

**YALITKAN ÜSTÜ SİLİKON TEK KİPLİ OPTİK DALGAKILAVUZUNUN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Özgür ARAS

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2013

ANKARA

Özgür ARAS tarafından hazırlanan “YALITKAN ÜSTÜ SİLİKON TEK KİPLİ OPTİK DALGAKILAVUZUNUN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Elif ORHAN

.....

Tez Danışmanı, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ahmet KILIÇ

.....

Fizik Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Elif ORHAN

.....

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Erdal ARAS

.....

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi : 21 / 06 / 2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özgür ARAS

**YALITKAN ÜSTÜ SİLİKON TEK KIPLİ OPTİK DALGAKILAVUZUNUN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**
(Yüksek Lisans Tezi)

Özgür ARAS

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2013

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yalıtkan üstü silikon (YÜS) tek kipli optik dalgakılavuzlarının tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirildi. Analitik ve nümerik yöntemler kullanarak YÜS dalgakılavuzu tasarlandı. Üretilecek dalgakılavuzu için uygun geometriler belirlendi ve tek kip elde edildi. Tasarım sonuçları göz önünde bulundurularak geleneksel optik litografi yöntemi ile tek kipli YÜS dalgakılavuzları üretildi. YÜS dalgakılavuzlarının optik giriş ve ilerleme kayıpları ticari cut-back metodu kullanılarak ölçüldü. YÜS dalgakılavuzunun optik giriş kaybı, TE ve TM polarizasyonlar için 4,9 dB olarak tespit edildi. Tek kipli YÜS dalgakılavuzunun optik ilerleme kayıpları, TE ve TM polarizasyonlar için sırasıyla 2,5 dB/mm ve 2,8 dB/mm olarak ölçüldü.

Bilim Kodu : 202.1.111
Anahtar Kelime : Yalıtkan üstü silikon (YÜS), tek kipli optik dalgakılavuzu, optik kayıp, tümlşik optik
Sayfa Adedi : 36
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Elif ORHAN

**FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF SINGLE MODE SILICON
ON INSULATOR OPTICAL WAVEGUIDE**

(M. Sc. Thesis)

Özgür ARAS

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2013

ABSTRACT

The design, fabrication and characterization of silicon on insulator (SOI) single mode optical waveguide are presented in this thesis. SOI waveguide were designed by using analytical and numerical methods. The convenient geometry was determined for SOI waveguide to be fabricated. Single mode for SOI waveguide was obtained. Based on the result of design, single mode SOI waveguide were fabricated by using conventional optical lithographic methods. The insertion and propagation losses of waveguide were measured by using conventional cut-back method. The insertion loss of SOI waveguide is 4.9 dB for TE and TM modes. The propagation losses of single mode SOI waveguide are 2.5 dB/mm and 2.8 dB/mm for TE and TM modes respectively.

ScienceCode : 202.1.111
KeyWords : Silicon on insulator (SOI), single mode optical waveguide, optic loss, integrated optics
PageNumber : 36
Adviser : Prof. Dr. Elif ORHAN

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasında, danıőman hocam Prof. Dr. Elif ORHAN'a ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eőim Gonca ARAS'a teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. OPTİK DALGAKILAVUZLARININ TEMELLERİ	4
2.1. Tek Kipli Dalgakılavuzları.....	11
2.2. Optik Dalgakılavuzları Kayıpları.....	15
3. OPTİK YÜS DALGAKILAVUZUN TASARIMI.....	17
3.1. BeamPROP Benzeşim Programı.....	17
4. OPTİK YÜS DALGAKILAVUZUN ÜRETİMİ.....	21
4.1. Fotolitografi	21
4.2. Aşındırma.....	23
4.3. Ölçüm.....	25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	28
KAYNAKLAR	29
EKLER	32
EK-1 Tezde kullanılan simülasyon programının kod dosyası	33
ÖZGEÇMİŞ	36

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. YÜS dalgakılavuzunun geometrik parametreleri.....	20
Çizelge 3.2. YÜS dalgakılavuzunun üretiminde kullanılan parametreler.....	20
Çizelge 4.1. Alttaş temizliğindeki aşamalar.....	21
Çizelge 4.2. Fotolitografi parametreleri	22
Çizelge 4.3. Aşındırma parametreleri	24

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Optik dalgakılavuzunun basit bir yapısı ve indis profili.....	4
Şekil 2.2. Tek kipi destekleyen dalgakılavuzu.....	5
Şekil 2.3. İki kipi destekleyen dalgakılavuzu	5
Şekil 2.4. Dilim dalgakılavuzu.....	6
Şekil 2.5. Tek kipli dalgakılavuzu.....	9
Şekil 2.6. Çok kipli dalgakılavuzu	9
Şekil 2.7. Eş. 2.21 ve Eş 2.22 kullanarak hesaplanan kiplerin güç dağılımı.....	11
Şekil 2.8. Dikdörtgen dalgakılavuzu çeşitleri	12
Şekil 2.9. Etkin indis yönteminin şematik gösterimi.	13
Şekil 2.10. YÜS dalgakılavuzu için tek kip şartı	14
Şekil 2.11. Kayıp mekanizmaları	15
Şekil 2.12. Silika fiberde kaybın dalgaboyu bağımlılığı.....	16
Şekil 3.1. Programının açılış ekranı	18
Şekil 3.2. Global setting penceresi	18
Şekil 3.3. İndis profili penceresi	19
Şekil 3.4. Programının hesaplama ekranı	19
Şekil 3.5. Çok kip ve tek kip profili	20
Şekil 4.1. Kuru aşındırma cihazı	24
Şekil 4.2. Ölçüm düzeneği	26
Şekil 4.3. Tek kipli YÜS dalgakılavuzunun optik giriş kayıpları.....	27

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Fotolitografi ile oluşturulmuş bozuk dalgakılavuzların optik mikroskop görüntüleri.....	23
Resim 4.2. Fotolitografi ile oluşturulmuş üretilecek dalgakılavuzların optik mikroskop görüntüleri.....	23
Resim 4.3. Kuru aşındırma ile aşındırılmış YÜS dalgakılavuzunun SEM görüntüsü	24
Resim 4.4. Optik olarak pürüzlü (solda) ve pürüzsüz (sağda) yüzey	25
Resim 4.5. Kızılötesi kamera ile alınmış tek kip profili	26

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
n_f	Çekirdek tabakanın kırılma indisi
n_c	Üst yelek tabakanın kırılma indisi
n_s	Alt yelek tabakanın kırılma indisi
ρ	Yük yoğunluğu, c/m^3
J	Akım yoğunluğu, $Amper/m^2$
E	Elektrik alan şiddeti, V/m
H	Manyetik alan şiddeti, A/m
D	Elektrik akı yoğunluğu, c/m^2
B	Manyetik akış yoğunluğu, $Weber/m^2$
β	İlerleme sabiti
ω	Açısal frekans
c	Işık hızı, m/s
λ	Elektromanyetik dalganın dalgaboyu
k_0	Vakum dalga vektörü
γ	Sönüm katsayısı
κ	Enine dalga vektörü, bağlaşım katsayısı
n_{eff}	Etkin indis
α	Sönüm katsayısı
dB	Desibel
φ	Faz farkı

Kısaltmalar**YÜS****TM****TE*****FSR******Q*****BPM****DC****RIE****HMDS****Açıklama**

Yalıtkan Üstü Silikon

Enine Manyetik

Enine Elektrik

Serbest Spektral Aralık

Kalite Faktörü

Işın İlerleme Metodu

Doğru Akım

Reaktif İyon Aşındırma

HexaMethylDiSilazene

1. GİRİŞ

Günümüzde elektronik iletişim endüstrisinde çok sayıda önemli değişimler meydana gelmektedir. Ses, veri ve görüntü iletişimindeki olağanüstü artış, daha ekonomik ve daha geniş kapasiteli iletişim sistemlerine olan talebin de aynı şekilde artmasına neden olmuştur. Bu da elektronik iletişim endüstrisinde hızlı, köklü ve nitelikli değişime yol açmıştır. Tümüleşik optik uygulamalar için en genel çerçevede malzemenin yüksek şeffaflığa, kolay işlenebilirliğe, yüksek fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal kararlılığa sahip olması gerekmektedir.

Silikon alttaş üzerine yüksek optik kaliteye sahip ince filmlerin fabrikasyonu ve çeşitli büyütme teknikleri 80'li yılların sonundan beri gelişmektedir. Bu metotlar optik özellikleri iyileştirilmiş silikon bazlı alaşımların (SiGe heteroyapılar), silikon tabanlı dielektirikler (silika, silikon oksinitrat (SiON) germano silika) epitaksiyel büyütme ve yalıtkan üstü silikon alttaşların fabrikasyonu üzerine temellenmektedir [2-5]. Bir araştırmacı doktora çalışmasında melez yalıtkan üstü silisyum tümleşik optik aygıtlar üzerine çalışmış ve bütün silikon tabanlı optik malzemelerin arasında yalıtkan üstü silikon (YÜS)'ün eşsiz optik özelliklere sahip olduğunu gözlemlemiştir [6]. İnce YÜS üzerine düşük güçlü ısı optik anahtar üretimi üzerine bir çalışma, Espinola ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [7]. Bruel'in yalıtkan üstü silikon malzeme teknolojisi üzerine bir çalışması mevcuttur [8]. Bir başka araştırmacı, YÜS optik sırt dalgakılavuzları üretmiştir [9]. Bir diğer araştırmacı da YÜS yönsel bağlaştırmacı üzerine çalışma yapmıştır [10]. Kiyat ve arkadaşları yüksek Q değerli YÜS optik çınlaçlar üretmişlerdir [11]. Hsu, düşük çift kırıcılığa sahip YÜS dalgakılavuzları üretmiştir [12]. Jones ve arkadaşları, YÜS malzemedan slot yapılı dalgakılavuzu esaslı yüksek Q faktörlü oval kovuk tasarlamış, üretmiş ve karakterize etmişleridir [13]. Ölçülen yüksek kalite faktörleri slot yapılı dalgakılavuzlarının düşük kayba sahip olabileceklerini göstermiş ve bu dalga kılavuzu geometrisinden oluşturulan halka kovukların biyolojik ve kimyasal sensörler ve ayarlanabilir telekomünikasyon filtreleri olarak uygulama bulabileceği belirtilmiştir. Gardner ve Brongersma, silikon teknolojisinde hazırlanmış erbiyum ve silikon nanokristaller kullanarak mikro halka ve mikro disk optik kovuk

üretmişleridir [14]. Ay, silikon esaslı dielektriklerin büyütülmesi, karakterizasyonu ve tümleşik optikteki uygulamaları üzerine bir tez çalışması sunmuştur [15]. Kiyat ve arkadaşları, YÜS dalgakılavuzu esaslı yüksek kalite faktörlü kovuklar tasarlamış, üretmiş ve karakterize etmişlerdir [16]. Kritik bağlaşımı sağlamak için uygun dalgakılavuzu (rib) geometrisi belirlemişler ve 350-500 μm yarıçaplı kovuklar için yüksek kalite faktörü (119000) elde etmişlerdir. Nawrocka ve arkadaşları, 47 nm ye sahip geniş FSR'li akortlanabilir ekle-çıkart YÜS halka rezonatör üretmişlerdir [17]. Yine Kiyat ve arkadaşları termal olarak akortlanabilir 38.000 Q faktöre sahip YÜS rezonator üretmişlerdir [18]. Rezonans dalgaboyundaki kaymayı ayarlamak için 17 mW'lık gücün yeterli olduğunu bulmuşlardır. Barrios, yüksek hassasiyete sahip yeni tümleşik nanomekanik optik sensör üretmiştir [19]. Bu fotonik cihaz, sadece bir ucu destekli kol olarak rol oynayan yatay dalgakılavuzu ile oluşturulmuş silikon esaslı disk kovuk ihtiva etmektedir. Lee ve arkadaşları, MEMS aktüatör kullanarak silikon mikro disk kovukların ayarlanabilir bağlaşım rejimlerini ilk kez tanımlamışlardır [20]. Dalgakılavuzu ve disk arasındaki aralığı değiştirerek aktif bir şekilde bu mikro kovuğu çalıştırabilmişlerdir. Dalgakılavuzu ve disk arasındaki aralığı ayarlayabilmek için dalga kılavuzları, MEMS aktüatörler ve mikro diskler iki tabakalı YÜS alttaş üzerinde üretilmiştir. Dikey bağlaşık halka kovukların detaylı teorik analizi Tee ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [21]. Aras, yüksek lisans tez çalışmasında YÜS optik ekle çıkart çoklayıcı tasarımı yapmıştır [22]. Hofrichter ve arkadaşları, YÜS dalgakılavuzunu, indiyum fosfat disk ile tümleştirerek modülasyon karakteristiklerini incelemişler ve düşük voltajda yüksek hızlı çalışabilen modülatör üretmişlerdir [28]. Dazeng ve arkadaşları yine YÜS dalgakılavuzu üzerine tümleştirilmiş yüksek hızlı, 40,7 GHz band genişliğine sahip, 5 dB giriş kaybına sahip GeSi elektro-absorpsiyon modülatör üretmişlerdir [29]. Guoliang ve arkadaşları, 300 nm kalınlığında bir YÜS kullanarak 0,026 dB/cm ultra-kayıp YÜS dalgakılavuzu üretmişlerdir [30].

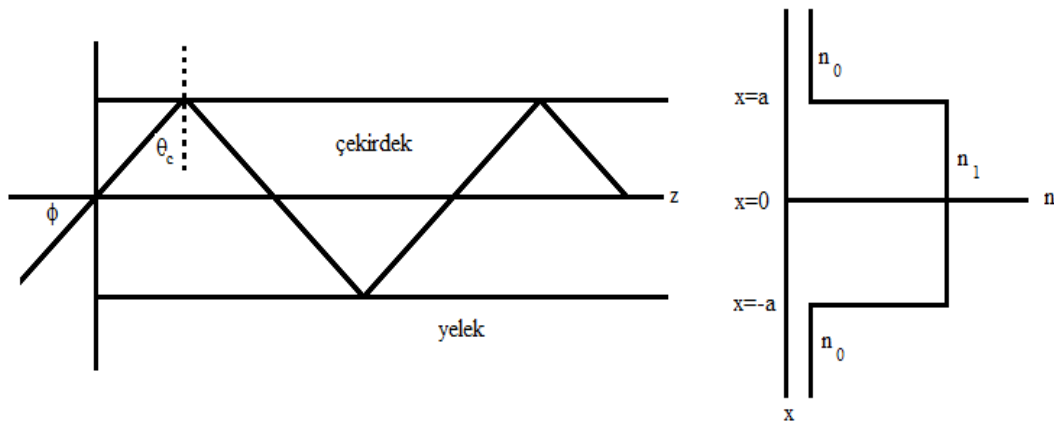
Bu tez çalışmasında, yalıtkan üstü silikon tek kipli optik dalgakılavuzlarının tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirildi. Tasarım sonuçları göz önünde bulundurularak geleneksel optik litografi yöntemle tek kipli YÜS dalgakılavuzları üretildi. YÜS dalgakılavuzlarının optik giriş ve ilerleme kayıpları ticari cut-back metodu kullanılarak ölçüldü. YÜS dalgakılavuzunun optik giriş kaybı, TE ve TM

polarizasyonlar için 4,9 dB olarak tespit edildi. Tek kipli YÜS dalgakılavuzunu optik ilerleme kayıpları TE ve TM polarizasyonlar için sırasıyla 2,5 dB/mm ve 2,8 dB/mm olarak ölçüldü.

2. OPTİK DALGAKILAVUZLARININ TEMELLERİ

Dalgakılavuzu içerisinde, kipler halinde ilerleyen ışık, Maxwell denklemleri, sınır şartları ve Pointing vektörü kullanılarak aşağıda sırasıyla açıklanacaktır.

Optik fiberler ve optik dalgakılavuzları, Şekil 2.1'de görüldüğü üzere ışığın hapsediği bir çekirdek tabakadan ve bu tabakayı çevreleyen alt ve üst yelek tabakalarından oluşur. Çekirdeğin kırılma indisi n_1 , yelek tabakasının kırılma indisi n_0 'dan büyüktür. Bundan dolayı ışık dalgakılavuzu içerisinde toplam iç yansıma yaparak ilerler. Toplam iç yansıma, sadece gelme açısı kritik açı olarak adlandırılan açıdan daha büyük olduğu zaman meydana gelir, böylece ışık ışınları Şekil 2.1'de görüldüğü gibi tamamen geldiği ortama yansır.



Şekil 2.1. Optik dalgakılavuzunun basit bir yapısı ve indis profili

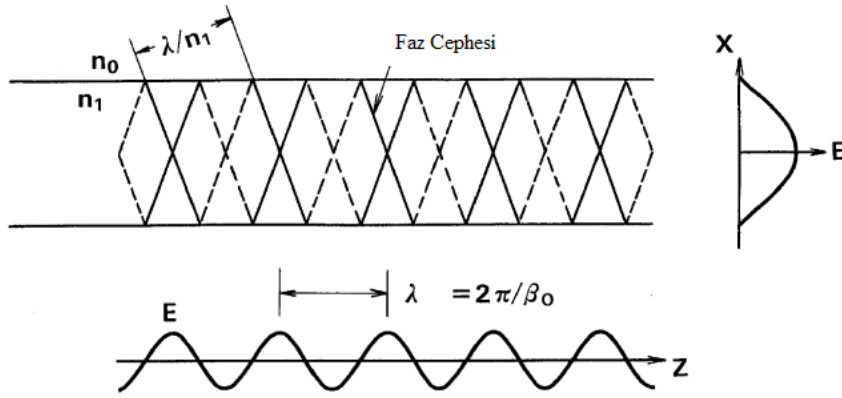
Snell yasasından faydalanarak, kritik açı Eş. 2.1'deki gibi bulunur:

$$\sin\theta_c = \frac{n_1}{n_0} \quad (2.1)$$

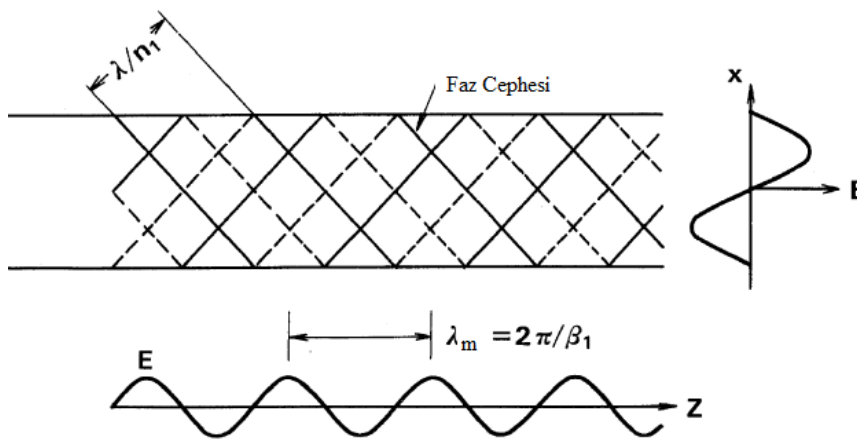
Şekil 1.1'de Φ açısının maksimum değeri, dalgakılavuzunun maksimum ışık toplama kapasitesinin, sayısal ifadesidir ve sayısal açıklık (NA) olarak adlandırılır. Eş. 2.2'deki gibi gösterilir [26]:

$$NA = \sin\Phi_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \quad (2.2)$$

Dalgakılavuzu içerisinde ışık kipler ile ilerler. Kipler, dalgakılavuzu içerisinde zıt yönde ilerleyen elektromanyetik dalgaların girişim desenlerinden oluşur [23]. Kipler, girişim sonucu oluşan yapılardır. Eğer yapıcı girişim varsa elektrik alanda maksimum, yıkıcı girişim varsa şiddette bir minimum oluşur. Bir dalgakılavuzu tek veya daha fazla kipe sahip olabilir. Şekil 2.2, tek bir maksimumu temsil eden temel kipi gösterir. Şekil 2.3 ise iki maksimumdan oluşan yani iki kipi destekleyen bir dalgakılavuzunu gösterir. Kipler ışığın ilerleme süresince güç dağılımını belirler. Kipin genliği, kipte ne kadar güç taşındığı ile ilgilidir. Dalgakılavuzunun her bir kipi farklı ilerleme sabitine veya etkin indise sahiptir.



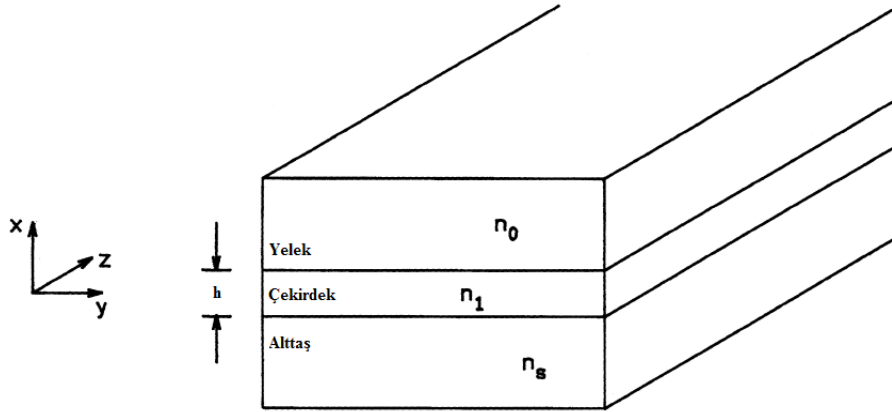
Şekil 2.2. Tek kipi destekleyen dalgakılavuzu



Şekil 2.3. İki kipi destekleyen dalgakılavuzu [26]

En basit dalgakılavuzu olan dilim dalgakılavuzu, çeşitli yapılardaki optik dalgakılavuzlarının analizini yapmak için oldukça iyi bir modeldir. Dilim

dalgakılavuzları, dielektrik filmlerden oluşan yapıdır. Şekil 2.4 genel bir optik dilim dalgakılavuzunu gösterir. Dilim dalgakılavuzu optik kipleri destekler, bu kipler sınır şartları kullanılarak Maxwell denklemlerinden hesaplanır.



Şekil 2.4. Dilim dalgakılavuzu

Burada Maxwell denklemleri, yüksüz ($\rho=0$, $J=0$), doğrusal ve izotropik ortamlar için skaler hesaplanacaktır. Maxwell denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\Delta \times E = -\mu \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\Delta \times H = \varepsilon \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\Delta \cdot D = 0 \quad (2.5)$$

$$\Delta \cdot B = 0 \quad (2.6)$$

Burada, E elektrik alan şiddeti, H manyetik alan şiddeti, D elektrik akı yoğunluğu, B manyetik akış yoğunluğu μ ve ε sırasıyla ortamın manyetik ve elektrik geçirgenlikleridir. Bu denklemler kullanılarak aşağıdaki skaler dalga denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin bileşenleri cinsinden yazılırsa elde edilir:

$$\nabla^2 E_i - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$$

Burada, enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) olmak üzere iki polarizasyonu göz önüne alınacaktır. TE dalga için, elektrik alanın ilerleme yönünde bileşeni yoktur. TM dalga da ise manyetik alanın ilerleme yönünde bileşeni yoktur. Her iki

durumun sınır şartları birbirinden farklı olduğu için kip karakteristikleri de birbirinden farklı olacaktır. TE durumunda E, y eksenine boyunca polarize olmuştur ve sadece E_y bileşenine sahiptir.

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (2.8)$$

Burada β , z yönündeki ilerleme sabitidir. Ayrıca β boyuna dalga vektörü olarak adlandırılır, ω açısal frekans, c ışık hızı, λ elektromanyetik dalganın dalgaboyudur.

$$\omega = \frac{k}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad k = k_0 n \quad n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.9)$$

Burada k_0 vakum dalga vektörüdür. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak Eş. 2.10'da verilen skaler Helmholtz denklemi dalga denklemi elde edilir:

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n^2(x) E_y = 0 \quad (2.10)$$

$$E_y(x, z) = E_y(x) e^{-i\beta z} \quad (2.11)$$

Eş. 2.11, Helmholtz denkleminde yerine yazılırsa aşağıdaki kırılma indisine bağlı skaler dalga denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 E_y(x)}{\partial x^2} + (k_0^2 n^2(x) - \beta^2) E_y = 0 \quad (2.12)$$

Eş. 2.12'nin çözümü parantez içindeki ifadenin işaretine göre değişir. Bu durumda,

$$\beta > k_0 n \text{ ise} \quad E_y(x) = E_0 e^{\pm \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n^2} x} \quad (2.13)$$

Burada E_0 , $x=0$ da alanın genliğidir. Çözüm gerçeldir. Negatif olarak üstel azalmayı ifade edecektir.

$$\beta < k_0 n \text{ ise} \quad E_y(x) = E_0 e^{\pm \sqrt{k_0^2 n^2 - \beta^2} x} \quad (2.14)$$

Burada ise çözüm sanaldır ve bir osilatör biçimindedir. Burada iki yeni katsayı tanımlamak daha yararlı olacaktır. Bunlardan biri sönüm katsayısı diğeri ise enine dalga vektörüdür.

$$\begin{aligned} \text{Sönüm katsayısı,} \quad \gamma &= \sqrt{\beta^2 - k_o^2 n^2} & (\beta > k_o n) \\ \text{Enine dalga vektörü,} \quad \kappa &= \sqrt{k_o^2 n^2 - \beta^2} & (\beta < k_o n) \end{aligned}$$

Bu terimler dalgakılavuzunun kiplerini karakterize etmek için kullanılacaktır. Toplam iç yansıma ve kılavuzlanma şartının sağlanması için β aşağıdaki aralıkta olmalıdır.

$$k_o n_s < \beta < k_o n_f \quad (2.15)$$

Bu şartlar altında, dilim dalgakılavuzunda, üç bölge için elektrik alan genlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} E_y &= A e^{-\gamma_c x} & x > 0 \\ E_y &= B \cos(\kappa_f x) + C \sin(\kappa_f x) & -h < x < 0 \\ E_y &= A e^{\gamma_s(x+h)} & x < -h \end{aligned} \quad (2.16)$$

Burada A, B, C ve D sınır şartlarından belirlenecektir. İki tane sınır şartı vardır. Bunlar teğetsel E ve H'nin ara yüzeylerde sürekli olmasıdır. H'nin sürekliliği için aşağıdaki bağıntı kullanılacaktır:

$$H_z = \frac{i}{\mu\omega} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.17)$$

Tüm bu şartlar ve bağıntılar kullanılarak TE ve TM polarizasyonları için aşağıdaki özdeğer denklemleri elde edilir.

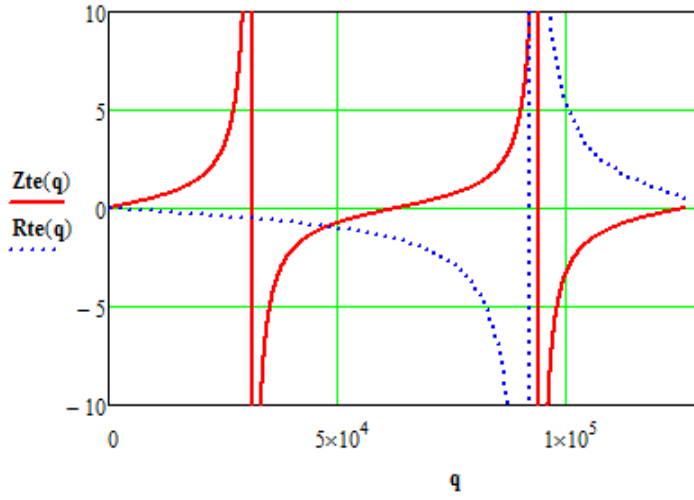
TE için:

$$\tan(h\kappa_f) = \frac{\gamma_s + \gamma_c}{\kappa_f \left[1 - \frac{\gamma_s \gamma_c}{\kappa_f^2} \right]} \quad (2.18)$$

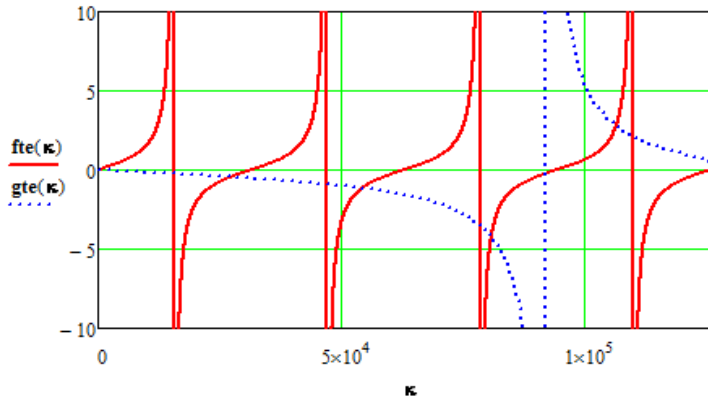
TM için:

$$\tan(h\kappa_f) = \frac{\kappa_f \left[\frac{n_f^2}{n_s^2} \gamma_s + \frac{n_f^2}{n_c^2} \gamma_c \right]}{\kappa_f^2 - \frac{n_f^4}{n_s^2 n_c^2} \gamma_s \gamma_c} \quad (2.19)$$

Bu özdeğer denklemleri asimetrik dalgakılavuzu için geçerlidir. Simetrik dalgakılavuzu için de benzer işlemler yapılarak özdeğer denklemleri bulunabilir.



Şekil 2.5. Tek kipli dalgakılavuzu



Şekil 2.6. Çok kipli dalgakılavuzu

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da verilen grafiklerde kesim noktaları dalgakılavuzunun desteklediği kip sayısını verir. Bu durumda ilk grafik tek bir kipi desteklerken, ikinci grafik dört kipi destekler. Bu kiplerin yönleri birbirlerinden farklıdır. Temel (0. Kip) kip, optik eksene eksen doğrultusunda giderken, diğer kipler yelek katmanına yakın hareket ederler. Yukarıda her kip farklı güç dağılımına sahip denilmişti, Eş. 2.16'da verilen katsayılar dalgakılavuzunda taşınan gücü belirler. Bu güç poynting vektörünün z bileşenin integrale edilmesiyle hesaplanır.

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H \cdot \hat{z}) \quad (2.20)$$

Buradan, TE kipi için ortalama güç aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_z = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y H_x dx = \frac{\beta}{2\mu_0\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_y|^2 dx \quad (2.21)$$

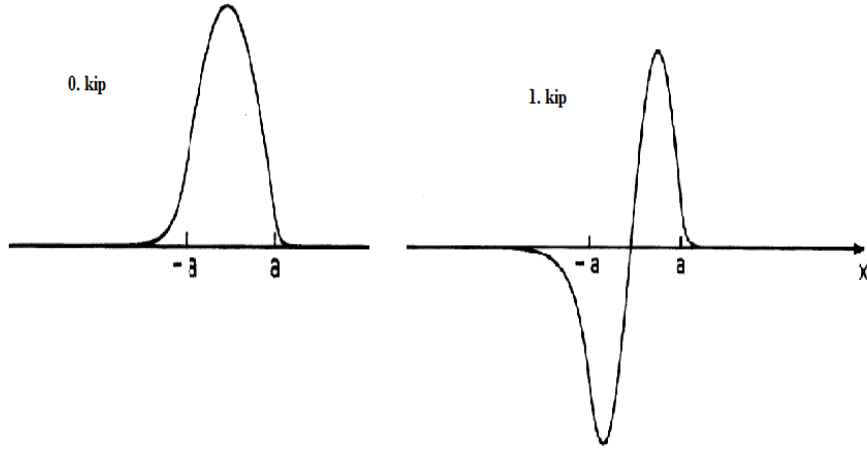
Böylece kiplerin çekirdek ve yelek tabakalarında, ne kadar enerji taşıdığını bulabiliriz. Çekirdek için güç ifadesi aşağıdaki gibi yazılırken,

$$\frac{P_{\text{çekirdek}}}{P_{\text{toplaml}}} = \frac{\int_{-h}^0 E_y(x) H_x^*(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} E_y(x) H_x^*(x) dx} \quad (2.22)$$

Yelekte, kipi taşıdığı enerji aşağıdaki gibi yazılır:

$$\frac{P_{\text{yelek}}}{P_{\text{toplaml}}} = 1 - \frac{P_{\text{çekirdek}}}{P_{\text{toplaml}}} \quad (2.23)$$

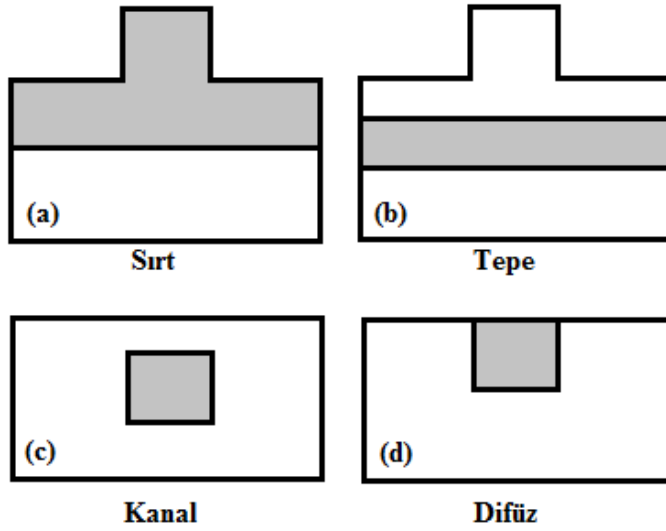
Böylece yukarıdaki denklemler kullanılarak dilim dalgakılavuzunun kip sayısı, her bir kipi ilerleme katsayıları, taşıdıkları enerji hesaplanabilir. Şekil 2.7 tek kip ve iki kipi güç dağılımını gösterir [23].



Şekil 2.7. Eş. 2.21 ve Eş 2.22 kullanarak hesaplanan kiplerin güç dağılımı

2.1. Tek Kipli Dalgakılavuzları

Dilim dalgakılavuzlarını, analiz etmek, optik dalgakılavuzlarının temel kavramlarını anlamak için kolay yapılardır. Ancak yatay hapsolme olmadığı için kullanım alanları azdır. Dilim dalgakılavuzu yerine ışığın yatay olarak hapsoldüğü dikdörtgen dalgakılavuzları yaygın olarak kullanılmaktadır. Dikdörtgen dalgakılavuzları üretim yöntemlerine göre farklı adlar alırlar. Bunlardan başlıcaları, sırt dalgakılavuzu (Şekil.2.8a), tepe dalgakılavuzu (Şekil.2.8b), kanal dalgakılavuzu (Şekil.2.8c), difüz dalgakılavuzudur (Şekil.2.8c).

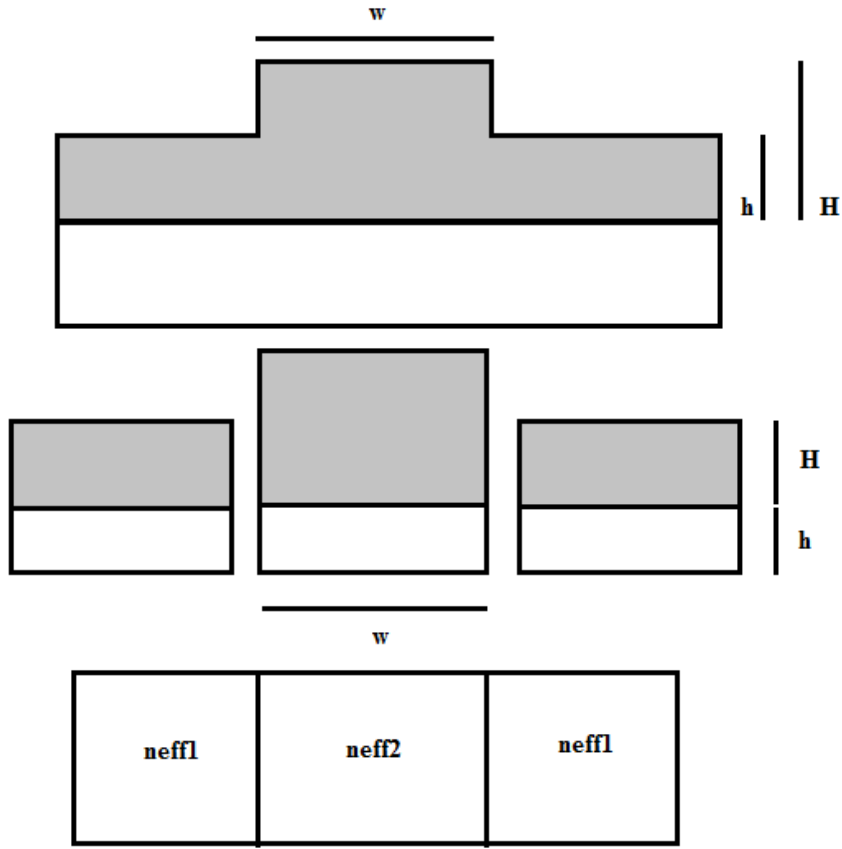


Şekil 2.8. Dikdörtgen dalgakılavuzu çeşitleri

Dikdörtgen dalgakılavuzlarının kip analizi, dilim dalgakılavuzunun analizine göre daha zordur. Bunun için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan en sık kullanılanlar etkin indis yöntemi ve nümerik bir yöntem olan ışın ilerleme yöntemidir. Bu yöntem ile sırt dalgakılavuzu Şekil 2.9'de gösterildiği gibi üç dilim dalgakılavuzuna bölünür. Her bir dilim dalgakılavuzu için özdeğer denklem kullanılarak ilerleme sabiti (β) bulunur. Her dilim dalgakılavuzunun etkin indisleri (n_{eff1} ve n_{eff2}) hesaplanır.

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.24)$$

Yeni oluşan simetrik dilim dalgakılavuzu için yapı için ortogonal polarizasyonda tekrar β ve etkin indis hesaplanır. Hesaplanan son etkin indis, asıl sırt dalgakılavuzunun etkin indisidir.



Şekil 2.9. Etkin indis yönteminin şematik gösterimi

Etkin indis yöntemi küçük boyutlu dalgakılavuzlarında güzel sonuçlar verirken, büyük boyutlu ve yelek-çekirdek kırılma indisi arasındaki farkın büyük olduğu dalgakılavuzlarının analizi için elverişli değildir. Soref ve arkadaşları 90'lı yılların başında, büyük boyutlara sahip dalgakılavuzları için aşağıdaki yaklaşımı geliştirdiler:

$$t < c + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad r > 0,5 \quad c = 0 \quad (2.25)$$

Burada,

$$t = \frac{\omega_{eff}}{H_{eff}} \quad r = \frac{h_{eff}}{H_{eff}}$$

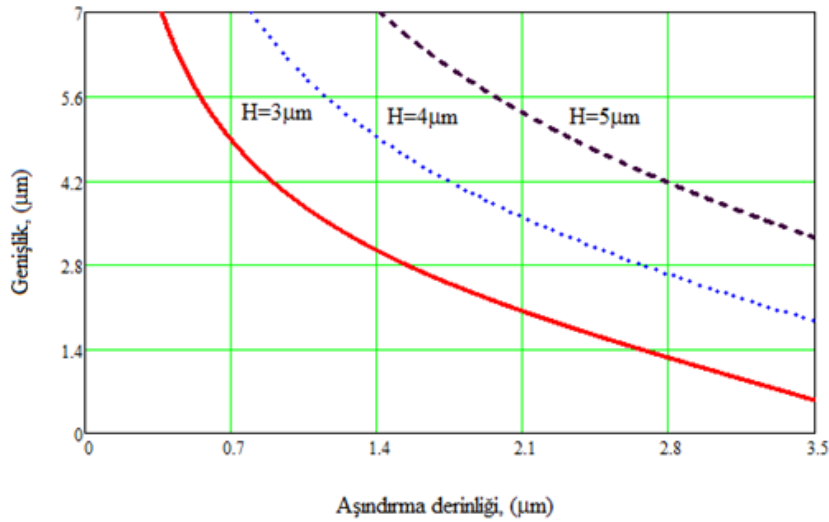
$$h_{eff} = h + q \quad H_{eff} = H + q$$

$$\omega_{eff} = \omega + \frac{2\gamma_c}{k\sqrt{n_f^2 - n_c^2}} \quad q = \frac{\gamma_c}{k\sqrt{n_f^2 - n_c^2}} + \frac{2\gamma_c}{k\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}$$

$$\gamma_{c,s} = 1 \quad TE \text{ kipleri için}$$

$$\gamma_{c,s} = \left(\frac{n_{c,s}}{n_f}\right)^2 \quad TM \text{ kipleri için}$$

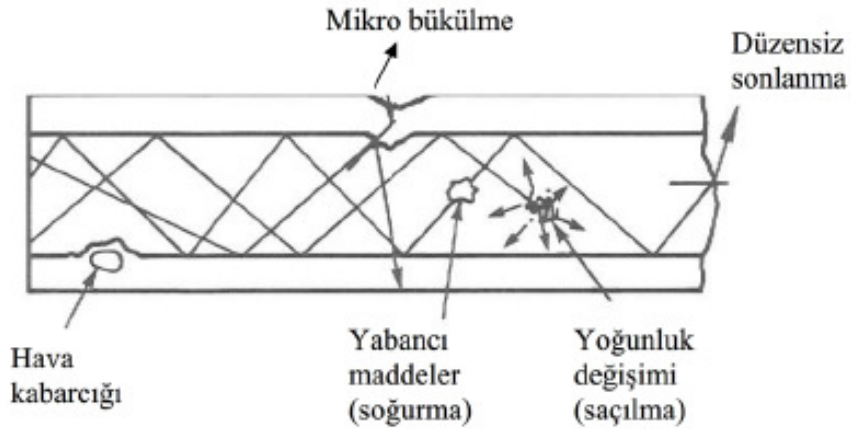
Tek kip şartı kullanılarak, belirlenen dalgakılavuzu yüksekliği için, dalgakılavuzu genişliğinin (W) karşı aşındırma derinliğine (H-h) çizilmiş örnek bir grafik Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Grafiğin altında kalan alan tek kip bölgesini gösterirken üstünde kalan bölge çoklu kip bölgesini gösterir [6].



Şekil 2.10. YÜS dalgakılavuzu için tek kip şartı

2.2. Optik Dalgakılavuzu Kayıpları

Optik dalgakılavuzlarında kayıp, bir fiber optik haberleşme sisteminde bilgi taşıma kapasitesini belirleyen en önemli mekanizmalardan biridir. Başlıca dört çeşit kayıp vardır. Şekil 2.11’de kayıp mekanizmaları görülmektedir. Bunlar saçılma kayıpları, soğurma kayıpları, radyasyon kayıplarıdır.

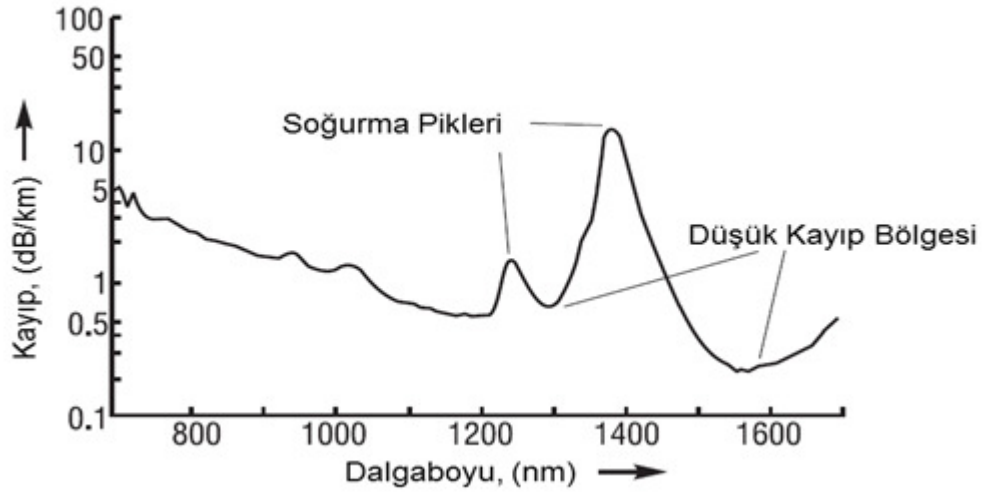


Şekil 2.11. Kayıp mekanizmaları [27]

çıkış gücü P_2 ise desibel olarak güç kaybı (α) aşağıdaki gibi verilir.

$$\alpha (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.26)$$

Silika fiberin, dalgaboyuna göre optik kaybı Şekil 2.11’de verilmiştir. Kayıplar, kısa dalgaboylarında Rayleigh saçılmasından kaynaklanırken uzun dalgaboylarında kızıl ötesi soğurma bantlarından kaynaklanır. 1240 nm ve 1380 nm dalgaboylarında OH^- iyonlarından kaynaklanan iki tane soğurma piki vardır. Şekil 2.11’de görüldüğü gibi iki minimum değer vardır, ilki 1300 nm de fiberlerde 1 dB/km kayba karşılık gelirken, diğeri 1550 nm de 0,2 dB/km en düşük kayba karşılık gelir. Bu iki dalga boyuna aynı zamanda Telekom dalgaboyları da denir. Bu tez çalışmasında 1550 nm dalgaboyunda çalışılmıştır.



Şekil 2.12. Silika fiberde kaybın dalgaboyu bağımlılığı

Saçılma kayıpları

İki çeşit saçılma kaybı vardır, bunlardan biri yüzey saçılma kayıpları diğeri hacim saçılma kayıplarıdır. Hacim saçılma kaybı, dalgakılavuzunun çekirdek tabakası içerisinde ışığın dalgaboyundan çok daha küçük indis dalgalanmalarından kaynaklanan kayıptır. Bu kusur kayıp mekanizmasına çok küçük katkı yapar. Yüzey saçılma kayıpları ise dalgakılavuzunun yüzeyindeki pürüzlerden kaynaklanır, iyi üretim teknikleri ile yüzey saçılma kayıpları en aza düşürülebilir.

Soğurma kayıpları

Fotonlar bir ortamda ilerlerken ortamın elektronları ile etkileşir ve fotonların enerjisi bant aralığından büyükse bu elektronları valans bandından iletkenlik bandına uyarır, böylece fotonun enerjisi azalır. Bu olay şiddetli bir sönmeye neden olur. Bu kaybı engellemek için kullanılan malzeme, çalışılan dalgaboyunda saydam olmalıdır.

Radyasyon kayıpları

Halka ve disk gibi eğri dalgakılavuzlarında, eğriliğin dışında kalan kısım, eğriliğin içinde (çekirdek) kalan kısımdan daha hızlı hareket eder. Bazı kritik yarıçaplarda eğriliğin dışında kalan kısım, ışık hızından daha hızlı hareket eder. Bu olay imkânsız olduğu için bu kritik yarıçapın ötesindeki alan uzaklaşır ve bir ışımaya kip oluşur. Uzaklaşan güç, dalgakılavuzu için bir kayıptır [22].

3. OPTİK YÜS DALGAKILAVUZUN TASARIMI

Bu tez çalışmasında YÜS dalgakılavuzlarının tasarımı, ticari BeamPROP benzeşim programı kullanılarak yapıldı. BeamPROP benzeşim programı, Eş.3.1'de verilen üç boyutlu skaler ve paraksiyel BPM dalga denklemini, verilen sınır şartlarında sonlu farklar yöntemini kullanarak hesaplayan bir programdır.

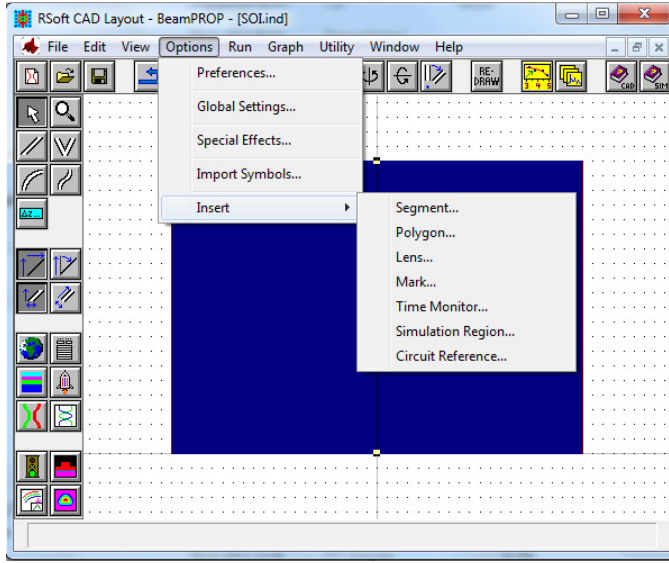
$$2\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} = \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2) u \right] \quad (3.1)$$

Sonlu farklar yönteminde üç yöntem kullanılır. Bunlar, ileri, geri ve merkezi fark yaklaşımlarıdır. Bahsedilen bu üç yöntemde de yapılan ihmallerden dolayı belirli bir hesap hatası mevcuttur. İleri ve geri fark yaklaşımlarında hata birinci dereceden olup h mertebesindedir. Merkezi fark yaklaşımında ise hata ikinci dereceden olup h^2 mertebesindedir [25].

Sonlu farklar yönteminde bu üç yöntem kullanılarak üç farklı yöntem daha geliştirilmiştir. İlki zaman diliminde ileri farkı, uzay diliminde merkezi farkı kullanan açık yöntemdir. Diğer zaman diliminde geri farkı, uzay diliminde merkezi farkı kullanan kapalı yöntemdir. Son olarak dalga denkleminin analizinde kullanılan Crank-Nicolson yöntemidir. Bu yöntem zaman ve uzay diliminde merkezi farkı kullanır. Bunun için ilk olarak bir hesaplama penceresi oluşturulur. Hesaplama penceresi hesaplama zamanını uzatmamak için küçük seçilirken aynı zamanda alandan etkilenmeyecek kadar büyük seçilmelidir [24].

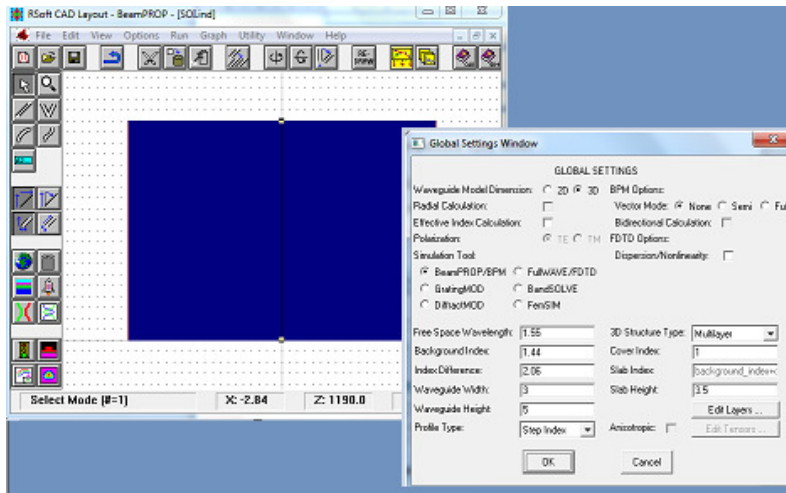
3.1.BeamPROP Benzeşim Programı

BeamPROP benzeşim programı, BPM dalga denklemini çözen ticari bir nümerik programdır. Bu programda dalgakılavuzu tasarlamak için aşağıdaki Şekil 3.1'de görülen açılış ekranında segment seçeneği ile nesne (mavi kısım) oluşturulur.



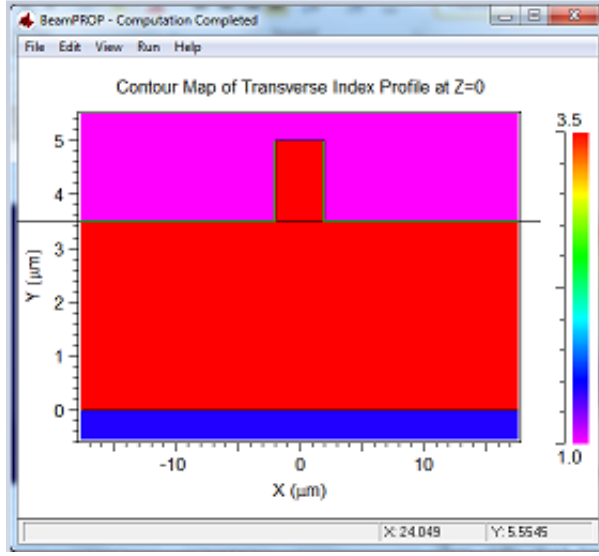
Şekil 3.1. Programının açılış ekranı

Daha sonra aşağıda Şekil 3.2’de gösterilen global setting penceresi ile dalgakılavuzunu oluşturan tabakaların kırılma indisleri, geometrik parametreleri, şekli, çalışılan dalgaboyu gibi ana özellikleri belirlenir.



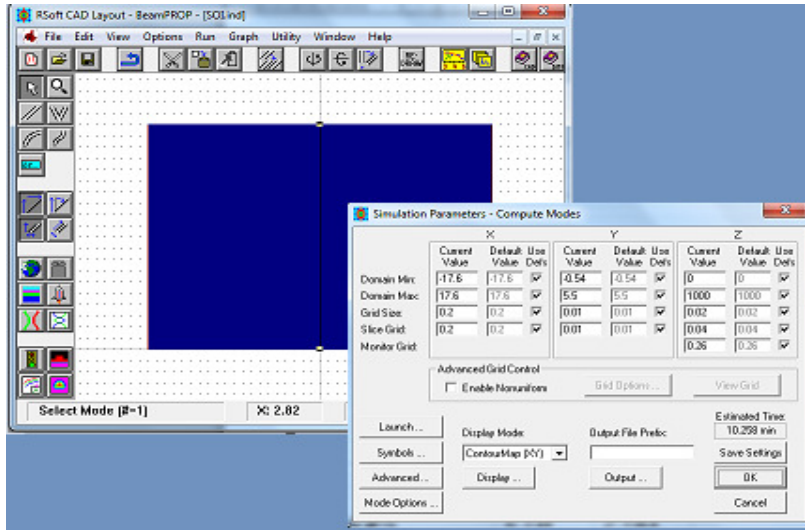
Şekil 3.2. Global setting penceresi

Burada, BPM options olarak none seçildi. Bu seçenek yukarıda anlatılan skaler BPM kullanır ve indis farkı küçük olan yapılar için diğer seçeneklere göre daha iyi sonuç verir. Girilen değerlere göre oluşturulan yapı, XY düzleminde Şekil 3.3’te gösterilen pencere yardımıyla görülebilir.



Şekil 3.3. İndis profili penceresi

Daha sonra Şekil 3.4'te verilen pencere yardımıyla hesaplama penceresinin sınırları belirlenir. Grid büyüklüğü girilir. Grid büyüklüğü ne kadar küçükse hesaplamannın doğruluğu o kadar artar, ancak benzeşim süresi uzar.



Şekil 3.4. Programın hesaplama ekranı

Çizelge 3.1. YÜS dalgakılavuzunun geometrik parametreleri

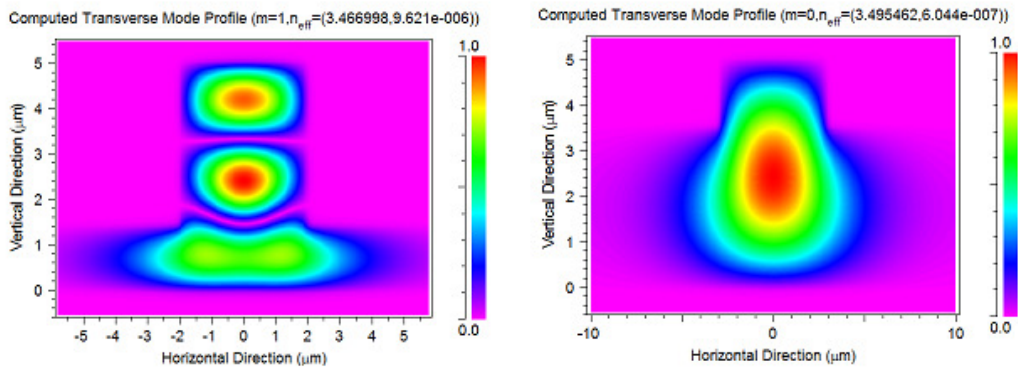
Örnek	Yükseklik (H) (μm)	Genişlik (w) (μm)	Aşındırma Derinliği (h) (μm)	Kip Durumu
Örnek 1	5	3	2,8	Tek kipli
Örnek 2	5	3	1	Tek kipli
Örnek 3	5	3	0,6	Tek kipli
Örnek 4	5	4	3,5	Çok kipli
Örnek 5	4	3	1	Tek kipli
Örnek 6	3	4	0,5	Tek kipli
Örnek 7	3	3	1,8	Çok kipli
Örnek 8	3	3	0,7	Tek kipli

Çizelge 3.1’de verilen kip durumları, Şekil 2.10’da tek kip şartı ile belirlenen geometrik parametreler kullanılarak simülasyon programı yardımıyla belirlendi. Bu sonuçlar temel alınarak YÜS dalgakılavuzunun üretimi yapıldı.

Çizelge 3.2 üretimde kullanılacak tek kipli YÜS dalgakılavuzunun geometrik parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 3.2. YÜS dalgakılavuzunun üretiminde kullanılan parametreler

w = 3 μm	$n_{\text{Si}} = 3,5$ $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$
H = 5 μm	$n_{\text{hava}} = 1$
h = 2,98 μm	$\lambda = 1,55 \mu\text{m}$



Şekil 3.5. Çok kip ve tek kip profilleri

4. OPTİK YÜS DALGAKILAVUZUNUN ÜRETİMİ

Bu bölümünde bir optik YÜS dalgakılavuzunun temel üretim aşamaları anlatıldı. Bunun için sırası ile temizlik, fotolitografi ve aşındırma işlemlerinden bahsedildi. Tüm bu üretim aşamaları, Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü İleri Araştırma Laboratuvarlarında Sınıf-100 temiz oda ortamında gerçekleştirildi.

İlk olarak optik YÜS dalgakılavuzunun şekillerini alttaş üzerine aktarabilmek için ticari tümleşik devre şema çizim programı olan MEMS L-Edit kullanılarak farklı geometrilerde optik YÜS dalgakılavuzlarından oluşan litografik maske tasarlandı. Daha sonra aşağıda belirtilecek aşamalar gerçekleştirildi.

4.1. Fotolitografi

Yukarıda bahsedilen maske üzerinde bulunan cihazın şeklini bir yonga üzerine transfer etmek için fotolitografi yöntemi kullanıldı. Fotolitografi işlemine başlamadan önce Çizelge 4.1’de verilen işlemleri içeren alttaş temizliği yapıldı.

Çizelge 4.1. Alttaş temizliğindeki aşamalar

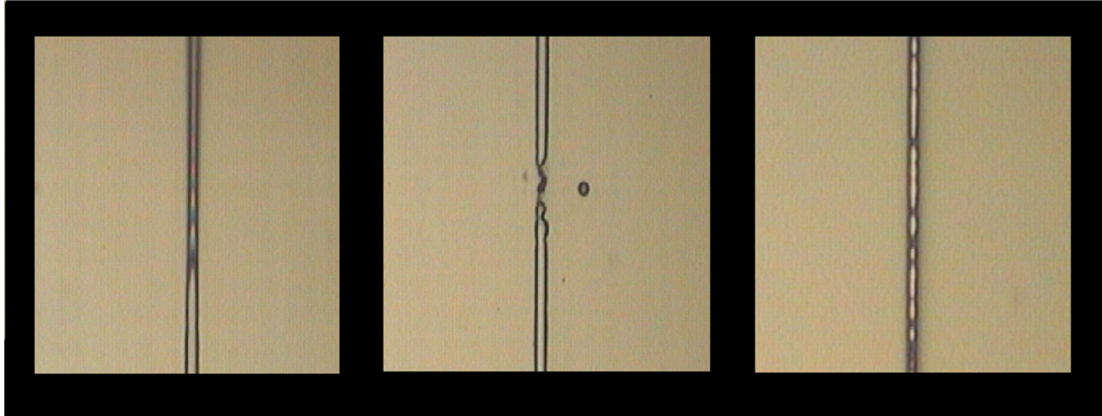
H ₂ SO ₄ (Sülfürik asit) : H ₂ O ₂ (Hidrojen peroksit) = 3:1 → Piranha çözeltisi
DI su ile 2-5 dk yıkama
HF (Hidroflorik asit) (50%) : DI su = 100 : 1
DI(Deiyonize) su ile 2-5 dk yıkama
120 °C’de 5 dk kurutma

Litografi işleminde, ışığa doğrudan maruz kalan bölgelerin kimyası bozulurken ışığa maruz kalmayan bölgelerin kimyası bozulmaz. Bunun için örnek döndürücü (spinner) cihaza (Karl Suss Model SM 120 Spinner) yerleştirildi. Fotorezist (PR) ile örneğin yüzeyinin daha iyi yapışması için yüzeye HMDS (100 % HexaMethylDisilazene) damlatıldı. Örnek 4000 rpm 45 s’de döndürüldü. Bu süre sonunda, tüm yüzeyi kaplayacak biçimde AZ 5214E fotorezist damlatıldı. Aynı rpm

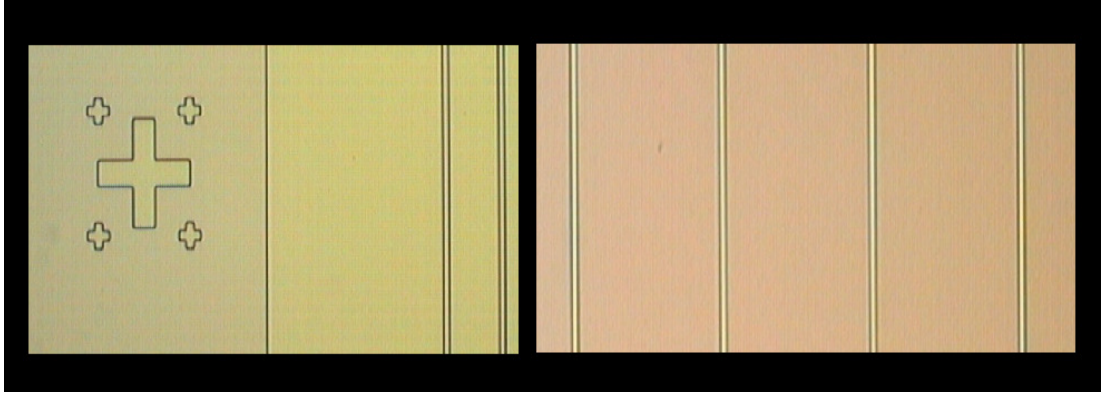
ve süre döndürüldükten sonra 110 °C'de 45 s ısıtıldı. Daha iyi bir litografi için örneğin kenarlarındaki kalın PR, asetonlu bir çubuk veya kenar kaldırmak için özel maskeleme işlemi ile kaldırıldı. Bu işlemler sonunda yaklaşık olarak 1500 nm kalınlığında PR film elde edildi. Üretim boyunca kalınlıkların ölçümü profilometre ile yapıldı (SloanDektak 3030ST SurfaceTexture Analysis System). Bu işlemlerden sonra örnek ve maske, hizalandırıcı cihazına (Karl-Suss MJB-3 HP/200W Mask Aligner) yerleştirildi. Örnek ve maske hizalandıktan sonra örnek 90 s boyunca 3 mW gücünde UV ışığa maruz bırakıldı. Hemen sonra örnek (AZ 400K) KOH:DI su = 1:5 çözeltisine daldırıldı. Böylece UV ışığına maruz kalan bölgeler ortamdaki uzaklaştırıldı ve bol diyonize su ile yıkandı. Daha sonra yüzeyde kalan PR, aşındırma işleminde maske olarak kullanılmak üzere 120 °C'de 2 dk ısıtıldı. Böylece dalgalı yüzeyleri aşındırma işlemi için hazır hale getirildi. Resim 4.1, optimum litografi parametreleri oluşturulmadan önce yapılan litografilerdir. UV ışığına maruz kalma süresi ve KOH:DI çözeltisinde bekleme süreleri değiştirilerek Resim 4.2'de Çizelge 4.2'deki parametreler kullanılarak oluşturulmuş optik mikroskop görüntülerini vermektedir.

Çizelge 4.2. Fotolitografi parametreleri

4000 rpm 45s	→ HMDS (yapışmayı güçlendirici)
4000 rpm 45s	→ AZ 5214E PR
110 °C 45 s	→ Ön ısıtma
3 mW 90 s	→ UV ışıklandırma
40 s	→ KOH :DI su (development)
120 °C 2 dk	→ Sert ısıtma



Resim 4.1. Fotolitografi ile oluşturulmuş bozuk dalgakılavuzların optik mikroskop görüntüleri



Resim 4.2. Fotolitografi ile oluşturulmuş üretilecek dalgakılavuzların optik mikroskop görüntüleri

4.2. Aşındırma

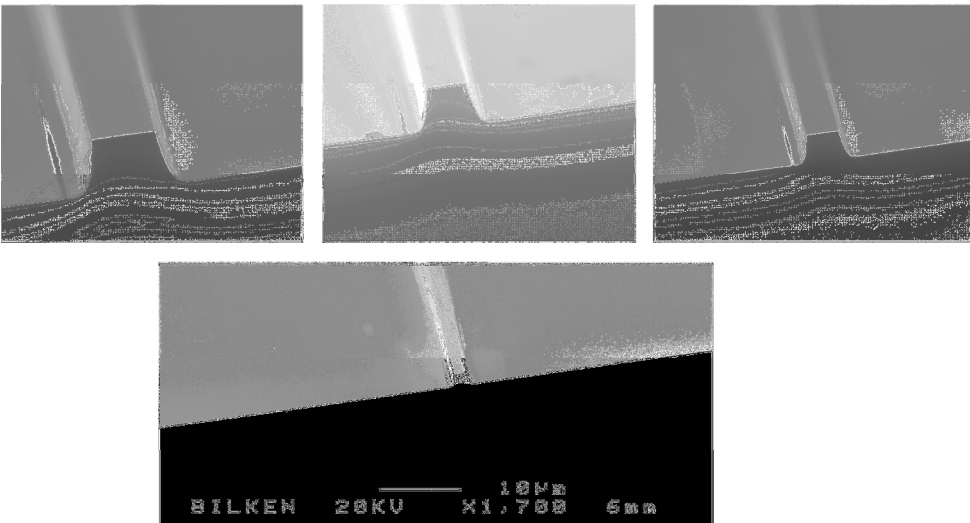
Aşındırma işleminde maskesiz alan istenilen kalınlıkta aşındırılır. Bu aşındırma işlemi reaktif iyon aşındırma (RIE) olarak adlandırılır. Kuru aşındırma anizotropik aşındırma profiline sahiptir. Yani değişik kristal doğrultularında farklı hızlarda aşınma meydana gelir. Islak aşındırma ise plazma ortamında değil kimyasal bir çözeltinin içerisinde gerçekleşir. Aşındırma profili izotropiktir yani kuru aşındırmanın aksine her yöne aşınma gerçekleşir. Resim 4.3, bu çalışma ile yapılan kuru aşındırma örneğinin SEM görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 4.1. Kuru aşındırma cihazı

Çizelge 4.3. Aşındırma parametreleri

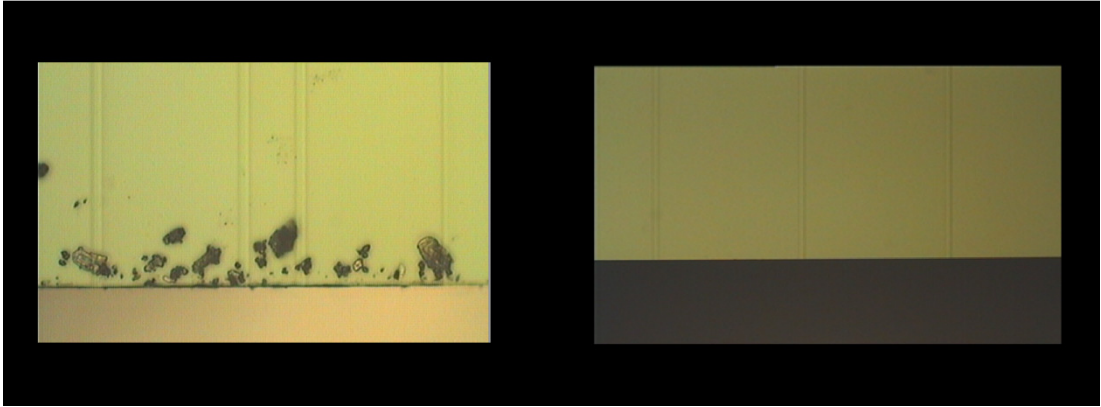
SF ₆	26 sccm
O ₂	7 sscm
Basınç	26 barr
RF Güç	60 W
Süre	30 dk



Resim 4.3. Kuru aşındırma ile aşındırılmış YÜS dalgakılavuzunun SEM görüntüsü

4.3. Ölçüm

Ölçme işlemi basit olarak dalgakılavuzunun bir yüzeyinden gücü bilinen bir ışığın girmesi ve bu gücün dalgakılavuzunun diğer yüzeyinden ölçülmesidir. Kayıp ölçümü için çeşitli teknikler vardır. Bu tez çalışmasında aşağıda daha detaylı anlatılacak olan butt bağlaşım tekniği kullanılmıştır. Ölçüm sonucunda ışığın dalgakılavuzuna giriş kayıplarını ve ışığın dalgakılavuzu içerisinde ilerleme kayıpları ölçülür. Ölçme işlemine başlamadan önce üretilen yongaların ışığın girdiği kısım optik olarak parlatılır.



Resim 4.4. Optik olarak pürüzlü (solda) ve pürüzsüz (sağda) yüzey

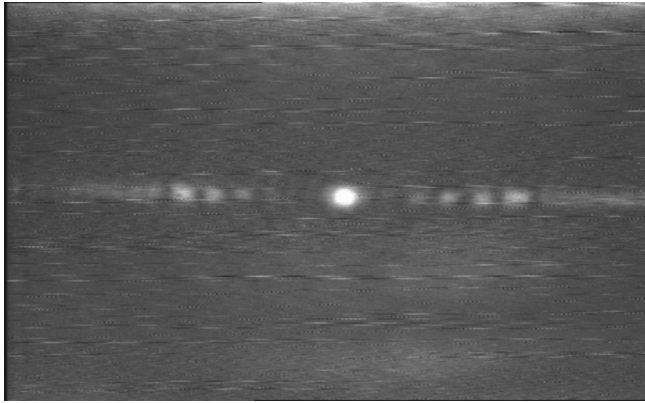
Işık dalgakılavuzuna girerken ve çıkarken bu hasar görmüş yerlerden saçılacağından yüzeyler olabildiğince pürüzsüz olmalıdır. Resim 4.4, düzgün kesilmiş bir dalgakılavuzunu göstermektedir.

YÜS dalgakılavuzlarının optik kayıp karakterizasyonları için cut-back metodu ile butt bağlaşım metodu kullanıldı. Butt bağlaşım tekniğinde yaklaşık 9 μm çapındaki tek kipli fiber dalgakılavuzunun yüzeyine değmeyecek kadar iyice yaklaştırılır. Şekil 4.2, kullanılan ölçüm düzeneğini verir.



Şekil 4.2. Ölçüm düzeneği [15]

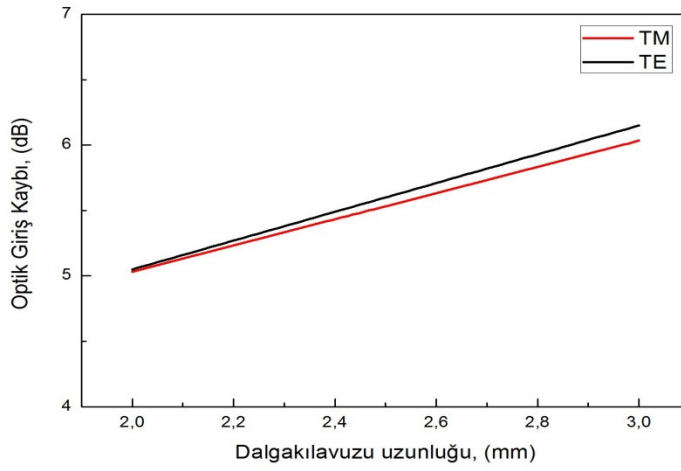
Kızılötesi kamera yardımıyla lazer ışığının yeri belirlenir. Resim 4.5, kameradan alınan tek kip profilini gösterir. Toplam giriş gücünü bulmak için lazer ışığı bir mikroskop objektifine odaklanır ve Ge dedektörü yardımıyla bir optik güçölçer ile doğrudan ölçülür.



Resim 4.5. Kızılötesi kamera ile alınmış tek kip profili

Bu işlem ölçülecek her parça için tekrarlanır. Kesilmiş her örnek üzerindeki 5-10 dalgakılavuzundan, çıkış gücü ölçülür. Her bir uzunluk için alınan ölçümlerin ortalaması alınır. Bu ortalamalar dB (desibel) cinsinden ölçülür. Bu ölçüm sonuçları, optik giriş kaybını verecektir. Giriş kaybını, fiberin giriş ve çıkışta dalgakılavuzuna bağlaırken oluşan kayıplar ile dalgakılavuzunun içerisinde ilerleme kayıplarını

içermektedir. Giriş kaybı değerleri her bir dalgakılavuzunun uzunluğunun fonksiyonu olarak çizilirse, grafiğin eğimi, ilerleme kaybının verirken y eksenini kestiği nokta ise giriş kaybını verir.



Şekil 4.3. Tek kipli YÜS dalgakılavuzunun optik giriş kayıpları

Grafiğe göre tek kipli YÜS dalgakılavuzunu optik ilerleme kayıpları TE ve TM kutuplanmaları için sırasıyla 2,5 dB/mm ve 2,8 dB/mm dir. Optik giriş kaybı ise her iki kutuplanma için 4,9 dB'dir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde elektronik iletişim endüstrisinde çok sayıda önemli değişimler meydana gelmektedir. Ses, veri ve görüntü iletişimindeki olağanüstü artış, daha ekonomik ve daha geniş kapasiteli iletişim sistemlerine olan talebin de aynı şekilde artmasına neden olmuştur. Bu da elektronik iletişim endüstrisinde hızlı, köklü ve nitelikli değişime yol açmıştır. Tümüleşik optik uygulamalar için en genel çerçevede malzemenin yüksek şeffaflığa, kolay işlenebilirliğe, yüksek fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal kararlılığa sahip olması gerekmektedir. Silikon alttaş üzerine yüksek optik kaliteye sahip ince filmlerin fabrikasyonu ve çeşitli büyütme teknikleri 80'li yılların sonundan beri gelişmektedir.

Bu tez çalışması, tek kipli yalıtkan üstü silikon dalgakılavuzunun tasarımı, üretimi ve kayıplarının belirlenmesi üzerine temellenmektedir. Tasarım için Işın İlerleme Metoduna (BPM) yöntemine dayalı nümerik benzeştirmeler kullanıldı. Üretimde geleneksel üretim aşamaları kullanılarak tek kipli sırt dalgakılavuzu yapıldı. Daha sonra kurulan ölçüm düzeneği ile kayıp tayini yapıldı. YÜS dalgakılavuzlarının optik giriş ve ilerleme kayıpları cut-back metodu kullanılarak ölçüldü. YÜS dalgakılavuzunun optik giriş kaybı, TE ve TM polarizasyonlar için 4,9 dB olarak tespit edildi. Tek kipli YÜS dalgakılavuzunu optik ilerleme kayıpları TE ve TM polarizasyonlar için sırasıyla 2,5 dB/mm ve 2,8 dB/mm olarak ölçüldü.

Ölçüm aşamasında kullanılan fiber kablonun çekirdek çapının 9 μm olması, projede üretilen YÜS dalgakılavuzlarının genişliklerinin 3 μm olması 4,9 dB'lik optik giriş kaybına yol açmıştır. İleriki çalışmalarda çekirdek çapı daha küçük özel fiber kablolar temin edilerek optik giriş kaybının minimize edilmesi sağlanacaktır. Diğer yandan, bu geometride daha pürüzsüz yan duvarlara sahip dalgakılavuzu elde edilmesi halinde, optik ilerleme kaybının 2,5 dB/mm den 1-1,5 dB/mm ye düşmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Jalali B., Yegnanarayanan S., Yoon T., Yashimoto T., Rendina I., and Copping F. "Advances in Silicon-on-Insulator Optoelectronics", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 4:6 (1998).
2. Soref R.A., Namavar F. and Lorenzo J.P. "Optical Waveguiding in a Single-Crystal Layer of Germanium Silicon Grown on Silicon", *Optics Letters*, 15:270, (1990).
3. Miya T. "Silica-Based Planar Lightwave Circuits: Passive and Thermally Active Devices", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6:1, (2000).
4. Germann R., Salamink H.W.M., Beyeler R., Bona G. L., Horst F., Massarek I. And Offrein B.J. "Silicon-Oxynitride Layers for Optical Waveguide Applications", *IBM Research Report, Engineering and Technology, RZ*, 3102:93147, (1999).
5. Ay F., Aydınli A. and Agan S. "Low-Loss as-Grown Germano Silicate Layers for Optical Waveguides", *Applied Physics Letters*, 83:4743 (2003).
6. Kiyat I. "Monolithic and Hybrid Silicon on Insulator Integrated Optical Devices" Doktora Tezi, *Bilkent Üni. Fen Bilimleri Enst.*, (2005).
7. Espinola R.L., Tsai M.C., Yardley J.T., and Osgood R.M.Jr. "Fast and Low-Power Thermo Optic Switch on Thin Silicon-on-Insulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15:10 (2003).
8. Bruel M. "Silicon on Insulator Material Technology ", *Electronics Letters*, 31:14, (1995).
9. Rickman G., Reed G.T. "Silicon-on-Insulator Optical Rib Waveguides; Loss, Mode Characteristics, Bends and Y-junctions", *IEEE Proc.-Optoelectronics*, 141:6, (1994).
10. Trinh P.D. Yegnanarayanan S.,Jalali B. "Integrated Optical Directional Couplers in Silicon-on-Insulator", *Electronics Letters*, 31:24, (1995).
11. Kiyat I., Aydınli A. and Dağlı N. "High-Q Silicon-on-Insulator Optical Rib Waveguide Racetrack Resonators", *Optics Express*, 13(6):1900-1905 (2005).
12. S. Hsu, "A Simple Optical Interconnection Integrated Low Birefringence Silicon on Insulator Waveguide", *in Proc. CLEO/Pacific Rim Aug.*, 27(31):1-3 (2007).

13. Jones T.B., Hochberg M., Walker C. and Scherer A., ‘‘High Q Optical Resonators in Silicon on Insulator Based Slot Waveguides’’, *Appl. Phys. Lett.*, 86:081101–1-3, (2005).
14. Gardner D.S., Brongersma M.L., ‘‘Microring and Microdisk Optical Resonators Using Silicon Nanocrystals and Erbium Prepared Using Silicon Technology’’, *Opt. Materials* 27: 804–811, (2005).
15. Ay F., ‘‘Silicon Based Dielectrics: Growth, Characterization and Applications in Integrated Optics’’, Doktora Tezi, *Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
16. Kıyat I., Aydınlı A., and Dağlı N., ‘‘High Q Silicon-on Insulator Optical Rib Waveguide Racetrack Resonators’’, *Opt. Express*, 13(6):1900-1905, (2005).
17. Nawrocka M.S., Liu T., Wang X. and Panepucci R.R., ‘‘Tunable Silicon Microring Resonator with Wide Free Spectral Range’’, *Applied Physics Letters*, 89:071110-1-3, (2006).
18. Kıyat İ., Aydınlı A., Dağlı N., ‘‘Low-Power Thermo Optical Tuning of SOI Resonator Switch’’, *IEEE Photonics Technol. Letters*, 18(2):364-366, (2006).
19. Barrios C.A., ‘‘Ultra Sensitive Nanomechanical Photonic Sensor Based on Horizontal Slot Waveguide Resonator’’, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 18(22): 2419-2421 (2006).
20. Lee M.-C. M., Wu M.C., Tunable Coupling Regimes of Silicon Microdisk Resonators Using MEMS Actuators’’, *Opt. Express*, 14(11): 4703-4712 (2006).
21. Tee C.W., Williams K.A. iPenty R.V., White I.H., ‘‘Fabrication Tolerant Active-Passive Integration Scheme for Vertically Coupled Microring Resonator’’, *IEEE J. Select Topics Quantum Electron*, 12:108-116 (2006).
22. Aras F.G., ‘‘Optik Ekle-Çıkar Çoklayıcı Tasarımı’’, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
23. Pollock C.R., ‘‘Fundamentals of Optoelectronics’’, *Richard D. IRWIN Inc*, ISBN 0-256-10104-3, USA (1995).
24. Coldren L.A. and Corzine S.W., ‘‘Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits’’, *John Wiley & Sons*, USA (1995).
25. Arı N., Özen Ş., Çolak Ö.H., Teşneli A., ‘‘Elektromanyetikte Sonlu Farklar Metodu’’, *Palme Yayıncılık*, Ankara (2008).
26. Okamoto K., ‘‘Fundamentals of Optical Waveguides’’, *Elsevier Inc*, ISBN 13: 978-0-12-525096-2, UK, (2006).

27. Krohn D.A., ‘‘Fiber Optic Sensors-Fundamentals and Applications’’, *ISA*, ISBN 13: 9781556170102, (1992).
28. Hofrichter J., Raz O., La Porta A., Morf T., ‘‘A Low-Powerhigh-Speed InP Microdisk Modulator Heterogeneously Integrated on a SOI Waveguide’’, *Optics Express*, 20(9): 9363-9370 (2012).
29. Dazeng F., Shirong L., Hong L., Joan F., Bhavin B., ‘‘High Speed GeSi Electro-Absorption Modulator at 1550 nm Wavelength on SOI Waveguide’’, *Optics Express*, 20(20):22224-22232 (2012).
30. Guoliang L., Jin Y., Attila M., Xuezhe Z., ‘‘Ultra Low-Loss, High-Density SOI Optical Waveguide Routing for Macrochip Interconnects’’, *Optics Express*, 20(11): 12035-12039 (2012).

EKLER

EK – 1 Tezde kullanılan simülasyon programının kod dosyası

```
alpha = 0
background_index = 1.44
bc_type = BC_STBC
boundary_max = 10
boundary_min = -10
color_scale = 0
color_surface = 0
cover_index = 1
delta = 2.06
dimension = 3
eim = 0
free_space_wavelength = 1.55
height = 5
index_display_mode = DISPLAY_CONTOURMAPXY
index_min = 1
index_shades = 250
k0 = (2*pi)/free_space_wavelength
mode_method = 0
most_prefix = mosttmp
most_progressive_scan_interval = 10
most_progressive_scan_plots = 0
profile_type = PROF_STEPINDEX
scan_mode_set = 0-2
scan_notify_most_count = 1
scan_run_option = 2
sim_tool = ST_BEAMPROP
slab_height = 3.5
slice_display_mode = DISPLAY_CONTOURMAPXY
structure = STRUCT_MULTILAYER
vector = 0
width = 3
layer_table 0
    height_1 = 5
    index_1 = 3.5
endlayer_table
scan_info 1
    variable = slab_height
    start = 2.5
    finish = 3.5
    increment = 0.1
```

EK-1. (Devam)Tezde kullanılan simülasyon programının kod dosyası

```

        scanprefix = soi
        metaprefix = soi
endscan_info
segment 1
    begin.x = 0
    begin.z = 0
    begin.width = 3
    end.x = 0 relbeginsegment 1
    end.z = 2000 relbeginsegment 1
    end.width = 3
endsegment
launch_field 1
    launch_pathway = 1
    launch_type = LAUNCH_WGMODE
    launch_tilt = 0
    launch_mode = 0
    launch_mode_radial = 1
endlaunch_field
text_block 1
    name = MOST
    text =
RSScanOptFormat1

[MODE]
SCAN

PREFIX mosttmp
PREFIX_STYLE 0
CLUSTER 0 0 0 0 1 ""

[SIMULATION]
SIMTOOL ST_BEAMPROP
WINDOW_SIZE 0
VERBOSITY 0
PRE_WHOLE_CMD
POST_WHOLE_CMD
PRE_CMD
POST_CMD
PREPOST_ACTIVE 0

```

EK – 1. (Devam) Tezde kullanılan simülasyon programının kod dosyası

```
PREPOST_ERRCODES 0
```

```
[ALGORITHM]
```

```
NAME root_1d_brent
```

```
MAXSTEPS DEFAULT 1000
```

```
CONVERGENCE DEFAULT 1.0e-7
```

```
[INDEPENDENT_VARIABLES_SCAN]
```

```
IV_Declarations
```

```
SYMTAB_SCALAR free_space_wavelengthY : IV_LINEAR_STEPS :
```

```
0.775 : 1.6 : 0.0825 : 11 : : :
```

```
[INDEPENDENT_VARIABLES_OPT]
```

```
IV_Declarations
```

```
IV_InitialValues
```

```
[MEASUREMENTS]
```

```
STANDARD bp_mon_1_last Y
```

```
[METRICS]
```

```
endtext
```

```
endtext_block
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :Aras, Özgür
Uyruğu :T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 15.02.1980 Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (554) 918 54 73
Faks : 0 (312) 202 37 10
e-mail : ozguraras@outlook.com

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /İleri Teknolojiler	2013
Lisans	Niğde Üniversitesi/ Fizik	2004
Lise	Aydınlıkevler Ticaret Mes. Lisesi	1997

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Hobiler

Model uçak, sinema, piyano.