ANKARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÜME MODLU FİBER YÜKSELTEÇLERİN ELEKTRONİK KONTROLÜ

Yavuz Burak ELDENİZ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2014

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

06.07.2014

Yavuz Burak ELDENİZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KÜME MODLU FİBER YÜKSELTEÇLERİN ELEKTRONİK KONTROLÜ

Yavuz Burak ELDENİZ

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat EFE

Düşük frekanslı pompalama ile beslenen optik yükselteç sistemlerinde, yükseltece ilk giren optik atımlar, yükselteçteki kazancın büyük bir kısmını boşaltıp, diğer atımlara çok az kazanç bırakmaktadırlar. Bundan dolayı, düşük frekansta atımlı pompalanan küme modlu sistemin çıkışında eşit olmayan enerji seviyesinde atımlar oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında sahada programlanabilir kapı dizileri (FPGA) ve akusto-optik modülatör (AOM) aracılığıyla atımların tepe güçlerini kontrol eden bir yöntem ortaya konulmuştur. Geliştirilen yöntem ile güç yükselteci çıkışında homojen atımlar elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, FPGA yardımı ile optik sinyal içinde bulunan her bir atımı tek tek seçilerek herhangi bir dizini oluşabilecek şekilde programlanabilen bir platform geliştirilmiştir. Bu sistem için, MATLAB programı ile kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Bu ara yüzün, RS232 iletişim protokolü kullanılarak, FPGA ile haberleşmesi sağlanmıştır.

Temmuz 2014, 57 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fiber lazer, küme modlu fiber yükselteçler, atım seçimi, atım sentezi, FPGA.

ABSTRACT

Master Thesis

ELECTRONIC CONTROL OF BURT MODE FIBER AMPLIFICATION

Yavuz Burak ELDENİZ

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoç. Prof. Murat EFE

In optical amplifiers, fed by low-frequency pumping systems, optical pulses which enter the amplifier first, discharge a large portion of the gain and leave very little gain for the other pulses. Therefore, low frequency pulse pumped burst mode amplifiers generate unhomogeneous burst pulses. In this thesis we present a method which can control peak power of the pulses within the burst via field programmable gate arrays (FPGA) and acousto-optical modulators (AOM). With this method, homogeneous burst pulses have been generated. In addition, a programmable platform, which can generate any pulse bursts by picking one by one any induvidual pulse in an optical signal, has been developed. For this system, user interface has been developed via MATLAB. The communication between this interface and the FPGA has been provided by using RS232 communication protocol.

July 2014, 57 pages

Key Words: Fiber lasers, burst mode fiber amplifiers, pulse picking, pulse synthesis, FPGA

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca her aşamada bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Murat EFE (Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve eş danışman hocam Doç. Dr. Fatih Ömer İLDAY'a (Bilkent Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca hem bilim adamlığı hem de hayata yaklaşımı ile bana örnek olan, bilgisini ve deneyimlerini her zaman çok cömertçe paylaşan saygıdeğer bilim adamı Dr. Hamit Kalaycıoğlu'na (Bilkent Üniversitesi İleri Araştırma Laboratuvarı Ultra Hızlı Optik ve Lazerler Laboratuvarı) sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalıma boyunca bana olan desteklerini ve arkadaşlıklarını hiç esirgemeyen Bilkent Üniversitesi İleri Araştırma Laboratuvarı Ultra Hızlı Optik ve Lazerler Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, annem Semra ELDENİZ, babam Aziz ELDENİZ ve Pelin KAYA'ya gösterdikleri sonsuz destek ve sabır için çok teşekkür ederim.

Yavuz Burak ELDENİZ
Ankara, Haziran 2014

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
TEŞEKKÜR ..... **iv**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **ix**
1. GİRİŞ **1**
2. KURAMSAL TEMELLER **3**
2.1 Fiberlerin Geometrik Yapısı ve Optiksel Tanımlar……..……..**3**
2.1.1 Atlamalı indis fiberler……..……..**4**
2.1.2 Kademeli indisli fiberler……..……..**6**
2.2 Dalganın Fiberde İlerlemesi…….**7**
2.3 Lazerler ve Fiber Lazerler……..……..**9**
2.4 Küme Modlu Fiber Yükselteçler……**16**
3. MATERYAL VE YÖNTEM **18**
3.1 Materyal…….…..**18**
3.1.1 Sahada programlanabilir kapı dizileri……**18**
3.1.2 Akusto-optik modülatör……..……..**26**
3.2 Yöntem……..…**28**
3.2.1 Donanım tanımlama dilleri…….....**28**
3.2.2 Küme modlu fiber yükselteçlerde atım senkronizasyonu ve sentezi……..….**35**
3.2.3 İsteğe bağlı atım seçimi……...…….**45**
4. TARTIŞMA VE SONUÇ **48**
KAYNAKLAR **52**
ÖZGEÇMİŞ **56**

KISALTMALAR DİZİNİ

AOM	Akusto-optik Modülatör
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EEPROM	Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
HDL	Hardware Description Language
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIDAR	Light Detection and Ranging
LSI	Large Scale Integrated
MSI	Middle Scale Integrated
PAL	Programmable Array Logic
PLA	Programmable Logic Array
ROM	Read Only Memory
SRAM	Static Random-Access Memory
SSI	Small Scale Integrated
TTL	Transistor Transistor Logic
VHDL	Very High Speed Integrated CircuitHardware Description Language
VLSI	Very Large Scale Integrated

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1Atlamalı ve kademeli indis fiberlerin yapıları ve yansıma indisleri)..... 4
Şekil 2.2 Toplam iç yansıma olayı (Agrawal 2007) 5
Şekil 2.3 Kademeli indisli fiberde 3 farklı ışının ilerlemesi(Born ve Wolf 1999)..... 6
Şekil 2.4 İdeal osilatörün zaman ve frekans çıktıları 10
Şekil 2.5 İdeal olmayan osilatörün zaman ve frekans çıktıları (Serway 2005)..... 11
Şekil 2.6 Dış kuvvet ile ideal ösilatörün zaman ve frekans çıktıları 11
Şekil 2.7 İdeal olmayan optiksel ösilatör ve modları 12
Şekil 2.8 N modlu ideal olmayan bir ösilatörün frekans çıktısı 12
Şekil 2.9 Temel lazer yapısı 13
Şekil 2.10 Geniş bant aralıklı yükseltecin filtrelenmesi..... 13
Şekil 2.11 Atımlı modda çalışan lazerin zaman çıktısı 14
Şekil 2.12Küme modlu lazer yükselteç sisteminin genel görünümü 17
Şekil 3.1 Temel FPGA mimarisi (Kuon ve Rose 2007) 19
Şekil 3.2 PLA ve PAL yapıları(Kuon ve Rose 2007) 20
Şekil 3.3 Taşan kapılı transistör(Kuon ve Rose 2007)..... 23
Şekil 3.4 Akusto-optik bir maddenin tipik yapısı 27
Şekil 3.5 AOM optik sinyal girişi 28
Şekil 3.6 VHDL tasarım akış bloğu(Pedroni 2004)..... 30
Şekil 3.7 VHDL kütüphane yapıları 32
Şekil 3.8 İki girişli nand kapısı 33
Şekil 3.9 Küme modlu fiber yükselteç sistemi 35
Şekil 3.10 Ön yükselteç çıktısının AOM'de küme moduna dönüştürülmesi..... 36
Şekil 3.11 AOM çıkışından elde edilen küme modlu optik atımlar..... 37
Şekil 3.12 Güç yükseltecine eşit seviyde giren atımların güç yükseltecinden çıkmış halleri..... 38
Şekil 3.13 FPGA'i tetiklemek için kullanılan elektronik sistem..... 39
Şekil 3.14 Dedektörden çıkışındaki elektronik sinyal..... 39
Şekil 3.15 Elektronik yükselteç çıkışındaki sinyal 40
Şekil 3.16 T ağacı çıkışındaki elektronik sinyal 40

Şekil 3.17Güç yükseltecine eşit giren atımların güç yükselteci çıkışındaki şiddetleri ... 41
Şekil 3.18 Belirli bir atımı engellenmiş atım kümesi ... 42
Şekil 3.19 Son atımlarına enerji kalmamış bir atım kümesi ... 43
Şekil 3.20 Küme sonundaki atımı, voltaj yükseltilmesi ile yükseltilememiş atım kümesi ... 44
Şekil 3.21İsteğe bağlı atım seçim düzeneği ... 46
Şekil 3.22 MATLAB ile hazırlanan isteğe bağlı atım seçim kullanıcı arayüzü ... 47
Şekil 4.1 Homojenizasyon uygulanmamış atımların güç yükselteç çıkışları ... 48
Şekil 4.2Homojenizasyon uygulanmış atımların güç yükselteç çıkışları ... 49
Şekil 4.3 Fazla elemanlı homojenize edilmiş kümenin güç yükselteç çıktısı ... 50
Şekil 4.4 İsteğe bağlı atım dizisi(Yavaş vd. 2012) ... 50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Programlama teknolojilerinin karşılaştırılması 26
Çizelge 3.2 Kütüphane bildirimleri 31
Çizelge 3.3 VHDL varlık bölümün yazılması 32
Çizelge 3.4 Nand kapısı VHDL varlık kodu 33
Çizelge 3.5 VHDL mimarı kısmının yazılması 33
Çizelge 3.6 Nand kapısının VHDL mimarı kısmı 34

1. GİRİŞ

FPGA (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri), programlanabilir mantık blokları ve bu bloklar arasındaki ara bağlantılardan oluşan ve geniş uygulama alanlarına sahip olan sayısal tümleşik devreleridir. Tekrar tekrar programlanabilme özelliği nedeniyle, prefabrik olarak adlandırılabilen ve silikondan yapılan bu aletler, içerilerine gömülen programın yapısına göre herhangi bir sayısal sistem veya devrenin yerini alabilirler.

Atımlı lazerlerden elde edilen, femtosaniye, pikosaniye ve nanosaniye uzunluklarındaki atımların biyomedikal görüntülemeden, malzeme işleme ve spektroskopiye kadar çok geniş uygulamaları vardır. Femtosaniye ve pikosaniye atımlar ağırlıklı olarak mod-kilitlilazerlerden, nanosaniye atımlar ise Q-anahtarmasıyla elde edilmektedir. Lazer sistemleri doğal olarak, lazer kovuğunun belirlediği bir tekrar frekansında atımları üretirler. Pek çok uygulamada ise bu atımların frekansının değiştirilmesi gerekir. Bu işlem, genellikle belli sayıda atımdan birinin akusto-optik ya da elektro-optik modülatörler ile seçilerek yapılır. Seçim sonucu elde edilen frekans lazerin temel tekrar frekansının alt harmoniklerine denk gelir. Bunun yanında, biyomedikal görüntülemede, hızlandırıcı merkezlerinde kullanılan lazerlerde ve lazer-malzeme işleme uygulamaları başta olmak üzere artan sayıda uygulamada, daha ileri seviyede, bazı durumlarda, tek tek her atım üzerinde kontrole ihtiyaç vardır. Bu amaçla geliştirilmiş ve modülatörleri sürmeye yönelik bazı ticari sistemler olmakla birlikte, bunların maliyetleri yüksektir ve teknik kapasiteleri rastsal denebilecek seviyede kontrol sağlamaktan uzaktır.

Düşük frekansta tekrarlanan ve içerisinde sık aralıklı atımların bulunduğu kümeler içeren lazer ışını sistemlerine küme modlu sistemler denir. Özellikle malzeme işleme ve biyomedikal uygulamlar sırasında ortaya çıkan ısıl etkileri azami duruma getirmek için küme modlu sistemler kullanılabilir.Düşük frekansta atımlı pompa ile çalışan bu sistemlerin pompalanmasını sağlamak için, osilatör atımları ile senkronize elektronik sinyallere ihtiyaç duyulmaktadır. Yine atımlı pompalamadan kaynaklı, yükselteç enerjisinin küme atımlarına eşit olarak dağıtılamaması da küme mod gibi sistemlerde büyük problem yaratmaktadır. Bu problem sonucunda, ortaya enerji seviyeleri

birbirinden çok farklı küme içi atımlar doğmaktadır. Bu tez çalışmasında, ortaya çıkan bu problemlere çözüm üretilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Toplam iç yansıma, ışığın kırılma indisi yüksek ortamdan düşük bir ortama geçerken, kritik açıya eşit veya daha büyük bir açıda kırılmasına verilen addır. 1840'ların sonlarına doğru toplam iç yansıma kavramının bulunması (Colladon 1842, Babinet 1842) ile ışık kayıpsız bir şekilde istenilen ortamda kılavuzlanmaya başlanmıştır. Bu olgu sayesinde, fiber içerisinde ışığın kılavuzlanma fikri ortaya çıkmıştır. İlk cam fiberlerin 1920'lerde ortaya çıkmasına rağmen (Baird 1927, Hansell 1930, Lamm 1930) dış kaplama yapımının bulunup kılavuzlama özelliğini geliştirmesi ile ancak 1950'lerde pratik olarak kullanılmaya başlanmıştır (Van Heel 1954). Fiberler 1970'ten önce sadece kısa mesafeli tıbbi görüntüleme amaçlı kullanılmıştırlar. Kilometre başına 1000dB kayıpları, iletişim alanında kullanılmalarını mümkün kılmamıştır. Fakat 1965'te Charles KuenKao ve George AlfredHockham, optik fiberlerde yüksek saflıkta silis camı kullanarak 20dB/km'den daha düşük kayıplar elde edilebileceğini kuramsal olarak gösterdiler (Kao ve Hockham 1966). Bu kuramsal temelden sonra, 1970 yılında ilk 17dB/km kayba sahip fiber üretilmiştir (Keck vd. 1973). En düşük kayıplı fiber ise ~1.55μm dalga boyunda 0.2dB/km olarak 1979 yılında elde edilmiştir (Miya vd. 1979). Modern telekomünikasyonun bu dalga boyunda olmasının ana nedeni budur.

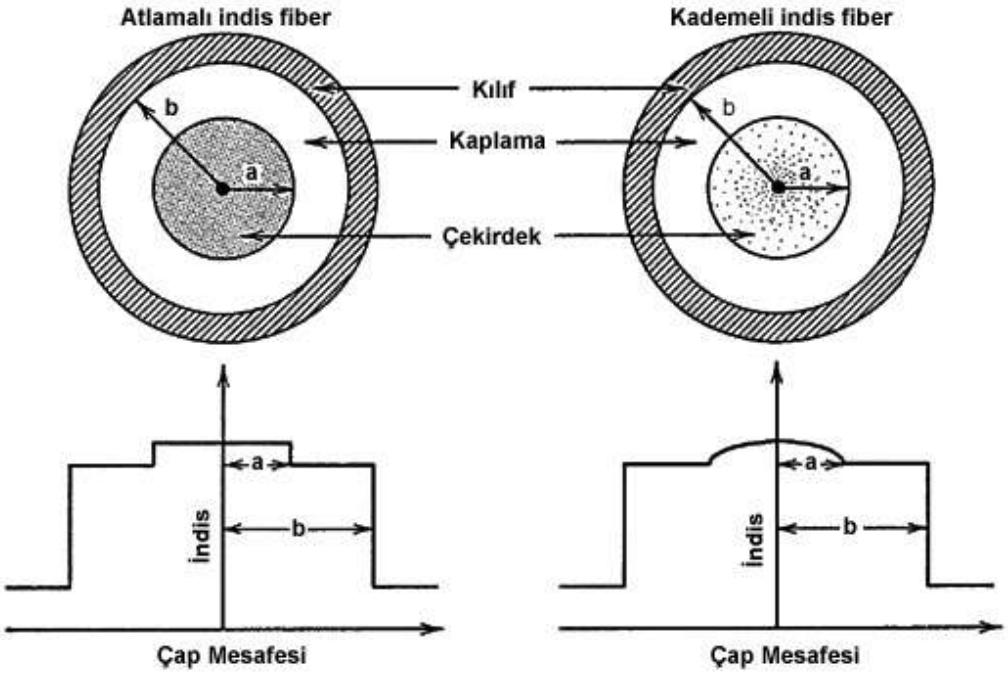
Kısaca 1960'lar dan 1979'a kadar olan gelişmeyi şu şekilde gözleyebiliriz; 1966'da kilometre başına fiber kayıpları 1000dB iken, yaklaşık 3m'de gücün yarısı kayıp oluyordu. 1979'da kilometre başına kayıp 0.2dB iken, gücün yarısının kayıp olması yaklaşık 15km'de meydana geliyordu.

2.5 Fiberlerin Geometrik Yapısı ve Optiksel Tanımlar

Optik fiberlerin en basit yapılısı, silindirik silis camdan yapılmış bir çekirdek ve onun etrafını çevreleyen ve kırılma indisi çekirdeğin kırılma indisinden düşük olan bir kaplamadan oluşur. Kırılma indisinin, çekirdek kaplama geçişlerinde ani olarak değiştiği fiberlere atlamalı-indisli fiberler denir. Eğer kırılma indisi ani olarak değil de

çekirdeğin içinden yavaşça azalarak, kaplamaya ulaşıyor ise, bu tip fiberlere kademeli-indisli fiberler denir.

Şekil 2.1'de, kademeli ve atlamalı indisli fiberlerin geometrik yapıları ve kırılma indis değişim grafikleri görülmektedir.



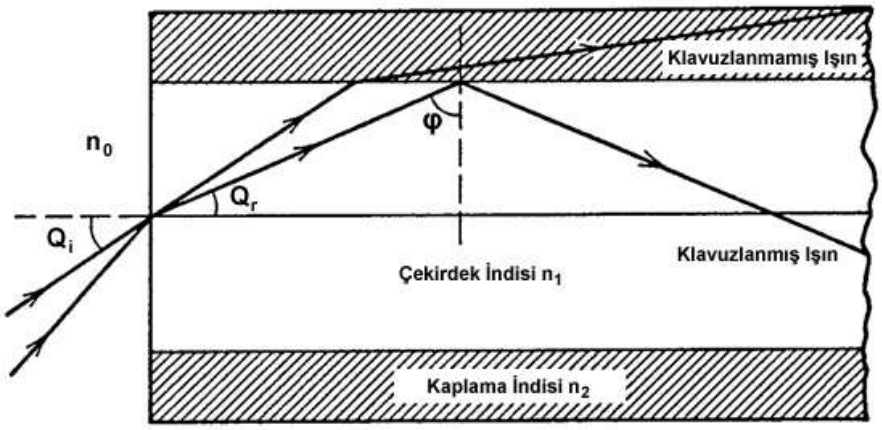
Şekil 2.1 Atlamalı ve kademeli indis fiberlerin yapıları ve yansıma indisleri(Agrawal 2007)

2.5.1 Atlamalı indis fiberler

Şekil 2.2'deki gibi bir ışın θ_i açısı ile gelsin. Bu durumda θ_r açısı eşitlik 2.1'deki gibi hesaplanabilir (Born ve Wolf 1999).

$$n_0 sin\theta_i = n_1 sin\theta_r \tag{2.1}$$

n_0 ve n_1 sırası ile hava ve fiber çekirdeğinin kırılma indisidir. Yansıyan ışın daha sonra çekirdek kaplama sınırına gelerek tekrar yansır. Bu yansıma ancak n_2'nin kaplama indisi olduğu, $sin\varphi < n_2/n_1$ koşulunun sağlandığı φ açısında gerçekleşebilir.



Şekil 2.2 Toplam iç yansıma olayı (Agrawal 2007)

Eşitlik 2.2'de görülen φ_c kritik açı olarak tanımlanır (Born ve Wolf 1999).

$$sin\varphi_c = n_1/n_2 \tag{2.2}$$

burada n_2 kaplamanın kırılma indisidir. Fiber boyunca kritik açıdan büyük açılar ile gelen bütün ışınlar şekil 2.2'deki gibi yansıyarak, fiberin içinde kılavuzlanacaktırlar. Eşitlik 2.1 ve 2.2 kullanılarak, bir ışının çekirdek içerisinde kılavuzlanması için, fiber ekseni ile yapması gereken maksimum açı şu şekilde hesaplanır.

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} - \varphi_c \tag{2.3}$$

Eşitlik 2.3 eşitlik 2.1'de yerine yazılır ise;

$$n_0 sin\theta_i = n_1 cos\varphi_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \tag{2.4}$$

eşitlik 2.4 elde edilir. Fiberler için ($n_0 sin\theta_i$) nümerik açıklık olarak tanımlanır (NA). Fiberin ışık toplama kapasitesini gösterir. Eşitlik 2.5'ten1≈n2 olduğu durumda NA'nın aldığı değer gösterilmiştir.

$$NA = n_1(2\Delta)^{1/2}, \Delta = n_1 - n_2/n_1 \tag{2.5}$$

Eşitlik 2.5'te görülen Δ, çekirdek kabuk geçişindeki kesirli indis değişkeni olarak adlandırılır. Fiber içine daha çok ışığı birleştirmek için, Δ'nın mümkün olduğunca yüksek seçilmesi gerekmektedir.

Eşitlik 2.6'da V parametresi tanımlanmıştır.

$$V=k_0 a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6'da $k_0=2\pi/\lambda$, a çekirdek yarı çapı, λ ise ışığın dalga boyudur. V parametresi fiberin ne kadar mod destekleyeceğini belirler. Atlamalı indis fiberler için, bu değer 2.405'ten küçük ise, fiber sadece tek bir modu destekler. Bu koşulu sağlayarak üretilen fiberlere ise tekil modlu fiberler denir. Tekil modlu ve çoğul modlu fiberler arasındaki en önemli fark çekirdeklerinin yarıçap farklılığıdır. Çoğul modlu fiberler için çekirdek yarıçapı genellikle 25-30 μm arasındadır. $\Delta\approx0.003$ olan tekil modlu fiberler için yarıçap 5μm den küçük olmak zorundadır.

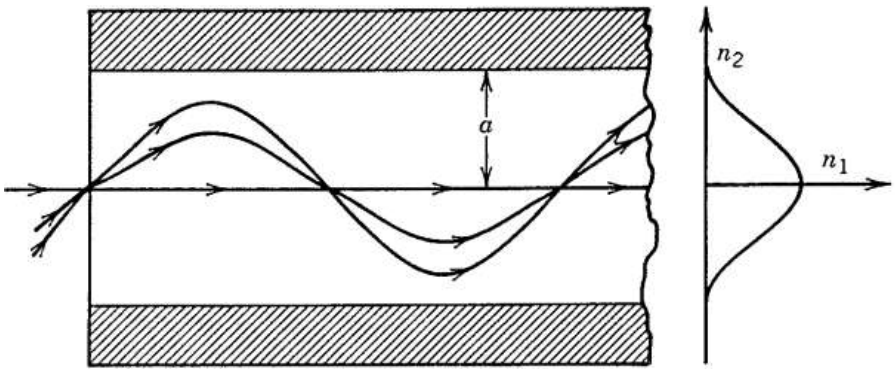
2.5.2 Kademeli indisli fiberler

Kademeli fiberlerde, çekirdeğin içindeki kırılma indisi sabit değildir. Kırılma indisi merkezde maksimum ve n_1 değerinde, katlama çekirdek geçişinde ise minimum ve n_2 değerindedir.

Eşitlik 2.7'de, bir çok kademeli fiberlerde görülen indis değişiminin yarı çap ile değişim fonksiyonu verilmiştir.

$$n(\rho) \quad \begin{matrix} n_1[1-\Delta(\frac{\rho}{a})]^a \; ; \; \rho < a \\ n_1 \; 1-\Delta \; = n_2 \; ; \; \rho \geq a \end{matrix} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'de fiberin yarıçapı a'dır. İndis profili fiberin yarıçapına bağlı bir fonksiyondur.



Şekil 2.3 Kademeli indisli fiberde 3 farklı ışının ilerlemesi(Born ve Wolf 1999)

Şekil 2.3'te 3 farklı ışının ilerlediği yollar gösterilmektedir. Atlamalı fiberlerde de olduğu gibi ışık fibere ne kadar eğik geliyor ise, aldığı yol o kadar uzamaktadır. Fakat yol boyunca kırılma indisi değiştiği için ilerleme hızı değişmektedir. Fiber merkezine dik olarak gelen ışın en kısa yolu alarak fiberi terk etmektedir. Fakat bulunduğu bölge fiber içindeki en yüksek kırılma indisine sahip bölge olduğu için, en yavaş ilerleyen ışın bu ışındır. Aynı şekilde eğik gelen ışınlarda merkezden uzaklaştıkça hızları artmaktadır. Uygun bir kırılma indis profili seçimi ile bu üç ışın aynı anda fiberin çıkışında olabilirler.

2.6 Dalganın Fiberde İlerlemesi

Bütün elektromanyetik olaylarda olduğu gibi, ışığın malzeme içinde ilerlemesi de Maxwell eşitlikleri ile açıklanabilirler. Genel bir ortam için Maxwell eşitlikleri yazılır ise;

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{2.8}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{2.9}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \tag{2.10}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2.11}$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 2.8'deki E elektrik alan, eşitlik 2.9'daki H ise manyetik alan vektörüdür. Eşitlik 2.10'daki D elektrik akı, eşitlik 2.11'deki B manyetik akı yoğunluklarıdır.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \boldsymbol{E} \tag{2.12}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} + \boldsymbol{M} = \mu \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \boldsymbol{H} \tag{2.13}$$

Eşitlik 2.12 ve 2.13'te elektrik akı ve manyetik akı yoğunluklarının, elektrik alan ve manyetik alan vektörleri ile olan ilişkileri görülmektedir. Eşitlik 2.12 deki ε_0 boşluk dielektrik sabiti, ε ise cismin dielektrik sabitidir.ε değerinin büyük olması cismin polarize olmaya eğimli olması anlamına gelmektedir. Eşitlik 2.13 teki μ_0 ise boşluğun,

μ ise cismin manyetik geçirgenliğidir.μ'nün büyük olması cismin manyetize olmaya eğimli olması demektir. **P** ve **M** ise sırası ile indüklenmiş elektrik ve manyetik polarizasyonlardır.

Silis fiberin yapısından dolayı, serbest yük yoğunluğu 'ρ' ve akım yoğunluğu 'J' sıfırdır. Silis fiber homojen bir ortam olduğundan $\nabla \cdot E = 0$'dır. Yine silis fiber manyetik olmayan ortam olduğundan M=0 olarak alınır. Bütün bu kısaltmalar yapılır, eşitlik 2.8 de her iki tarafın buklesi alınır ve 2.9, 2.12 ve 2.13 kullanılarak, eşitlik 2.14 elde edilir.

$$\nabla \mathrm{x}\, \nabla \mathrm{x}\, \mathbf{E} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{P}}{\partial t^2} \tag{2.14}$$

c ışık hızıyla ve $c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2}$ olarak tanımlanır. Eşitlik 2.14'in sol tarafındaki bukleli kısımda eşitlik 2.15'daki gibi yazılır ve $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ eklenerek sadeleştirilir ise eşitlik 2.16 elde edilir.

$$\nabla \mathrm{x}\, \nabla \mathrm{x}\, \mathbf{E} = \nabla\ \nabla \cdot \mathbf{E}\ - \nabla^2 \boldsymbol{E} \tag{2.15}$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{P}}{\partial t^2} \tag{2.16}$$

E(r,t)'nin Fourier dönüşümü eşitlik 2.17'de gösterilmiştir.

$$E\ r, \omega\ = \int_{-\infty}^{+\infty} E(r,t) e^{i\omega t} dt \tag{2.17}$$

Eşitlik 2.15 frekans cinsinden yazılacak olunursa eşitlik2.18 elde edilir.

$$\nabla x \nabla x E = -\varepsilon(r,\omega)\left(\frac{\omega^2}{c^2 E}\right) \tag{2.18}$$

Buradaki frekansa bağlı dielektrik sabiti de eşitlik 2.19 deki gibi yazılır.

$$\varepsilon(\mathrm{r}, \omega) = 1 + \tilde{\chi}(\mathrm{r}, \omega) \tag{2.19}$$

$\chi(\mathrm{r}, \omega)$, $\chi\ r, t\ '$nin Fourier dönüşümünü gösterir. Genel olarak $\varepsilon(r, \omega)$ karmaşıktır. Reel ve sanal kısımları, kırılma indisi '$\boldsymbol{n}$' ve soğurulma katsayısı $\boldsymbol{\alpha}$'ya bağlı olarak eşitlikler 2.20, 2.21 ve 2.22 deki gibi belirtilir.

$$\varepsilon = (n + \frac{i\alpha c}{2\omega})^2 \tag{2.20}$$

n ve α'nın$\tilde{\chi}$'e göre bağlantısı sırası ile eşitlik 2.21 ve 2.22 teki gibi olur.

$$n = (1 + Re\tilde{\chi})^{\frac{1}{2}} \tag{2.21}$$

$$\alpha = (\frac{\omega}{nc\ Im\chi})^{\frac{1}{2}} \tag{2.22}$$

Re ve Im reel ve sanal kısımları tanımlamaktadır. 'n' de 'α' da frekansa bağlı değişkenlerdir. n'nin frekansa bağlılığı kromatik dağılımlara örnektir. Yukarıdaki eşitliklerden yararlanılarak eşitlik 2.23 çıkarılır.

$$\nabla^2 E + n^2\ \omega\ k_0^2 E = 0 \tag{2.23}$$

Serbest uzay dalga vektörü k0 eşitlik 2.24 teki gibi hesaplanır.

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = 2\pi/\lambda \tag{2.24}$$

λ ise, ω frekansında salınım yapan optik alanın boşluktaki dalga boyunu belirtir.

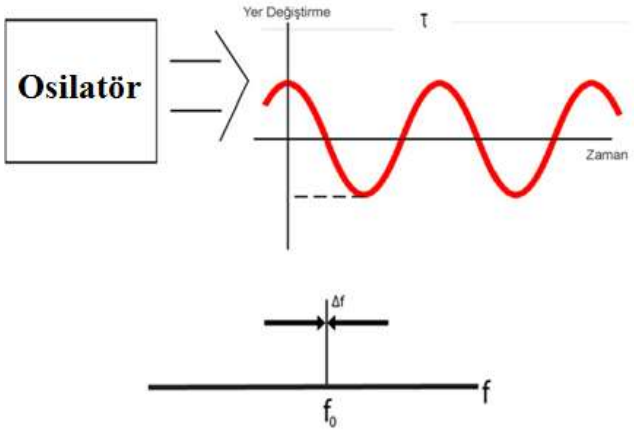
Eşitlik 2.16 ve 2.23 çözülerek, fiber içerisinde ilerleyen dalganın zaman ve frekans bölgesi hakkında bilgi sahibi olunabilir (Agrawal 2007).

2.7 Lazerler ve Fiber Lazerler

Çok şiddetli, koherent ve tek renk ışık elde etmek için geliştirilmiş optik düzeneklere lazer (İngilizce LASER(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation))denir. Lazerin anlaşılmasındaki en temel kavram olan uyarılmış ışınım ilk olarak 1971 yılında Albert Einstein tarafından kuramsallaştırılmıştır. Einstein, bir atomik sistemin düşük ve yüksek seviyeleri arasında nüfüsevrilmesi gerçekleştiğinde, yükseltilmiş uyarılmış ışınım gerçekleşmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Bu yükseltilmiş uyarılmış ışınım, ilk ışınım ile aynı faz ve frekansa sahip olacaktır. 1960 yılında Theodore Maiman yakut lazeri icat ettmiştir ve bu dünyadaki ilk çalışan lazerdir (Maiman 1960). Aynı zamanlarda Gordon Gould ilk defa lazer terimini bir makalede kullanmıştır (Gould 1959). Bu makalede Gould, lazerin LIDAR (Lazer görüntüleme bulma ve algılama), spektroskopi ve interferometre gibi uygulamaları olduğunu

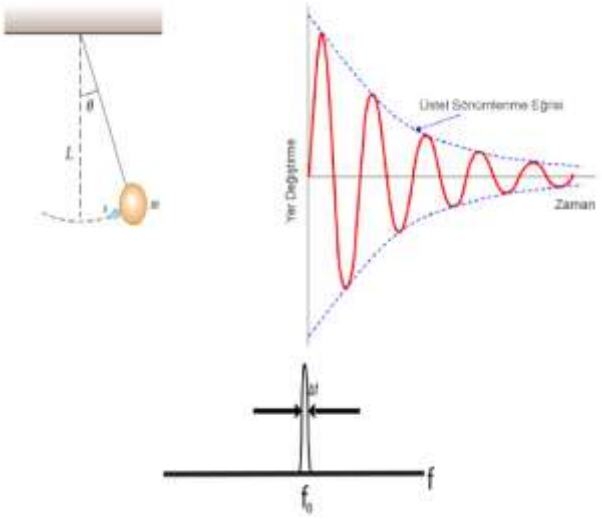
göstermiştir. 1962'de Robert Hall galyum arsenikten yapılan ve 850 nm dalga boyunda ışınım yapan ilk lazer diyotu geliştirmiştir.

Lazerlerin çok geniş çeşitleri olmasına rağmen, temel çalışma prensibi bütün lazerler için aynıdır. Lazerleri birer optik osilatör olarak da kabul edebiliriz. İdeal bir ösilatör, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, çok uzun süre kesilmeden, fazı ve genlik çarpanı değişmeden sürekli salınım yapan sistemlerdir. Bu özellikler sayesinde, frekans bölgesinde merkezi dalga boyuna bağlı olarak değişen delta dirak fonksiyonudur.



Şekil 2.4 İdeal osilatörün zaman ve frekans çıktıları

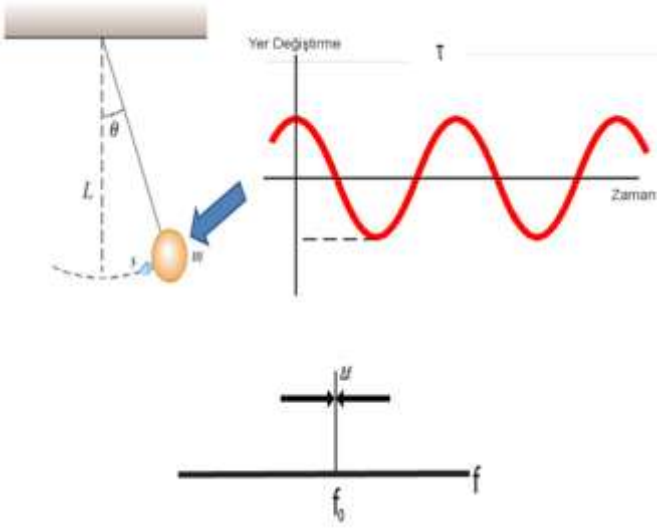
İdeal'de elde ettiğimiz delta dirak fonksiyonu, gerçekte dışarıdan etkilenen gürültüler sebebi ile Δf frekans genişliği sonsuz darlıkta olmayacaktır. Dışarıdan eklenen gürültüler ne kadar artar ise Δf o kadar artacaktır.



Şekil 2.5 İdeal olmayan osilatörün zaman ve frekans çıktıları (Serway 2005)

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, menteşedeki ve havadaki sürtünmeler gibi etkenlerden dolayı salınım, idealde olması gerektiği gibi değil; belirli bir sönümlenme faktörü ile üstel olarak sönümlenecektir. Bu sebepten, frekans bölgesinde bir delta dirak elde edilemeyecektir. Bu sarkacı ideal bir osilatöre çevirmek için dışarıdan başka bir kuvvete gerek vardır.

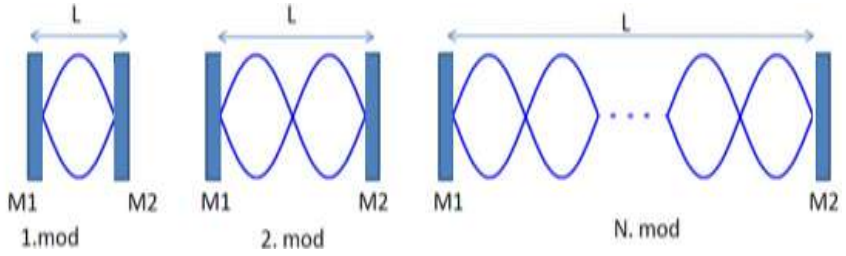
Şekil 2.6'da ideal olmayan osilatörün ideal hali görünmektedir. Şekil 2.6'daki mavi ok, sistemde oluşan gürültüleri engellemek için dışarıdan eklenen kuvvettir.



Şekil 2.6 Dış kuvvet ile ideal ösilatörün zaman ve frekans çıktıları

Bu dış kuvvet, içerideki kayıpları dengelemek için her seferinde m kütlesine uygulanmalıdır. Böylece sistemdeki kayıpların her seferinde orada olmasına rağmen, ideal bir ösilatörün çıktıları elde edilmiş olunacaktır. O halde ideal bir ösilatör için, belirli frekanslarda salınım üreten bir sisteme ve yükseltece (dış kuvvete) gerek vardır.

Optiksel ösilatör için ise ışığa salınım yaptıracak bir sisteme ve bu sistem içindeki kayıpları karşılayacak dışarıdan bir etkiye (optiksel bir yükseltece) ihtiyaç vardır. Şekil 2.7'de iki ayna arasında salınım yapan ışığın bir çok farklı modu görülmektedir.



Şekil 2.7 İdeal olmayan optiksel ösilatör ve modları

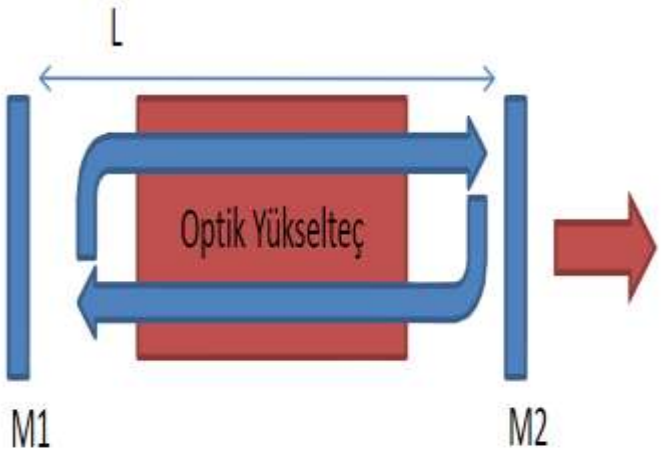
Şekil 2.7'deki iki ayna arasındaki mesafe 'L' metre kadardır. Buradan bu iki ayna arasına sığacak en büyük dalga boyunun (en temel frekans bileşeninin) c/2L olduğu görülmektedir. Bunun dışında daha büyük frekanslı bir sürü mod da bu sistemin içinde olabilir.



Şekil 2.8 N modlu ideal olmayan bir ösilatörün frekans çıktısı

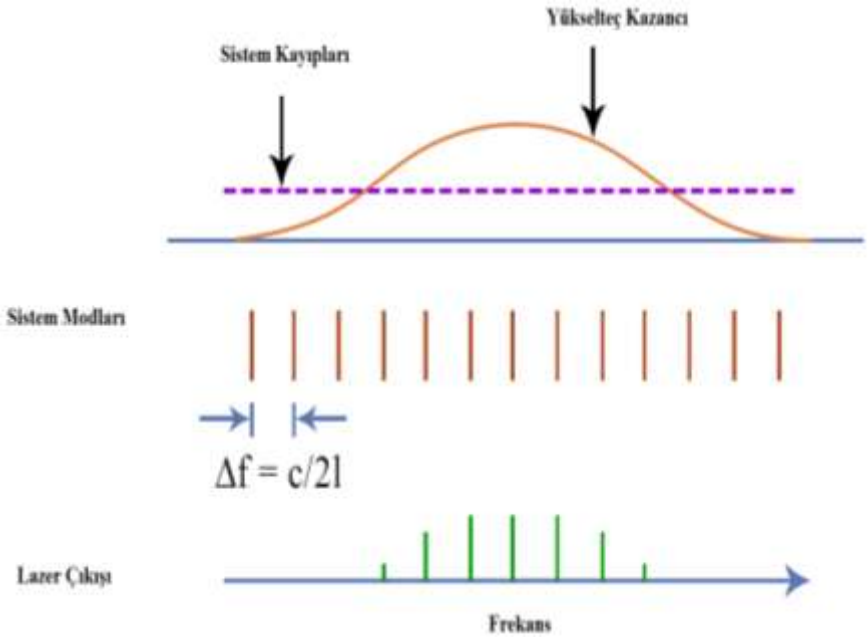
Şekil 2.8'de N tane modun içinde bulunduğu bir sistemin frekans çıktısı görülmektedir. Görüldüğü üzere, her bir mod için frekans tepkileri delta dirak fonsiyonu değildir.

Bunun nedeni aynalar arasındaki kayıplardır. Bu kayıpları engellemek için dışarıdan, kayıpları karşılayacak bir kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.9 Temel lazer yapısı

Şekil 2.9'da ideal bir optik ösilatör olan basit bir lazer yapısı görülmektedir. Sistem içindeki kayıpları engellemek için optik yükselteç eklenmiştir. Optik yükselteçler, içerideki kayıpları karşıladıkları gibi frekans bölgesi içinde bant geçirgen filtre olarak da görev yaparlar.

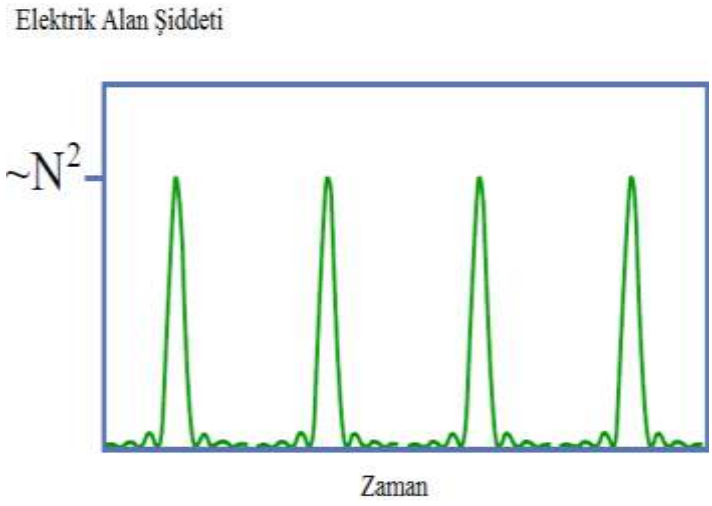


Şekil 2.10 Geniş bant aralıklı yükseltecin filtrelenmesi

Şekil 2.10'da bant aralığı geniş olan bir yükseltecin birçok modu lazerin çıkışına aktardığı görülmektedir.

Lazer çeşitleri lazer ışınımının süresine göre, atımlı veya sürekli lazerler olarak sınıflandırılırlar. Şekil 2.9'daki lazer yapısından elde edilen ideal optik osilatörün çıktısı şekil 2.4'teki gibi çok uzun süreli, bölünmemiş, genlik çarpanı sabit olan bir sinüs olacaktır. Elektrik alan olan sinüs dalgasının, karesi alınır ise şiddeti sabit bir değer olacaktır. Bu durum osilatörün sürekli modda çalışmasına karşılık gelir.

Bir optik osilatörün atımlı modda çalışması için, optik yükseltecin bant genişliğinin içindeki modların sabit bir faz ilişkisi içerisinde çalışmaları gerekmektedir. Bu olaya mod kilitlenmesi denir(referans). Mod kilitlenmesi durumundaki fazları kilitlenmiş bir sürü sinüs harmoniğinin, toplanıp kareleri alınır ise osilatörün çıkış şiddeti belirli frekanslarda atımlar olarak gözlenecektir.



Şekil 2.11 Atımlı modda çalışan lazerin zaman çıktısı

Şekil 2.11'de lazer içindeki modların sabit bir faz ilişkisi içerisinde çalışması sonucu oluşan atımlar görülmektedir. Yükseltecin bant genişliği ne kadar yüksek, içeride ne kadar fazla mod bulunur ve bu modlar sabit bir faz farkı ile çalıştırılabilir ise zaman bölgesindeki atımların genişliği de o kadar dar olacaktır.

Kazanç ortamının çeşidine göre sınıflandırılan lazerler ise birçok çeşitlilik gösterebilirler.

Gaz lazerler, lazerin kazanç ortamında düşük yoğunluklu gazların kullanıldıkları lazerlerdir. Gaz lazerler helyum, neon, argon ve karbon dioksit gibi doğal atomlar, iyonlar ve moleküllerden lazer ışığı üretmek için yapılabilirler. Farklı gazlar farklı dalga boylarında yayılım yaptıkları için, gaz lazerlerin dalga boyları 193nm (excimer lazer) den 10.7μm (karbon dioksit lazeri) kadar değişebilirler. Lazer çukurunu gaz kazanç ortamı ile oluşturduktan sonra, pompalama sistemi gaz ortama bağlı olan elektrotların boşaltılması sonucu oluşturulur. Lazer çukurunun içinde elektrik enerjisi lazer ışığına dönüşür. En yaygın gaz lazeri He-Ne lazerleridir ve 633nm de çalışırlar. Güçleri düşüktür ve bu yüzden optik hizalama, holografi ve interferometre gibi uygulamalar için kullanılırlar.

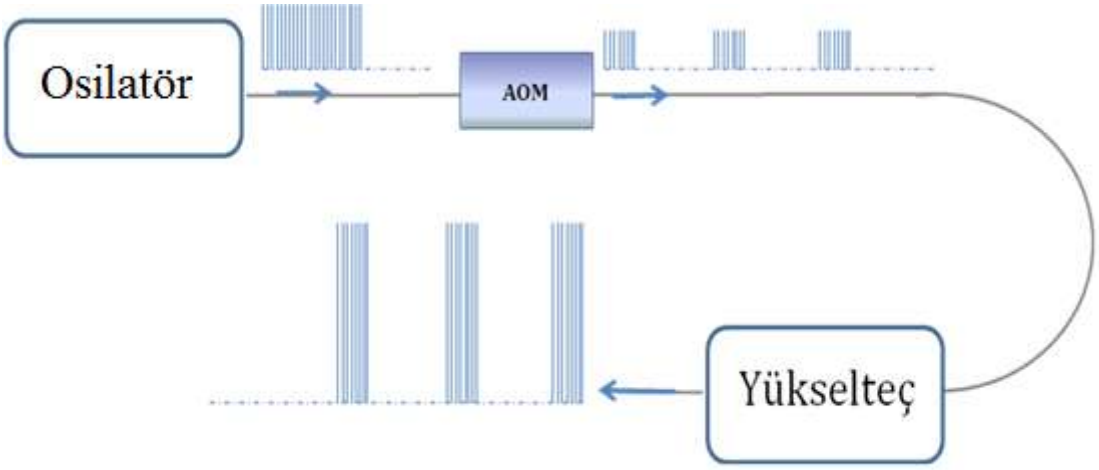
Katı hal lazerlerin kazanç ortamları yüksek yoğunluklu katı maddelerden oluşmaktadır. İyonlar, kristal veya cam olabilen ana malzemenin içine safsızlık olarak eklenirler. Toprak iyonları veya geçiş metalleri kazanç ortamı olarak tercih edilirler. Ana malzemeler silikattan yapılan camlar veya safir (Al_2O_3) ve YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) gibi kristaller de olabilirler. Ana maddesi cam olan lazerin üretim süreci kolaydır, kristal olanlar ise daha iyi ısıl özelliklere sahiptirler. Neodimyum, Nd:YVO4 (Neodimyum itriyum ortovanadat) Nd:YLF (neodimyum itriyum florür) ve Nd:YAG (Neodimyum itriyum alüminyum grena) gibi kristaller için en yaygın ek malzemedir. Çalışma dalga boyu 1060nm'dir. Nd:YAG en çok kullanılan katı hal lazeridir ve çok yaygın kullanım alanı vardır. Nd:YAG lazerlerin çıkışları kW seviyelerine kadar çıkabilir. Özellikle, metal kesme, kaynak yapma ve bunun gibi yüksek güç çıkışı gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Katı hal lazerleri hem sürekli, hem de atımlı modda çalışabilirler. Cam ek malzemeli Nd, 100 femtosaniye genişliğinde atımlar ile desteklenirler. Isıl etkiler ile dönüştürülememiş pompa gücünden dolayı katı hal lazerlerin verimleri genel anlamda düşüktür. Bu dönüştürülemeyen pompa gücü, kendisini ısı olarak açığa çıkarmaktadır. Fakat bu ısıl limitlerin kazanç ortamının geometrisinin değiştirilmesi ile üstesinden gelinebilir. İnce disk lazerleri, kazanç ortam geometrileri inceltilerek ve küçültülerek oluşturulmuşlardır ve kilo watt çıkış gücüne erişebilirler (Steven vd. 2000)

Kimyasal lazerler enerjilerini sistem içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlardan elde ederler. Çalışma dalga boyları 1300nm'den 4200nm'ye kadar değişkenlik gösterir. Hidrojen florür, bu lazer tipinin en yaygın olanıdır ve bu lazerden megawattlar seviyesinde çıkış gücü elde edilebilir. Bu tip lazerler, kesme ve delme işlemlerinde yaygın olarak kullanılırlar.

Fiber lazerler, katı hal lazerlerin özel bir türüdür. Bu lazer tipinde kazanç ortamı olarak optik fiberler kullanılırlar. Erbiyum, itebiyum, neodimyum ve tülyum gibi toprak iyonları ana maddeye takviye olarak eklenirler. Fiber lazerler kazanç ortamındaki takviye maddeye bağlı olarak farklı dalga boylarında çalışabilirler. Bu lazerler kilowattlar seviyesinde çıkış gücüne erişebilirler.

2.8 Küme Modlu Fiber Yükselteçler

Özellikle malzeme işleme ve biyomedikal uygulamalar sırasında ortaya çıkan birikmiş ısıl etkileri minimize etmek için kullanılan alternatif bir yöntem vardır. Bu yöntem, düşük frekansta (1 kHz) tekrarlanan ve içerisinde sık aralıklı atımların bulunduğu kümeler içeren (küme-modlu) yöntemdir. İlk küme-modlu fiber yükselteç sistemi 2011 yılında geliştirilmiştir (Kalaycıoğlu 2011). Bunlar aynı zamanda, femtosaniye atımlı ilk küme modlu lazerlerdir. Katı hal lazer teknolojisini kullanan küme modlu lazerler uzun bir süredir bulunmaktadır. Ancak bunlar nanosaniye ve pikosaniye sistemlerdir. Bu sistemlerin başlıca örnekleri W. Lempert'in liderliğinde yapılan çalışmalarda geliştirilmiş ve uygulamalarda kullanılmış olan Nd:YAG lazer-yükselteç sistemleridir (Wu vd. 2000, Wu vd. 2000, Jiang vd. 2009). Bunlar 9 Hz ila 50 kHz küme tekrar frekanslı, 10 ila 400 mJ atım enerjisi ve küme içerisinde 1 ila 99 adet mikrosaniye mertebelerinde genişliği olan atımlar üreten sistemlerdir. Bu sistemler, aeronotik alanında gaz akımlarının görüntülenmesi, yanma ve infilak gibi olayların teşhis edilmesini kapsayan çalışmalarda kullanılmıştır. Ancak küme modundan faydalanmak için atımlar arasındaki sürenin çok daha kısa olması gerekmektedir. Nitekim bu çalışmalarda görüntülemedeki zamansal ve uzaysal çözünürlüğün arttırılabilmesi için küme içerisinde daha yüksek enerjili ve daha sık aralıklı atımlara ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.12 Küme modlu lazer yükselteç sisteminin genel görünümü

Şekil 2.12'de küme modlu fiber yükselteç sisteminin genel görünümü verilmiştir. Her küme eşit sayıda atım içerir ve atımların tekrar frekansı kaynak osilatör tarafından belirlenir. Küme-modlu yükselteç sisteminde, kaynak lazerden çıkan yüksek tekrar frekanslı sürekli atım dizisi, bir akusto-optik modülatör vasıtası ile istenen frekansta tekrarlanan atım kümelerinedönüştürülür. Bu atım kümeleri yükselteçlerden geçirilerek güçlendirilir ve yüksek enerjili atımlar içeren küme-modlu lazer ışını elde edilir. Bu tez çalışmasında kullanılacak olan küme atımları, Bilkent Üniverstisi Ultra Hızlı Optik ve Lazerler Laboratuvarında Dr. Hamit Kalaycıoğlu tarafından geliştirilen küme modlu fiber lazer yükselteci tarafından üretilmektedir (Kalaycıoğlu vd. 2012).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Sahada programlanabilir kapı dizileri

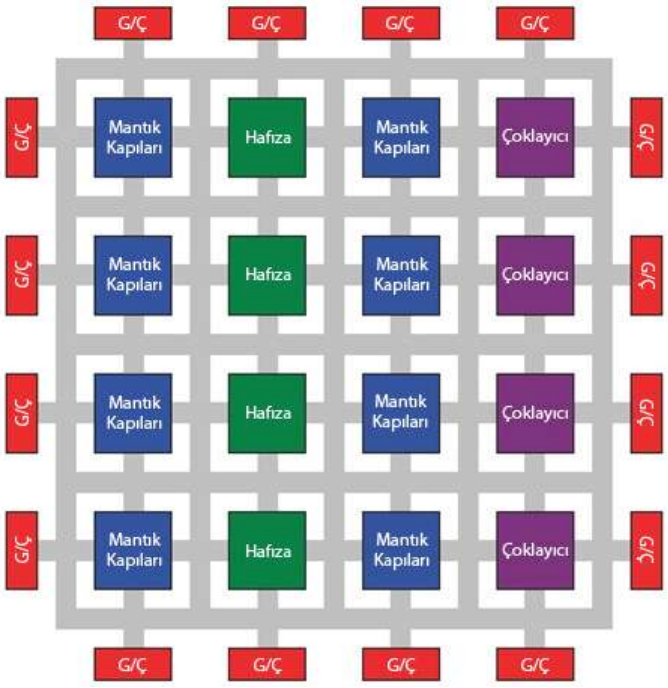
İlk tümleşik devreler 1960'ların başlarında üretilmiştir. SSI (Küçük ölçekli bütünleşik) olarak adlandırılan bu devreler, bir çip içerisinde 100 transistörden daha az transistör ile üretilmişlerdir. 1960'ların sonlarında geliştirilen MSI (Orta ölçekli bütünleşik) olarak adlandırılan devlerler ise bir çip içerisinde birkaç yüz transistör ile üretilmişlerdir. 1970'lerin ortalarında ise LSI (Geniş ölçekli bütünleşik) devreleri yine bir çip içerisinde birkaç bin trasistör barındıracak şekilde geliştirilmişlerdir. Bir çip içerisinde 100.000 transistör içeren VLSI (Çok geniş ölçekli bütünleşik) devreler ise 1980 sonlarına doğru geliştirilmişlerdir. Günümüze kadar üstel bir şekilde artan bu sayı, 1980'ların sonunda 1.000.000, 1990'ların ortasında 10.000.000, 2004'te 100.000.000, günümüzde ise 1.000.000.000.000 aşan rakamlara ulaşmaktadır.

FPGA (Sahada programlanabilir kapı dizileri), programlanabilir mantık blokları ve bu bloklar arasındaki ara bağlantılardan oluşan ve geniş uygulama alanlarına sahip olan sayısal tümleşik devrelerdir. Tekrar tekrar programlanabilme özelliği nedeniyle, prefabrik olarak adlandırılabilen ve silikondan yapılan bu aletler, içerilerine gömülen programın yapısına göre herhangi bir sayısal sistem veya devrenin yerini alabilirler. FPGA'lerin geleneksel sabit fonksiyonlu ASIC'ler (Uygulama özellikli bütünleşik devre) üzerlerinde önemli sayılacak üstünlükleri vardır. Geleneksel ASIC'de ilk cihazın üretilmesi için fabrikada aylarca vakit ve ek olarak milyonlarca doların harcanması gerekmektedir. FPGA'ler ise birkaç dakikada programlanabilirler. Maliyetleri ise birkaç yüz dolar ile birkaç bin dolar arasındadır. FPGA'lerin bir diğer avantajı ise ilk programlamada bir hata yapıldığında, çok kısa sürede ve kolayca yeniden düzenlenilebilmeleridir.

FPGA'lerin esnek yapısının avantajları olduğu gibi bu yapının sebep olduğu bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri; kapladığı alan, hız ve güç gereksinimi gibi dezavantajlardır. Bir FPGA standart bir ASIC ile karşılaştırıldığında 20 den 35 kata kadar daha fazla yer gereksinimi duymaktadır. Yine standart bir ASIC ile karşılaştırıldığında bir FPGA 3 veya 4 kat kadar daha yavaştır ve 10 kat daha fazla güç gereksinimi vardır (Kuon ve Rose 2007).

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi FPGA'ler programlanabilir mantık blokları, hafıza ve çoklayıcı blokları ve bu blokları çevreleyen aralarında programsal olarak iletişimi gerçekleyen bir yapı tarafından çevrelenmişlerdir. Şekil 3.1'de görülen G/Ç olarak etiketlenmiş kısımlar ise, mantık bloklarını çevreleyen, dış dünyadan alınacak girdileri veya dış dünyaya verilecek program çıktılarını temsil etmektedirler.

FPGA'deki "programlanabilir" terimi, fabrikasyon üretimi gerçekleştirildikten sonra çipin fonksiyonunu belirleyen programın değiştirilme kabiliyetine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da çipin sahada programlanmasını mümkün kılmaktadır ve "sahada" terimi, bu özelliğinden gelmektedir.

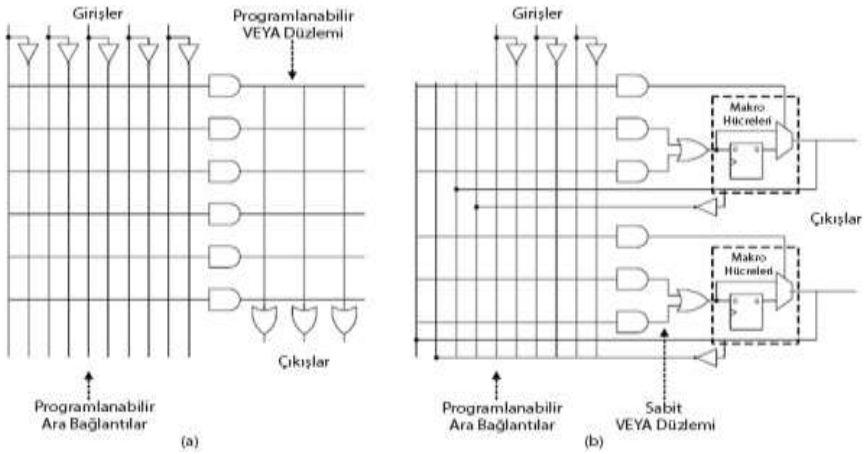


Şekil 3.1 Temel FPGA mimarisi (Kuon ve Rose 2007)

Tarihsel gelişim: Günümüz FPGA'lerinin temeli 1960'ların başında geliştirilen bütünleşik devrelere dayanmaktadır. İlk programlanabilir aletler, mimari düzenlilik ve fonksiyonel esneklik getirmişlerdir. Hücresel diziler (Minnick 1967) genel olarak sabit basit mantık hücrelerinden oluşup, noktadan noktaya haberleşirler. Bu Maitrakaskat (Maitra 1962) gibi ilk hücreler, iki girişli mantık fonksiyonunu uygulamak için, üretim sırasında metalizasyon yöntemi ile programlanabilen mantık kapılarına sahip olmuşlardır.

1960'ların ortalarında, sahada programlama, yani fabrikasyondan sonra programlanabilme yeteneği, kesim noktası hücresel dizilerin geliştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir (Minnick 1967). Dizinin elemanları arasındaki bağlantılar sabit olmasına rağmen, dizideki her bir mantık hücresinin fonksiyonu, programlanabilir mantık sigortaları tarafından belirleniyordu. Bu sigortalar, program akımları ve foto iletim etkisi sonucu alanda programlanabilmişlerdir (Minnick 1967). Sonuç olarak, saha düzenlemeleri, basitleştirilmiş hücre üretimi ve daha geniş uygulamaların gelişmesine yol açmıştır.

1970'lere gelindiğinde, programlanabilir yapılar ile üretilen salt okunur bellekler (ROM) mantık fonksiyonlarının uygulanması için yeni bir yöntem sağladılar. İlk programlanabilir mantık dizileri (PLAs), iki seviyeli ('ve' ve 'veya' kapıları) mantık düzleminde geliştirildiler. Şekil 3.2'de PLA ve PAL yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2 PLA ve PAL yapıları(Kuon ve Rose 2007)

İlk statik hafıza tabanlı FPGA (genel olarak SRAM tabanlı FPGA olarak geçer) Oscar Wahlstrom tarafından 1967 yılında icat edilmiştir. Bu yapı, yapılandırılmış bit akışı ile hem mantıksal hem de iç bağlantılı yapılandırmayı mümkün kılar. Çağdaş hücresel dizi meslektaşlarının aksine, fazla girişli mantık fonksiyonları ve depo elemanları her mantık hücresinde uygulanabilirler. Statik hafıza, cihaz programlama için en esnek yaklaşımı önerse de, salt okunur bellekler (ROM) ile karşılaştırılırsa programlanabilen her anahtar ile gerekli olan alan önemli derecede artmaktadır. 1980'lerin ortalarında transistör başına düşen maliyetin azalmasına kadar, bu durum statik hafıza tabanlı cihazların üretilememesindeki en büyük etken olmuştur.

İlk modern tarzda FPGA 1984'te Xilinx tarafından geliştirilmiştir (Carter vd. 1986). Bu cihaz şimdikinin klasik yapılandırılabilir mantık bloklarını içermekteydi. İlk FPGA 64 mantık bloğu 58 giriş ve çıkıştan oluşmaktaydı (Carter vd. 1986). Şuan ki modern FPGA'ler 330.000 mantık bloğu, 1100 giriş ve çıkıştan (Anonymous 2011, Anonymous 2013) oluşmaktadırlar.

FPGA programlama teknolojileri: FPGA teknolojisinin altında programlanabilir anahtarların kontrolü yatar ve bu kontrol FPGA'e programlanabilirlik yeteneğini verir. Birçok değişik programlama teknolojisinin, programlanabilir mantık mimarisine değişik etkileri bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan bazıları, silinip programlanabilir salt okunur bellek (EPROM) (Frohman 1971), elekronik olarak sinilebilir programlanabilir salt okunur bellek (EEPROM) (Scheibe ve Krauss 1980, Cuppens vd. 1985), flash (Guterman vd. 1979), statik hafıza (Carter vd. 1986) ve anti-sigorta (Birkner vd. 1992, Hamdy vd. 1988) gibi yaklaşımlardır. Bu yaklaşımlardan sadece flash, statik hafıza ve anti-sigorta yaklaşımları geniş bir şekilde mordern FPGA'lerde kullanılmıştırlar.

SRAM programlama teknolojileri: Statik hafızalı hücreler, Xilinx, Lattice ve Altera gibi cihazlarda kullanılan SRAM programlama teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Bu cihazlarda görülen statik hafıza hücreleri FPGA boyunca, yapılandırmayı sağlamak için yayılmışlardır. SRAM programlama teknolojisi, iki çok önemli avantajından dolayı FPGA teknolojilerinde çok önemli yer tutmaktadır. Bu avantajlardan biri tekrar programlanabilme özelliği, diğeri ise standart bütünleyici metal oksit yarı iletken

(CMOS) teknolojisinin kullanmasıdır. Pratik olarak bir SRAM sonsuz sayıda tekrar programlanabilir. Diğer programlama teknolojilerinin aksine SRAM hücrelerinin kullanılması sayesinde, özel bir bütünleşik devre üretim adımlarından hiçbirine ihtiyaç duyulmamaktadır. Sonuç olarak, SRAM tabanlı FPGA'ler en son CMOS teknolojisini kullanırlar ve bu durum daha yüksek hız, daha düşük dinamik güç gereksinimleri gibi çok önemli faydalar sağlamaktadır.

Bunun yanında SRAM tabanlı programlama teknolojisinin, birkaç kötü yanı da bulunmaktadır;

(1) Yer: SRAM hücreleri 5 veya 6 transistöre ve ara bağlantılar için ise en az 1 transistöre ihtiyaç duyulmaktadır.

(2) Geçicilik: SRAM hücreleri üzerlerine gömülen, ayarları depolayabilmeleri için fazladan bir dış kaynağa ihtiyaç duymaktadırlar. Eğer bu ayarları depolayacak dış kaynak yok ise, cihaz güçten kesildiğinde bütün ayarlar silinecektir. Bu flashlar veya EEPROM aletleri SRAM tabanlı FPGA'lere fazladan bir maliyet de katacaklardır. Bu şekilde ana çipini SRAM cihazı olarak kullanan fakat üzerinde flash hafızası olan cihazlar da bulunmaktadır.

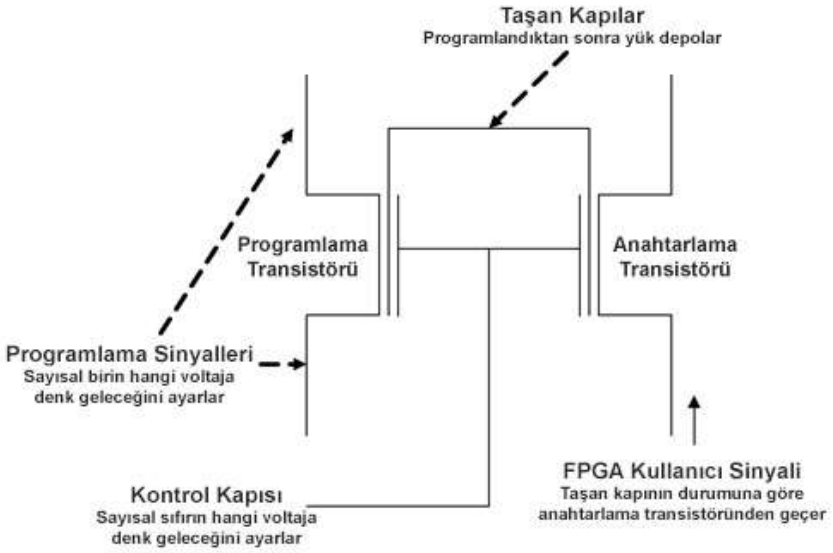
(3) Güvenlik: SRAM hücrelerindeki ayarlar, cihaza her güç verilişinde tekrar yüklenmesi gerektiğinden, bu ayarların rakip bir sistem tarafından çalınması veya bozulması olasılığı yükselmektedir.

(4) Geçiş transistörlerinin elektriksel özellikleri. SMRAM tabanlı FPGA'ler geçiş transistörlerinin çoklayıcıları kontrol etmesine bağlı olarak çalışırlar. Fakat bu transistörler, bu devrelerde kapasitif yüklerde ve dirençlerde olduğu gibi iyi birer anahtar elemanları değillerdir. FPGA'ler daha küçük geometrilere doğru yönlendirildikçe, bu transiströlerin elektriksel özellikleri daha kötüye gitmektedir.

Flash veya EEPROM programlama teknolojileri: FPGA'ler için başka bir alternatif de taşan kapı programlama teknolojisinin kullanılmasıdır. Bu teknoloji yükleri taşma kapısı denilen kapıda depolayarak, SRAM'lerin geçici olma özelliklerini ortadan kaldırırlar. Yani cihazın gücü kesildiğinde, cihaz üzerindeki bilgi kayıp olmaz.

Aslında ilk olarak EEPROM hafıza hücreleri direk olarak FPGA sinyallerini kilitlemek için değil de, daha çok programlanabilir mantık cihazları (PLD) tarzı cihazlarda 've' kapıları gibi fonksiyonları yüklemek için kullanılmıştırlar (Brown vd. 1992). Modern bütünleşik devre (IC) süreci ile, taşan kapı hücreleri anahtar olarak kullanılmaya başlandı. Bununla beraber flash hafıza hücreleri, sahip olduğu kapladığı alan etkinliği sayesinde çokça kullanılmaya başlandı.

Şekil 3.3'te Actel'in ProASIC aletinde de kullanılan flash tabanlı yaklaşım gösterilmiştir (Speers vd. 1999).



Şekil 3.3 Taşan kapılı transistör (Kuon ve Rose 2007)

Flash tabanlı programlama teknolojisi birkaç önemli avantaj sağlar ve bu avantajlardan en önemlisi, daha önce de bahsedildiği gibi kalıcılıktır. Bu özellik sayesinde Flash tabanlı programlama teknolojisinde, SRAM teknolojisinde kullanılan, tasarımı yüklemek ve saklamak için gerekli olan dış kaynaklara gerek kalmayacaktır. Yine Flash tabanlı programlama teknolojisinin kullanıldığı cihazlarda, tasarımı yüklemek için her seferinde beklemek yerine, cihaza güç verildiğinde hiç beklenmeden cihaz işlevini yerine getirecektir. SRAM tabanlı programa teklojisinde programlanabilir hafizayı yüklemek için en az 6 transistör gerektiği için flash tabanlı yaklaşımda alan kullanımı daha azdır.

Flash tabanlı programlama teknolojilerinden dezavantajlarından birisi sınırsız sayıda programlanabilme özelliğine sahip olmamasıdır. Oksit şarj birikimi eninde sonunda flash tabanlı bir cihazda programın düzgün bir şekilde yüklenmesini ve silinmesini engelleyecektir (Pavan 1997). Şuan Actel ProASIC3 gibi bu teknoloji ile çalışan cihazlar, yaklaşık olarak sadece 500 defa program yükleme ve silinme döngüsünü tamamlayabilirler(Anonymous 2005). Bu rakam birçok FPGA için yeterince iyi bir rakamdır. Çünkü çoğu FPGA tasarım aşamasında eksiklikleri gidermek için birkaç kez programlanarak, kullanıma hazır hale getirilirler.

Son yıllarda flash depolama tekniği ve SRAM programlama tekniği birleştirilerek yeni bir teknolojiye eğilim gösterilmiştir (Leventis 2004). Altera, Xilinx ve Lattice'in ürettiği bu cihazlarda, çip üzerinde kalıcılığı sağlamak için bir flash bellek ve programlamayı kontrol etmek için SRAM hücreleri kullanılmıştır. Bu tasarım, Flash depolama tekniği sayesinde, SRAM tabanlı programlama teknolojisinin getirdiği fazladan depolama cihazı gereksinimi ve güvenlik gibi dezavantajları ortadan kaldırırken, SRAM tabanlı programlama teknolojisinin getirdiği sınırsız sayıda yeniden programlanabilme avantajını da korur. Bu cihazların programlama teknolojisi SRAM hücrelerine dayandığı için, FPGA mimarisi açısından SRAM tabanlı cihazlardan hiçbir farkı yoktur.

Anti-sigorta programlama teknolojisi: Anti-sigorta Programlama Teknolojisi, SRAM ve taşan kapı tabanlı programlama teknolojilerine alternatif olarak gösterilebilir. Bu teknoloji, normal koşullar altında çok yüksek direnç gösteren fakat düşük dirençli bağlantılar oluşturmak için programsal olarak şişirilebilen (gerçekte de, bağlı) yapılara dayanır. SRAM ve kayan kapı programlama teknolojilerin aksine bu teknolojideki bağlantı kalıcı bir bağlantıdır. Programlanabilen parça, bir anti-sigorta, FPGA sinyallerini iletmek için kullanılır. Dielektrik anti-sigortalar, N tipi yarı iletken madde ile polisilikon arasında yer alan oksit-nitrit-oksit dielektrik yaklaşımından oluşurlar (Hamdy vd. 1988). Yüksek voltajın uygulanması ile dielektrik bozularak 100 ile 600 ohm arasında direnci olan iletken bir linke dönüşür (Chen vd. 2006) (Ho vd. 2006). Bu dielektrik yaklaşımı, metal-metal tabanlı anti-sigortalarda çokça kullanılmışlardır. Aynı şekilde uygulanan yüksek voltaj, anti-sigortayı bozarak, sigortanın iletilmesine sebep olur. Metal-metal anti-sigorta'ların avantajı ise, oluşan bağlantıların direncinin 20 ile

100 ohm arasında olmasıdır (Shih vd. 1997). Bu metal-metal yaklaşımı Actel'den QuickLogic'e kadar son dönem FPGA'lerde kullanılmaktadır.

Anti-sigorta teknolojisinin en önemli avantajı, düşük alan gereksinimidir. Metal-metal anti-sigorta yaklaşımında, bağlantıları yapmak için silikon alanına ihtiyaç duyulmaz ve bu da programlanabilir alan yükünü azaltır. Anti-sigortaların diğer bir avantajı ise; direnç ve istenmeyen kapasitans değerleri diğer programlama teknolojilerine göre düşük seviyededirler.

Bu programlama teknolojisinin önemli bir dezavantajı bulunmaktadır. Bu teknoloji, anti-sigortaları tekrar programlamak mümkün olmadığı için, ayarların değiştirilmesi gereken uygulamalarda kullanılamamaktadır. Alternatif teknolojilere kıyasla, sistem içi programlama mümkün değildir. Bunun yerine, çok usta programcılar tarafından önemli testler aşıldıktan sonra son aşamada programlar FPGA'e yüklenmelidir.

Çizelge 3.1'de üç programlama teknolojisi arasındaki farklar özetlenmiştir. İdeal bir programlama teknoloji, kalıcılık, süresiz kez tekrar programlanabilme, düşük direnç ve düşük kapasitif özellikler taşımalıdır. Fakat görülüyor ki, bu üç modern teknolojiden hiçbiri tek başına bu üç özelliği taşımamaktadır. Bu yüzden kullanılacak teknoloji, kullanım alanın ihtiyacına göre belirlenmelidir.

Çizelge 3.1 Programlama teknolojilerinin karşılaştırılması

	SRAM	Flash	Anti-sigorta
Kalıcılık	Var	Yok	Yok
Alan Gereksinimi	Yüksek (6 transistör)	Orta (1 transistör)	Düşük (0 transistör)
Tekrar Programlanma	Var (Sınırsız sayıda)	Var (Sınırlı sayıda)	Yok
Direnç veKapasitans	~500-1000 Ω ~1-2 fF	~500-1000 Ω ~1-2 fF	~20-100 Ω <1 fF

Bu tezde yapılan bütün FPGA programlama teknolojisi, SRAM ve flash tabanlı programlama teknolojilerinin birleştirilmesi ile oluşturulan ara teknolojiyi kullanan bir cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz Spartan-3E FPGA çipini kullanan, Digilent'in Basys 2 modelidir (Anonymous 2010).

3.1.2 Akusto-optik modulatör

Akusto-optik mödülatör (AOM), ses ve ışık dalgalarının birbirlerini etkilemesiyle optiksel yoğunluk, frekans, faz gibi etkenlerin değiştirilmesi için kullanan bir modülasyon yaklaşımıdır. Başka bir değişle AOM, uygun bir etkileşim ortamında, ışığın ses tarafından kırılımına dayanmaktadır.

Bir ses dalgası şeffaf bir yüzey üzerinden geçerken, kırılma endeksinde periyodik değişimlere sebep olur. Ses dalgası, madde içinde hareket eden bir dizi sıkışma ve gevşeme olarak nitelendirilebilir. Ses basıncının yüksek olduğu bölgelerde, madde hafifçe sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırılma kırılma indisinin artmasına sebep olur. Kırılma indisindeki artış küçük olmasına rağmen, sıkıştırılmış maddede yol alan ışık üzerinde büyük birikmiş etkiler yaratır.

Akusto-optik cihazların, iyi akustik,optiksel ve bunun yanında yüksek optiksel iletim özelliği olan maddelerden yapılması gerekmektedir. Şekil 3.4'te akusto-optik maddenin tipik yapısı görülmektedir.

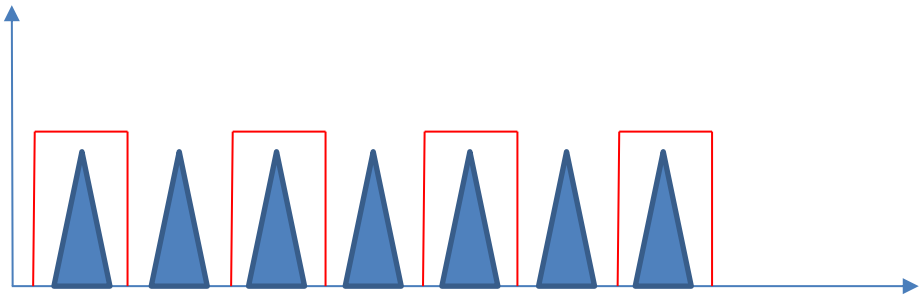


Şekil 3.4 Akusto-optik bir maddenin tipik yapısı

Ses dalgası piezoelektrik dönüştürücü tarafından üretilir. Piezoelektrik maddelere voltaj uygulandığında, fiziksel yapılarında değişikliğe uğrarlar. Piezoelektrik madde, akusto-optik malzeme ile temas halinde yerleştirilir ve yüksek frekanslı bir voltaj uygulanırsa, piezoelektrik madde, voltajın frenkans salınımına göre genişler veya küçülür.Bu da okusto-optik malzeme üzerine basınç uygular ve madde içerisinde hareket eden bir ses dalgası oluşturur.

Piezoelektrik madde iki metal tabakanın arasında bulunmaktadır (Şekil 3.4). Radyo frekans düzeyde elektrik alan, metal tabakalar elektrot olarak kullanılarak, piezoelektrik madde boyunca uygulanır. Akustik dalga daha sonra, piezoelektrik madde tarafından, akusto-optik ortama verilir. Akustik dalgalar, daha önce anlatıldığı gibi madde içinde gevşeme ve şıkışmaların sonucu indisi değiştirerek ışığın geçişini kontrol eder.

Bu tez çalışmasında, AOM'e gelen optiksel sinyal, FPGA tarafından gönderilen elektriksel sinyal ile düzenlenecektir. Bu sayede gelen sinyalin tekrar sıklığı ve optik şiddeti kontrol edilecektir. Bir örnekle açıklanmak istenir ise;



Şekil 3.5 AOM optik sinyal girişi

Şekil 3.5'teki gibi optik atımlardan bazıları, kırmızı ile gösterilen FPGA tarafından üretilen elektronik sinyallar tarafından seçilerek AOM'in çıkışına iletilir. Bu durumda AOM çıkışındaki optik sinyalin tekrar sıklığı AOM girişindeki optik sinyalin yarısına düşürülmüş olur.

AOM'ler aynı zamanda atımların ne kadar genlikte geçeceğinin de belirlenmesine yardımcı olan bir sistemdir. Gelen atımın sadece sayısal sinyaller ile'geç' yada 'geçme' değil de, ne kadarının geçmesi gerektiğini analog sinyaller ile sürülerek de ayarlayabilir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Donanım tanımlama dilleri

Son 20 yılda bilgisayar-destekli mühendislik alanındaki gelişmeler, elektronik parça ve sayısal sistem geliştirmek için harcanan zamanda, güç, ağırlık ve kaplanılan alandaki düşüşte çok önemli yer oynamıştır. Donanım tanımlama dilleri (HDL) elektronik devrelerin tanımlanması amacı ile kullanılan herhangi bir bilgisayar dilinin sınıfına verilen addır.

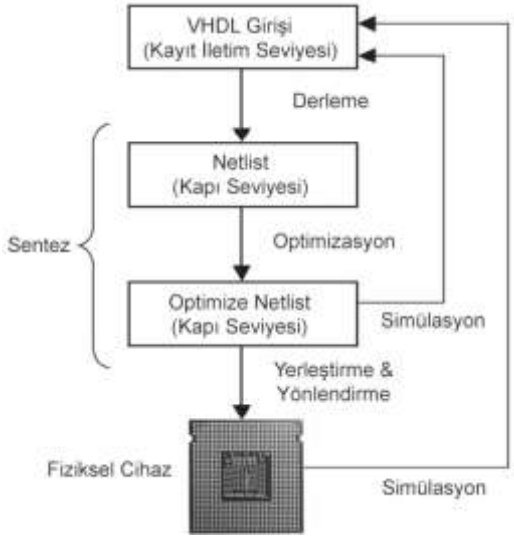
HDL, devrenin yürüttüğü fonksiyonu simülasyon yoluyla doğrulamayı gerektirir. Yazılım programlama dilinden farklı olarak, HDL'in sözdizimi ve şematiği, donanımın

birinci özelliği olan zaman ve uyumluluk gibi ifadelere yer vermektedir. Donanım tanımlama dilleri ilk zamanlarda, herhangi bir donanımın fonksiyonel özelliklerinin simülasyonunu yapmak amacı ile kullanılıyorlardı. Zamana bağlı işlem yapan simülasyon programları sayesinde bir donanım parçası fiziksel olarak üretilmeden önce tasarımcı tarafından test edilebiliyordu. Bu test edebilme özelliği sayesinde, kullanıcı HDL'i normal bir programlama dili gibi davrandığı varsayılabilir. Fakat simülasyonların dışına çıkıp, gerçek zamanlı dünyaya dönüldüğünde, HDL'in normal bir programlama dilinden çok farklı olduğu çok açıktır.

Bu çalışmada, FPGA'i programlamak için bir HDL olan çok yüksek hızlı bütünleşik devre donanım tanımlama dili (VHDL) kullanılmıştır.

Çok yüksek hızlı bütünleşik devre donanım tanımlama dili (VHDL) sayısal elektronik sistemleri tanımlamak için kullanılan bir dildir. Bütünleşik devre fonksiyon ve yapılarını tanımlamak için bir standart dile ihtiyaç duyulmuştur. Bundan dolayı çok yüksek hızlı bütünleşik devreler donanım tanımlama dili olan VHDL ilk olarak, Birleşik Devletler'de çok yüksek hızlı bütünleşik devreler programında geliştirilmiştir (Ashenden 2006).

VHDL, elektronik sistem tasarımının bütün fazlarında kullanılmak için geliştirilmiş resmi bir gösterim şeklidir (Rushton 1997). Çünkü bu dil, gelişimi, doğrulamayı, sentezi, donanımsal tasarımların testlerini, donanımsal tasarım verilerinin haberleşmesini ve donanımsal tasarımların değiştirilmesini destekleyen bir dildir (Anonymous 1998).



Şekil 3.6 VHDL tasarım akış bloğu (Pedroni 2004)

Şekil 3.6'da VHDL tasarım akış bloğu görülmektedir. Bu dil ile sistem tanımından, kodlamasına kadar her adımı tanımlanmak amaçlanmıştır. Tasarım sürecinin ilk aşamalarında, sistemin davranış modeli geliştirilir. Bu model de, zamanlamalar ve tasarımda amaçlanan görüşler tanımlanır. Daha sonra bütün olarak gelişmiş ve istenen en büyük sistemin alt sistemleri belirlenir. Bu alt sistemler ve ana sistem arasındaki bağlantıları sağlayan bir yapı modeli oluşturulur. Bu alt sistem ayrışması, tasarımın kayıt iletim seviyesine ulaşmasına kadar devam eder. Bu seviyede, kapı seviyelerine geçiş gerçekleşmektedir. Bu sebepten, VHDL kullanımında, tipik olarak tasarım sürecinin üç fazı bulunmaktadır. Bunlar: Tanım fazı, tasarım fazı ve kapı seviyesi sentez fazıdır. Kayıt-iletim modellemesi, tasarım fazında yapılırken; sistem modellemesi tanım fazında yapılmaktadır. Kayıt iletim seviye modellemesindeki kodlama ise, kapı seviyesi sentez fazında yapılmaktadır.

Standart bir VHDL kodu en az 3 temel kısımdan oluşmak zorundadır.

- Kütüphane Bildirimleri: Tasarımda kullanılacak fonksiyonları tanımlamak için, kütüphanelerin listelendiği kısımdır.
- Varlık: Giriş, çıkış pinlerinin tanımlandığı kısımdır.

- Mimari: Tasarlanmak istenilen devrenin, nasıl davranması gerektiğinin VHDL kodlaması ile anlatıldığı bölümdür.

VHDL'de kütüphane bildirmek için iki satır kod yazılması gerekmektedir. Birinci satır kütüphanenin ismini içerir ikinci satır ise birinci satırda belirtilen isimli kütüphanenin hangi paketinin çağırılacağı bir cümle ile açıklanır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 Kütüphane bildirimleri

```
LIBRARY  kütüphane_ismi;

        Usekütüphane_adı.paketin_adı.paketin_parçası;
```

Bir tasarımda genelde en azından üç farklı kütüphaneden, üç farklı paket bildirilebilir. Bu önemli kütüphane paketleri;

- İeee.std_logic_1164 (ieee kütüphanesinden)
- Standard (std kütüphanesinden)
- work (work kütüphanesinden).

Bu kütüphanelerin bildirilmeleri ise şu şekildedir;

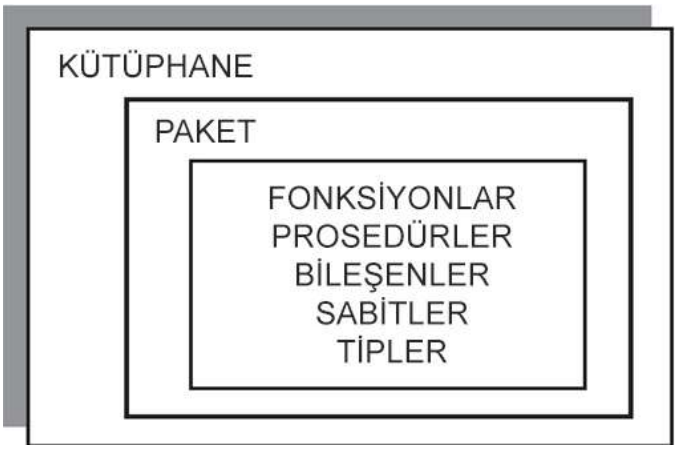
```
Library ieee;

Useieee.std_logic_1164.all;
```

ileiee.std.logic 1164 pakeri bildirilir.

```
Library std;

Usestd.standard.all;
```

ile std kütüphanesinin standard paketi bildirilir.

Kütüphanelerin bildirilmelerindeki en önemli neden içerisindeki fonksiyonları, sabitleri, prosedürleri, araçları ve veri tiplerini kullanmalarıdır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 VHDL kütüphane yapıları

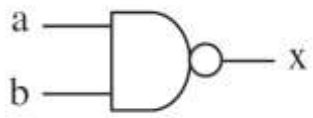
Varlık bölümü**,** bazı özellikleri ile beraber tasarlanacak devredeki giriş ve çıkışların listelendiği bölümdür.

Çizelge 3.3 VHDL varlık bölümün yazılması

```
ENTITY giriş_adı IS

        PORT(

port_adı : portun_ne_olduğusinyalin_tipi;

);

END giriş_adı;
```

Çizelge 3.3'de kalın punto ile yazılan kısımlar kodlamanın kendisinden olan kısımlarıdır. Normal puntolar ile yazılan 'portun adı', kodun diğer kısımlarında da kullanılacak olan 'değişkenin ismi'dir. Yine normal puntolar ile yazılan "portun_ne_olduğu" kısmına, sinyalgiriş ise "**in"** çıkış ise "**out"** yazılacaktır. Normal puntolar ile yazılan "sinyal_tipi" kısmına "**bit", "std_logic", "integer"** gibi değişken tipleri olabilir. Son olarak normal puntolar ile yazılan "giriş_adı" kısmına VHDL saklı kelimeleri dışında herhangi bir giriş adı kullanılabilir.

Örneğin şekil 3.8'de görülen NAND kapısının varlık kısmı çizelge 3.4'teki gibi yazılır.



Şekil 3.8 İki girişli nand kapısı

Çizelge 3.4 Nand kapısı VHDL varlık kodu

```
Entitynand_gateIS;
                    PORT(a, b: IN BIT;
x: OUT BIT);
Endnand_gate;
```

VHDL mimari kısmında, kurulan algoritmanın veya oluşturulmak istenilen devrenin nasıl davranması gerektiğinin anlatıldığı bölümdür (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 VHDL mimarı kısmının yazılması

```
ARCHITECTURE mimari_ismiOF giriş_ismiIS
    [bazı bildirimler]
BEGIN
[devrenin davranışının anlatıldığı kısım]
END mimari_ismi;
```

Çizelge 3.5'te kalın puntolar ile yazılan kısımlar kodlamanın gerektirdiği sabit kısımlardır. Normal puntolar ile yazılan "mimari _ismi" mimariye verilecek isim, "giriş_ismi" ise giriş kısmında atanan giriş ismidir. "Bazı bilidirimler" kısmında ise tasarımın giriş ve çıkışında kullanılmayacak sinyaller ve fonksiyonlar gibi değişkenler bildirilir. Mesela, mimarinin içinde kullanılacak bir sayaç, oluşturulacak devre için ne giriş ne de çıkıştır. Bu durumda bu sayacın giriş kısmında bildirilmesi yanlış olacaktır. Bu tarz değişkenlerin tanımlanması gereken yer çizelge 3.5'te görülen "[bazı bildirimler]" kısmıdır. Eğer mimarinin içerisinde böyle bir değişken kullanılmayacak ise bu kısım boş bırakılarak geçilebilir.

Çizelge 3.6 Nand kapısının VHDL mimarı kısmı

```
ARCHITECTURE tasarimimOF nand_gateIS

        BEGIN

x<= a NAND b;

END tasarimim;
```

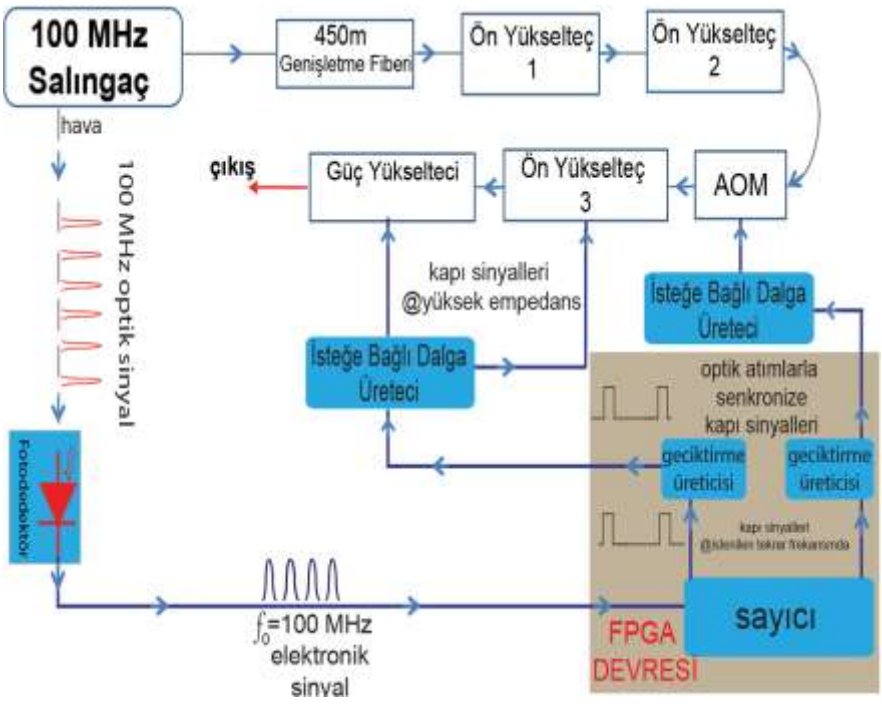
Şekil 3.8'de görülen nand kapısının VHDL mimarı kısmı Çizelge 3.6'daki gibidir. Örnekteki nand devresi a ve b girişleri ile değişen x çıkışına sahiptir.Çizelge 3.6'da a ve b "**NAND"** fonksiyonu ile nand'lenerek "<=" işareti ise x 'e atanmıştır. "<=" işareti VHDL de atama işaretidir. **"NAND"** ise daha önceki kütüphane bildirimleri bölümünde tanımlanan kütüphane fonksiyonlarından biridir. Bu örnekte olduğu gibi tasarım için herhangi bir sabit veya sinyal gerekmemektedir ve "[bazı bildirimler]" bölümü boş bırakılmıştır.

Elektronik tasarım otomasyonları: VHDL kullanarak, devre sentezi, simülasyon ve tasarımın cihaza gömülmesi gibi işlemlerin yapılabileceği birkaç elektronik tasarım otomasyonu vardır. Bu araçlardan bazıları FPGA satan firmalar tarafından sağlanmaktadır. Mesela, Altera'nın ürettiği Quartus II tasarım paketi, Altera'nın FPGA çiplerine kod sentezi gibi işlemlerin yapılmasını sağlamaktadır (Anonymous 1995).

Yine Xilinx'in Xilinx ISE paketi, Xilinx'in FPGA'lerinin sentez ve yazılımı gömme gibi işlemlerini yapmaktadır (Anonymous 1991).

3.2.2 Küme modlu fiber yükselteçlerde atım senkronizasyonu ve sentezi

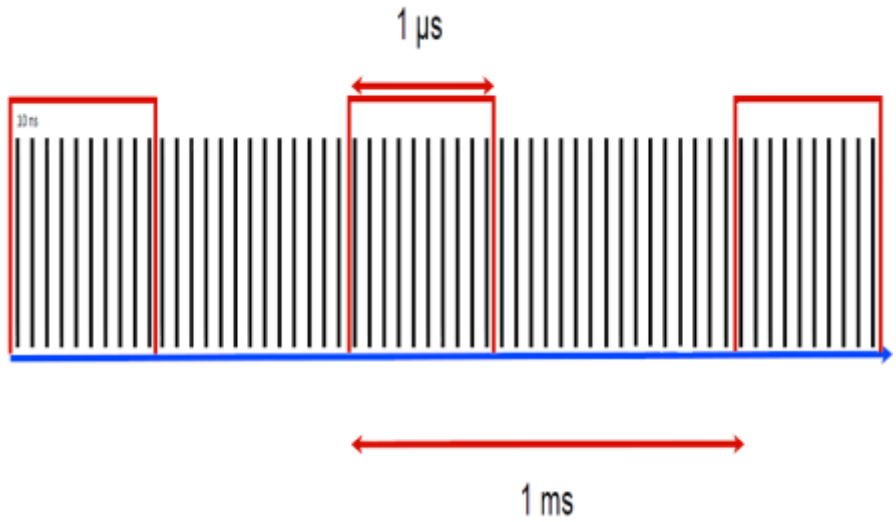
Şekil 3.9'da küme modlu fiber yükselteç sistemin şematiği görülmektedir (Kalaycıoğlu vd. 2012).



Şekil 3.9 Küme modlu fiber yükselteç sistemi

Sistem, dalga boyu 1035nm'de 85mW gücünde 100 Mhz'lik, tümüyle normal saçılımlı osilatörden çıkan atımlar ile beslenmektedir (Chong vd. 2006). İlk adımda 100 MHz tekrar frekansında osilatörden çıkan atımlar, 450 m'lik genişletme fiberine girmektedir. Bilindiği üzere atım içindeki farklı frekans bileşenleri, farklı hızlar ile giderler (dispersiyon, dağılma özelliği). Burada dispersiyon özelliğinden faydalanılarak atım genişliği, 450 m genişletme fiberinde arttırılmaktadır. Genişletme fiberi sayesinde doğrusal olmayan etkiler kontrol altında tutulmaktadır. Genişletme fiberinin başka bir faydası da atımların tepe güçlerinin, fiberin sınırlarının, zarar görme sınırları içerisinde kalmasıdır.

Genişletilmiş olan atımlar, 976 nm diyot ile sürekli modda her biri 450mW pompalanan iki optik ön yükseltece girmektedir. Bu yükselteçlerin amacı güç yükseltecini doyuma ulaştırmaktır. Bu sayede hem daha yüksek atım enerjilerine erişilecek hem de güç yükselteci doyuma ulaşana kadar gelecek düzensiz güçler engellenecektir. Bu iki ön yükselteçten sonra sinyal, küme modunun oluşturulacağı AOM girmektedir. Kullanılan AOM'nin %50 iç kaybı bulunmaktadır. Yine kullanılan AOM'nin yükselme ve düşme zamanları sırası ile 6 ve 8 ns'dir.

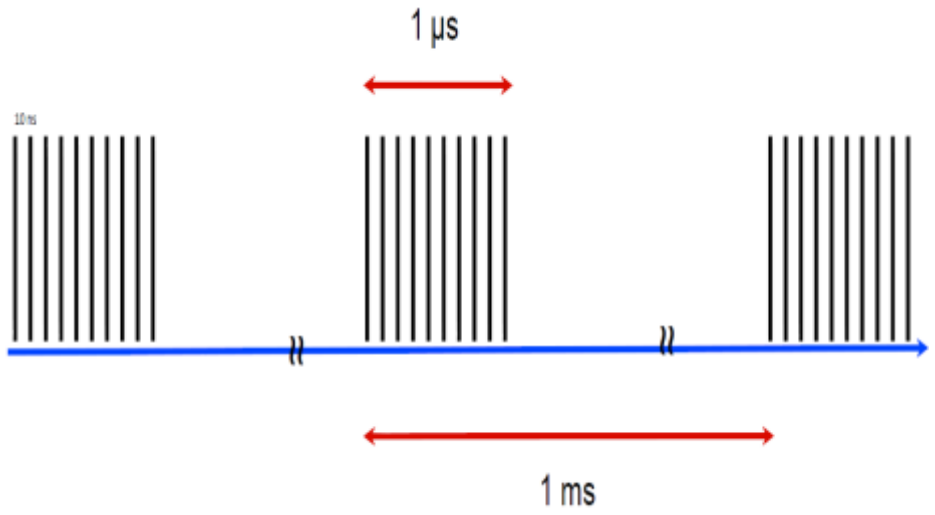


Şekil 3.10 Ön yükselteç çıktısının AOM'de küme moduna dönüştürülmesi

Şekil 3.10'da AOM'e gönderilen kapı sinyali kırmızı ile AOM girişine gelen optik sinyal siyah ile gösterilmiştir. Kırmızı ile gösterilen kare sinyaller geldiğinde AOM, gelen ışığın geçmesine izin vermektedir. Böylece kare sinyalin içinde kalan atımlar, AOM'in çıkışında görülecek, kare dalganın dışında kalanlar ise görülmeyecektir (Şekil 3.11).

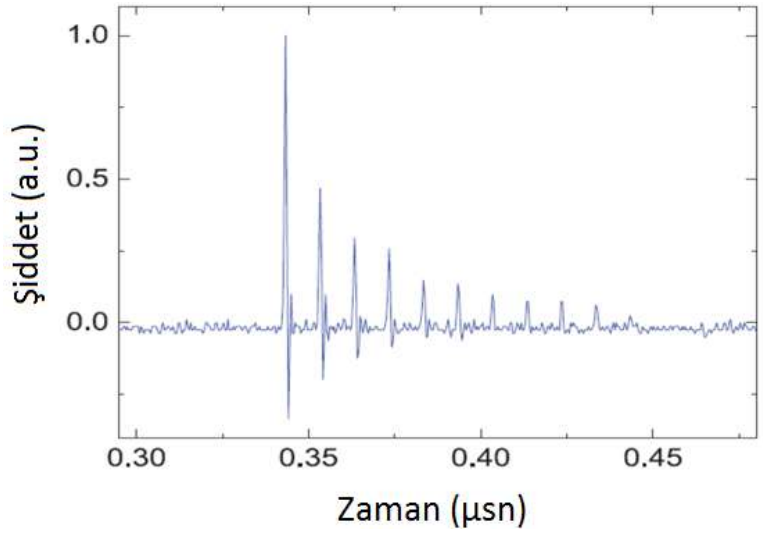
AOM çıkışında optik atımlar güç yükseltecinden önceki son ön yükseltece gireceklerdir. Bu son ön yükselteç, daha önceki ön yükselteçlerin aksine, atımlı pompa ışını ile pompalanmaktadırlar. Düşük tekrar frekansındaki küme-modlu atımları yüksek enerjilere çıkarabilmek için, atım kümelerine oranla uzun süreleri olan ve atım kümeleri ile aynı tekrar frekansına sahip olan atımlı pompa ışınının kullanılması gerekir. Buna geçici enerji depolama yöntemi denir. Tekrar frekansının 50 kHz'in altında olduğu durumlarda, fiber yükselteçlere giren sinyal gücünün genellikle ortalama değeri

düşüktür ve her durumda atımlar arasında geçen süre yükseltilmiş kendiliğinden ışıma (ASE) oluşmasına zemin hazırlar. Bu istenmeyen durumu olabildiğince azaltmak için son ön yükselteç atımlı pompa ışını ile pompalanmaktadır. Aynı mantıkla güç yükselteci de atımlı pompa ışını ile pompalanmaktadır.



Şekil 3.11 AOM çıkışından elde edilen küme modlu optik atımlar

Yüksek enerjili atımlar elde eden bir sistem ile çalışmanın getirdiği, normal yükselteçlerde hiç yaşanmayan bir başka zorluk, tek bir atımın kendi başına kazanç ortamındaki enerjisinin önemli bir kısmını boşaltabiliyor olmasıdır. Tipik bir yükselteç için çok sayıda atım birlikte kazanç ortamını boşaltabildiğinden genel kural yükseltecin ortalama güce bağlı olarak doyuma ulaşmasıdır. Bu durumda, doğal olarak pompa gücünün arttırılmasıyla, başka bir engel yaşanmaz ise, çıkış gücü de arttırılabilir. Oysaki bireysel atımların da, kazanç ortamını boşalttığı enerji seviyelerinde durum biraz daha karmaşıktır. Bunun ilk kendini belli eden etkisi küme içerisindeki ilk atımların çok yüksek kazanç görmesi, onların boşaltması sonucu sonraki atımların daha az kazanç görmesidir. Bu nedenle, normal şartlar altında küme-modlu bir sistemden elde edilen ışının içerdiği kümeler içindeki atımların enerjileri eşit bir dağılımdan uzak olacaktır.

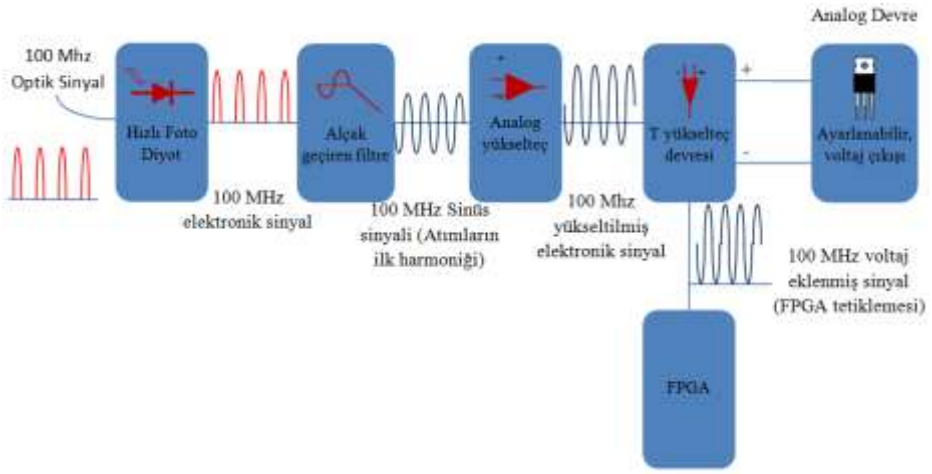


Şekil 3.12 Güç yükseltecine eşit seviyde giren atımların güç yükseltecinden çıkmış halleri

Şekil 3.12'de AOM'den eşit seviyede çıkan atımların, güç yükseltecinden çıkmış halleri görülmektedir. Bu durumda ilk atımlar, güç yükseltecindeki enerjinin çoğunu almış, bunun sonucunda sonraki atımlar ilk atımlara göre daha düşük şiddette güç yükseltecinden çıkmışlardır.

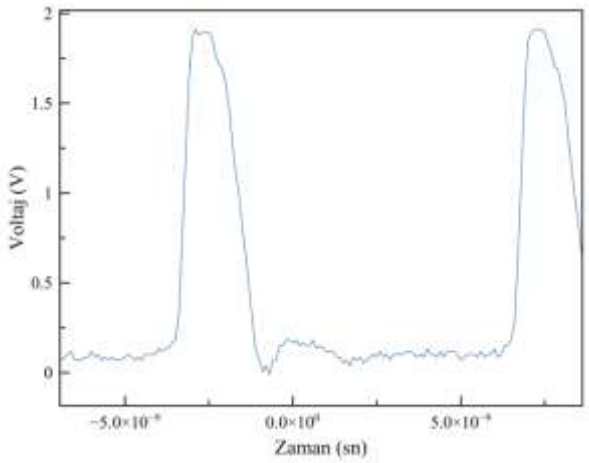
Atımların eşit dağılmayan tepe gücünün getirdiği en önemli dezavantajlardan bir tanesi, ortalama güç istenilen seviye gelmeden, atımlardan birinin tepe gücünün fiberin sınırlarını zorlayacak seviyelere ulaşmasıdır. Daha yüksek ortalama güçlere çıkmak için küme içindeki atımların enerjileri kontrol edilerek, atımların birbinine yakın enerjilerde olmaları sağlanmalıdır. Küme içindeki atım enerjisini kontrol etmenin diğer bir önemi ise, malzeme işleme gibi uygulamalarda atımların ne zaman hangi enerji ile malzemenin üzerine gönderilmesini araştırarak, atımların malzeme üzerindeki etkisini maksimuma çıkarmaktır.

Atımların enerjilerini kontrol edebilmek için şekil 3.13'te görülen FPGA elektroniği sistemi geliştirilmiştir.Bu elektronik sistemdeki ana mantık, 100 Mhz çıkışındaki optik atımlar ile elektronik sistemi senkronize etmektir. 100 Mhz optik osilatörden çıkan atımlar birkaç ps atımlardır. Bu atımlar elektronik bir dedektör ile elektronik sinyale dönüşmektedirler.



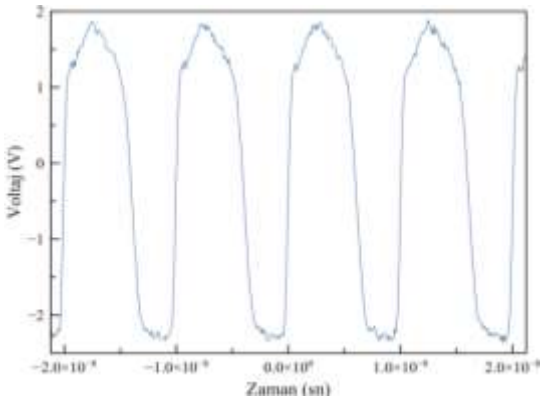
Şekil 3.13 FPGA'i tetiklemek için kullanılan elektronik sistem

Kullanılan FPGA'in dışarıdan tetiklenebilmesi için en az 3-4 ns civarında düzgün bir yükselen kenarlı, voltaj seviyesi olarak transistör transistör mantık (TTL) seviyesinde bir sinyal gerekmektedir. Dedektörden çıkan elektronik sinyal hem yükselen kenar hem de voltaj seviyesi bakımından FPGA'i tetiklemek için uygun değildir. Şekil 3.14'te görülen sinyal, önce 140 Mhz'lik bir alçak geçirgen filtreden geçirilmiştir. Bu filtreleme sonucunda daha hızlı, yani daha düşük yükselme zamanına sahip harmonikler filtrelenecek ve sadece ilk harmonikler kalacaktır.



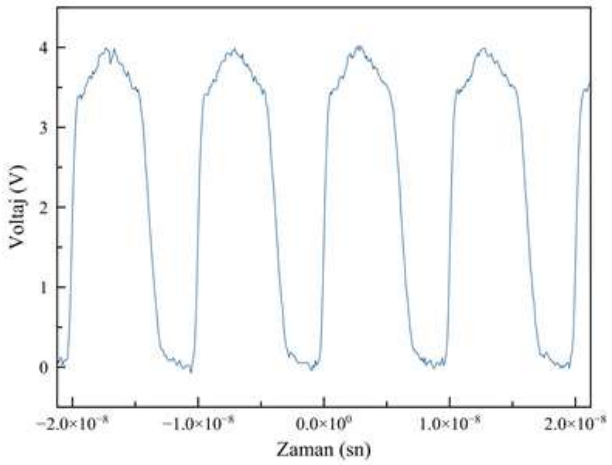
Şekil 3.14 Dedektörden çıkışındaki elektronik sinyal

Filtrelemenin sonucunda sinüs benzeri, bir kısmı negatif bölgede olan bir sinyal oluşacaktır. Bu sinyal, yükselen kenar bakımından FPGA'i tetiklemek için uygundur. Fakat genlik bakımından halâ FPGA için uygun seviyelerde değildir. Elektronik yükselteçler kullanarak sinyal 3.3 V seviyelerine, yani transistör transistör mantık seviyelerine uygun hale getirilmiştir. Elektronik yükselteç çıkışındaki sinyal Şekil 3.15'de görülmektedir.



Şekil 3.15 Elektronik yükselteç çıkışındaki sinyal

Şekil 3.15'teki sinyal, genlik ve yükselen kenar bakımından FPGA için uygundur. Fakat sinyalin yükselen kenarı negatif bir genlikten başlayıp pozitif bir genliğe çıkmaktadır. Negatif genlikli bir sinyal ise FPGA girişi için ugun değildir. Bu sinyali uygun hale getirmek için bir t ağacı kullanılmıştır. Bu t ağacı kendisine uygulanan voltaj kadar, giriş sinyalini yükseltmektedir.

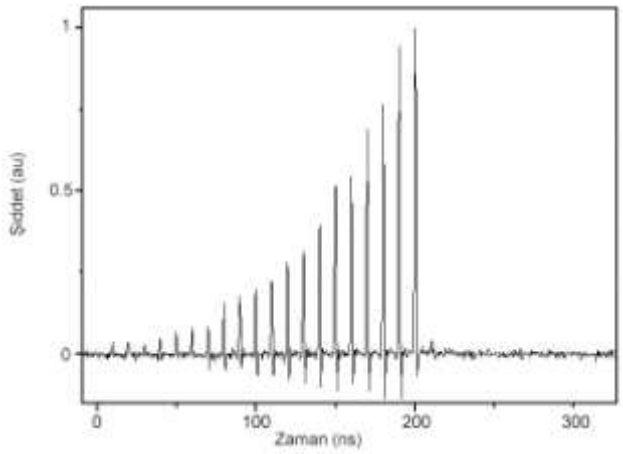


Şekil 3.16 T ağacı çıkışındaki elektronik sinyal

T ağacı çıkışındaki tamamı pozitif bölgede ve yükselen kenar bakımından da uygun bir sinyal elde edilmiştir (Şekil 3.16).

Belirli ön işlemden geçmiş elektronik sinyal FPGA için 100MHz'lik bir dış saat olmuştur. Bu dış saat, FPGA içerisinde belirli sayıcıları sayarak 1 kHz'lik sinyaller üretecektir. Daha sonra geciktiriciler ile, optik sinyalin AOM'ye gelme süresi ve elektronik kablolardan oluşan gecikmeler hesaba katılarak oluşturulan kHz'lik sinyallere gecikme verilmektedir. Böylece isteğe bağlı dalga üreteçlerine tetiklenme sinyalleri osilatör ile senkronize olmuş şekilde gönderilmektedir.

Homojenizasyon süreci: İsteğe bağlı dalga üreteçleri, gelen her tetiklemede AOM için istenilen analog sinyali göndermektedir. AOM'e gönderilen 1kHz tekrar sıklığındaki analog sinyal, AOM'den çıkan ışığın sadece tekrar sıklığını değil, enerjilerini de modüle etmektedir.

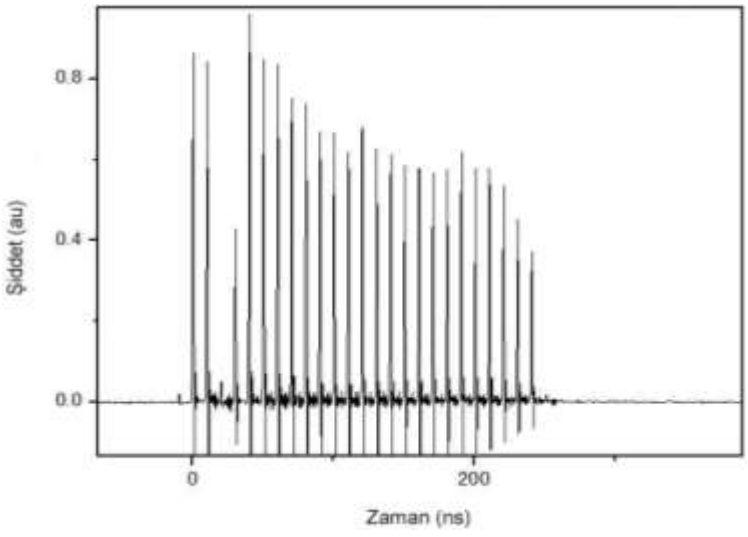


Şekil 3.17 Güç yükseltecine eşit giren atımların güç yükselteci çıkışındaki şiddetleri

Daha önce de bahsedildiği gibi, güç yükseltecine gönderilen eşit tepe gücündeki atımlar, Şekil 3.17'de görüldüğü gibi eşit olarak çıkmamaktadır. Bu atımların homojenize (eşit seviyede) olarak güç yükseltecinden çıkmaları için, AOM'den belirli bir şekil ile çıkmaları gerekmektedir. Bu şeklin belirlenmesi homojenizasyon süreci ile gerçekleştirilmektedir. Homojenize atımlar için, analog sinyalin belirlenmesinde bir kaç önemli nokta bulunmaktadır. İlk olarak, homojenizasyon sürecinin daha hızlı ilerlemesi

için başlangıç sinyalinin uygun seçilmesi gerekmektedir. Bu sinyalin ise üstel olması gerekmektedir. Çünkü, güç yükseltecine eşit seviyede giren atımlar, yaklaşık olarak üstel bir şekil ile çıkmaktadırlar (Şekil 3.17). Bu yüzden açıkça görülüyor ki, güç yükseltecine gönderilmesi gereken kümenin ilk atımları çok düşük, son atımları ise çok yüksek olmalıdır. Optik güç yükseltecine böyle giren bir kümenin ilk giren atımları daha fazla, son giren atımlar daha az enerji çekerek yükselteç çıkışında aynı seviyede olacaktır. Sinyalin uzunluğu, optik osilatörün atım sıklığına bakılarak, kümenin kaç atım ile oluşturulmak istenmesine bağlıdır. Küme içindeki atımların sayısı uygulama sırasında (malzeme işleme vb. uygulamalar) değiştirilmek istenmedikçe, bu uzunluk bütün homejenizasyon süreci boyunca sabit kalmalıdır. Yine sinyalin üst limit ve alt limit değerlerine, AOM'in veri sayfasına bakılarak karar verilmiştir. %100 geçirgenlik (üst limit) için AOM'in maksimum güç limitleri düşünülerek 1.1 V civarı seçilmiştir. Alt limit için ise 0 V seçilmiştir.

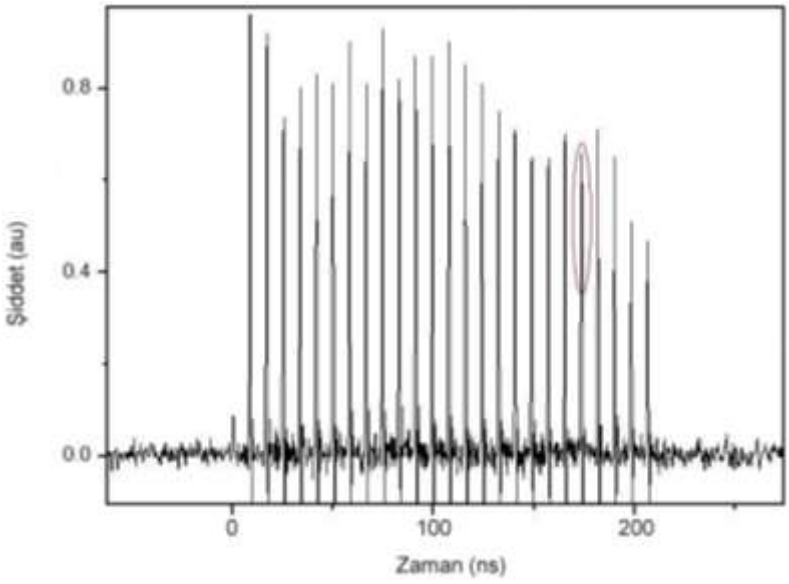
Sinyalin başlangıç şekli belirlendikten sonra, ikinci olarak genellikle sinyalin hangi kısmının atım kümesinin hangi kısmını etkilediğini bulmak gerekmektedir. Bunu anlamak için sinyalin osilatörün tekrar sıklığı kadar bir kısmı sıfır yapılmış diğer kısımları aynı bırakılmıştır. Bu işlem teker teker sinyalin bütün bölümleri için yapılmış, çıkan sonuçlar ile analog sinyalin hangi kısmının, hangi optik atımları etkilediği öğrenilmiştir.



Şekil 3.18 Belirli bir atımı engellenmiş atım kümesi

Şekil 3.18'de, AOM'e gönderilen analog sinyalin belirli bir kısmı sıfır yapıldığında, oluşan belirli bir atımın tamamen, diğer atımın ise kısmen engellenmiş olduğu görülmektedir. Daha sonra homojenizasyon sürecinde bu atım değiştirilmek istenirse, hangi sinyalin değiştirilmek istendiği bu şekilde belirlenmiştir.

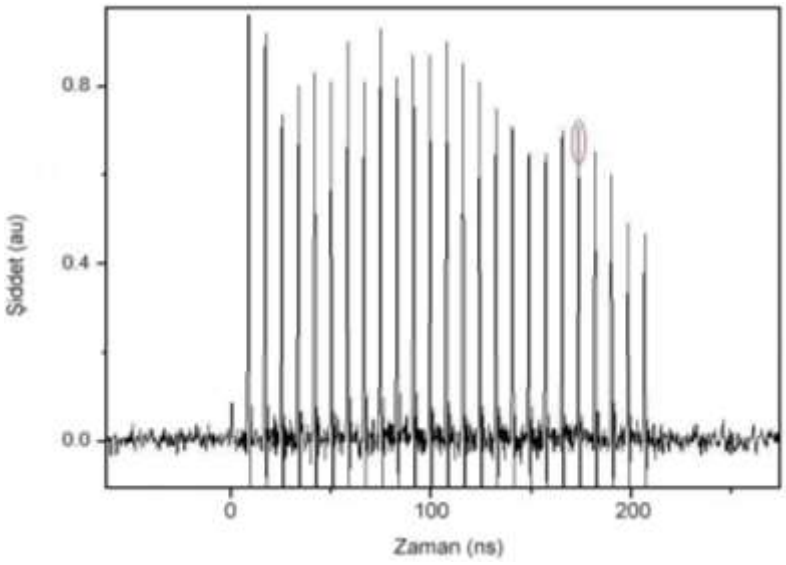
Üçüncü ve en önemli adım, enerjinin sonlara aktarılması adımıdır. Bu adım, homojenizasyon süreci sırasında dikkat edilmesi gereken bir adımdır. Periyodik olarak gelen her küme atımı için, güç yükseltecinin aktaracağı enerji sabittir. Eğer bu belirli miktarda enerji, ilk atımlarda kayıp edilirse, atım kümesinin son kısımları için yeterli miktarda enerji kalmayacaktır. Bu durumda, küme içindeki son kısımları etkileyen analog sinyal ne kadar yükseltilirse yükseltilsin, güç yükseltecinin aktaracağı enerji olmayacağı için, son kısımdaki atımlar yükseltilemeyecektir. Bu yüzden homojenizasyon işlemi, homojen olmayan son kısımları yükseltmek yerine ilk atımları düşürerek gerçekleştirilmelidir. Böylece son kısımlara enerji aktarımı gerçekleşecektir.



Şekil 3.19 Son atımlarına enerji kalmamış bir atım kümesi

Şekil 3.19'da güç yükseltecinin enerjisinin büyük çoğunluğu ilk atımlar tarafından alınmış bir küme görülmektedir. Örneğin şekil 3.19'da kırmızı ile gösterilen atımın tepe gücü yükseltilmek istensin. AOM'e gönderilen analog sinyalin bu atımı etkileyen kısmı

daha önceden belirlendiği için, bu kısım maksimuma yani 1.1V'ye çekilmiş ve sonuç elde edilmiştir.



Şekil 3.20 Küme sonundaki atımı, voltaj yükseltilmesi ile yükseltilememiş atım kümesi

Eğer güç yükselteci atımın geldiği anda yeterli enerjiye sahip olsaydı, şekil 3.20'de kırmızı ile gösterilen atımın, kümedeki en yüksek tepe gücü seviyelerine gelmesi beklenirdi. Fakat bu atım, beklendiğinden çok az bir şekilde yükselmiştir. Hatta bu yükselme sonucu kendisinden sonraki atımların tepe güçlerini de azaltmışır. Çünkü bu atım, kendinden sonraki atımlara iletilen enerjiyi de alarak, sonlara iletilen enerjiyi çok aza indirmiştir. Bu yüzden homojenizasyon süreci, atımları sürekli olarak yükselterek değil de, baştaki enerjiyi sonlara da yayacak şekilde gerçekleştirilmelidir.

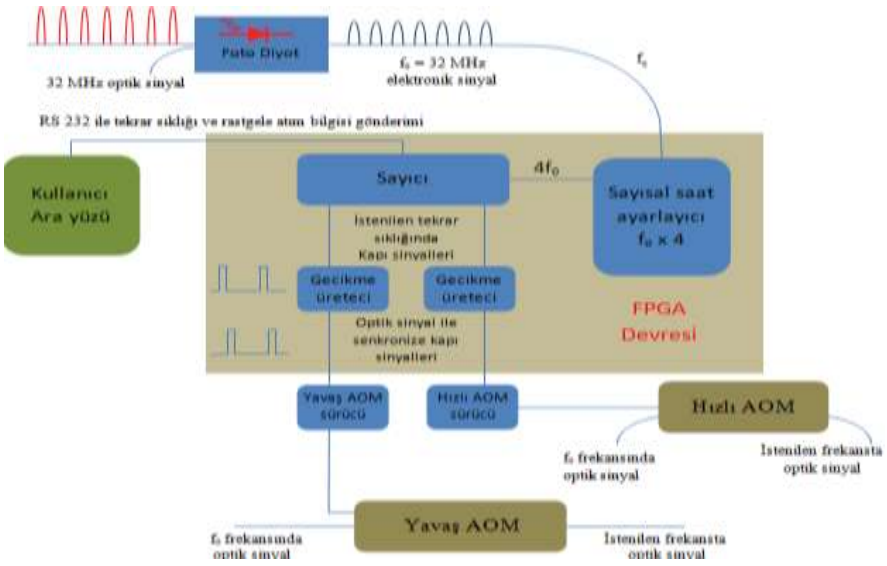
Anlatılan üç adım takip edilerek ve her analog sinyal değişiminde çıkış atımları kontrol edilerek homojenizasyon süreçleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreçler sonunda atım kümesinin ne kadar düzgün dağıldığını göstermek için eşitlik 3.1'deki istatistiksel değer olan değişim katsayısı kullanılmıştır.

$$c_v = \frac{var}{\mu} * 100 \tag{3.1}$$

Eşitlik 3.1'de kullanılan 'var' varyansı, 'μ' ise ortalamayı göstermektedir. Örneğin 20 atımlı bir küme için, atımların her biri alınarak bir dizi oluşturulur ise, bu dizinin standart sapmasının ortalamaya oranı bize değişim katsayısını verir. Değişim katsayısının 100 ile çarpılması ise, bize bu kümenin kendi içinde ne kadar düzgün dağıldığını yüzde olarak gösterecektir. Bu değer ne kadar düşükse küme içindeki seviye o kadar düzgün demektir.

3.2.3 İsteğe bağlı atım seçimi

Lazer sistemleri doğal olarak, lazer kovuğunun belirlediği bir tekrar frekansında atımları üretirler. Pek çok uygulamada ise bu atımların frekansının değiştirilmesi gerekir. Bu genellikle belli sayıda atımdan birinin seçilerek akusto-optik ya da elektro-optik modülatörler sayesinde yapılır ve temel tekrar frekansının alt harmoniklerine denk gelir. Bunun yanında, biyomedikal görüntüleme, hızlandırıcı merkezlerinde kullanılan lazerler, LİDAR ve benzeri uygulamalar, çeşitli spektroskopi sistemleri ve lazer-malzeme işleme uygulamaları başta olmak üzere artan sayıda uygulamada, daha ileri seviyede, bazı durumlarda her atım üzerinde tek tek kontrole ihtiyaç vardır. Bu amaçla geliştirilmiş ve modülatörleri sürmeye yönelik bazı ticari sistemler olmakla birlikte, bunların maliyetleri yüksektir ve teknik kapasiteleri rassal (arbitrary) denebilecek seviyede kontrol sağlamaktan uzaktır.



Şekil 3.21 İsteğe bağlı atım seçim düzeneği

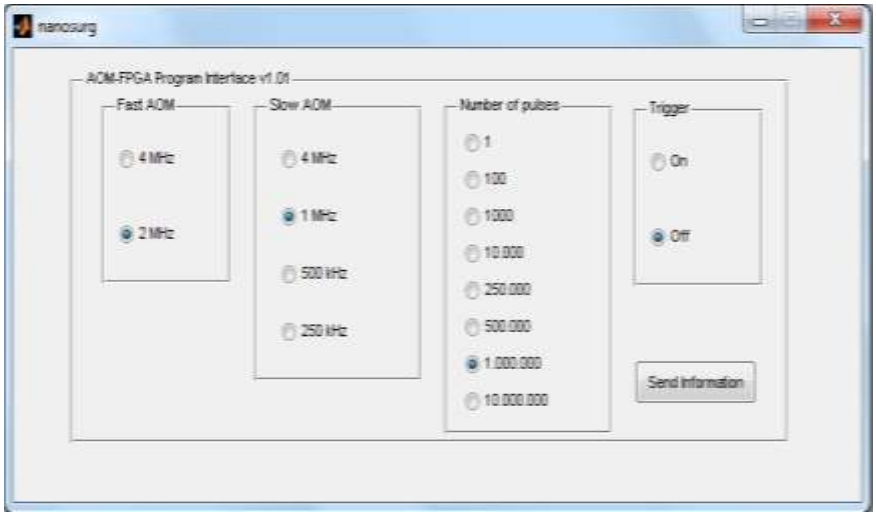
Şekil 3.21'de FPGA ile oluşturulan isteğe bağlı atım düzeneği görülmektedir (Yavaş vd. 2012). Burada osilatörden gelen 32 MHz'lik optik atımlar, bir foto diyot ile elektronik sinyale dönüştürülerek FPGA'yi tetiklemektedirler. Bu sistemin tekrar sıklığı küme modlu sistemdeki gibi çok yüksek olmadığından, yükselme-düşme zamanı FPGA için uygun olan yani yavaş tepki süresine sahip bir foto diyot kullanılmıştır. Dolayısıyla, küme modlu yüksek tekrar sıklıklı sistemlerdeki gibi, filtre veya t ağacı kullanımına gerek duyulmamıştır.

FPGA'e saat olan 32MHz'lik sinyal, sayısal saat ayarlayıcısı ile 4 ile çarpılarak hızlandırılmıştır. Burada bu sinyalin hızlandırılmasının sebebi 32MHz'de gelen optik atımların tek tek yakalama kabiliyetine erişmesini sağlamaktır. Genel olarak FPGA içinde ne kadar hızda bir saat var ise, elde edeceğini en düşük kapıların genişliği o kadardır. 32 MHz'lik optik atımların tekrar sıklığı 31.25 ns'dir. 35.25 ns'lik atımların tek tek yakalana bilinmesi için, hızlı bir AOM'ye ve hızlı bir FPGA saatine ihtiyaç duyulmaktadır. Hızlı FPGA saati, hem kısa FPGA kapıları, hem de yüksek çözünürlükte geciktirme zamanı üretimini gerçekleştirir.

Üretilen atımlar AOM'ye gelene kadar optik olarak bir gecikme yaşamaktadırlar. Diğer bir yandan optik sinyalden elde edilen elektronik sinyal de FPGA içinde ve yoldaki

kablolarda gecikmelere uğrayacaktır. Bütün bu gecikmeler hesaplanarak, genel gecikme FPGA içindeki geciktirici ile tek bir atım yakalanacak şekilde ayarlanmıştır.

Bu sistem FPGA'i bilmeyen biyologlar tarafından kullanıldığı için MATLAB ile bir kullanıcı arayüz tasarlanmıştır (Şekil 3.22). Matlab'da hazırlanılan bu arayüz, farklı seçimler için FPGA'e RS232 haberleşme protokolü ile farklı 8 bit yollamaktadır.

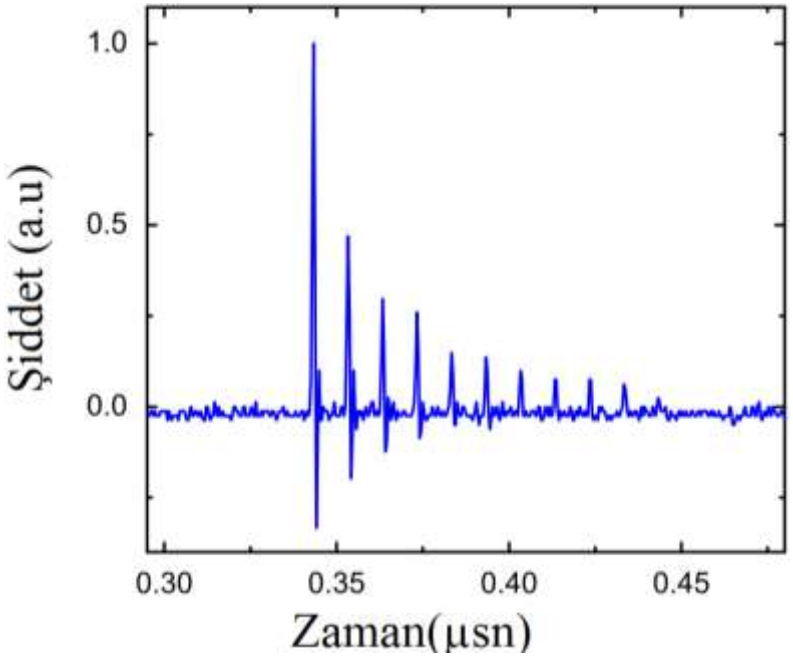


Şekil 3.22 MATLAB ile hazırlanan isteğe bağlı atım seçim kullanıcı arayüzü

Kullanıcı arayüzünde görüldüğü üzere, hızlı AOM için 4 ve 2 MHz olmak üzere iki frekans seçeneği vardır. Bu iki seçenek için de üretilen kapı genişliği 8 ns'dir. Yavaş AOM için ise 4 tekrar seçeneği vardır. Bu tekrar seçenekleri için ise üretilen kapı genişliği 100 ns'dir ve bütün seçenekler için sabittir. Ara yüzde görülen atım sayısı ise yavaş AOM'i belirli tekrar sıklığında değil de, hızlı AOM'den belirlenen tekrar sıklığında gelen atımların, belirli atım sayısında çalışmasını sağlar. Fakat bu özelliğin açılması için en sağ tarafta bulunan tetiklenme bitinin ON konumuna getirilmesi gerekmektedir.

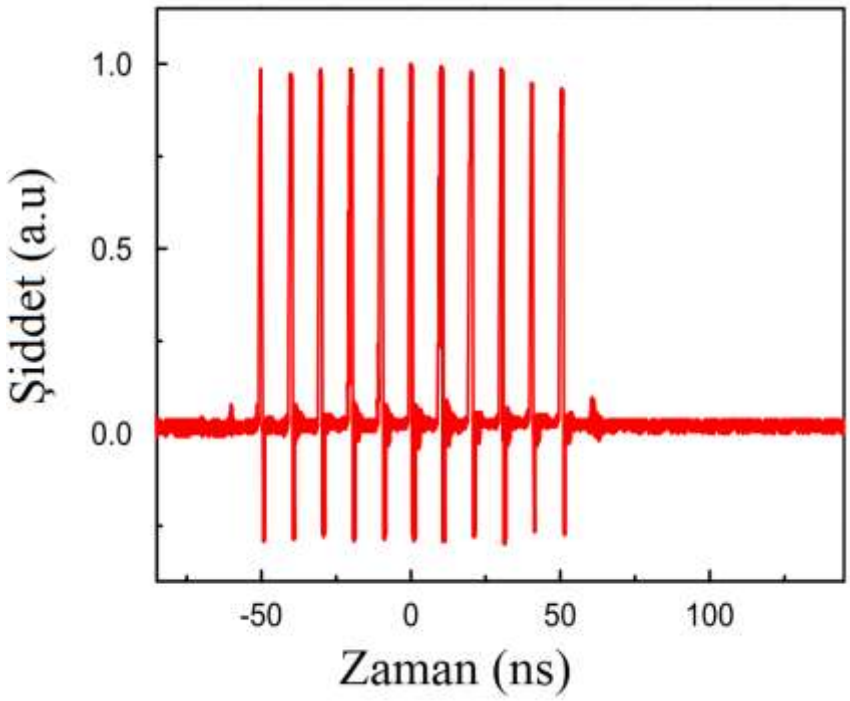
4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Küme modlu fiber yükselteç sistemi ile, AOM sayısal olarak sürülerek(homojenizasyon uygulanmada), elde edilen sonuç Şekil 4.1'de görülmektedir. Homojenizasyon uygulanmadan en fazla 150uJ küme enerjisi elde edilmiştir. Güç yükselteci daha yüksek pompada çalıştırılamamış, çünkü ilk gelen atımların tepe güçleri çok yüksek olduğu için fiberde ısıl etkiler ile bozulmalar başlamıştır.



Şekil 4.1 Homojenizasyon uygulanmamış atımların güç yükselteç çıkışları

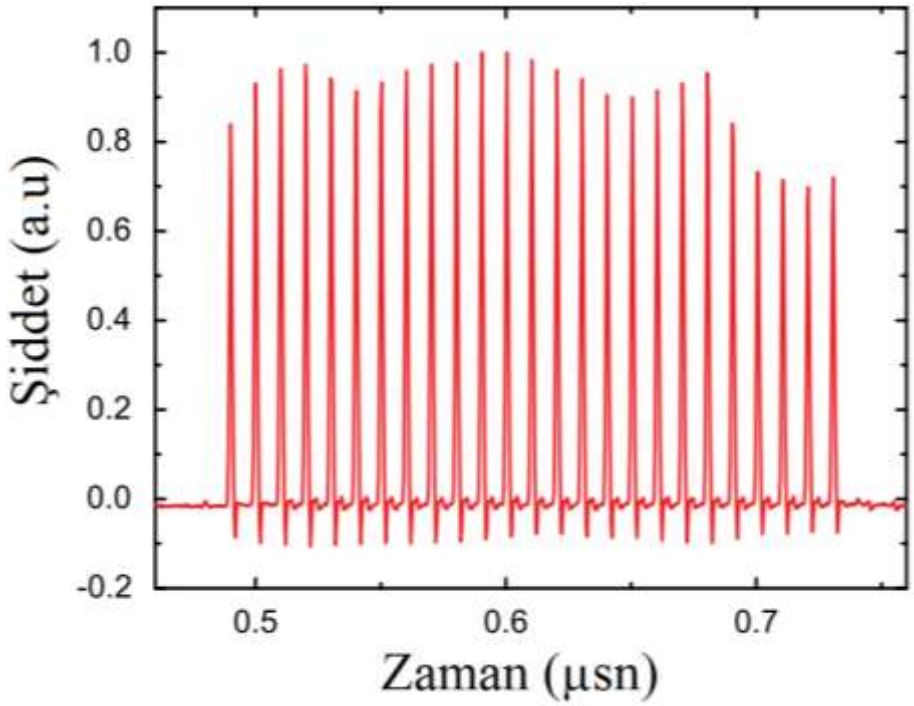
Şekil 4.1'de homojenizasyon uygulanmamış atımlar için değişim katsayısı %116 olarak hesaplanmıştır. Yine aynı sistem ile, AOM analog olarak sürülerek homojenizasyon uygulanmış ve şekil 4.2'deki atımlar elde edilmiştir.



Şekil 4.2 Homojenizasyon uygulanmış atımların güç yükselteç çıkışları

11 atımdan oluşan bu kümede enerji bütün atımlara homojen olarak dağıldığı için kümeden toplam 660 µJ küme enerjisi elde edilmiştir. Yani her atım için 60 µJ atım enerjisi elde edilmiştir. Şekil 4.2'deki atımlarım değişim katsayısı %2 olarak hesaplanmıştır (Kalaycıoğlu vd. 2012).

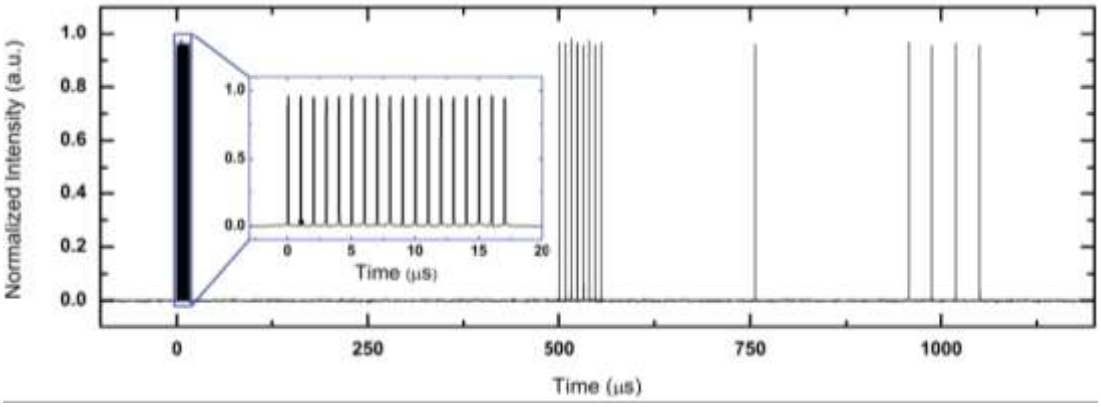
Homojenizasyon sürecinin zorluğu, küme içerisindeki atımların artması ile artmaktadır. Çünkü küme içerisinde ne kadar fazla atım varsa, enerjinin son atımlara aktarılması o kadar zorlaşacaktır.



Şekil 4.3 Fazla elemanlı homojenize edilmiş kümenin güç yükselteç çıktısı

Şekil 4.3'de daha fazla elemanlı bir küme için homojenizasyon uygulanmıştır. Fakat burada elde edilen değişim katsayısı, enerji aktarımı zorluğundan dolayı %7 olarak elde edilebilmiştir. 25 atımlı bu kümenin 1 mJ küme enerjisi, 40 uJ atım enerjisi bulunmaktadır.

Sonuçlar kısmında bahsedilen bütün küme modlu fiber yükselteç deneyleri, 1kHz küme tekar sıklığı ve 100 Mhz'lik atım tekrar sıklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4 İsteğe bağlı atım dizisi(Yavaş vd. 2012)

İsteğe bağlı atım seçim istemi ile gibi tamamen isteğe bağlı atım dizileri hiçbir kısıtlama olmaksızın (osilatörün tekrar sıklığı dışında) üretilebilmektedir. Örneğin, Şekil 4.4'teki isteğe bağlı atım dizisinin ilk kümesindeki atım sıklığı ile ikinci kümesindeki atım sıklığı birbirinden farklıdır ve atım kümeleri arasındaki süre tamamen isteğe bağlıdır. Ayrıca tek bir atım da istenildiği an seçilebilmektedir.

Bu sistem sayesinde ise, kullanılan atımların tek tek veya küme olarak, malzeme üzerindeki etkilerinin araştırılmasına olanak sağlanmaktadır(Yavaş vd. 2012).

KAYNAKLAR

Agrawal, G. P. 2007. Nonlinear Fiber Optics. Elsevier Inc., 481,San Diego,USA.

Anonymous. 1988. VHDL Language Reference Manual,Standard 1076-1987.

Anonymous. 1991. Web Sitesi: http://www.xilinx.com/, Erişim tarihi: 14.06.2014.

Anonymous. 1995. Web Sitesi: http://www.altera.com/, Erişim tarihi: 14.06.2014.

Anonymous. 2010. Web Sitesi: http://www.digilentinc.com/Data/Products/BASYS2/Basys2_rm.pdf,Erişim tarihi: 14.06.2014.

Anonymous. 2011. Web sitesi: http://www.altera.com/literature/hb/stx3/stratix3_handbook.pdf , Erişim Tarihi:14.06.2014

Anonymous. 2013. Web sitesi: http://www.altera.com/literature/hb/cyclone-/cv_51001.pdf, Erişim tarihi: 14.06.2014

Ashenden, P. J. 1996. The designer's guide to VHDL.Morgan Kaufmann Publishers Inc.. 910, Massachusetts, USA.

Babinet, J. 1842. Note on the transmission of light by sinuous canals. ComptesRendus, 15, 802.

Baird, J. L. 1928. An improved method of and means for producing optical images. British Patent 285,738.

Birkner, J., Chan,A., Chua,H., T., Chao, A., Gordon,K.. Kleinman,B.. Kolze,P. and Wong, R. 1992.A very-high-speed field-programmable gate array using metalto-metal antifuse programmable elements.Microelectronics Journal. 23(7),561-568.

Born, M. and Wolf, E. 1999. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, 936,Cambrigde,U.K.

Carter, W., Duong, K., Freeman,R.H., Hsieh,H., Ja, J. Y., Mahoney, J.E., Ngo,L.T. and Size,S.L. 1986.A user programmable reconfiguration gate array. Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference. 233-235.

Chen, J., Eltoukhy,S., Yen,S., Wang,R., Issaq,F., Bakker,G., Yeh,J., L.Poon,,E.Liu, and D.Hamdy,E. 1993. A modular 0.8 um technology for high performance dielectric antifuse field programmable gate arrays.Proceedings of 1993 International Symposium on VLSI Technology-Systems and Applications.160-164.

Chong, A,. Buckley, J., Renninger, W. and Wise, F. 2006.All-normal-dispersion femtosecond fiber laser.14,10095-10100.

Colladon, D. 1842. On the reections of a ray of light inside a parabolic liquid stream. Comptes Rendus, 15, 800-802

Cuppens, R., Hartgring, C.D., Verwey,J., F.Peek,H. L., Vollebraft,F. A., H.Devens,E., G. and M.Sens,I. A. 1985. An EEPROM for microprocessors andcustom logic. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 20(2),603-608.

Frohman, D. 1971. A fully-decoded 2048-bit electrically programmable MOS ROM. IEEE International Solid State Circuits Conference Digest of Technical Papers.80-81.

Gould, R.G. 1959.The laser, light ampli_cation by stimulated emission of radiation.The Ann Arbor Conference on Optical Pumping. 28(7),128.

Guterman,D., C.Rimawi,L., H.Chiu,, T.L., Halvorson, R. and D.McElroy, D.J. 1979.Anelectrically alterable nonvolatile memory cell using a floating-gate structure. 26(4),576-586.

Hamdy,E., McCollum,J., Chen,S.-O., Chiang,S., Eltoukhy,S, .Chang,J., Speers,T. and Mohsen,A. 1988.Dielectric based antifuse for logic and memory IC. International Electron Devices Meeting Technical Digest.786-789.

Hansell, C. W. 1930.Picture transmission. US Patent 1, 751, 584.

Ho,C., H.Leong,P., H. W.Luk,W.Wilton,S.J. and E.Lopez-Buedo,S. 2006.Virtual embedded blocks: A methodology for evaluating embedded elements in FPGAs. IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). 44-45.

Kalaycioglu,H., Eldeniz, Y., Akçaalan, B., Yavas, Ö., S. Gürel,K., Efe,M. and I lday, F. Ö. 2012.1-mJ Pulse Bursts from a Yb-doped Fiber Amplifier. Opt. Lett. 37, 2586-2588.

Kao, K.C. and Hockham, G.A. 1966. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers,1151 – 1158.

Keck, D. B. Schultz,P. C. and Zimar, F. 1973. Method of forming optical waveguide bers. US Patent 3,737,292.

Kuon, I. Tessier, and R. Rose,J. 2007. FPGA Architecture: Survey and Challenges. Foundations and Trends in Electronic Design Automation.2(2),135-532.

Lamm, H. 1930. Biegsame optische gerte. Z. Instrumentenk, 50, 579-581.

Maiman,T. H. 1960.Stimulated optical radiation in ruby. Nature.4736(187),493-494.

Maitra, K. 1962.Cascading switching networks of two-input flexible cells. IEEE Transactions on Electronic Computing. EC-11, 136-143.

Minnick, R. 1967. A survey of microcellular research. Journal of the Association of Computing Machinery.14,203-241.

Miya, T., Terunuma,Y., Hosaka,T. and Miyashita,T. 1979. Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm. Electron. Lett. 15,106.

Rushton, A. 1997.VHDL for Logic Synthesis.McGraw-Hill Book Company.390,New South Wales, Australia.

Serway, A. and Jewett,J. W. 2008.Physics for Scientists and Engineers. Cengage Learning. 1344, Boston USA.

Scheibe, A. and Krauss, W. 1980.A two-transistor SIMOS EAROM cell. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 15(3),353-357.

Shih,C.C., Lambertson,R., Hawley,F., Issaq,F., McCollum,J., Sakurai,E.H., Yuasa,, H., Honda, H., Yamaoka, T., Wada, T. and Hu, C. 1997.Characterization and modeling of a highly reliable metal- to-metal antifuse for high-performanceand high-density field-programmable gate arrays.Proceedings of the 1997IEEE International Reliability Physics Symposium. 23-25.

Van Heel, S. 1954. A New Method of transporting Optical Images without Aberrations.173,39.

Yavaş, S., Erdogan, M., Gürel, K., Ilday, F. O., Eldeniz, Y. B. and Tazebay, U. H. 2012. Fiber laser-microscope system for femtosecond photodisruption of biological samples. Biomedical Optics Express. 3(3) ,605-611.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yavuz Burak Eldeniz

Doğum Yeri : Ceyhan

Doğum Tarihi : 01.10.1987

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ceyhan Halil Çiftçi Anadolu Lisesi (2005)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği (2010)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2011-Temmuz 2014)

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl

Bilkent Üniversitesi İleri Araştırma Laboratuvarı Ultra Hızlı Optik ve LASER Laboratuvarı (2010-2013)

ROKETSAN ROKET SAN. VE TİC.A.Ş (2013- Halen)

Yayınlar (SCI)

Elahi P, Yılmaz S, Eldeniz YB, Ilday FÖ. "Generation of picosecond pulses directly from a 100 W, burst-mode, doping-managed Yb-doped fiber amplifier." Opt. Lett. 39(2),236-239 (2014)

H. Kalaycioglu, Y. B. Eldeniz, Ö. Akçaalan, S. Yavas, K. Gürel, M. Efe, and F. Ö. Ilday, "1-mJ Pulse Bursts from a Yb-doped Fiber Amplifier," Opt. Lett. 37, 2586-2588 (2012).

S. Yavaş, M. Erdogan, K. Gürel, F. Ö. Ilday, Y. B. Eldeniz, and U. H. Tazebay, "Fiber laser-microscope system for femtosecond photodisruption of biological samples," Biomed. Opt. Express 3, 605-611 (2012).

Ulusal Kongre Sunum

A.Ozgur Yerdut ,Y. Burak Eldeniz;, H. Gökhan İlk "İzdüşüm Metodu TabanlıOtomatik Plaka Tanıma Sistemi", SİU 2011

Y.B. Eldeniz, S. Yavaş, K. Gürel, H. Kalaycıoğlu, M. Efe, F. Ö. İlday, "Elektronik İsteğe Bağlı Atım Seçimi ve Atım Dizini Sentezi", FOTONİK 2012

Hamit Kalaycıoğlu; Y.Burak Eldeniz; Önder Akcaalan; Seydi Yavas; Kutan Gürel;Murat Efe; F. Ömer İlday, "1mj Autım Kümeleri Üretebilen Yb-katkılı Fiber Yükselteç", FOTONİK 2012

S. Yavaş, E. A. Kipergil, Y. B. Eldeniz, Ö. Akçaalan, M. Erdoğan, H.Erkol, M. B. Ünlü, F. Ö. İlday "Fotoakustik Mikroskopide Kullanılmak Üzere Sürekli Tayflı Nanosaniye Atımlı Fiber Lazer Sistemi", FOTONİK 2012