enerjinin yayılmasına fırsat verilmeden ve tatbik alanının çevresinde asgari düzeyde hasar oluşturarak, atımların kümülatif etkisi sonucu, yüksek verimlilikte malzeme buharlaştırılması olarak özetlenebilir. Lazer ile malzeme işlemede çığır açıcı nitelikte olan bu fikrin ispatını başta metaller olmak üzere, dokuz farklı malzeme üzerinde yaptığımız deneyler ile ispat ettik. Sonuçlar, bu rejimde ultrakısa atımlar ile malzeme kaldırma için gerekli atım enerjisinin bakır ve silikonda 1000 kat kadar düşerken, verimliliğin 10 kat kadar arttığını, fare beyin dokusu ve diş minesinde ise 10 kat verimlilik artışı elde edilebileceğini göstermektedir. Sonuçları içeren makalemiz "Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses" "Nature" dergisi tarafından kabul edilmiştir ve yayınlanma aşamasındadır [1]. Ayrıca, düşük ortalama güç ve küme tekrar frekanslı, darbeli pompalamalı, küme-modlu sistemlerde [2] ve yüksek ortalama güç ve küme tekrar frekansına sahip sürekli pompalamalı küme-modlu sistemlerde [3] yükseltilmiş kendinden ışıma (ASE) oluşumu ve ulaşılabilecek atım enerjisi sınırlarını araştıran, ve küme içi atım tekrar frekansı 3.5 GHz olan, 15 ns uzunluğunda 50 atım içerebilen 200 mikrojül enerjiye sahip 1 kHz'de tekrarlanan kümeler üretebilen sistemi raporlayan [4] makalelerimiz yayınlandı.

4. GİRİŞ

Minyatürize aygıtların üretilmesinde, çeşitli malzemelerin çok hassas işlenmesinde, mikron ve nanometrik ebatlarda yapıların direkt lazer yazımı veya lazer ile kendiliğinden büyüme tekniklerini birlikte kullanarak oluşturulmasında ve yüksek kaliteli yüzey yapılandırılmasında ve atımlı çökertme ile çok yüksek kaliteli ince filmlerin üretilmesinde ultrahızlı lazerlerin kullanımına hızla büyüyen bir ilgi vardır. 10 pikosaniyeden kısa atımların kullanılması durumunda termal-olmayan rejim olarak bilinen farklı bir mekanizma ile malzemenin işlendiği ve geleneksel lazer işleme teknikleriyle elde edilemeyen hassasiyet ve düzenlilik elde edildiği iyi bilinmektedir. Ancak ultrahızlı lazer ile malzeme işlemenin potansiyeli, bu teknik ile elde edilen malzeme kaldırma (ablasyon-buharlaştırma) hızlarının düşük olması ve gerekli lazer sistemlerinin karmaşıklığı yüzünden sınırlanmaktadır. Bu tekniklerin temel araştırma laboratuvarlarının dışında, endüstride geniş kullanıma kavuşması için ilk ve mecburi adım ise kullanımı basit, çalışması kararlı, düşük maliyetli ve en az mikrojul enerjili atımlar üreten ultrahızlı lazerlerin geliştirilmesidir. Diğer önemli ihtiyaç, malzeme işleme hızlarının arttırılarak, nanosaniye lazerlerle elde edilen hızlara yaklaşılmasıdır.

Bu açıdan heyecanlandırıcı bir fırsat lazerin küme modunda çalıştırılmasıdır, ki buna göre lazer az sayıda, yüksek enerjili atımları çok dar (odak noktasında oluşan ultrayüksek sıcaklığın etrafa difüzyonuna fırsat tanımayacak kadar kısa) bir zaman aralığında üretmekte, bunu da (ortalama gücü makul derecede düşük tutacak kadar) düşük bir frekansla tekrarlamaktadır (Şekil 1). Teorik çalışmalar ve katı hal lazerlerle yapılan bazı deneyler işaret etmektedir ki, küme modu aynı enerjili, süreli ve güçlü atımlara göre daha hızlı yıkımlama sağlamaktadır. Biz 2010 yılında, dünyada ilk kez, 400 fs uzunluğa sıkıştırılabilen, aralarında 10 ns bulunan 20 μJ enerjili atımlar içeren kümeleri 1 kHz tekrar frekansında üretebilen yüksek enerjili küme modunda çalışan bir fiber lazer geliştirdik [5]. Yaptığımız ilk malzeme deneyleri, küme modunun beklentilere uygun olarak çok daha etkin malzeme işlemeyi sağladığını doğrulamakta idi.



Şekil 1. Yüksek tekrar frekanslı atımları içeren kümelerden oluşan küme modlu sinyalin zamansal görünümü.

Bu projenin hedefi, dünyada ilk kez geliştirmiş olduğumuz ultrahızlı küme-modlu fiber lazer teknolojisini, teknik açıdan atım ve küme enerjisi seviyelerini yükselterek ve atım genişliklerini pikosaniye altında tutarak daha da geliştirmek ve malzeme işleme uygulamalarında deneysel olarak optimize ederek, yüksek tekrar frekanslı atımların ultrahızlı malzeme işleme açısından taşıdığına inandığımız devrimsel potansiyelini ortaya çıkarmak idi. Proje kapsamında yapılan çalışmaları iki ana koldan yürüttük. Birincisi, sistemin teknik olarak geliştirilerek koyulan atım ve küme enerjisi hedeflerine yönelik yapılan iyileştirmeler ve denemeler, ikincisi ise malzeme işlemede öngörebildiğimiz potansiyeli ortaya çıkarmaya yönelik yapılan deneylerdir. Raporun bundan sonraki bölümlerinde, sırası ile, konuya altyapı oluşturucak bir literaür özeti verildikten sonra, sistem geliştirmeye yönelik çalışmalar ve malzeme işleme deneyleri ele alınacak, gereç ve yöntem ile bulgular ve tartışma bölümlerinnde her iki konu ayrı ayrı işlenecektir.

5. LİTERATÜR ÖZETİ

Ultrahızlı fiber lazer teknolojisi, pratiklik, maliyet verim ilişkisi, güç seviyeleri ve yüksek kaliteli ışın üretme seviyeleri açısından doygunluğa ulaşmakta olan bir teknoloji sayılabilir [6-9]. Bu lazerlerin, araştırma laboratuarları dışındaki uygulamaları içerisinde malzeme [10] ve doku [11] işleme en önemlilerinden ikisini oluşturmaktadır. Burada iki adet sınırlama bu lazerlerin yaygınlaşması önünde engel teşkil etmektedir; sınırlı malzeme kaldırma hızları ve ihtiyaç duyulan onlar ila yüzlerce mikrojül mertebesinde atım enerjisi seviyeleri. Bu enerji seviyeleri, fiber lazer teknolojisi açısından ciddi karmaşık sistemleri gerektirmektedir. Diğer yandan, Marjoribanks ve arkadaşları 1999 yılında, nispeten düşük tekrar frekansında tekrarlanan ve içerisinde yüksek yüksek sıklıkta atımlar bulunduran kümelerden oluşan küme-modlu lazer ışını ile malzeme işlemenin etkin bir yöntem olduğunu gösterdiler [12]. Bu yöntem, makul ortalama lazer güçlerinde, küme içerisinde yüksek enerjili atımların yüksek tekrar frekansında bulunabilmesine izin veriyordu.

Küme-modlu lazer sistemleri uzun süredir literatürde bulunmakla birlikte, bunlar katı-hal tabanlı ve nanosaniye ve pikosaniye atımlı sistemler idi. Bu sistemlerin başlıca örnekleri W. Lempert'in liderliğinde yapılan çalışmalarda geliştirilmiş ve uygulamalarda kullanılmış olan Nd:YAG lazer-yükselteç sistemleri idi [13-15]. Bunlar 9 Hz ila 50 kHz küme tekrar frekanslı, 10 ila 400 milijül atım enerjisi ve küme içerisinde 1 ila 99 adet mikrosaniye mertebelerinde

genişliği olan atımlar üreten sistemler idi. Bu sistemler, aeronotik alanında gaz akımlarının görüntülenmesi, yanma ve infilak gibi olayların teşhis edilmesini kapsayan niş çalışmalarda kullanılmıştır [15-21]. Bu çalışmalarda görüntülemedeki zamansal ve uzaysal çözünürlüğün arttırılabilmesi için daha yüksek enerjili ve küme içerisinde daha sık aralıklı atımlara ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Bu sistemler katıhal bazlı karmaşık yapıya sahip olmaları itibariyle bizim geliştirdiğimiz tümleşik fiber sisteme göre oldukça farklıdırlar.

Hedeflenen sıklıkta ve enerjideki atımları, düşük frekansta tekrarlanan kümeler içinde sağlayan, küme-modlu lazer teknolojisini tümleşik fiber yapıda dünyada ilk kez biz geliştirdik [5]. Bunu müteakiben, sırası ile, bu teknolojiyi FPGA tabanlı elektronik kontrol sistemi ile ilerleterek yüksek düzeyde homojen atım enerjisi dağılımına sahip kümeler üreten düzeye getirdik [22], yüksek güç uygulamalarına yönelik olarak küme tekrar frekansı 1 MHz ve ortalama gücü 100 W olan sistem geliştirdik [23]. Bunun yanında, Limpert ve gurubu da çubuk tipi fiber (rod-type) lazer ile küme modunda yüksek enerjili sistem ile 50 mJ üstü küme enerjisine ulaştı [24]. Bu proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda, düşük ortalama güç ve küme tekrar frekanslı darbeli pompalamalı küme-modlu sistemlerde [2] ve yüksek ortalama güç ve küme tekrar frekansına sahip sürekli pompalamalı küme-modlu sistemlerde [3], yükseltilmiş kendinden ışıma (ASE) oluşumunu ve ulaşılabilecek atım enerjisinin sınırlarını araştırdık.

Küme-modlu lazerler ile malzeme işleme uygulamaları açısından literatüre bakıldığında, öncelikle, R. Marjoribanks'ın grubu tarafından yürütülen aliminyum birleşmiş silis (fused silica) ve KDP kristalleri üzerinde delik delme ve lazer tahribatlarının onarımı çalışmaları görülmektedir [12, 25-27]. Bu deneylerde, kaynak olarak 133 MHz tekrar frekansında lamba pompalı Nd:cam lazeri içeren pikosaniye ve üstü genişliğinde atımlar üreten katıhal-lazer yükselteç sistemi kullanılmıştır. Bu çalışmalarda incelenen ana husus küme sayısının ve kümeler içindeki atımların sayısının malzeme işlemedeki etkileridir. Bir de direkt olarak malzeme işleme çalışması olmamakla birlikte, M. Murakami ve ekibi 1 MHz tekrar frekansında, 0.4 mikrojül atım enerjisi üreten küme-modlu fiber lazer yükselteç sistemi ile atımlı lazer ince film büyütme çalışması yaparak, küme-modunun bu tür bir işlemde daha yüksek kontrol sağladığını belirtmiştir [28]. Malzeme işlemede küme modunun avantajlarının en iyi tartışıldığı çalışmalar olarak [29, 30] dikkati çekmektedir. Bunlardan [29] ağırlıklı olarak teorik bir çalışma olmakla birlikte pikosaniye deneylerle desteklenmiş olan bu çalışmada uygun şartlar altında küme modunda bir lazerin, aynı lazerin normal modda, eş aralıklı atımlar üretmesine kıyasla 5 kat daha hızlı malzeme işleme sonuçları verebildiğini göstermektedir. Diğer çalışma [30] ise tümüyle deneysel olup, bir katı hal lazerini kullanarak,

10 ps uzunluğunda ve 5-10 mikrojüllük atımlar içeren 200 kHz ve 1 MHz tekrar frekansındaki kümeler ile çelik, silisyum, tungsten karbid yüzeylerde yapılan işlemelerde eş aralıklı atımlarla yapılan çalışmalara göre 10 kat işleme hızının arttığı ve kalitenin iyileştiği belirtmektedir. Bu sonuçlar küme modunun malzeme işlemede etkinliği açısından son derece ümitlendiricidir ve her iki çalışma da atım kümesinin yaklaşık olarak eşdeğer enerjili tek bir atıma benzer etkinlikte malzeme işlemeye olanak verdiğine kuvvetle işaret etmektedir, ancak net, deneysel bir doğrulama görünmemektedir. Bu projenin hazırlanması sırasında yürütmekte olduğumuz kendi çalışmalarımız bu beklentileri doğrular gibi gözükmekte idi, ancak net bir sonucun ortaya konulması için sistemin geliştirilerek kapsamlı deneyler yapılmasına gerek vardı.

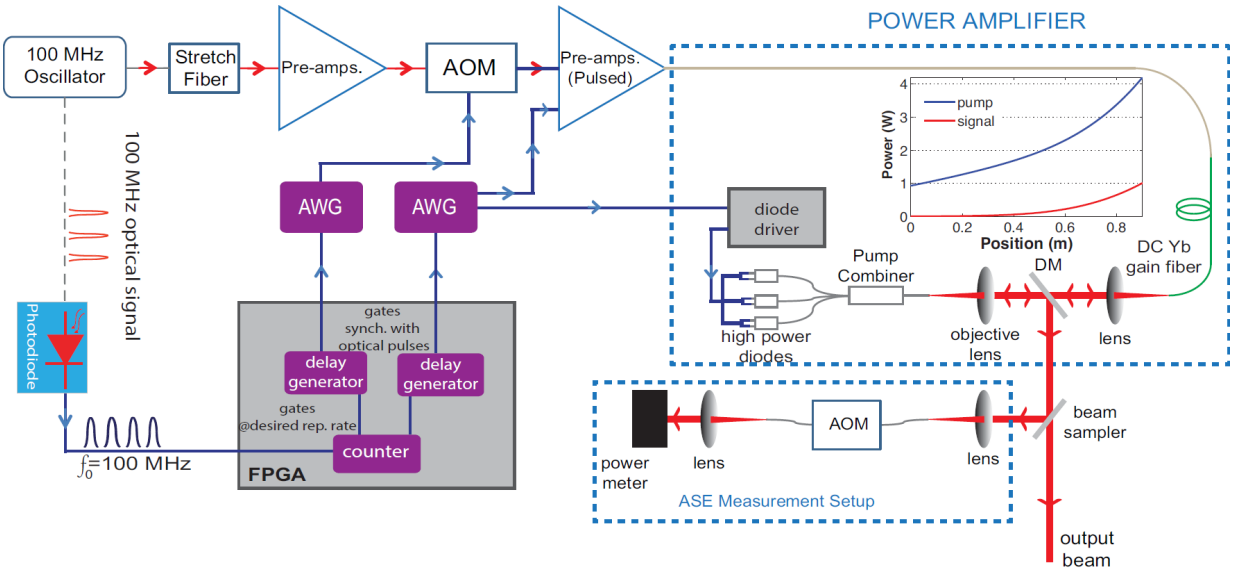
Proje süreci içerisinde yürüttüğümüz malzeme işleme deneylerinde küme içi atım tekrar frekansının yüksek olduğu durumlarda daha etkin ablasyon ve işlenen alan dışında çok düşük termal hasar gözlemledik. Bu da şunu işaret ediyordu: yıkımlanan yani buharlaşan malzeme ısı enerjisini yanında taşıyarak uzaklaştığından, malzemenin ısınmaması için bütün mesele, ısınmış, ancak yıkımlama için gereken kritik sıcaklığa ulaşmamış malzemenin, ısısını malzemenin geri kalanına aktarmasına fırsat vermeden tekrar vurularak buharlaştırılmasıdır. Yani, küme modunun etkili olması için tatmin edilmesi gereken fiziksel koşul, küme içi atımlar arasında geçen sürenin odak noktasında biriken ısı enerjisinin malzeme yığınına (bulk) yayılması ve (transparanlığı yüksek malzemeler için) oluşan plazmanın sönümlenmesi için gereken süreye göre kısa olmasıdır. Bu da gerekli atım tekrar frekansının, malzemenin termal yayılım katsayısına göre değişeceği ve teknolojik açıdan önemli olan metaller, silikon gibi yüksek katsayılı malzemelerde GHz boyutlarına da ulaşabileceğini gösteriyordu. Bu durumda ilk olarak 100 MHz atım tekrar frekanslı kaynak salıngaçı ile inşa ettiğimiz sistemimizde, proje sürecinde atım tekrar frekansını yükseltme ihtiyacı doğdu. Kaynak sinyalin tekrar frekansı GHz üstü olduğu sistemler olarak, literatürde, SESAM-kip kilitli yarıiletken disk lazerleri, dikey-dış-kovuklu yüzey-ışımalı lazerler, bulunmaktadır [31]. Ancak bunlar karmaşık düzenekler olup, tümleşik fiber yapıya uygun teknolojiler değildir. Ultrahızlı fiber salıngaçlarda 1 GHz'e kadar çıkılmıştır [32] ancak, GHz üstü seviyelere ulaşabilmek için Fabry-Perot ve diğer pasif kovuk yöntemleri ile katlama seçenekleri vardır ve bunlar karmaşık çözümlerdir [33, 34]. Bizim ugulamamız için, tümleşik fiber mimariye uygun ve oldukça basit yöntem olarak, kaskat yerleştirilen çiftleyicilerden oluşan frekans yükseltici öne çıkmaktadır [35-37]. Frekans yükselticinin her kademesi, sinyali eşit iki kola ayıran 50/50 çiftleyici ve çiftleyicinin çıkış kolları arasında giriş tekrar frekansının periyodu kadar gecikme sağlayan fiber boyu farkından oluşmaktadır. Bu şekilde, optik sinyal tekrar frekansı, ikinci kademeden başlamak üzere her kademede iki kat artmaktadır. Biz bu

yöntemi uygulayarak, beş kademeli yükseltici ile, küme-modlu Yb-fiber lazer yükselteç sistemimizi küme içi atım tekrar frekansı 3.5 GHz olan, 15 ns uzunluğunda 50 atım içerebilen 200 mikrojül enerjiye sahip 1 kHz'de tekrarlanan kümeler üretebilen seviyeye ulaştırdık [4].

6. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde sırası ile küme modlu lazer sistemimizin tanıtımı, geliştirilmesine yönelik çalışmalar ve malzeme işleme deneyleri ele alınacaktır.

6.1 Küme-Modlu Lazer Sisteminin Özeti



Şekil 2. Sistemin genelini gösteren işlevsel şema

Şekil 2'deki şemanın yardımı ile sistemi kısaca özetlersek, yüksek tekrar frekanslı (100 MHz) kip-kilitli salıngacın ürettiği kaynak sinyalin içerdiği atımlar zamansal boyutta genişletilmekte ve sinyal tekrar frekansı akusto-optik modülatör (AOM) vasıtası ile düşürülmeden önce ön-yükselteç (pre-amplifier) ile güçlendirilmektedir. Güçlendirilen 100 MHz tekrar frekansındaki atımlı sinyal, AOM vasıtası ile 1 kHz'de tekrarlanan kümeler içeren yapıya dönüştürülmekte ve darbeli ön-yükselteçler ve güç yükselteci (power amplifier) silsilesi ile atım başına enerjinin onlarca mikrojül, küme enerjisinin ise yüzlerce mikrojül olduğu seviyelere yükseltilmektedir. AOM sonrasındaki yükselteçlerde senkronize darbeli pompalama sistemi uygulanmaktadır. Bu sistemde, FPGA (Alanda Programlanabilir Mantık Dizileri) tabanlı elektronik sistem vasıtası ile AOM'e uygulanan ve sinyal atım dizisinin tekrar frekansını düşürmekte ve atım kümelerini oluşturmakta kullanılan kapı sinyalinin kaynak salıngaçtan tetiklenmesi, ve pompa darbesinin (atımının) yükselteçlerdeki kazanç fiberlerini uyarması ve hemen akabinde sinyal

atım kümelerinin fibere girerek güçlendirilmesi sağlanmaktadır. Pompa darbesi olabildiğince uzun tutularak kazanç fiberlerine yüklenen enerji ile sinyal atımlarının yüksek enerji seviyelerine çıkartılması hedeflenmektedir. Yüksek tekrar frekansındaki atımları içeren kümelerin daha düşük bir frekansta tekrarlanmasından oluşan küme modu Şekil 1'de gösterilmektedir. Sistemimiz, küme tekrar frekansı ve kümelerin zamansal uzunluğu açısından esnek olup, burada seçilen 1 kHz ortalama gücü düşük tutma amacına hizmet etmektedir. Sistemde üretilen yüksek enerjili lazer ışını kırınım ağı çiftine sokularak, doğrusal olmayan etkileri azaltmak amacı ile genleştirilmiş atımlar sıkıştırılmakta ve pikosaniye altı atım genliği hedeflenmektedir.

6.2 Küme-Modlu Lazer Sisteminin Geliştirilmesi

Küme modlu fiber lazer yükselteç sisteminin geliştirmeye yönelik çalışmalar, elde edilen küme ve atım enerjisinin yükseltilmesine, ve bu atımların zaman boyutunda daha iyi şekilde sıkıştırılmasına yönelik olmak üzere iki ana koldan yürütülmüştür.

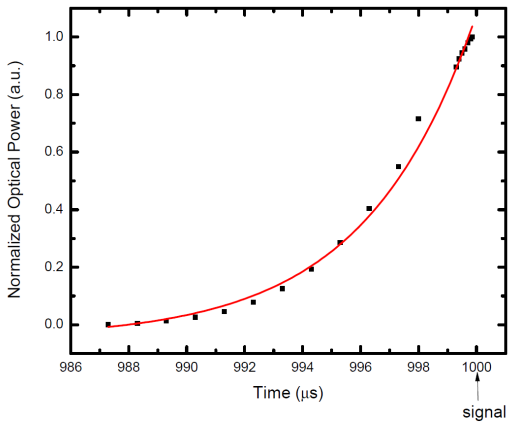
6.2.1 Küme Enerjisinin Yükseltilmesi Yönündeki Çalışmalar

Proje kapsamında yapılan çalışmalarda, öncelikle, düşük küme tekrar frekansının yol açabileceği yükseltilmiş kendiliğinden ışıma (ASE) oluşumunun hassas bir şekilde ölçümü ele alınmıştır, çünkü ASE pompa enerjisinin sinyale dönüşüm verimini azaltmakta ve atım enerjisinin belli seviyelerin üzerine yükseltilmesi konusunda engel teşkil edebilmektedir. Şekil 2'den de görülebileceği gibi, ASE ölçümü AOM aracılığı ile lazer ışınının sadece sinyal içeren kısmını geçiren bir kapı uygulanarak yapılmaktadır. Bu mümkün olmakta çünkü zamansal olarak sinyal ile ASE ayrışmakta ve sinyalin ASE'den ayıklanarak ölçülmesine olanak tanımaktadır. Sistemimizde, ASE ölçümü çeşitli aşamalarda uygulanmıştır ve darbeli yükselteçler silsilesi içerisinde ASE oluşumunu engelleyici çalışmalar yapılmıştır. Çünkü bu silsile içerisinde belli bir aşamada ortaya çıkan ASE daha sonraki yükselteçlerde güçlenerek pompa enerjisinin sinyale dönüşümünü sınırlayıcı etki yapmaktadır. Nitekim yapılan ölçümlerde sistemde 250 nanosaniye (ns) uzunlukta 25 atım içeren kümelerden oluşan ışının yükseltilmesi sürecinde birkaç yüz mikrojül küme enerjisine çıkıldığında ASE oluşma eğilimi tespit edilmiştir. Bu durumda, yapılması gereken iki aşamalı bir iyileştirme süreci ortaya çıkıyor. AOM öncesi sürekli pompalanan kısımda sinyalin gücünü olabildiğince yükseltmek ki, burada sınırlayıcı eleman 1 W sinyal geçiş eşiği olan AOM olmaktadır. AOM sonrasında, düşük tekrar frekanslı darbeli pompalama içeren bölümde ise, yükselteç silsilesinin arttırılarak güçlendirmenin olabildiğince kademeli olması. Burada ise atım enerjisi ile birlikte artan doğrusal olmayan etkilerin göz önünde bulundurulması gerekiyor. Bu kapsamda, AOM

öncesinde bulunan ön-yükselteçlerin sayısı üçe yükseltilerek, AOM'e giren güç 700 mW'tan 1 W eşiğine çıkartılmıştır. AOM sonrasında ise darbeli pompalanan ön-yükselteçlerin sayısı birden üçe çıkartılmıştır. Ayrıca, üç adet darbeli ön-yükselteçin çıkışında küme enerjisi ve oluşan ASE'nin, ön-yükselteçlere uygulanan pompa darbelerine göre değişimi ölçülerek, ASE oluşumunun asgaride tutularak elde edilebilecek küme enerjisi belirlenmiştir. Bu optimizasyon süreci sonucunda, çok düşük ASE oranı (%1-2) ile birlikte, her biri 25 atım içeren 250 ns'lik kümeler için 16 µJ küme enerjisi, yani atım başına 650 nJ enerji elde edilmiştir. Optimum sonucu sağlayan pompa darbelerinin şiddeti diyodların azami tepe gücüne (480 mW) eşit olup, uzunlukları ilk iki ön-yükselteç için 40 µs sonuncusu için ise 110 µs olduğu tespit edilmiştir..

Sistemin darbeli ön-yükselteçlerini takip eden darbeli güç yükselteci kısmında da daha yüksek atım ve dolayısı ile küme enerjisi elde etme hedefine yönelik yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda da sistem 1 kHz'de tekrarlanan 250 ns'lik 25 atım içeren kümeler üreten modda işletilmiştir. İlk olarak geriden pompalanan güç yükseltecindeki pompa diyodu sayısı bir iken üç adede çıkarılmıştır, böylece buradaki pompalama tepe gücü 25 W'tan 75 W'a çıkartılmıştır. Bunun nedeni ASE oluşumu zamana dayalı büyüme gösterdiği için, darbeli pompalamada kullanılan pompa enerjisini daha kısa sürede yükleyip, ASE oluşumuna daha az süre vermektir. Dışarıdan pompalamanın kullanıldığı güç yükseltecinde, üç adet 25 W'lık pompa diyod pompa birleştirici (pump combiner) vasıtası ile birleştirilmiştir. Diğer yandan ön-yükselteç bölümündeki iyileştirme süreci sonrasında elde edilen ve kullanılan optik elemanlar (yalıtıcı, çiftleyici) sonrasında 10 µJ küme enerjisi ve sıfıra yakın ASE ile güç yükseltecine giren sinyal ile yapılan güçlendirme çalışmaları, 200 µJ küme enerjisi sonrasında ASE oluşma eğilimini ortaya koymuştur. Dolayısı ile yükseltme sürecini kademelendirme amacı ile ilk olarak son safhadaki geriden pompalanan güç yükselteci öncesine önden pompalanan bir adet güç yükselteci yerleştirilmiştir. Önden pompalamalı güç yükselteci, bir pompa-sinyal birleştirici fiberoptik eleman vasıtası ile tümleşik fiber yapıya entegre edilmiştir. Pompa kaynağı olarak öncelikle bir adet 25-W diyod kullanılmış, ve bu sayı denemelerde üçe kadar çıkartılmıştır. Yapılan denemelerde, son güç yükseltecine girmeden önce sinyalin küme enerjisinin 200 µJ (200 mW ortalama güç) seviyesine %5 ASE/Sinyal oranı ile çıkartılabildiği, ancak son aşamada ASE oranın geriden pompalamalı güç yükseltecinde hızla arttığı ve küme enerjisinin 350 µJ civarında sınırlandığı tespit edilmiştir. Burada ortaya çıkan olgu, geriden pompalamalı güç yükseltecinde ASE'nin sinyalden daha yüksek oranda güçlendiğidir, bunun ana nedeni de aktif iyonların kendiliğinden ışıması ile oluşan ve güçlenen ASE, zamana yayılan bir yapıdadır ve sinyalden önce gelen pompa darbesi ile

sinyalden önce güçlenme imkanı bulmaktadır. Bu olguyu son güç yükseltecinde oluşan ASE'nin zamansal yapısını AOM vasıtası ile ölçüm yaparak gösterdik (Şekil 3).

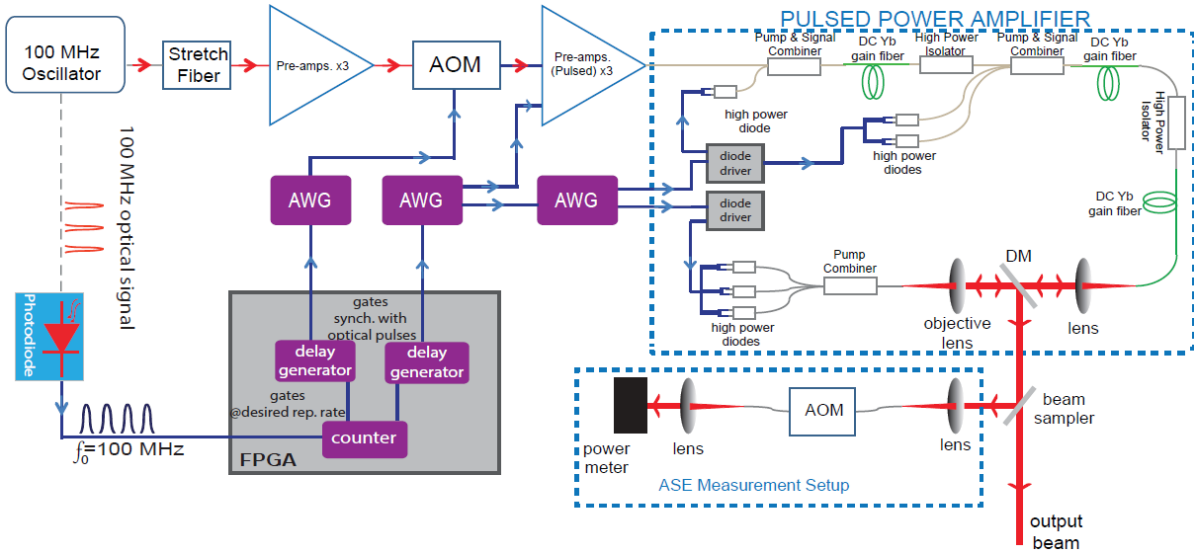


Şekil 3. ASE'nin zamansal yapısı, kullanılan pompa darbesi 65 μs uzunluğundadır, sinyal 1000. mikrosaniyede gelmektedir, çünkü küme tekrar frekansı 1 kHz'dir.

Şekil 3'ten de görüldüğü gibi, ASE yaklaşık 10 μs'lik bir zaman diliminde oluşmaktadır. ASE'nin güçlenme oranının sinyale göre yüksek oluşu, bizi, son yükselteç aşamasına girerken sinyaldeki ASE oranını asgari düzeyde tutmanın yollarını aramaya itti. Bu amaca yönelik, önden pompalı güç yükselteci ile son yükselteç bir AOM yerleştirerek ve bu AOM'e sinyali seçecek ve ASE'yi dışarda bırakacak bir kapı uyguladık. Burada ilkin fiberoptik AOM denendi, ancak bu AOM'in fiberinin tek kipli (SM), oysa yükselteçlerin içerdiği fiberin büyük mod alanlı çift kılıflı (DC) fiber olmasının, sinyalde aşırı derecede kayıba yol açtığı ve AOM'in hasara uğrayabildiği görüldü. Bunun üzerine ışığı havadan geçiren AOM denendi, bu cihazla önden pompalanan güç yükseltecinden gelen sinyalin üçte biri son aşamadaki güç yükseltecine iletilebildi ve 50 μJ'a yakın bir küme enerjisi 300 μJ civarına yükseltilebildi ve ASE'nin sinyale oranı %10 dolaylarında sınırlanılabildi. Işığın fiber dışına koşutlayıcı ile çıkararak AOM içerisinden geçirildikten sonra tekrar koşutlayıcı vasıtası ile son güç yükselteci fiberine sokulmasını içeren bu yöntemde, çift kılıflı fiber içeren koşutlayıcıların yükselteçlerden gelen soğurulmamış pompa ışını yüzünden hasar görebildiği gözlemlendi. ASE oluşumunu frenlemek için yükselteçlerdeki kazanç fiberlerinin, pompa ışınının sinyale çevrim verimini de gözeterek, olabildiğince kısa tutulması, kazanç fiberlerinin çıkışında ortaya soğurulmayan pompa ışını çıkarmaktadır.

Güç yükselteçleri arasına dışardan ışın geçiren AOM yerleştirme yönteminden, sinyaldeki düşüş, optik elemanların hasar görmesi ve dışardan ışın geçirmenin tümleşik fiber yapıyı bozması gibi nedenlerden dolayı vazgeçilerek, önden pompalanan güç yükselteçlerinin

sayısını ikiye çıkartarak, güçlendirme silsilesine bir kademe daha eklenmiştir ve güç yükselteçlerinin sayısı toplam üçe çıkarılmıştır ve Şekil 4'te görülen dokuz güçlendirme kademesinden oluşan sistem elde edilmiştir. Bunu yaparken, sinyalin giriş sırasıyla, ilk



Şekil 4. Sistemin güçlendirilmiş halinin şeması.

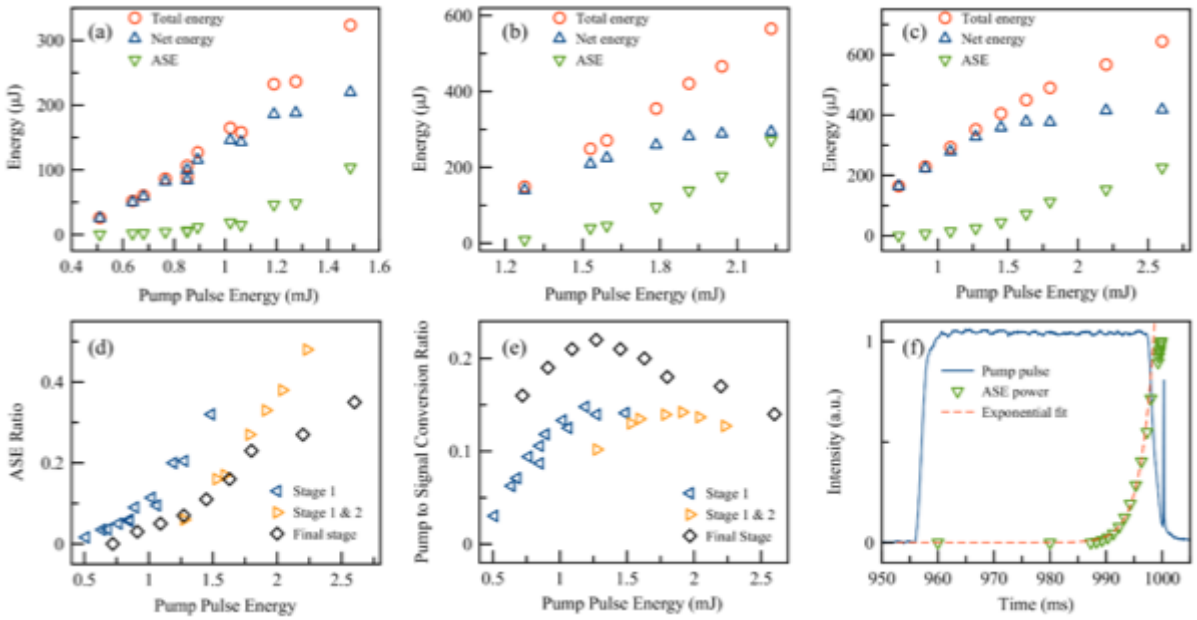
güç yükseltecinde bir adet 25-W'lık pompa diyod, ikincisinde iki adet 25-W'lık pompa diyod, üçüncüsünde (geriden pompalanan güç yükseltecinde) ise üç adet 25-W'lık diyod kullanılmıştır. Üç kademeli bu sistemde yükselteçlere giren sinyalin her kademede artışı göz önüne alınarak ve labaratuarımızda geliştirilmiş kazanç simülasyonun yönlendirmesi ile, kazanç fiberlerinin uzunlukları azalan şekilde, birincide 1.35 m, ikincide 1 m, ve sonuncuda 80 cm olarak belirlenmiştir. Bu yapıda hedeflenen, mümkün olduğunca ASE oluşumuna izin vermeden, sinyalin kademeli olarak daha da yüksek enerji seviyelerine yükseltilmesidir. İlk güç yükselteci için tek-kipli sinyal girişi olan sinyal pompa birleştirici ve güç yükselteçleri arasında büyük mod alanlı fiberoptik yalıtıcı kullanılmıştır. Üç kademeli yükselteç sistemi inşa edilirken, en iyi sonuçları elde edebilmek için güç yükselteçleri sırayla kurulmuş ve her kademede karakterize edilerek sistemden en iyi performans alınması hedeflenmiştir. Öncelikle, darbeli ön-yükselteçlerin arkasına önden pompalanan tek 25-W pompa diyodla sürülen güç yükselteci bağlandı. Yapılan sinyal güçlendirme denemelerinde 1 kHz ile tekrarlanan 250 ns uzunluğundaki sinyal atım kümeleri 11 µJ'dan %5 ASE oranı ile net 100 µJ enerji seviyesine, %30 ASE oranıyla net 220 µJ'a yükseltilebilmiştir. Yükseltece giren sinyal gücü 10 mW (10 µJ küme enerjisi) ve 70 µs uzunluğunda darbe ile sağlanan ortalama pompa gücü 1.5 W civarında olduğuna göre, bu yükselteçte 1 kHz'de tekrarlanan 250 ns'lik kümeler içeren sinyal ışını için elde edilen pompa ışınından sinyale çevrim oranı net (ASE hariç) %14 olmaktadır. Bunun akabinde, 2 adet 25-W'lık lazer diyod ile önden pompalanan güç yükselteci eklenmiş ve %40 ASE/SİNYAL oranı ile 290 µJ küme enerjisi elde

edilebilmiştir ve iki yükseltecin pompadan sinyale çevrim oranı toplam olarak yine net %14 olmuştur. Son olarak sisteme üç adet 25-W diyodla geriden pompalanan güç yükselteci bağlanmış ve %40 ASE/SİNYAL oranı ile 400 µJ küme enerjisine (ortalama güç 400 mW) ulaşılmıştır. Bu enerjiye ulaşırken, tüm güç yükselteçlerinde 40 µs uzunluğunda pompa darbesi kullanılmıştır ve son güç yükseltecinde fibere giren sinyal gücü 20 mW, ortalama pompa gücü ise 1.7 W olup, pompanın sinyale çevrim oranı net olarak (ASE hariç) %22 olmuştur. Toplam üç yükseltecin çevrim oranı ise net olarak %15'te kalmaktadır.

Sistemde, tümleşik fiber yapıda elde edilebilecek küme enerjisinin sınırlarını tespit etmeye yönelik performans karakterizasyon çalışmasında 1 kHz sıklığında tekrarlanan 250 ns uzunluğunda her biri 25 atım içeren atım kümeleri kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle darbeli pompalanan üç kademeli tek kipli önyükselteç kısmı ele alınmıştır. Bu kısımda farklı uzunlukta ve tepe güç değerlerinde pompa darbeleri ile yapılan denemeler sonucunda, en yüksek sinyal küme enerjisi ile tolere edilebilir ASE kombinasyonu ilk iki ön yükseltece düşük enerjili pompa darbesi, üçüncüye ise daha yüksek enerji darbesi verilerek elde edilmiştir. Bu yöntemle 250 ns uzunluğunda 25 atım içeren kümeler 16 mikrojül (µJ) enerjiye yükseltilebilmiş ve ASE'nin sinyale oranı %3 seviyesinde tutulabilmiştir.

Önyükselteç kısmının ardından, sistemin güç yükseltecinin darbeli pompalama altındaki kazanç performansı sistematik bir şekilde incelenmiştir. Sistemin son aşamasında yer alan güç yükselteci üç kademeden oluşmaktadır: İlk iki kademe sırasıyla bir ve iki adet 25 W'lık diyodlar ile önden, üçüncü kısım ise üç adet 25 W'lık diyod ile arkadan pompalanmakta ve sırasıyla 1.3 m, 0.8 m ve 0.8 m PM Yb-1200-DC-20/125 çift kılıflı kazanç fiberi içermektedir. Her kademenin çıktısı analiz edilmiştir. İlk iki kademede aynı diyod sürücü kullanılmakta, dolayısıyla ikinci kademeye birinci kademeye uygulanan pompa darbesinin zamansal olarak aynısı, güç olarak ise iki katı uygulanmaktadır, yani birinciye göre iki kat tepe güç ve pompa enerjisi ile pompalanmaktadır. Bu durumda ikinci yükselteç kademesinin çıktısı kümülatif yani iki kademeli yükseltmeyi temsil etmektedir ve ilk iki kademenin sonuçları birlikte ele alınmıştır. Bunun akabinde, geriden pompalanan nihai kademe sonuçları değerlendirilecektir ki, bu kademe ilk iki kademeden bağımsız olarak pompalanmakta ve giriş sinyali ikinci kademenin çıktısıdır. İlk iki kısmın performans ölçümlerinde, giriş sinyal küme enerjisi 10 µJ ve ASE oranı yaklaşık sıfır olarak ayarlanmıştır. Sinyal küme enerjisi, üç adet önyükselteçin çıkışında 16 µJ iken, iki adet yüksek güce dayanıklı yalıtıcı ve gözlem kanalı olarak kullanılan koşutlayıcının kayıpları sonucu 10 µJ'a gerilemekte, ASE oranı yalıtıcının filtreleme etkisi ile ise sıfıra yaklaşmaktadır. ASE oranının olabildiğince sıfıra yakın olması oldukça kritiktir çünkü girişte ASE çok düşük miktarda olsa dahi hızla güçlenmekte ve sinyalin yükseltilmesini

sınırlamaktadır. Performans ölçümlerinde, pompa diyotlara 40, 50, 60 and 70 μs uzunluğunda darbeler uygulanmış ve güç düzeyleri tam güç seviyesinin 60, 75 ve 100%'ü oranlarında tutulmuştur. Birinci ve ikinci kademe güç yükselteci için elde edilen, yükseltilmiş net sinyal küme enerjisi (ASE'den arındırılmış), toplam yükseltilmiş küme enerjisi ve ASE enerjisi değerlerinin pompa enerjisine göre değişimi, sırası ile Şekil 5(a) ve (b)'de görülmektedir. Sonuçlar artan pompa enerjisiyle birlikte net küme enerjisinin bir sınır değere doğru (birinci kademe için 230 μJ, ikinci için 290 μJ) azalan bir artış eğilimi ile yaklaştığını, ve bu değere ulaştığında artış hızının neredeyse sıfıra düştüğünü göstermektedir, bunun sebebi de ASE'nin düşük pompa enerjisinde yatay gelişme gösterirken giderek artan bir eğim, yani üstel (eksponansiyel) bir eğilim sergilemesidir. Yani, yükseltilmiş sinyal küme enerjisi için sınır iki kademeli güçlendirme ile daha yüksek bir değere çıkmaktadır ve aynı küme enerjisine daha düşük bir ASE oranı ile ulaşılabilmektedir. Örneğin 220 μJ net küme enerjisine birinci kademede %32 ile ulaşabilirken iki kademeli yükseltme ile bu oran %17'ye düşmektedir. Bu durum kademeli güçlendirmenin, ASE'yi sınırlama etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 5(d) çıkış gücü içerisindeki ASE oranının belli bir eşik pompa enerjisi sonrasında oldukça doğrusal olarak artmakta olduğunu göstermektedir, bu da ASE'nin artan pompa enerjisi ile birlikte üstel artışını teyit etmektedir. Şekil 5(e)'de, bizimki gibi enerji depolama prensibiyle çalışan bir lazer yükselteç sistemi için kritik bir parametre olan pompa enerjisinin net sinyal enerjisine çevrim oranının pompa enerjisi ile değişimi görülmektedir. Çevrim oranı, ilk iki kademenin çıkışında düşük pompa enerjisinde %10 civarından başlayarak %15'e kadar yükselmekte ve bundan sonra güçlenen ASE sonucu düşüşe geçmektedir. Net sinyale çevrim oranının düşük olmasının yanında, pompanın toplam (sinyal + ASE) çıktı enerjisine çevrimi ise tek kademeli yükselteçte % 21'e kadar çıkarken iki kademeli yükseltmede % 25'e kadar yükselmektedir. Ayrıca toplam çıkış enerjisinin pompa enerjisine göre artış eğimi birinci kademede %30 iken ikinci kademede %45'e yükselmektedir. Standard verimle çalışan Yb katkılı fiber lazer yükselteçlerde en az %50 civarında olan pompanın sinyale çevrim oranı ve sinyalin pompaya göre artış eğiminin bizim sistemimizde düşük seviyelerde bulunması, sistemimizin ASE oluşumuna karşı kısa kazanç fiberleri içeren yükselteç tasarımından kaynaklanmaktadır. Buna ilave olarak, düşük verim ve toplam çıkış enerjisindeki artış eğiminin oldukça sabit kalması doyurulmamış (unsaturated) kazanç rejiminde çalıştığımızı göstermektedir.



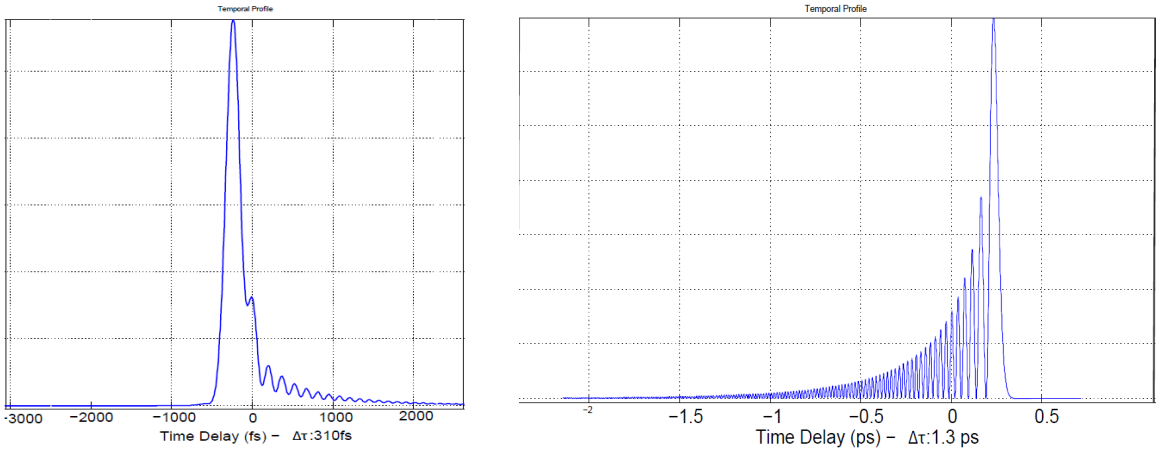
Şekil 5. Güç yükseltecinin (a) birinci kademesinin çıkışında (b) ikinci kademesinin çıkışında (c) son kademesinin çıkışında, pompa enerjisine göre ölçülmüş yükseltilmiş net sinyal enerjisi (yukarı yönlü üçgenler), ASE (aşağı yönlü üçgenler), toplam çıkış enerjisi (daireler). Güç yükseltecinin her kademesi için (d) çıktı içerisindeki ASE oranı (e) pompanın net sinyale çevrim oranı. (d) ve (e)'de ikinci kademenin çıktısı, kümülatif yükseltmeyi belirtmek amacı ile "Kademe 1&2" olarak tanımlanmıştır. (f) Sistemden 1.7 mJ enerjili 40 μs uzunluğunda pompa darbesi ile 400 μJ net yükseltilmiş sinyal enerjisi ve %20 ASE/Sinyal elde edildiği durumda ASE oluşumunun zamansal karakterizasyonu. ASE oluşumu (aşağı yönlü üçgenler) üzerine $I(t)=0.017 \times e^{(t-989)/2.43}$ formülü ile üstel eğri (kırmızı kesik tireler) uydurulmuştur. Pompa darbesi ve 1 ms noktasında fibere giren sinyal atımının da ölçüm sonuçları gösterilmektedir.

Güç yükseltecinin ilk iki kademesinden sonra, üçüncü ve sistemin çıkışını oluşturan geriden pompalamalı kademenin analizi yapılmıştır. Bu ölçümler için, diğer kademelerde olduğu gibi, öncelikle sinyal girişi sıfıra yakın ASE içerecek şekilde ayarlandı. Şekil 5(c), son kademe için giriş sinyal küme enerjisinin 50 μJ olduğu durumda yükseltme performans sonuçlarını göstermektedir. Bu verilerden pompa enerjisinin sinyale çevrim oranının ve yükseltilmiş küme enerjisinin önceki iki yükselteç kademesine göre benzer bir eğilim sergilediği ancak daha üst seviyede seyrettiği görülmektedir. Yükseltilmiş küme enerjisi artan pompa enerjisi ile birlikte 400 μJ'un az üzerine yakınsamakta iken çevrim verimi düşük enerjilerdeki %14 değerinden %22'ye çıkmakta ve sonrasında düşüşe geçmektedir.

6.2.2 Yüksek Enerjili Atımların Zaman Boyutunda Sıkıştırılması

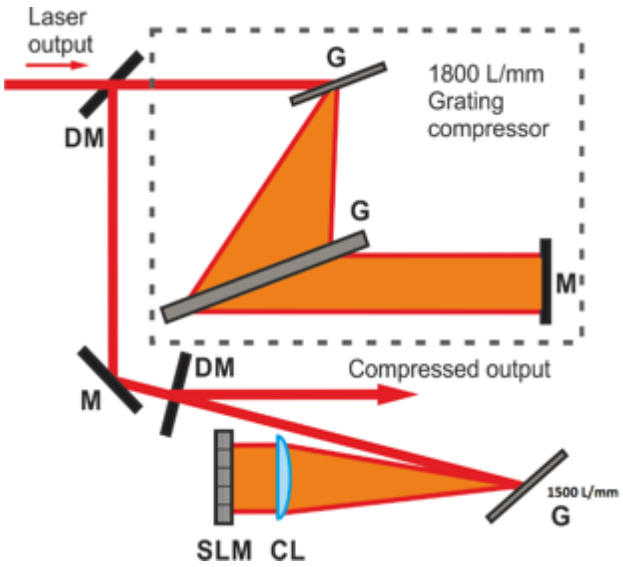
Sistemi geliştirmeye yönelik çalışmaların bir kolu da yüksek enerjili atımların zaman boyutunda sıkıştırılarak pikosaniye altı atımlara ulaşmayı hedefleyen çabalardır. Bu projenin

başlangıcında, salıngaç sonrası yükselteç aşamalarında oluşacak doğrusal olmayan etkileri azaltmak amacıyla 450 m genleştirme fiberi ile atımlar 360 pikosaniyeye genişletilmekte, sistem çıkışında 1500 çizgi/mm yoğunluğunda kırınım ağı çifti ile sıkıştırılmakta idi. Ancak sistemin yükselteç kademelerinin ciddi şekilde arttırılarak takviye edilmesi sonucunda, özellikle darbeli yükselteçlerin olduğu kısımda doğrusal olmayan etkilerin artması atım genliğinin arttırılmasını gerekli kılmıştır. Bu aşamada genleştirme fiberinin boyu 2600 m'ye çıkartılarak, atım genişliği salıngaç sonrasında 2.3 ns'ye arttırılmıştır. Bu durumda sıkıştırma amaçlı kullanılan kırınım ağı çifti de gerek boyutları açısından, gerekse fiziki olarak kırınım ağları arasındaki atımları sıkıştırmak için gerekli mesafenin çok artması dolayısı ile yetersiz kalmıştır. Bu nedenle kırınım ağları 1500 yerine 1800 çizgi/mm yoğunlukta ve yansıtan değil geçirgen (transmission) 20 cm genişliği olan kırınım ağları ile değiştirilmiştir. Katlanarak artan fiber boyu ve yüksek yoğunluklu kırınım ağı beraberinde bertaraf edilemeyen yüksek dereceli özellikle üçüncü dereceden saçınım (third order dispersion-TOD) getirdiği için, bu yapıda atımların pikosaniye altına sıkıştırılmaları imkansız olmaya başlar. Bu sorunu aşabilmek amacıyla, kırınım ağı çiftinden kaynaklanan artı üçüncü dereceden saçınımı eksi üçüncü dereceden saçınım ile karşılayacak ve böylece atımların çok daha üst seviyede sıkıştırılmasını sağlayacak, atım genleştirici olarak "chirped" fiber Brag kırınım ağı (CFBG) kullanmaya karar verdik. Bu kararımızda bize UFOLAB atım yayılım simülasyonu yol göstermiştir ve CFBG'li sistem ile yaptığımız simülasyonlar Şekil 6(a).'da görüldüğü gibi atımların 500 fs altı seviyelere sıkıştırılabileceğini göstermiştir. Ancak CFBG, kırınım ağınının ışığın belli derecede geliş açısındaki (69^o) saçınım değerlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır ve bu açıdan ufak bir sapma saçınım değerleri arasında ciddi fark yaratabilmektedir. Bu olguyu, simulsyon programımızda CFBG'li sistemin çıktısının kırınım ağı çiftine lazer ışının 69.5^o ile giriş yaptığı durumu simüle ederek gösterdik. Şekil 6(b)'da verilen simülasyon sonucu ışığın giriş açısında yarım derecelik sapmanın sıkıştırılmış atımların dört kat genişleyerek yaklaşık 1.3 ps civarına çıkmasına yol açtığını ve atım sıkıştırmadan iyi sonuç elde edilebilmesi için kırınım ağının çok hassas ayarlanması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 6. (a) CFBG'li sistem için 20 μJ enerjili atımların 1800 çizgi/mm kırınım ağları ile sıkıştırılmasının simüle edilmiş sonuçları ve (b) 0.5° sapma ile sıkıştırılmasının simüle edilmiş sonuçları

CFBG'yi sistemimize entegre edebilmek için, önce 1800 çizgi/mm kırınım ağı çiftinin telafi edebileceği azami ikinci derce saçınıma (second order dispersion veya group velocity dispersion) yakın bir değeri belirleyerek bunu karşılayacak bir CFBG imal ettirdik. Bu sınırı kırınım ağının fiziki boyutları ve esas olarak genişliği belirlemekte idi ki, elimizdeki kırınım ağının genişliğinin (20 cm) halihazırda firmanın bu yoğunlukta kırınım ağı için üretebildiği sınır değer olduğu belirtildi. Bu saçınım değerinin de 2.3 ns civarında bir atım genişliğine denk geldiğini tespit ettik.



Şekil 7. (Sol taraf) Atım sıkıştırıcı sonrası Uzaysal Işın Modülatörü (SLM) yerleştirilerek sıkıştırılmış atımların iyileştirilmesine yönelik düzenek. G: Kırınım Ağı (grating), M: Ayna (mirror), DM: D-yapılı ayna (D-shaped mirror), CL: Silindirik ayna. (Sağ taraf) Sıkıştırılmış atımları SLM ile iyileştirme

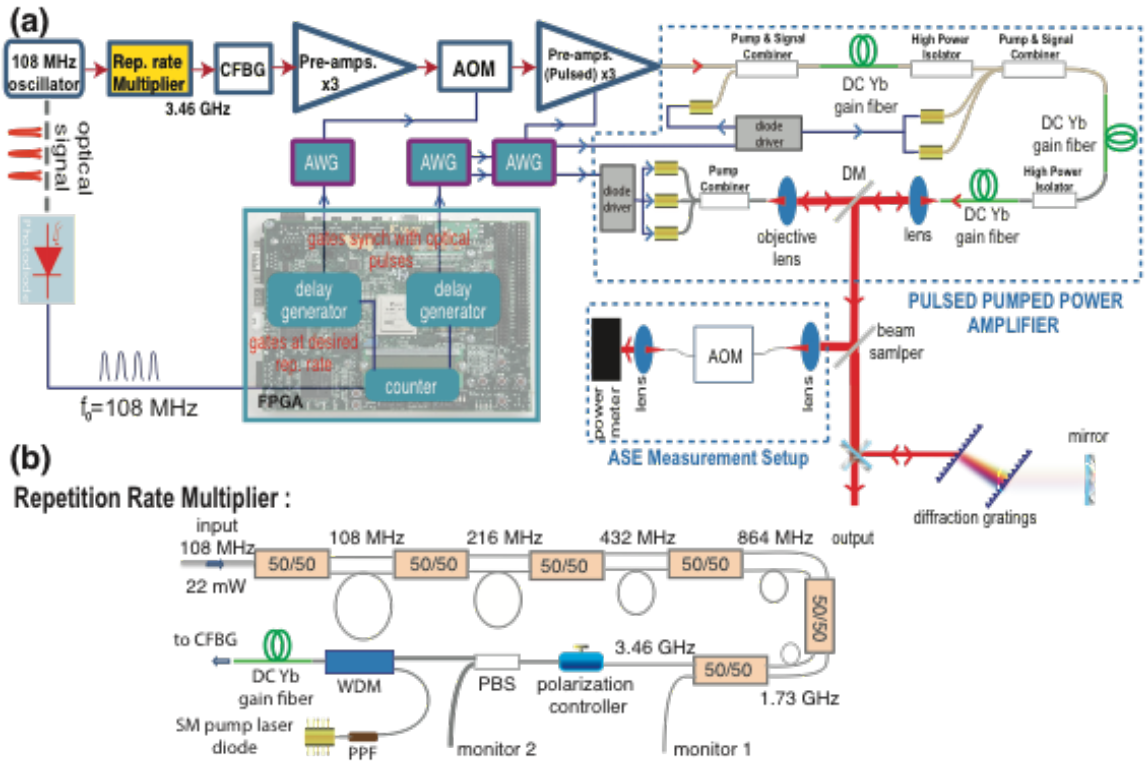
çabalarını gösteren otokorelasyon ölçümleri: SLM öncesi sıkıştırıcı çıkışı (mavi eğri), SLM çıkışı (kırmızı kesik çizgili eğri).

Proje kapsamında atım sıkıştırma sonuçlarımızı daha da iyileştirme ve özellikle kanat yapısını küçülterek atımların tepe gücünü yükseltme amacıyla Uzaysal Işın Modülatörü (Spatial Light Modulator-SLM) ile çalışmada yapılmıştır. Şekil 7.'de görüldüğü gibi, ilk aşamada SLM'i sistem çıkışında, atım sıkıştırıcı kırınım ağı çifti (grating compressor) sonrasına yerleştirerek, sıkıştırılmış atımın dalgaboyu bileşenlerinin faz yapısını değiştirerek daraltmayı denemekteyiz. Bu yöntemde, kırınım ağından çıkan sıkıştırılmış atım içeren ışın, sırasıyla 1500 çizgi/mm yoğunluklu bir kırınım ağı ile dalga boyu tayfı bileşenlerine ayırılmakta, bir silindirik lens ile koşutlanmakta ve SLM'in piksel matriksinden oluşan ekranı üzerine düşürülmektedir. Işının dalgaboyu bileşenlerinin üzerine düştüğü piksellerin kırınım endeksleri elektronik olarak değiştirilebilmektedir. Böylece bileşenlerin fazları değiştirilerek faz yapısının dönüşüm limitli (transform-limited) atımınkine yakınlaştırılması hedeflenmektedir. Burada geri besleme yöntemi kullanılmaktadır, SLM'i kontrol eden bilgisayardan piksel bazında faz verisi SLM'e aktarılmakta, faz yapısı değiştirilen atımın otokorelasyon ölçüm verileri osiloskop vasıtasıyla bilgisayara aktarılmakta, bilgisayarda bir algoritma ile işlenmektedir. Atımla ilgili programa tanımlanan parametrenin (parametrelerin) iyileşip iyileşmediği kontrol edildikten sonra, iyileşme olana kadar o piksele faz verisi gönderilmektedir. Programa tanımlanan seferde iyileşme olmaz ise o pikselin faz verisi ilk değerinde bırakılarak, sonraki piksele geçilmektedir, böylece ışının dalgaboyu bileşenleri taranmaktadır.

6.2.3 Küme İçi Atım Tekrar Frekansının 3.5 GHz'e Çıkartılması

Dokuz kademeli yükselteç sistemimize, kaynak sinyal sağlayıcı olarak atım tekrar frekansı 3.5 GHz olan lazer sistemi bağlanmıştır ve sistem Şekil 8(a)'de görülen yapıya kavuşmuştur. Yüksek tekrar frekanslı sinyal kaynağı, 108 MHz tekrar frekanslı kip-kilitli lazer salıngacın çıktısının, Şekil 8(b).'de detaylı şekilde görülen altı kademeli frekans yükseltici ile 32 kat yükseltilmesi ile elde edilmektedir. Frekans yükselticinin her kademesi, sinyali eşit iki kola ayıran 50/50 çiftleyici ve çiftleyicinin çıkış kolları arasında giriş tekrar frekansının periyodu kadar gecikme sağlayan fiber boyu farkından oluşmaktadır. Bu şekilde, optik sinyal tekrar frekansı, ikinci kademeden başlamak üzere her kademede iki kat artmaktadır ve böylece toplam altı kademede 2^5 kat artarak 3.5 GHz'e çıkmaktadır. Sinyal gücü, 108 MHz tekrar frekanslı salıngaç çıkışında 22 mW iken, frekans yükseltici çıkışında, çiftleyicilerdeki kayıplar sonucunda 8 mW'a düşmektedir ve akabinde bir kutuplara ayırıcı eleman ile kutuplanmakta ve bir önyükselteç vasıtası ile 300 mW'a yükseltilmektedir. Bu aşamadan sonra yüksek tekrar

frekanslı sinyal CFBG'den oluşan atım genleştiriciye girmekte ve küme-modlu dokuz kademeli yükselteç ile güçlendirilmektedir. Bu arada, fiberoptik frekans yükselticinin önemli bir özelliği de, istenen kademeden fiber kırılarak ve küme-modlu yükselteç sistemine kaynak yapılarak ara frekans değerleri olan 108 MHz'in katlarını (216, 432, 864, 1728 MHz) veya kaynaktaki 108 MHz'i kullanma olanağını sunmasıdır. Nitekim malzeme deneylerinde, 3.5 GHz'den başlayarak 108 MHz'e kadar inilerek, beş ayrı küme içi atım tekrar frekansı uygulanmıştır.



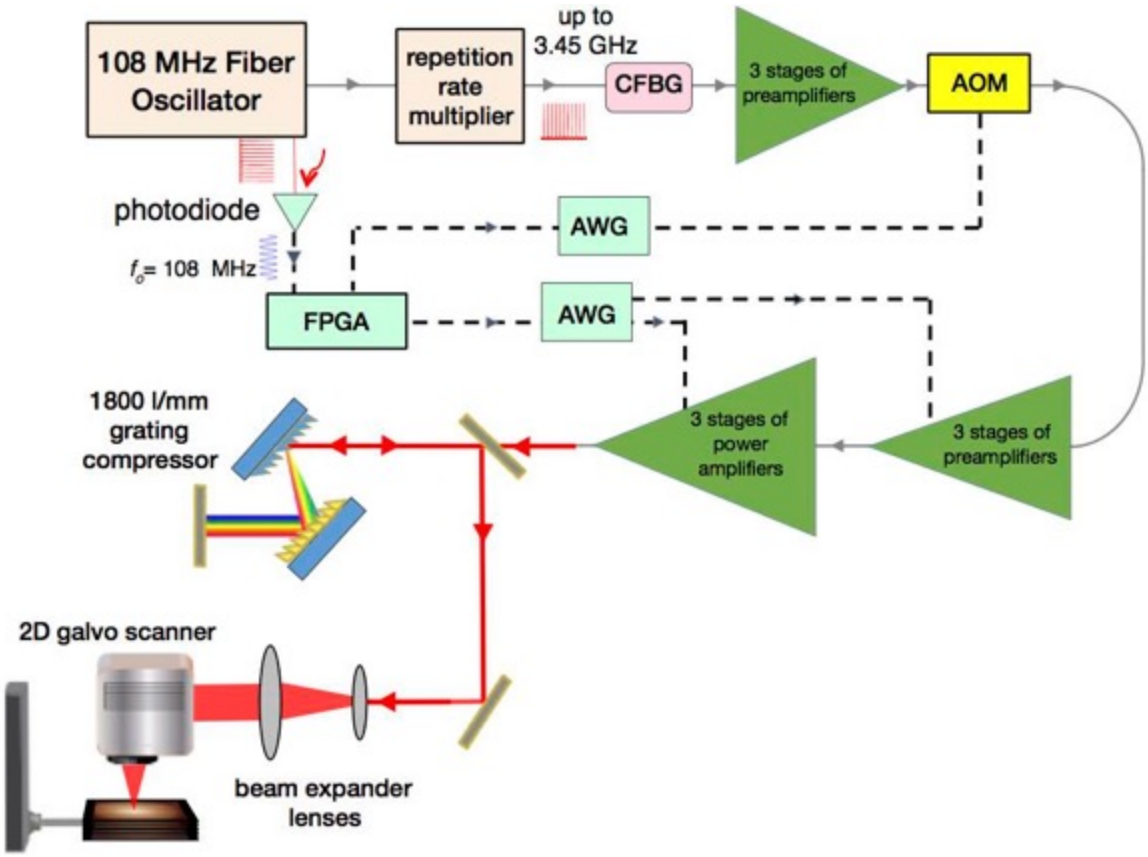
Şekil 8. (a) Küme içi atım tekrar frekansı 3.5 GHz'e çıkarılan lazer-yükselteç sisteminin şeması, (b) fiber atım tekrar frekansı yükselticisinin şeması.

6.3 Küme-Modlu Lazer Sistemi ile Malzeme İşleme Çalışmaları

6.3.1 Malzeme İşleme Deneyleri

Küme modun malzeme buharlaştırma (ablasyon) etkinliği kapsamlı malzeme işleme deneyleri ile incelenmiştir. Bu deneylerde dokuz farklı malzeme (bakır, silikon, peltiyer seramiği, piyezoelektrik seramiği, PMMA, agar jöle, inek gözü, diş minesi, sıçan beyni) üzerine küme-içi atım tekrar frekansı 22 MHz ila 3.5 GHz arasında değişen küme modlu ve karşılaştırma amacı ile de düzenli atım modunda lazer ışını tatbik edilmiştir. Bu deneylerde ağırlıklı olarak Şekil 2, 4 ve 8'de görülen küme içi atım tekrar frekansı 100 ila 3.5 GHz arasında değiştirebildiğimiz küme-modlu lazer yükselteç sistemimizi bir galvo tarayıcı ile

birlikte Şekil 9'de görüldüğü gibi kullandık. Ayrıca, bu yükselteç sitemine 500 MHz atım tekrar frekanslı kaynak salıngaç bağlayarak 500 MHz küme-içi atım tekrar frekansı ile deneyler yaptık. İlaveten, labaratuarımızda geliştirdiğimiz 22 MHz ve 91 MHz küme içi atım tekrar frekansı olan ve 10 μJ'a kadar 300 fs'ye sıkıştırılabilen atımlar üreten iki adet küme-modlu lazer sistemini de kullandık.



Şekil 9. Küme-modlu lazer-yükselteç sistemi ve galvo tarayıcıdan oluşan malzeme işleme düzeneği.

Deneylerde ilk başlarda, malzemeye ışın uygulama işlevi için motorize xyz platformu kullan ırken, sonradan Galvo tarayıcıya geçmemiz, Galvonun ayarlanabilir yüksek hızının sağladığı yetenek ile daha kontrollü deneyler yapabilmezi sağladı. Şöyle ki, tarama hızı lazerin atım tekrar frekansına göre ayarlanarak, malzeme üzerinde odak üzerine küme modda istenilen sayıda atım kümesi ve düzenli modda küme içerisindeki atım sayısına eşit atım düşmesi sağlanabilmekte idi.

6.3.2 Lazer ile Malzeme Etkileşimi Konusunda Teorik Çalışmalar

5.3.2.1 Oyuncak Model

Deneyler sırasında gözlemlediğimiz yüksek atım tekrar frekansında düşük enerjili atımlarla elde edilen yüksek malzeme buharlaştırma (ablasyon) ve minimal ısısal yan etkiler

sonucunda keşfettiğmiz ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma rejimi konusunda içgörü elde etmek üzere basitleştirilmiş oyuncak model geliştirdik. Burada ilk olarak, her atımın malzeme üzerinde atım enerjisi E_p 'ye orantılı ΔT kadar bir ısı artışına yol açtığını ve malzemenin $1/\sqrt{1+t/\tau_0}$ ilişkisine göre soğuduğunu varsayarak balıyoruz. Burada τ_0, δ^2/α 'ya orantılı olan termal rahatlama süresi, δ^2/α, δ buharlaştırılması sözkonusu hacim ve α malzemenin ısısal yayılım katsayısı (thermal diffusivity) oluyor. Bu durumda, N sayıda atım için, $n+1$'inci atımın karşılaştığı yüzey ısısı $T_{n+1} = T_n + \delta T$ ve $\delta T = \Delta T/\sqrt{1+\tau_R/\tau_0}$ tek atımın oluşturduğu küçük ısı artşış ve τ_R atıım tekrar arlığı (frekansın tersi) oluyor. Malzeme sıcaklığın kritik T_c değerini geçtiği zaman buharlaşır. Geleneksel ultrahızlı ablasyon rejiminde, atım tekrar frekansı düşüktür ($\tau_R \gg \tau_o$) ve her atım buharlaştırmaya yol açacak kadar enerjik olmak durumundadır ($\Delta T > T_c - T_o$), burada T_o yüzeyin başlangıç sıcaklığıdır. Ablasyon soğutmalı rejim $\tau_R \lesssim \tau_0$ olduğu yüksek tekrar sıklığında ortaya çıkar. Bu rejimde, her bir atımın enerjisi ablasyon eşiğinin altında olabilmektedir, çünkü sıcaklık atımlar arası soğumaya vakit bulamadığı için artmakta ve buharlaşma m'inci atımdan sonar başlamakta, burada $m = \left(T_c - T_o - \Delta T + \delta T\right)/\delta T$ olmaktadır. Buharlaştırılan malzemenin hacmi $V_{\text{ablated}} = \beta(N - u(T_c - T_o - \Delta T)m)E_p u(N-m)$ ile verilmektedir ve β bir orantı faktörü, u ise birim basamak işlevidir (unit step function). Atımlar arası malzeme yığınına yayılan ısı enerjisi $E_{\text{heat}} = \alpha(T_c - T_o)\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+\tau_R/\tau_0}}\right)(N-m)E_p + \alpha(\Delta T - \delta T)mE_p$ ile verilmektedir, ve α hedef malzemenin ısı sığasıdır. Düşük tekrar frekanslı geleneksel rejimde, bu denklem $\lim_{\tau_R \to \infty} E_{\text{heat}} = \alpha(T_c - T_o)NE_p$ sonucuna indirgenir.

5.3.2.2 Tek ve Çift Sıcaklık Modellerine Göre Simülasyonlar

Malzeme deneyleri sonucu keşfettiğimiz ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma rejiminin niteliksel yönlerini göstermek ve yuncak modelin öngördüğü sonuçları doğrulamak amacı ile, lazer ışınının malzeme ile etkileşimi için proje planına da parallel olarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Temel olarak, lazer-malzeme etkileşimi, sabit termo-fiziksel ve optik özellikler varsayılarak, bir parabolic tek-basamak radyasyon modeline uygun modellenmiştir. Ayrıca, lazer ışınının optik penetrasyon derinliğine oranı 100 mertebesinde kabul edilmiştir. Bu sınır durumda, fiziksel oluşumlar tek-boyutlu modelleme (STM) ile simüle edilebilmektedir ve bu da simülasyon süresini ciddi şekilde azaltmaktadır. Bu şartlarda ısı yayılım denklemi

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S$$

olarak yazılmakta, burada z yüzeye dik yön, ρ malzemenin yoğunluğu, C_p ısı sığası, k termal geçirgenliği, ve S aşağıda tanımlandığı şekli ile lazer şiddeti:

$$S = (1 - R)\alpha I_o e^{-\alpha z},$$

burada $(1 - R)$ yüzeyin geçirgenliği, α malzeme soğurma katsayısı, I_o yüzeye isabet eden ışın şiddetidir. Bu basite indirgenmiş modelde, malzeme buharlaştırma, malzemenin belli bir (T_c) ısısı üzerinde derhal buharlaştığını varsayan kritik faz noktası ayrılığı (critical point phase separation - CPPS) varsayımı kullanılmıştır. Yüzeyden ısı kaybının, malzeme içerisine yayılım yanında çok düşük kaldığı varsayıldığında, malzeme üzerinde termal sınır koşulu "no-heat flux" olur. Simülasyon hacminin büyüklüğü göz önüne alındığında, malzemenin derin ucunda termal sınır koşulu sabit olur ve oda ısısı olan T_0 olarak alınır.

Tek-sıcaklık modeli kolay ve berrak bir niteliksel yorum imkanı tanımakla birlikte, ultrahızlı atımların malzeme ile etkileşimi sırasındaki dengeden uzak termodinamik koşullar dolayısı ile kesin ve hassas bir modelleme olmadığı bir gerçektir. Buna karşın İki-sıcaklıklı modelin (TTM) çok daha hassas bir simülasyon imkanı tanıdığı bir gerçektir. Bu parabolic iki-adım radyasyon modeli ultrahızlı atım-malzeme etkileşimini modellemede yoğun olarak kullanılmaktadır. Ablasyon soğutmalı rejimin temel prensiplerinin ardışık atımlar arasındaki denge dışı koşullara bağlı olması (tipik olarak zaman ölçeği >100 ps üzerinde olan değişimler), TTM'nin niteliksel olarak farklı sonuçlar vermesini beklemiyorduk. Burada da (STM) uygulamamızda olduğu gibilazer ışınının optik penetrasyon derinliğine oranı 100 olarak bırakılmıştır. Bu sınırda, fiziksel olgular tek boyutlu modelle çözümlenebilmekte ve bilgi işlem süresi ciddi oranda kısalmktadır. Bu durumda TTM için ana deklemler şu şekilde yazılabilmektedir:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial z}\right) - G(T_e - T_L) + S,$$

$$C_L \frac{\partial T_L}{\partial t} = G(T_e - T_L),$$

burada T_e electron sıcaklığı, T_L kafes (lattice) sıcaklığı, z yüzeye dik yön, ρ malzemenin yoğunluğu, C_e elektronların ısı sığası, C_L kafesin ısı sığası, k_e elektronların termal geçirgenliği, G elektron-fonon bağlaşma parametresi, ve S aşağıda tanımlandığı şekli ile lazer şiddeti:

$$S = (1 - R)\alpha I_o e^{-\alpha z},$$

burada $(1 - R)$ yüzeyin geçirgenliği, α malzeme soğurma katsayısı, I_o yüzeye isabet eden ışın şiddetidir. TTM'de çeşitli alternatifler arasından STM'de de olduğu gibi malzeme buharlaştırma CPPS ile modellenmiştir, yani malzemenin belli bir (T_c) ısısı üzerinde derhal buharlaştığını varsayılmıştır ve yüzeyde ve malzemenin derinlerinde termal sınır koşulları yukarıda bahsedildiği gibi belirlenmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1 Lazer Sisteminin Geliştirilmesi

7.1.1 Küme Enerjisinin Sınırları

Önyükselteçler sonrasında, son güç yükseltecinden önce ikinci bir güç yükseltecinin eklenmesi sonucu oluşan güç yükselteçleri silsilesi yapısıyla yapılan deneyler birkaç önemli hususa işaret etmiştir. Bunlardan bir tanesi, ilk güç yükseltecinde büyük mod alanlı çift kılıflı (DC) fibere geçişte kullanılan pompa sinyal birleştiricinin sinyal giriş tarafının tek-kipli (SM) fiber olmasının ön-yükselteçlerden gelen sinyalin güç yükseltece giren miktarını ciddi şekilde arttırdığıdır. Aksi durumda, bu fiberin çift kılıflı olması durumunda sinyaldeki kayıp çok artmakta ve yükselteçten elde edilen verim düşmektedir. Diğer husus ise, güç yükselteçleri arasında büyük mod alanlı (LMA) fiber içeren yalıtıcılar olmadığı taktirde, geri yönde giden ASE ve soğurulmamış pompa ışını yüzünden optik elemanların (pompa sinyal birleştirici, koşutlayıcı) hasar gördüğüdür. Ayrıca, güç yükselteçleri ile yapılan denemelerin sonucunda ortaya çıkan önemli sonuçlardan biri ASE/SİNYAL seviyesi %40'lar seviyesine ulaştıktan sonra pompa gücü arttırılsa da ilave pompa enerjisinin büyük kısmı ASE'ye çevrilmekte ve sinyal enerjisinin artışı çok düşük kalmaktadır. Sonuç olarak, güç yükseltecinin geneline bakıldığında, pompa enerjisinin sinyale çevrim oranı belli bir pompa enerjisinde en üst düzeye ulaşmakta, sonrasında ise ilave artışın ASE'ye dönüşmesi sonucunda düşüşe geçmektedir. Ayrıca, az oranda ASE içeren giriş sinyali ile yapılan ölçümler çok düşük ASE oranının bile yükselteç çıkışında ciddi bir ASE oranına ulaştığını ve net sinyal enerjisini sınırladığını göstermiştir. Örneğin, son kademede %3 ASE içeren 66 μJ'luk sinyal kümesi 1.5 mJ pompa enerjisi uygulanarak 380 μJ net küme enerjisine yükseltilirken ASE oranı %38'e çıkmış ve pompadan sinyale çevrim oranı %21 olmuş, oysa %11 ASE içeren 190 μJ'luk sinyal kümesi aynı pompa enerjisi ile 320 μJ'e yükseltilebilmiş ve ASE oranı %56'ya çıkmış ve pompanın sinyale çevrim verimi %11'de kalmıştır.

Yukarıda sonuçlarını sunduğumuz darbeli pompalama ile çalışan çok kademeli yükselteç sistemimizde yapılan performans analizi ASE'nin üstsel bir hızla büyüyerek (Şekil 4(f)) pompadan sinyale çevrim verimini sınırladığını göstermektedir. Burada cevaplanması gereken soru, bu tür düşük tekrar frekansta tekrarlanan 500 ns altı uzunlukta atım kümeleri üreten bir fiber sistemde, bu sınırlamayı aşarak daha yüksek küme enerjilerine ulaşma imkânının bulunup bulunamayacağıdır. Burada ilk akla gelen yöntemlerden biri, pompa tepe gücünün arttırılarak pompa enerjisini daha kısa sürede fibere yükleme ve böylece ASE'nin oluşması için daha kısa süre bırakılmasıdır. Bu yöntem, sistemin güç yükseltecinde hem

baştaki iki kademeli önden pompalanan yükselteç kısmında, hem de sondaki geriden pompalanan yükselteç kısmında denenmiştir. İlk denemede, 1.3 mJ pompa enerjisi 20 ve 40 μs'lik darbelerle iki kademeli yükselteç kısmında ayrı ayrı uygulanmıştır ve uzun pompa darbesi ile %50 daha yüksek net sinyal küme enerjisi ve iki katı ASE/Sinyal oranı elde edilmiştir. İkinci denemede ise, güç yükseltecinin geriden pompalanan son kademesinde, iki farklı pompa enerjisi ile karşılaştırmalı ölçümler yapılmıştır; 1.3 mJ (30 ve 60 μs uzunluğunda pompa darbeleri) ve 0.9 mJ (42 ve 21 μs uzunluğunda pompa darbeleri). Her iki enerji değeri ile yapılan ölçümlerde yüksek tepe güçlü kısa pompa darbesiyle, ne elde edilen net küme enerjisinde, ne de Sinyal/ASE oranında belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Burada muhtemelen kazanç fiberinin kısa oluşu enerji depolamayı sınırlandırmakta olabilir veya ASE oluşumunda eşik pompa enerjisi daha etkili olabilir. Çözüm olarak kazanç fiber boyunun uzatılması ve aynı zamanda pompa tepe gücünün daha da yükseltilerek pompa darbesinin iyice kısaltılması düşünülebilir, fakat bu kazanç fiberinde q-anahtarlama benzeri bir etkiyle dev atım oluşumu ve fiberin hasar görme riskini doğuracaktır.

ASE eşiğini (ASE'nin oluşmaya başladığı pompa enerjisi) yükseltmeye yönelik ilk olarak, son kademedeki toplam 75 W gücündeki pompaları daha da arttırarak toplam 200 W gücünde 2 adet 100'er W'lık pompa lazer diyodla değiştirdik ve pompa enenerjisinin sabit kaldığı ancak pompa darbesinin kısaltılarak tepe gücünün arttırılması durumunda ASE eşiğininin yükseltilme olasılığını araştırdık. 32 ve 64 μs ve ortalama 6 W pompa gücü (fibere giren ortalama pompa gücü 4.5 W ve pompa enerjisi ise 4.5 μJ oluyor) ile yaptığımız denemede %100 ASE/SİNYAL oranı ile 1.1 - 1.2 W çıkış gücü elde ettik. Bu net küme enerjisinin her iki durumda da 600 μJ'a denk geldiğini ve ASE eşiğinin değişmediğini gösterdi. Ayrıca daha kısa pompa darbeleri de kullanarak yaptığımız denemeler de aynı yönde sonuçlar verdi. Bu bulgular ışığında ASE eşiğinin pompa darbelerinin kısaltılması ve tepe gücünün yükseltilmesi yöntemi ile yükseltilmesinin mümkün görünmediği, ASE seviyesinin esas olarak pompa enerjisine bağlı olduğunu sonucuna vardık.

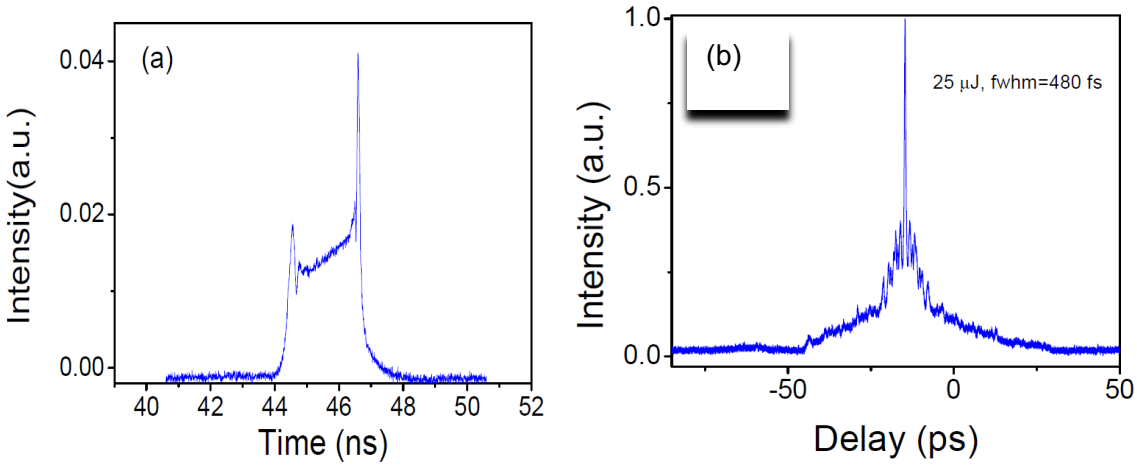
ASE eşiğinin yükseltilmesine yönelik akla gelen ikinci yöntem ise güç yükseltecinde kullanmakta olduğumuz 20 mikron çekirdek çapı olan çift kılıflı kazanç fiberi (NLight PM 20/125 Yb 1200 DC) yerine, daha büyük çekirdek çaplı fiber denemektir. Bu drumda, küme sinyali gelmeden önce pompa enerjisi daha düşük aktif iyon konsantrasyonu olan kazanç ortamında depolanacak ve enerji depolama kapasitesi daha yüksek olan böyle bir fiberin ASE eşiğini de yükseltmesi ve daha yüksek küme enerjisine imkan vermesi beklenebilir. Böylece 30/250 mikron çaplı fiberi (Coreactive DCF-YB-30/250-PM) sistemimizin geriden pompalamalı son yükselteç kademesinde 20/125 Yb 1200 DC'nin yerine denedik. Bu fiberin

soğurma katsayısı biraz daha düşük olduğu için 3 m uzunluğunda kullandık, ve 200 W pompa güücü ile 32 μs genişliğinde pompa darbesi (fiber içine 4.5 μJ pompa enerjisi giriyor) ile 840 mW toplam sinyal çıkışı elde ettik. ASE/SİNYAL oranını %25 olarak ölçtük, bu da 880 x 0.8 =700 mW, yani 1 KHz tekrar frekansında 700 μJ küme enerjisine ulaştığımızı gösterdi. Bu durumda 30 mikron çekirdek çapı olan fiber ile, 20 mikron çaplı fibere göre, aynı pompa enerjisi ile ASE/SİNYAL oranını %100'den % 25'e düşürürken %17 daha yüksek küme enerjisi elde edebildik. Buna parallel olarak ASE eşiğinin de yükselmiş olduğunu söyleyebiliriz. Bu fiber ile daha fazla denemeler ile bu konuyu araştırmak faydalı olacaktır, ancak elimizdeki miktarın kısıtlı olması ve fiber içersisinde hasar oluşma durumunun 20/125' göre daha yüksek sıklıkta olması, şimdilik bize daha fazla deney yapma imkanı vermemiştir.

Sistemin Şekil 4'te görülen dokuz kademe yükseltme içeren yapısı ile, en optimize şartlar altında ASE/Sinyal oranı %20 ile üretebildiği 100 ns uzunluğunda 10 atım içeren ve net 400 μJ enerjili (atım başına ortalama enerji 40 μJ) atım kümesi üretebildiğini gördük. Buna ilave olarak, 250 ns'lik atım kümeleri ile en yüksek 0.6 mJ, 30 mikron çekirdek çaplı fiber ile 0.7 mJ elde edebildik ve tümleşik fiber yapıda bir lazer yükselteç sistemi için hâlihazırda düşük tekrar frekanslı kısa (500 ns ve altı) atım kümeleri ile elde etmiş olduğumuz sonuçların pratik sınırlara çok yakın olduğunu göstermektedir. Proje hedefleri göz önünde bulundurulduğunda, yapmış olduğumuz çalışmalar bize atım kümesinin uzunluğunun mikrosaniyeler (muhtemelen onlarca) boyutuna arttırılarak 10 mJ seviyelerine çıkılabileceğini göstermektedir. Çünkü bu durumda, hem pompadan çevrim oranı artacak, hem de ASE oluşumu da azalacaktır. Bu nedenle, kümeyi genişleterek ve buna paralel olarak pompa darbelerini genişleterek yüksek küme enerjisine ulaşma yöntemini denedik. Bu yöntemle önce, kümenin zamansal genişliğini 160 mikrosaniyeye çıkartarak, Şekil 14.'te görülen 4.5 mJ net enerjiye sahip kümeyi elde edebildik. Burada ulaşılan sinyal gücü net olarak 4.5 W olup, küme tekrar frekansı için 1 kHz kullanılmış ve ASE oranı %10'un altında gerçekleşmiştir. Yüksek enerjili kümeye ulaşmada kullanılan pompa darbelerinin uzunluğu güç yükseltecinde, önden pompalanan ilk iki kısım için 195 mikrosaniye, son aşamadaki geriden pompalanan güç yükselteci için ise 240 mikrosaniye olup, son kademedeki güç yükseltecinde pompanın sinyale çevrim oranı %30 civarında gerçekleşmiştir. Sonrasında ise 200 mikrosaniyelik küme ile pompa darbelerini de uzatarak 6.5 mJ elde ettik. Sonuç olarak, küme enerjisinde proje hedefi olan 10 mJ küme enerjisine ulaşılabileceğini prensip olarak kanıtlamış olduk.

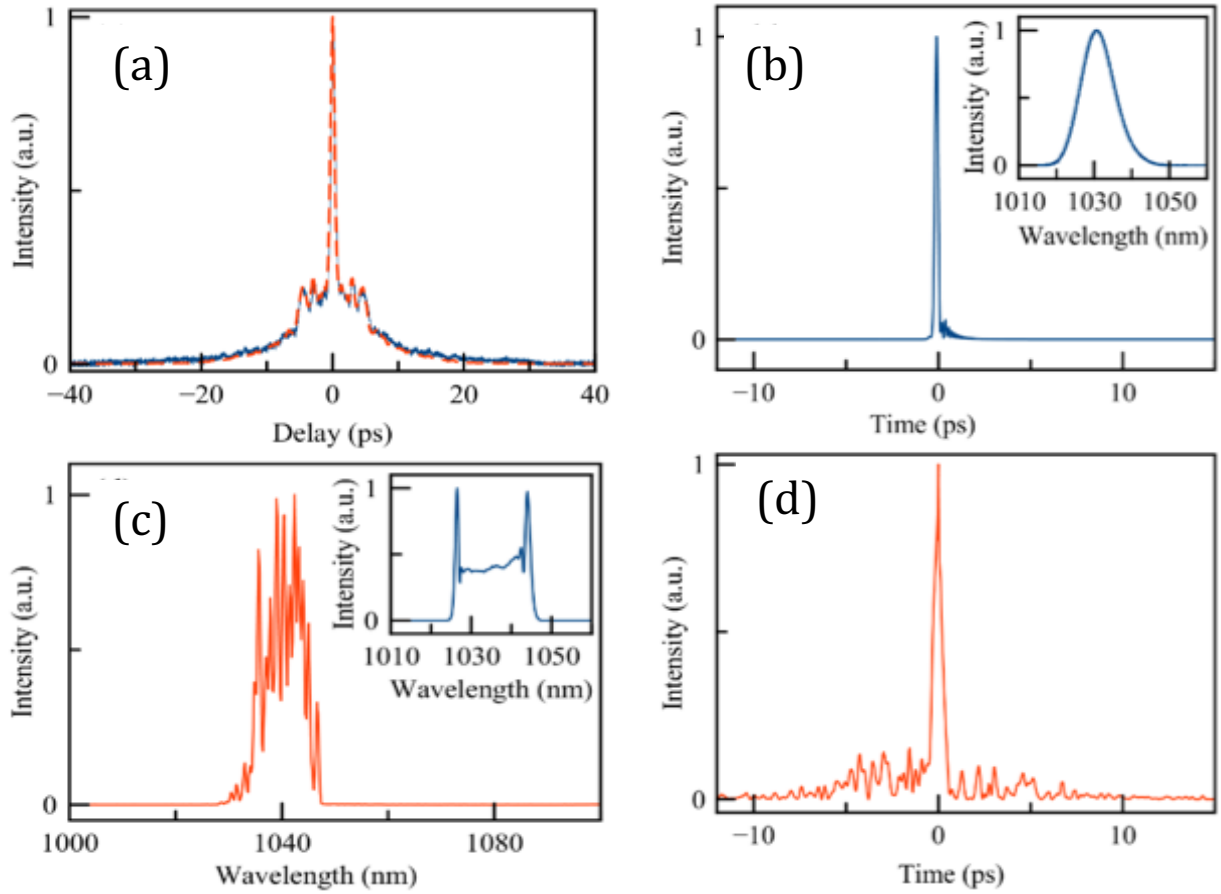
7.1.2 Atımları Zaman Boyutunda Sıkıştırma Sonuçları

Genleştirme fiberi yerine salıngaç çıkışına CFBG yerleştirilmiştir, ve atımların 2.3 ns'ye genişlediği (Şekil 10(a)) teyit edildikten sonra elde edilen 17, 20 ve 25 mikrojül atım enerjileri seviyesinde elde edilen sıkıştırma sonuçları sırasıyla Şekil 10(b)'de gösterilmektedir.



Şekil 10. CFBG'li sistemde (a) salıngaç çıkışıda CFBG ile 2.3 ns'ye genişletilmiş atım, (b) 25 μJ'luk atımların sıkıştırma sonrasında otokorelasyön ölçümü sonuçları

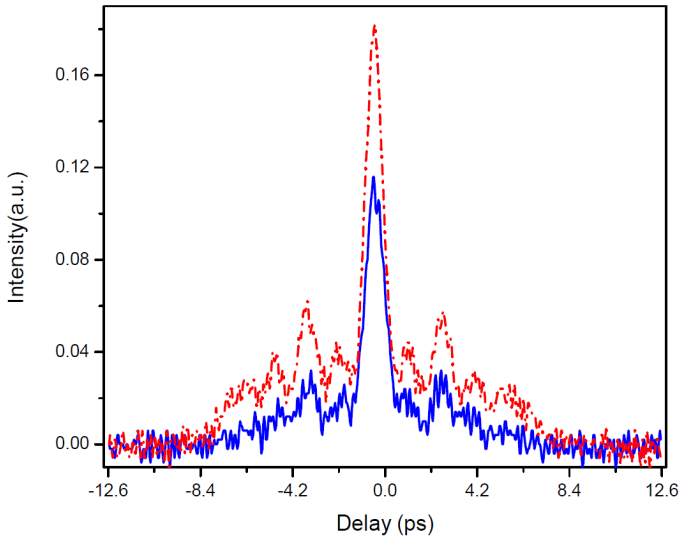
Şekil 10(b)'deki sonuçtan görüldüğü gibi yüksek enerjili atımlar 500 fs altına sıkıştırılabilmektedir, ancak alt kısımdaki kanat yapıları efektif atım genişliğinin pikosniyenin biraz üzerinde olmasına yol açmaktadır. Bu kanat yapılarının kısmen de olsa CFBG ile kırınım ağı arasındaki ufak bir uyumsuzluk sonucu ortaya çıkma ihtimali çok kuvvetlidir, çünkü yüksek yoğunluklu kırınım ağının saçınım değerleri ışığın kırınım açısına çok güçlü şekilde bağlıdır. Bu durumda kırınım ağlarının hassas ayarı yapılması durumunda daha iyi sıkıştırma sonuçları ihtimal dahilindedir. Ayrıca doğrusal olmayan etkilerin düşürülmesi gerekli olursa, üç kademeli güç yükselteci iki kademeye de düşürülebilir.



Şekil 11. (a) 40 μJ'luk atımların sıkıştırma sonrası ölçülmüş (kesintisiz eğri) ve Picasso algoritması ile yeniden oluşturulan otokorelasyon. (b) 40 μJ'luk atımlar için simülasyonla elde edilmiş sıkıştırma sonucu. Üst sağ köşede bu atım enerji değerindeki dalgaboyu tayfı bulunmakta. (c) 40 μJ atım enerjisi içeren lazer çıkışının dalgaboyu tayfı. (d) Picasso algoritması ile 40 μJ'lük atımın ölçülmüş otokorelasyon ve dalgaboyu tayfı kullanılarak oluşturulmuş zamansal formu.

Kırınım ağı çiftinin ayarlarında iyileştirme çabaları sonucunda, Şekil 11(a)'deki 40 μJ enerji seviyesindeki sıkıştırılmış atımın otokorelasyon sonucundan da görüleceği gibi, atım sıkıştırmada ciddi iyileşme sağladık. Şekil 11(a) ile Şekil 10(b) karşılaştırıldığında, atım enerjisi iki katına yakın yükselmesine rağmen alttaki kanat yapısında iki katı daralma görülmektedir. Şekil 11(a)'deki otokorelasyon ve 11(c)'de yine bu enerji değerine ait dalgaboyu tayfı ölçümü veri alınarak, Picasso algoritması ile yeniden oluşturulan 40 μJ enerjili atıma ait zaman profilinden (Şekil 11(d)) yarı-tepe genişliği 500 fs, alttaki kanat yapısının etkisini de yansıtan efektif genişlik ise 1.2 ps olarak saptanmıştır. Oysaki, Şekil 11(b)'de görülen simülasyon çıktısına göre 40 μJ enerji değerindeki atım için beklenen sıkıştırılmış atım genişliği 250 fs civarındadır. Simülasyon ile gerçekleşme arasındaki farkın temel kaynağı kanımızca, Şekil 9(b)'nin üst sağ köşesinde görülen simülasyona ait çıkış dalgaboyu tayfı ile Şekil 11(c)'de görülen deneysel dalgaboyu tayfı arasındaki sapmalardır.

Bu sapmalar, gerçekleşen tayfın %20 civarında daha dar olması ve simülasyondaki düzenli yapıya göre çok daha düzensiz bir yapıda olmasıdır.



Şekil 12. Sıkıştırılmış atımları SLM ile iyileştirme çabalarını gösteren otokorelasyon ölçümleri: SLM öncesi sıkıştırıcı çıkışı (mavi eğri), SLM çıkışı (kırmızı kesik çizgili eğri).

SLM ile lazer-yükselteç sistemi çıkışında atım sıkıştırmaya yönelik çabaların ilk sonuçlarında (Şekil12) sıkıştırılmış atımın zamansal yapısında iyileşmeler görmeye başladık. Şekil 10'da mavi eğriyle görülen SLM sonrası atımın merkez kısmının enerjisinin toplam atım enerjisine oranı SLM öncesi ile karşılaştırıldığında iki katına yakın (0.3'den 0.5'e) yükselmiştir. Ancak, Şekil 12'den de görüldüğü gibi SLM ile müdahale sonrası toplam atım enerjisinde düşüş olmaktadır, buna SLM üzerindeki faz değişikliklerinin kırınım etkisi yaratarak ışının bir kısmının kırılma sonucu ana ışından ayrılması yol açmaktadır. İşlemin doğası gereği oluşan bu etkinin, ancak ardışık SLM pikselleri arasındaki faz değişimlerinin azaltılması ile hafiflemesi beklenebilir.

7.2 Malzeme İşleme Sonuçları ve Ablasyon Soğutmalı Rejimin Keşfi

Küme-modlu lazer sistemimizin imkan verdiği yüksek atım tekrar frekansında bakır, silikon, diş minesi, seramik gibi malzeme örnekleri üzerinde yaptığımız deneylerde yüksek verimlilik ve asgari termal yan etkiler, ve buharlaştırma için gerekli atım enerjisi eşiğinin geleneksel ultrhızlı malzeme işleme sonuçlarına göre ciddi oranda düştüğünü gözlemledik. Bu sonuçlar bizim ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma kavramını oluşturmamıza yol açtı. Ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma kavramı, yüksek tekrar frekanslı (malzemeye göre değişmekle birlikte 10 MHz mertebelerinden GHz'ler mertebeleri) ultra kısa lazer atımları ile malzemeye aktarılan enerjinin yayılmasına fırsat verilmeden ve tatbik alanının çevresinde asgari düzeyde hasar oluşturarak, atımların kümülatif etkisi sonucu, yüksek verimlilikte malzeme

buharlaştırılması olarak özetlenebilir (Şekil 13(a)). Buharlaşan malzeme ısı enerjisini yanında taşıyarak uzaklaştığından, malzemenin ısınmaması için bütün mesele, ısınmış, ancak yıkımlama için gereken kritik sıcaklığa ulaşmamış malzemenin, ısısını malzemenin geri kalanına aktarmasına fırsat vermeden tekrar vurularak buharlaştırılmasıdır. Bu konuda içgörü elde etmek ve kavramsal olarak daha fazla hakim olmak hedefleri ile oyuncak modelimizi geliştirdik ve bunu tek ve çift sıcaklık modelleri temelli simülasyonlar ile destekledik. Paralel olarak, dokuz farklı malzeme üzerinde, 3.5 GHz'e kadar varan atım tekrar frekansı ve 5 - 10 mikrojül'e kadar varan atım enerjileri ile kapsamlı ablasyon deneyleri ile ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma kavramını incelemek ve desteklemek üzere deneyler yaptık. Burada sırası ile, yöntemlerini yukarda özetlemiş olduğumuz oyuncak modelin öngördüğü sonuçlar, ablasyon soğutma etkisinin direkt gösterilmesi için yapılan deney özet ve deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarından örnekler verilecektir. Daha detaylı bilgi için okuyucunun, bu raporla birlikte ek olarak sağlamakta olduğumuz "Nature" dergisine kabul edilmiş olan "Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses" adlı makalemiz ve onun eki olan "Supplementary Information"a başvurmasını öneririz.

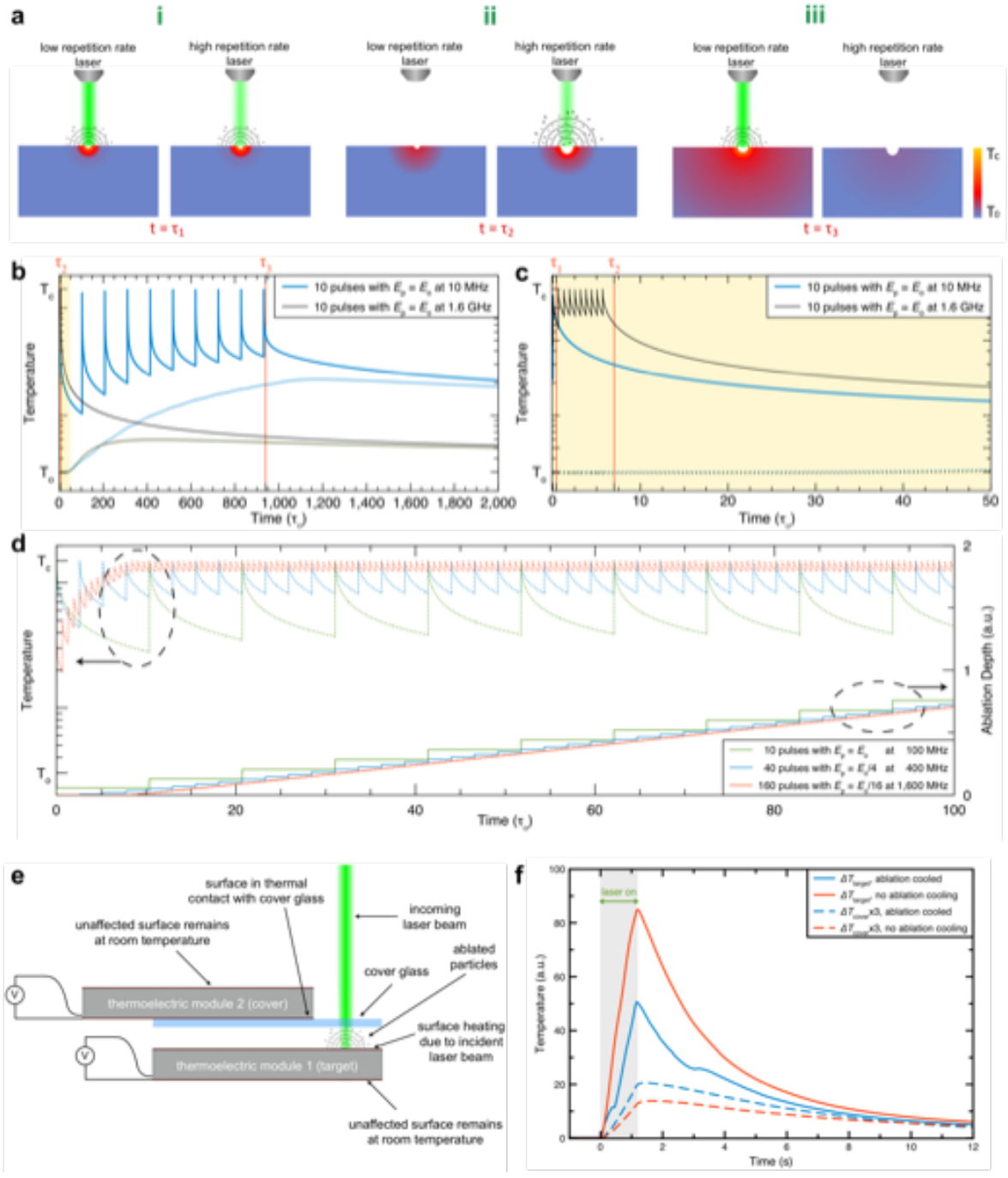
7.2.1 Oyuncak Modelin Öngörüleri

Oyuncak model, deneylerin ve simülasyon sonuçlarının da desteklediği, iki önemli öngörüde bulunmaktadır: (i) Atım tekrar frekansını arttırmak termal yanetkileri azaltır (Şekil 13(b) ve (c)). Daha az enerji ısısal olarak yayılma fırsatı bulduğu için($\lim_{\tau_R \to 0} E_{\text{heat}} = 0$), ablasyon (kaldırma, buharlaştırma) verimi geleneksel rejime göre yüksektir. (ii) Atım sayısı, atım enerjisinin düşürüldüğü orana eşit olarak, eş zamanlı olarak yükseltilir ise, ablasyon verimi sabit kalır (Şekil 13(d)). Bu, aslında, ablasyon soğutmalı rejimden tam anlamı ile yararlanabilmek için gerekli bir koşuldur çünkü eğer atım tekrar sıklığı atım enerjisi sabit tutularak arttırılır ise, ablasyon kökenli plazma ve kaldırılan parçacıklar gibi lazer ışınını yansıtan ve saçılmasına yol açan önleyici etkenler, verimli ablasyon önünde engel teşkil edecektirler.

7.2.2 Ablasyon Soğutmalı Malzeme Kaldırma Etkisinin Direkt Kanıtlanması

Bu etkiyi kanıtlamak amacı ile Şekil 13(e)'de görüldüğü gibi eşzamanlı olarak lazer ışını hedefindeki malzemenin sıcaklığını dolaysız, ve malzemeden kaldırılan parçacıkların taşıdığı ısı enerjisini dolaylı şekilde ölçtük. Termoelektrik seramik levha (peltiyer) yüzeyine odaklanan lazer ışını, levhanın üst ve alt yüzeyi arasında ısı farkına yol açmakta ve bu da Seebeck etkisi sonucu voltaj farkına yol açmaktadır. Ayrıca, yüzeyden kaldırılan parçacıkların küçük bir kısmı yukarı yerleştirilen cam levhaya yapışmakta ve bu cam levhaya yapışık ikinci

bir termoelektrik leha tarafından camın ısısı ölçülmektedir. Şekil 13(f)'de görüldüğü gibi, ablasyon soğutmalı rejimde geleneksel rejime göre, hedef malzeme daha az ısınmakta, halbuki yukardaki cam levha daha çok ısınmaktadır. Lazer ışını, tipik seramik termal yayılım katsayısının 150 mm^2/s olduğu gözönüne alınarak 3 μJ, 800 fs genişliğinde atımlardan 50 adedi, ablasyon soğutmalı rejimde küme-içi atım tekrar sıklığı 1.7 GHz, küme tekrar frekansı 200 kHz değerlerinde, geleneksel rejimde ise 10 MHz atım tekrar frekansı ile uygulanmıştır.

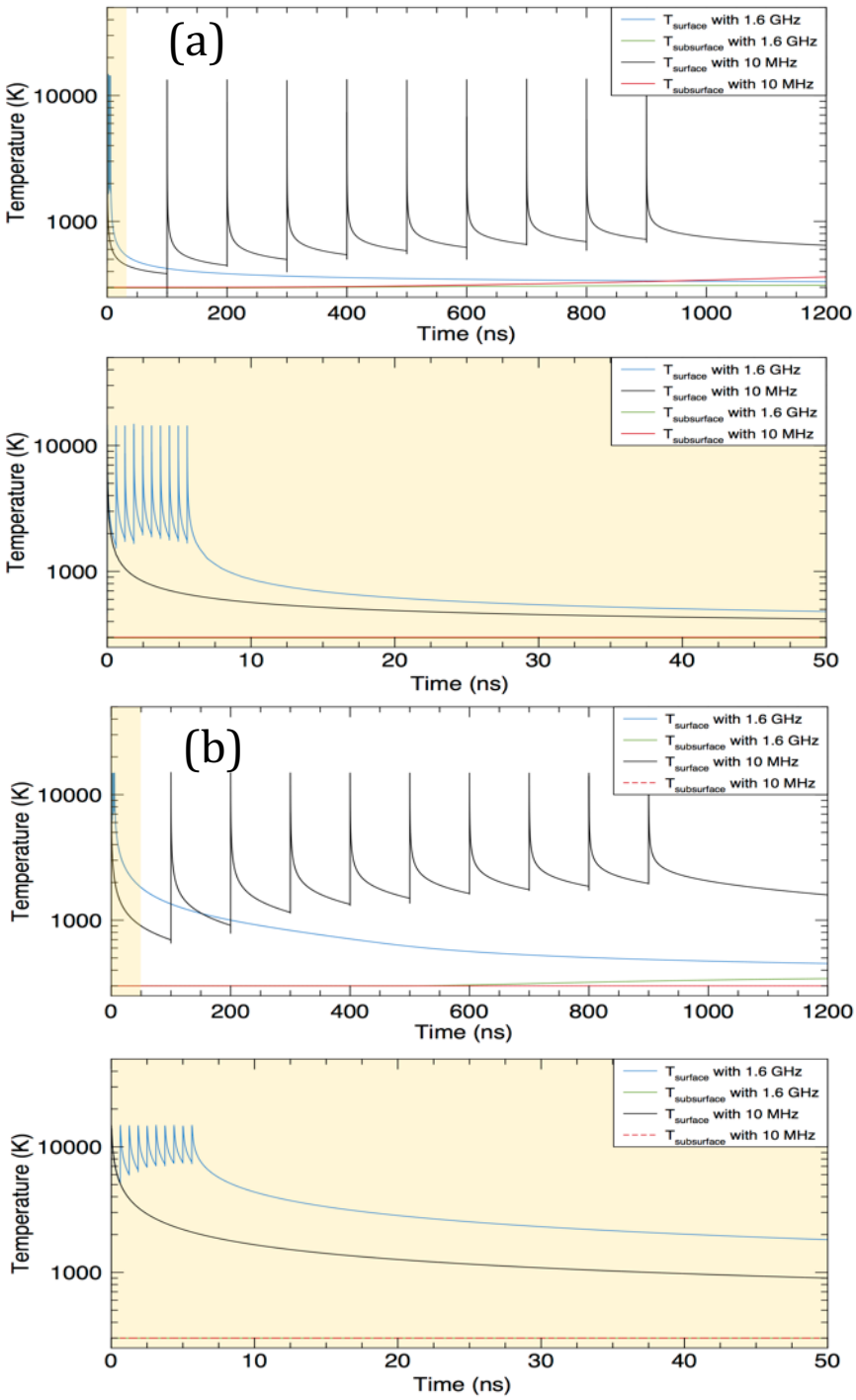


Şekil 13. Ablasyon soğutmalı lazer ile malzeme kaldırmanın temel prensipleri. (a) Sırası ile, düşük (geleneksel rejim) ve yüksek (ablasyon-soğutmalı rejim) atım tekrar frekanslarında malzeme

buharlaştırma (ablasyon) sürecinin temsili görüntüleri. Sıcaklık profilleri (i) $t = \tau_1$ için, ilk atımın malzemeye varışından hemen sonrası için; (ii) $t = \tau_2$ için, yüksek tekrar frekansı (düşük tekrar frekansı) için son varan (ikinci) atımdan hemen sonrası (öncesi); which is shortly after (before) the arrival of the last (second) pulse for the high-repetition-rate; (iii) $t = \tau_3$ için, düşük tekrar frekanslı lazer için son gelen atımdan hemen sonrası. Hedef malzemenin renkleri, (b)'de gösterilen hesaplama sonuçları (renk çubuğu ve τ_1, τ_1, and τ_3 zaman aralıkları) baz alınarak belirlenmiştir. (b) 10 MHz (mavi çizgiler) ve 1,600 MHz (siyah çizgiler) atım tekrar frekansları için oyuncak model kullanılarak hesaplanmış yüzey (kesintisiz çizgi) ve yüzey altı (optic penetrasyon derinliğinin 30 katı) sıcaklık değişimi. Atım enerjileri ve atım sayısı her iki durumda aynıdır. Görüldüğü gibi yüksek tekrar frekans ı yüzey altındakayda değer oranda daha düşük ısınmaya yol açmaktadır. (c) (b)'deki gölgeli alanine genişletilmiş görüntüsü. (d) 100 MHz (yeşil çizgiler), 400 MHz (mavi çizgiler) ve 1,600 MHz (kırmızı çizgiler) için hesaplanmış yüzey sıcaklığı değişimi (kesintili çizgiler) ve buharlaştırılan malzeme miktarları (kesintisiz çizgiler). Atım enerjisi ve tekrar frekansının çarpımı değişmediği durumda buharlaştırma hızının yaklaşık aynı kaldığı görülmektedir. Sıcaklık eğrilerindeki çıkıntılar atımların varışına denk gelmektedir. (e) Ablasyon soğutma olgusunun dolaysız olarak teyit edilmesi için kurulmuş deneysel düzenek. (f) Termoelektrik Levha (Modül) 1 (hedef malzeme, kesintisiz çizgiler) ve Termoelektrik Levha (Modül) 2 (hedef malzemenin yukarısında kaldırılan partiküllerin bir kısmının yapışması için konuşlandırılan levha, kesintili çizgiler) üzerinde, lazeri ablasyon soğutmalı (siyah çizgiler) ve geleneksel (kırmızı çizgiler) rejimde çalışan lazer ışını ile uyarılmış sıcaklık artışının ölçüm sonuçları.

7.2.3 Simülasyon Sonuçları

Şekil 14(a) ve(b)'de, sırası ile gösterilen, Nikel parametreleri baz alınarak, tek-sıcaklık ve çift-sıcaklık modeli ile elde edilmiş hedef malzeme için yüzey ve yüzey altı sıcaklık değişimleri görülmektedir. Çıktıların Şekil 13 (b) ve (c)'deki oyuncak model baz alınarak yapılan hesaplama sonuçları ile niteliksel olarak tam bir uyum içinde oldukları görülmektedir.

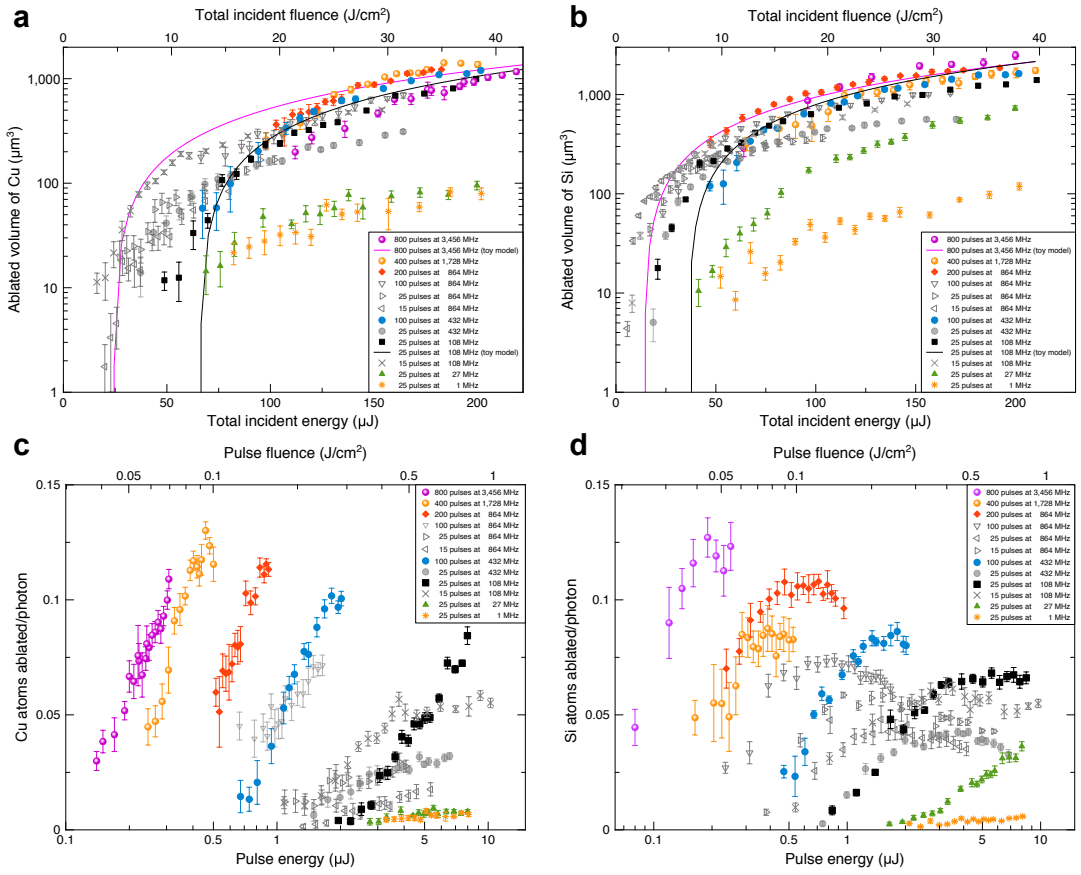


Şekil 14. (a) Tek-sıcaklık ve (B) çift-sıcaklık modeline göre yapılmış Nikel üzerinde ablasyon soğutma etkilerini gösteren simülasyon sonuçları.

7.2.4 Bakır ve Silikon Örnekleri Üzerinde Deneyler

Oyuncak modelin öngörülerini birçok malzeme üzerinde test ettik. Bunlardan bakır ve silikonu, literatürde ultrahızlı atımlar ile malzeme işleme verileri oldukça kapsamlı olduğu için, sırası ile metal ve yarıiletken örnekleri olarak seçtik. Şekil 15(a) ve (b)'de çeşitli atım tekrar

frekanslarında, sırası ile bakır ve silikon örnekleri için, buharlaştırılan malzemenin isabet eden enerjiye göre değişimi verilmiştir. Şekil 15(c) ve (d)'de ise isabet eden foton başına kaldırılan atomların atım enerjisine göre değişimi gösterilmektedir. Bu verilerden 100 MHz üzerinde ciddi düzeylerde ablasyon artışı gözlemlenmektedir. Oyuncak model her malzemede hassas bir şekilde ablasyon soğutmalı rejime giriş frekansı öngörmek için kaba kalmaktadır, ancak bakırda birkaç 100 nm'lik işleme derinliği için $\tau_0 \simeq$ 1 ns olduğu öngörülebilir. Modele göre ablasyon verim artışı buna denk gelen atım frekansının onda birinde başlıyacağı düşünüldüğünde, bu deneysel sonuçlar ile uyuşmaktadır. Silikon için verim artışının 27 MHz'de başlaması, onun bakıra göre daha düşük termal yayılım katsayısına sahip olması ile uyumludur, ve bakırda 1 ve 27 MHz sonuçlarının yakın oluşu ablasyon soğutmalı rejimin bu metal için 27 ile 108 MHz arasında başladığını göstermektedir. Tekrar frekansı daha yükseltildiğinde, yüksek atım enerjilerinde ablasyon veriminde doygunluk göze çarpmaktadır, bu da önleyici (shielding) etkilerin devreye girdiğine işaret etmektedir. Çözüm atım enerjisini düşürmek ve atım sayısını tekrar frekansı ile birlikte arttırmaktadır; örneğin 25 atım ve 108 MHz'den 800 atım (32 kat düşük enerjili) ve 3,464 MHz' geçilmesi. Bu durumda ablasyon aynı seviyede kalır (Şekil 15(a) ve (b)'de siyah ve pembe veriler), yani bu önleyici etkilerin bertaraf edildiğini gösterir.



Şekil 15. Yükselen atım tekrar frekansı ile atım enerjisinin düşürülmesi. Farklı küme-içi atım tekrar frekanslarında, toplam isabet eden enerji ve ışın akışı (fluence) göre, tek bir atım kümesi ile buharlaştırılan (a) Cu (bakır) and (b) Si (silikon) hacimleri. Oyuncak modelimizin ablasyon soğutmalı rejim içerisindeki en düşük ve yüksek tekrar frekansları için öngörüleri de (kesintisiz çizgiler) gösterilmiştir. Farklı tekrar frekanslarında, isabet eden foton başına buharlaştırılan (c) Cu ve (d) Si atomu sayıları cinsinden ablasyon veriminin atım enerjisi ve atım akışına göre değişimi. Verilerin alt ve üst sınırları, sırası ile, ablasyon eşiği ve mevcut olan lazer enerjisinin üst sınırına tekabül etmektedir. Tüm grafiklerde, herbir very noktası için örnek büyüklüğü 20 olup, merkez ortalama değere ve hata çubukları da standart sapmya eşittir. Renkli data noktaları, atım enerjisinin tekrar frekansına (108 MHz üstü) ters orantılı düşüşünü vurgulamaktadır.

7.2.5 Ablasyon Soğutmalı Malzeme İşleme Deneyleri Sonuçları - Diğer

Bakır ve silicon üzerinde yaptığımız yüksek tekrar frekanslı deney sonuçlarını literatür ile karşılaştırdığımızda, bu rejimin ablasyon verimini 10 kat civarında arttırırken, gerekli atım enerjisini ise 1000 kat civarında düşürdüğünü gördük [1]. Ayrıca fare beyin dokusu üzerine yapmış olduğumuz çalışmalarda, Loesel ve ekibi [38],100 Hz tekrar frekansındaki 140 fs genişliğinde ve 74 µJ enerjili atımları beyin dokusuna tatbik ederek 6 dakika gibi bir sürede 0.55 mm^3 hacminde dokuyu, odak dışında hiçbir noktaya zarar vermeden buharlaştırmışken biz 55 kat düşük atım enerjisi kullanarak 1mm^3/dk seviyesinde ablasyon verimi elde ettik.

7.3 Sonuç

Dünyada ilk olarak geliştirdiğimiz küme-modlu fiber lazer sistemini, bu proje kapsamında yürüttüğümüz çalışmalar ile dokuz adet yükseltme kademesine çıkartarak, düşük küme tekrar frekansında 500 ns altı kümeler ile ulaşılabilecek enerji sınırlarına taşıdık. Bu sınır yüksek ışın kaliteli 20/125 DC fiberde 0.6 mJ civarında iken, 30/250 fiber ile, ışın kalitesinde bozulma riski oluşmakla birlikte, artabileceğini gördük, yani daha geniş kesitli ve düşük iyon konsantrasyonlu fiberde ASE eşiğinin yükselmesi söz konusu olmaktadır. Bu sınırları tespit ederken fiberlerin kazanç ve ASE dinamiklerini çok detaylı inceledik. Ancak bu projenin en önemli çıktısı ise malzeme işleme deneleri sonucunda geliştirdiğimiz, devrim niteliğnde ablasyon soğutmalı lazerle malzeme kaldırma fikrinin keşfi olmuştur. Bu fikir, ultrahızlı atımlarla yapılan ablasyonda gerekli atım enerjisi eşiğini 1000 kat aşağı çekerken lazer malzeme işleme alanında yeni bir çığır açma potansiyeli taşımaktadır: ultrahızlı ablasyonda verimi asgari termal yan etki ile arttırırken, atım enerjisini düşürerek lazerlerin basitleşmesi ve maliyetlerinin düşmesi, fiberler ile vücut içine taşınmasının önünü açmaktadır.

8. PROJE ÇIKTILARI

8.1 Makaleler

1. Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Parviz Elahi, P., Çetin, B., Yavaş, S., Kesim, D. K., Akçaalan, Ö., Aşık, M. D., Öktem, B., Hoogland, H., Holzwarth, R., and Ilday, F. Ö. 2016. "Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses", Nature, kabul edildi.
2. Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Elahi, P., Akçaalan, Ö., Eldeniz, Y. B., and Ilday, F. Ö. 2015. "3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser", Optics Communications, 366, 404-409.
3. Kalaycıoğlu, H., Akçaalan, Ö., Yavaş, S., Eldeniz, Y. B., and Ilday, F. Ö. 2015. "Burst-mode Yb-doped fiber amplifier system optimized for low- repetition-rate operation", JOSA B, 32, 900–906.
4. Yilmaz, S., Elahi, P., Kalaycıoğlu, H., and Ilday, F. Ö. 2015. "Amplified spontaneous emission in high-power burst-mode fiber lasers", JOSA B, 32, 2462-2466.

8.2 Konferans Bildirileri

1. C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, et al, "Ablation-cooled material removal at high speed with femtosecond pulse bursts", (ASSP, OSA 2015).
2. D. K. Kesim, H Kalaycıoğlu, et al, "All-Fiber Burst Mode Femtosecond Laser System Integrated with OCT for Cataract Surgery", (CLEO Europe 2015).
3. H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, C. Kerse, Ö. Akçaalan, D. K. Kesim, F. Ö. Ilday, "1.7-GHz Intra-burst Repetition Rate Yb-Fiber Amplifier System", (CLEO Europe 2015).
4. H. Kalaycıoğlu, Ö. Akçaalan, S.Yavaş, Y. B. Eldeniz, F.Ö. Ilday, "A burst-mode Yb-doped fiber amplifier system optimized for low-repetition-rate operation", Europhoton Conference, (Neuchatel, İsviçre, 2014).
5. C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, Ö. Akçaalan, B. Eldeniz, F.Ö. Ilday, H. Hoogland, R. Holzwarth, "Non-thermal Material and Tissue Processing with 100 MHz and 500 MHz Repetition Rate Bursts", CLEO/Europe and EQEC Conference, (Münih, May 2013).
6. H. Kalaycıoğlu, C. Kerse, Ö. Akçaalan, B. Eldeniz, K. Gürel, F.Ö. Ilday, H. Hoogland, R. Holzwarth, "Development of a 1-mJ burst-mode fiber laser and its use in ultrafast material processing", UFO (Davos, February 2013).

9. EKLER

1. Nature dergisinden "Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses" makalemiz için kabul mesajı

2. "Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses" makalesinin ana metni.

3. “Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses” makalesinin ek metni (Supplementary Information)

10. KAYNAKLAR

[1] Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Parviz Elahi, P., Çetin, B., Yavaş, S., Kesim, D. K., Akçaalan, Ö., Aşık, M. D., Öktem, B., Hoogland, H., Holzwarth, R., and Ilday, F. Ö. 2016. “Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses”, Nature, kabul edildi.

[2] Kalaycıoğlu, H., Akçaalan, Ö., Yavaş, S., Eldeniz, Y. B., and Ilday, F. Ö. 2015. “Burst-mode Yb-doped fiber amplifier system optimized for low- repetition-rate operation”, JOSA B, 32, 900–906.

[3] Yilmaz, S., Elahi, P., Kalaycıoğlu, H., and Ilday, F. Ö. 2015. “Amplified spontaneous emission in high-power burst-mode fiber lasers”, JOSA B, 32, 2462-2466.

[4] Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Elahi, P., Akçaalan, Ö., Eldeniz, Y. B., and Ilday, F. Ö. 2015. “3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser”, Optics Communications, 366, 404-409.

[5] Kalaycioglu, H., Eken, K. & Ilday, F. O. 2011. “Fiber amplification of pulse bursts up to 20 μJ pulse energy at 1 kHz repetition rate”, Optics Letters, 36, 3383–3385.

[6] Richardson, D. J., Nilsson, J., and Clarkson, W. A. 2010. “High power fiber lasers: current status and future perspectives (invited)”, JOSA B., 27, 2, B63–B92.

[7] Nilsson, J., and Payne, D. N. 2011. “High-power fiber lasers”, Science 332, 6032, 921–922.

[8] Fermann, M. E., and Hartl, I. 2013. “Ultrafast fibre lasers”, Nature Photonics 7, 11, 868–874.

[9] Jauregui, C., Limpert, J., Tuennermann, A. 2013. “High-power fibre lasers”, Nature Photonics, 7, 11, 861–867.

[10] Sugioka, K., and Cheng, Y. 2013. Ultrafast laser processing. CRC Press.

[11] Chung, S. H., and Mazur, E. 2009. “Surgical applications of femtosecond lasers”, J. Biophotonics. 2, 10, 557–572.

[12] Lapczyna, M., Chen, K. P., Herman, P. R., Tan, H. W., and Majoribanks, R. S. 1999. “Ultra high repetition rate (133 MHz) laser ablation of aluminum with 1.2-ps pulses”, Applied Physics A, 69, S883–S886.

[13] Wu, P. P., Miles, R. B. 2000. “High-energy pulse-burst laser system for megahertz-rate flow visualization,” Optics Letters, 25, 1639.

[14] Jiang, N., Webster, M. C. and Lempert, W. R. 2009. “Advances in generation of high-repetition-rate burst mode laser output,” Applied Optics 48, B24.

[15] Wu, P., Lempert, W. L. and Miles, R. B. 2000. “Megahertz pulse-burst laser and visualization of shock-wave boundary-layer interaction”, AIAA Journal 38, 4, 672–679.

[16] Braun, H., Rinolfi, L., Weisz, S., Ferrari, A., and Tomas, R. 2008. “CLIC 2008 parameters”, CERN OPEN 021.

[17] Will, I., Templin, H. I., Schreiber, S. and Sandner, W. 2011. “Photoinjector drive laser of the FLASH FEL”, Opt. Express, 19, 24, 23770–23781.

[18] Thurow, B. S., Satija, A., and Lynch, K. 2009. “Third-generation megahertz-rate pulse burst laser system”, Applied Optics 48, 11, 2086–2093.

[19] Hartog, D. J. D., Ambuel, J. R., Borchardt, M. T., Falkowski, A. F., Harris, W. S., Holly,

D. J., Parke, E., Reusch, J. A., Robl, P. E., Stephens, H. D., and Yang, Y. M. 2013. “Pulse-burst laser systems for fast Thomson scattering (invited)”, Review of Scientific Instruments, 81, 10, 10D513.

[20] Murakami, M., Liu, B., Hu, Z., Liu, Z., Uehara, Y., and Che, Y. 2009. “Burst-mode femtosecond pulsed laser deposition for control of thin film morphology and material ablation”, Applied Physics Express, 2, 4, 042501.

[21] Liu, T., Wang, J., Petrov, G. I., Yakovlev, V. V., and Zhang, H. F. 2010. “Photoa- coustic generation by multiple picosecond pulse excitation”, Medical Physics, 37, 4, 1518–1521.

[22] Kalaycıoğlu, H., Eldeniz, Y. B., Akçaalan, Ö., Yavaş, S., Ilday, F. Ö. 2012. “1 mJ pulse bursts from a Yb-doped fiber amplifier”, Optics Letters, 37, 2586–2588.

[23] Elahi, P., Ylmaz, S., Eldeniz, Y. B., and Ilday, F. Ö. 2014. “Generation of picosecond pulses directly from a 100W, burst-mode, doping-managed Yb-doped fiber amplifier”, Optics Letters, 39, 236–239.

[24] Breitkopf, S., Klenke, A., Gottschall, T., Otto, H.-J., Jauregui, C., J. Limpert, and Tuennermann, A., 2012. “58 mJ burst comprising ultrashort pulses with homogenous energy level from an Yb-doped fiber amplifier”, Optics Letters 37, 24, 5169–5171.

[25] McKinney, L., Frank F., Graper, D., Dean, J., Forrester, P., Rioblanc, M., Nantel, M. and Marjoribanks, R.S. 2005. ‘‘Mitigating intrinsic defects and laser damage using pulse train-burst (>100 MHz) ultrafast laser processing”, Proceeedings SPIE, 5970, 59701L.

[26] Herman, P. R., Oettl, A., Chen, K. P., Marjoribanks, R. S. 1999. “Laser micromachining of ‘transparent’ fused silica with 1-ps pulses and pulse trains”, SPIE, 3616,148.

[27] Mckinney, L., Frank, F., D. Graper, D., Dean, J., Forrester, P., Rioblanc, M. Nantel, M., Marjoribanks, R. S. 2006. “Ultrafast laser pulse train-burst (>100 MHz) processing of glasses for laser-damage mitigating and photonic applications”, CLEO, JTuD9.

[28] Murakami, M., Liu, B., Hu, Z., Liu, Z., Uehara, Y., Che, Y. 2009. “Burst-mode femtosecond pulsed laser deposition for control thin film morphology and material ablation”, Applied Physics Letters, 042501.

[29] Hu, W., Chin, Y. C., King, G. 2010. “Modeling of multi-burst mode picosecond laser ablation for improved material removal rate”, Applied Physics A 98, 407.

[30] Knappe, R., Haloui, H., Seifert, A., Weis, A. and Nebel, A. 2010. “Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining”, SPIE, 7585, 75850H.

[31] Mangold, M. C., Zaugg, A., Link, S. M., Golling, M., Tilma, B. W. and Keller, U. 2014. “Pulse repetition rate scaling from 5 to 100 GHz with a high-power semiconductor disk laser”, Optics Express, 22, 6099–6107.

[32] C. Li, C., Ma, Y., Gao, X., Niu, F., Jiang, T., Wang, A. and Zhang, Z. 2015. “1GHz repetition rate femtosecond Yb:fiber laser for direct generation of carrier envelope offset frequency”, Applied Optics, 54, 8350–8353.

[33] Chen, J., Sickler, J. W., Fendel, P. E., Ippen, P., Kartner, F. X., Wilken, T., Holzwarth, R., and Hansch, T. W. 2008. “Generation of low-timing-jitter femtosecond pulse trains with 2 GHz repetition rate via external repetittion rate multiplication”, Optics Letters 33(9), 959–961.

[34] Lee, J., Kim, S.-W., and Kim, Y.-J. 2015. “Repetition rate multiplication of femtosecond light pulses using a phase-locked all-pass fiber resonator”, Optics Express 23, 10117–10125.

[35] Min, S.-S., Zhao, Y., Fleming, S. 2007. “Repetition rate multiplication in figure-eight fibre laser with 3dB couplers”, Optics Communications, 277 (2), 411– 413.

[36] Haboucha, A., Zhang, W., Li, T., Lours, M., Luiten, A. N., Coq, Y. Le, Santarelli, G. 2011. “Optical-fiber pulse rate multiplier for ultralow phase-noise signal generation”, Optics Letters, 36 (18), 3654–3656.

[37] Maram, R., Van Howe, J., Li, M., Azan˜a, J. 2015. “Lossless fractional repetition-rate multiplication of optical pulse trains”, Optics Letters, 40 (3), 375–378.

[38] Loesel, F. H., et al. 1998. “Non-thermal ablation of neural tissue with femtosecond laser pulses”, Applied Physics B: Lasers and Optics, 66, 121–128.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. HAMİT KALAYCIOĞLU
Proje No:	112T980
Proje Başlığı:	Malzeme İşleme Amaçlı Küme Modlu Fiber Lazer Sistemi Geliştirilmesi Ve Kullanımı
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	FATİH ÖMER İLDAY
Danışmanlar:	RAŞİT TURAN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/04/2013 - 01/04/2016
Onaylanan Bütçe:	445060.0
Harcanan Bütçe:	391363.57
Öz:	Gurubumuz tarafından dünyada ilk kez geliştirilen küme-modlu fiber lazer teknolojisini, bu proje kapsamında yapılan çalışmalar ile küme içi tekrar frekansı 3.5 GHz ve 250 ns genişliğinde atım kümelerini 700 mikrojül düzeyinde üretebilen ve 40 mikrojül atımları 500 fs düzeyine sıkıştırabilen seviyelere ilerlettik. Geliştirdiğimiz küme-modlu lazer-yükselteç sistemi ile kapsamlı malzeme deneyleri yaparak ablasyon soğutmalı lazerle malzeme kaldırma (ablation-cooled material removal) fikrini keşfettik. Ablasyon soğutmalı malzeme kaldırma kavramı, yüksek tekrar frekanslı (malzemeye göre değişmekle birlikte 10 MHz mertebelerinden GHz?ler mertebeleri) ultra kısa lazer atımları ile malzemeye aktarılan enerjinin yayılmasına fırsat verilmeden ve tatbik alanının çevresinde asgari düzeyde hasar oluşturarak, atımların kümülatif etkisi sonucu, yüksek verimlilikte malzeme buharlaştırılması olarak özetlenebilir. Lazer ile malzeme işlemede çığır açıcı nitelikte olan bu fikrin ispatını başta metaller olmak üzere, dokuz farklı malzeme üzerinde yaptığımız deneyler ile ispat ettik. Sonuçlar, bu rejimde ultrakısa atımlar ile malzeme kaldırma için gerekli atım enerjisinin bakır ve silikonda 1000 kat kadar düşerken, verimliliğin 10 kat kadar arttığını, fare beyin dokusu ve diş minesinde ise 10 kat verimlilik artışı elde edilebileceğini göstermektedir. Sonuçları içeren makalemiz ?Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses? ?Nature? dergisi tarafından kabul edilmiştir ve yayınlanma aşamasındadır [1]. Ayrıca, düşük ortalama güç ve küme tekrar frekanslı, darbeli pompalamalı, küme-modlu sistemlerde [2] ve yüksek ortalama güç ve küme tekrar frekansına sahip sürekli pompalamalı küme-modlu sistemlerde [3] yükseltilmiş kendinden ışıma (ASE) oluşumu ve ulaşılabilecek atım enerjisi sınırlarını araştıran, ve küme içi atım tekrar frekansı 3.5 GHz olan, 15 ns uzunluğunda 50 atım içerebilen 200 mikrojül enerjiye sahip 1 kHz?de tekrarlanan kümeler üretebilen sistemi raporlayan [4] makalelerimiz yayınlandı.
Anahtar Kelimeler:	Küme modlu fiber lazer, Fiber lazer yükselteç, Ultrahızlı lazer malzeme işleme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Amplified spontaneous emission in high-power burst-mode fiber lasers (Makale - İndeskli Makale), 2- Burst-mode Yb-doped fiber amplifier system optimized for low-repetition-rate operation (Makale - İndeskli Makale), 3- 3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser (Makale - İndeskli Makale),

TÜBİTAK