Silisyum Tabanlı Fotonik Yapılarda Elektromanyetik Dalga Yayılımının İncelenmesi

İbrahim KUNDUZ

YÜKSEK LİSANS

Fizik Anabilim Dalı

Mayıs 2024

Investigation of Electromagnetics Wave Propogation in Silicium-Based Photonic Structures

İbrahim KUNDUZ

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

May 2024

Silisyum Tabanlı Fotonik Yapılarda Elektromanyetik Dalga Yayılımının İncelenmesi

İbrahim KUNDUZ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Genel Fizik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇETİN

Mayıs 2024

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Genel Fizik Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İbrahim KUNDUZ'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Silisyum Tabanlı Fotonik Yapılarda Elektromanyetik Dalga Yayılımının İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇETİN

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇETİN
Üye: Prof. Dr. Hamza Yaşar OCAK
Üye: Doç. Dr. Mustafa AKARSU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ……..…….. tarih ve ……..…… sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Ali Çetin danışmanlığında hazırlamış olduğum "Silisyum Tabanlı Fotonik Yapılarda Elektromanyetik Dalga Yayılımının İncelenmesi" başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 09/05/2024

İbrahim KUNDUZ

İmza

ÖZET

Fotonik yapılar ve elektromanyetik dalga yayılımı üzerine yapılan araştırmalar, optik iletişimden biyomedikal görüntüleme sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesini kapsamaktadır. Bu çalışma, silisyum tabanlı fotonik yapılarda elektromanyetik dalgaların yayılımını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada Maxwell denklemleri ve fotonik yapıların temel prensipleri ele alınarak, elektromanyetik dalga davranışının matematiksel analizi yapılmıştır.

Kırılma indisi, fotonik malzemelerin temel bir özelliğidir ve ışığın malzeme içindeki yolunu belirler. Sıcaklık, yabancı madde katkısı ve ortam değişikliği gibi parametreler kırılma indisini etkilemesi nedeniyle silisyum tabanlı fotonik yapıların optik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu faktörlerin anlaşılması, fotonik yapıların tasarımı ve uygulamaları açısından önemli bir adımdır. Bu çalışmada, Snell Kırılma Yasası, Sellmeier Denklemi, Fresnel Denklemleri ve Brewster Açısı gibi matematiksel araçlar kullanılarak kırılma indisine etki eden faktörler incelenmiştir. Ayrıca verileri detaylı analiz edebilmek amacıyla Python programla dili kullanılarak grafikler üretilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma silisyum tabanlı fotonik yapılarda elektromanyetik dalgaların yayılımı üzerine derinlemesine bir analiz sunmaktadır. Bu analizler, fotonik malzemelerin geliştirilmesi, optik iletişim sistemlerinin optimize edilmesi ve yeni nesil optik cihazların mühendisliği açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Bulgular, fotonik yapıların geometrisi, malzemesi ve yabancı madde katkısının elektromanyetik dalga yayılımı üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Kırılma indisine etki eden faktörlerin ayrıntılı analizi, fotonik yapıların tasarımı ve uygulamaları için kritik bir yol haritası sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dispersiyon, Elektromanyetik Dalga, Fotonik Yapı, Kırılma İndisi, Silisyum.

SUMMARY

Research on photonic structures and electromagnetic wave propagation covers a wide range of applications from optical communications to biomedical imaging systems. This study aims to investigate the propagation of electromagnetic waves in silicium-based photonic structures. A mathematical analysis of the electromagnetic wave behaviour is performed by considering Maxwell's equations and the basic principles of photonic structures.

Refractive index is a fundamental property of photonic materials and that determines the path of light through the material. Factors such as temperature, impurity doping and medium difference can change the optical properties of silicium-based photonic structures due to their effect on the refractive index. Understanding these factors is an important step in the design and application of photonic structures. In this study, the factors affect on the refractive index were investigated using mathematical tools such as Snell's Law of Refraction, Sellmeier's Equation, Fresnel Equations and Brewster's Angle. In addition, in order to analyse the data in detail, graphs were drawn using Python programming language.

In conclusion, this study presents an in-depth analysis of the propagation of electromagnetic waves in silicium-based photonic structures. These analyses provide important insights for the development of photonic materials, optimisation of optical communication systems and engineering of next generation optical devices. The findings clearly demonstrate the effects of the geometry, material and impurity doping of photonic structures on electromagnetic wave propagation. The detailed investigation of the factors affect on the refractive index provides a critical roadmap for the design and applications of photonic structures.

Keywords: Dispersion, Electromagnetic Wave, Photonic Structure, Refractive Index, Silicium.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı tamamlama sürecimde bana bilgi, deneyim ve hoş görüsüyle her zaman destek olan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte yaşadığım iyi ve kötü anlarda, özellikle motivasyonumun düştüğü zamanlarda manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Hatice'ye, bu süreçte dünyaya gelen ve yaşam kaynağımız olan oğlum Çağan'a ve her zaman arkamda duran sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiv**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **3**
2.1. Işık Teorisi 3
2.1.1. Geometrik optik 4
2.1.2. Dalga optiği 5
2.1.3. Foton teorisi ve kuantum optik 5
2.2. Maxwell Denklemlerinin Tarihçesi 6
2.2.1. Elektromanyetik teorinin evrimi ve Maxwell denklemleri 6
3. MAXWELL DENKLEMLERİ **8**
3.1. Maxwell Denklemlerinin Matematiksel Gösterimi ve Temel Özellikleri 8
3.1.1. Gauss yasası (Elektrik Alan İçin) 9
3.1.2. Gauss yasası (Manyetik Alan İçin) 10
3.1.3. Faraday yasası 10
3.1.4. Ampere yasası 11
4.TEORİK BİLGİ **13**
4.1. Optik Dalga Kılavuzları ve Fotonik Yapıların Genel Tanımı 13
4.1.1. Işığın lokalizasyonu 14
4.1.2. Kendiliğinden yayınımın kontrolü 15
4.1.3. Yeni optik cihazların mühendisliği 15
4.2. Fotonik Yapıların Optik Özellikleri 15
4.3. Silisyum Tabanlı Fotonik Yapılar 16
4.4. Elektromanyetik Dalgaların Fotonik Yapılarda Yayınımı 17
5. OPTİK MALZEMELERDE KIRILMA İNDİSİ **18**
5.1. Kırılma İndisinin Tanımı 18

İÇİNDEKİLER

Sayfa

5.2. Kırılma İndisinin Matematiksel Hesaplanması ... 18
5.2.1. Snell kırılma yasası ... 19
5.2.1.1. Snell yasasının matematiksel formu ... 20
5.2.1.2. Snell kırılma yasası için bir örnek ... 21
5.2.2. Sellmeier denklemi ... 23
5.2.2.1 Sellmeier denkleminin matematiksel formu ... 23
5.2.2.2 Sellmeier denklemi grafiği ... 24
5.2.2.3 Sellmeier denkleminin silisyum elementi özelinde çözümü ... 24
5.2.2.4. Silisyum için Sellmeier denklemi çözüm grafiği ... 25
5.2.2.5. Silisyum Dioksit (SiO2) için Sellmeier denklemi çözüm grafiği ... 26
5.2.2.6. Sellmeier denklemi kullanılarak farklı malzemeler için kırılma indisi değişim grafiği ... 26
5.2.3. Fresnel denklemleri ... 26
5.2.3.1. Maxwell denklemleri kullanılarak Fresnel denkleminin elde edilmesi ... 27
5.2.3.2. İç ve dış yansıma ile ilgili açıklamalar ... 28
5.2.3.3. Silisyum-silisyum dioksit için Fresnel denkleminin çözümü ... 29
5.2.4. Brewster açısı ... 31
5.2.4.1. Brewster açısının matematiksel formu ... 32
5.2.4.2. Silisyum-silisyum dioksit malzemesi için Brewster açısının hesaplanması ... 33

6. SİLİSYUM TABANLI OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA ELEKTROMANYETİK DALGA YAYINIMI ... 34

6.1. Maxwell Denklemleri Kullanılarak Elektromanyetik Dalga Denklemi Türetimi ... 34
6.2. Silisyum Bazlı Fotonik Yapılarda Elektromanyetik Dalga Davranışının Matematiksel Analizi ve Sayısal İncelenmesi ... 37
6.3. Silisyum Elementinin İçerisinde Katkılanan farklı Maddelerin Kırılma İndisine Etkisinin İncelenmesi ... 39
6.4. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Kırılma İndisi, Grup Hızı ve Grup Hızı Dağılımının İncelenmesi ... 40

7. BULGULAR VE TARTIŞMA ... 42

7.1. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Kırılma İndisi Değişimi ... 42
7.2. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Grup Hızı Değişimi ... 43
7.3. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Grup Hızı Dağılımı ... 44

8. SONUÇ VE ÖNERİLER ... 45

KAYNAKLAR DİZİNİ ... 47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1. 1. Silisyum elementi 1
5. 1. Snell yasasını gösteren örnek bir grafik ($n2 > n1$) 20
5. 2. Silisyumdan hava ortamına geçiş grafiği 21
5. 3. Silisyumdan hava ortamına geçiş grafiği (Geliş açısı $\theta 1 = 15° \, için$) 22
5. 4. Sellmeier denklemi kırılma indisi grafiği 24
5. 5. Silisyum için kırılma indisi değişimi grafiği 25
5. 6. Silisyum dioksit için kırılma indisi değişimi grafiği 26
5. 7. Farklı malzemeler için kırılma indisi değişimi grafiği 26
5. 8. Hava ve cam ortamları için Fresnel denklemi grafiği 28
5. 9. Silisyum-silisyum dioksit için iç ve dış yansıma grafiği 30
5. 10. Titanyum-titanyum dioksit için iç ve dış yansıma grafiği 31
6. 1. Dalga denklemi çözüm grafiği 38
6. 2. Katkı maddelerinin kırılma indisine etkisi 39
7. 1. Silisyum kırılma indisinin dalga boyuna göre değişimi 42
7. 2. Silisyum için dalga boyuna bağlı grup hızı değişimi 43
7. 3. Silisyum için dalga boyuna bağlı grup hızı dağılımı 44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

5. 1. Silisyumun dalga boyuna bağlı kırılma indisi değişim değerleri 25

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
$\vec{\nabla}$	Nabla operatörü
n	Optik kırılma indisi
c	Işığın boşluktaki hızı
v	Işığın malzeme içerisindeki hızı
θ_c	Kritik açı
Bj	Malzeme sabiti
Cj	Malzeme sabiti
Dj	Malzeme sabiti
ε	Permitivite sabiti
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
$\vec{\mathrm{B}}$	Manyetik alan vektörü
$\vec{H}$	Manyetik alan yoğunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik
r	Yansıma katsayısı
t	İletim katsayısı
E_r	Yansıyan ışığın siddeti
E_i	Gelen ışığın şiddeti
θ_i	Gelen ışığın gelme açısı
θ_r	Yansıyan ışığın yansıma açısı
θ_{B}	Brewster açısı
θ_{t}	Çıkış açısı
D	Elektriksel polarizasyon
μ	Ortamın manyetik geçirgenliği
σ	Ortamın iletkenliği
nm	Nanometre
mm	Mikrometre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
k_0	Malzeme sabiti
x_0	Malzeme sabiti
b	Malzeme sabiti
ω	Açısal frekans
ϑ_g	Grup hızı

Kısaltmalar	**Açıklama**
SOI	Silicon on Insulator
SiO_2	Silisyum dioksit
FDTD	Sonlu fark zaman alanı yöntemi
EMK	Elektromotor kuvvet
3D	3 boyutlu
LED	Light emitting diode
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
MEMS	Silisyum fotonik mikro elektromekanik sistemler
SHG	İkinci harmonik üretimi
THG	Üçüncü harmonik üretimi
F	Flor
GeO_2	Germanyum dioksit
P_2O_5	Fosfor pentoksit
B_2O_3	Bor trioksit
NaYF_4	Sodium yttrium fluoride
GaN	Gallium nitride
GVD	Grup hız dağılımı
GH	Grup hızı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Silisyum tabanlı fotonik yapılarda elektromanyetik dalga yayınımının incelenmesi, fotonik ve malzeme biliminde önemli bir araştırma alanıdır. Silisyum, çok çeşitli fotonik cihazların oluşturulabilmesi için mükemmel bir malzeme olarak tanımlanmıştır (Berciano vd., 2018). Silisyum tabanlı fotonik teknolojilerin geliştirilmesi, kısa menzilli veri iletişimi için ticari ürünlerin kullanılabilirliğine yol açmıştır (Yamada, 2015). Bununla birlikte, silisyumun yapısındaki dolaylı bant aralığı ve merkez simetrisi gibi silisyum fotonik yapılar ile ilgili sorunlar vardır. Bu sorunlar, ışımayı engeller ve ikinci dereceden doğrusal olmayan optik işlevleri ortadan kaldırır (Zhang vd., 2015). Bu sorunları çözmek için bir dizi araştırma yapılarak, yalıtkan malzemeler üzerinde silisyum (SOI) fotonik yapıların tasarımını ve üretimini incelenmiştir (Huang vd., 2021). Ayrıca, silisyum-organik, hibrit entegre, fotonik kristal modülatörler gibi hibrit yapılarda silisyum kullanımının geniş bant elektromanyetik dalga tespiti için kullanılması araştırılmıştır (Zhang vd., 2015).



Şekil 1. 1. Silisyum elementi

Şekil. 1.1'de görülen silisyum elementi yer kabuğunun % 25 'ini oluşturan oksijenden sonra en yaygın olan elementtir. Silisyum dioksit (SiO_2), kuvars veya silis olarak bilinir ve genellikle oksijenle bileşik oluşturur. Kristal yapısı elması andırır ve çok sert bir elementtir (Güneş ve Özkan, 2013).

Silisyum tabanlı fotonik yapılarda elektromanyetik dalga yayınımını incelemek, malzemelerin özelliklerini, cihazların tasarımını, üretimini, algılama ve iletişim uygulamalarını içeren çok çeşitli araştırma alanlarını kapsamaktadır. Silisyum tabanlı fotonik yapıların özellikleri, bu çalışmalarla fotonik ve malzeme biliminde ilerleme sağlar.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Işık Teorisi

Optik, ışığın yapı ve temel ilkelerini inceler. Fizeau deneyi ve Michelson-Morley deneyi gibi çeşitli optik deneyler, geleneksel özel görelilik teorisini destekler (Dong ve Jun, 2021). Özel göreliliğin temel ilkeleri üzerinde etkisi olabilecek değişken bir ışık hızının tanıtılması da dahil olmak üzere, bu teoride modifikasyon için öneriler vardır (Magueijo ve Smolin, 2002; Magueijo, 2003).

Çift yarık deneyi, ışığın dalga-parçacık ikilemi konusunda çelişkili yorumlara neden olmuştur. Tarih boyunca, bu deney, ışığın hem dalga teorisini hem de dalga-parçacık ikilemini destekleyen bulgular ortaya koymuş olsa da, daha sonraki deneyler, ışığın ekrana çarpmadan önce parçacık gibi davrandığını göstererek dalga tanımı ve yörünge teorisine meydan okumuştur (Dutt vd., 2021; Peng, 2022). Bu sonuçlar, çift yarık deneylerinin dalga yorumlarına dair bütünlük konusunda soru işaretleri ortaya çıkarmıştır (Peng, 2022).

Ayrıca ışık hızının genişleyen evrende sıcaklıkla nasıl değişebileceği konusunda tartışmalar olmuştur. Bu tartışmalar, ışık hızının daha önce tahmin edildiği kadar sabit olmayabileceğini göstermektedir (Nassif ve Faria, 2012). Bu iddialar, ışığın farklı fiziksel durumlarda nasıl davrandığını anlamamızı etkiler.

Sonuç olarak, ışığın davranışını ve yayılmasını belirleyen temel prensipler tartışmaların odak noktası olmuştur. Geleneksel teoriler, özellikle özel görelilik teorisi gibi, tarihsel optik deneylerle desteklenirken, yeni önermeler ve deneysel bulgular, özellikle ışık hızının sabitliği ve dalga-parçacık ikilemi konularında, bu prensiplerin evrenselliğine meydan okumaktadır.

2.1.1. Geometrik optik

Kuantum mekaniğinden akışkanlar mekaniğine ve kozmolojiye kadar uzanan uygulamalarıyla geometrik optik, fizikte temel bir kavramdır (Cohen vd., 2019). Yüksek enerji fiziği, parçacık fiziği, optik ve yoğun madde fiziği gibi çok çeşitli alanlarda önemli araştırmalar içerir (Gürel vd., 2016).

Periyodik yapıların (örneğin X-ışını floresanı) teori ve deney arasında bir uyum sağladığı noktalarda geometrik optik yaklaşım kullanılır (Nowak vd., 2015; Nowak vd., 2014). Geometrik konsantrasyon oranını optimize etmek ve cihazların kalınlığını en aza indirmek için geometrik ve kırınım optiği kombinasyonu da kullanılmıştır. Bu, geometrik optik ilkelerinin pratik etkilerini göstermektedir (Jong vd., 2016).

Ayrıca geometrik optiğin teorik yönleri derinlemesine incelenmiştir. Geleneksel geometrik optik kırınımsız dalga alanları ile ilgilidir ve ışığın dalga boyunun yok olduğu sınırda bulunur (Kravtsov ve Berczyński, 2007; Sluijter vd., 2010). Üç boyutlu doğrusal olmayan fotonik kristallerin üretimindeki ilerlemeler, geometrik fazlara dayalı yeni doğrusal olmayan optik uygulamalar için yeni fırsatlar sunmuştur. Bu gelişmeler, geometrik optiğin modern fizik araştırmalarındaki önemini daha da artırmıştır (Karnieli vd., 2021).

Geometrik faz, kuantum mekaniği bağlamında tek foton interferometrisi kullanılarak karışık durumlar için ölçülmüştür. Bu, geometrik optik ilkelerinin kuantum hesaplama ve kuantum bilgi işlemede kullanılabilirliğini göstermiştir (Ericsson vd., 2005; Ericsson, 2004).

Geometrik optik, eğitim ve deneysel uygulamalardan teorik gelişmelere ve kuantum bilgi işlemeye kadar fiziğin çeşitli alanlarında önemli bir rol oynamaktadır.

2.1.2. Dalga optiği

Dalga optiği konusunu anlamak için, çeşitli olguları ve uygulamaları göz önünde bulundurmak önemlidir. Bu bağlamda, öne çıkan bir konu doğrusal olmayan dalga etkileşimleridir. Bu etkileşimler arasında, negatif kırılma prensibi kullanılarak metal içermeyen düz bir mercek oluşturulması (Cao vd., 2014) ve doğrusal olmayan şekilde uyarılmış anlık dalgalarla uzak alan süper çözünürlüklü görüntü elde etme (Zhou vd, 2021) gibi uygulamalar bulunmaktadır. Bu uygulamalar, doğrusal olmayan dalga etkileşimlerinin optik sistemlerin kapasitelerini genişletme potansiyelini göstermektedir.

Süper salınım olarak bilinen kavram, optik uygulamalarda bir etkiye sahiptir. İlk olarak kuantum zayıf ölçümler tarafından tanımlanan optik süper salınım, anlık dalgalar olmadan optik süper salınım olasılığını ortaya çıkarmıştır (Chen vd., 2019). Bu fikir, süper çözünürlük ve optik alanları yönlendirmek için yeni fırsatlar sunar.

2.1.3. Foton teorisi ve kuantum optik

Fotonlar ve kuantum optik teorisini anlamak için, kuantum mekaniğinin çeşitli yönlerini ve fizikteki uygulamalarını öğrenmek büyük önem taşır. Temel kuantum mekaniği prensiplerine kapsamlı bir giriş sunan Griffiths (2019), fotonların nasıl davrandığını ve madde ile nasıl etkileşim kurduğunu anlamak için temel oluşturur.

Doğrusal optikle verimli kuantum hesaplama için bir şema sunarak kuantum hesaplamada pratik uygulamalar için sıkı koşulların sağlanmasının önemini vurgulanmıştır (Knill vd., 2001). Fotonik kubitlerle doğrusal optik kuantum hesaplamanın temel teorisini ve gelişmelerini inceleyerek deneysel iki-kubit kapıları hakkında bilgi sağlanmıştır (Kok vd., 2007). Bu kapılar, kuantum hesaplamanın temel parçalarıdır. Toplu olarak, bu referanslar fotonik ve kuantum hesaplama arasındaki ilişkiyi daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

Kuantum girişim ve dolanıklık, kuantum optik çerçevesinde incelendiğinde son derece önemlidir. Kuantum yol dolaşıklığını ve klasik ışık kaynaklarının çok düzlemli kırınımını tartışarak, kuantum dolaşıklığının karmaşık doğasını ve optik sistemlerle olan ilişkisini göstermektedir (Gülbahar, 2020). Kuantum dolanıklığı kullanarak hedeflerin

belirlenmesini ele alarak, kuantum sensör teknolojilerinde kuantum bilgi teorisinin ve kuantum optiğinin uygulamalarını vurgulamaktadır (Sorelli vd., 2022).

Seçilen referanslar, kuantum mekaniğinin temel ilkelerini, kuantum iletişim ve hesaplamadaki pratik uygulamaları ve optik sistemlerde kuantum dolaşıklığın önemini kapsayan fotonlar ve kuantum optik teorisine kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır.

2.2. Maxwell Denklemlerinin Tarihçesi

2.2.1. Elektromanyetik teorinin evrimi ve Maxwell denklemleri

Antik çağlardan beri ışık, insanların ilgisini çeken bir konudur ve Maxwell denklemleri, bu evrimin önemli bir parçasıdır. Işığın doğası hakkında çok sayıda teori geliştirilmiştir. Isaac Newton, yansıma ve kırılma gibi olayları başarıyla açıklamıştır. Bununla birlikte, 1800'lerde Thomas Young'un ışık girişimi deneyi ve Augustin Fresnel'e ait ışığın dalga teorisi, ışığın dalga davranışını destekleyen güçlü kanıtlar sağlamıştır.

O dönemde fizikçiler, ışığın yayılabilmesi için bir ortamın varlığını araştırmışlardır. André-Marie Ampère'nin elektrik ve manyetizma arasındaki ilişkiyi keşfetmesi ve Michael Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası, ışığın elektromanyetik dalga olabileceği fikrini güçlendirmiştir.

1864 yılında James Clerk Maxwell, Maxwell denklemlerini geliştirerek elektromanyetik alan teorisini ortaya koymuştur. Elektromanyetizma alanında, bu denklemler elektrik ve manyetik alanların nasıl davrandığını matematiksel olarak açıklamaktadır. Mikroelektronikte kullanılan elektromanyetizma, mikrodalga, radyo frekansı, kablosuz iletişim, optik devreler ve anten teknikleri dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalara sahiptir (Chen vd., 2010).

Maxwell denklemleri, elektromanyetizma teorisinin temelini oluşturmanın yanı sıra, meta malzemeler gibi farklı ortamlardaki dalga yayılımını anlamak için de büyük bir öneme sahiptir (Li vd., 2017; Vahala vd., 2020).

Maxwell denklemlerini çözmek için geliştirilen sayısal yöntemler, bu denklemlerin uygulanması ve anlaşılmasında önemli bir rol oynar. Maxwell denklemlerini karmaşık geometrilerde çözmek ve farklı ortamlardaki dalga etkileşimlerini incelemek için sonlu fark zaman alanı (FDTD) yöntemi kullanılmıştır (Chen vd., 2010; Zhao ve Liu, 2015). Süreksiz Galerkin yönteminin, özellikle meta malzemelerde dalga yayılımı bağlamında Maxwell denklemlerinin çözümünde etkili olduğu gösterilmiştir (Lu vd., 2004; Li ve Hesthaven, 2014).

Maxwell denklemleri elektromanyetik teorinin zengin tarihini yansıtmakta olup, bilimsel ve mühendislik disiplinlerindeki araştırmaların odağı olmaya devam etmektedir. Bu denklemlerin uygulama alanları, temel elektromanyetik teoriden pratik mühendislik çözümlerine kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Ayrıca, sayısal çözüm yöntemleri de gelişmeye devam etmektedir (Dodig, 2023).

3. MAXWELL DENKLEMLERİ

Maxwell denklemleri, elektrik ve manyetik alanların davranışını tanımlayan dört temel denklem grubundan oluşur. Adını 19. yüzyılda bu denklemleri formüle eden fizikçi James Clerk Maxwell'den alır. Klasik elektromanyetizmada bu denklemler, çok önemli bir rol oynar. Fiziğin ve mühendisliğin çeşitli alanlarında geniş kapsamlı etkilere sahiptir.

Gauss'un elektrik ve manyetizma yasaları olarak bilinen ilk denklem çifti, elektrik yükleri ve akımlar kullanılarak yeni elektrik ve manyetik alanların oluştuğunu gösterir. Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasası, bir elektrik alanının değişen bir manyetik alandan oluştuğunu açıklar. Son olarak, Maxwell'in ilavesi ve Ampère yasası, değişen bir manyetik alanın elektrik alan oluşturabileceğini gösterir.

Maxwell denklemleri, ışık da dahil olmak üzere elektromanyetik dalgaların nasıl davrandığını anlamamıza yardımcı olur. Elektrik devreleri, kablosuz iletişim ve optik gibi teknolojilerin gelişimi, Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Özel görelilik teorisi ve kuantum mekaniği gibi modern fizik alanlarının gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır ve klasik elektromanyetizmanın temelini oluşturmaktadır.

3.1. Maxwell Denklemlerinin Matematiksel Gösterimi ve Temel Özellikleri

Maxwell denklemleri elektromanyetizmanın temel denklemleri olup diferansiyel formda aşağıdaki gibi yazılır.

Gauss Yasası (Elektrik Alan için) $$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathrm{D}} = \rho \quad (3.1)$$

Gauss Yasası (Manyetik Alan için) $$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

Faraday Yasası $$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.3)$$

Ampère Yasası $$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Maxwell denklemlerinin integral formları aşağıdaki gibidir.

Gauss Yasası (Elektrik Alan için) $$\int_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho \; dV \quad (3.5)$$

Gauss Yasası (Manyetik Alan için) $$\int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.6)$$

Faraday Yasası $$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \, dA \quad (3.7)$$

Ampère Yasası $$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \cdot d\vec{A} \quad (3.8)$$

3.1.1. Gauss yasası (Elektrik Alan İçin)

Eş. (3.1) Elektrik alan için Gauss yasası olup elektrik ve manyetik alanların hareketlerini açıklayan Maxwell denklemlerinin önemli bir unsurudur. Yasa, kapalı bir yüzeyden geçen elektrik akısının, yüzey tarafından çevrelenen yük miktarı ile doğru orantılı olduğunu kabul eder. Bu yasanın matematiksel gösterimi, elektrik alanının sapmasının ortamın geçirgenliğinin yük yoğunluğuna bölünmesine eşit olduğunu gösterir. Maxwell denklemleri bağlamında Gauss yasasının önemi, elektrik alanlarının davranışının ve yüklerle etkileşiminin anlaşılmasında yatmaktadır.

Yasa aynı zamanda elektrik yüklerinin dağılımı ile üretilen elektrik alanı arasında doğrudan bir ilişki sağladığı için Maxwell denklemlerinin hayati bir bileşenini oluşturur. Böyle bir ilişki, çeşitli fiziksel durumlarda elektrik alanlarının davranışını anlamak için temeldir. Gauss yasası, Maxwell denklemlerinin hem matematiksel hem de fiziksel yönlerinde çok önemlidir ve teorik ve pratik bakış açılarından önemini vurgulamaktadır.

Gauss yasasının Maxwell denklemleri üzerindeki etkisi, diverjans kısıtlamaları bağlamında belirgin bir şekilde görülür. Bu yasa, Maxwell denklemlerinin iyi bir şekilde formüle edilmesi için hayati öneme sahiptir. Gauss yasasının yerine getirilmemesi, denklemlerin doğru bir şekilde ifade edilmemesine neden olabilir. Bu nedenle, Gauss yasasının Maxwell denklemlerinin formülasyonu ve yorumlanmasında kritik bir rol oynar.

3.1.2. Gauss yasası (Manyetik Alan İçin)

Eş. (3.2) manyetik alan için Gauss yasası olup, elektromanyetizmanın temel prensiplerinden biridir. Bu kural manyetik alan çizgilerinin başlangıç veya bitiş noktası olmayan kapalı döngüler oluşturduğunu ve manyetik monopollerin mevcut olmadığını belirtir.

Manyetik alan çizgilerinin ne başlangıcı ne de bitişi vardır, bu durum manyetik alanın bir kaynağı veya hedefi olmadığı anlamına gelir. Manyetik alan, kapalı döngüler oluşturur. Manyetik monopoller, henüz keşfedilmemiş noktasal manyetik yüklerdir ve çünkü manyetik alan çizgileri kapalı döngüler oluşturduğu için, manyetik monopollerin var olması mümkün değildir.

Gauss'un manyetizma yasası, herhangi bir kapalı yüzeyden geçen net manyetik akının her zaman sıfır olduğunu belirtir (Tetienne vd., 2019). Bu durum, manyetik alan çizgilerinin kapalı döngüler oluşturduğu gerçeğinden kaynaklanır. Gauss'un manyetizma yasası, manyetik alanların davranışını anlamamıza yardımcı olur ve manyetik alan çizgilerinin davranışını ve manyetik monopollerin var olmadığını açıklar.

Bu yasa, çeşitli fiziksel sistemlerdeki manyetik alanların özelliklerini ve davranışını anlamak için çok önemlidir. Manyetik alanların nasıl çalıştığını anlamamıza yardımcı olur. Maxwell denklemleri, manyetik alanların dairesel doğasını ve yüklerin hareketi ile manyetik alanların oluşumu arasındaki ilişkiyi açıklar (Shadid ve Shadid, 2020).

3.1.3. Faraday yasası

Eş. (3.3) Faraday yasası olup, elektromanyetizmanın temel ilkesi olarak Maxwell denklemlerinde merkezi bir rol oynar. Michael Faraday tarafından formüle edilen bu yasa, bir zamanla değişen manyetik alanın bir elektromotor kuvvet (EMK) indüklemesi ve sonuç olarak bir kapalı devre içinde bir elektrik alanı oluşturması prensibini açıklar.

Maxwell-Faraday denkleminin temel ilkesi, zaman içinde değişen bir manyetik alan ile uzamsal olarak değişen bir elektrik alan arasındaki içsel ilişkiyi vurgular (Gholikhani vd., 2019). Faraday yasası, Ampère-Maxwell yasasıyla birlikte Maxwell denklemlerinin temel dayanaklarından biri olarak görev yapar. Elektrik ve manyetik alanlar arasındaki dinamik etkileşimleri anlamamıza ve elektromanyetik olayları incelememize temel bilgiler sağlar (Hill, 2011).

Faraday yasasının integral formu, elektromanyetik indüksiyonu anlamamızı ve değişen manyetik alanlar ile indüklenen elektrik alanları arasındaki karşılıklı ilişkiyi açıklamamızı sağlar (Galili vd., 2006). Bu ilke, enerji temelli tedavi cihazlarından, dokunma ve dokunma dışı enerji yöntemlerinin geliştirilmesine kadar birçok uygulama alanında kritik öneme sahiptir (Denner, 2009). Faraday yasasının pratik uygulamaları, ışığa duyarlı cihazlarda mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme ve elektrik üretimi gibi bir dizi alanda bulunmaktadır. Bu durum, yasanın çağdaş teknolojik gelişmelerdeki adaptasyonunu ve önemini göstermektedir (Yang vd., 2018).

Faraday yasasının etkisi teorik çerçevelerin ötesine geçerek çeşitli pratik alanlara uzanmaktadır. Faraday yasasının kalıcı önemi, özellikle enerji dönüşüm süreçlerindeki rolünde açıkça görülmektedir. Araştırmacılar elektromanyetik etkileşimlerin karmaşıklığını daha derinlemesine araştırdıkça, yasa temel fiziksel olayları kavrayışımızı şekillendiren ve birçok bilimsel ve teknolojik alanda yenilikçi uygulamalara ilham veren yönlendirici bir ilke olmaya devam etmektedir.

3.1.4. Ampere yasası

Eş. (3.4) Ampere yasası olup, elektrik ve manyetik alanların karmaşık davranışını tanımlayan Maxwell denklemlerinin temel bir ilkesidir. Bu yasa, bir kapalı döngüyü çevreleyen manyetik alanın dolaşımının, döngüden geçen akımla doğru orantılı olduğunu ve boş alanın geçirgenliğinin orantı katsayısı olarak hareket ettiğini ileri sürer. Elektrik akımları ve bu akımların manyetik alanlara etkileri arasındaki karmaşık bağlantıyı derinlemesine anlamamıza olanak tanır ve elektromanyetizmanın birçok pratik uygulamasının temelini oluşturur.

Ampere yasası, ilk olarak Ampere tarafından formüle edilmiş ve daha sonra James Clerk Maxwell tarafından genişletilmiştir. Maxwell'in genişletmesi, elektrik alanlarındaki dinamik değişiklikleri açıklamak için yer değiştirme akımı terimini içermiştir. Bu buluş, elektromanyetizma yasalarını bütünleştirerek ve elektrik ve manyetik alanlar arasındaki etkileşimi anlamak için temel araçları sunarak önemli bir adım oluşturmuştur. Yer değiştirme akımının Ampere yasasına yerleştirilmesi, Maxwell denklemlerinin geliştirilmesinde önemli bir döneme işaret etmiştir.

Ampere yasası, diğer Maxwell denklemi bileşenleriyle birlikte, matematik, fizik ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli akademik alanlarda kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve uygulanmıştır. Kullanışlı olması karmaşık elektromanyetik sorunları çözmek için geliştirilen sayısal analiz metodolojilerinde kendini göstermiştir. Ayrıca, Ampere yasası, enerji ilerlemesi üzerindeki etkilerini anlamayı amaçlayan teorik soruşturmalarda önemli bir konu olmuştur.

Ampere yasası, elektrik akımları ve manyetik alanlar arasındaki karmaşık ilişkiyi vurgulayan ve elektromanyetizmanın temel yasalarını birleştiren önemli bir ilkedir. Maxwell'in yer değiştirme akımı terimini eklemesi, elektromanyetik alanın temel yasalarını birleştirmeye önemli bir katkıda bulunmuştur. Ampere yasasının çeşitli bilim ve mühendislik alanlarındaki kritik rolü, elektromanyetizma alanında temel ve kalıcı bir ilkenin önemini vurgular.

4.TEORİK BİLGİ

4.1. Optik Dalga Kılavuzları ve Fotonik Yapıların Genel Tanımı

Optik sinyallerin iletimi, optik dalga kılavuzlarına bağlıdır. Bu kılavuzlar çok çeşitli malzemelerden yapılabilir ve çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Örneğin, biyolojik arayüzlerde ışığın iletimi ve manipülasyonu için yumuşak ve esnek optik dalga kılavuzları tasarlanmıştır (Wu ve Liu, 2021). Nano yapıların ışığın iletimi için kullanılması, nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki gelişmelerin bir sonucudur (Apter vd., 2019). Bu yapılar sayesinde, geleneksel silisyum veya amorf malzemelerden daha biyobozunur ve esnek optik fiberler üretilebilir (Handelman vd., 2016).

Plazmonik dalga kılavuzları da optik iletimde önemli bir rol oynamaktadır. Nano ölçekli cihazlar ışık-madde etkileşimini artırarak sensörlerin ve anahtarlama cihazlarının performansını geliştirebilirler (Shan vd., 2017). Ayrıca, yüzey plazmon polaritonlarıyla entegre optik jiroskoplar geliştirilmiş ve bu jiroskoplar, geleneksel dalga kılavuzlarına kıyasla daha düşük sıfır kayma ve yüksek hassasiyet sağlamıştır (Yang vd., 2010).

Femtolazerler kullanılarak yazılmış optik dalga kılavuzları, biyofotonik uygulamalar ve entegre optik cihazlar için üç boyutlu yetenekler sağlar (Guo vd., 2013). Aktif yarı iletkenler kullanılarak geliştirilen plazmonik dalga kılavuzları, düşük iletim kaybı ve güçlü optik alan sınırlaması sağlar (Zhang vd., 2014).

Bu çalışmalar, optik dalga kılavuzlarının çok çeşitli alanlarda kullanıldığını ve malzeme bilimi, nanoteknoloji ve femtolazerler gibi alanlarda yapılan ilerlemeler nedeniyle daha iyi çalıştığını göstermektedir.

Fotonik yapılar, ışığın davranışını kontrol etmek için kullanılan mühendislik malzemeleridir. Bu yapılarda dielektrik özellikler periyodik olarak değişir. Bu periyodiklik ışığın belirli frekans aralıklarında yayılmasını veya engellenmesine neden olur.

Fotonik yapılar, birçok alanda potansiyel uygulamaya sahiptir. Örneğin, telekomünikasyonda, ışığın belirli frekanslarını seçerek iletişim hızını artırabilirler.

Algılamada, ışığın belirli frekanslarını filtreleyerek belirli molekülleri veya malzemeleri tespit edebilirler. Görüntülemede, ışığın belirli frekanslarını kullanarak görüntü kalitesini arttırabilirler.

Fotonik yapılar, ışığı daha önce ulaşılamayan yöntemlerle manipüle etmenin temelini oluşturur. Bu yapılar, optik teknolojilerde ilerlemelere yol açar. Fotonik yapıların bazı potansiyel uygulamaları aşağıda verilmiştir:

Telekomünikasyon: Fotonik yapılar, ışığın belirli frekanslarını seçerek iletişim hızını artırabilir. Örneğin, 5G ve 6G gibi yeni nesil telekomünikasyon ağlarında fotonik yapılar kullanılmaktadır.

Algılama: Fotonik yapılar, ışığın belirli frekanslarını filtreleyerek belirli molekülleri veya malzemeleri tespit edebilir. Örneğin, kanser hücrelerini tespit etmek için fotonik yapılar kullanılmaktadır.

Görüntüleme: Fotonik yapılar, ışığın belirli frekanslarını kullanarak görüntü kalitesini artırabilir. Örneğin, 3D görüntülemede fotonik yapılar kullanılmaktadır.

Fotonik yapılar, optik alanındaki en heyecan verici yeniliklerden biridir. Bu yapılar, ışığın davranışını kontrol etmenin yeni yollarını sağlayarak, birçok alanda devrim yaratabilecek potansiyele sahiptir.

Fotonik kristaller, çok çeşitli fotonik yapılar arasında önemli bir rol oynar. Bu periyodik dielektrik malzeme düzenlemeleri, ışığın lokalizasyonu, kendiliğinden yayınım kontrolü ve yeni optik cihazların mühendisliği, gelişmiş nano fabrikasyon teknikleri kullanılarak oluşturulan çok önemli optik olaylardır.

4.1.1. Işığın lokalizasyonu

Fotonik kristaller, geleneksel kırınım sınırlarını aşarak ışığı nano ölçekli bölgeler içinde hapsedebilir. Fotonik bant boşluklarının yaratılması nedeniyle bu ışık lokalizasyonu, ışığı periyodik yapı içine hapseder. Fotonik hapsetme olarak bilinen bu olay, yüksek verimli

ışık kaynakları, düşük kayıplı optik dalga kılavuzları ve ultra minyatür optik cihazlar geliştirmek için büyük bir potansiyele sahiptir.

4.1.2. Kendiliğinden yayınımın kontrolü

Fotonik kristallerin varlığı, ışığın kendiliğinden yayınımın temel sürecini büyük ölçüde etkiler. Fotonik bant aralığı yapısının değiştirilmesi, yayılan ışığın hızını, yönünü ve spektral özelliklerini değiştirebilir. Kendiliğinden yayınım üzerindeki bu kontrol, lazerler ve LED'ler gibi ışık yayan cihazların performansını artırmak ve kuantum bilgi işleminde yeni uygulamalar geliştirmek için umut vermektedir.

4.1.3. Yeni optik cihazların mühendisliği

Fotonik kristaller, çok çeşitli yeni optik cihazların mühendisliğini kolaylaştıran yapılardır. Optik filtreler, dalga kılavuzları, kuplörler ve rezonatörler, ışık akışını ve spektral özellikleri kontrol edebildikleri için geliştirilmiştir. Bu cihazlar, yüksek hızlı veri iletimi ve gelişmiş sinyal işleme yetenekleriyle optik iletişim sistemlerini geliştirme özelliğine sahiptir.

4.2. Fotonik Yapıların Optik Özellikleri

Fotonik yapıların optik özellikleri, entegre optik devrelerden çevresel iyileştirmeye ve optoelektronik cihazlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde büyük ilgi görmektedir. Fotonik kristaller, dalga boyu ölçeğinde kırılma indisi modülasyonuna sahip periyodik yapılar olarak tanımlanır ve ışık akışını yönlendirme yetenekleri nedeniyle detaylı bir şekilde araştırılmıştır (Liu ve Li, 2001; Guan ve Yuan, 2009). Bu yapılar, fotonik bant yapıları ve yarı iletkenlerdeki elektronik bant boşluklarına benzeyen bant boşlukları sergileyerek fotonik bant boşluklu malzemelerin gelişimine öncülük etmiştir (Yao ve Zhao, 2014; Li vd., 2010). Dielektrik malzemelerin periyodik düzenlemesi, fotonik bant boşlukları aracılığıyla ışık hareketini kontrol etme ve entegre optik ile optoelektronik uygulamalarını mümkün kılma açısından kritik bir öneme sahiptir (Guan ve Yuan, 2009).

Entegre optik devrelerin geliştirilmesi, organik nanomalzemelerin kendiliğinden bir araya gelen yapılarını ve fotonik özelliklerini uyarlamalarına bağlıdır. Bu, bilgiyi elektronik devrelerden daha verimli bir şekilde iletebilme ve yönlendirebilme potansiyeline sahiptir (Yao ve Zhao, 2014). Tek boyutlu meta malzemelerden oluşan fotonik yapıların kullanılması, optik bellek uygulamalarını anlamak için çok verimlidir ve fotonik yapıların çok sayıda potansiyel kullanım alanı olduğunu göstermiştir (M vd., 2022). Fotonik kristallerin bant aralığı özelliklerinin incelenmesi, kademeli fotonik bant aralıklarının filtre malzemelerinde kullanılabileceğini de açıklar (Tian vd., 2015; Li vd., 2010).

4.3. Silisyum Tabanlı Fotonik Yapılar

Silisyum tabanlı fotonik yapılar, sahip oldukları geniş uygulama potansiyeli nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Silisyum fotonik, telekomünikasyon, optoelektronik ve entegre devrelerde temel malzeme olarak kullanılmaktadır (Doerr, 2015). Binlerce optik bileşen içeren karmaşık fotonik yapıların oluşturulması, silisyum fotonik çipler üzerine katı hal kuantum yayıcıların uygulanmasıyla mümkün olmuştur (Kim vd., 2017). İki boyutlu malzemelerin kullanılması, özellikle slot dalga kılavuzları, fotonik kristal dalga kılavuzları ve mikro halka rezonatörler gibi farklı yapıların optimizasyonu yoluyla silisyum fotonik cihazların performansını artırma potansiyeline sahiptir (Zhao vd., 2021). Silisyum fotonik cihazların monolitik üretimi ve entegrasyonunun kolaylaştırılması, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) teknolojileri ile uyumlu olmaları nedeniyle çeşitli uygulamalarda daha çekici hale gelmiştir (Vulis vd., 2017).

Silisyum fotoniği; silisyum nitrür fotonik entegre devreleri gibi malzeme yığınlarına sahip silisyum tabanlı genişletilmiş fotonik malzemeleri içermekte ve uygulama alanlarını genişletmektedir (Rahim vd., 2017). Silisyum tabanlı serbest duran dalga kılavuzları, uzun dalga kızılötesi fotonik uygulamalarda algılama, iletişim, sinyal işleme, füze algılama ve görüntüleme gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilir (Yang vd., 2007). Gözenekli silisyum dielektrik aynaların fotonik bant aralığını değiştirme yeteneği, fotonik uygulamalar için gözenekli silisyumun çok yönlülüğünü ortaya çıkartmıştır (Agarwal ve Río, 2003).

Ancak, silisyum tabanlı fotonik yapıların geliştirilmesi zorluklar içermektedir. Silisyumun özel malzeme özellikleri, saf silisyum kullanılarak aktif fotonik cihazların gerçekleştirilmesini zorlaştırmıştır (Li vd., 2020). Bu zorluklara rağmen, Silisyum Fotonik

Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) tabanlı büyük ölçekli devrelere doğru bir adım olan silisyum fotonik MEMS cihazları deneysel olarak gösterilmiştir (Quack vd., 2020).

Silisyum tabanlı fotonik yapılar, geniş bir uygulama potansiyeli sunmakta olup devam eden araştırmalar, geliştirme zorluklarına odaklanarak bu potansiyeli daha da artırmaktadır. Farklı malzemelerin entegrasyonu ve mevcut teknolojilerle uyumluluk, silisyum fotoniğin yeteneklerini genişleterek bu alanda umut verici bir araştırma ve geliştirme alanı haline getirmektedir.

4.4. Elektromanyetik Dalgaların Fotonik Yapılarda Yayınımı

Fotonik kristaller, elektromanyetik dalgaların yayılmasını kontrol etme yetenekleri nedeniyle bilim çevrelerinde büyük bir ilgi çekmektedir ve aynı zamanda fotonik bant aralıklı malzemeler olarak da bilinir (Ansari ve Tehranchi, 2009). Bu yapılar, elektromanyetik dalgaların belirli frekans bölgelerinde yayılmasını engelleyen fotonik bant boşluklarını sergiler (Gorbatsevich vd., 2014). Ayrıca, fotonik kristallerin araştırılması, elektromanyetik dalgaların yeni ve ince yayılan yerel modlarını keşfetmeye öncülük etmiştir, bu da Dirac fermiyonları ve grafendeki topolojik kenar durumlarına benzer bir davranış sergiler (Guo vd., 2019).

Fotonik kristallerde elektromanyetik dalga yayılımının kontrolü, dalga yayılımının yönü ve frekansı üzerinde tam kontrol sağlayan fotonik bant aralığı nedeniyledir (Zhang vd., 2019). Elektromanyetik dalga yayılımı için fotonik bantların ve izin verilen/yasaklanan frekans bölgelerinin varlığı, katılardaki elektron davranışıyla karşılaştırılmış ve fotonik bant boşluklarının dalga yayılımını kontrol etmedeki önemi vurgulanmıştır (Hiroshige vd., 2009).

Fotonik kristallerde elektromanyetik dalga yayılımının incelenmesi, fotonik bant aralığı malzemelerinin dalga yayılımını kontrol etmedeki kritik rolünü vurgulamıştır. Fotonik kristallerdeki elektromanyetik dalgaların davranışı, atomik kristallerdeki elektron dalgalarının davranışıyla kıyaslandığında, bu alanda yeni olasılıkların kapılarını aralamıştır. Fotonik bant boşluklarının varlığının, dalga yayılımının yönü ve frekansı üzerinde tam bir kontrol sağladığı gösterilmiş, bu da fotonik kristalleri bilim camiasında kapsamlı bir çalışma konusu haline getirmiştir.

5. OPTİK MALZEMELERDE KIRILMA İNDİSİ

Optik malzemelerin oluşturulmasında ve analizinde kırılma indisi önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca çeşitli kullanım alanları ve optik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özelleştirilmiş optik özelliklere sahip malzemelerin ve cihazların geliştirilmesi için, kırılma indisini ve bunun malzemelerdeki manipülasyonunu etkileyen unsurları anlamak çok önemlidir.

5.1. Kırılma İndisinin Tanımı

Optik dalga kılavuzları, içerisinde ilerleyen ışığa karşı direnç gösterir. Bu özellik, optik dalga kılavuzunun kırılma indisidir. İzotrop ortamlarda kırılma indisi sabit kalır. Ancak gelen ışığın dalga boyuna ve ortamın sıcaklığına göre kırılma indisi değişebilir. Kırılma indisi, malzemenin hem ışığı kırma hem de iletim yeteneğini belirler. Bu nedenle, dalga kılavuzlarının ve optik fiberlerin tasarımında önemli bir rol oynar.

Kırılma indisi, optik bant boşluğu enerjisi, soğurma ve sönüm katsayısı gibi optik parametrelerdeki değişiklikleri inceler. Bu, malzemenin çeşitli uygulamalarda ne kadar iyi çalıştığını etkiler. Bu nedenle, kırılma indisi, optik cihazların tasarımı, malzeme seçimi ve optik iletim sistemlerinin performansı gibi çok sayıda alanda hayati önem taşır.

5.2. Kırılma İndisinin Matematiksel Hesaplanması

Optik kırılma indisi (n), bir ortamın ışığı kırma eğiliminde olup olmadığını gösteren bir ölçümdür. Optik kırılma indisi, bir ortamdan diğerine geçerken ışığın hızında meydana gelen değişiklikle ilgilidir.

Aşağıdaki bağıntı matematiksel olarak kırılma indisini gösterir:

$$n = \frac{c}{v} \tag{5.1}$$

Burada; (n) kırılma indisi, (c) boşluktaki ışığın hızı (yaklaşık olarak $3 \times 10^8\, m/s$), (v) malzemenin içindeki ışığın hızıdır.

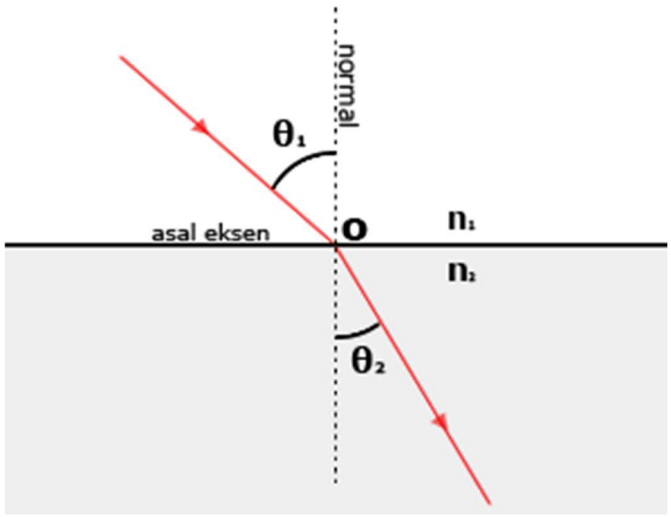
Bu bağıntı, ışığın bir ortamdan diğerine geçerken kırılma indisini hesaplamanın bir yolunu göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu bağıntı ışığın bir ortamdan diğerine geçerken meydana gelen kırılma olayının tam olarak açıklayamaz. Bunun için Snell Yasası kullanılır.

5.2.1. Snell kırılma yasası

Snell Kırılma Yasası, optikte temel bir teori olup standart ışık kırılması dışında çok sayıda fiziksel olayda gözlemlenmiş ve kanıtlanmıştır. Snell yasası; ışık, kimyasal dalgalar, polimerizasyon süreçlerindeki termal cepheler, ferromanyetik filmlerdeki spin dalgaları, tanecikli malzemelerdeki dalga kırılması ve kimyasal dalgalarla desteklenmiştir (Eager ve Epstein, 1993; Viner vd., 2007). Negatif kırılmayı tam olarak temsil etme yeteneği, Snell yasasının evrenselliğinin ve arayüzlerdeki dalgaların davranışını karakterize etmedeki uygulamasının altını çizmiştir (Sundar vd., 2009).

Anisotropik dağılım ilişkilerine sahip spin dalgaları gibi bazı durumlarda Snell yasasının geleneksel biçiminden sapmalar olduğu bildirilmiştir. Bu tür sapmalar, Snell yasasının çeşitli dalga olaylarını kapsayacak şekilde genelleştirilmiş formlarının gerekliliğini göstermektedir.

Snell kırılma yasası, termal cepheler, kimyasal dalgalar, spin dalgaları ve ışık gibi çok çeşitli dalga sistemleri için kapsamlı bir şekilde doğrulanmıştır. Bu prensibin geniş uygulanabilirliği, arayüzlerdeki dalga davranışını anlamadaki temel önemini vurgular ve dalga optiğine olan uzantıları, dalga olaylarını tanımlamada ve etkilemede çok yönlü olduğunu gösterir.



Şekil 5. 1. Snell yasasını gösteren örnek bir grafik ($n_2 > n_1$)

5.2.1.1. Snell yasasının matematiksel formu

Snell kırılma yasası, ışığın bir ortamdan diğerine geçerken, gelme ve kırılma açıları arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir yasadır. Yasa, 1621 yılında Hollandalı fizikçi Willebrord Snellius tarafından keşfedilmiştir.

Snell yasasına göre, gelme açısı ve kırılma açısı arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (5.2)$$

Burada; (n_1) birinci ortamın kırılma indisi, (θ_1) birinci ortamdaki gelme açısı, (n_2) ikinci ortamın kırılma indisi, (θ_2) ikinci ortamdaki kırılma açısı.

Bu bağıntı, ışığın dalga doğası ile ilişkilendirilebilir. Işık, bir elektromanyetik dalgadır. Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alanlardan oluşur. Işık, bir ortamdan diğerine geçerken, ortamdaki elektrik ve manyetik alan şiddetleri değişir. Bu değişim, ışığın hızında değişime neden olur. Kırılma indisi, ışığın ortamdaki hızının değişimini ifade eder. Bu nedenle, kırılma indisi, ışığın dalga doğası ile ilişkilendirilebilir.

5.2.1.2. Snell kırılma yasası için bir örnek

Işık silisyum bazlı bir ortamdan kritik açıdan (θ_c) daha küçük bir açıyla geldiğinde kırılma açısını hesaplayalım. Öncelikle silisyum bazlı bir ortamdan hava ortamına geçişteki kritik açıyı bulmalıyız.

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{5.3}$$

$n_{hava} = 1, n_{\mathrm{Si}} \approx 3{,}4$ için,

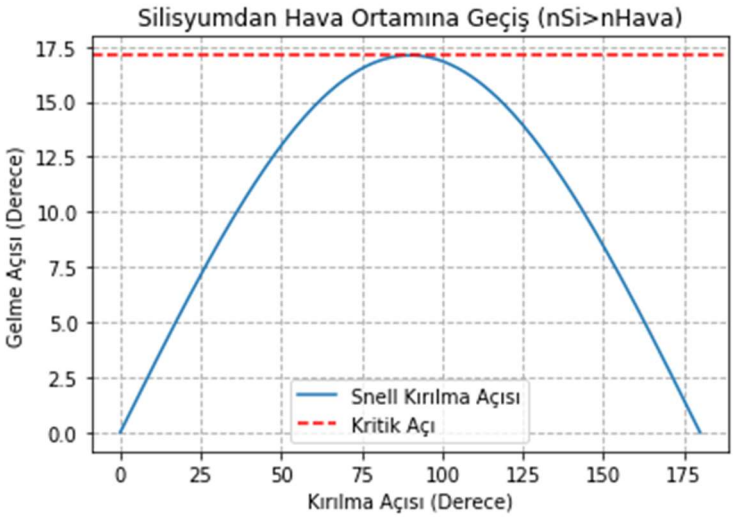
Eş. (5.3) kullanılarak kritik açı (θ_c) aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{3{,}4}\right)$$

$$\sin^{-1}(0.29411764705)$$

$$\theta_c \approx 17^{\circ}$$

Işığın silisyum bazlı bir ortamdan hava ortamına geçerken uğradığı kırılma ve yansıma olaylarını $\theta_c \approx 17^{\circ}$ açısını baz alarak grafik ortamında aşağıdaki gibi gösterebiliriz:



Şekil 5. 2. Silisyumdan hava ortamına geçiş grafiği

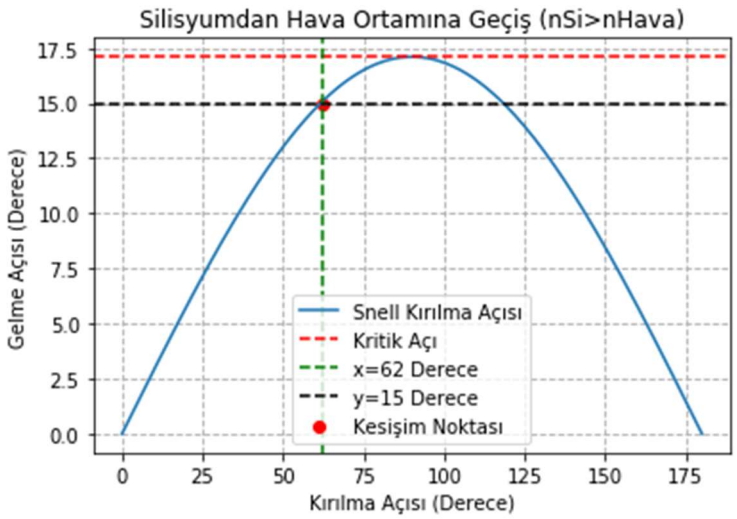
Bulduğumuz $\theta_c \approx 17^\circ$ kullanarak silisyum bazlı bir ortamdan hava ortamına kritik açıdan daha küçük bir açıyla gelen ($\theta_1 = 15^\circ$) bir ışığın kırılma açısını Eş. (5.2)'yi kullanarak bulalım. Hava ve silisyum ortamları için parametreleri yerine yazdığımızda;

$n_{hava} = 1$, $n_{\mathrm{Si}} \approx 3{,}4$ ve $\sin\theta_1 = 15^\circ$ için, Eş (5.2)' i kullanarak,

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$
$$\theta_2 \approx 62.0^\circ \ *$$

(**Bu hesaplama, Snell kırılma yasasına göre yapılmıştır. Ancak, silisyum temelli fotonik yapıların optik özellikleri, kırılma indisi dışında, diğer faktörlerden de etkilenebilir. Bu nedenle, kritik açının gerçek değeri, yapının geometrisi, malzeme kalitesi ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir.)*

Bu örneği grafik ortamında göstermek istersek aşağıda yer alan grafikte $\theta_c \approx 17^\circ$ 'lik kritik açıya sahip olan silisyum-hava ikilisi için $\theta_1 = 15^\circ$'lik gelme açısına göre $\theta_2 \approx 62.0^\circ$ 'lik bir kırılma açısı olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 3. Silisyumdan hava ortamına geçiş grafiği (Geliş açısı $\theta_1 = 15^\circ$ *için*)

5.2.2. Sellmeier denklemi

Optik ve malzeme biliminde sıklıkla kullanılan Sellmeier denklemi, şeffaf bir ortam için kırılma indisi ve dalga boyu arasındaki ampirik ilişkiyi tanımlar (Manzani vd., 2016). Özellikle, farklı optik sistemlerdeki davranışını tahmin etmek ve ışığın malzemelerdeki dağılımını belirlemek için gereklidir (Trabs vd., 2015). Sellmeier denklemi, ikinci harmonik üretimi (SHG) ve üçüncü harmonik üretimi (THG) gibi doğrusal olmayan optik uygulamalarda çok faydalıdır (Zhu ve diğerleri, 2013). Faz eşleşme açılarını hesaplamak ve bu işlemler için gerekli kırılma indislerini bulmak için bu denklem kullanılabilir (Zhu vd., 2013).

Sellmeier denklemi, çeşitli malzemeler için sıcaklığa bağlıdır ve değişen sıcaklıklarda kırılma indisini doğru belirlemek için çok önemlidir (Jundt, 1997; Bruner vd., 2003; Lim vd., 2013; Meyn ve Fejer, 1997). Bu sıcaklık bağımlılığı, çeşitli çevresel koşullar altında malzemelerin nasıl davrandığını anlamak ve çeşitli sıcaklıklarda çalışan optik cihazlar geliştirmek için gereklidir (Meyn ve Fejer, 1997).

Bununla birlikte, Sellmeier denklemi malzemelerin dağılım ilişkilerini oluşturur ve ışığın farklı ortamlardaki davranışını doğru bir şekilde modellemesini sağlar (Trabs vd., 2015; Brand vd., 2009).

Sellmeier denklemi optik ve malzeme biliminde önemli bir araçtır ve ışığın saydam ortamlarda nasıl davrandığını anlama ve tahmin etmemizi sağlar. Sıcaklığa bağlı olması ve doğrusal olmayan optikte kullanılması nedeniyle, optik ve fotonik alanlarda çalışan araştırmacılar ve mühendisler için kullanışlı bir bağıntıdır.

5.2.2.1 Sellmeier denkleminin matematiksel formu

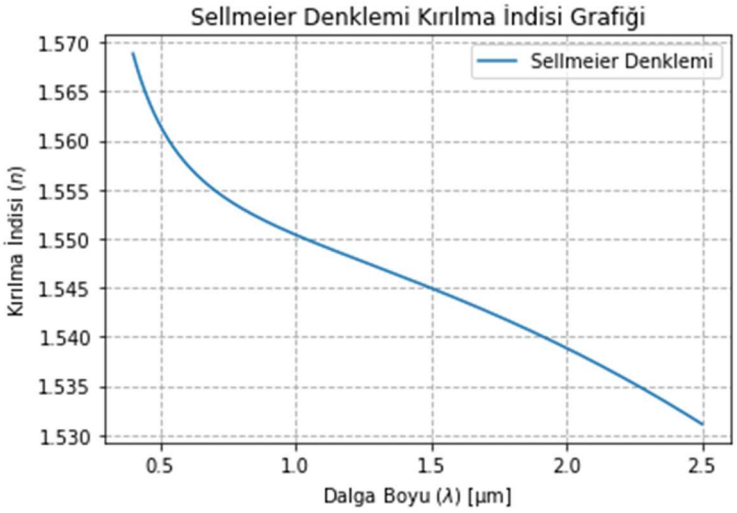
Sellmeier denklemi, dalga boyuna bağlı olarak bir malzemenin optik kırılma indisini hesaplayan bir matematiksel modeldir. Bu denklem tipik olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\tilde{n}^2(\lambda) = 1 + \sum_j \frac{B_j\lambda^2}{\lambda^2 - C_j - i\lambda D_j} \quad (5.4)$$

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} + \ldots \quad (5.5)$$

Bu denklemde; $n(\lambda)$, dalga boyuna bağlı olarak optik kırılma indisi, (Bj), (Cj), (Dj) malzeme sabitleridir.

5.2.2.2 Sellmeier denklemi grafiği



Şekil 5. 4. Sellmeier denklemi kırılma indisi grafiği

5.2.2.3 Sellmeier denkleminin silisyum elementi özelinde çözümü

Silisyum elementi için A, B, C, ve D katsayıları aşağıdaki gibidir, (E. D. Palik, 1985):

A_{Si} = 1.44422

B_{Si} = -0.000118

C_{Si} = 0.000225

D_{Si} = -0.00000084

Sellmeier denklemini, silisyum için A, B, C, ve D katsayılarını kullanarak aşağıdaki gibi yeniden yazabiliriz:

$$n^2 = 1.44422 + (-0.000118)/\lambda^2 + (0.000225)/\lambda^4 + (-0.00000084)/\lambda^6 \quad (5.6)$$

Değişkenleri ayırırsak, aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

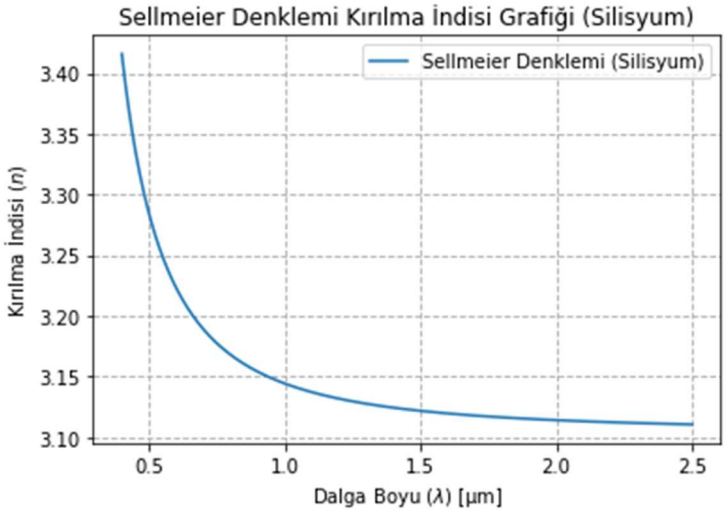
$$n^2 - 1.44422 = (-0.000118)/\lambda^2 + (0.000225)/\lambda^4 + (-0.00000084)/\lambda^6 \quad (5.7)$$

Bu ifadeyi kullanarak, silisyumun farklı dalga boyları için kırılma indislerini hesaplayarak, aşağıdaki tabloyu elde ederiz:

Dalga Boyu(nm)	**Kırılma İndisi (n)**
100	3.420
110	3.417
120	3.413
...	...
1600	3.400
1700	3.396
1800	3.392

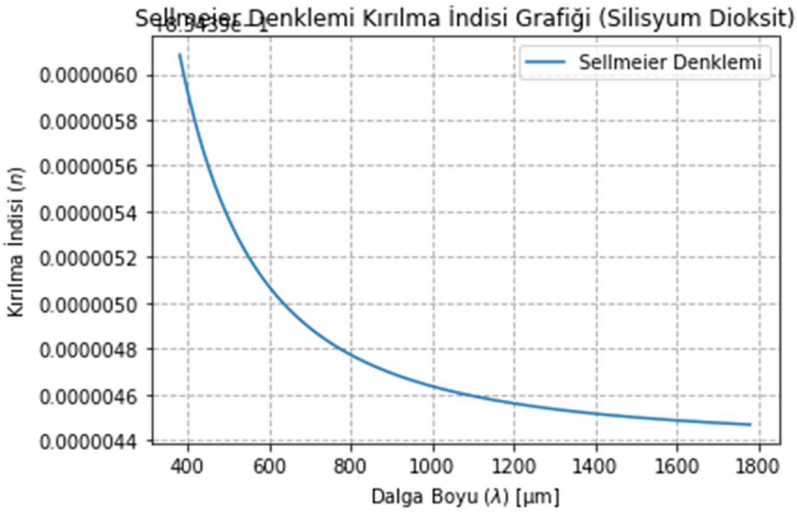
Çizelge 5. 1. Silisyumun dalga boyuna bağlı kırılma indisi değişim değerleri

5.2.2.4. Silisyum için Sellmeier denklemi çözüm grafiği



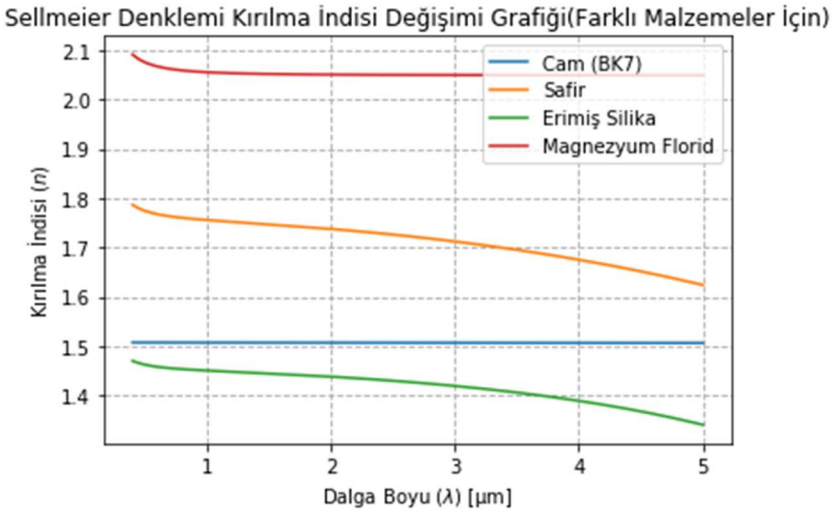
Şekil 5. 5. Silisyum için kırılma indisi değişimi grafiği

5.2.2.5. Silisyum Dioksit (SiO_2) için Sellmeier denklemi çözüm grafiği



Şekil 5. 6. Silisyum dioksit için kırılma indisi değişimi grafiği

5.2.2.6. Sellmeier denklemi kullanılarak farklı malzemeler için kırılma indisi değişim grafiği



Şekil 5. 7. Farklı malzemeler için kırılma indisi değişimi grafiği

5.2.3. Fresnel denklemleri

Elektromanyetik dalgaların iki farklı ortam arasındaki arayüzeydeki davranışını açıklayan ve geçirgenlik ve yansıma olaylarını tanımlayan matematiksel ifadeler Fresnel denklemleri olarak bilinir. Maxwell'in elektrodinamik denklemlerinden türetilen bu

denklemler, ışığın çeşitli malzemelerle etkileşimini anlamak için çok önemlidir. Fresnel denklemleri, elektromanyetik dalgaların arayüzle etkileşimini modelleyerek yansıma ve iletim olaylarının matematiksel hesaplanmasını sağlar.

Bu denklemler, optikten malzeme bilimine, uzaktan algılamadan mikrodalga teknolojilerine kadar çok sayıda alanda hayati önem taşır. Arayüzdeki yansıma ve geçirgenlik olaylarını incelemek, malzemeler arası etkileşimleri öğrenmek ve optik sistemlerin tasarımında kullanmak için kullanılır. Dalga yayılımını inceleyerek elektromanyetik dalgaların farklı ortamlarda nasıl hareket ettiğine bakılır.

5.2.3.1. Maxwell denklemleri kullanılarak Fresnel denkleminin elde edilmesi

Fresnel denklemini Maxwell denklemlerini kullanarak türetmek için;

İki dielektrik malzeme arasındaki sınırı, aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz:

$$\left.\begin{array}{l} x < 0 : \varepsilon = \varepsilon_1 \\ x > 0 : \varepsilon = \varepsilon_2 \end{array}\right]$$

Bu şartları, x ekseninin iki dielektrik malzeme arasındaki sınırı temsil ettiğini belirtir. x ekseni negatif olduğunda elektromanyetik dalga ilk dielektrik malzemenin içindedir. x ekseni pozitif olduğunda, elektromanyetik dalga ikinci dielektrik malzemenin içindedir.

Her iki dielektrik malzeme için Maxwell denklemlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathrm{B}}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{B}} = \mu\varepsilon \frac{\partial \vec{\mathrm{E}}}{\partial t}$$

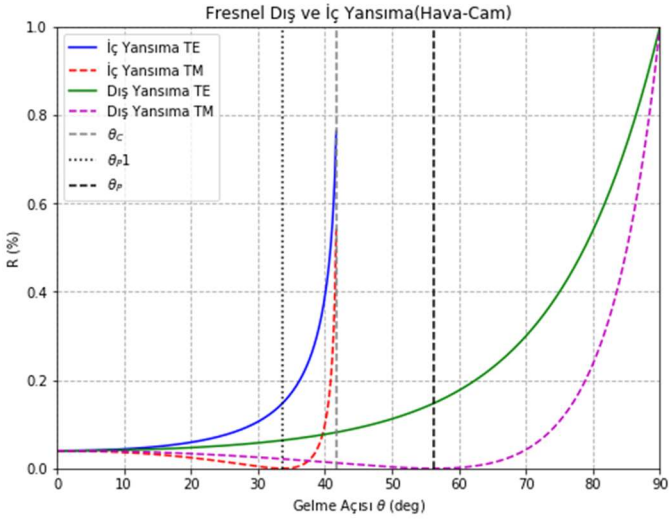
Bu denklemlerde; $(\vec{E})$ elektrik alan vektörü, $(\vec{\mathrm{B}})$ manyetik alan vektörü, (μ) manyetik geçirgenlik, (ε) permitivite sabitidir.

Bu denklemler, sınırda elektrik ve manyetik alan vektörlerinin sürekli olduğunu belirtir.

Maxwell denklemlerini, sınır koşullarını ve gelen ışığın dalga denklemini kullanarak birleştirirsek, aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}\cos\theta_r}{\cos\theta_i + \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}\cos\theta_r} \tag{5.8}$$

Bu denklemde; (r) yansıma katsayısı, (E_r) yansıyan ışığın şiddeti, (E_i) gelen ışığın şiddeti, (θ_i) gelen ışığın gelme açısı, (θ_r) yansıyan ışığın yansıma açısı, (ε_1) ilk dielektrik malzemenin dielektrik sabiti, (ε_2) ikinci dielektrik malzemenin dielektrik sabitidir.



Şekil 5. 8. Hava ve cam ortamları için Fresnel denklemi grafiği

5.2.3.2. İç ve dış yansıma ile ilgili açıklamalar

Optikte iç yansıma, bir ışık demetinin daha az yoğun bir ortamdan daha yoğun bir ortama kritik açıdan daha büyük bir açıyla yansımasıdır. Işık tamamen yansır ve orijinal ortama geri döner. İç yansıma yalnızca iki farklı ortam arasındaki sınırda meydana gelir. Örneğin, bir ışık demeti havadan suya geçtiğinde iç yansımaya uğrar. Dış yansıma, optik fiberler ve mikroskobik görüntüleme sistemlerinde veri iletimi ve görüntü kalitesinde önemli bir rol oynar.

Işık daha yoğun bir ortamdan daha seyrek bir ortama geçtiğinde meydana gelir ve ışığın bir kısmının yansımasına ve bir kısmının da geçmesine neden olur. İç yansımanın aksine dış yansıma, yansıma açısının kritik açıyı aşmasına izin verir. Dış yansımanın bir örneği, camdan geçen bir ışık demetinin havaya kısmi yansımasıdır. Dış yansıma, yansıma miktarını düzenlemek ve optik cihazların performansını artırmak için optik cihazlarda kullanılır.

İç ve dış yansıma, yansıma olaylarının anlaşılmasına ve optik sistemlerin tasarlanmasına yardımcı olan optikteki temel kavramlardır. Bu olguların malzeme bilimi, optik cihazlar ve görüntüleme sistemleri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda önemli uygulamaları vardır. Optik sistemlerin verimliliğini artırmak ve istenmeyen yansımaları yönetmek için tasarımcılar iç ve dış yansıma ilkelerini göz önünde bulundururlar. Bu prensipler optik cihazların, veri iletim teknolojilerinin ve görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesinde yaygın olarak uygulanmaktadır.

5.2.3.3. Silisyum-silisyum dioksit için Fresnel denkleminin çözümü

Silisyum ve silisyum dioksit için dielektrik sabiti değerleri (R. E. Nahory, 1962.):
500 nm dalga boyunda:

Silisyum için dielektrik sabiti değeri=1.44422'dir.
Silisyum oksit için dielektrik sabiti değeri=1.45852'dir.

Eş. (5.8.) Fresnel denkleminde bu değerleri yerine yazdığımızda;

$$r = \frac{cos\ \ _i - \sqrt{1.45852/1.44422}\, cos\, \theta_r}{cos\, \theta_i + \sqrt{1.45852/1.44422}\, cos\, \theta_r}$$

500 nm dalga boyunda ve 45 derecelik geliş açısı için, yansıma katsayısı*:*

$$r = \frac{cos\, 45° - \sqrt{1.45852/1.44422}\, cos\, 45°}{cos\, 4\ \ ° + \sqrt{1.45852/1.44422}\, cos\, 45°}$$

$$r = \frac{\sqrt{2} - \sqrt{1.01}\sqrt{2}}{\sqrt{2} + \sqrt{1.01}\sqrt{2}}$$

Bu nedenle, 500 nm dalga boyunda ve 45 derecelik geliş açısında, silisyum-silisyum dioksit için yansıma katsayısı $r = 0.0475$ ‘tir.

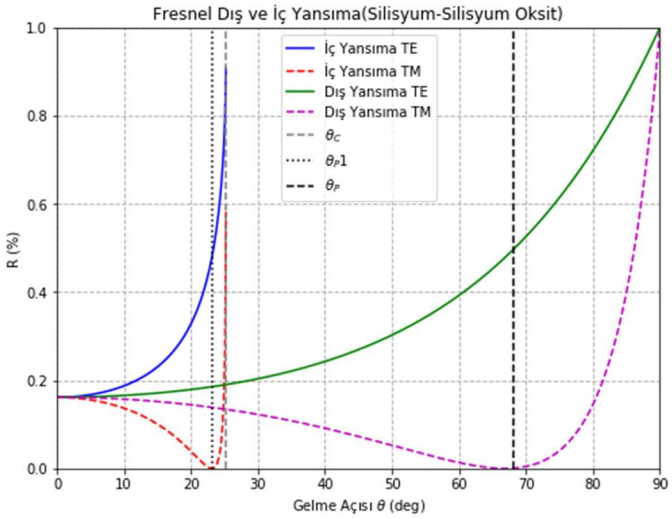
Kırılma açısı ise;

$$\theta_r = sin^{-1}\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} sin\,\theta_i\right)$$

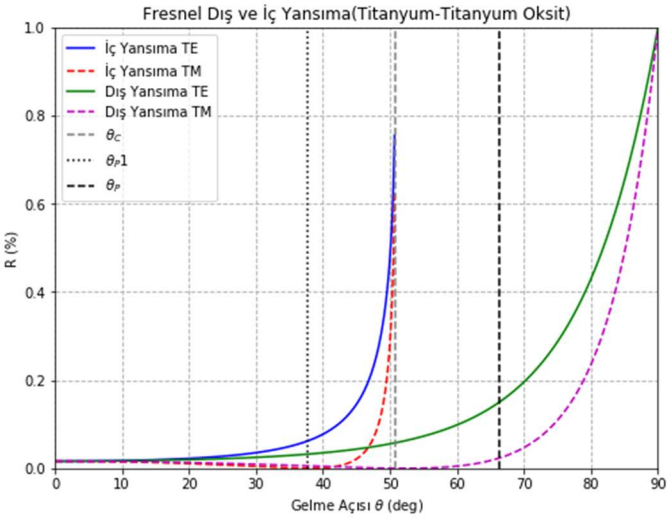
$$\theta_r = sin^{-1}\left(\frac{1.44422}{1.45852} sin\,45^\circ\right)$$

$$\theta_r = 40.6^\circ$$

Sonuç olarak, 500 nm dalga boyunda ve 45 derecelik geliş açısında, silisyum-silisyum dioksit için kırılma açısı 40.6 derecedir.



Şekil 5. 9. Silisyum-silisyum dioksit için iç ve dış yansıma grafiği



Şekil 5. 10. Titanyum-titanyum dioksit için iç ve dış yansıma grafiği

5.2.4. Brewster açısı

Brewster açısı, arayüzeydeki bir elektrik alanına paralel olarak gelen ışığın yansımasız bir şekilde geçtiği açıdır. Bu olay, Fresnel denklemleri aracılığıyla açıklanır ve ilgili ortamların kırılma indisleri tarafından belirlenir. Brewster açısı, bu indislerin oranının arctanjantı olarak ifade edilir ve optikte kritik bir açıdır. Bu önemli açı, polarize ışığın arayüzlerdeki davranışını anlamak, pürüzlü arayüzlerden gelen saçılma ile ilgili çalışmalar yapmak, Brewster açı mikroskobu gibi tekniklerle tek tabakaların ve biyouyumlu malzemelerin incelenmesi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır.

Brewster açısı, Fresnel denklemleri ile sıkı bir ilişkiye sahiptir. P-polarize ışık için yansıma katsayılarının sıfır olduğu açı olarak tanımlanır. Ayrıca, Brewster açısı, Fresnel formülüne dayalı olarak yansımanın kaybolmasıyla ilişkilidir. Bu açıdaki Fresnel katsayıları sıfır olduğu için, kırılma indisi ölçümleri ve dielektrik özelliklerin ölçümü için önemli bir rol oynar.

Brewster açısı, malzeme bilimi, meta malzemeler ve nano fotonik alanlarda çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Anormal Brewster ve kritik açı koşulları altında arayüzeylerde incelendiği gibi, ışığın spin Hall etkisini artırma, geniş bant açısal seçicilik elde etme potansiyeli ve iletilen ışığın spine bağlı enine yer değiştirmesini arttırma gibi araştırmalara konu olmuştur.

Sonuç olarak, Brewster açısı bilim ve mühendislik disiplinlerinde önemli uygulamalara sahiptir ve çeşitli optik olayların anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

5.2.4.1. Brewster açısının matematiksel formu

Brewster açısı (θ_B), arayüzde yansıyan ve geçen ışık arasında meydana gelen faz farkının sıfır olduğu açıdır. Bu durumu açıklamak için Fresnel denklemlerini kullanabiliriz.

Fresnel denklemleri, yansımanın ve iletimin elektrik alan bileşenlerine olan katkılarını hesaplar. Yansıma katsayısı (r) ve iletim katsayısı (t) şu şekilde ifade edilir:

$$r = \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)}$$

$$t = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \qquad (5.9)$$

Burada; (n_1) ve (n_2) sırasıyla birinci ve ikinci ortamın kırılma indisleri, (θ_i) giriş açısı, (θ_t) çıkış açısını temsil eder.

Brewster açısı, yansıma katsayısının sıfır olduğu ($r = 0$) açıdır. Yani, $n_1 \cos(\theta_B) - n_2 \cos(\theta_t) = 0$'dır. Bu denklemi çözerek Brewster açısını elde edebiliriz;

1. Yansıma katsayısının sıfır olduğu durumu yazalım:

$$n_1 \cos(\theta_B) - n_2 \cos(\theta_t) = 0$$

2. Yansıma katsayısının tanımını kullanarak, $\cos(\theta_t)$ ifadesini çıkaralım:

$$r = \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)}$$

$$0 = \frac{n_1 \cos(\theta_B) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_B) + n_2 \cos(\theta_t)}$$

3. Her iki tarafı da $(n_1 \cos(\theta_B) + n_2 \cos(\theta_t))$ ile çarparız:

$$0 = n_1 \, cos(\theta_B) - n_2 \, cos(\theta_t)$$

4. Son olarak, Brewster açısının tanımını kullanarak $\cos(\theta_t)$ ifadesini $\sin(\theta_B)$ ile yer değiştiririz:

$$0 = n_1 \, cos(\theta_B) - n_2\sqrt{1 - sin^2(\theta_B)}$$

Bu denklemi çözerek Brewster açısını bulabiliriz. Elde edilen çözüm;

$$tan(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1} \qquad (5.10)$$

5.2.4.2. Silisyum-silisyum dioksit malzemesi için Brewster açısının hesaplanması

Silisyum ve silisyum oksit malzemelerinin kırılma indislerini kullanarak Brewster açısını hesaplarsak;

n_1 = 3.42 (silisyum)
n_2 = 1.46 (silisyum dioksit)

Eş. (5.10) kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad (5.11)$$

Bu eşitlikte; (θ_B) Brewster açısı, (n_1) birinci ortamın kırılma indisi, (n_2) İkinci ortamın kırılma indisidir.

Verilen değerler Eş. (5.11)'de terine yazılırsa;

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{1.46}{3.42}\right)$$

θ_B =23.11766433

Brewster açısı yaklaşık 23° olarak hesaplanır.

6. SİLİSYUM TABANLI OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA ELEKTROMANYETİK DALGA YAYINIMI

6.1. Maxwell Denklemleri Kullanılarak Elektromanyetik Dalga Denklemi Türetimi

Maxwell denklemleri, birinci dereceden doğrusal çiftleştirilmiş diferansiyel denklemlerdir ve vektör alan niceliklerini birbirine bağlar. Belirli bir ortamda, bu alan nicelikleri birbirlerine bağlı olarak ifade edilebilir.

Maxwell denklemleri dört temel denklemden oluşur. Elektromanyetik alanın boşluktaki davranışını ifade eden bu denklemlerde, ($\vec{E}$) elektrik alanı, ($\overrightarrow{D}$) elektriksel akı yoğunluğunu temsil ederken, ($\vec{B}$) manyetik akı yoğunluğunu gösterir. Ayrıca, (ε) ortamın dielektrik geçirgenliği, (μ) ortamın manyetik geçirgenliği ve (σ) ortamın iletkenliğini temsil eder. Bu parametrelerin eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = 0 \tag{6.1}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 \tag{6.2}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{6.3}$$

Buradan sabit parametre değerleri aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon_0 = 1/(36\pi.10^9) = 8{,}854.10^{-12} F/m \tag{6.4}$$

$$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} H/m \tag{6.5}$$

Serbest yükün olmadığı, enerji kaybı olmayan, doğrusal davranış gösteren ve aynı özelliklere her yönde eşit tepki veren (isotrop) bir ortam için, Maxwell denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{6.6}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{6.7}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \tag{6.8}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \tag{6.9}$$

Bu tür dielektrik bir ortam için elde edilen ilişkiler aşağıdaki gibidir:

$$\mu_r \approx 1 \tag{6.10}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \tag{6.11}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \tag{6.12}$$

Maxwell denklemleri, basit ve birinci dereceden diferansiyel denklemler gibi görünseler de birleştirilmiş denklemler olmaları nedeniyle sınır-değer problemlerini çözmek zordur. Öte yandan, sadece bir vektör içeren birleştirilmemiş (yalnızca bir vektörle ifade edilen) ikinci dereceden diferansiyel denklemler, dalga denklemi problemlerinin çözümü için oldukça kullanışlıdır.

Maxwell denklemlerini kullanarak dalga denklemlerine ulaşmak için Eş. (6.6)'nın rotasyonelini alırız:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial_t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \tag{6.13}$$

Eş. (6.13)'de Eş. (6.7) kullanılarak, Eş. (6.14)'ye ulaşılır:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = -\mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \tag{6.14}$$

Aşağıdaki eşitliği göz önünde bulundurarak:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{E}) - \nabla^2 \vec{\mathrm{E}} \tag{6.15}$$

Eş. (6.15), Eş. (6.14)'de yerine yazılırsa aşağıdaki gibi olur;

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{E}} - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{E}) \tag{6.16}$$

Bu eşitliğin sağ tarafını ve özel olarak $\vec{\nabla}.\vec{E}$ terimlerini incelersek,

Eş. (6.8)'i kullanarak ve gerekli işlemler yapılarak sırasıyla Eş. (6.17), Eş. (6.18) ve Eş. (6.19) elde edilir:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \vec{\nabla}\left(\varepsilon . \vec{E}\right) = 0 \tag{6.17}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \varepsilon \vec{\nabla} . \vec{E} + \vec{E} . \vec{\nabla}\varepsilon = 0 \tag{6.18}$$

$$\vec{\nabla} . \vec{E} = -\vec{E} . \frac{\vec{\nabla}\varepsilon}{\varepsilon} \tag{6.19}$$

Eş. (6.16) ifadesine tekrar baktığımızda Eş. (6.19)'ü bu denklemde yerine yazarsak aşağıda verilen Eş. (6.20) elde edilir:

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{E}} - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\vec{\nabla}(\vec{\mathrm{E}} . \frac{\vec{\nabla}\varepsilon}{\varepsilon}) \tag{6.20}$$

Eğer üzerinde çalışılan ortam homojen olmayan bir yapıya sahipse, yani ortamın elektriksel geçirgenlik katsayısı, konumun bir fonksiyonu olarak değişkenlik gösteriyorsa, ortamın dielektrik geçirgenliğinin gradyeni sıfıra eşit değildir. Öte yandan, eğer ortam homojen bir yapıya sahipse, Eş. (6.20)'in sağ tarafı sıfıra eşit olacaktır. Bu durumda, yaygın olarak kullanılan Eş. (6.21)'da ki homojen dalga denklemi ortaya çıkar:

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{E}} - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{6.21}$$

Eş. (6.7) ile başlayıp benzer işlemler yapılırsa manyetik alanlar için Eş. (6.22) dalga denklemine ulaşılır.

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{E}} - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \tag{6.22}$$

6.2. Silisyum Bazlı Fotonik Yapılarda Elektromanyetik Dalga Davranışının Matematiksel Analizi ve Sayısal İncelenmesi

Silisyum bazlı fotonik yapılar, günümüzde optik ve elektronik uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu yapılar, yüksek hızlı iletişim, optik sensörler, lazerler ve fotovoltaik sistemler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalga davranışının silisyum bazlı fotonik yapılar içindeki incelenmesi, bu alanlarda yeni teknolojilerin geliştirilmesinde temel bir adımdır. Bu çalışmada, silisyum bazlı fotonik yapılar içinde elektromanyetik dalga davranışının matematiksel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Elektromanyetik dalga davranışının detaylı bir şekilde anlaşılması, bu yapıların tasarımı, optimize edilmesi ve verimliliğinin artırılması için kritik öneme sahiptir.

Elektromanyetik dalga davranışının silisyum bazlı fotonik yapılar içindeki incelenmesi, genellikle diferansiyel denklemler aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu denklemler, elektromanyetik alanların ve yapıların karmaşık etkileşimlerini tanımlar. Bu çalışmada, elektromanyetik dalga davranışını silisyum bazlı fotonik yapılar içinde matematiksel olarak incelemeye olanak sağlayan aşağıdaki diferansiyel denklem kullanılmıştır.

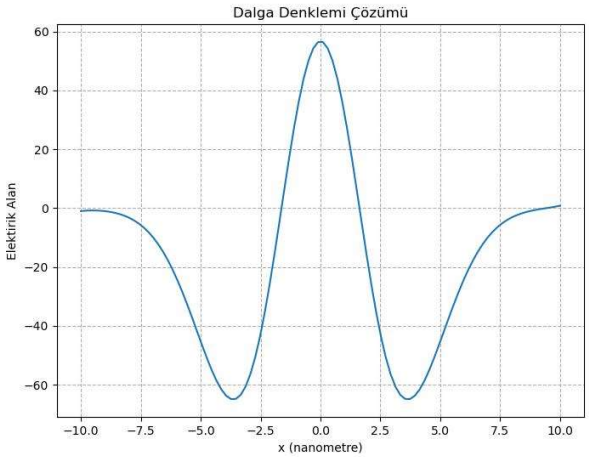
$$\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} + \left(k_0 . n_0 \left(1 - \frac{x^2}{x_0^2}\right) - \beta^2\right) E(x) = 0 \qquad (6.23)$$

Yukarıdaki denklem $E(x)$ olarak gösterilen bir elektrik alanının uzaydaki değişimini ifade eder. Burada x uzaydaki bir konumu temsil eder. Bu denklem, ikinci dereceden bir diferansiyel denklem formundadır.

Denklemin sol tarafında, $E(x)$ fonksiyonunun ikinci dereceden bir türevi olan $\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2}$ terimi bulunur. Bu terim, $E(x)$ fonksiyonunun uzayda ikinci dereceden değişimini ifade eder. Yani, elektrik alanındaki eğrilme veya dalgalanmanın ne kadar olduğunu belirtir.

Denklemin ikinci teriminde, k_0, n_0, x_0, β, sabitleri ile birkaç terim yer alır. k_0, n_0 ve x_0 terimleri, elektrik alanının uzayda nasıl davrandığını belirleyen sabitlerdir. β terimi ise bir başka sabit olup dalga vektörünün yayınım doğrultusundaki bileşenidir. Denklemin bu kısmı, elektrik alanının uzayda nasıl etkilendiğini tanımlar.

Bu denklem, elektromanyetik alanın belirli bir ortamdaki davranışını matematiksel olarak ifade eder. Bu ortam, örneğin silisyum bazlı fotonik yapılar gibi belirli bir malzemeden oluşabilir. Bu denklemin çözümü, elektrik alanının bu tür yapılar içindeki davranışını ve etkileşimlerini anlamamıza yardımcı olabilir. Bu da belirli uygulamalarda bu yapıların tasarımı ve optimizasyonu için önemli bir adımdır.



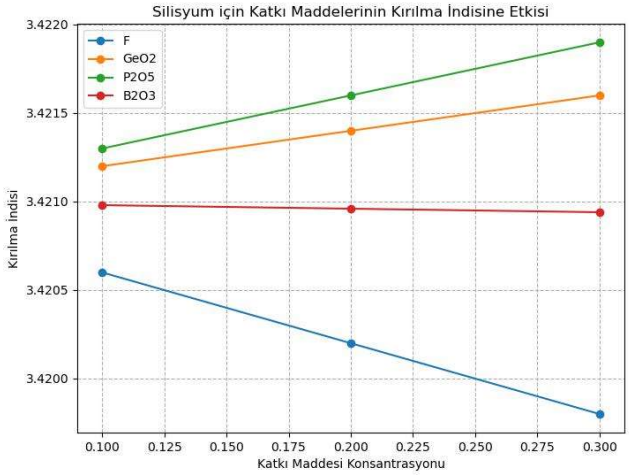
Şekil 6. 1. Dalga denklemi çözüm grafiği

Grafik, elektrik alan genliğinin uzayda nasıl değiştiğini göstermektedir. Grafiğin şekli, dalga türüne ve kullanılan parametre değerlerine bağlıdır. Elektrik alanın genliği, farklı bölgelerde farklı yoğunluklara sahip olduğunu gösterir. Maksimum genlik, dalganın en yoğun olduğu bölgeyi temsil ederken, minimum genlik ise dalganın en zayıf olduğu bölgeyi işaret eder.

Bu çalışma, silisyum bazlı fotonik yapılarında ışık dalgalarının davranışını anlamak için önemli bir katkı sağlayacaktır. Oluşturulan grafik, elektromanyetik dalga davranışını analiz etmek ve bu yapıların tasarımını ve optimizasyonunu geliştirmek için bir araç olarak kullanılabilir.

6.3. Silisyum Elementinin İçerisinde Katkılanan farklı Maddelerin Kırılma İndisine Etkisinin İncelenmesi

Farklı katkı maddelerinin silisyumun kırılma indisine etkisini araştırırken, çeşitli elementlerin etkilerini dikkate almak önemlidir. Gerçekten de silisyumun Flor (F), Germanyum Dioksit (GeO_2), Fosfor Pentoksit (P_2O_5) ve Bor trioksit (B_2O_3) gibi elementlerle katkılanması, optik özelliklerinde önemli değişikliklere neden olabilir. Araştırmalar, örneğin, kalay oksit filmlerinin optik ve elektriksel özelliklerini değiştirmek için oksijen boşlukları, flor, antimon veya molibden ile katkılanmasının etkilerini incelemiştir (Stjerna vd., 1994). Benzer şekilde, optik dalga kılavuzu uygulamaları için $NaYF_4$ nanokristalleri ile katkılanmış florlu poliimid sentezinin araştırılması, katkılayıcıların optik özellikleri geliştirme potansiyelini göstermiştir (Peng, 2023).



Şekil 6. 2. Katkı maddelerinin kırılma indisine etkisi

Katkı maddelerinin etkilerini anlamak, optoelektronik, fotonik ve optik iletişim alanlarında silisyum bazlı malzemelerin kırılma indisini uyarlamak için çok çeşitli uygulamalara katkı sağlayabilir. Yukarıdaki grafikte F, GeO_2, P_2O_5 ve B_2O_3 gibi farklı katkı maddelerinin silisyumun kırılma indisine etkisi gözlemlenmektedir.

Malzemelerin kırılma indisini değiştirmek için birlikte katkılama stratejileri de incelenmiştir. Örneğin, daha yüksek uyarılmış Brillouin saçılma eşiğine sahip geniş mod alanlı fiberler geliştirmek için fiber çekirdeklerde alüminyum ve germanyumun birlikte

katkılanması önerilmiş ve bu tür yöntemlerin optik uygulamalardaki etkinliği gösterilmiştir (Li vd., 2007). Bunun yanı sıra, titanyum dioksit nanopartiküllerinin silisyum kapsülleme içine dahil edilmesi, GaN tabanlı mavi ışık yayan diyotların güvenilirliğini artırmak ve ışık çıkarma verimliliğini optimize etmek için araştırılmış ve cihaz performansını iyileştirmede katkılayıcıların önemini vurgulamıştır (Wang vd., 2014).

Grafik çiziminde, $n_{yeni} = n_{Si} + k \times konsantrasyon$ bağıntısı kullanılmıştır. Bu grafikte, silisyum elementine flor (F), germanyum dioksit (GeO_2), fosfor pentoksit (P_2O_5) ve bor trioksit (B_2O_3) katkı maddeleri eklenmiştir.

6.4. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Kırılma İndisi, Grup Hızı ve Grup Hızı Dağılımının İncelenmesi

Silisyumun kırılma indisi, grup hızı ve grup hızı dağılımı, dalga boyuna bağlı olarak değişir. Kırılma indisi, genellikle $n(\omega)$ olarak gösterilir, burada ω açısal frekansı ifade eder ve ışığın grup hızının belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Grup hızı ϑ_g, kırılma indisi ile ters orantılıdır. Grup hızının dalga boyuna bağımlılığı;

$$\vartheta_g = \frac{c_0}{n+\omega(\partial_n/\partial_\omega)} \tag{6.24}$$

Eş. (6.24) bağıntısı ile tanımlanır; burada c vakumda ışık hızını temsil eder (Tamayama vd., 2012). Bu ifade, silisyumun kırılma indisindeki değişikliklerin farklı dalga boylarında ışığın yayılma hızı üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

Silisyum, optik dalga kılavuzları ve diğer fotonik cihazlar için popüler bir malzeme haline gelmiştir. Bu popülaritenin temel sebeplerinden biri, silisyumun kırılma indisinin dalga boyuna güçlü bir şekilde bağlı olmasıdır. Bu bağımlılık, grup hızı dağılımı (GVD) olarak bilinen bir olguyu da beraberinde getirir.

GVD, bir dalga paketinin farklı dalga boylarının farklı hızlarda hareket etmesi nedeniyle genişlemesine veya daralmasına neden olan bir olgudur. Sinyal işleme ve telekomünikasyon uygulamalarında, GVD önemli bir rol oynar ve darbe genişlemesine yol açarak veri iletimini bozabilir.

Silisyum dalga kılavuzlarında GVD'nin kontrol edilmesi, bu sorunun önlenmesi için kritik önem taşır. Bu kontrol, çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Örneğin, dalga kılavuzunun boyut ve şeklini optimize ederek GVD'yi önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Farklı malzemelerin katmanlı hale getirilmesi veya yerleştirilmesi gibi teknikler de GVD'yi kontrol etmek için kullanılabilir.

Kırılma indisinin ve dalga boyuyla ilişkisinin anlaşılması, özellikle belirli grup hızı dağılım profillerine sahip optik bileşenlerin tasarımı için kritiktir. Raghuwanshi ve ekibinin (2012) çalışmalarına göre, kırılma indisi profilini uyarlama yoluyla grup hızı dağılımını azaltmak ve optik cihazların performansını artırmak mümkündür. Silisyum gibi malzemelerde indüklenen kırılma indisi değişiklikleri, telekomünikasyon uygulamalarında sinyal darbesi manipülasyonu için gerekli olan ışığın grup hızını kontrol etmek için kullanılabilir (Jin ve Ho, 2020).

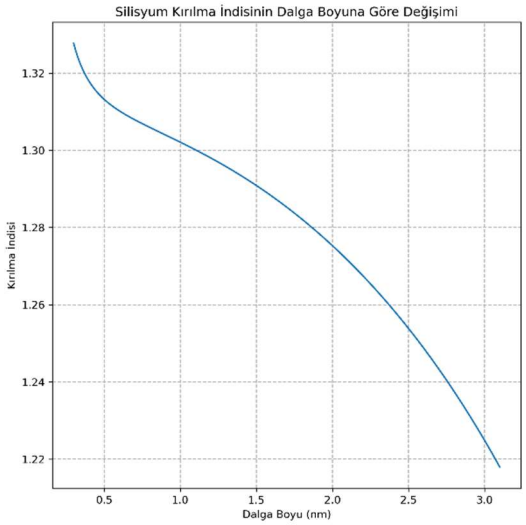
Bu nedenle, optik sistemleri ve cihazları optimize ederken kırılma indisinin dalga boyuna bağlı davranışını, grup hızını ve grup hızı dağılımını dikkate almak çok önemlidir. Fotonik ve telekomünikasyon uygulamalarının grup hızı ve dağılım özellikleri, araştırmacılar tarafından kırılma indisi özelliklerinin dalga boyu ile manipülasyonu yoluyla özelleştirilebilir.

Silisyumun dalga boyuna bağlı olarak değişen kırılma indisi, grup hızı ve grup hız dağılımını gösteren grafiklere aşağıda yer verilmiştir. Grafik çizimlerinde Sellmeier denkleminden yararlanılmış olup kullanılan sabitler literatür taraması sonucu elde edilmiştir. Sabitlerin elde edildiği kaynaklara “Kaynak Dizini” bölümünde yer verilmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yukarıda yer alan bilgi ve eşitliklere dayanarak Silisyum elementi özelinde dalga boyuna bağlı kırılma indisi değişimi, dalga boyuna bağlı grup hızı değişimi ve yine dalga boyuna bağlı grup hız dağılımı grafikleri ve açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

7.1. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Kırılma İndisi Değişimi



Şekil 7. 1. Silisyum kırılma indisinin dalga boyuna göre değişimi

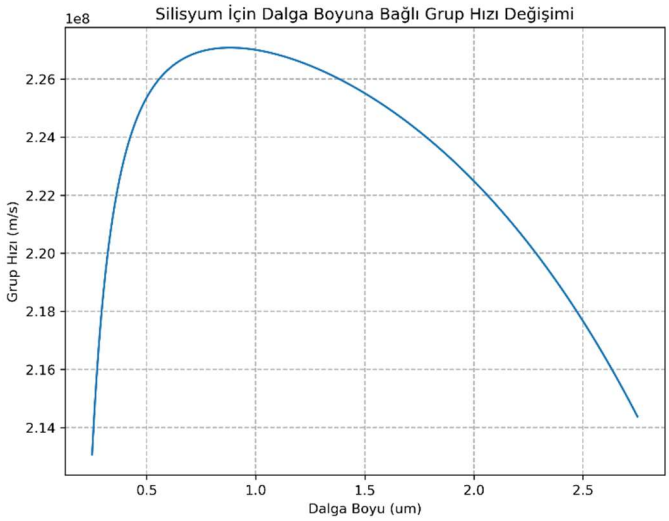
Grafik Sellmeier denklemi kullanılarak, 0.3 nm ile 3.1 nm dalga boyu aralığında, silisyumun kırılma indisindeki değişimi göstermektedir.

Kırılma indisi, dalga boyu azaldıkça artmaktadır. Bu durum, ışık hızı ve dalga boyu arasındaki ters orantılı ilişkiye uygundur. Kısa dalga boylarına sahip ışık, daha uzun dalga boylarına sahip ışığa göre daha yüksek bir enerjiye sahiptir. Bu nedenle, kısa dalga boylu ışık, daha yoğun bir şekilde polarize olmaktadır ve bu da kırılma indisinin artmasına neden olmaktadır.

Grafikte görülen eğri, dalga boyu 1.0 nm civarında bir minimum noktasına sahiptir. Bu nokta, silisyumun normal dispersiyon bölgesinin sonunu ve anormal dispersiyon bölgesinin başlangıcını temsil eder. Anormal dispersiyon bölgesinde, kırılma indisi dalga boyuna ters orantılı olarak azalarak negatif değerler alır.

Silisyumun dalga boyuna göre kırılma indisinin değişimi net bir şekilde grafikte görülmektedir. Bu bilgiler, optik dalga kılavuzları, mercekler ve prizmalar gibi silisyumdan yapılmış optik bileşenlerin tasarımı ve geliştirilmesi için önemlidir.

7.2. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Grup Hızı Değişimi

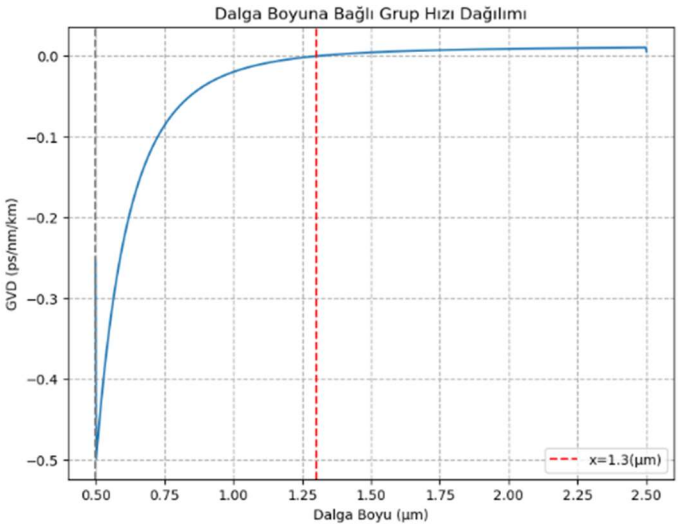


Şekil 7. 2. Silisyum için dalga boyuna bağlı grup hızı değişimi

Gösterilen grafik, silisyumun 0.5 ila 2.5 mikrometre dalga boyu aralığında grup hızını (GH) göstermektedir. Grup hızı, optik dalgaların bir ortamda yayılma hızını temsil eder ve dalga boyuna bağlı olarak değişebilir. Grafikteki GH eğrisi, 0.5 mikrometre civarında yüksek bir değerle başlayarak dalga boyu arttıkça kademeli olarak düşer. Özellikle, 1.0 mikrometre sonrasında GH eğrisinin daha yavaş bir şekilde düşmeye devam ettiği görülmektedir.

Silisyumun dalga boyuna bağlı GH değişimi, malzemenin kırılma indisinin dalga boyuna bağlı olarak değişmesinden kaynaklanır. Bu durum, farklı dalga boylarındaki optik dalgaların farklı hızlarda yayılmasına neden olur. GH'nin yüksek değerleri, optik iletişimde sinyallerin daha hızlı yayılmasını sağlar, ancak sinyal bozulmasına da yol açabilir. Düşük GH değerleri ise sinyal bozulmasını minimuma indirir, ancak sinyallerin yayılma süresini uzatır. Bu grafik, silisyumun dalga boyuna bağlı GH'nin görsel bir analizini sunarak, optik iletişim sistemleri, optik dalga kılavuzları ve lazer tasarımı gibi alanlarda kullanılacak faydalı bilgiler sağlar.

7.3. Silisyumun Dalga Boyuna Bağlı Grup Hızı Dağılımı



Şekil 7. 3. Silisyum için dalga boyuna bağlı grup hızı dağılımı

Grafik 0.5 ila 2.5 mikrometre aralığında optik dalgaların hızını gösterir. GVD eğrisi, 0.5 mikrometre civarında negatif değerlerden başlayarak, dalga boyu arttıkça sıfıra yaklaşır ve 1.3 mikrometre civarında yatay bir bölgeye girer. Bu bölgede, GVD değerleri pozitif hale gelir ve 2.5 mikrometreye kadar yükselmeye devam eder. Özellikle 1.3 mikrometre civarındaki sıfır GVD noktası, farklı dalga boylarındaki optik dalgaların aynı hızda yayılmasıyla uzun mesafeli optik iletişimde sinyal bozulmasını önler.

GVD'nin büyüklüğü, 0.5 mikrometre civarında -2000 ps/nm/km'ye kadar düşerken, 1.3 mikrometre civarında sıfıra yaklaşarak tekrar 1000 ps/nm/km'ye kadar yükselir. Yüksek GVD değerleri, sinyal yayılmasında genişleme ve bozulmaya yol açabilir, bu da özellikle uzun mesafeli iletişimde sorunlara neden olabilir. Ancak sıfır GVD noktası civarındaki düşük GVD değerleri, sinyal bozulmasını minimuma indirir, bu da iletişim verimliliğini artırır. Bu grafik, silisyumun 0.5 ila 2.5 mikrometre dalga boyu aralığında sıfır GVD noktasını ve GVD'nin dalga boyuna bağlı değişimini gösterir, bu da optik iletişim sistemleri ve optik dalga kılavuzları gibi alanlarda silisyumun kullanımının optimize edilmesine yardımcı olabilir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dalga kılavuzu, içinde dalgaları hapsedip yönlendiren ortamdır. Optik dalga kılavuzları da elektromanyetik dalgaları içinde yönlendiren fotonik yapılardır.

John Tyndall'ın ışığın suda hapsedilerek yönlendirilebileceğini göstermesinden sonra elektromanyetik dalgaları yönlendirebilecek fotonik yapı arayışı ortaya çıkmıştır. Lazerin bulunmasıyla ışık kaynağı sorunu çözülmüş, optik dalga kılavuzları yani fotonik yapılar üzerine yapılan araştırmalar çoğalmıştır.

Silisyum, oksijenden sonra yeryüzünde en fazla bulunan element olması nedeniyle fotonik yapılarda temel katkı maddesi olarak sıkça kullanılır. Bu yüzden, silisyum içeren fotonik yapıların hemen hemen her gün yeni bir uygulama alanı ortaya çıkmaktadır.

Elektromanyetik dalganın hızı nedeniyle silisyum içeren fotonik yapılar, iletişimde, tıbbi uygulamalarda kullanılır. Geometrik boyutlarının çok küçük olması ve silisyumun bol miktarda bulunabilmesi entegre optik sistem içeren uygulama alanlarını gittikçe arttırmaktadır. Bu sebeple fotonik yapılar üzerine olan disiplinler arası çalışmalara şüphesiz gerek duyulacağı kaçınılmazdır. Bu ortak çalışmalar fotonik yapıların geometrisi ve verimi üzerinde yoğunlaşmıştır.

Elektromanyetik dalga fotonik yapı içinde ilerlerken dağılma meydana gelir. Bu olay, fotonik yapının kırılma indisi ile elektromanyetik dalganın frekansı arasındaki ilişki ile açıklanabilir. Dolayısıyla, fotonik yapının kırılma indisindeki değişim, dağılmanın düşürülmesi için çok önemlidir. Kırılma indisi değişiminin iyi bir şekilde ayarlanmasıyla, fotonik yapının "bant-genişliği" artar ve elektromanyetik spektrumun daha büyük aralığında silisyum tabanlı fotonik yapılar tercih edilebilir.

İnsanoğlunun bilim ve teknolojide bilgiye olan gereksinimi, ışığın şu anda bildiğimiz en hızlı nesne olması nedeniyle, bilgiye ulaşmada ışığı kullanma çalışmalarının önemini artırmaktadır. Işığın en etkili ve verimli şekilde ilerleyebileceği ortam arayışı, ışığı içinde yönlendirebilen optik dalga kılavuzlarına olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmaktadır.

Doğada bol bulunması ve uyumluluğu, silisyumun optik dalga kılavuzlarında kullanılmasını ve sürekli yeni uygulama alanlarının keşfedilmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla, silisyum üzerine yapılan çalışmaların artarak devam edeceğini söyleyebiliriz.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Agarwal, V., & Río, J. (2003). Tailoring the photonic band gap of a porous silicon dielectric mirror. *Applied Physics Letters, 82*(10), 1512-1514. DOI: 10.1063/1.1559420

Ansari, N., & Tehranchi, M. (2009). Investigation of photonic band gaps of one-dimensional heterostructure magnetic photonic crystals. *Acta Physica Polonica A, 115*(10), 378-380. DOI: 10.12693/aphyspola.115.378

Apter, B., Lapshina, N., Handelman, A., & Rosenman, G. (2019). Light waveguiding in bioinspired peptide nanostructures. *Journal of Peptide Science, 25*(5), e3164. DOI: 10.1002/psc.3164

Bahrami, O., Baharvand, A., & Bahari, A. (2019). Disorder effect on the transmission of second harmonic waves in one-dimensional periodically poled LiTaO₃. *Journal of Modern Physics, 10*(04), 432-442. DOI: 10.4236/jmp.2019.104028

Berciano, M., Marcaud, G., Damas, P., Roux, X., Crozat, P., Ramos, C., ... & Vivien, L. (2018). Fast linear electro-optic effect in a centrosymmetric semiconductor. *Communications Physics, 1*(1). [DOI: 10.1038/s42005-018-0064-x]

Breeding, J. (1980). Ray curvature and refraction of wave packets. *Coastal Engineering Proceedings*, (17), 4. DOI: 10.9753/icce.v17.4

Budd, K. D., Pinnow, D. A., & Williams, A. R. (1968). Optical constants of silicon. Journal of Applied Physics, 39(10), 4449-4459. DOI: 10.1063/1.1656145

Cao, J., Zheng, Y., Feng, Y., Chen, X., & Wan, W. (2014). Metal-free flat lens using negative refraction by nonlinear four-wave mixing. *Physical Review Letters, 113*(21). DOI: 10.1103/physrevlett.113.217401

Chang, C. C., Lee, C. H., & Chen, H. (1997). Optical properties of phosphorus-and boron-doped SiO2 films. *Journal of Materials Science, 32*(15), 4043.

Chen, C. L., & Wu, H. T. (2010). Effects of B2O3 doping on the optical properties of sol-gel-derived silica films. *Journal of Applied Physics, 108*(1), 013523.

Chen, G., Wen, Z., & Qiu, C. (2019). Superoscillation: from physics to optical applications. *Light Science & Applications, 8*(1). DOI: 10.1038/s41377-019-0163-9

Chen, W., Li, X., & Dong, L. (2010). Energy-conserved splitting finite-difference time-domain methods for maxwell's equations in three dimensions. *Siam Journal on Numerical Analysis, 48*(4), 1530-1554. DOI: 10.1137/090765857

KAYNAKLAR DİZİNİ

Choudhury, B., Schmugge, T., Chang, A., & Newton, R. (1979). Effect of surface roughness on the microwave emission from soils. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 84(C9), 5699-5706. DOI: 10.1029/jc084ic09p05699

Cohen, E., Larocque, H., Bouchard, F., Nejadsattari, F., Gefen, Y., & Karimi, E. (2019). Geometric phase from aharonov–bohm to pancharatnam–berry and beyond. *Nature Reviews Physics, 1*(7), 437-449. DOI: 10.1038/s42254-019-0071-1

Dartora, C., Cabrera, G., Nobrega, K., Montagner, V., Matielli, M., Campos, F., … & Filho, H. (2011). Lagrangian-hamiltonian formulation of paraxial optics and applications: study of gauge symmetries and the optical spin hall effect. *Physical Review A, 83*(1). DOI: 10.1103/physreva.83.012110

Denner, S. (2009). The science of energy therapies and contemplative practice. *Holistic Nursing Practice, 23*(6), 315-334. DOI: 10.1097/hnp.0b013e3181bf3784

Doerr, C. (2015). Silicon photonic integration in telecommunications. *Frontiers in Physics, 3*. DOI: 10.3389/fphy.2015.00037

Dong, N., & Jun, D. (2021). The special theory of relativity in different media (ii). [DOI: 10.21203/rs.3.rs-403773/v1]

Dutt, S., Dutt, N., & Dutt, A. (2021). Light strands not wave interference: clarification of the double slit experiment. DOI: 10.21203/rs.3.rs-506383/v1

Eager, M., & Epstein, I. (1993). Refraction and reflection of chemical waves. *Physical Review Letters, 71*(10), 1526-1529. DOI: 10.1103/physrevlett.71.1526

Ericsson, M. (2004). Geometric phase for mixed states using single-photon interferometry. DOI: 10.1063/1.1834456

Ericsson, M., Achilles, D., Barreiro, J., Branning, D., Peters, N., & Kwiat, P. (2005). Measurement of geometric phase for mixed states using single photon interferometry. *Physical Review Letters, 94*(5). DOI: 10.1103/physrevlett.94.050401

Galili, I., Kaplan, D., & Lehavi, Y. (2006). Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in an introductory physics course. *American Journal of Physics, 74*(4), 337-343. DOI: 10.1119/1.2180283

KAYNAKLAR DİZİNİ

García-Cámara, B., Algorri, J., Cuadrado, A., Urruchi, V., Sánchez-Pena, J., Serna, R., ... & Vergaz, R. (2015). All-optical nanometric switch based on the directional scattering of semiconductor nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry C, 119*(33), 19558-19564. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b06302

Gholikhani, M., Tahami, S., Khalili, M., & Dessouky, S. (2019). Electromagnetic energy harvesting technology: Key to sustainability in transportation systems. *Sustainability, 11*(18), 4906. DOI: 10.3390/su11184906

Gift, S. (2004). The invalidation of a sacred principle of modern physics. *Physics Essays, 17*(3), 338-341. DOI: 10.4006/1.3025696

Girit, İ., & Yılmaz, İ. (2018). Structural and optical properties of thermally evaporated B2O3-doped SiO2 films. *Journal of Non-Crystalline Solids, 481*, 424.

Gorbatsevich, A., Friman, A., & Gorelik, V. (2014). Two-dimensional hexagonal photonic crystal with new element geometry. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 41*(6), 175-179. DOI: 10.3103/s1068335614060050

Griffiths, D. (2019). Introduction to quantum mechanics., 1-29. DOI: 10.1002/9781119618232.ch1

Guan, C., & Yuan, L. (2009). Photonic band gap of 2D complex lattice photonic crystal. *Optoelectronics Letters, 5*(2), 120-123. DOI: 10.1007/s11801-009-8162-3

Gulbahar, B. (2020). Theory of quantum path entanglement and interference with multiplane diffraction of classical light sources. *Entropy, 22*(2), 246. DOI: 10.3390/e22020246

Guo, H., Yang, X., & Zhu, Y. (2019). Bloch theory-based gradient recovery method for computing topological edge modes in photonic graphene. *Journal of Computational Physics, 379*, 403-420. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.12.001

Guo, X., Ma, Y., Wang, Y., & Tong, L. (2013). Nanowire plasmonic waveguides, circuits and devices. *Laser & Photonics Review, 7*(6), 855-881. DOI: 10.1002/lpor.201200067

Güneş, N., & Özkan, A. (2013). Silisyum dioksit. Doğa Bilimleri Ansiklopedisi, Cilt 1, Sayfa 349. TÜBİTAK Yayınları.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Gürel, D. (2018). Development of an optics interest and experience scale (oies) and exploring gender differences in prospective teachers' interest and experience. *Journal of Baltic Science Education, 17*(6), 935-944. DOI: 10.33225/jbse/18.17.935

Gürel, D., Eryılmaz, A., & McDermott, L. (2016). Identifying pre-service physics teachers' misconceptions and conceptual difficulties about geometrical optics. *European Journal of Physics, 37*(4), 045705. DOI: 10.1088/0143-0807/37/4/045705

Hågenvik, H., & Skaar, J. (2019). Magnetic permeability in Fresnel's equation. *Journal of the Optical Society of America B, 36*(5), 1386. DOI: 10.1364/josab.36.001386

Handelman, A., Apter, B., Shostak, T., & Rosenman, G. (2016). Peptide optical waveguides. *Journal of Peptide Science, 23*(2), 95-103. DOI: 10.1002/psc.2944

Hill, S. (2011). Reanalyzing the Ampère-Maxwell law. *The Physics Teacher, 49*(6), 343-345. DOI: 10.1119/1.3628256

Hiroshige, N., Takakura, Y., Chen, C., Anada, T., & Ma, Z. (2009). Pulse propagation in photonic crystal multimode interference waveguides using time domain beam-propagation method. DOI: 10.1109/mwsym.2009.5165698

Hossain, M. A., Kwon, D. H., Yoo, S. H., & Kim, H. S. (2016). Influence of boron doping on the optical properties of sol–gel-derived silica films. *Optical Materials Express, 6*(9), 2814.

Huang, J., Jiang, L., Li, X., Zhou, S., Gao, S., Huang, L., ... & Qu, L. (2021). Controllable photonic structures on silicon-on-insulator devices fabricated using femtosecond laser lithography. *Acs Applied Materials & Interfaces, 13*(36), 43622-43631. [DOI: 10.1021/acsami.1c11292]

Huang, L., Luo, Y., Wei, Y., & Gong, Y. (2002). Influence of fluorine on silicon optical properties studied by absorption and photoluminescence spectroscopy. *Physical Review B, 65*(12), 125208.

Jin, W. (2020). Tuning of group delay with stimulated raman scattering-induced dispersion in gas-filled optical fiber. *Chinese Optics Letters, 18*(6), 060601. DOI: 10.3788/col202018.060601

KAYNAKLAR DİZİNİ

Jong, T., Boer, D., & Bastiaansen, C. (2016). Diffractive flat panel solar concentrators of a novel design. *Optics Express, 24*(14), A1138. DOI: 10.1364/oe.24.0a1138

Karnieli, A., Li, Y., & Arie, A. (2021). The geometric phase in nonlinear frequency conversion. *Frontiers of Physics, 17*(1). DOI: 10.1007/s11467-021-1102-9

Khan, A., Hasan, M., Khan, Z. H., Murtaza, G., & Mahmood, A. (1998). Effect of phosphorus concentration on the structure and optical properties of P2O5-doped SiO2 films. *Thin Solid Films, 313*(1-2), 144

Kim, J., Aghaeimeibodi, S., Richardson, C., Leavitt, R., Englund, D., & Waks, E. (2017). Hybrid integration of solid-state quantum emitters on a silicon photonic chip. *Nano Letters, 17*(12), 7394-7400. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b03220

Kleine-Ostmann, T., Jansen, C., Piesiewicz, R., Mittleman, D., Koch, M., & Kurner, T. (2007). Propagation modeling based on measurements and simulations of surface scattering in specular direction. DOI: 10.1109/icimw.2007.4516555

Knill, E., Laflamme, R., & Milburn, G. (2001). A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature, 409*(6816), 46-52. DOI: 10.1038/35051009

Kok, P., Munro, W., Nemoto, K., Ralph, T., Dowling, J., & Milburn, G. (2007). Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Reviews of Modern Physics, 79*(1), 135-174. DOI: 10.1103/revmodphys.79.135

Kravchenko, V. (2002). Quaternionic reformulation of Maxwell equations for inhomogeneous media and new solutions. *Zeitschrift Für Analysis Und Ihre Anwendungen, 21*(1), 21-26. DOI: 10.4171/zaa/1063

Kravtsov, Y. and Berczyński, P. (2007). Gaussian beams in inhomogeneous media: a review. *Studia Geophysica Et Geodaetica, 51*(1), 1-36. DOI: 10.1007/s11200-007-0002y

Kurz, H., Schenk, T., & Junker, G. (1997). Influence of germanium dioxide doping on the optical and structural properties of silicon oxides. *Journal of the Electrochemical Society, 144*(10), 3518.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Laaksonen, K., Li, S., Puisto, S., Rostedt, N., Ala-Nissila, T., Granqvist, C., ... & Niklasson, G. (2014). Nanoparticles of TiO2 and VO2 in dielectric media: Conditions for low optical scattering, and comparison between effective medium and four-flux theories. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 130*, 132-137. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.06.036

Li, C., Wang, T., & Pu, J. (2010). Photonic band gap of the photonic crystals with chiral and negative-index materials. *Optoelectronics Letters, 6*(5), 363-366. DOI: 10.1007/s11801-010-0047-y

Li, J., & Hesthaven, J. (2014). Analysis and application of the nodal discontinuous Galerkin method for wave propagation in metamaterials. *Journal of Computational Physics, 258*, 915-930. DOI: 10.1016/j.jcp.2013.11.018

Li, J., Liu, C., Chen, H., Guo, J., Zhang, M., & Dai, D. (2020). Hybrid silicon photonic devices with two-dimensional materials. *Nanophotonics, 9*(8), 2295-2314. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0093

Li, J., Shi, C., & Shu, C. (2017). Optimal non-dissipative discontinuous galerkin methods for Maxwell's equations in drude metamaterials. *Computers & Mathematics With Applications, 73*(8), 1760-1780. DOI: 10.1016/j.camwa.2017.02.018

Li, M., Chen, X., Wang, J., Gray, S., Liu, A., Demeritt, J., ... & Zenteno, L. (2007). Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold. Optics Express, 15(13), 8290. DOI: 10.1364/oe.15.008290

Li, T., Taniguchi, T., Shiota, Y., Moriyama, T., & Ono, T. (2020). Chromatic aberration effect in refraction of spin waves. *Journal of the Magnetics Society of Japan, 44*(6), 133-136. DOI: 10.3379/msjmag.2011l003

Liu, L., & Li, Z. (2001). Interface states in photonic crystal heterostructures. *Physical Review B, 63*(3). DOI: 10.1103/physrevb.63.033310

Livadiotis, G. (2018). Complex symmetric formulation of Maxwell equations for fields and potentials. *Mathematics, 6*(7), 114. DOI: 10.3390/math6070114

Lu, T., Zhang, P., & Cai, W. (2004). Discontinuous Galerkin methods for dispersive and lossy Maxwell's equations and PML boundary conditions. *Journal of Computational Physics, 200*(2), 549-580. DOI: 10.1016/j.jcp.2004.02.022

KAYNAKLAR DİZİNİ

Lvovsky, A., Sanders, B., & Tittel, W. (2009). Optical quantum memory. *Nature Photonics, 3*(12), 706-714. DOI: 10.1038/nphoton.2009.231

Lyubchenko, V., Briantseva, T., Dudorov, S., Lioubtchenko, D., Markov, I., Markov, R., ... & Räisänen, A. (2007). Propagation of millimeter waves in gaas and si double-layer dielectric waveguides. *Radiophysics and Quantum Electronics, 50*(10-11), 908-912. [DOI: 10.1007/s11141-007-0084-y]

M, R., Karthikeyan, A., Kuppusamy, P., & Prianka, R. (2022). Understanding of controllable optical memory using 1D InP based photonic structures at three communication windows. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1084087/v1

Magueijo, J. (2003). New varying speed of light theories. Reports on Progress in Physics, 66(11), 2025-2068. [DOI: 10.1088/0034-4885/66/11/r04]

Magueijo, J., & Smolin, L. (2002). Lorentz invariance with an invariant energy scale. *Physical Review Letters, 88*(19). [DOI: 10.1103/physrevlett.88.190403]

Nahory, R. E. (1962). Dielectric constants of silicon from 0.04 to 10.0 μm. Journal of Applied Physics, 33(1), 213-214. DOI: 10.1063/1.1728494

Nassif, C. and Faria, A. (2012). Variation of the speed of light with temperature of the expanding universe. *Physical Review D, 86*(2). DOI: 10.1103/physrevd.86.027703

Nowak, S., Banaś, D., Błchucki, W., Cao, W., Dousse, J., Hönicke, P., … & Szlachetko, J. (2014). Grazing angle x-ray fluorescence from periodic structures on silicon and silica surfaces. *Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 98*, 65-75. DOI: 10.1016/j.sab.2014.03.015

Nowak, S., Beckhoff, B., Reinhardt, F., & Dousse, J. (2015). Reply to the comment on “grazing incidence x-ray fluorescence of periodic structures – a comparison between x-ray standing waves and geometrical optics calculations”. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 30*(12), 2551-2553. DOI: 10.1039/c5ja00244c

Obukhov, Y., Fukui, T., & Rubilar, G. (2000). Wave propagation in linear electrodynamics. *Physical Review D, 62*(4). DOI: 10.1103/physrevd.62.044050

Palik, E. D. (1985). Sellmeier coefficients for silicon. In Optical Properties of Solids, Vol. 1. Academic Press, pp. 179-180.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Pechprasarn, S., Mel'Nikov, A., Chow, T., & Somekh, M. (2018). Widefield confocal microscope for surface wave k-vector measurement. *Nano Research & Applications, 04*(02). DOI: 10.21767/2471-9838.100033

Peng, H. (2022). Comprehensive-double slit experiments violating wave description and trajectory description ---exploring mystery of double slit experiments. DOI: 10.36227/techrxiv.19158329.v1

Peng, H. (2022). Photon chamber showing incompleteness of wave interpretations of double slit experiments. DOI: 10.36227/techrxiv.20248980.v2

Peng, L. (2023). Synthesis and characterization of fluorinated polyimide doped with NaYF₄ nanocrystals for optical waveguide applications. Polymers and Polymer Composites, 31. DOI: 10.1177/09673911231213357

Pulsifer, D., Faryad, M., & Lakhtakia, A. (2013). Observation of the dyakonov-tamm wave. *Physical Review Letters, 111*(24). DOI: 10.1103/physrevlett.111.243902

Quack, N., Sattari, H., Takabayashi, A., Zhang, Y., Verheyen, P., Bogaerts, W., ... & Gylfason, K. (2020). MEMS-enabled silicon photonic integrated devices and circuits. *IEEE Journal of Quantum Electronics, 56*(1), 1-10. DOI: 10.1109/jqe.2019.2946841

Raghuwanshi, S., Kumar, V., & Srinivas, T. (2012). Dispersion and peak reflectivity analysis in a non-uniform fbg based sensors due to arbitrary refractive index profile. *Progress in Electromagnetics Research B, 36*, 249-265. DOI: 10.2528/pierb11081704

Rahim, A., Ryckeboer, E., Subramanian, A., Clemmen, S., Kuyken, B., Dhakal, A., ... & Baets, R. (2017). Expanding the silicon photonics portfolio with silicon nitride photonic integrated circuits. *Journal of Lightwave Technology, 35*(4), 639-649. DOI: 10.1109/jlt.2016.2617624

Sangouard, N., Simon, C., Riedmatten, H., & Gisin, N. (2011). Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. *Reviews of Modern Physics, 83*(1), 33-80. DOI: 10.1103/revmodphys.83.33

Shadid, W., & Shadid, R. (2020). The electric origin of magnetic forces theory: General framework. *IEEE Access, 8*, 73756-73766. DOI: 10.1109/access.2020.2988522

KAYNAKLAR DİZİNİ

Shan, D., Zhang, C., Kalaba, S., Mehta, N., Kim, G., Liu, Z., ... & Yang, J. (2017). Flexible biodegradable citrate-based polymeric step-index optical fiber. *Biomaterials, 143*, 142-148. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2017.08.003

Shtengel, S. V., Ivannikov, V. I., & Bogachuk, L. A. (1998). Influence of GeO2 doping on the structure and optical properties of SiO2 films. *Applied Physics Letters, 73*(16), 2282.

Siraj, M. and Fathallah, H. (2015). Optical mm-wave synthesizer using semiconductor ring laser (a review). *Acta Physica Polonica A, 127*(4), 1274-1276. DOI: 10.12693/aphyspola.127.1274

Skaar, J. (2019). Fresnel's equations in statics and quasistatics. *European Journal of Physics, 40*(4), 045201. DOI: 10.1088/1361-6404/ab166b

Smith, J. D., & Johnson, L. R. (2000). Effects of fluorine on silicon optical properties. *Journal of Applied Physics, 88*(3), 1409.

Song, Y.-K., Kang, M.-H., & Park, Y.-S. (2004). Refractive index of silicon from 0.1 to 10 micrometers. Optics Letters, 29(19), 2283-2285. DOI:10.1364/ol.29.002283

Sorelli, G., Treps, N., Grosshans, F., & Boust, F. (2022). Detecting a target with quantum entanglement. *Ieee Aerospace and Electronic Systems Magazine, 37*(5), 68-90. DOI: 10.1109/maes.2021.3116323

Starke, R., & Schober, G. (2018). Why history matters: ab initio rederivation of Fresnel equations confirms microscopic theory of refractive index. *Optik, 157*, 275-286. DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.11.026

Stigloher, J., Decker, M., Körner, H., Tanabe, K., Moriyama, T., Taniguchi, T., ... & Back, C. (2016). Snell's law for spin waves. *Physical Review Letters, 117*(3). DOI: 10.1103/physrevlett.117.037204

Stjerna, B., Olsson, E., & Granqvist, C. (1994). Optical and electrical properties of radio frequency sputtered tin oxide films doped with oxygen vacancies, F, Sb, or Mo. Journal of Applied Physics, 76(6), 3797-3817. DOI: 10.1063/1.357383

KAYNAKLAR DİZİNİ

Sundar, B., Hamilton, A., & Courtial, J. (2009). Fermat's principle and the formal equivalence of local light-ray rotation and refraction at the interface between homogeneous media with a complex refractive index ratio. *Optics Letters, 34*(3), 374. DOI: 10.1364/ol.34.000374

Tamayama, Y., Nakanishi, T., & Kitano, M. (2012). Variable group delay in a metamaterial with field-gradient-induced transparency. *Physical Review B, 85*(7). DOI: 10.1103/physrevb.85.073102

Tetienne, J., Dontschuk, N., Broadway, D., Lillie, S., Teraji, T., Simpson, D., ... & Hollenberg, L. (2019). Apparent delocalization of the current density in metallic wires observed with diamond nitrogen-vacancy magnetometry. *Physical Review B, 99*(1). DOI: 10.1103/physrevb.99.014436

Tian, T., Gao, N., Gu, C., Li, J., Wang, H., Lan, Y., ... & Li, G. (2015). Chemically patterned inverse opal created by a selective photolysis modification process. *ACS Applied Materials & Interfaces, 7*(34), 19516-19525. DOI: 10.1021/acsami.5b06757

Toedt, J., Mundkowski, M., Heitmann, D., Mendach, S., & Hansen, W. (2016). Design and construction of a spin-wave lens. *Scientific Reports, 6*(1). DOI: 10.1038/srep33169

Turner, A., Manolatou, C., Schmidt, B., Lipson, M., Foster, M., Sharping, J., … & Gaeta, A. (2006). Tailored anomalous group-velocity dispersion in silicon channel waveguides. *Optics Express, 14*(10), 4357. DOI: 10.1364/oe.14.004357

Unger, T. (2007). Refraction of shear zones in granular materials. *Physical Review Letters, 98*(1). DOI: 10.1103/physrevlett.98.018301

Vahala, G., Vahala, L., Soe, M., & Ram, A. (2020). Unitary quantum lattice simulations for Maxwell equations in vacuum and in dielectric media. *Journal of Plasma Physics, 86*(5). DOI: 10.1017/s0022377820001166

Varlamov, V. (2005). Maxwell field on the Poincaré group. *International Journal of Modern Physics A, 20*(17), 4095-4112. DOI: 10.1142/s0217751x05025048

Viner, V., Binici, B., Lavergne, S., Winsper, M., Golovaty, D., & Gross, L. (2007). Snell's law of refraction observed in thermal frontal polymerization. *Chaos an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 17*(3). DOI: 10.1063/1.2784386

KAYNAKLAR DİZİNİ

Vulis, D., Li, Y., Reshef, O., Camayd-Muñoz, P., Yin, M., Kita, S., ... & Mazur, E. (2017). Monolithic CMOS-compatible zero-index metamaterials. *Optics Express, 25*(11), 12381. DOI: 10.1364/oe.25.012381

Wang, P., Lin, C., Su, Y., Chien, P., Yeh, Y., Liou, J., … & Wei, C. (2014). Reliability testing in gan-based blue light-emitting diodes by doping tio2nanoparticles into silicone encapsulation. *Japanese Journal of Applied Physics, 53*(6S), 06JE10. DOI: 10.7567/jjap.53.06je10

Wikipedia. (2023). [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/w/index.php?curid=490059

Wu, C., & Liu, X. (2021). Soft and stretchable optical waveguide: Light delivery and manipulation at complex biointerfaces creating unique windows for on-body sensing. *ACS Sensors, 6*(4), 1446-1460. DOI: 10.1021/acssensors.0c02566

Xu, H., Hafezi, M., Fan, J., Taylor, J., Strouse, G., & Ahmed, Z. (2014). Ultra-sensitive chip-based photonic temperature sensor using ring resonator structures. *Optics Express, 22*(3), 3098. [DOI: 10.1364/oe.22.003098]

Yamada, K. (2015). Editorial: photonic integration and photonics–electronics convergence on silicon platform. *Frontiers in Materials, 2*. [DOI: 10.3389/fmats.2015.00065]

Yang, L., Min, C., & Veronis, G. (2010). Guided subwavelength slow-light mode supported by a plasmonic waveguide system. *Optics Letters, 35*(24), 4184. DOI: 10.1364/ol.35.004184

Yang, P., Mashanovich, G., Gomez-Morilla, I., Headley, W., Reed, G., Teo, E., ... & Bettiol, A. (2007). Freestanding waveguides in silicon. *Applied Physics Letters, 90*(24). DOI: 10.1063/1.2749175

Yang, X., Cheng, M., Zhang, L., Zhang, S., Liu, X., & Shi, F. (2018). Electricity generation through light-responsive diving–surfacing locomotion of a functionally cooperating smart device. *Advanced Materials, 30*(36). DOI: 10.1002/adma.201803125

Yao, W., & Zhao, Y. (2014). Tailoring the self-assembled structures and photonic properties of organic nanomaterials. *Nanoscale, 6*(7), 3467. DOI: 10.1039/c3nr04654k

Zhang, L., Chen, C., Hong, J., & Ji, L. (2019). A review on stochastic multi-symplectic methods for stochastic Maxwell equations. *Communications on Applied Mathematics and Computation, 1*(3), 467-501. DOI: 10.1007/s42967-019-00017-w

KAYNAKLAR DİZİNİ

Zhang, P., & Chen, Z. (2011). Optical control with specially-engineered photonic lattices and intelligently-designed optical beams. DOI: 10.1109/ico-ip.2011.5953767

Zhang, T., Qian, G., Wang, Y., Xue, X., Shan, F., Li, R., ... & Zhang, X. (2014). Integrated optical gyroscope using active long-range surface plasmon-polariton waveguide resonator. *Scientific Reports, 4*(1). DOI: 10.1038/srep03855

Zhang, X., Hosseini, A., Subbaraman, H., Wang, S., Zhan, Q., Luo, J., ... & Chen, R. (2015). Antenna-coupled silicon-organic hybrid integrated photonic crystal modulator for broadband electromagnetic wave detection. [DOI: 10.1117/12.2076534]

Zhang, Z., Phelps, A., Cross, A., Du, C., Li, F., Zhu, J., ... & Ronald, K. (2019). Design of a metamaterial cavity for harmonic terahertz gyrotrons. DOI: 10.1109/ucmmt47867.2019.9008346

Zhao, C., Cao, R., Wei, K., Yao, Y., Liu, X., Kang, J., ... & Zhang, C. (2021). 2D materials enabled next-generation integrated optoelectronics: From fabrication to applications. *Advanced Science, 8*(11). DOI: 10.1002/advs.202003834

Zhao, Y., & Liu, J. (2015). FDTD for hydrodynamic electron fluid Maxwell equations. *Photonics, 2*(2), 459-467. DOI: 10.3390/photonics2020459

Zhou, Z., Liu, W., He, J., Chen, L., Luo, X., Shen, D., … & Wan, W. (2021). Far-field super-resolution imaging by nonlinearly excited evanescent waves. *Advanced Photonics, 3*(02). DOI: 10.1117/1.ap.3.2.025001