

Tamamen Optik Paket Anahtarlamaalı Ağlar için Düğüm Tasarımı

Proje No: 109E240

Prof. Dr. MEHMET SALİH DİNLEYİCİ

EYLÜL 2012
İZMİR

ÖNSÖZ

Bu proje, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Elektrik, Elektronik ve Enformatik Araştırma Grubu (EEEAG), Ankara, Türkiye ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye tarafından desteklenmiştir.

Tamamı optik ortamda gelişen haberleşme sistemlerinin her geçen gün daha yaygın olarak kullanılması ve son kullanıcıya daha da yakınlaşması sonucunda, bu tür optik haberleşme hatlarında kullanılacak muhtelif aktif-pasif komponentlerin pratik ve ekonomik olarak üretilebilmesi, çok önemli bir mühendislik araştırma-geliştirme alanı haline gelmiştir.

Proje kapsamında, optik fiber hatlar üzerinde paket anahtarlama olarak çalışabilecek özelliklerde, tüm-optik-iletişim hat komponentlerinin (aygıtlarının) tasarımı hedeflenmektedir. Bu tür aygıtlarda temel mekanizma tamamen optik ortamda anahtarlama; yani, optik sinyali çok yüksek hızlarda (paketleme hızı) anahtarlayabilen ve bunu başka bir optik sinyal ile yapabilen donanımlar kastedilmektedir. Bu tür mekanizmanın optik fiber üzerinde gerçekleştirilmesi için gerekli modelleme çalışmalarının yapılması ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi için gerekli teknolojilerin araştırılması çalışmaları yapılmış ve temel bir aygıt tasarlanarak test edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Salih Dinleyici

İzmir, Eylül 2012

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	2
İÇİNDEKİLER.....	3
ŞEKİL LİSTESİ.....	5
ÖZET.....	7
ABSTRACT.....	8
I. GİRİŞ.....	9
1.1 Tüm Optik Haberleşme.....	9
1.2 Tamamen Optik Anahtarlama.....	10
II. GEÇİCİ KIRINIM IZGARASI İLE ANAHTARLAMA VERİMLİLİK HESAPLAMALARI, BENZETİM VE GERÇEKLEME	
2.1 Geçici Kırınım Izgarası Geometrisi ve Optik Özellikleri	11
2.2 Geçici Izgara ile Modlar Arası Güç Aktarımı Modeli ve Benzetimi	16
2.3 Optik Kerr Doğrusalsızlığı Yüksek Polimer Film Üretimi.....	23
2.4 Polimer Filmlerde Geçici Kırınım Izgarası Oluşturma ve Saçılma Başarım Ölçümleri.....	26
2.5 Geçici Kırınım Izgarasının Optik Fiber Üzerine Yerleştirilmesi ve Optik Anahtarlama Başarım Ölçümleri.....	33
2.5 Kunt (Bulk) Optik Modülasyonlu Anahtarlama Başarım Ölçümleri	35
2.6 Geçici Kırınım Izgarası ile Mod Anahtarlama Başarım Ölçümleri	37
2.7 Geçici Kırınım Izgarası ile Modlar Arasında Güç Aktarımı Çalışmaları ile İlgili Sonuçlar ve Tartışmalar.....	40
III. SABİT KIRINIM IZGARASI İLE MOD KUPLAJLAMA VERİMLİLİK HESAPLAMASI, BENZETİM VE DENEYSEL GERÇEKLEME	
3.1 Matematiksel Model ve Benzetim	42

3.2 Sabit Kırınım Izgarası Mod Kuplaj Verimlilik Hesapları: Sinüs Kırınım Izgarası Modeli.....	45
3.2.1 Fotopolimerize Kırınım Izgara Yapısı.....	47
3.3 Sabit Kırınım Izgarası Mod Kuplaj Verimlilik Hesapları: Gauss Kırınım Izgarası Modeli.....	48
3.4 Sabit Kırınım Izgarası Karakterizasyon Çalışmaları.....	50
3.5 Optik Fiber Üzerine Kırınım Izgarası Kuplaj Çalışmaları.....	54
3.5 Sabit Kırınım Izgarası ile Mod Kuplajlama Çalışmaları Sonuçları Üzerine Tartışmalar.....	56
IV. PROJE SONUÇLARI ÜZERİNE GENEL TARTIŞMALAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKÇA.....	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1.1 Tüm-Optik Fiber Anahtarlama Mekanizması
- Şekil 2.1 İki Gauss Işık Hüzmesi Girişimi ve İki Boyutlu Dağılımı
- Şekil 2.2 İki Gauss Işık Hüzmesi Girişimi Benzetimi ve Işık Yoğunluk Dağılımı
- Şekil 2.3 Girişim Desenli Kırınım İndisi Izgarası Bulunan Dalga Kılavuzu Izgara Profili
- Şekil 2.4 İki Işık Hüzmesi Girişiminin $x=0$ Düzlemindeki Yoğunluk Deseni ve z Yönündeki Işık Yoğunluk Dağılımları
- Şekil 2.5 Dört dalga Karışımı (DDK) Geometrisi
- Şekil 2.6 Kırınım Izgaralı Yapı İçin Dispersiyon Grafiği
- Şekil 2.7 Modlar Arası Enerji Aktarım Verimliliği (Düşük Kuplaj $\kappa \approx \delta$)
- Şekil 2.8 Modlar Arası Enerji Aktarım Verimliliği (Yüksek Kuplaj $|\kappa| \gg |\delta|$)
- Şekil 2.9 Modlar Arası Enerji Aktarım Verimliliğinin Duygunluk Parametresi ile Değişimi
- Şekil 2.10 Z-Scan Yöntemiyle Elde Edilen Doğrusalsızlık Grafiği
- Şekil 2.11 Nanoparçacık İlaveli PVA Polimerin Z-Scan Ölçüm Grafiği
- Şekil 2.12 Nanoparçacık İlavesiz PVA Polimerin Z-Scan Ölçüm Grafiği
- Şekil 2.13 'Pump- Probe' Deney Düzeneği
- Şekil 2.14. 'Pump-Probe' Deney Düzeneğinde Hüzmelerin Geliş ve Çıkış açıları
- Şekil 2.15 Optik Doğrusalsız Polimer İçindeki Girişim Deseni Görüntüsü
- Şekil 2.16 Saçılım Deney düzeneği
- Şekil 2.17 Film-1 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri
- Şekil 2.18 Film-2 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri
- Şekil 2.19 Film-3 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri
- Şekil 2.20 Film-4 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri
- Şekil 2.21 Film-5 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri
- Şekil 2.22 Beş Film'e ait -1.Saçak Toplam Işık Yoğunluğu Grafikleri
- Şekil 2.23 Yanal Yüzeyi Aşındırılmış Optik Fiber Kesiti
- Şekil 2.24 Kerr Etkisine Bağlı Fber Çıkışındaki Işık Gücünün Değişimini Gözlemlemek için Kurulan Düzenek
- Şekil 2.25 Lazer Işık Hüzmesinin Pozisyonuna Göre Fiber Çıkış Işık Gücü
- Şekil 2.26 Gçici Kırınım Izgarası İle Mod Anahtarlama
- Şekil 2.27 Girişim Açısına Bağlı Olarak Çıkış Gücü Grafiği (543 nm)
- Şekil 2.28 Girişim Açısına Bağlı Olarak Çıkış Gücü Grafiği (632.8 nm)
- Şekil 2.29 Girişim Açısına Bağlı Olarak Çıkış Gücü Grafiği (852 nm)
- Şekil 2.30 Diyot Sıcaklığına (Lazer Dalgaboyu) Bağlı Çıkış Güç Değişimi
- Şekil 3.1 Sabit Kırınım Izgarası ile Mod Kuplajlama
- Şekil 3.2 Sinüs Biçimli Sabit Kırınım Izgarası İçin Kuplaj Verimlilikleri
- Şekil 3.3 Kılavuz Açıklığına Göre Her Moda Aktarım Enfazla Mesafesi
- Şekil 3.4 Fotopolimerizasyon ile Elde Edilen Dalga Kılavuzları ve Profilmetre ile Alınan Yüzey Geometrisi
- Şekil 3.5 Gauss Kırınım Izgarası modeli için Kuplaj Verimlilikleri
- Şekil 3.6 Gauss Model için Azami Güç Aktarım Mesafesi
- Şekil 3.7 Kuplaj Verimliliğinin Izgara Periyodu ile Değişimi
- Şekil 3.8 Fotopolimerizasyon İle Dalga Kılavuzu Yazım ve Difraksiyon Ölçüm

Düzeneği

Şekil 3.9 Fotopolimerize Dalgakılavuzu Optik Mikroskop Görüntüsü ve Profili

Şekil 3.10 Difraksiyon Modeli İçin Kullanılan a) Üç Boyutlu b) Kesit Geometriler

Şekil 3.11 Uzak Alan Difraksiyon İçin Kullanılan Kırınım İndisi Dağılımı Modeli

Şekil 3.12 Tek-sefer geçiş (solda), Çoklu sefer Geçiş (orta) ve Üç-sefer Geçiş (sağda) ile Üretilmiş Fotopolimerize Dalga Kılavuzları İçin Difraksiyon Desenleri

Şekil 3.13 Üç-sefer Difraksiyon Desenlerinin Eşlenmesi

Şekil 3.14 Sabit Izgara İle Mod Kuplaj Verimliliğinin Ölçüm Düzeneği: Prensip Çizimi ve Fotoğrafi

Şekil 3.15 Yanal Yüzeyi İnceltilmiş Optik Fiber ve Polimer Film Üzerinde Kırınım İndisi Izgarası Olan Deney Örneği

Şekil 3.16 İki Moda Ait Işık Yoğunluk Dağılımının CCD Kaydı

ÖZET

Bu projede, tüm-optik fiber haberleşme hatlarında ihtiyaç duyulan komponentlerin temel mekanizması olarak çalıştırılabilir, tamamen optik ortamda anahtarlama yapabilen bir aygıtın kuramsal ve deneysel yapılabirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fiber optik üzerinde tasarlanan anahtarlama mekanizması iki ayrı bileşenden oluşmaktadır. İlk olarak, Kerr tipi doğrusalsızlığın kullanıldığı mod (kip) anahtarlama yapabilen komponent bulunmaktadır. Bu aygıt doğrusalsız malzeme içerisinde geçici kırınım ızgarası oluşturularak kontrol edilmektedir. İkinci bileşen ise anahtarlama yapılan modun sabit bir kırınım ızgarası ile optik fiberden çıkarılmasını sağlayan optik kuplördür. Temel anahtarlama mekanizmasının kerr tipi doğrusalsızlığa dayanıyor olmasından dolayı, optik paket anahtarlama için gerekli olan hızlarda anahtarlama yapılabilmektedir. Ancak, yüksek verimlilikte ve düşük güçlerde çalışabilen bir mekanizma en çok aranan özelliklerdir. Bu nedenle, optik fiberin kendisi enine bir rezonatör (çınlayıcı) gibi düşünülmüş ve optik fiberin kılıfı üzerindeki çok küçük kırınım indisi değişikliğine duyarlı anahtarlama tasarlanmıştır.

Geçici kırınım ızgara ile yapılan anahtarlama mekanizması ve sabit kırınım ızgaralı optik kuplör matematiksel olarak modellenmiş ve yüksek verimlilik için eniyi şartlar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda iki ayrı bileşen optik fiber üzerinde gerçekleştirilmiş ve test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optik Anahtarlama, Fiber Optik, Fiber Optik Haberleşme, Kerr Tipi Doğrusalsızlık, Tüm-Optik, Tamamen Optik, Optik Paket Anahtarlama, Fotopolimer, Geçici Kırınım Izgarası.

ABSTRACT

In this project, an essential switching mechanism that can be deployed in all-optical communication link components have been theoretically investigated and experimentally realized for practical applications. The switching mechanism run on the optical fiber consists of two components. The first functioning as modal switching is based on a diffraction grating is created into Kerr type nonlinear polymer, called transient grating. The second part is an optical coupler that extracts the switched mode power from the optical fiber in terms of a permanent diffraction grating. Since the whole switching mechanism relies on Kerr type nonlinearity that switch can be fast enough for all optical packet switching. However, high efficiency and low switching power requirements are the most desired properties from any optical switch. Thus, the optical fiber is considered as a lateral (transverse) resonator and the switch is designed on the mechanism that sensitive to small change in the refractive index of optical fiber cladding.

The switching mechanism based on the transient diffraction grating and the optical coupler exploiting the permanent grating are mathematically modeled and optimized for efficient switching. These diffraction gratings are realized on the optical fiber and tested for the switching properties.

Key Words: Optical Switch, Optical Fiber, Optical Fiber Communication, Kerr Type Nonlinearity. All-Optical Communication, Optical Packet Switching, Photopolymer, Transient Diffraction Grating

I. GİRİŞ

1.1 TÜM-OPTİK HABERLEŞME

Her geçen gün artan haberleşme uygulamaları nedeniyle haberleşme ağlarında ihtiyaç duyulan kapasite de artarak devam etmektedir. Talep edilen yüksek kapasitenin karşılanabilmesi için hat kapasitesinin verimli paylaşılması teknikleriyle birlikte yeni teknolojiler kullanılarak toplam kapasitenin artırılmasına çalışılmaktadır. Optik fiberin iletişim ortamı olarak kullanılması ve her geçen gün daha yaygın olarak son kullanıcıya ulaşması bu çalışmalardan bazılarıdır. Ancak, sonuç olarak haberleşme ağlarının üzerine oturduğu omurganın kapasitesinin sınırlarını, elektronik aygıtların hızı belirlemektedir ki malzemenin termal ısı yitimi sınırı gibi nedenlerle daha fazla zorlanması mümkün gözükmemektedir (Dawes, 2009). Alternatif olarak önerilen ve üzerinde yoğun olarak çalışılan teknoloji ise tamamen optik ortamda haberleşme ağlarının kurulmasıdır. Geline nokta, zaten optik ağlar (FTTx) son kullanıcıya her geçen gün daha fazla yaklaşmaktadır, ancak önerilen teknoloji optik iletişimin baştan sona optik ortamda olmasını öngörmektedir. Bu teknoloji, optik iletişimin hatlarının çok yüksek kapasitelerde olabilmesi özelliği ile birlikte paralel olabilmeye özelliğinin de çok yoğun olarak kullanılması ve ayrıca elektronik işlemlerin tamamının devre dışı bırakılması anlamına gelmektedir (Bewab, 2006).

Tamamen optik haberleşme için temel mekanizma optik sinyallerin bir birisiyle etkileşebilmesine gerektirmektedir, ancak bunu sadece doğrusalsız ortam (malzeme) aracılığıyla yapmak mümkün olmaktadır, elektronikte olduğu gibi elektronların elektrik alan ile kontrolü gibi fotonların kontrolü mümkün değildir (Demircan, 2011). Optik malzemeler genel olarak silica bazlı cam (SiO_2 gibi) malzemelerdir ve doğrusalsızlık katsayıları oldukça düşüktür (Optik Kerr katsayısı $10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$) (Günter, 2000) ve bu nedenle tüm optik doğrudan anahtarlama için çok uygun değildir (Haque, 2010).

Tamamen optik ağlarda ihtiyaç duyulan bir çok optik sinyal işleme modülüne ihtiyaç bulunmaktadır: Yönlendiriciler, Modülatörler, Çoklayıcılar, Çoğullayıcılar, Ekle/Çıkar Multipleksirler, Mantık Kapıları, Filtreler ve Kuplörler bazılarıdır (Grillet, 2010). Tüm bu komponentlerin kalbinde yatan temel mekanizma ise optik anahtarlama. Temel olarak bir optik sinyalin bazı özelliklerinin başka bir optik sinyalin, önce ortamın özelliğini değiştirmesi ve dolayısı ile de gelen optik sinyalin özelliğinin değiştirilmesi mekanizmasıdır. Kastedilen özellikler ışığın polarizasyonu, propogasyon yönü, geciktirilmesi, spektral özelliğinin değiştirilmesi veya fazının değiştirilmesi olabilmektedir. Örnek olarak değişen oranlı optik kuplörü alabiliriz, burada kontrol sinyali ile kuplörün gerçekleştiği ortamın kırınım indisi değiştirilebilir ve dolayısı ile de kuplaj oranları değiştirilmiş olur (Osman Akın, 2010).

Bunların yapılabilmesi için çok düşük değerlerdeki doğrusalsızlığın yükseltilmesi ve/veya ışık yoğunluğunun artırılması gerekmektedir, böylece pratik aygıtların yapılabilmesi mümkün olabilecektir. Doğrusalsızlığın geliştirilmesi için yapılan çalışmalara örnek: organik malzemelerin kullanılması ve/veya nanoparçacıkların ilave

edilmesi sayılabilir. Işık yoğunluğunun artırılması için ise yüksek güçlerde ışık üretiminin kolaylaşması ve verimliliğinin artırılması ile birlikte ışığın çok dar alanlara odaklanması önem kazanmaktadır. Işığı dar alanlarda yoğunlaştıran yapılardan en öne çıkan yaklaşım, dalga kılavuzlarının iki veya üç boyutlu olarak periyodik yapılar ile tasarlanması ki bu durum fotonik kristal yapıların oluşturulmasıdır (Joannopoulos, 2008). Bir diğer yaklaşımda rezonatörlerin (çınlayıcıların) kullanılmasıdır (Ünlü, 1995).

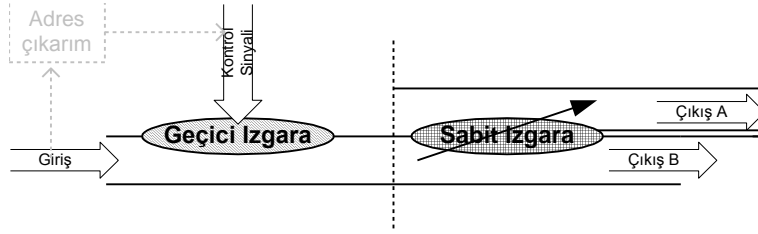
Bu projede, yukarıda bahsedilen doğrusalsızlığın geliştirilmesi çalışmalarından; yüksek doğrusalsızlıklı malzeme kullanımı yanında nano parçacık katkısından da yararlanılmıştır (Woon, 2012). Ayrıca, iki boyutlu rezonatör olarak optik fiber ele alınmış ve optik fiber modları arasında anahtarlama gerçekleştirilmiştir. Rezonatör modlarının kullanılması ışığın mod profili içerisinde yoğunlaştırılmasına olanak tanımıştır. Son olarak anahtarlama mekanizmasının güçlendirilmesi amacıyla modun kesim frekansı civarında ki hızlı dinamiğinden (Ünlü, 1995) yararlanılması düşünülmüştür.

1.2 TAMAMEN OPTİK ANAHTARLAMA

Tüm optik haberleşme bölümünde bahsedilen temel anahtarlama mekanizmasının gerçekleştirilmesinin bir çok yolu araştırılmış ve literatürde önerilmiştir (Dawes, 2009). Anahtarlamanın verimli olabilmesi ve çok yoğun olarak bir araya getirilebilir olması (ölçeklenebilir) yanında pratik olarak da gerçekleştirilebilir olması gerekmektedir. Anahtarlamanın verimli olması kontrol sinyal gücünün düşük olmasını gerekli kılmaktadır ki bu seviye tek bir foton düzeyine kadar inebilmektedir. Son zamanlarda yapılan çok düşük seviyeli güç kullanan çalışmalarda kuvantum etkisinin öne çıktığını ve kuvantuma dayalı aygıtların tasarlandığı gözlenmektedir, ancak bu tür aygıtların en başta ölçeklenebilme sorunları nedeniyle, tüm optik haberleşme alanında pratik uygulamaları henüz bulunmamaktadır. Bu projende hedeflediği ikinci grup ise görece daha yüksek ışık gücü ve ışığın dar bir alana yoğunlaştırılması prensibini kullanan aygıtlar yer almaktadır (Sahu, 2012). Işığın iki boyutlu olarak yoğunlaştırıldığı yapılarda, enine yönde ki rezonans yapı, kendisini çevreleyen malzemedeki kırınım indisinin düşük düzeydeki değişimlerine çok yüksek duyarlılık göstermektedir ki bu mekanizma anahtarlama için kullanılabilir. Yaygın kullanılan tüm optik anahtarlama mekanizması, ışık yoğunluğu doğrusalsızlığına dayalı ve bir girişimölçer ile çalışan tasarımlardır (Saleh, 2007). İki kola ayrılan ışığın birisi üzerinde yüksek yoğunluklu kontrol sinyali uygulanarak doğrusalsızlığın etkisi ile kırınım indisi değerinin yükseltilmesi veya alçaltılması sonucu fazladan faz kayması oluşturulabilir. Bu iki koldan gelen ışığın girişim ölçer üzerinde izlenmesi ile elde edilen parlaklık veya karanlık girişim deseni anahtarlama durumlarını belirlemektedir. Böyle bir mekanizma, ışık kolları arasında 180 derecelik bir faz farkı ile ancak enyüksek kontrastı verebilmektedir ki böyle bir faz kayması için yüksek doğrusalsızlık yada aygıt uzunluğu gerektirmektedir.

Projeninde konusu olan rezonance kırılmalı anahtarlama mekanizması; optik fiberin bir rezonatör gibi kullanılması ve fiber modları arasında anahtarlamanın tetiklenmesi prensibini kullanmaktadır. İki modu destekleyen bir optik fiberden, birinci modun bilgi taşıma kanalı olarak düşünülmesi ve ikinci moda bu sinyalin aktarımının sağlanması, daha sonra bu ikinci modun fiberden çıkarılması ile anahtarlamanın

gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır (Akın, 2010). Şekil 1.1 de iki kırınım ızgarası (geçici ve sabit) ve iki dalga kılavuzu arasındaki kupaç gözükmektedir.



Şekil 1.1 Tüm-Optik Fiber Anahtarlama Mekanizması

Birinci moddan ikinci moda enerji aktarımı için kullanılacak araç sadece fiber kılıfının kırınım indisinin değiştirilmesi değil, kılıf içerisine yazılan kırınım ızgarasıyla, fiber modunun bir başka moda fazının eşlenmesiyle bu anahtarlamanın başarılması planlanmıştır. Modlar arasındaki bu etkileşim Dört Dalga Karışımı (FWM) olarak ele alınmaktadır (Yariv, 2007). Böylece, enine rezonansı bozulmuş olan fiber modunun istenilen bir başka moda faz eşlemesiyle verimli bir şekilde aktarılması sağlanmaktadır. Şekilde geçici ızgara ile (B) kanalındaki enerjinin ikinci moda aktarılması ve sabit ızgara ile bu modun başka bir dalga kılavuzuna (A) alınması gösterilmektedir. Anahtarlama mekanizmasının hızını Kerr doğrusalsızlığı olan malzemenin tepki süresi belirlemektedir, elektronik geçişe dayalı bir doğrusalsızlık olduğundan (Schneider, 1999) femtosaniye mertebesinde olması beklenmelidir.

II. GEÇİCİ KIRINIM IZGARASI İLE ANAHTARLAMASI VERİM HESAPLAMALARI, BENZETİM VE GERÇEKLEME

2.1 GEÇİCİ KIRINIM IZGARASI GEOMETRİSİ VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

Optik doğrusalsızlık, malzemenin uygulanan optik sinyale verdiği tepkinin doğrusal olmaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Elektromanyetik dalganın malzeme ile etkileşmesi sonucu oluşan polarizasyonun; $P(r,t)$, elektrik alan vektörüyle; $E(r,t)$ ile ilişkisi aşağıdaki ifade ile verilir,

$$P = \epsilon_0 \chi E + 2dE^2 + 4\chi^{(3)} E^3 \quad 2.1$$

Buradaki ilk terim doğrusal ilişkiyi, ikini ve üçüncü terimler ise doğrusalsızlık ilişkilerini vermektedir. Genellikle ikinci terimin malzeme özelliğinden (simetri) dolayı oluşmadığı ve sadece üçüncü terimin mevcut olduğunu düşünebiliriz. Polarizasyon ile elektrik alanın etkileşimi gerçekte tensörel bir ilişki olmakla birlikte, bir çok kez bu ifade basitleştirilerek kullanılabilir. Örneğin, tekrenkli (monochromatic) bir optik sinyalin uygulandığı dielektrik optik tektürel (homogeneous) ortam için bu ifade,

$$P_{NL}(\omega) = 4\chi^{(3)} E^3(\omega) = 3\chi^{(3)} |E(\omega)|^2 E(\omega) \text{ ve } P_{NL}(3\omega) = \chi^{(3)} E^3(\omega) \quad 2.2$$

şeklinde yazılabilir. İlk ifade uygulanan frekansla aynı olan ve ortam katsayısının elektrik alan şiddetinin karesiyle artırılmış bir polarizasyon ilişkisini ifade ederken, ikinci ifade üçüncü dereceden bir harmonik polarizasyonu vermektedir. İlk terim bir başka biçimde ifade edildiğinde Optik Kerr etkisini buluruz (Boyd, 2008),

$$n(I) = n + n_2 I \quad 2.3$$

$$n_2 = \frac{3\eta_0}{n^2 \epsilon_0} \chi^{(3)}$$

n_2 optik Kerr katsayısıdır. Toplam ışık yoğunluğu ortam parametresini değiştirerek, malzemenin optik kırınım indisini yükseltmektedir. Değişen indis değeri ortamda yayılmakta olan dalganın fazı üzerinde önemli etkilerde bulunabilmektedir. Bir çok optik anahtarlama mekanizması bu etkiyi kullanarak, ortamdan geçmekte olan bir başka zayıf optik sinyalini etkileme yöntemini kullanmaktadır.

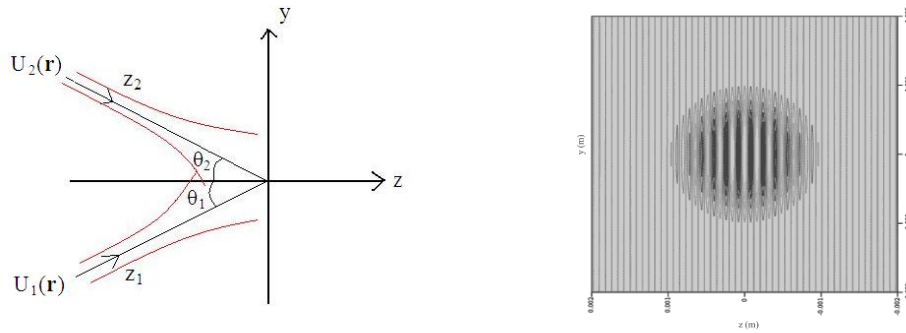
Görece basitleştirilmiş analizde ışığın hüzmeye özelliğine bağlı değişimler ve malzemenin yönbağımlı özellikleri hesaba katılmamıştır. Ayrıca, ortamda birden fazla dalganın bulunması durumunda ise girişimler sonucu oluşan ışık yoğunluğu dağılımı belirleyici olmaktadır. İki Gauss ışık hüzmelerinin doğrusalsızlık gösteren bir ortamda giriştirilmesi önemli bazı sonuçlar doğurmaktadır. Z-yönünde ilerleyen Gauss hüzmeleri şöyle ifade edilebilir (Saleh, 2007),

$$U(\mathbf{r}) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left(-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right) \exp\left(-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} + j\zeta(z)\right) \quad 2.4$$

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right]^{1/2} ; \quad R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2\right]$$

$$\zeta(z) = \arctan \frac{z}{z_0} ; \quad W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi}\right)^{1/2} ; \quad A_0 = \frac{A}{jz_0}$$

$W(z)$ ve $R(z)$ sırasıyla hüzme genişliğinin ve dalga cephesi yarıçapının eğriliğinin (wavefront radius of curvature) ölçüsüdür. W_0 ise $z=0$ da $W(z)$ 'in aldığı minimum değerdir ve hüzme açıklığı (beam waist) olarak adlandırılır. z_0 parametresi ise Rayleigh mesafesi olup z ve ρ ise sırasıyla aksel uzaklık ve enine yarıçap mesafesidir. $\zeta(z)$ ise faz gecikmesidir. A_0 ve A ise sabit sayılardır, ışık hüzmelerinin taşıdığı toplam güç miktarına göre hesaplanmalıdır.



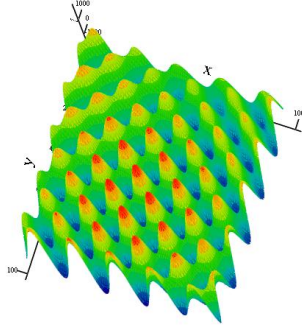
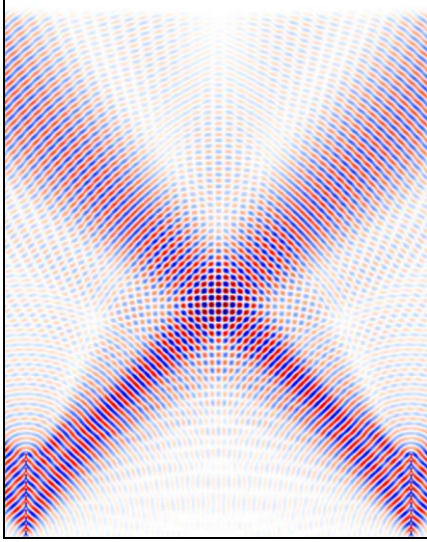
Şekil 2.1 İki Gauss Işık Hüzmesi Girişimi ve İki Boyutlu Dağılımı

İki Gauss ışık hüzmesi açısal olarak girtildiklerinde (Şekil 2.2) elde edilecek kırınım ızgarası ışık yoğunluk dağılımı şöyle olacaktır,

$$I = \frac{1}{2} \left(\frac{A_{11}}{z_{01}}\right)^2 \exp\left(-2\frac{y_1^2}{W_1^2(z)}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{A_{22}}{z_{02}}\right)^2 \exp\left(-2\frac{y_2^2}{W_2^2(z)}\right) + \frac{A_{11}}{z_{01}} \frac{A_{22}}{z_{02}} \exp\left[-\left(\frac{y_1^2}{W_1^2(z)} + \frac{y_2^2}{W_2^2(z)}\right)\right] \cos\left[k_1 \frac{y_1^2}{2R_1(z)} - k_2 \frac{y_2^2}{2R_2(z)} + k_1(z_1 - L_1) - k_2(z_2 - L_2) + (k_1\zeta_1 - k_2\zeta_2)\right] \quad 2.5$$

L_1 ve L_2 ise hüzmelerin başlangıç noktalarıdır.

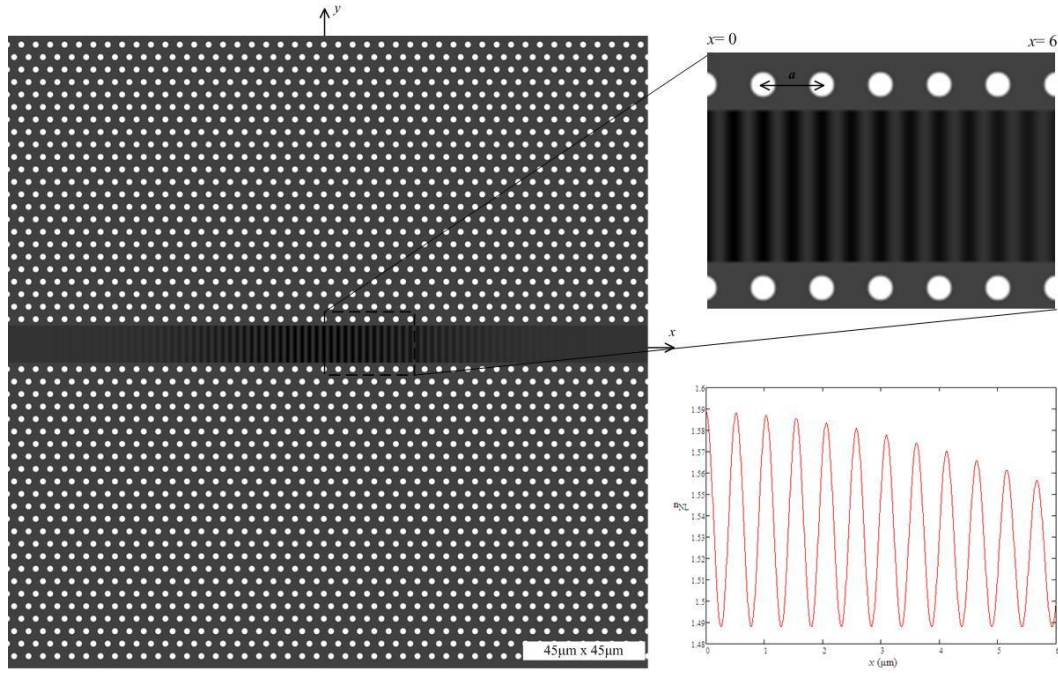
Bu genel ifade kullanılan geometrinin özelliklerine (simetri) bağlı olarak basitleştirilebilir. Ayrıca, Kerr doğrusalsızlığının etkin olabilmesi için belirli bir ışık yoğunluğuna ulaşılması gerekmektedir ki bu bir eşik değer belirlemektedir (Bonnetois, 2009). Sonuç olarak elde edilen girişim deseni şöyle olacaktır,



Şekil 2.2 İki Gauss Işık Hüzmesi Girişimi Benzetimi ve Işık Yoğunluk Dağılımı

Benzetim çalışmalarında Gauss ışık hüzmesi ile gösterilen dalganın genliği Gauss fonksiyonu ile değişen ancak fazı düzlemsel olarak alınmıştır. Girişim şekilleri 45 derece açı ile gelen iki türdeş Gauss ışık hüzmesi içindir. Işık yoğunluk dağılımının benzer şekilde kırınım indisi dağılımı olarak da alınabilir, çünkü ışık yoğunluk esaslı kırınım indisi değişimi Kerr tipi doğrusalsızlık ortamlarında mümkün olmaktadır.

Elde edilen girişim desenli kırınım indisi dağılımının (ızgarasının) ışık iletim ve yansıtma özelliklerinin araştırılması için Fotonik Kristal (FK) yapı içerisinde oluşturulan doğrusalsızlık özellikli dalga kılavuzu kullanılmıştır (Boor, 2009). Dalga kılavuzunun bir bölgesine ızgara yapısı yerleştirilmiş ve dalga kılavuzunun iletim özelliğinde ki değişim incelenmiştir. Geçici (transient) ızgaranın oluşturulması için iki Gauss ışık hüzmesinin FK içerisinde giriştirilmesi probleminin gerçek zamanlı (FDTD) modellenmesinde istenilen sonuçlar alınamamıştır (Karakilinc, 2009). Bu konudaki çalışmalar devam etmektedir.



Şekil 2.3 Girişim Desenli Kırınım İndisi Izgarası Bulunan Dalga Kılavuzu Izgara Profili

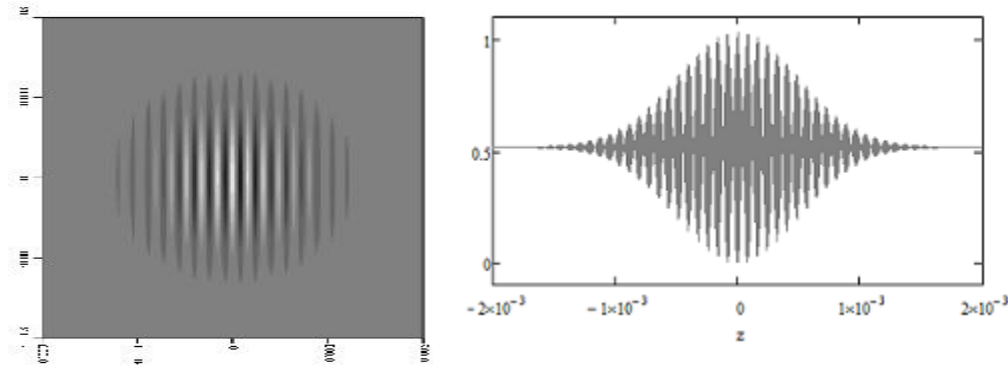
Girişim desininin elde edildikten sonra bu dağılımın dalga kılavuzu içerisinde kırınım indisi dağılımı şeklinde fonksiyonel olarak tanımlanması ile elde edilen matematiksel model gerçekleştirilmiş ve istenilen sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmada özellikle durdurma frekans bandı (stop band) incelenmiştir. Ayrıca, frekansın geliş açısı ve ışık yoğunluğu parametresiyle, dolayısı ile de kırınım indisi tepe değeriyle değişimi ortaya konmuştur. Prensipte olarak düzgün bir ızgara yapısında (düzlemsel dalga girişimi) girişim periyodu ile Bragg frekansı arasındaki ilişki şöyle verilir,

$$\Lambda = \frac{\lambda_{beam}}{2 \sin \theta} \quad \text{ve} \quad \lambda_B = 2\Lambda n \quad 2.6$$

' Λ ' Girişim deseni periyodu, ' λ_B ' Bragg dalgaboyu, n ortam kırınım indisidir ve λ_{beam} girişim ışık hüzmesi dalgaboyudur. İki ışık hüzmesi girişiminde durum biraz daha farklıdır çünkü, periyotun ızgara boyunca değişiyor olması, ızgaranın görünürlüğünün merkezden uzaklaştıkça düşmesi ve ışık yoğunluğunun daha dar bir alana sıkışması sözkonusudur. Bu nedenle Bragg frekansı ve frekans aralığı değişebilmektedir. Düşük açı (Paraxial) yaklaşımı kullanılarak girişim deseni aşağıdaki gibi yazılabilir (Akın, 2005),

$$I(x, y, z) = \frac{A^2}{|\rho|^2} \exp\left(-k_L x_0 \frac{y^2 + (x \sin(\theta))^2 + z^2}{|\rho|^2}\right) \cos\left[2k_L \sin \theta \left(1 - x \frac{x-L}{|\rho|^2}\right) z\right] \quad 2.7$$

Burada 2θ girişim açısı, ρ radyal uzaklık (optik eksene dik yönde), k_L dalgasayısı ve L ise lazerin çıkış noktası ile girişim düzlemi arasındaki uzaklıktır. 'y' uzaklığı dalga geliş düzlemine dik ve 'z' ise bu düzleme paralel kordinatları belirlemektedir. Görüldüğü üzere $x=0$ düzleminde girişim deseninin z-yönünde düzgün bir girişim dağılımına sahip olduğu, ancak girişimin y-z düzlemi içerisinde $x=0$ etrafında odaklandığı belirlenmektedir.



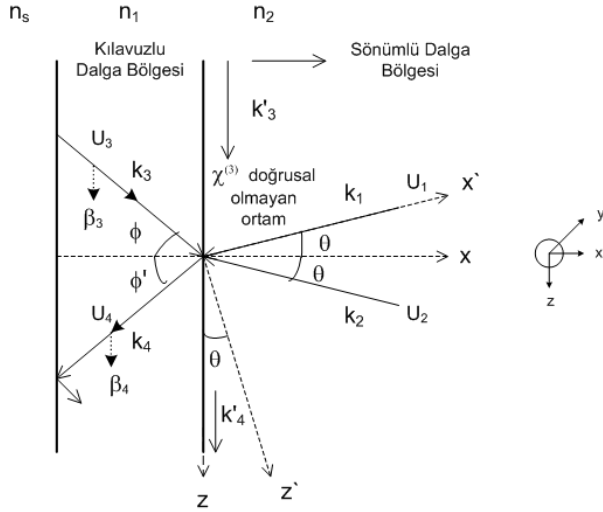
Şekil 2.4 İki Işık hüzmesi Girişiminin $x=0$ Düzlemindeki Yoğunluk Deseni ve Z-Yönündeki Işık Yoğunluk Dağılımları

Şekilde ışık yoğunluk dağılımlarının 2 boyutlu ve kesit değişimleri gözükmemektedir. Kesit değişiminin boyutunun ve periyodik olmayan girişim deseninin faz eşleme üzerine önemli etkileri bulunmaktadır.

2.2 GEÇİCİ IZGARA İLE MODLAR ARASI GÜÇ AKTARIM MODELİ VE BENZETİMİ

Yukarıda açıklandığı gibi iki ışık hüzmesinin doğrusalsız bir ortamda giriştirilmesiyle oluşan geçici kırınım ızgarasının, optik fiberin iletimi üzerine etkisini incelemek için bir matematiksel modele ihtiyaç vardır. Genellikle kullanılan yöntemler 'Coupled Mode Theory (CMT)' ile yapılan, fiberin iletilen modları ile doğrusalsızlık katmanının oluşturduğu dalgakılavuzu (dilim, 'slab') modları arasında ki kuplaj katsayısını hesaplamaya dayalıdır [Ref. salih]. Bu yaklaşımda fiber modlarının özelliklerini koruduğu ve dilim dalgakılavuzu modlarıyla etkileştiği, yada fiber optik kablonun kılıfı üzerindeki geçici kırınım ızgarasının etkisiyle fiber modları arasında güç aktarımı olduğu öngörülmekte ve kuplaj katsayıları buna göre hesaplanmaktadır. Projede kullanılan method ise kırınım ızgarasını oluşturan dalgalar ile fiber modlarına ait dalgaların, Kerr doğrusalsızlığı ortamında Dört Dalga Karışımı (DDK, Four Wave Mixing, FWM) olarak

ele alınmasıdır. Dört dalganın optik fiber ve dilim dalga kılavuzuna göre konumları, yönleri ve diğer detayları şekil 2.5 de verilmektedir.



Şekil 2.5 Dört Dalga Karışımı (DDK) Geometrisi

Fiber optik içerisinde ilerleyen modlara ait dalga vektörleri k_3 ve k_4 ile gösterilmiştir, bu dalgalara ait sönümlü dalga uzantısının kılıf bölgesindeki bileşenleri k'_3 ve k'_4 olarak ifade edilmektedir. Kırınım ızgarasını oluşturan dalgalardan dalga vektörleri ise k_1 ve k_2 olarak gösterilmektedir ve bu dalgalardan fiber optik eksenine dik vektörle yaptığı geliş açısı ise θ ile gösterilmektedir. Kerr doğrusalsızlık sadece kılıf bölgesinde bulunmaktadır, çünkü fiber kılıfının bir kısmının kaldırılarak yerine bu tip doğrusalsızlığı olan polimer yerleştirilmiştir. Dört dalganın aynı anda Kerr doğrusalsızlık ortamında bulunması ile oluşan etkileşim için öngördüğümüz frekans ve faz eşlemeleri şöyledir,

$$\omega_1 + \omega_3 = \omega_2 + \omega_4 \quad 2.8$$

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_3 = \vec{k}_2 + \vec{k}_4 \quad 2.9$$

' k_3 ' ve ' k_4 ' ile gösterilen dalga vektörleri sırasıyla optik fibere ait birinci ve ikinci modlara aittir. Dalga vektörlerinin eşlemesi ile $|k_1|=|k_2|$, $|k_3|=|k_4|$, $\omega_1=\omega_2$ ve $\omega_3=\omega_4$ eşitlikleri verilmektedir. Fiber modlarının kılıf bölgesindeki uzantısı olan (sönümlü) dalgalara ait dalga vektörleri ise β_3 (yada k'_3) ve β_4 (yada k'_4) ile verilmektedir. β_3 ve β_4 vektörleri fiberin birinci ve ikinci modlarına ait olduğu için eşit değildir, ancak oluşturulan kırınım ızgarası ile bu vektörlerin eşitlenmesi sağlanabilir ve böylece ikinci mod etkinleştirilir. Bu durumda ilişki, denklem 10 ile verilir.

$$\beta_3 = \beta_4 \pm mK \quad 2.10$$

'K' oluşturulan ızgaranın periyotudur ve dik yöndeki zayıflama parametresine bağlı olarak K'nın değilebildiğini unutmamak gerekir. Dört dalğanın doğrusalsız ortamda karıştırılmasıyla fiber ikinci modunun aktive edilmesinin analizini CMT kullanarak yapabiliriz (Saleh, 2007). Elde edilen kuple denklemleri birinci ve ikinci modlara ait dalga genlikleri, U_3 ve U_4 , cinsinden yazılabilir.

$$(\nabla^2 + k_3^2)U_3 = -\zeta_3 \Psi U_4 - \gamma_3 U_3 \quad 2.11$$

$$(\nabla^2 + k_4^2)U_4 = -\zeta_4 \Psi^* U_3 - \gamma_4 U_4 \quad 2.12$$

Denklemlerdeki katsayılar $\zeta_{3,4} = 6\mu_0 \omega_{3,4}^2 \chi^{(3)}$ ve $\gamma_{3,4} = 2n_{cl} n_2 \frac{\omega_{3,4}^2}{c_0^2} (2I - I_{3,4})$ fiber kılıf kırınım indisi

n_{cl} , doğrusalsızlık duygunluğu (susceptibility) $\chi^{(3)}$ ve ışık yoğunluk değerleri $I_{3,4} = \frac{|U_{3,4}|^2}{2\eta_0}$

ile ifade edilebilir. ' $\Psi = U_1^* U_2$ ' kırınım ızgarasını Gauss ışık hüzmeleri U_1 ve U_2 ile ilişkilendirmektedir. Denklem 4 ile verilen Gauss ışık hüzmesi ifadesinin yeni kordinatlara göre yazılması ve ışık yoğunluğunun küçük açılar için hesaplanmasıyla denklem 2.13 ilişkisi elde edilir.

$$\Psi(x, y, z) = U_1^* U_2 = \frac{A^2}{|\rho|^2} \exp\left(-k_L x_0 \frac{y^2 + (x \sin(\theta))^2 + z^2}{|\rho|^2}\right) \cos\left[2k_L \sin \theta \left(1 - x \frac{x-L}{|\rho|^2}\right) z\right] \quad 2.13$$

Denklemden $|\rho|^2 = |x'' - L|^2 + |x_0|^2$ ve $k_L = \frac{2\pi}{\lambda_L}$ ifade etmektedir. $k_L \frac{x_0}{|\rho|^2}$ katsayısı girişim

dağılımının zarfını belirlemekte ve azaltım faktörü gibi fonksiyon görmektedir.

Denklemler 2.11 ve 2.12 nin çözümü için yayılan dalgaların en genel olarak tüm fiber modları cinsinden yazılması gerekir.

$$U_3 = \sum_m A_m(z) E_m(x, y) \exp\{-j\beta_m z\} \quad 2.14$$

$$U_4 = \sum_n B_n(z) E_n(x, y) \exp\{-j\beta_n z\}$$

A_n ve A_m yavaş değişen zarf genlik katsayısını ve E_n enine dalga genliğini vermektedir.

Bu ifadeleri kuple denklemlerde yerine koyarsak aşağıdaki ilişkileri elde ederiz,

$$\frac{dA_m}{dz} = -jK_m(z) B_n(z) \exp\{-j(\beta_n - \beta_m)z\} + j\left(-\frac{\gamma_3}{2\beta_m}\right) A_m(z)$$

2.15

$$\frac{dB_n}{dz} = -jK_n(z)A_m(z)\exp\{j(\beta_n - \beta_m)z\} + j\left(-\frac{\gamma_4}{2\beta_n}\right)B_n(z)$$

K_n ve K_m mod kuplaj katsayıları: $K_m(z) = \frac{|\beta_m|}{\beta_m} \frac{1}{4\omega\mu} \zeta_3 C_{mm}(z)$ ve $K_n(z) = \frac{|\beta_n|}{\beta_n} \frac{1}{4\omega\mu} \zeta_4 C_{nn}(z)$ ile verilmektedir. C_{nm} örtüşme katsayısı olup integral ifadesi şöyledir,

$$C_{nm}(z) = \iint_S \Psi(x, y, z) E_m(x, y) E_n^*(x, y) dx dy \quad 2.16$$

Modlara ait enine dalga alanları (E_n ve E_m) ortogonal olmasına rağmen kırınım ızgarası nedeniyle integral sıfırdan farklı bir sonuç vermektedir. Kırınım ızgarasının sonlu boyutta olması ve farklı periyotlardaki bileşenleri nedeniyle integral her bir bileşen için ayrı yazılabilir.

$$\Psi(x, y, z) = \frac{A^2}{|\rho|^2} \exp\left(-k_L x_0 \frac{y^2}{|\rho|^2}\right) H(x, z) \text{ ve } H(x, z) = \sum_{p,r} F_{p,r} \exp\left(i \frac{2\pi p}{L_g} z\right) \exp\left(i \frac{2\pi r}{L_{int}} x\right) \quad 2.17$$

Kırınım ızgarasının Fourier bileşenleri denklem 17 de verilmektedir. $F_{p,r}$ Fourier katsayıları için ifade,

$$F_{p,r} = \frac{1}{4L_g L_{int}} \int_{-L_g}^{L_g} \int_{-L_{int}}^{L_{int}} \exp\left(-k_L x_0 \frac{(x \sin(\theta)^2) + z^2}{|\rho|^2}\right) \cos\left[2k_L \sin \theta \left(1 - x \frac{x-L}{|\rho|^2}\right) z\right] \exp\left(-i \frac{2\pi r}{L_{int}} x\right) \exp\left(-i \frac{2\pi p}{L_g} z\right) dx dz$$

Tüm Fourier katsayılarını dahil ederek ışık hüzme genliği şöyle yazılabilir,

$$A_m(z) = \sum_q A_q(z) = \sum_{p,r} A_{p,r}(z) \quad 2.18$$

$$B_n(z) = \sum_q B_q(z) = \sum_{p,r} B_{p,r}(z)$$

Bu katsayıların denklem 2.14 de yerine konması ve arkasından denklemler 2.11, 2.12 de yerine konması ile tüm modlar ilişkilendirilmiş olmaktadır.

Çözüm için sınır değerleri ise başlangıçta ikinci modun hiç enerjisi olmadığı ($B(0)=0$) ve tüm enerjinin temel modun taşıdığı ($A(0)=A_{0,p,r}$) kabul edilmekte. Ayrıca herhangi bir

anda ve z-pozisyonunda toplam gücün değişmediği kabul edilebilir $\left[\frac{d}{dz}(|A_m|^2 + |B_n|^2) = 0\right]$.

Her bir harmonik için (Fourier bileşeni) denklem 2.15 in çözümü şöyle yazılabilir,

$$A_{p,r}(z) = \left[A_{0,p,r} \cos(Q_{p,r} z) + j \frac{A_{0,p,r}}{Q_{p,r}} \delta_{p,r} \sin(Q_{p,r} z) \right] \exp\left(-j \delta_{p,r} z + j \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} z\right)$$

$$B_{p,r}(z) = -j \frac{K_{n,p,r}}{Q_{p,r}} A_{0,p,r} \sin(Q_{p,r} z) \exp\left(j \delta_{p,r} z + j \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} z\right) \quad 2.19$$

$K_{m,p,r}$ ve $K_{n,p,r}$: kuplaj katsayılarının genliğidir ve örtüşme katsayısıyla ilişkilendirilir.

$$K_{m,p,r} = \frac{|\beta_3|}{\beta_3} \frac{1}{4\omega\mu} \zeta_3 C_{mm,p,r} \text{ ve } K_{n,p,r} = \frac{|\beta_4|}{\beta_4} \frac{1}{4\omega\mu} \zeta_4 C_{mm,p,r} \quad 2.20$$

$C_{mm,p,r}$ ve $C_{nn,p,r}$ örtüşme integralinin (2.16) her bir harmonik için değerini vermektedir ve simetri nedeniyle bir birlerine eşit alınabilir ($C_{mm,p,r} = C_{nn,p,r}$), bu durumda $K_{m,p,r}$ ve $K_{n,p,r}$ katsayıları da eşit olur. 'Q' parametresi $Q_{p,r}^2 = K_{p,r}^2 + \widehat{\delta}_{p,r}^2$ ile ifade edilir ve uzaysal kuplaj periyotunu belirler. Ayrıca, akort kaydırma parametresi $\widehat{\delta}_{p,r}$; faz eşleme

parametresi $\delta_{p,r} = \frac{1}{2}(\beta_4 - \beta_3) + \frac{\pi p}{L_g}$ ve kendi kendine kuplaj parametresiyle

$$\alpha_{a,b} = -\frac{2n_{cl}n_2 \frac{\omega_{3,4}^2}{c_0^2} (2I - I_{3,4})}{2\beta_{3,4}} \text{ ile ilişkilidir; yani } \widehat{\delta}_{p,r} = \delta_{p,r} + \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2} \text{ dir.}$$

Toplam verimlilik; yani birinci moddan ikinci moda kırınım ızgarası sonrasında aktarılan ışık için şu ifade yazılabilir,

$$\eta = \frac{|B_n(L_g)|^2}{|A_m(0)|^2} = \sum_{p,r} \frac{K_{p,r}^2}{Q_{p,r}^2} \sin^2(Q_{p,r} L_g) \quad 2.21$$

L_g : Kırınım ızgarası boyunu vermektedir. Modlar arasında ki periodik enerji transferini en fazla olabilmesi için Q parametresinin endüyük değerde olması gerektiği gözükmektedir. Bunun için akort kaydırma parametresinin $\widehat{\delta}_{p,r} = 0$ olması gerekir ki Q değerini endüyük değere taşır. Akort parametresinin sıfır olması ise aşağıdaki ifadeyi doğurur,

$$\beta_4 \left(1 + n_{cl} \frac{\Delta n_4}{n_{eff4}^2}\right) = \beta_3 \left(1 + n_{cl} \frac{\Delta n_3}{n_{eff3}^2}\right) - \frac{2\pi}{L_g} p \quad 2.22$$

Denklemden, $\Delta n_{3,4} = n_2(2I - I_{3,4})$ ve $\beta_{3,4} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff3,eff4}$ doğrusalsızlığa bağlı kırınım indis

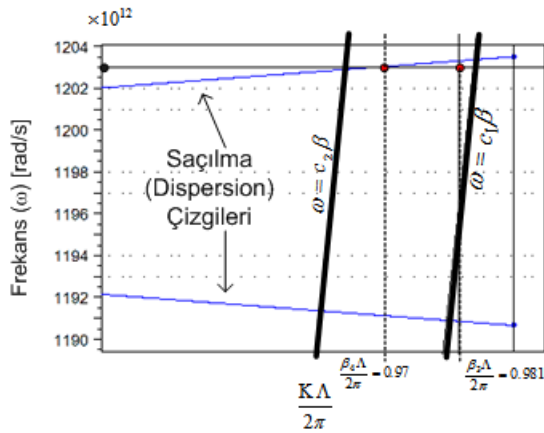
değişimini ve etkin kırınım indisi değerlerini vermektedir. Denklem 2.22 iki mod arasında ki faz eşlemesini doğrusalsızlık ortamında nasıl sağlanacağını göstermektedir. Doğrusalsızlık parametreleriyle birlikte, toplam ışık yoğunluğu (I) önemli bir rol

oyunmaktadır ve ışık şiddetine bağlı olarak faz eşlemesi sağlanabilmektedir. Kırınım ızgarasının boyu (L_g) ile girişim desininin periyodu (Λ) birbirleriyle ilişkili iki parametredir ve etkin faz eşlemesi için gerekli dalga vektörünü vermektedir.

Örnek Hesaplama

Sadece iki modun iletilebildiği asimetrik dalga kılavuzu için yapılan hesaplamalar ile elde edilen toplam verimlilik grafikleri aşağıdadır. Dalga kılavuzunun desteklediği modlar $\omega = 12032 \times 10^{12}$ rad/s frekansında $\beta_3 = 9.708 \times 10^6$ ve $\beta_4 = 9.6 \times 10^6$ yayılım sabitine sahiptir. İki ışık hızıyla oluşturulan kırınım ızgarasının indis değerleri $n_d = 2.32$ ile

$n_d + \Delta n = 2.327$ ($\Delta n = 0.007$) olarak ve ızgaranın boyu 1 mm olarak belirlenmiştir. Kırınım ızgarasının x-z düzlemindeki Fourier serisi açılı ile elde edilen bileşenlerden önemli olanlar (en azından yüzde 5 veya daha büyük) 78, 79, 80 ve 81 inci katsayılarıdır. Bu değerler kırınım ızgarası boyunun ızgara periyotuna oranının iki katına denk gelmektedir. Elde edilen değerlerin dispersiyon grafiği üzerinde gösterimi şekil 2.6 da verilmektedir.

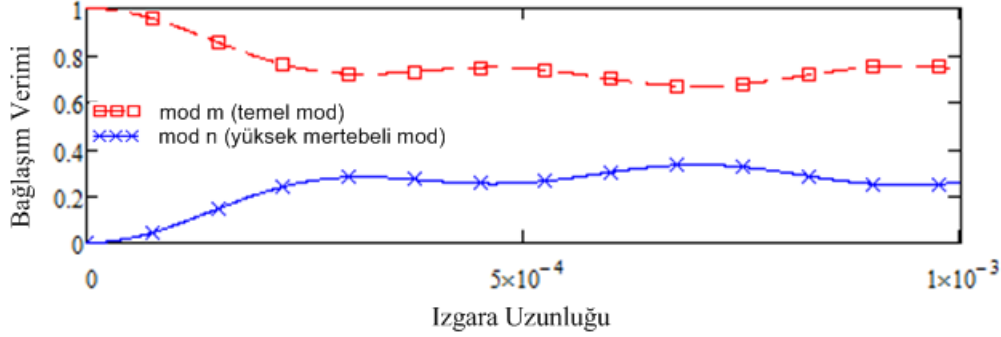


Şekil 2.6 Kırınım ızgaralı Yapı İçin Dispersiyon Grafiği

Şekildeki dispersiyon çizgileri kırınım ızgarasının band geçiren frekans aralığını, siyah çizgiler kırınım ızgarası indislerindeki düzlemsel dalga yayılım sabitlerini ve noktalı çizgiler de fiber dalga kılavuzu modlarının yayılım sabitlerini belirtmektedir. Görüldüğü üzere gelen dalga (3) yasak bantta yer alırken çıkan dalga (4) dispersiyon çizgisi üzerinde ilerleyen dalga özelliğindedir.

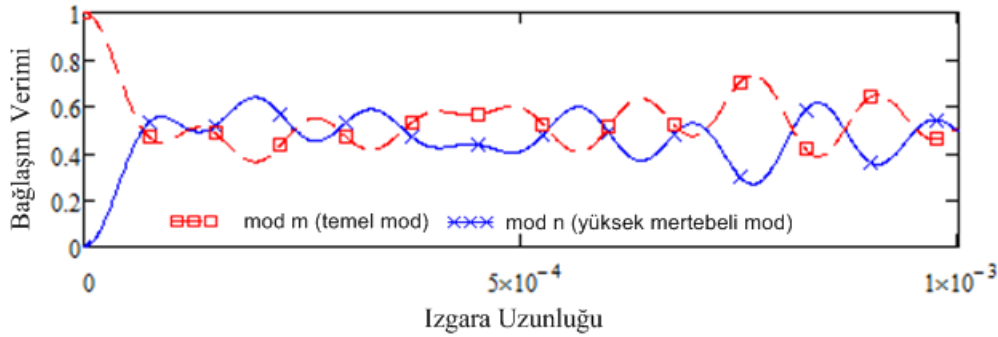
İdeal faz eşlemesi olduğunda yani akort parametresi $\hat{\delta}_{p,r} = 0$ durumunda % 67 güç aktarımının gerçekleştirilebileceği hesaplanmıştır. İdeal faz eşlemesi durumunda tabii ki ızgara boyutunun etkisi olmamaktadır çünkü denklem 14 deki ızgara sabiti tek ideal periyotda olduğu farzedilmiş oluyor $\frac{2\pi}{L_g} p \Rightarrow \frac{2\pi}{\Lambda}$.

İdeal faz eşlemesinin olmadığı durumda Q parametresinin değeri artacaktır, çünkü akort değişkeni $\hat{\delta}_{p,r} \neq 0$ sıfırdan farklıdır. Kuplaj ve akort parametreleri ($\kappa \cong \hat{\delta}$) alındığında (düşük kuplaj) verimlilik % 33 civarında hesaplanmıştır, şekil 2.8 de verilmektedir.



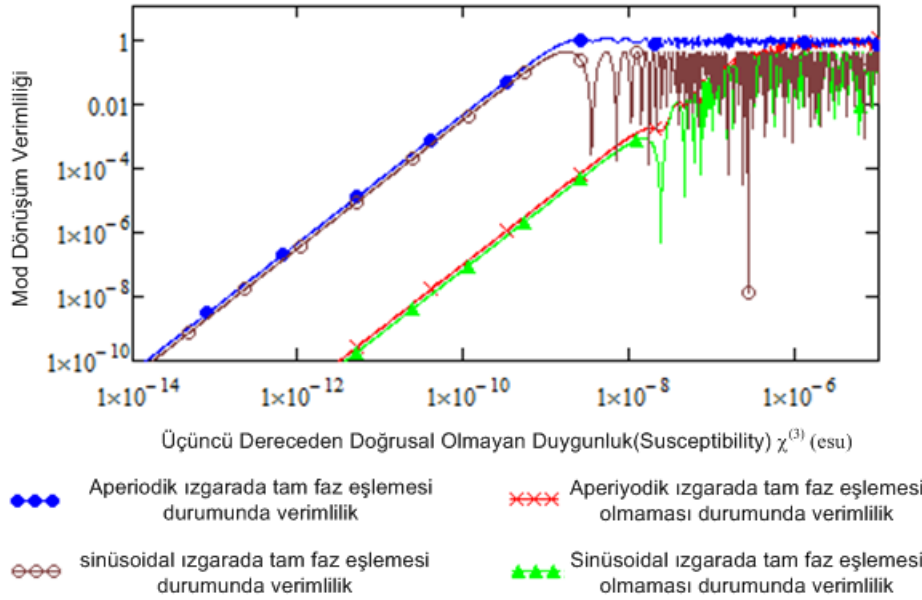
Şekil 2.7 Modlar Arası Enerji Aktarım Verimliliği (Düşük Kuplaj $\kappa \cong \hat{\delta}$)

Fiber modlarında ki enerjinin büyük kısmı fiber ana modunda kalırken 25% ile 33% arasında dalgalanmaktadır. Benzer şekilde $|\kappa| \gg |\hat{\delta}|$ alındığında (fazla kuplaj) verimlilik % 48 olarak hesaplanmıştır, şekil 2.8 de verilmektedir.



Şekil 2.8 Modlar Arası Enerji Aktarım Verimliliği (Yüksek Kuplaj $|\kappa| \gg |\hat{\delta}|$)

Fazla kuplaj durumunda dalgalanmanın daha fazla olduğu ve ızgara boyunun belirleyici özellik taşıdığı gözükmektedir. Son olarak mod transfer verimliliğine doğrusalsızlık duygunluğunun etkisini gösteren grafik şekil 2.9 da verilmiştir.



Şekil 2.9 Modlar Arası Enerji Aktarım vVerimliliğinin Duygunluk Parametresi ile Değişimi

Şekilde ideal faz eşlemesinin olduğu ve olmadığı durumlarla, sünis benzeri kırınım ızgarası ile sinüse benzemeyen türden ızgaralar için mod transfer verimliliği hesapları verilmektedir. Düşük doğrusalsızlık değerlerinde faz eşlemenin önemi daha bir belirgin gözükmemektedir. Dalgalanmanın sünis tipi ızgaralarda fazla olması beklenen bir sonuç çünkü diğer durumda farklı Fourier bileşenleri hesaba girerek dalgalanmayı dengelemektedir.

2.3 OPTİK KERR DOĞRUSALSIZLIĞI YÜKSEK POLİMER FİLM ÜRETİMİ

Projede gerçekleştirilecek yönlendirme aygıtı Kerr etkisine bağlı olarak anahtarlama yapacağından malzeme özellikleri kritik öneme sahiptir. İhtiyaç duyulan polimerin doğrusalsızlık değeri yüksek (Kerr katsayısı 532 nm de) ve tepki süresi hızlı olmalıdır. Bir malzemenin fotonik aygıt yapımında kullanılmasına yönelik üç ölçüt vardır (Brzozowski, 2001). Birincil olarak malzemenin tepki verme süresi, lazerin darbe süresinden kısa olmalıdır. İkinci ölçüte göre doğrusal soğurma (linear absorption), malzemenin doğrusalsızlık etkisinden zayıf olmalıdır ve bu ölçüt W değer katsayısı ile belirtilir.

$$W = \frac{\Delta n}{\alpha_0 \lambda} > 1$$

2.23

Burada Δn kırılma indisi değişimi, α doğrusal soğurma katsayısı ve λ da ışığın dalgaboyudur. Buna göre $W > 1$ olmalıdır. Üçüncü ölçüte göre iki foton soğurma etkisi

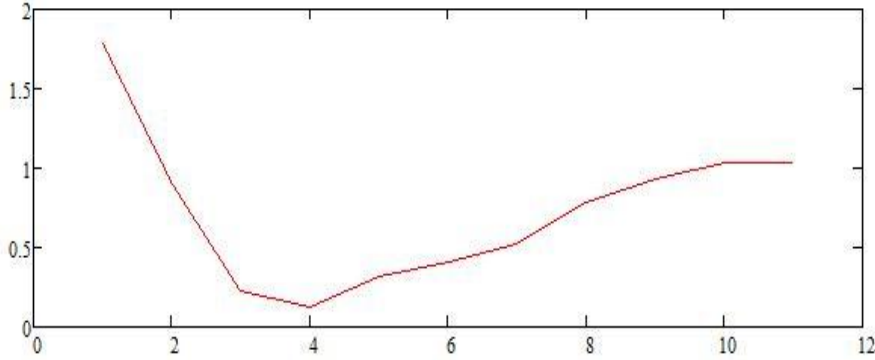
(two photon absorption), doğrusalsızlık etkisine göre zayıf olmalıdır ve bu durum T değer katsayısı ile ifade edilir

$$T = \frac{2\beta_2\lambda}{n_2} < 1$$

2.24

Burada β_2 iki foton soğurma katsayısı, n_2 doğrusalsızlık katsayısı ve λ da ışığın dalgaboyudur. Buna göre $T < 1$ olmalıdır. Bu doğrultuda (T. He, 2007) tarafından önerilen polimerin bu amaç için uygun olduğuna karar verdik. Bu polimer, polyvinyl alcohol (PVA) içine Methyl Red (MR) veya Methyl Orange (MO) azobenzene molekülleri katılarak elde edilir. Bu şekilde elde edilen kompozit malzemelerin üçüncü dereceden doğrusalsızlık katsayıları: MR içeren kompozit için $n_2 = -1.18 \times 10^{-9}$ esu ve MO içeren kompozit için de $n_2 = -1.23 \times 10^{-9}$ esu olarak rapor edilmiştir. Bu kompozitler için T değerleri 0 olarak ölçülmüş, MR için $W = 2.05$ ve MO için $W = 2.34$ olarak bulunmuştur. Laboratuvarında bulunan 532 nm darbeli lazer ile yukarıdaki malzemeler uyarıldığında MO katkılı PVA film için $\Delta n = 0.01845$, MR katkılı PVA film için de $\Delta n = 0.0177$ civarında Kerr etkisine bağlı indis değişimi hesaplanmıştır.

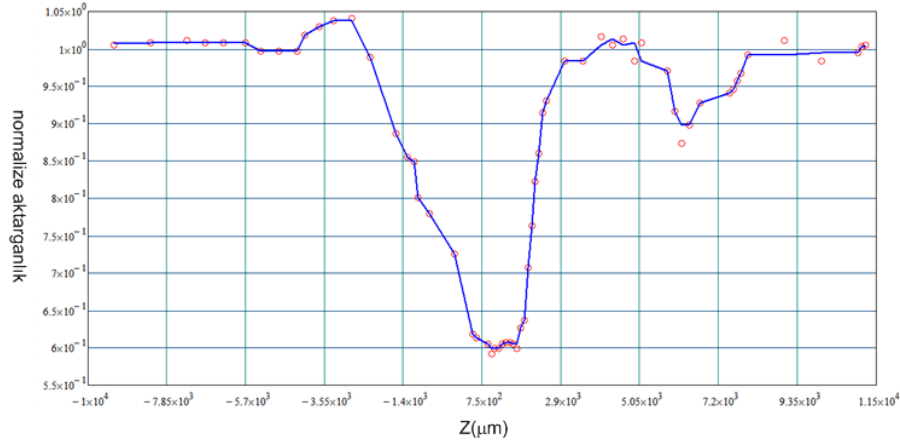
Yukarıda bahsedilen tarife göre hazırlanan polimerler cam alttaş üzerine fırıl kaplama yöntemiyle dökülerek doğrusalsız polimer filmler elde edilmiştir. Bu filmlerin doğrusalsızlıkları 'z-scan' (z-tarama) yöntemiyle ölçülmüştür (He, 2007).



Şekil 2.10 Z-Scan Yöntemiyle Elde Edilen Doğrusalsızlık Grafiği

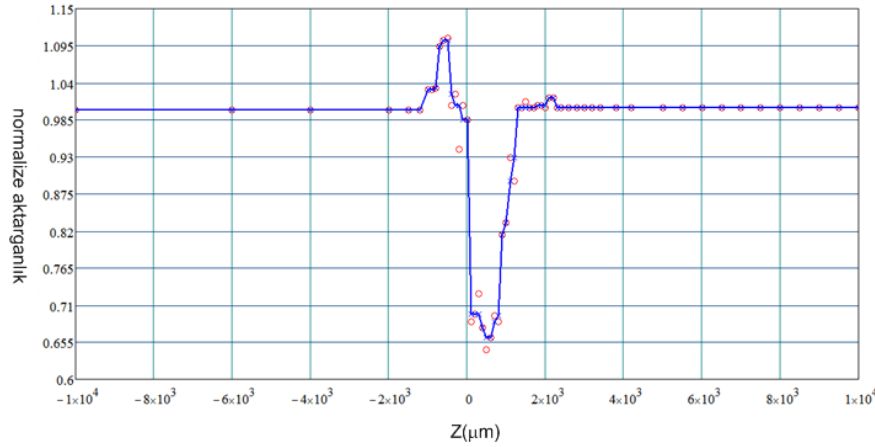
Bu değerler kullanılarak doğrusalsızlık katsayısı $n_2 = -0.28 \times 10^{-10}$ esu olarak bulundu. Kompozit malzeme içerisindeki MR miktarı malzemenin doğrusalsızlığını doğrudan etkilemektedir. Bir sonraki aşamada değişik oranlarda PVA ve MR karıştırarak yüksek doğrusalsızlık katsayısına sahip polimerler sentezlenmiştir. Ayrıca doğrusalsızlığı arttırmak ve ince filmin kırılma indisini düşürmek için filmin içine 20 nm çapında SiO_2 nano parçacıklarının ilave edilmesine karar verildi. Elde edilen bu filmlerin doğrusalsızlık karakterizasyonu yeniden yapıldı ve aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

İlk olarak, Nanoparçacık: 20 nm SiO_2 ve Film İçerik Oranları: SiO_2 - %7.35, PVA- %7.42, Methyl Red - % 0.014 olan bir polimer sentezlenerek film dökülmüş ve aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 2.11 Nanoparçacık İlaveli PVA Polimerin Z-Scan Ölçüm Grafiği

Doğrusalsızlık katsayısı $n_2 = -4.616 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{W}$ olarak ölçülmüştür. Ölçüm kapalı açıklık metodu (Closed Aperture) ile yapılmıştır (He, 2007). Benzer şekilde aynı filmin nano parçacık ilavesiz hazırlanmış film için elde edilen grafik aşağıda verilmektedir.

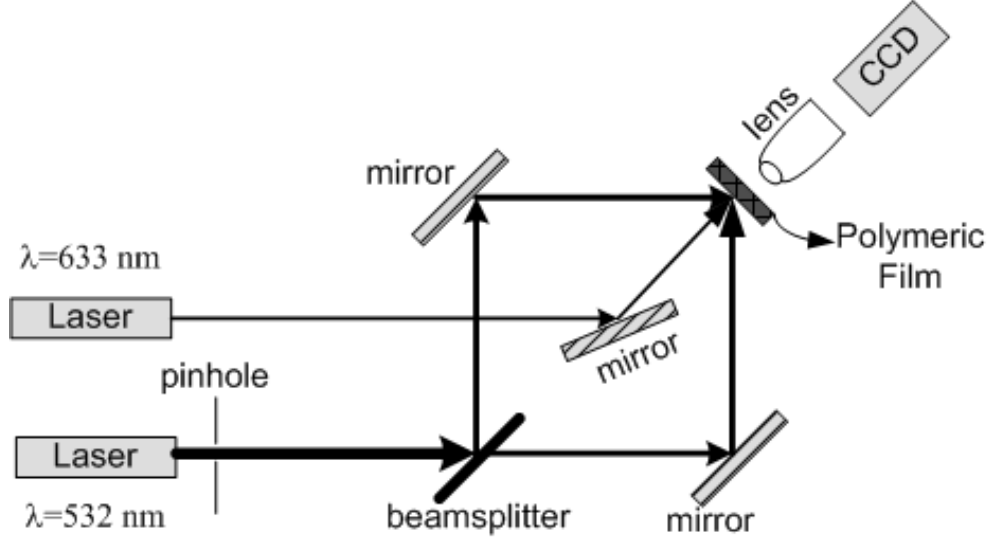


Şekil 2.12 Nanoparçacık İlavesiz PVA Polimerin Z-Scan Ölçüm Grafiği

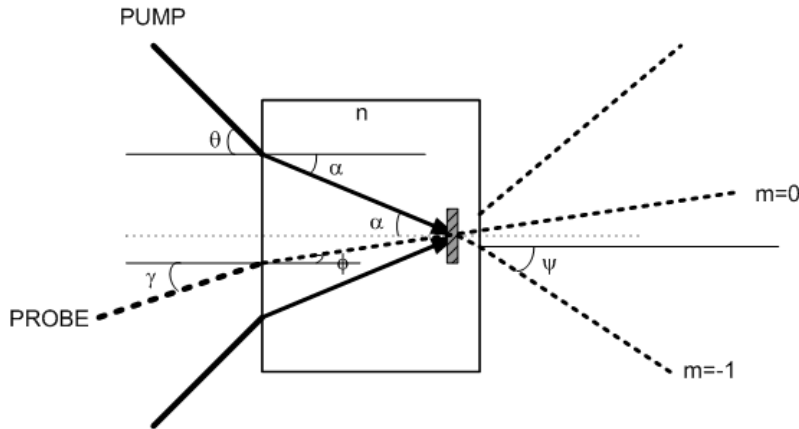
Üçüncü dereceden doğrusalsızlık katsayısı $n_2 = -4.02 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{W}$ olarak ölçüldü. Elde edilen bu sonuçlar, silikon parçacık ilavesiyle 15% oranında doğrusalsızlığın artırılabilirliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu polimerin, dielektrik delinme gücüne ulaşmadan, kırınım indisinin ikinci basamağında değişim yaratılabileceği tespit edilmiştir.

2.4 POLİMER FİLMLERDE GEÇİCİ KIRINIM IZGARASI OLUŞTURMA VE SAÇILMA BAŞARIM ÖLÇÜMLERİ

Sentezlenen yüksek doğrusalsızlıklı polimerin karakterizasyonu tamamlandıktan sonra polimer içerisinde oluşturulacak kırınım ızgarasının karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla şekildeki 'pump-probe' deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 2.13 'Pump- Probe' Deney Düzeneği



Şekil 2.14 'Pump-Probe' Deney Düzeneğinde Hüzmelerin Geliş ve Çıkış Açıları

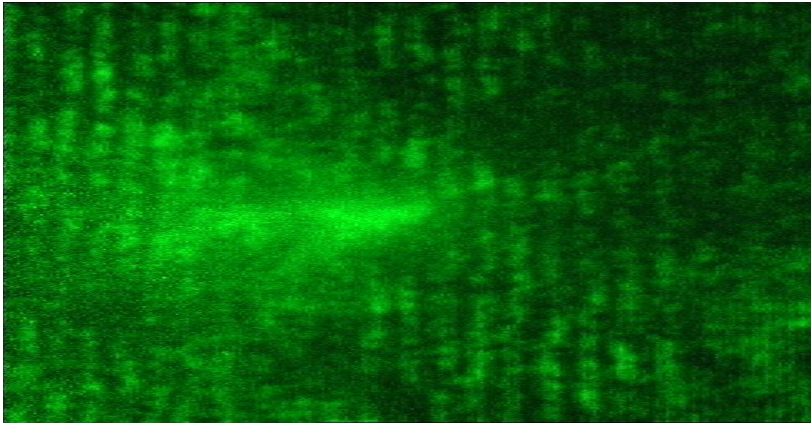
Bu ifadede m saçak numarasını (diffraction order) göstermektedir. χ açısı ile ızgarayı terkeden hüzmeye, polimer filminden ψ açısı ile çıkmaktadır ve bu açı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\psi = \sin^{-1} \left(n \times \sin(\chi) \right) \text{ ve } \chi = \sin^{-1} \left(\sin(\phi) + m \frac{\lambda_p}{n\Lambda} \right)$$

2.25

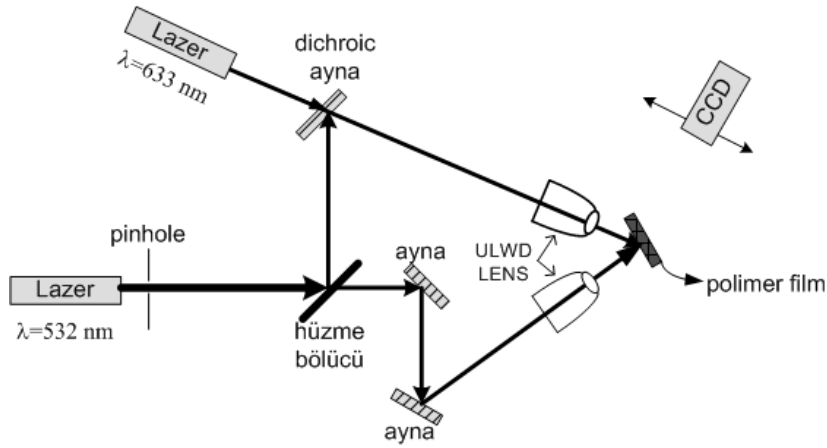
Öncelikle, girişim anında maksimum güç kullanabilmek için hüzmeleri TM polarizasyonda göndermeye karar verdik ve giriş açısını da Brewster açısına ayarladık. Kullanılan malzeme için bu değer $\theta = 56$ derece olarak hesaplandı ve deney düzeneği bu değere göre kuruldu. 'Probe' hüzmeleri olarak 542 nm dalga boyunda He-Ne sürekli dalga lazer kullanılırken, 'Pump' olarak da dalga boyu 532 nm, darbe süresi 10 ns ve ortalama çıkış gücü 5 W olan darbeleri lazer kullanıldı. 'Pump' ışını 56 derece ile gönderilip kırınım ızgarası oluşturulduktan sonra, 'Probe' ışını 45 derece ile gönderildiğinde sadece $m=-1$ saçığı oluşmakta ve bunu oluşturan hüzmelerin malzemeden çıkış açısı $\Psi=-79.15$ olarak hesaplandı.

Polimer içerisinde (yüzeyinde) oluşan girişim deseninin görüntüsü şekil 15 de verilmektedir.



Şekil 2.15 Optik Doğrusalsız Polimer İçindeki Girişim Deseni Görüntüsü

Şekil 2.15'de görüldüğü üzere film üzerinde girişim deseni oluşmasına rağmen, desenin Kerr etkisi ile kırılma indisi değişimini ne kadar etkin olarak dönüştüğünü anlamının yegane yolu 'Pump'-'Probe' deneyinde saçıkların gözlemlenmesidir. Ancak, çok küçük bir saçılma beklediği için (Schneider, 1999) deney düzeneğinin eniyilenmesi gerekmektedir. Bu maksatla muhtelif deney düzenekleri araştırılmış ve girişim ışın hüzmelerinin asimetrisini kompanse eden aşağıdaki düzenek kullanılmıştır.



Şekil 2.16 Saçılım Deney Düzenegi

Ayrıca, film kalınlığının difraksiyona etkisi detaylı olarak incelenmiş ve yüksek verimlilik için gerekli kalınlığa yakın film hazırlanmıştır (Sturman, 2007).

$$\theta_p = 45^\circ \quad \text{ve} \quad I_1 = I_2 = 1 \times 10^9 \text{ W/cm}^2 \quad (\text{Lazer Akımı} = 31 \text{ A})$$

Kerr katsayısı $n_2 = 3.44 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{W}$, kompozit polimerin kalınlığı $10 \text{ }\mu\text{m}$, 'Pump' hüzmelerinin darbe genişliği 10 ns , 'Pump' hüzmelerinin minimum spot genişliği $80 \text{ }\mu\text{m}$ ve 'Probe' ışınının dalga boyu 633 nm alındığında oluşturulan geçici ızgaranın verimliliği %2.244 olarak hesaplandı.

Oldukça düşük verimlilikli saçılma ölçümleri için ince beş farklı ince film hazırlanmıştır. Bu filmlerin listesi aşağıdaki tabloda verilmektedir.

	Malzeme	Spin (devir/dk)	Spin Süresi (sn)	Film Kalınlığı (μm)
Film 1	MR1	1000	60	0.460
Film 2	MR2	1000	60	0.460
Film 3	MR1	1500	30	2.7
Film 4	MR2	1500	30	2.7
Film 5	MR2	2000	30	2

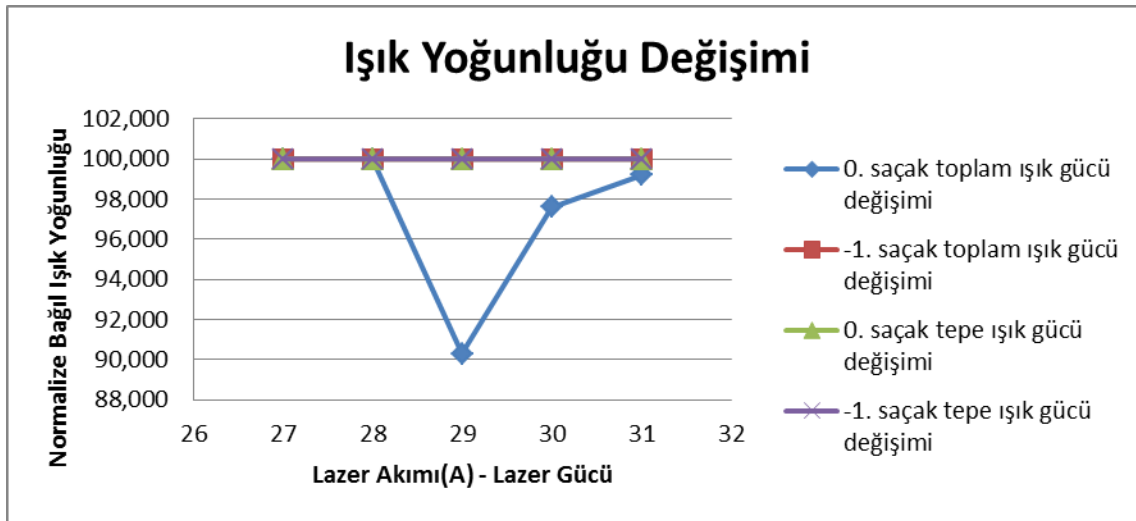
Tablo 1 Muhtelif Doğrusalsız Polimer Filmler ve Özellikleri

Tabloda gösterilen filmler kullanılarak şekil 14'te gösterilen 'Pump-Probe' düzenegi kurulmuştur. 'Pump' hüzmelerinin kırınım ızgarası oluşturması durumunda "Probe" hüzmeleri kırınıma uğrayacak ve kırınım saçakları oluşacaktır. Bunu saptamak amacıyla 1

nW hassasiyete sahip sensör dizini olan CCD kullandık. CCD, -1.Saçanın oluşacağı açısız doğrultuya yerleştirilerek ışık yoğunluğu değişimleri gözlemlenmiştir. Kırınım ızgarasını belirten bir diğer nokta da 0. Saçakta (0. order) oluşacak ışık yoğunluğu azalmasıdır. Geçici kırınım ızgarasının ışığı başka saçaklara dağıtmasında mümkündür. Kırınım ızgarasının oluşmaması durumunda ise herhangi bir bir dağılma olmayacak, sadece filmde kaynaklara kırılma ve yansıma olayları gerçekleşecektir. Ayrıca 'Pump' için kullandığımız lazerden kaynaklanan ışığın CCD'ye ulaşmasını engellemek amacıyla CCD önüne 532 nm dalgaboyundaki ışığı geçirmeyen, 632.8 nm dalgaboyundaki ışığı geçiren lazer dar bant (line) filtre kullanılmıştır. Tabloda aynı özelliklere sahip iki farklı reçete kullanılmış; MR1 ve MR2 olarak belirtilmiştir.

Filmlere ait difraksiyon saçaklarından -1. ve 0. harmoniklere ait ışık yoğunlukları hem tepe değeri hemde toplam güç olarak kaydedilmiştir. Şekillerde yatay eksen lazer akımına göre verilmiştir, bunun karşılığı olan odaklanmış tepe değeri kullanılan merceğin özelliklerine göre değişmekle birlikte, GW/cm^2 civarındadır. Grafiklerde önemli olan göreceli değişim olduğu için mutlak değerler ölçülmemiş ve verilmemiştir.

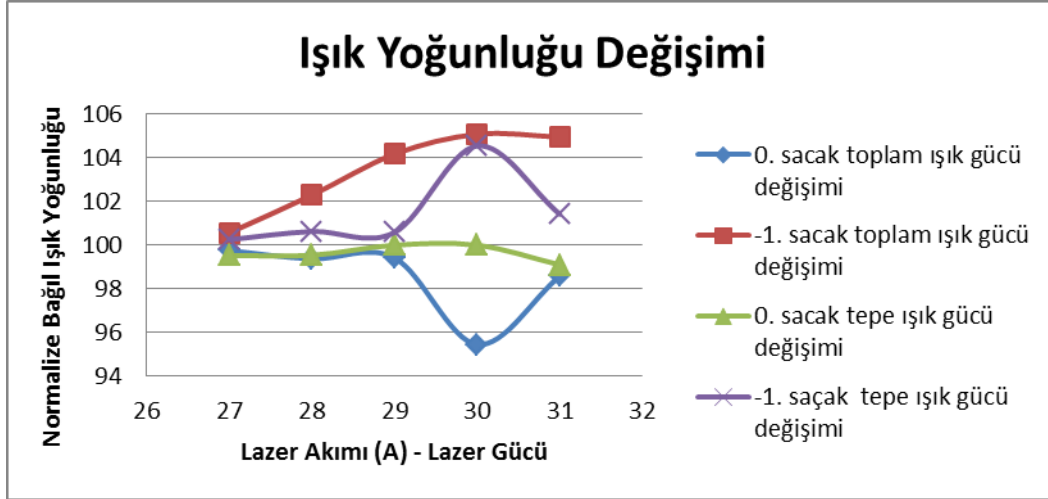
İlk filme ait grafikler şekil 2.17 de verilmektedir.



Şekil 2.17 Film-1 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri

Lazer belirli bir eşik değeri geçene kadar (28 A) hiç bir etkileşim gözükmemekte, ancak 29 A den sonra 0.saçakta bir düşüş görülmesine rağmen -1.saçakta her hamgi bir değişim izlenmemiştir. Bunun nedeninin, film hazırlanırken kullanılan reçeteye (MR1) bağlı olarak içerisinde ve yüzeyinde çok miktarda bulunan parçacıklar olduğu anlaşılmıştır.

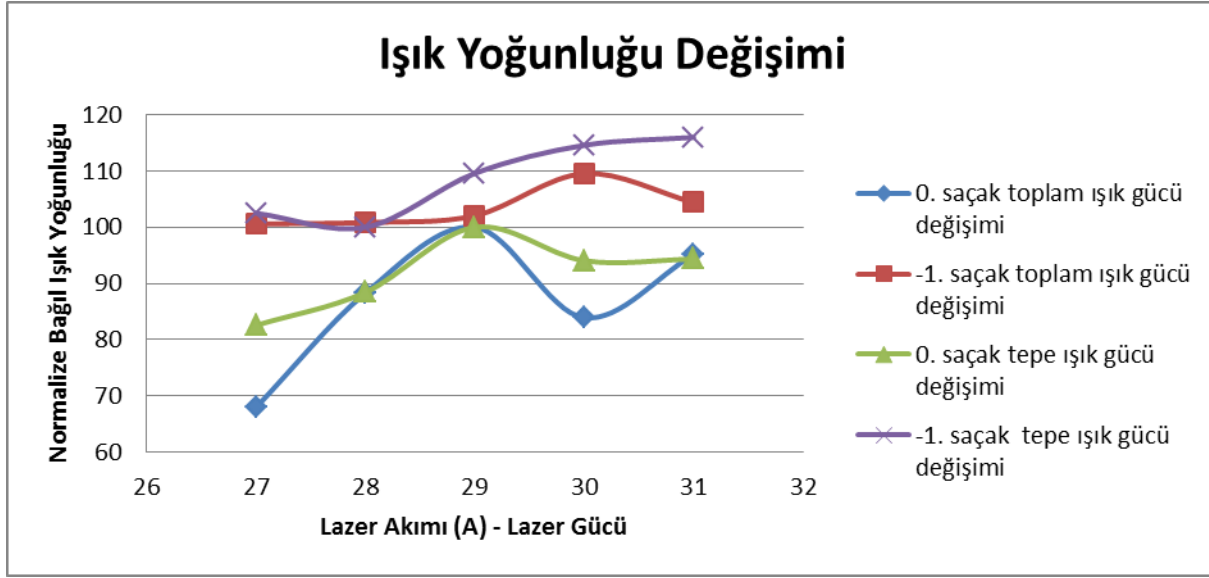
İkinci film, yine birinci film özelliklerine sahip ancak farklı bir reçete ile hazırlanmıştır, buna ait grafikler Şekil 2.18 de görülmektedir.



Şekil 2.18 Film-2 için Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri

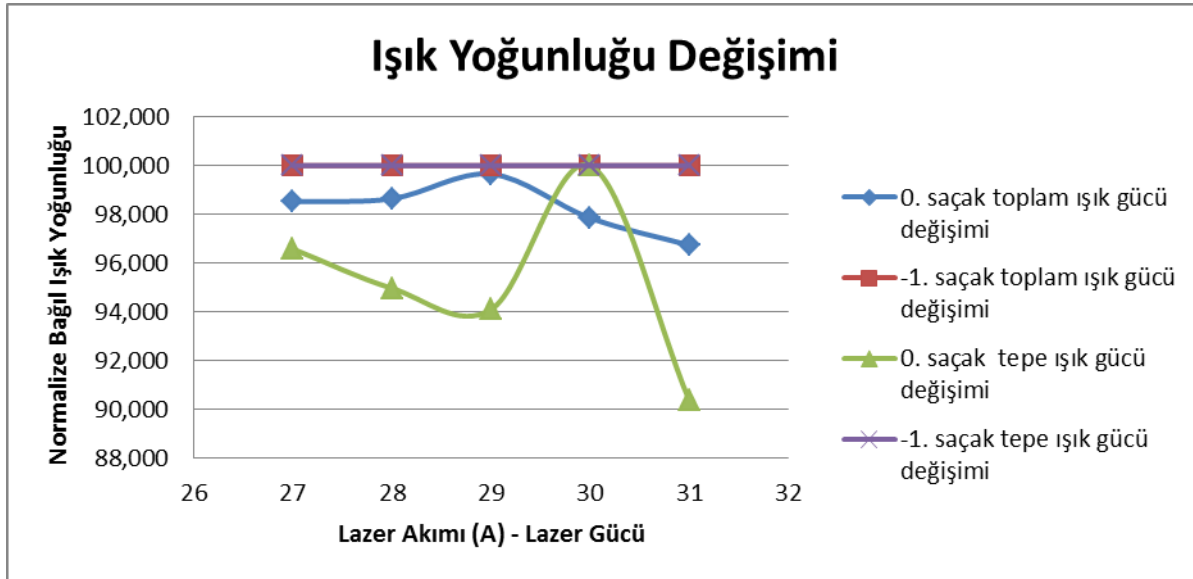
İkinci film için yapılan ölçümlerde, -1. sacakda ışık lazer 29 A den sonra izlenebilmiştir. Benzer şekilde 0. sacakda da ışık yoğunluk düşüşü gözlemlenebilmiştir. İki harmonik arasında ters bir ilişki olması toplam gücün korunumu nedeniyle beklenen bir durumdur. Toplam ışık yoğunluk eğrisinin tepe ışık yoğunluk eğrisinden farklı olması lazer ışık hüzmesinin yüksek akımlarda ışın profilini değiştirmesi nedeniyle açıklanabilir. Lazer ışık hüzmesinin karakterizasyonunda bu değişim açıkça ortaya konmuştur. Elde edilen bu değerler, kırınım izgarasının 30 Amp. lik ışık yoğunluğunda etkin olarak oluştuğunun ifadesidir.

Üçüncü film ilk filmle aynı reçeteyi kullanmakla birlikte farklı hazırlama yöntemi nedeniyle farklılık göstermektedir.



Şekil 2.19 Film-3 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri

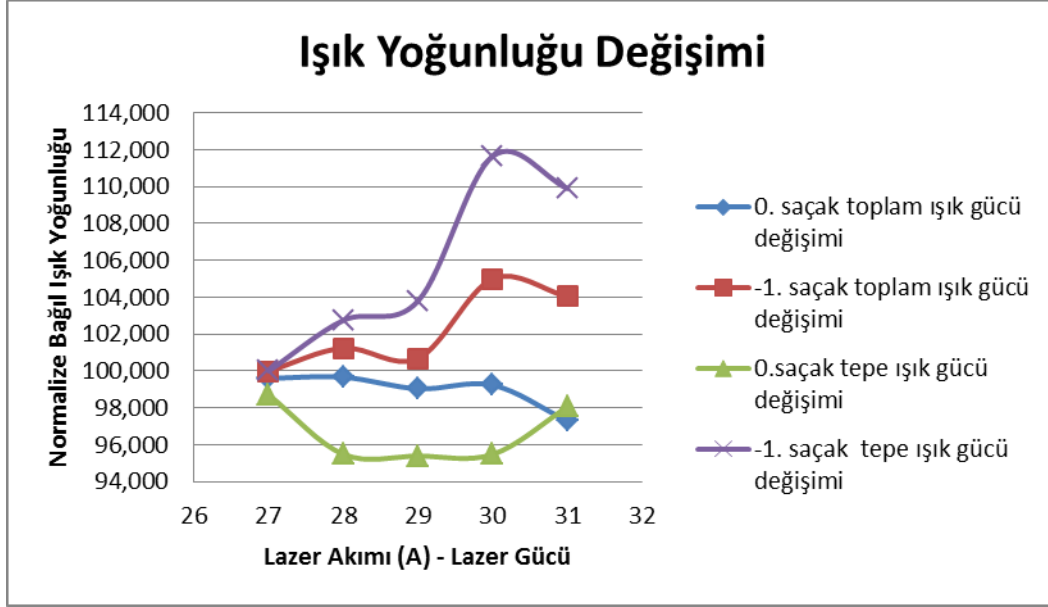
Film 3 için ışık yoğunluk grafikleri, 30 Amp. lik lazer ışığında -1.saçağa güç aktarımının gerçekleştiğini ve bunu 0.saçağın güç kaybının takip ettiği gözükmektedir. Film 3 ile aynı metotla hazırlanan ama MR2 reçetesi kullanılan Film 4 için grafikler şekil 2.20 de verilmektedir.



Şekil 2.20 Film-4 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri

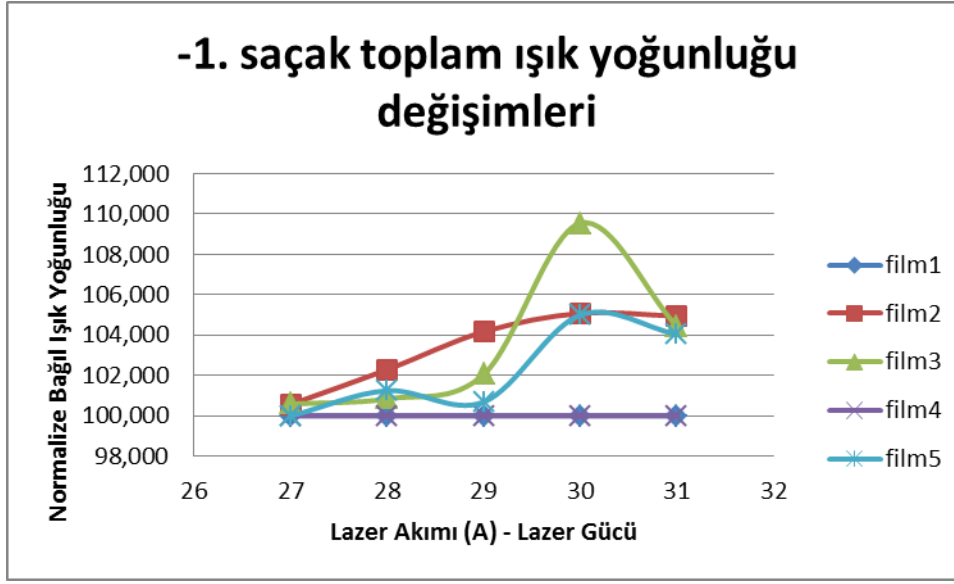
Film 4 de saçılma gözlemlenememiş ancak 0.saçak tepe değerinde önemli bir düşüş bulunmaktadır, bu durum ışığın başka saçaklara aktarılmış olabileceğini düşündürmektedir.

Son olarak Film 5 fırıl kaplama ve süre olarak farklı olarak hazırlanmış ve ışık yoğunluk grafikleri şekil 2.21 de verilmektedir.



Şekil 2.21 Film-5 İçin Kırınım Izgarası Harmoniklerindeki Işık Yoğunluk Değerleri

Fim 5 de saçılmaların 29 Amp. den itibaren başladığı gözlenmektedir. Tüm Filmlerin karşılaştırmalı saçılma verimliliğini gösteren grafikler Şekil 2.22 de verilmiştir. Kırınım ızgarasından saçılma deneylerinde kontrol ışığının (probe) ve ızgara yazan ışığın (pump) eşfazlılık (coherence) değerinin de verimliliğe çok büyük etkisi vardır. Herşeyden önce girişim deseninde ki kontrast doğrudan eşfazlılıkla ilgilidir (Saleh, 2007), bu nedenle kullanılan lazer ışıklarının tek modlu olması önemlidir. Deneyde kullanılan DPSS lazerin karakterizasyonunu yaptığımızda 30 A den sonra tek mod özelliğini koruyamadığı ve ikinci bir tepe ışık noktasının oluştuğu belirlenmiştir. Sonuç olarak kitlemeli yüselteç kullanarak bu tür salınımların etkisi azaltılmakla birlikte, ışık darbesinin tepe noktasının çok az kayması bile sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir. Elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından ölçümler defalarca tekrarlanmaktadır.

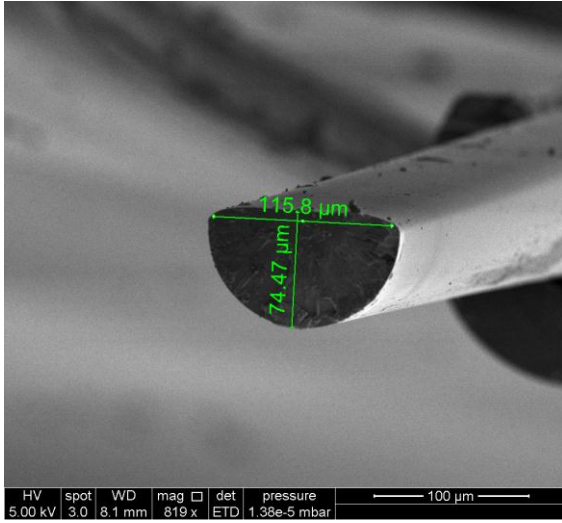


Şekil 2.22 Beş Filme ait -1.Saçak Toplam Işık Yoğunluğu Grafikleri

Şekil 2.22 de gözüktüğü üzere -1.saçağa en yüksek güç aktarımı (%10) 3.Film ile gerçekleşmiştir. Sonuçlar bize kullanılan reçetenin ve hazırlama yönteminin önemini ortaya koymuştur. Saçılma verimliliği ile kırınım ızgarasının fiziksel özellikleri arasında ki ilişkinin oldukça karmaşık olması, elde edilen kırınım ızgaralarının fiziksel özellikleriyle (tepe Δn değeri) ilgili kesin yargılar ortaya koymamıza engel olmaktadır. Sonuç olarak, doğrusalsız kırınım indis ızgarasının karakterizasyonu muhtelif MR katkılı doğrusalsız polimer filmler için gerçekleştirilmiş ve karakterizasyon için uygun bir deney düzeneği geliştirilmiştir.

2.5 GEÇİCİ KIRINIM IZGARASININ OPTİK FİBER ÜZERİNE YERLEŞTİRİLMESİ VE OPTİK ANAHTARLAMA BAŞARIM ÖLÇÜMLERİ

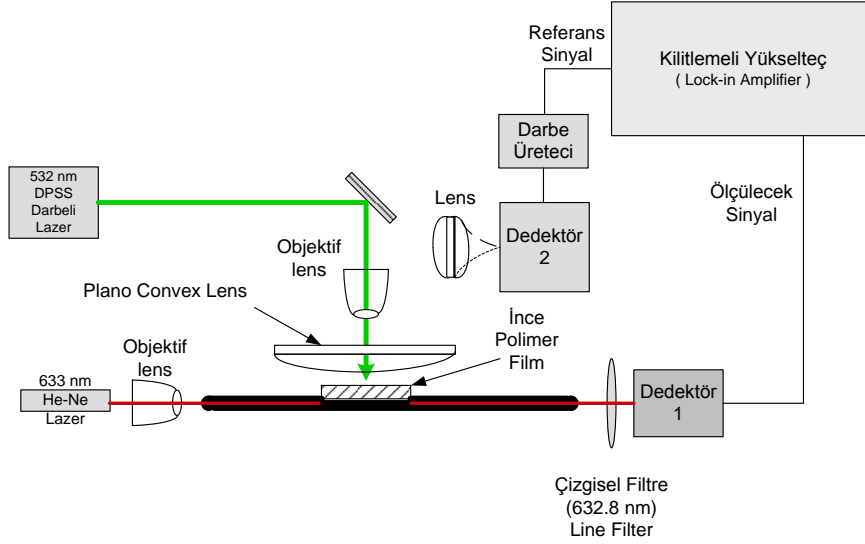
Önceki bölümlerde matematiksel modelinin geliştirildiği ve benzetiminin yapıldığı, optik fiber üzerine doğrusalsızlık polimeri yerleştirilerek, içerisinde lazer kaynağıyla geçici kırınım ızgarası oluşturulması prensibine dayalı anahtarlama için kullanılacak optik fiber şekilde 2.23 de görülmektedir. 'Corning' firmasının ürettiği optik fiber üzerinden kazıma yapılarak hazırlanmış olan fiberin, normalde (kazıma yapılmadan önce) 920 nm de tek modlu olduğu verilmektedir. SEM resmi verilen fiberin kazınan bölgesinde ki deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra, altın kaplanarak çekilmiştir.



Şekil 2.23 Yanal Yüzeyi Aşındırılmış Optik Fiber Kesiti

Uzunluğu 2 metre olan optik fiberin, ortasında 20 mm lik bir bölgenin şekildeki gibi yanal yüzeyinden inceltilerek, D-şeklinde olması sağlanmıştır. Optik fiberin 632.8 nm de iki modu desteklediği bilinmektedir ve inceltilen bölgeden modların enerji kaybederek geçebildiği gözlemlenmiş ve ölçülmüştür. Yanal yüzeyin inceltilmiş olması sönümlü dalganın etkin olarak etkileşime açık hale getirilmesini sağlamıştır. Lazer ışık kaynağının ve fiber kuplaj merceğinin parametrelerini ayarlayarak tek bir modun fibere kuple edilebilmesi sağlanmıştır. Bu durum optik fiberin çıkış tarafından uzak alan difraksiyon desenlerinin CCD sensör diziniyle incelenmesiyle doğrulanmıştır. Aynı zamanda kazınan kısımdan da ışığın bir kısmının yayıldığı saptanmıştır. Böylece inceltilmiş bölgeye yerleştirilecek bir optik doğrusalsız polimer filmin kırılma indisinin değiştirilerek, bölgeden yayılan ışık miktarını değiştirme, dolayısıyla da fiberden ilerleyen toplam ışık gücünü de değiştirme imkanı sunacaktır. Kırınım indisi değişimi bir başka ışık kaynağıyla gerçekleştirilebilir ki bu durumda ışık anahtarlama yada ışık modülatörü mekanizması gerçekleşmiş olacaktır. Dışarıdan uygulanan ışık kaynağının, kurt (bulk) olarak (girişimsiz) doğrusalsız polimerin kırınım indisini değiştirmesi ile film içerisinde kırınım ızgarası oluşturularak elde edilecek sonuçlar; iki ayrı mekanizmayı işaret etmektedir. İlkinde optik fiberin, dilim dalgakılavuzu ile kuplajı esas olacaktır ki ilk olarak bu durum incelenmektedir. Her hangi bir kuplaj geometrisinden farklı olarak, kırınım indisi değişikliğinin dilim dalga kılavuzunun küçük bir alanınında gerçekleşmekte ve Gauss benzeri bir dağılım göstermektedir. Bu durum dilim dalga kılavuzunu tümünden kırınım indisini değiştirmekten oldukça farklı bir modeli işaret etmektedir. Dilim dalga kılavuzu modları açısından da oldukça karmaşık bir durum sözkonusudur. Bu nedenle analitik bir çözümlenmeye gitmek kolay değildir, sanırım FDTD gibi sayısal yöntemlerle probleme yaklaşılabılır. İkinci yöntemde, kırınım indisi ızgarasının faz eşleme özelliği ile mod bloklama özelliğine dayalı bir mod kuplajlama mekanizması kullanılmaktadır ki buna ait matematiksel model DDK'na dayalı olarak yukarıda geliştirilmiştir.

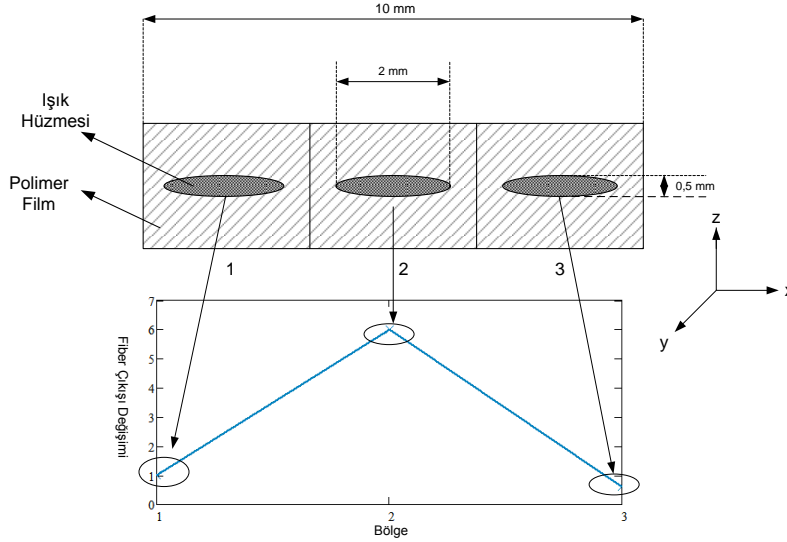
2.6 KUNT (BULK) OPTİK MODÜLASYONLU ANAHTARLAMA BAŞARIM ÖLÇÜMLERİ



Şekil 2.24 Kerr Etkisine Bağlı Fiber Çıkışındaki Işık Gücünün Değişimini Gözlemlemek İçin Kurulan Düzenek

Bu düzenekte, öncelikle fiberin kazınmış bölgesine Kerr katsayısı yüksek ve karakterizasyonu önceden verilen, içinde 20 nm çapında nanoparçacıkların olduğu polimer film yerleştirildi. He-Ne lazerden çıkan ışık bir lens yardımıyla fiberin temel moduna aktarıldı ve fiberin çıkışındaki ışık da 632.8 nm'lik bir çizgisel optik süzgeç üzerinden dedektör üzerine düşürüldü. Çizgisel süzgeç, 532 nm'lik lazerden gelen yoğun ışığı bloke etmek amacıyla kullanıldı (süzgecin OD değeri 4). 532 nm DPSS lazerden gelen ışık bir objektif ve bir tane de plano convex lens üzerinden geçirilerek ince film üzerine düşürüldü. Bu iki lensten oluşan sistem filmin üzerine düşürülecek ışık hüzmelerinin genişliğini/profilini ayarlamak üzere kullanıldı. Lazer hüzmelerinin polimer film üzerindeki dağılımı küçük çapı 0.5 mm ve uzun çapı 2 mm olan bir elips şeklindedir. İnce filmin üzerine bir ışık darbesi geldiğinde filmin kırılma indisini anlık olarak (darbe süresince) değiştirecek, bu esnada fiber çekirdeğinden filme yayılan ışık miktarı değişecektir, bu durumda fiberin çıkışındaki güç de değişecektir. Filmin üzerinde Kerr etkisi olmadığında ise dedektörün çıkışında sabit bir DC voltaj değeri okunacaktır. DPSS lazerin çıkışındaki darbe genişliği 10 ns, yinleme frekansı (repetition rate) da 35 kHz olarak ayarlandı. Kilitlemeli yükseltecin düzgün çalışabilmesini (sadece lazer darbesinden kaynaklanan sinyali ölçmek) sağlamak üzere, lazer darbelerine senkronize, 2. dedektör kullanılarak referans sinyal üretildi. Kilitlemeli yükselteç AC kipinde çalıştırılarak sadece değişim sinyalinin ölçülmesi amaçlandı. Buna göre DPSS lazerin diyot akımı 29 A, yinleme frekansı da 35 kHz olduğunda, polimerin kırılma indisinin değiştiği ve bunun yarattığı güç değişimini ölçebildik. Buna göre polimer filmi şekil 2.25

de gösterildiği gibi üç bölgeye ayırdığımızda, yükselteçten okuduğumuz değerler aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.25 Lazer Işık Hüzmesinin Pozisyonuna Göre Fiber Çıkış Işık Gücü

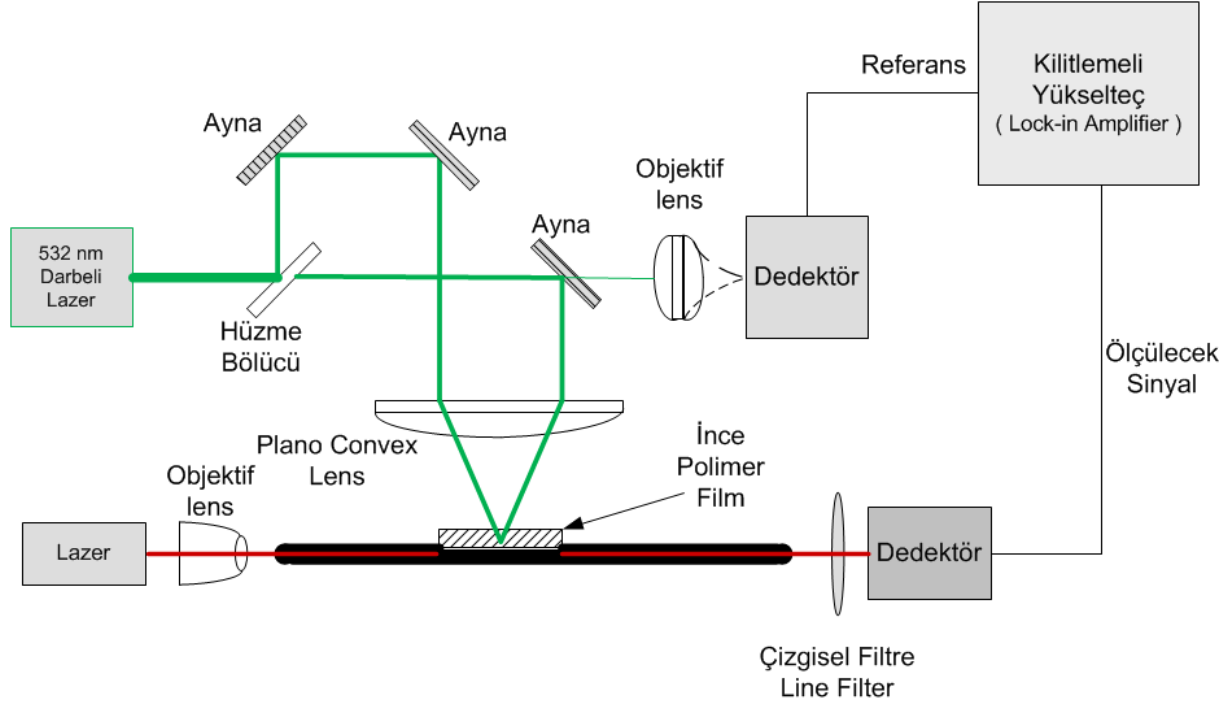
Bu değerler lazer hüzmesinin merkezi ile fiberin çekirdeğinin merkezi tam çakıştığında elde edilebilmektedir.

Sonuç olarak, polimerin üzerine uygulanan ışık darbeleri ile fiberin içinde ilerleyen ışığın şiddetinin değiştirilebildiği (anahtarlama mekanizması) gösterilmiştir. Burada kullanılan Kerr etkisini elde etmek için çok yüksek bir anlık güce ihtiyaç vardır ve bu güç polimerin yanma gücünün biraz altındadır. Dolayısıyla elde edilen bu değişimlerin termal etkiden olmadığından emin olmak gerekir. Yapılan ölçümlerde, termal etki ya da termal bozulma sınırına ulaşıldığında kilitlemeli yükselteçte okunan değerlerde ani yükselmeler olmakta ve yükselteç, lazerin tekrar frekansına kilitleme yapamamaktadır. Dolayısıyla termal etki ile kerr etkisini ölçüm sonuçlarından ayırt etmek mümkündür. Yukarıda elde edilen sonuçlar Kerr etkisine bağlı olarak gözlemlenmiştir ve polimerde herhangi bir bozulmaya neden olmadığı için de tekrar edilebilmektedir.

Kunt optik anahtarlama mekanizmasının matematiksel modeli oldukça karmaşık gözükmemektedir. Polimer film ikinci bir optik dalgakılavuzu (dilim) gibi düşünülebilir ve fiber içerisinde ilerleyen temel moddan, Kerr etkisi uyarılmadan önce de dilim dalgakılavuzu modlarına ve yayılım (radiation) modlarına ışık aktarımı mümkündür. Kerr etkisi uyarıldığında ise modlar arasında ki kuplaj katsayıları değişecektir ve buna bağlı olarak da fiber çıkışında ölçülen ışık gücü farklılaşacaktır. Oluşturulan Kerr etkisinin ışık yoğunluğuyla ilişkili olması yaratılan kunt kırınım indisi değişimi dağılımını (Kerr etkili kırınım indisi değişim geometrisi) oldukça biçimsiz yapmaktadır, bu nedenle yapının (aygıtın) modellenmesinin dikkatlice yapılması gerekmektedir.

2.7 GEÇİCİ KIRINIM IZGARASI İLE MOD ANAHTARLAMA BAŞARIM ÖLÇÜMLERİ

Kerr doğrusalsız optik polimer filmin optik fiber üzerine yerleştirilmesinden sonra, film içerisinde kırınım ızgarası oluşturulması ve buna bağlı olarak da fiberin temel modundan ikinci moda güç aktarımını ölçmek için kurulan düzenek şekil 2.26 da verilmektedir. Bir önceki bölümde kurt yöntemiyle yapılan anahtarlardan farklı olarak kırınım ızgarasının modlar arasında faz eşlemesini sağlayacak şekilde seçilmesi ve böylece seçici bir kuplajın gerçekleşmesi beklenmektedir.

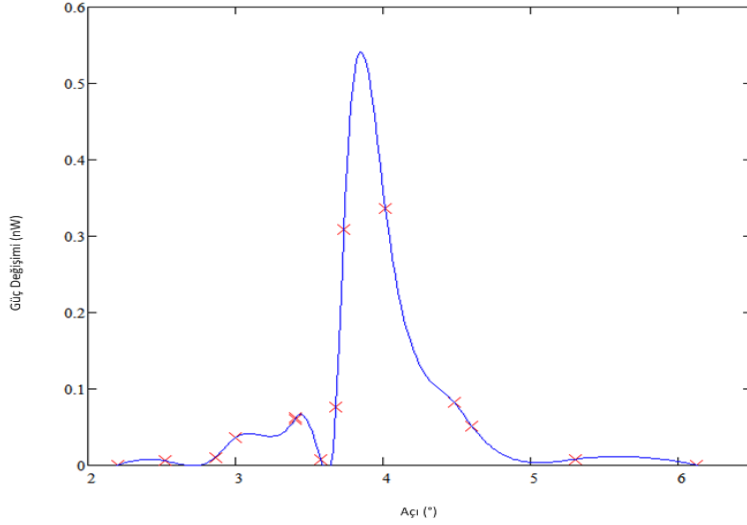


Şekil 2.26 Geçici Kırınım Iızgarası ile Mod Anahtarlama

Polimer filmin dalga kılavuzu gibi düşünülmesi durumunda, yayılım yönüne dik ve filme paralel yönde her hangi bir sınırlama olmadığı için, dilim dalga kılavuzunun bir çok modu desteklemesi ve optik fiber moduyla kuplajın (faz eşlemesinin) kolayca gerçekleşmesi beklenmelidir. Ancak, bundan önce, dilim dalga kılavuzu ile optik fiber kuplajının incelendiği çalışmalarda (Dinleyici, 1998) film kırınım indisinin çok yüksek olması durumunda fiber modunun boşaltılacağı yani yüksek bir aktarımın olacağı belirtilmektedir. PVA bazlı polimerlerin kırınım indisinin 1.5 civarında olduğu (bu film için 1.4995) ve Kerr etkisi ile elde edilen kırınım indisi değişimininde ($\Delta n \sim 10^{-5}$) azaltıcı yönde olduğu belirtilmelidir.

İlk olarak, 543 nm'lik He-Ne lazerden çıkan ışık bir mercekle yardımıyla fibere aktarıldı ve güç ölçer kullanılarak fiberin çıkışında ortalama 100 nW güç okundu. Lazer darbeleri ile farklı periyotlarda ızgaralar oluşturularak fiberin çıkışındaki güç değişimi incelendiğinde aşağıdaki şekil elde edilmiştir. Burada kırmızı işaretler ölçüm sonuçları,

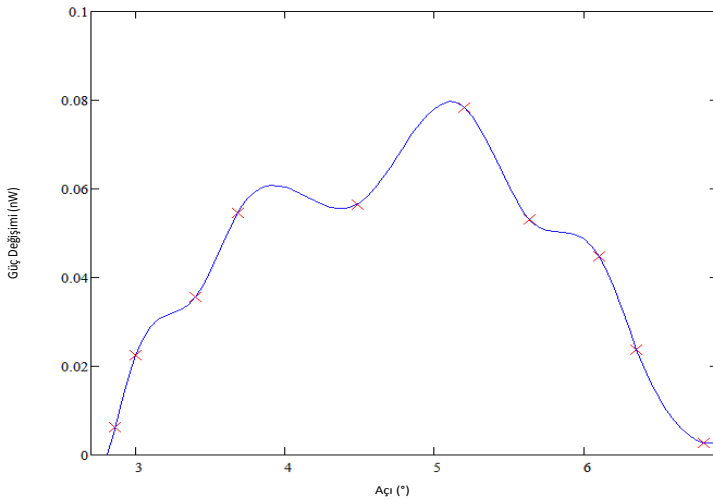
mavi çizgi ise interpolasyon ile elde edilen eğriyi göstermektedir. Farklı girişim açıları merceğin üzerine düşen iki lazer ışık hüzmesinin arasındaki mesafe ayarlanarak elde edilmiştir.



Şekil 2.27 Girişim Açısına Bağlı Olarak Çıkış Gücü Grafiği (543 nm)

Çıkışta ölçülen ışık gücü değeri toplam tüm modlara ait olduğu için modlar arasında ki güç aktarımını ortaya çıkaramamaktadır. Fiber çıkışının yakın alan difraksiyon desenlerini inceleyerek modlara ait katsayıları belirlemek mümkün olacaktır. Ancak, çok düşük değerlerde ki ışık gücünün (<1 nW) CCD ile algılanması mümkün olamamıştır. Elde edilen bu sonucun açığa bağlılığı çok önemlidir, zira benzer şekilde kurt kırınım indisi değişiminde de çıkış gücünün arttığı gözlenmiştir.

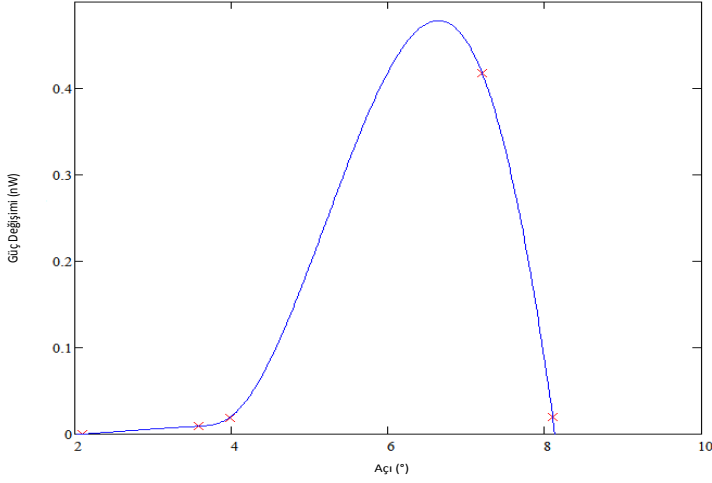
Aynı düzenek kullanılarak farklı dalga boylarındaki lazerler içinde ölçümler yapılmıştır. 632.8 nm kırmızı He-Ne lazer için yapılan ölçüm aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.28 Girişim Açısına Bağlı Olarak Çıkış Gücü Grafiği (632.8 nm)

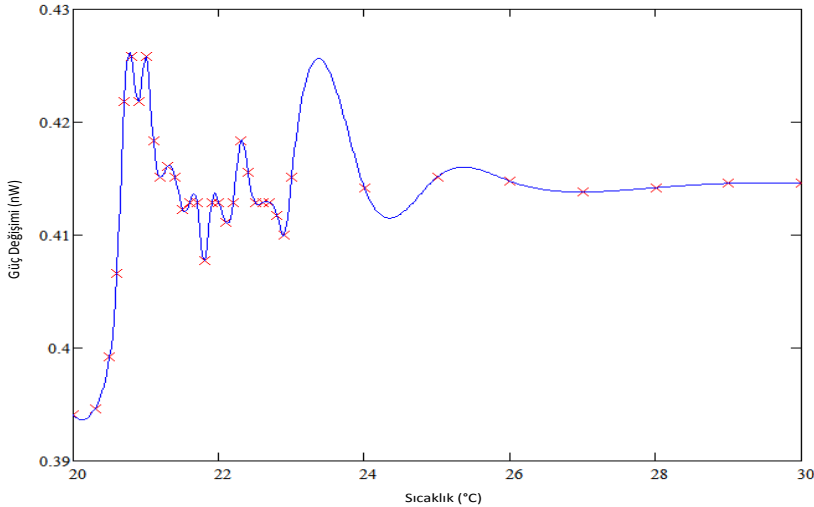
Belirli açılarda çıkış gücünün artmasına rağmen eğrinin dalgalandığı gözükmemektedir ki faz eşleşmesinin kısmen sağlanabildiğini düşündürmektedir.

Bir diğer lazer diyod ışığı 852 nm ile yapılan ölçümlerde aşağıdaki sonuçlar alınmıştır.



Şekil 2.29 Girişim Açısına Bağlı Olarak Çıkış Gücü Grafiği (852 nm)

852 nm lik lazer için yapılan deneyde 7.2 derece için en yüksek çıkış gücü ölçülebilmıştır. Aynı lazer kaynağının diyot sıcaklığı 20 °C ile 30 °C arasında değiştirilerek dalgaboyu 851.4 ile 854.1 nm arasında ayarlanabilmektedir. Buna göre farklı girişim açıları kullanarak, sıcaklık değişimine bağlı olarak fiberin çıkışındaki güç değişimi incelenmiştir. En fazla fiber çıkışı elde edilen açı; 7.2 derece için elde edilen grafik aşağıdadır.



Şekil 2.30 Diyot Sıcaklığına (Lazer Dalgaboyu) Bağlı Çıkış Güç Değişimi

Diğer açılarda yapılan lazer kaynağı dalgaboyu taramalı ölçümlerden alınan değerlerin hepsi çok düşük değerlerde salınım yapmakta yada hiç bir değişiklik gözükmemektedir.

Şekil 2.30 da görüldüğü üzere muhtelif tepe değerler gözükmemektedir. Bu değerlerin kırınım ızgarasının tam katı değerlere gelmesi büyük olasılıktır. Ancak, lazer kaynağının tam faz değerini aynı anda ölçmek oldukça zor olduğu için bunu doğrulayabilmiş değiliz.

Kırınım ızgarasıyla çıkış ışık gücünün artmasını şöyle açıklayabiliriz. Başlangıçta, ızgara oluşturulmadığı durumda, fiber içerisinde ilerleyen modların fiberin kılavuzlamadığı modlara (yayılmı, kaçak (leaky) ve dilim dalga kılavuzu modları) kuple olarak ortamdaki ışığın götürülmesine neden olduğu ve bunun sonucu fiber çıkışında çok az bir ışık ölçülebildiğini söyleyebiliriz. Ancak, kırınım ızgarasının oluşturulmasıyla birlikte modların bazıları arasında faz eşleşmesi sağlanmakta bunun sonucu olarak da fiber modlarının daha fazla ışığı çıkışa taşıması sonucu, ölçülen güç değerleri yükselmektedir.

Fiberin desteklediği iki mod arasında güç aktarımı için geçici kırınım ızgarasının periyodunun uzun ve böylece dalga numarasının çok küçük olması gerekmektedir. Kullanılan 532 nm güç lazeri için girişim açısının çok küçük değerlerinde (<1 derece) sağlanabilmektedir, bu durumda da lazer ışığının büyük bir kısmı yüzeyden yansımaktadır. Ancak, girişim kırınım ızgarasının sonlu uzunlukta olması ve düzenli periyotlu olmaması, başka bir deyişle kırınım ızgarasının Fourier serisi açılımında bir çok periyotun (harmoniğin) önemli katsayılara sahip olması, farklı harmoniklerle faz eşleşmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum elde ettiğimiz sonuçları açıklamaktadır.

2.8 GEÇİCİ KIRINIM IZGARASI İLE MODLAR ARASINDA GÜÇ AKTARIMI ÇALIŞMALARI İLE İLGİLİ SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Geçici kırınım ızgarası ile modlar arasında faz eşleşmesi sağlanması ve ışık gücü aktarımının gerçekleştirilmesi için yapılan çalışmalar ve sonuçları ile tartışmalar bu bölümde verilmiştir.

İlk olarak, bahsedilen mod anahtarlama mekanizması, Dört Dalga Karışımı problemi olarak ele alınmış, matematiksel olarak incelenmiş ve bir model geliştirilmiştir (Akin, 2009). Bu model kullanılarak mekanizma benzetimi yapılmış ve mod aktarım verimliliğine etki eden parametreler incelenmiş, yüksek verimlilik için olanaklar araştırılmıştır. Elde edilen verimlilik değerlerinin düşük olması, % 5 den az, ağırlıklı olarak malzemelerin doğrusalsızlığına (Kerr katsayısı) bağlı olduğu yada kontrol optik sinyalinin (girişen dalgalar) ışık yoğunluğunun artırılmasıyla ilgili olduğu değerlendirilmiştir yapılmıştır. Ayrıca, yapılan matematiksel modelleme çalışmalarında optik fiber modlarının mod kesim noktasından uzak olduğu kabul edilerek, doğrusal ilişkiler kullanılmıştır. Aslında mod kesim noktasına yakın çalışma değerlerinde modların davranışları daha düzensiz olabilmekte ve dolayısıyla da anahtarlamanın daha kolay olabilmesi mümkündür. Anahtarlama verimliliği için ışık yoğunluğunun artırılması gerekliliğini karşılamak üzere Fotonik Kristal (FK) yapılar içerisinde oluşturulan kırınım ızgarasının iletim özellikleri araştırılmıştır (önder, 2010). Modellemelerde lazer ışık hüzmelerinin her zaman Gauss şeklinde alınması problemin gerçekçi olarak araştırılması için gerekliliktir; çünkü gerek fiber modlarını, gerekse lazer hüzmelerinin malzeme içerisinde yayılmasını ifade etmek mümkündür. Ayrıca, Gauss ışın hüzmelerinin girişimi oldukça zengin karakteristik (chirp, apodize) sonuçlar vermektedir. Modlar arası anahtarlama verimliliğini etkileyen bir diğer önemli faktör malzeme kırınım indisi ve doğrusalsızlığı. Kullanım kolaylığı ve doğrusalsızlık performansları nedeniyle

polimerlerin iyi bir optik malzeme olabileceği kabul görmektedir. Ancak, polimer sentezi için bir çok reçete denenerek, istenilen özelliklerde PVA bazlı polimer filmler yapılabilmiştir. Hazırlama sürecinde, polimerlerin optik performanslarını etkileyen özellikleri geliştirilerek süreç iyileştirilmiştir. Daha da önemlisi Kerr doğrusalsızlığının yükseltilebilmesi amacıyla silica nanoparçacıklar (20 nm) kullanılmış ve etkisi gözlemlenmiştir. Elde edilen, doğrusalsızlığı nano parçacıklarla artırılmış polimer filmlerin geometrik özellikleri SEM ile incelenerek, dilim dalga kılavuzu olabilecek düz yapılar elde edilmiştir.

Polimer filmlerin doğrusalsızlığının, optik malzeme karakteristiğinin ve film özelliğinin en iyi bir şekilde deneneceği metod; kırınım ızgarası oluşturulması ve ölçüm ışın demetinin difraksiyonu ile başarımının ölçülmesi prensibine dayalı, 'pump-probe' tekniğidir. Bunun için geliştirilen deney düzeneği ile ölçüm ışık hüzmesinin, girişim kırınım ızgarası tarafından difraksiyon harmoniklerine saçılan ışığın ölçümü gerçekleştirilmiştir. Beş farklı film için yapılan difraksiyon ölçümlerinde kırınım ızgarasının başarımı ile film kalınlığı, hazırlama metodu ve polimer reçetesi eniyilemleri gerçekleştirilmiştir.

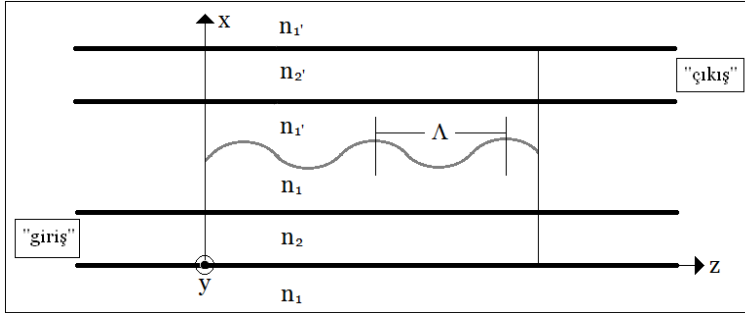
Polimer filmin karakterizasyonunun tamamlanması ile sıra, bu filmin yanal yüzeyi inceltilmiş optik fiber üzerine yerleştirilmesi ve modal faz eşleme özelliğinin araştırılmasına gelmiştir. Geometrisi düzgün filmin, modlar arası ilişkilerin incelenmesi açısından dilim dalga kılavuzu gibi düşünülmesi yanlış olmayacaktır. Hazırlanan örnek aygıt (fiber ile film/dilim dalga kılavuzu) geliştirilen bir deney düzeneği ile test edilmiştir. İlk olarak kırınım ızgarasının olmadığı sadece dilim dalga kılavuzu ile optik fiberin etkileşimini içeren durum test edilmiştir. Fiberin modlarının dilim dalga kılavuzunun modlarına ve diğer yayılım modlarına kuple olduğu, bu nedenle de fiber çıkışında ışık gücünün çok zayıfladığı gözlemlenmiştir. Dilim dalga kılavuzunun kırınım indisinin fiber kırınım indisinden çok yüksek olması durumunda, fiber iletiminin büyük ölçüde zayıfladığı bilinmektedir. Dilim dalga kılavuzunun bir bölgesinin (lokal olarak) kırınım indisinin kontrol ışık hüzmesiyle değiştirilmesi sonucu optik fiber modlarıyla kuplaj karakteristiği değişmekte ve fiber temel modu çıkış gücünde modüleli bir sinyal elde edilmektedir. Bu aygıtın ışık yoğunluk modülatörü veya FK lerde dalga kılavuzu yönlendiricisi olarak kullanılması mümkün gözükmektedir. Aygıtın performansının artırılması için daha detaylı incelenmesi gerekmektedir.

Geliştirilen aygıtın, lazer hüzmelerinin girişimi ile elde edilen kırınım indisi ızgarasının varlığında ki testi için yeni bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzenekte geliştirilen lazer hüzmelerinin geliş açısına karşılık, optik fiberin iletim özelliği yani çıkış ışık gücü ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar kritik bir açıda fazların eşlendiğini ve fiber çıkış gücünün arttığını göstermektedir. Elde edilen ölçümlerin modları arası geçişi ortaya koyması mümkün olamamıştır, çünkü toplam ışık gücüne bakılmaktadır. Her bir moda ait yakın alan difraksiyon desenleride CCD duyarlılığının altında kalmıştır. Bunun yerine iki farklı dalgaboyunda lazer ışığının modları arasında faz eşleme sağlanabilir ve ışık gücü aktarımı gerçekleştirilebilir. Ancak, bu rapor içerisine bahsedilen çalışma dahil edilememiştir. Son olarak faz eşlemesinin sağlandığı açıda ve bir başka açıda ışık kaynağının frekansı değiştirilerek fiber çıkış gücüne bakılmıştır. Bu grafiklerde, belirli noktalarda tepe oluşması, geçici olarak farklı harmoniklerle faz eşlenmesinin sağlandığını doğrular niteliktedir.

III. SABİT KIRINIM IZGARASI İLE MOD KUPLAJLAMA VERİM HESAPLAMALARI, BENZETİM VE DENEYSEL GERÇEKLEME

3.1 MATEMATİKSEL MODEL VE BENZETİM

İki modu destekleyen optik fiber hattında anahtarlama ile uyarılan (geçici kırınım ızgarası yardımı ile) ikinci modun bir başka fibere aktarılması ile optik anahtarlama tamamlanmış olacaktır. İkinci moddan diğer fibere aktarım için sabit olarak yazılmış (fotopolimerizasyon ile) kırınım ızgarası kullanılacaktır. Şekil 3.1 de iki optik fiber ve aralarındaki sinüsoid kırınım ızgarası betimlenmektedir.



Şekil 3.1 Sabit Kırınım Iızgarası ile Mod Kuplajlama

Sabit kırınım ızgarası, fotopolimer film içerisine (ve yüzeyine) lazer ışığı ile yapılan polimerizasyon yöntemiyle oluşturulmaktadır. Elde edilen fotopolimerize kırınım ızgarasının yapısı daha sonra detaylı olarak incelenmiş ve gerçekçi kırınım indisi geometrisi modele dahil edilmiştir. Genel olarak, boylamasına periodik kırınım ızgarasının bir fonksiyonla ifadesi şöyledir (Yariv, 2008),

$$\Delta n^2(z) = 2d \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad d = \frac{n_1'^2 - n_1^2}{\pi} \quad 3.1$$

'd' kırınım indisi değişimi en fazla değerini vermektedir. Ancak, esas olan kuple edilecek modlar arasında yayılım sabiti farkından kaynaklanan fazın eşlenmesidir. Bunun için gerekli koşul denkem 3.2 ile verilmiştir.

$$\frac{2\pi}{\Lambda} \cong \gamma_a - \gamma_b \cong 2\Delta\gamma \quad 3.2$$

Üstteki ifadeye ‘ Λ ’ kırımım ızgarası periyodu ile; γ_a ve γ_b eşlenmek istenen modların ızgara etkisiyle değişikliğe uğramış propagasyon sabitleridir, açık ifadeleri şöyledir:

$$\gamma_p = \beta_p + \frac{(K_{pp} - cK_{qp})}{1 - c^2} \quad \text{ve} \quad \gamma_q = \beta_q + \frac{(K_{qq} - cK_{pq})}{1 - c^2} \quad 3.3$$

Burada ‘ c ’ ile gösterilen kuple edilecek modların örtüşme integrali, ‘ K ’ ile gösterilenler ise kuple denklemlerinden gelen mod kuplej katsayıları ve ‘ p, q ’ ilgili modları ifade etmektedir.

$$c_{pq} = \frac{1}{2} \int \int_{-\infty}^{\infty} [E_t^{(p)} \times H_t^{(q)}] dx dy \quad c = \frac{1}{2} (c_{pq} + c_{qp}) \quad 3.4$$

Her bir fiberin iki modu desteklediğini kabul ederek, modlar arasındaki güç aktarımını kuple denklemler ile formülüne edebiliriz. Modlara (a, b) ait enine dalga alanlarını ve boylamsal değişimi ifade eden katsayıları $(a(z)$ ve $b(z))$ ile toplam enine alan vektörleri 3.5 de ki gibi ifade edilebilir.

$$E_{t(x,y,z)} \cong a(z) E_t^{(a)}(x, y) e^{-\beta_a z} + b(z) E_t^{(b)}(x, y) e^{-\beta_b z}$$

$$H_{t(x,y,z)} \cong a(z) H_t^{(a)}(x, y) e^{-\beta_a z} + b(z) H_t^{(b)}(x, y) e^{-\beta_b z} \quad 3.5$$

Ref[Griffel, 1991] deki formülasyonu takip edilerek mod kuplejlarına ait katsayılar için kuple denklemleri şöyle yazılır:

$$\frac{d}{dz} a(z) = idk_{ab} e^{-i2\delta z} b(z)$$

$$\frac{d}{dz} b(z) = idk_{ba} e^{i2\delta z} a(z) \quad 3.6$$

‘ d ’ kırımım indisi değişimi genliğini ifade etmektedir (3.1). Kuplej katsayıları k_{ab} ve k_{ba} ile çapraz ve kendi kendine mod kuplej katsayıları sırasıyla K_{pq} ve K_{pp} şöyle ilişkilendirilebilir;

$$k_{pq} = \frac{(K_{qp} - cK_{qq})}{1 - c^2} \quad ; \quad k_{qp} = \frac{(K_{pq} - cK_{pp})}{1 - c^2} \quad 3.7$$

Yine 'c' normalize mod örtüşme integrali değerini vermektedir. Mod kuplaj katsayılarının ifadesi ise şöyledir,

$$K_{pq} = \frac{\omega}{4} \int \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \varepsilon^{(q)} \left[E_t^{(p)} E_t^{(q)} - \frac{\varepsilon^{(p)}}{\varepsilon} E_z^{(p)} E_z^{(q)} \right] dx dy \quad 3.8$$

'ε' enine dielektrik sabiti dağılımını vermektedir ve 'ε^(p)' ise sadece 'p' dalga kılavuzunun enine düzlemdeki dielektrik sabiti dağılımını vermektedir. Bu integral, kırınım ızgarası nedeniyle mod dikliğinin bozulması sonucu ortaya çıkmaktadır ve dolayısıyla dielektrik sabiti farkı 'Δε' çarpanına direk bağlıdır, kırınım indisi ile ilişkisi de şöyledir,

$$\Delta \varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_o f(x, y) \Delta n^2(z) \quad 3.9$$

Tamamen periyodik olmayan dielektrik yapılarda; Fourier serisi şeklinde yazılabilir ve bu integral her bir Fourier katsayısı için ayrı ayrı yazılmalıdır. Kuplaj denklemlerinin (3.6) çözümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada K_{pq} ile K_{qp} katsayılarının eşitliği kabul edilmiş ve 'K' ile gösterilmiştir,

$$\begin{aligned} a(z) &= e^{-i\delta z} \left[\left(\cos(sz) + i\delta \frac{\sin(sz)}{s} \right) a(0) - iK \frac{\sin(sz)}{s} b(0) \right] \\ b(z) &= e^{i\delta z} \left[-iK^* \frac{\sin(sz)}{s} a(0) + \left(\cos(sz) - i\delta \frac{\sin(sz)}{s} \right) b(0) \right] \end{aligned} \quad 3.10$$

$s^2 = \delta^2 + KK^*$ ilişkisi kullanılmıştır, 's' toplam kuplaj ilişkisini belirlerken; $\delta = \Delta\gamma - \pi / \Lambda$ kırınım ızgarası içerisindeki modların faz uyumsuzluğunu, yani faz eşleşmesinden ne kadar uzak olduğunun göstergesidir. Elde edilen sonuçlar için sınır değer koşullarını uyguladığımızda istediğimiz mod kuplaj verimliliği hesaplanabilir. İlk olarak bir modun (a) başlangıç noktasında (z=0) tetiklendiğini ve ikinci dalga kılavuzundaki (b) modun ise bu noktada sıfır değere sahip olduğunu varsayabiliriz. Modlar fiber boyunca (z-yönünde) ilerledikçe, ikinci moddaki ışık gücü bizim verimliliğimizi belirleyen katsayı olacaktır.

$$\eta = \left| \frac{b(z)}{a(0)} \right|^2 \quad 3.11$$

Genel olarak 'a' ve 'b' modlarının farklı dalga kılavuzlarında olması ve farklı dalga kılavuzlardaki farklı modlar olması mümkündür. Bizim modelimizde ikinci moddan temel moda kuplajın yüksek ama temel moddan -temel moda kuplajın ise düşük olması gerekmektedir. Mod kuplaj verimliliği için açık ifade,

$$\eta(z) = c^2 + 1 - \frac{c^2}{1 + \zeta^2} \sin^2 \left[d \sqrt{k_{pq} \cdot k_{qp}} (1 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}} z \right] \quad 3.12$$

$$\zeta = \delta / d \sqrt{k_{pq} \cdot k_{qp}}$$

' ζ ' akort parametresidir.

Enyüksek verimlilik için gereken boylamasına mesafe ise şöyle hesaplanmıştır,

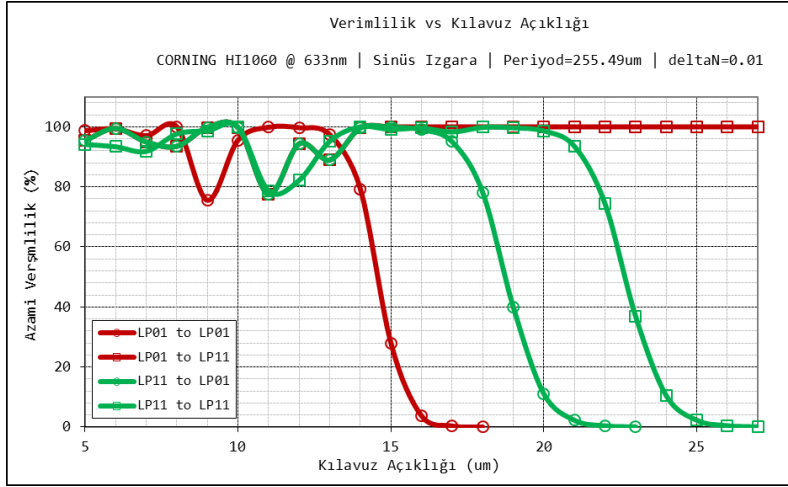
$$l_{\max} = \frac{\pi}{2d \sqrt{k_{ab} k_{ba}} (1 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}}} \quad 3.13$$

Mükemmel faz eşleme durumunda ' ζ ' sifıra eşit olacaktır; $l = \pi/2dk$ ($k = k_{ab} = k_{ba}$) ifadesinde eğer mod dikliği bozulmamışsa ($k=0$) gerekli mesafe sonsuz çıkacaktır, yani enerji aktarımı ideal modlar için sonsuz mesafeye ihtiyaç duyacak, yada aktarım olmayacaktır, diyebiliriz.

3.1 SABİT IZGARA KUPLAJ VERİMLİLİK HESAPLARI: SİNÜS KIRINIM IZGARASI MODELİ

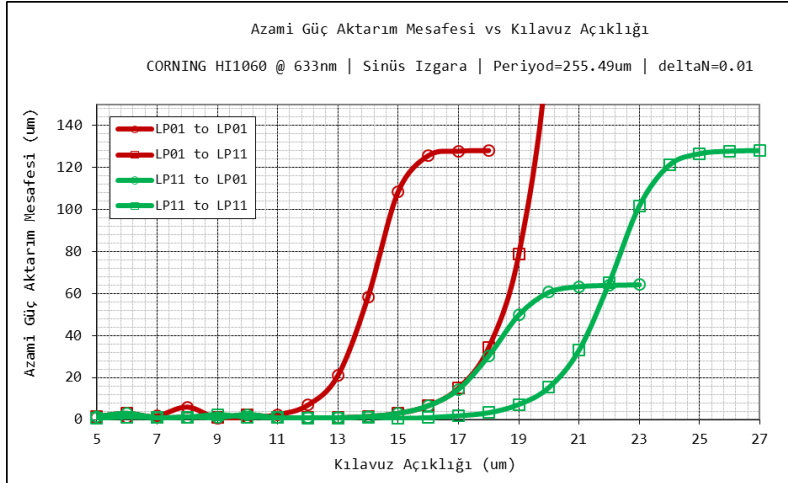
Corning HI1060 optik fiber, projede kuplörler için kullanılacak fiber olmasından dolayı iki modu destekleyecek şekilde 633 nm lazer ışığıyla modellenmiş ve modlar arasındaki kuplaj verimliliği hesaplanmıştır. Fiber parametreleri çekirdek kırılma indisi: $n_{\text{Core}} = 1.4572$, kılıf kırılma indisi: $n_{\text{Clad}} = 1.4507$ ve çekirdek yarıçapı: $a = 2.65 \mu\text{m}$ olarak alındığında iki modu desteklemektedir; yayılım sabitleri $\beta_{01} = 1.444714490226709 \times 10^7$ (1/m) ve $\beta_{11} = 1.442255268723464 \times 10^7$ (1/m).

Tüm mod alanlarının kılavuzlar boyunca propagasyonu hesaplanmış ve her bir modun her bir moda kuplaj verimliliği propagasyon mesafesine bağlı olarak elde edilmiştir. Esas alınan hedef kuplaj girişindeki ikinci moddan (LP_{11}) çıkıştaki modlara gerçekleşen kuplajdır ve temel moddan (LP_{01}) bunun dışında kalan modlara gerçekleşecek kuplajın minimuma indirilmesidir. Önceki bölümde verilen ifadeler kullanılarak girişteki ikinci moddan (LP_{11}) çıkıştaki temel moda (LP_{01}) faz eşlemesini sağlayan ızgara periyodu $255.49 \mu\text{m}$ 'dir. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 3.2 de aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2 Sinüs Biçimli Sabit Kırınım Izgarası İçin Kuplaj Verimlilikleri

Şekilde sinüs biçimli kırınım ızgarası değişimi kabul edilerek yapılan verimlilik hesabı sonuçları görülmektedir. Yüzde yüz verimlilik, hiç kayıp olmadığı teorik bir sonuçtur, ayrıca LP₀₁ modundan LP₁₁ moduna her zaman enyüksek verimlilikle kuplaj gerçekleşmektedir, çünkü faz eşlemesi bu modlar içinde sağlanmaktadır.



Şekil 3.3 Kılavuz Açıklığına Göre Her Moda Aktarım Enfazla Mesafesi

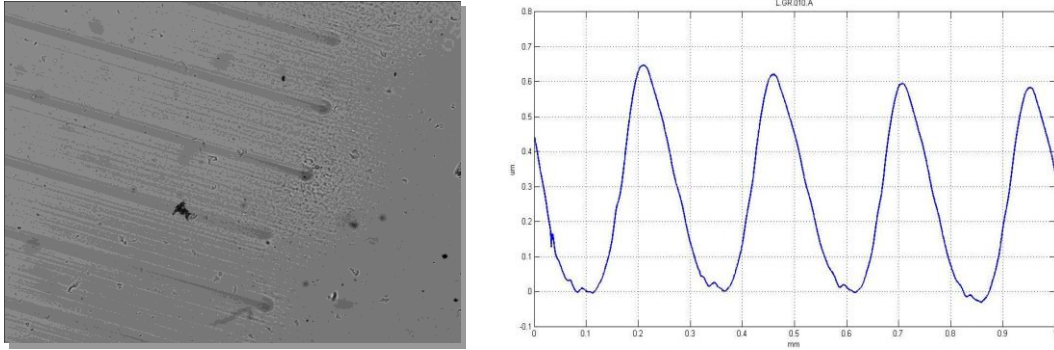
Giriş fiberinde her iki moda ait ışık enerjisinin enyüksek verimlilikle kuplaj edileceği mesafesinin, dalga kılavuzlarının aralığına göre değişimi gözükmemektedir. Grafik üzerinde her bir noktanın kuplörün gerçekleşme/tasarım özelliğini belirtmektedir ve böylece çalışma özelliğini karakterize etmektedir. Temel LP₀₁ modunun 17 micronluk bir kılavuz

açıklığından sonra kuple olmadığı, ancak LP_{11} den LP_{01} ve LP_{11} çıkış fiber modlarına aktarımın gerçekleştiği gözükmemektedir.

Elde edilmiş olan sonuçlar, tasarlanan yapı ile selektif olarak mod kuplajı elde etmenin mümkün olduğunu, bunun yanında mod geçirgenliği ve seçici kuplaj için gerek kılavuz açıklığı gerekse azami kuplaj mesafesi parametrelerinin hassas bir şekilde ayarlanması gerektiğini göstermektedir.

3.1.1 Fotopolimerize Kırınım Izgara Yapısı

Gerçekçi bir model için dalga kılavuzları arasındaki kırınım ızgarasının fotopolimerizasyon ile elde edildiği gerçeğinin hesaplamalara yansıtılması gerekmektedir. Tasarlanan kırınım ızgarasının periyotları fotopolimerizasyonu yapan lazerin (ışın) adımlarıyla belirlenmektedir ve tam istenilen aralıklarda gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte her bir fotopolimerizasyon çizgisinin geometrisi ve kırınım indisi dağılımı kesin değildir. Yüzey geometrisi profilometre ve/veya SEM ile belirlenebilse de polimerin alt katmanında ki kırınım ızgarasının dağılımını tanımlamak kolay değildir. Karmaşık geometrik kırınım indisinin yapısının belirlenmesi için bir difraksiyon yöntemi geliştirilmiş ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir (Dinleyici, 2011). Aşağıdaki şekilde, fotopolimerizasyon ile yazılan dalga kılavuzlarının kırınım indisi dağılımının polarize optik mikroskop ile alınan görüntüsü ve kırınım ızgarasının profilometre çizimi verilmektedir.

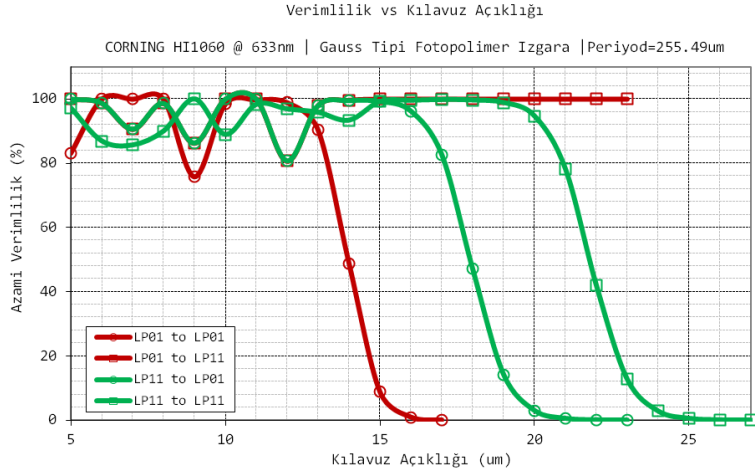


Şekil 3.4 Fotopolimerizasyon ile Elde Edilen Dalga Kılavuzları ve Profilometre ile Alınan Yüzey Geometrisi

Fotopolimerize dalga kılavuzlarının enine geometrisi birden fazla Gauss fonksiyonu ile modellenebilir. Ayrıca, dalga kılavuzlarının derinliğine indis dağılımı ise difraksiyon yöntemiyle belirlenebilir (Dinleyici, 2011). Kırınım ızgarası için elde edilen gerçekçi modellerin matematiksel hesaplamalara dahil edilmesiyle modlar arasında ki kuplaj verimlilikleri daha yüksek hassasiyetle hesaplanabilmektedir. Daha sonraki bölümlerde karakterizasyon ve modelleme çalışmaları detaylandırılmıştır, bundan önce gerçekçi modele dayalı kuplaj verimlilikleri bir sonraki bölümde hesaplanmıştır.

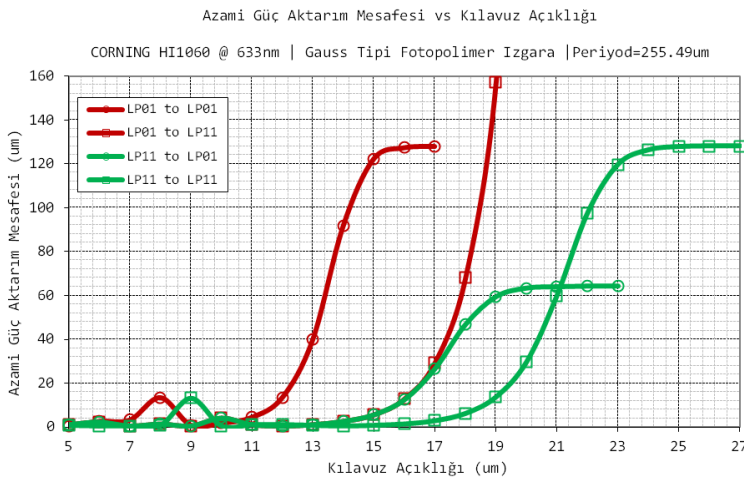
3.2 SABİT IZGARA KUPLAJ VERİMLİLİK HESAPLARI: GAUSS KIRINIM IZGARASI MODELİ

Optik fiberlerin arasına yerleştirilen kırınım ızgarasının daha gerçekçi olarak, fiziksel ölçümlere dayalı olarak modellenmesi ve verimliliğin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Kırınım indisi geometrik modelinin Fourier serisi açılımı ile ifade edilmesi ve her bir harmonik için verimliliğin hesaplanması; son olarak toplam (kümülatif) verimliliğin elde edilmesiyle aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 3.5 Gauss Kırınım Izgarası Modeli İçin Kuplaj Verimlilikleri

Sinüs verimlilik değerleriyle Gauss modelinin çok benzer olduğu ancak küçük kılavuz açıklıklarında verimlilik grafiğinin salınımının değiştiği gözlenmiştir. Bu durum temel periyotun çok net olarak aynı kaldığı, sadece kırınım ızgarasını oluşturan dalga kılavuzlarının enine modelinin değiştirilmiş olması gerçeğiyle açıklanması mümkündür. 17 Microndan büyük kılavuz açıklığı için LP₀₁ den LP₀₁ mod kuplajı sıfırlanmaktadır.



Şekil 3.6 Gauss Model için Azami Güç Aktarım Mesafesi

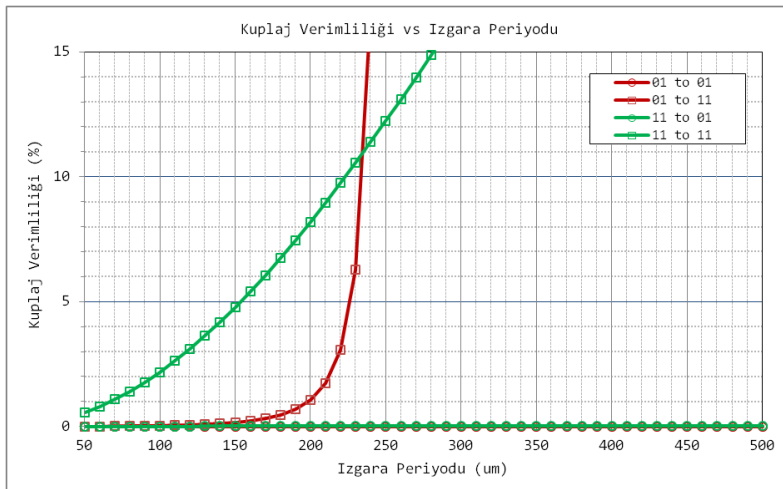
Ancak, aynı zamanda LP₁₁ den LP₁₁ ve/veya LP₀₁ kuplajının enfazla olması istenmektedir ki bu durumu grafikteki yeşil çizim ile gösterilen eğrilerin enfazla değere sahip olmasına denk gelmektedir. Benzer şekilde simetri olduğu için LP₀₁ den LP₁₁ geçişinde en az olması istenmektedir ki bunu sağlamak kolay değildir çünkü LP₁₁ den LP₀₁ moduna kuplaj için aynı anda fazı eşlenmektedir. Bu durumda azami kuplajın LP₁₁ den LP₁₁'e olacak şekilde kuplaj parametrelerinin ayarlanması daha doğru olacaktır.

Yukarıda belirtildiği gibi LP₁₁ den LP₁₁ e kuplajın azami olması için kılavuz açıklığının 23 micron civarında seçilmesi gerekmektedir. Bu durum için elde edilen sayısal değerler şöyledir;

Giriş Fibri	Fiber Tipi	Corning H11060
	Çekirdek indisi	1.4572
	Kılıf indisi	1.4507
	Çekirdek yarıçapı	2.65µm
İşaret Dalgaboyu		632.8nm
Desteklenen Modlar		LP01, LP11
Kılavuz Açıklığı		23µm
Aygıt Uzunluğu		0.83mm
Kuplaj Verimliliği	LP ₀₁ 'den LP ₀₁ 'e	0.00%
	LP ₀₁ 'den LP ₁₁ 'e	8.44%
	LP ₁₁ 'den LP ₀₁ 'e	0.02%
	LP ₁₁ 'den LP ₁₁ 'e	12.70%

Tablo 2 Optik Fiber Özellikleri ve Hesaplanan Kuplör Sayısal Değerleri

Kuplör uzunluğu (aygıt uzunluğu) LP₁₁'den LP₁₁'e kuplajı azami yapmak için enuygun olarak vuru mesafesine göre seçilmiştir. Görüldüğü üzere % 12.7 verimlilik hala oldukça düşüktür. Bu nedenle başta girdi olarak alınan LP₁₁'den LP₀₁'e faz eşleyen ızgara periyodu değiştirilerek aşağıdaki grafik elde edilmiştir.

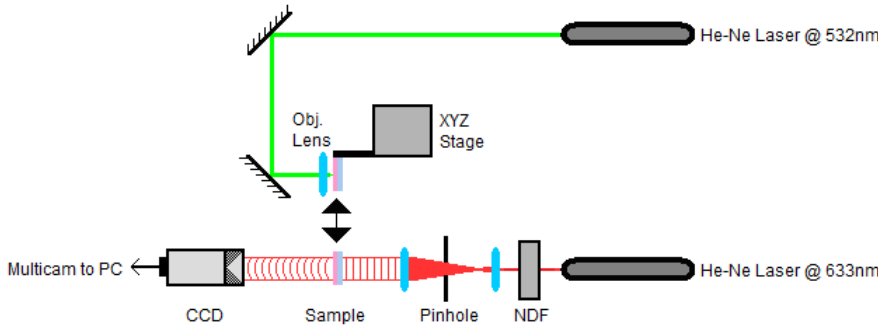


Şekil 3.7 Kuplaj Verimliliğinin Iızgara Periyodu ile Değişimi

Kırınım ızgarasının periodunu değiştirerek bir miktar daha verimliliğin artırılması m¼mk¼n g¼z¼kmektedir. Faz eşlemesini sağlayan periyodun az miktarda da olsa değiştirilmesi LP₁₁'den LP₁₁'e kuplaj verimliliğini artırırken, LP₁₁'den LP₀₁'e olan faz eşlemsinin bozulması nedeniyle verimliliği d¼ř¼rmektedir. Pratik olarak kırınım ızgarasının geręekleřtirilmesinin bir çok parametreye bağlı olduğu ve istenilen oz¼n¼rl¼kte ve geometride elde edilmesi m¼mk¼n olmadığı geręeęini de g¼z¼n¼nde bulundurmak gerekmektedir. Bu nedenle fotopolimerize kırınım ızgarası deneysel olarak detaylı olarak incelenmiştir, bu çalışmaya ait sonuçlar bir sonraki b¼l¼mde açıklanmaktadır.

3.3 SABİT KIRINIM IZGARASI KARAKTERİZASYON DENEYSEL ALIşMALARI

Lazer ışın h¼zmesi yardımıyla fotopolimerize edilerek oluşturulan optik dalga kılavuzunun, y¼zey geometrisi ve kırınım indisi ¼zellikleri (dağılımı) optik performans açısından son derece ¼nemlidir. Bahsedilen y¼ntemle elde edilen dalga kılavuzlarının yan yana sıralanması ile elde edilen kırınım ızgarasının kuplaj başarımı da her bir dalga kılavuzunun karakterizasyonuna bağlıdır. Bu nedenle şekilde g¼r¼len d¼zenek kullanılarak farklı ¼ dalga kılavuzu elde edilmiş ve muhtelif y¼ntemler kullanılarak karakterizasyonu yapılmıştır.



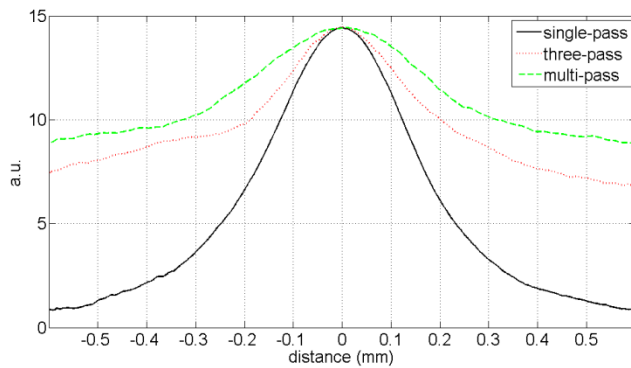
şekil 3.8 Fotopolimerizasyon İle Dalga Kılavuzu Yazım ve Difraksiyon ¼l¼m D¼zeneęi

Fotopolimerizasyon alışmalarında (Garcia, 2002) tarihli çalışmasına dayanan Polivinil Alkol matris içeren Akrilamid bazlı bileşiği kullanılmıştır. Bu bileşikte Akrilamid (AA) fotopolimerleştirilebilir monomer, Trietanolamin (TEA) yardımcı-başlatıcı ve Sarımsı Eozin (YE) duyarlayıcı olup, sulu çözelti halinde hazırlanan Polivinil Alkol (PVA) matrisi oluşturmaktadır. ¼rnekler aşağıdaki tabloda verilen molar oranlara g¼re hazırlanmaktadır:

Malzeme	Çözeltideki Oranı	15ml Sulu Çözeltideki Hesaplanan Miktarı	Özellik
H ₂ O	-	(15g)	Sıvı
PVA	10% w/v H ₂ O	1.5g	Toz
TEA	0.199M	0.445g	Sıvı
AA	0.446M	0.475g	Toz
YE	2.5x10 ⁻⁴ M	2.4mg	Toz

Tablo 3 Fotopolimer Reçetesi

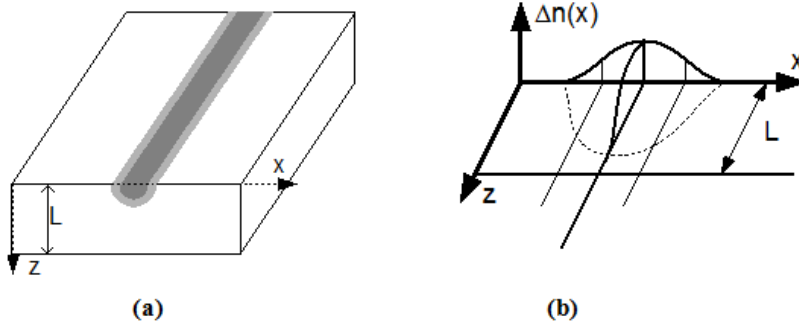
Bu formülasyon kullanılarak 1,25mm kalınlığında cam (silika) slayt altına üzerine hazırlanan örnekler, doğrudan döküm yöntemiyle kaplanmakta ve PVA kurutmanın ardından herhangi bir işlem görmeden süreç sonundaki halleriyle kullanılmaktadır. Şekilde verilen düzenek kullanılarak, film üzerine odaklanmış lazer ışını taranarak aynı tarama hızına ancak farklı tarama sayılarına (tek, üç ve çoklu) sahip üç ayrı dalga kılavuzu yapısı oluşturulmuştur. Farklı örneklerdeki tarama hızı ve ışın yoğunluğu aynı olduğu için ışına maruz kalma miktarları birbirlerinin katı şeklindedir. Örneklerin optik mikroskop geçirim görüntüleri alınmıştır ve fotopolimerize olan bölgelerdeki renk değişimi gözükmemektedir.



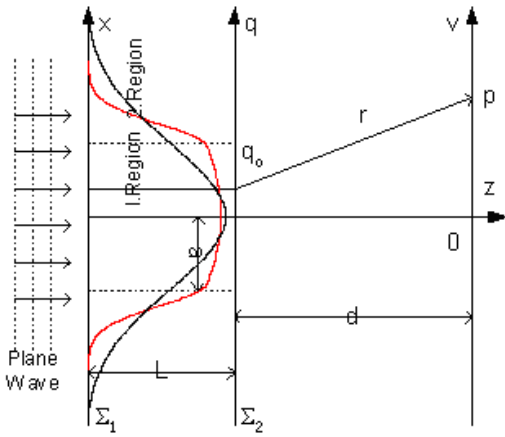
Şekil 3.9 Fotopolimerize Dalgakılavuzu Optik Mikroskop Görüntüsü ve Profili

Optik mikroskop akkor arkasığının geçirimi ile elde edilen profillerin gerçek kırınım indisi profiline karşılık gelmediğine dikkat edilmelidir, sadece kümülatif kırınım indisi profili olarak alınabili ki bu durumda Gauss dağılımına uyması son derece normaldir.

Daha önceden de belirtildiği gibi kırınım indisi dağılımı fotopolimer film içerisinde yayılmaktadır. Bu nedenle profilin tam olarak belirlenebilmesi için uzak alan difraksiyon yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde kullanılan indis dağılım modeli ve geometrileri aşağıdaki şekilde verilmektedir;

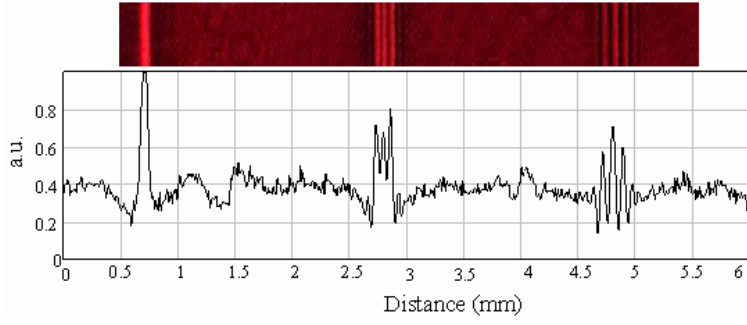


Şekil 3.10 Difraksiyon Modeli İçin Kullanılan a) Üç boyutlu b) Kesit Geometriler

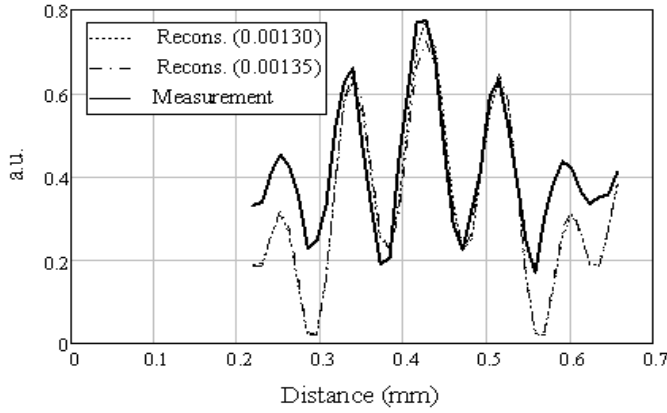


Şekil 3.11 Uzak Alan Difraksiyon İçin Kullanılan Kırınım İndisi Dağılımı Modeli

İki ayrı Gauss fonksiyonunun iliştilmesiyle elde edilen ve iki ayrı farklı durum için kırınım indisi dağılımları ile difraksiyon şematiği Şekil 3.11 de gösterilmektedir. 'v' düzleminde elde edilen difraksiyon deseni deneysel olarak elde edilen difraksiyon desenleriyle eşlenmekte; Gauss parametreleriyle birlikte, kırınım indisi tepe değeri ve dağılım modeli ortaya çıkmaktadır. Yukarıda bahsedilen üç farklı dalga kılavuzu ve bunlara ait difraksiyon desenleri aşağıdaki şekilde deneysel olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.12 Tek-sefer Geçiş (solda), Çoklu-sefer Geçiş (orta) ve Üç-sefer Geçiş (sağda) ile Üretilmiş Fotopolimerize Dalga Kılavuzları İçin Difraksiyon Desenleri

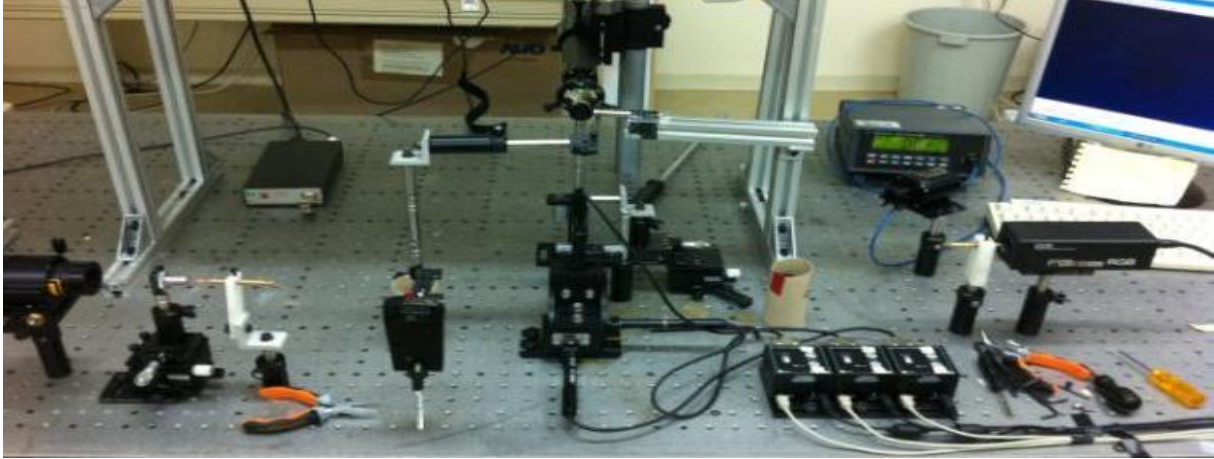
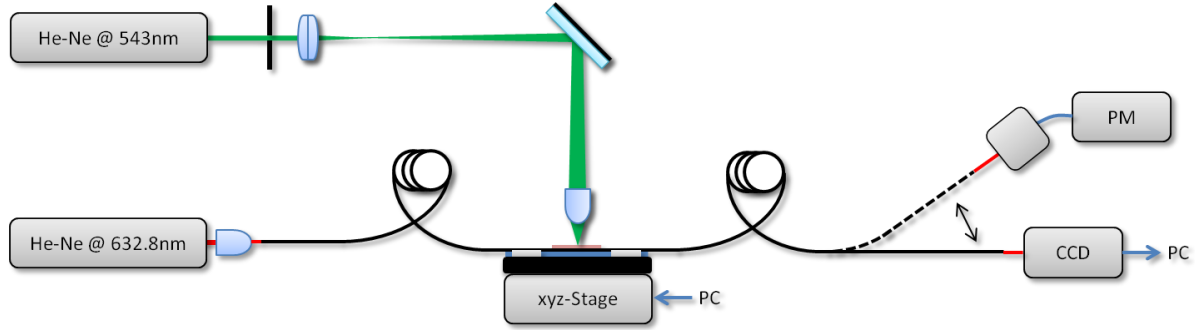


Şekil 3.13 Üç-sefer Difraksiyon Desenlerinin Eşlenmesi

Şekil 3.13 de üç-sefer yazılan dalga kılavuzu için elde edilen benzetim ve deneysel difraksiyon desenleri gözükmemektedir. Kırınım indisinin noktadan sonra beşinci basamağına kadar bir hassasiyetle modelin eşlenebildiği gözükmemektedir. Ayrıca literatürden elde edilen kırınım indisi değerleriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan matematiksel model (Sabatyan, 2007) ve diğer detaylar tarafımızdan yayınlanmıştır.

3.4 OPTİK FİBER ÜZERİNE KIRINIM IZGARASI KUPLAJ ÇALIŞMALARI

Karakterizasyonu yapılan fotopolimerize dalga kılavuzlarından oluşturulan kırınım ızgaralarının mod transfer verimliliğinin test edilebilmesi için aşağıdaki düzenek kurulmuştur.



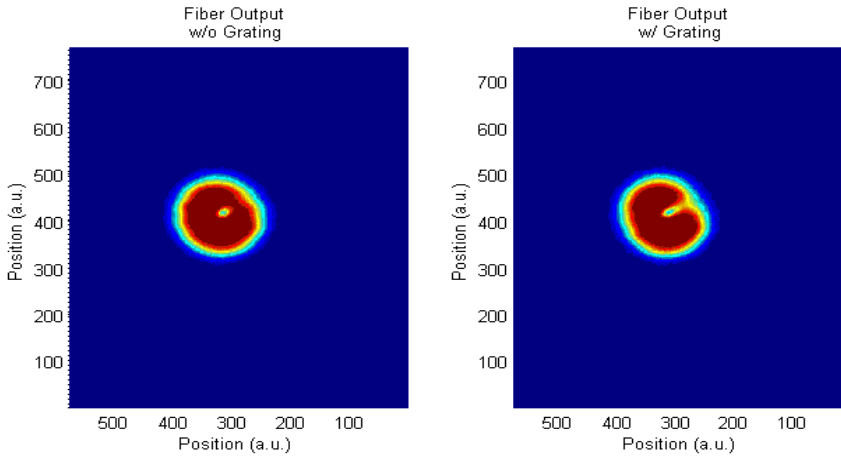
Şekil 3.14 Sabit Izgara İle Mod Kuplaj Verimliliğinin Ölçüm Düzenegi: Prensipten Çizimi ve Fotoğrafi

Yanal yüzeyi inceltirilmiş optik fiberin (Corning, HI1060) üzerine yerleştirilen polimerin özellikleri ve reçetesi önceki çalışmalarda verilmişti (Tablo 2). 543 nm Lazer ile işlenebilen polimerin 632.8 nm de sadece iki modu desteklediği bilinmektedir. Deneysel çalışmada, iki modun 632.8 nm kaynaktan sürülmesiyle başlayan süreç; polimer yapının (film) optik fiberin inceltirilmiş yüzeyine yerleştirilmesi, kırınım ızgarasının adım adım yazılması ile devam eden ve polimerin kurutulmasıyla sonlanan bir zaman dilimini kapsamaktadır. Tüm süreç boyunca iki modun taşıdığı ışık gücünün monitör edilmesiyle (optik güç metre), modlar arasında ki geçiş (güç aktarımı) ve modlara ait gücün değişimi izlenmektedir (CCD kamera ile).



Şekil 3.15 Yanal Yüzeyi İnceltilmiş Optik Fiber ve Polimer Film Üzerinde Kırınım İndisi Izgarası Olan Deney Örneği

Modlara ait güçlerin belirlenmesi için modların yakın alan difraksiyon modelleri ve mod dikliği kullanılmaktadır [ref]. CCD kamera ile kaydedilen yakın alan difraksiyon deseni, iki moda ait difraksiyon desen modellerinin katsayılarla çarpılması ve toplanması sonucu elde edilen desenle eşlenmektedir (katsayı oranını belirler) ve toplam ışık gücünün güç metre ile okunan değere ayarlanmasıyla katsayılar belirlenmektedir.



Şekil 3.16 İki Moda Ait Işık Yoğunluk Dağılımının CCD Kaydı

Fiberin desteklediği iki modun kırınım ızgarası ile etkileştiğinde modlardaki ışık gücü değişimi modlar arası aktarım verimliliğini ifade etmektedir, ancak ikinci bir optik fiber olmadığı için gerçekten kuple olan ışık gücünü vermemektedir. Benzetim çalışmalarında ortaya koyduğumuz kılavuzlanmış modlar arasındaki güç aktarımı yerine, kılavuzlanmış modlardan ışınım modlarına kuple olan güç aktarımı söz konusudur. Bu nedenle, çalışmada test edilen aygıtın, kırınım ızgarasının karakterizasyonu elde edilmiş olmaktadır. İki modun kırınım ızgarası ile etkileşimi sonucu, faz eşlemesi sağlanan aynı fibere ait modlar arasında güç aktarımı beklenmektedir. Şekil 3.16 da iki moda ait ışık

yoğunluk diyagramları kırınım ızgarası varken ve yokken görünmektedir. Modlar arasında güç aktarımı görülmekle birlikte oldukça düşük değerlerdedir.

Çıplak fiber çıkış gücü	558±10nW
İşlenmemiş polimer kaplı fiber çıkış gücü	79,5±10nW
44 adım ızgara yazılmış fiber çıkış gücü	79,5±10nW

Yanal yüzeyi inceltilmiş optik fiberin üzerine yerleştirilen polimerin kırınım indisi 1.503 civarındadır(1.531'e kadar çıkabilmektedir) ve yerini aldığı fiberin kılıfının kırınım indisi 1.4507 dir. Bu durumda modlara ait ışık gücünün çok büyük kısmı ışınım modları tarafında saçılmaktadır, çok az bir miktarı fiber içerisinde kalabilmektedir (Dinleyici, 1998). Ölçüm sonuçları Tablo 3 de verilmektedir, başlangıçta 558 nW olan modların toplam gücü, polimer yerleştirildikten sonra 79.5 nW değerine düşmekte, kırınım ızgarasının yazılmasından sonra ise toplam güç değişmemekle birlikte, modlar arası geçiş olduğu gözlemlenmektedir. Modlar arasında faz eşleşmesinin sağlandığını bunun sonucunda modların taşıdığı ışık gücünün modlar arasında yeniden dağıldığını söyleyebiliriz.

3.5 SABİT IZGARA İLE MOD KUPLÖR TASARIMI ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI ÜZERİNE TARTIŞMALAR

Optik dalga kılavuzları arasında mod kuplajlama için kırınım indisi ızgarası kullanımı literatürde bulunmasına rağmen fotopolimer tabanlı bir kuplörün varlığına literatürde pek fazla rastlanmamaktadır. Fotopolimerin malzeme olarak çokça çalışılmasına karşın yararlı (kullanılabilir) bir aygıt tasarımı için pek fazla değerlendirilmediği gözükmektedir. Literatürde ki çalışmalarda bir çok polimer sentezi reçetesi önerilmektedir. Ancak, foton ile polimerizasyonu başlatılan malzemelerde kırınım indisinin değişimini ifade eden pratik bir model bulunmamaktadır. Bu proje kapsamında doğrudan fotopolimerize ederek yazılan optik dalgakılavuzlarının karakterizasyonu PVA bazlı polimerler için gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak etkin mod özelliği kullanılmadan yakın alan difraksiyon yöntemi kullanılmış ve enine kırınım indisi profili modellenmiştir. Böylece bir çok farklı dalga kılavuzu geometrisini gerçekleştirmek mümkün olabilecektir. Bu dalga kılavuzlarının istenilen geometrilerde (tek veya iki boyutlu) dizilmesi ile difraktif optik tasarım çalışmaları yapılabilir. İlave olarak çok küçük boyutlarda (yüksek çözünürlükte) fotopolimer işlenmesi ile ilgili bir çalışma önemli sonuçlar doğurabilir.

Bahsedilen kırınım ızgarası yapılarının optik fiber üzerine yerleştirilmesi ile modlar arasında faz eşleşmesi kısmen sağlanabilmiştir. Bu çalışmada mod seçiciliği modlar arasında ki güç dengesi oranı ile belirlenmeye çalışılmıştır ve ilk sonuçlarda çok düşük mod kuplajı değerleri ölçülebilmştir. Yapılan çalışmaların geliştirilerek, fotopolimerize

dalga kılavuzunun karakteristiğinin, modlar arası faz eşlemeye etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Optik fiberler arasında mod aktarımının tam olarak gerçekleştirilmesi için ikinci optik fiberin kuplör üzerine yerleştirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, iki dalga kılavuzu arasında ki mod kuplajlama için kırınım ızgarasının faz eşleme özelliği net olarak bilinmektedir. Bu nedenle kuplaj verimliliğinin artırılması için parametrelerin eniyelenmesi gerekmektedir.

V. PROJE SONUÇLARI ÜZERİNE GENEL TARTIŞMALAR VE ÖNERİLER

Projenin hedeflediği, tamamen optik anahtarlama yönlendiricinin matematiksel modelinin geliştirilmesi, gerçekçi malzemeler ve optik aygıtlar ile benzetiminin yapılması ve deneysel olarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Temel mekanizması ışık kontrollü optik anahtarlama olan yönlendiricinin iki bileşeni vardır. Bunlar, Kerr doğrusalsızlığını etkin olarak kullanan geçici kırınım ızgarası ile mod kuplajlama ve sabit kırınım ızgarası ile mod seçici kuplörden oluşmaktadır. Her iki bileşende fiber optik üzerine polimer malzeme yerleştirilerek yapılmıştır. İlkinde, doğrusalsızlığı yüksek polimer sentezlenerek, ayrıca doğrusalsızlığı daha da yükseltmek için silika nanoparçacıklar ilave edilerek, elde edilen malzeme kullanılmıştır. İkincisinde, fotopolimerize özelliği olan polimer sentezlenerek uygulanmıştır. Reçeteleri literatürden alınan PVA bazlı bu polimerlerin amacına uygun işlevselliği için hazırlanma süreçleri iyileştirilmiş ve malzemeler detaylı olarak karakterize edilmiştir. Kullanılan polimerlerle ilgili literatürdeki çalışmaların ağırlıklı olarak sentezlemeye yönelik olması ve pratik tasarım için gerekli önbilgilerin bulunmaması, bu konuda araştırma yapmamızı gerekli kılmıştır. Fotopolimerlerde, lazer ışık hüzmesiyle yaratılan kırınım indisi değişikliğinin gerçekçi bir modelini geliştirdik ve yayınladık (Dinleyici, 2011). Doğrusalsızlığı yüksek polimerlerde kırınım indisinin optik fiberin değerlerine yaklaştırılabilmesi için ve ayrıca doğrusalsızlığını artırmak için nanoparçacık ilavesini kullandık ve yöntemi başarıyla test ettik. Bu çalışmaların bazıları yayınlanmış, bir kısmı yayına hazırlık aşamasındadır.

İstenilen özelliklerde malzemelerin elde edilmesi ve karakterizasyonundan sonra, yanal yüzeyi inceltirilmiş optik fiber üzerine, dilim dalga kılavuzu (film) olarak yerleştirilerek, iki farklı aygıt (kuplör) gerçekleştirilmiştir. Fotopolimer ile yapılan aygıtın, mod seçici kuplajlama fonksiyonunu yerine getirebilmesi için faz eşleyici kırınım ızgarası, dilim dalga kılavuzunun içerisine doğrudan lazer ile yazılmıştır. Elde edilen aygıt, mod seçici kuplör olarak test edilmiş ve ilk sonuçlar düşük verimlilikli olarak alınmıştır. Test edilen aygıt iki fiber arasında ki modlar için değil, fiber kılavuzladığı istenilen ve istenilmeyen modların dilim dalga kılavuzu modlarına kuplajı esas alarak test edilmiştir. Aygıtın tamamlanması için ikinci fiberin de yerleştirilerek kuplajın doğrudan ölçülmesi gerekmektedir.

Doğrusalsızlık özelliği olan polimer filmin (dilim dalga kılavuzu) optik fiber üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulan ikinci aygıtın anahtarlama özelliği başarıyla test edilmiştir. İlk olarak, doğrusalsız polimer filmin kunt (bulk) olarak ele alındığı ve lokal olarak (filmin bir bölgesi) kırınım indisinin değiştirildiği mekanizma ile ışık yoğunluk modülatörü karakteristiği ortaya konmuştur. Aynı aygıt üzerinde, iki Gauss ışık hüzmesinin girişilmesiyle film içerisinde geçici kırınım indisi ızgarası elde edilmiş ve bu durum için fiber iletim özelliği incelenmiştir. Kırınım ızgarasının faz eşlemesi sağladığı modlar arası kuplaj nedeniyle fiber çıkışında ışık gücü değişimi gözlenmiştir. Geçici kırınım ızgarasının periyodunun değiştirilerek fiber çıkış gücünün ölçülmesiyle, kritik açılarda modlar arasında faz eşlemesinin sağlandığı, farklı mod eşlemesi nedeniyle fiber çıkışında ışık gücünün değiştiği tespit edilmiştir. Ancak, bu geçişlerin (faz eşleme) hangi modlar arasında olduğunun belirlenebilmesi için toplam ışık gücünden başka, modlara ait ışık gücünün ayrıştırılması gerekmektedir. Geçici kırınım ızgarası ile tamamen optik anahtarlamanın mümkün olabileceği gösterilmiştir. Kuplaj verimliliğinin artırılması ve iki aygıtın birleştirilerek tek bir yönlendirici olarak çalıştırılması gerekmektedir.

Anahtarlama mekanizmasının fiber modları arasında denenmesinden sonra iki farklı dalgaboyunda ışık kaynağının modları arasında da mekanizmanın test edilmesi iyi olacaktır. Bu çalışma başlamıştır, ancak henüz sonuç alınmamıştır.

Anahtarlama verimliliğini artıracak iyileştirmelerin yapılması ve bu maksatla fiber modlarının kesim frekansına yakın noktalarda mekanizmanın denenmesi çok önemlidir. Bunu gerçekleştirme konusunda en önemli sorun gerek optik fiberin gerekse lazer kaynaklarının istenilen özelliklerde temin edilememesidir.

Sonuç olarak, projenin ortaya koyduğu aygıt modelinin çalışma mekanizması doğrulanmış ve ilk ölçümler alınmıştır. Ancak, pratik kullanılacak bir aygıt için yapılması gereken iyileştirmeler bulunmaktadır ve proje kapsamında alınan donanımla bu çalışmalar devam ettirilebilecektir. Proje çalışmaları esnasında ortaya çıkan bir çok yeni bilginin yayınlanması için de hazırlıklarımız devam etmektedir.

KAYNAKÇA

- 1- A. M. C. Dawes, D. J. Gauthier, S. Schumacher, N. H. Kwong, R. Binder, and A. L. Smirl, Transverse optical patterns for ultra-low-light-level all-optical switching, *Laser & Photon. Rev.*, 2009.
- 2- T. S. El-Bawab, *Optical Switching*, Springer, 2006.
- 3- Osman, A., Dinleyici, M. S., An All-Optical Switching Based on Resonance Breaking with a Transient Grating, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* , Vol. 28, No.23, pp.3470-3477, 2010.
- 4- S.A. Haque, J. Nelson, Toward Organic All-Optical Switching, *Science*, Vol. 327, No. 5972, pp.1466-1467, Mar. 2010.
- 5- Demircan, A., Amiranashvili, Sh. and Steinmeyer, G.. Controlling light by light with an optical event horizon. *Phys. Rev. Lett*, 106: 163901, 2011.
- 6- L. Brzozowski, E. H. Sargent, Azobenzenes for photonic network applications: Third-order nonlinear optical properties, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 12, 2001.
- 7- Sabatyan, A. and Tavassoly, M.T., Application of Fresnel diffraction to nondestructive measurement of the refractive index of optical fibers, *Optical Engineering*, Volume 46, Issue 12, 2007.
- 8- P. Günter, *Nonlinear Optical Effects and Materials*, Springer Series in Optical Sciences, 2000.
- 9- T Babeva, D Mackey, I Naydenova, S Martin and V Toal; Study of the photoinduced surface relief modulation in photopolymers caused by illumination with a Gaussian beam of light; *J. Opt.* **12**, 2010.
- 10-Garcia C., Pascual I., Costela A., Garcia-Moreno I., Gomez C., Fimia A., and Sastre R., Hologram Recording in Polyvinyl Alcohol/Acrylamide Photopolymers by Means of Pulsed Laser Exposure, *Applied Optics* Volume 41, p. 2613-2620, 2002.
- 11-Griffel, Giora and Yariv, Amnon, *Frequency response and tunability of grating-assisted directional couplers*. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 27 (5). pp. 1115-1118. ISSN 0018-9197, 1991.
- 12-Saleh, B.E.A., Teich, M.C.: *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- 13-Dinleyici, M. S., Can, S., Characterization and Estimation of Refractive Index Profile of Laser-Written Photopolymer Optical Waveguides, *Optics Communications*, Vol. 284, No.21, pp.5067-5071, 2011.
- 14-O. O. Karakilinc, M. S. Dinleyici Interference Grating Structures in Photonic Crystal Circuits, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 42, No.9-10, pp.645-656, 2011.
- 15-T. Schneider, D.Wolfframm, R.Mitzner, J.Reif, *Ultrafast optical switching by instantaneous laser-induced grating formation and self-diffraction in barium fluoride*, *Appl.Phys. B* 68, 749-751,1999.
- 16-O. O. Karakilinc, M. S. Dinleyici., ' Novel Transient Grating Structures in Photonic Crystal Circuits' 15th International Conference Electronics, May 17-19, Kaunas and Vilnius, Lithuania, 2011.

- 17-Akın O. Dinleyici, M.S., In Fiber Resonance Breaking Mechanism, 10th Mediterranean Microwave Symposium MMS'2010, Güzelyurt, Northern Cyprus, 8, 2010.
- 18-T. He, Y. Cheng, Y. Du, Y. Mo, Z-scan determination of third-order nonlinear optical nonlinearity of three azobenzenes doped polymer films, *Optics Communications*, V.275, Issue 1, p. 240-244, 07/2007.
- 19-M. S. Dinleyici, Vector Modal Solution of Evanescent Coupler, PhD. Thesis, IIT, 1998.
- 20-Tingchao He, Yongguang Cheng, Yabing Du, Yujun Mo, Z-scan determination of third-order nonlinear optical nonlinearity of three azobenzenes doped polymer films, *Optics Communications*, V. 275, Issue 1, Pages 240-244, 7/2007.
- 21-Akın O. All optical switching via diffraction grating formed by interference of gaussian beam, Master Thesis, Izmir Institute of High Technology, pp.42-46 ,2005.
- 22- P. Sahu, All-optical switch using optically controlled two mode interference coupler, *Appl. Opt.* 51, 2601-2605, 2012.
- 23-Bonnefois, J., Guida, G., Priou, A.: Nonlinear response of a 2D photonic crystal made of Kerr effect nonlinear parallel rods of large diameter. *J. Mod. Opt.* 56, 646-652, 2009.
- 24-Boyd, R.W.: *Nonlinear Optics*, Third Edition. Academic Press, New York, 2008.
- 25-de Boor, J., Geyer, N., Gösele, U., Schmidt, V.: Three-beam interference lithography: upgrading a Lloyd's interferometer for single-exposure hexagonal patterning. *Opt. Lett.* 34, 1783-1785, 2009.
- 26-Grillet, C., Monat, C., Smith, C., Lee, M., Tomljenovic-Hanic, S., Karnutsch, C., Eggleton, B.: Reconfigurable photonic crystal circuits. *Laser & Photon. Rev.* 4, 192-204, 2010.
- 27-Joannopoulos, J.D., Johnson, S.G., Winn, J.N., Meade, R.D.: *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, New Jersey, 2008.
- 28-Li, E., Tieu, K., Mackenzie, M.: Interference patterns of two focused Gaussian beams in an LDA measuring volume. *Opt. and Lasers in Eng.* 27, 395-407, 1997.
- 29-Lin, S., Huang, T., Sun, J., Wu, T.: Gradient-index phononic crystals. *Phys. Rev. B.* 79, 094302 doi: 10.1103/PhysRevB.79.094302, 2009.
- 30- N. Chen, B. Yun, Y. Cui, *Cladding index modulated fiber grating*, *Optics Communications*, Vol. 259, Issue 2, 2006.
- 31-K.O. Hill, B. Malo, K.A. Vineberg, F. Bilodeau, D.C. Johnson, L. Skinner, *Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings*, *IEEE Electronics Letters*, 1990.
- 32-A. Yariv, Pochi Yeh, *Photonics*, Oxford University Press, 2007
- 33-M. S. Ünlü and S. Strite, Resonant Cavity Enhanced Photonic Devices, *J. Appl. Phys.* 78, 607, 1995.
- 34-Evaluation of the third-order optical nonlinearity of Au:SiO₂ nanocomposites in the off-resonant spectral region, H. Woon Lee *et al.*, *Opt. Comm.*, 2012.
- 35-B. Sturman et al. , Femtosecond recording and time-resolved readout of spatial gratings in lithium niobate crystals, *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 24, No. 3, 2007.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 109E240
Proje Başlığı: Tamamen Optik Paket Anahtarlama Ağlar için Düğüm Tasarımı
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof.Dr. Mehmet Salih Dinleyici
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Müh. Böl., Gülbahçe, 35435, Urla, İzmir
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Elektrik, Elektronik ve Enformatik Araştırma Grubu (EEEAG), Ankara, Türkiye
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1 Mart, 2010- 1 Eylül 2012
Tüm-optik fiber haberleşme hatlarında ihtiyaç duyulan komponentlerin temel mekanizması olarak çalıştırılabilir, tamamen optik ortamda anahtarlama yapabilen bir aygıtın kuramsal ve deneysel yapılabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fiber optik üzerinde tasarlanan anahtarlama mekanizması iki ayrı bileşenden oluşmaktadır. İlk olarak, Kerr tipi doğrusalsızlığın kullanıldığı mod (kip) anahtarlama yapabilen komponent bulunmaktadır. Bu aygıt doğrusalsız malzeme içerisinde geçici kırınım ızgarası oluşturularak kontrol edilmektedir. İkinci bileşen ise anahtarlama yapılan modun sabit bir kırınım ızgarası ile optik fiberden çıkarılmasını sağlayan optik kuplördür.
Anahtar Kelimeler: Optik Anahtarlama, Fiber Optik, Fiber Optik Haberleşme, Kerr Tipi Doğrusalsızlık, Tüm-Optik, Tamamen Optik, Optik Paket Anahtarlama, Fotopolimer, Geçici Kırınım Izgarası.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> <small>Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.</small>
Projeden Yapılan Yayınlar: Osman, A., Dinleyici, M. S., "Pulse Controlled Ultrafast All-Optical Switch/Modulator" Optics Letters, Gönderildi, 2012. Dinleyici, M. S., Can, S., "Characterization and Estimation of Refractive Index Profile of Laser-Written Photopolymer Optical Waveguides" Optics Communications, Vol. 284, No.21, pp.5067-5071, 2011.

**O. O. Karakilinc, M. S. Dinleyici “Interference Grating Structures in Photonic Crystal Circuits”
Optical and Quantum Electronics, Vol. 42, No.9-10, pp.645-656, 2011.**

**O. O. Karakilinc, M. S. Dinleyici.,’ Novel Transient Grating Structures in Photonic Crystal Circuits’
15th International Conference Electronics, May 17-19, 2011, Kaunas and Vilnius, Lithuania.**

**Osman, A., Dinleyici, M. S., “An All-Optical Switching Based on Resonance Breaking with a
Transient Grating ” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology , Vol. 28, No.23, pp.3470-3477,
2010.**

**Akm O. Dinleyici, M.S.,’In Fiber Resonance Breaking Mechanism’ 10th Mediterranean Microwave
Symposium MMS’2010, Ağustos 2010, Güzelyurt, Northern Cyprus**