	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 08-09-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 08-06-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.337281	

Fotonik kristallerde yüzey kipleri özelliklerini kullanarak bağlaştırıcı, demet bölücü ve algılayıcı tasarımları

Fulya Bağcı^{*1}, Öznur Çapraz², Barış Akaoglu³

ÖZ

Bu çalışmada Silisyum fotonik kristallerde yüzey düzeni değişikliği yaratılarak, elektromanyetik dalgaların hava ortamından dalga kılavuzuna bağlaşma özellikleri iyileştirilmiş ve fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışından havaya demet saçılım profilleri incelenerek odaklayıcı, 1×2 ve 1×3'lük demet bölücüler tasarlanmıştır. Fotonik kristal giriş yüzeyine Silisyum çubuklardan oluşan yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklendiğinde, elektromanyetik dalgaların yüzey tabakasıyla oluşturulmuş olan yüzey kipine bağlaşma verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyinde dalga kılavuzunu çevreleyen Silisyum çubuklarda yarıçap değişimi ve nokta kusurları oluşturulduğunda elektromanyetik dalgaların odaklanabildiği veya eşit güçlerde saçılabildiği görülmüştür. İlk defa bu çalışma ile yarıçap değişimi kademeli olarak oluşturulduğunda istenmeyen yan lobların şiddetinde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyindeki belirli periyottaki çubuklarda kırılma indisi değişimi yaratılarak kırılma indisi sensörü uygulamasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristal, yüzey kipi, enine elektrik ve enine manyetik dalgalar, odaklayıcı, demet bölücü, algılayıcı

Coupler, beam splitter and Sensor designs by using the properties of surface modes in photonic crystals

ABSTRACT

In this study, coupling properties of electromagnetic waves from air medium to waveguide are improved by creating surface corrugation in silicon photonic crystals and a focuser, 1×2 and 1×3 beam splitters are designed by examining beam scattering properties from photonic crystal waveguide exit to air. When a surface layer and a diffraction grating layer consisting of silicon rods are added to the input surface of photonic crystals, it has been observed that, the surface mode coupling efficiency of electromagnetic waves increases. It has been obtained that when radius variation and point defects are formed in the silicon rods surrounding the waveguide at the exit surface of the photonic crystal waveguide, electromagnetic waves can be focused or scattered at equal powers. For the first time by this study a decrease in the insensity of unwanted side lobes has been detected when radial change is gradually established. In addition, studies

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye – fbagci@eng.ankara.edu.tr

² oznurcapraz@hotmail.com

³ akaoglu@eng.ankara.edu.tr

regarding a refractive index sensor have been carried out by creating a change in the refraction index at the rods located in a certain periodicity at the exit surface of the photonic crystal waveguide.

Keywords: Surface corrugated photonic crystals, surface mode, transverse electric and transverse magnetic waves, focuser, beam splitter, sensor

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dalga boyu altı bir metalik yarıktan geçerken ışık çok kez kırınımına uğradığından iletim çok azdır. Fakat metalik yarık periyodik bir desen alacak şekilde tasarlandığında üretilen yüzey plazmonlarının etkisiyle iletimin arttığı geçmişte çok sayıda araştırmacı tarafından ispat edilmiştir [1], [2], [3]. 2004 senesinde Moreno *vd.* metallerde gözlenen bu olgunun fotonik kristallerde de benzer karşılığı olduğunu göstermiştir [4]. Fotonik kristal yüzeyinde uygun yüzey değişikliği yaratıldığında fotonik kristal dilimlerde oluşturulan slitlerde artan iletimin sağlandığı, fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) çıkışında ise ışıma etkisi yaratıldığı gözlemlenmiştir [4]. Bu bağlamda oluklu yüzeydeki bir metalik film ile yüzey düzeni değiştirilmiş bir fotonik kristalin her ikisi de benzer özellik taşımaktadır. Her iki yüzeyde de yüzey üzerinde yerleşmiş elektromanyetik kipler desteklenmektedir [5]. Bu bulgunun sonrasında fotonik kristal dalga kılavuzunun yüzey düzeni değiştirilmiş yapılarıdaki ışıma etkisi üzerine teorik ve deneysel olarak çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.

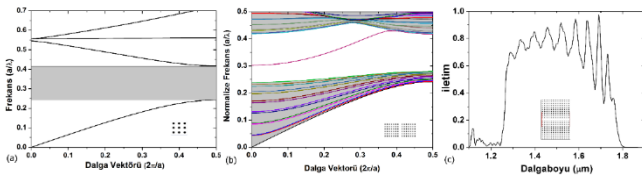
Kuple kip teorisini kullanarak yüzey kiplerinin yardımıyla bir fotonik kristal T-eklem dalga kılavuzu [6] ve 1×4 demet bölücü [7] tasarımları gerçekleştirilmiştir. Erim *vd.* fotonik kristalin yüzeyinde kusurlu saçıcılar kullanarak sayısal modelleme ile biyo-sensör [8] ve enine-elektrik (TE) ve enine-manyetik (TM) dalgalar için aynı frekansta yüzey kipini destekleyen, kutupluluktan bağımsız bir fotonik kristal dalga kılavuzu tasarlanmıştır [9]. Metal ile iki boyutlu fotonik kristal arayüzündeki [10] veya iki farklı iki boyutlu fotonik kristaller arasındaki arayüzdeki [11] yüzey kipleri kullanılarak bağlaşım özellikleri iyileştirilmiştir. Dielektrik-fotonik kristal arayüzey özellikleri değiştirilerek frekans ile ışıma yönü değiştirilebilen demet tarayıcı bir fotonik kristal tasarlanmış ve frekansla demet tarama özelliği deneysel olarak gösterilmiştir [12]. Dalga kılavuzunun her iki yanındaki periyodikliğin farklı olması ile demet kılavuz ekseninden farklı doğrultularda yönlendirilmiştir [12].

Metalik yüzeylerdeki yüzey plazmonlarına benzer şekilde, fotonik kristal ile bir başka ortam arasında yerleşen elektromanyetik dalgalara “yüzey dalgaları” denilmektedir. Fotonik kristal yüzeyleri uygun biçimde sonlandırılarak yüzey dalgaları desteklenebilir. Buna ek olarak bant aralığı içerisindeki frekanslarda gelen dalgalar için fotonik kristaller bir ayna görevi görerek bu frekanslardaki dalgaları yansıtmaktadır. Normal FKD’ları yüzey dalgaları barındırmamaktadır. Bu yüzden demetin yönlendirilmesi yüzey dalgasının oluşturulması ile mümkündür. FK yüzeyleri farklı bir madde ile sonlandırılarak yüzey dalgaları oluşturulmuştur [4], [13]. Fakat yüzey dalgasının yüzeye paralel dalga vektörü $k_{//}$, ω/c oranından küçük olduğundan yüzey kipini ilerleyen kipe bağlaştırmak için çıkış yüzeyindeki fotonik kristalin şekli veya periyodu değiştirilmiştir [14], [15]. Yüzey düzeni değişikliği yaratmak için Chen *vd.* [16] FKD çıkış yüzeyindeki tek sıradaki silindir çubukların yarıçapını ve kırılma indisini azaltmıştır. Çıkış yüzeyindeki örgü periyodunu değiştirerek odak noktasının kaydığını ve FKD çıkışında asimetri oluşturarak farklı doğrultularda odaklanmayı göstermişlerdir [16]. Fotonik kristal içerisinde farklı kırılma indisli çubuklar yerleştirilmesi pratikte kolay değildir. Ayrıca bu çalışmada FKD çıkışında demetin bölünmesi üzerine bir inceleme yapılmamıştır.

Bu çalışmada fotonik bant aralığı ve yüzey kipleri etkilerinden aynı anda yararlanılarak hava içinde kare örgülü Si dielektrik çubuklardan oluşan bir fotonik kristal yapısı için bir bağlaştırmacı ve demet bölücü tasarlanmıştır. Bu amaçla sayısal modelleme ile fotonik kristal dalga kılavuzu yüzeyinde yüzey kusurları oluşturularak meydana gelen yüzey kiplerinden yararlanılmıştır. Yüzey kusurları FKD girişine yerleştirilerek ışık 1.5 μm 'de dalga kılavuzuna daha verimli bağlaştırmıştır. Yüzey kusurları FKD çıkışına yerleştirilerek ise farklı tasarımlarla gelen ışık demetinin odaklanması, eşit güçte olarak ikiye veya üçe ayrılması veya kırılma indisi değişimi ile iletim frekansının kaydırılması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu yapıların entegre optik devrelerde yüksek uygulama potansiyeli bulunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Hava içerisinde Si dielektrik çubuklar 540 nm aralıklarla kare örgüde dizilerek bir fotonik kristal yapısı oluşturulmuştur ($n_{Si}=3.47$, örgü sabiti, $a=540$ nm). Bu noktada şu unutulmamalıdır ki uygun kırılma indisi kullanılarak bu çalışma GaAs, GaInP, InGaAsP gibi malzemelere göre de tasarlanabilir. Dielektrik çubukların yarıçapı 108 nm olduğunda ($r=0.2a$) $1.3 \mu\text{m}$ ($0.417(a/\lambda)$) ile $2.20 \mu\text{m}$ ($0.245(a/\lambda)$) arasında TM kutuplu dalgalar için bir fotonik bant aralığı oluşmaktadır. Bu fotonik kristal içerisinde bir çizgi kusuru oluşturularak bant aralığı içerisinde kılavuzlanmış bir kip yaratılmıştır. Kare örgülü fotonik kristalin bant diyagramı Şekil 1(a)'da, dalga kılavuzunun bant diyagramı ise Şekil 1(b)'de gösterilmiştir. $1.285 \mu\text{m}$ ($0.42(a/\lambda)$) ile $1.8 \mu\text{m}$ ($0.3(a/\lambda)$) arasında değişen dalga boylarında bir kılavuzlanmış bant olduğu Şekil 1(b)'deki bant diyagramından anlaşılmaktadır. Fotonik kristal dalga kılavuzunun zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) ile hesaplanan iletim spektrumu fotonik kristal dalga kılavuzunun düzlem dalga açılımı yöntemiyle hesaplanan bant diyagramı ile oldukça uyumludur. 15 Si çubuklu bir fotonik kristal yapısında çizgi kusuru oluşturularak elde edilen dalga kılavuzu yapısında Şekil 1(c)'de gösterildiği gibi bant aralığı içinde $1.25 \mu\text{m}$ ile $1.8 \mu\text{m}$ arasında iletim gözlenmektedir.

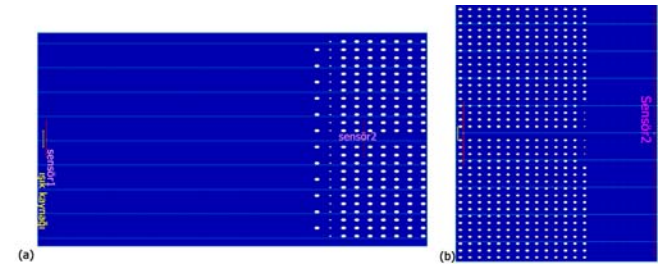


Şekil 1(a) $r=0.2a$ yarıçaplı Si çubuklu fotonik kristal kare örgünün, (b) fotonik kristal dalga kılavuzunun bant diyagramları, (c) fotonik kristal dalga kılavuzunun iletim spektrumu (Band diagrams of (a) square lattice $r=0.2a$ Si rod photonic crystals, (b) photonic crystal waveguide, (c) transmission spectrum of photonic crystal waveguide).

Çalışmamızda fotonik bant aralıklarının hesaplanmasında düzlem dalga açılım yöntemini kullanan açık kaynak MPB paket programı kullanılmıştır [17]. Çözünürlük süper hücrenin uzun kenarı boyunca $a/64$, bir örgü periyodu olan kenar boyunca ise doğrultuda ise $a/32$ olarak alınmıştır. İletim eğrilerinin, çalışmamızın demet bölücü kısmında hava tabakası sonundaki sensör boyunca net akı grafiklerinin elde edilmesinde ise PhotonD, CrystalWave ticari fotonik kristal benzetim programının FDTD modülü kullanılmıştır [18]. Elektromanyetik akı olarak

sensör alanından geçen elektrik alan hesaplanmaktadır. Net akı, iletimden yani sensöre pozitif yönde ulaşan elektromanyetik akıdan negatif elektromanyetik akının yani sensöre negatif yönde ulaşan yansıma kaynaklı akının çıkarılmasıyla elde edilmektedir.

Bu çalışma fotonik kristal dalga kılavuzu yapısının girişinde ve çıkışında yüzey kusurları oluşturulması bakımından bağlaştırıcı ve demet bölücü tasarımı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bağlaştırıcı tasarımında serbest hava alanından dalga kılavuzuna, demet bölücü tasarımında ise dalga kılavuzundan serbest hava alanına ışığın bağlaşma verimliliği ve farklı bağlaşma konfügurasyonları incelenmiştir. Bağlaştırıcı tasarımında kullanılan benzetim ortamı yapısı Şekil 2(a)'da, demet bölücü tasarımında kullanılan yapı ise Şekil 2(b)'de gösterilmektedir.



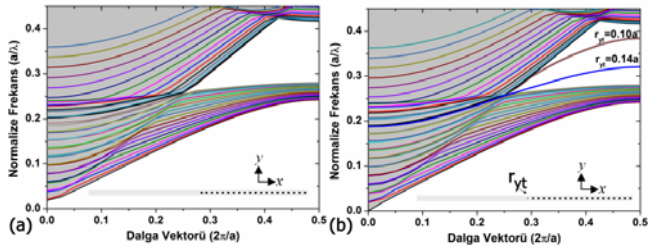
Şekil 2(a) Bağlaştırıcı tasarımında kullanılan benzetim ortamı yapısı, (b) demet bölücü tasarımında kullanılan benzetim ortamı yapısı. Mavi renk hava ortamını göstermektedir. (Simulation environment used for (a) coupler design, (b) beam splitter design)

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzuna Işığın Bağlaşdırılması (Coupling of Light to Photonic Crystal Waveguide)

Serbest hava alanından fotonik kristal dalga kılavuzuna ışığın bağlaşması esnasında saçılmadan ötürü oldukça kayıp meydana gelmektedir. Bağlaşım verimliliğini artırmak için yüzey kiplerinden yararlanılabilir. Bu amaçla fotonik kristal bant aralığı içerisinde yüzey kipleri yaratılmalıdır. Örgü yarıçapından daha küçük yarıçaplı Si çubuklardan oluşan bir kusur tabakası fotonik kristalin önüne eklenerek yüzey kipi oluşup oluşmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla x ekseninde $40a$, y ekseninde $1a$ boyutlarında dikdörtgen biçiminde bir süper hücre kullanılmış, x eksenindeki $20a$ kadarlık mesafe serbest hava alanı bırakılarak ardına bir kusurlu çubuk ve 18 tane kusursuz Si fotonik kristal örgü çubukları eklenmiştir. Yüzeye kusurlu çubuklar eklenmemiş

ve eklenmiş fotonik kristal bant yapıları sırasıyla Şekil 3(a) ve (b)'de, kullanılan süper hücre yapıları ise grafikler içerisinde belirtilmiştir. Fotonik kristal yapısında yüzey tabakası (yt) eklenmediğinde beklenildiği gibi bant aralığı içerisinde yüzey kipi yoktur. $r=0.20a$ yarıçaplı olan kare fotonik kristal örgüsüne $r_{yt}=0.10a$ yarıçaplı çubuklardan oluşan yüzey tabakası eklendiğinde $k=0.5(2\pi/a)$ 'da $0.38(a/\lambda)$ frekansında, $r=0.14a$ yarıçaplı çubuklardan oluşan yüzey tabakası eklendiğinde ise $0.34(a/\lambda)$ normalize frekansta yüzey kipleri oluşmaktadır. $r=0.18a$ yarıçaplı çubuklardan oluşan yüzey tabakası eklendiğinde ise yüzey kipi oluşmamaktadır. Çalışmamızda yüzey kipi oluşturmak için $r=0.10a$ yarıçaplı Si çubuklar kullanılmıştır.

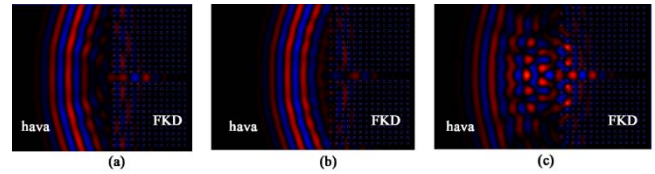


Şekil 3(a) Hava ve fotonik kristalden oluşan yapının dağıtım grafiği, (b) hava ve yüzey kusurlu fotonik kristale sahip yapının dağıtım grafiği. (Dispersion graph of the structure consisting of (a) air and photonic crystal, (b) air and surface corrugated photonic crystal)

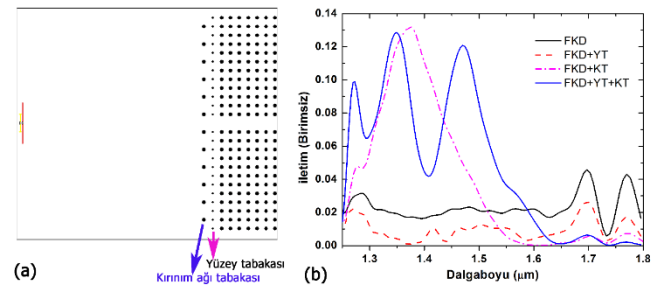
FKD yapısının $20a$ kadar soluna merkeze $1.5 \mu\text{m}$ dalga boyunda bir düzlem dalga kaynak yerleştirilerek, hava tabakasından sonra ilk durumda FKD, ikinci durumda ise $r=0.1a$ yarıçaplı Si çubuklardan sonra (yüzey tabakası) FKD eklenmiş ve yapılarında ilerleyen düzlem dalga görüntüleri sırasıyla Şekil 4(a) ve (b)'de verilmiştir. FKD yapısı önüne kusurlu çubuklardan oluşan yüzey tabakası eklenmediğinde düzlem dalga tamamen FKD'nun ilk tabakasından yansımaya uğramaktadır. Yüzey tabakası eklendiğinde ise yüzey tabakasını oluşturan Si çubuklardan yansımaya uğramaktadır. Havada ilerleyen düzlem dalgayı FKD içerisine bağlaştırmak için yüzey tabakası önüne bir kırınım ağı tabakası eklenmelidir. Sadece sıfırıncı ve birinci dereceden kırınımların oluşabilmesi için çalışma dalga boyu merkezi (çalışmamızda $1.5 \mu\text{m}$), d_g kırınım ağı periyodu olmak üzere, $2d_g/3$ ile $2d_g$ arasında seçilmelidir [19]. Örgü periyodu fotonik kristal örgü periyodunun iki katı, $a=0.108 \mu\text{m}$ ve yarıçapı fotonik kristal örgü yapısındaki gibi $r=0.2a$ olan bir kırınım ağı tabakası yüzey tabakası önüne eklenerek serbest hava alanında ilerleyen dalganın

yüzey kipine bağlanması sağlanmıştır. (Diğer kırınım ağı konfigürasyonlarında bağlaşım verimliliği düşmüştür.) Bu durumdaki düzlem dalga ilerlemesi Şekil 4(c)'de gösterilmiştir. Şekil 4(c), Şekil 4(a) ve (b) ile karşılaştırıldığında, ışığın yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası eklendiğinde yüksek oranda dalga kılavuzu içerisine bağlaştılabildiği ve dalga kılavuzu içerisinde yol aldırılabilirdiği görülmektedir (Şekil 4'deki üç durumda da düzlem dalganın gözlenmesinde aynı parlaklık derecesi kullanılmıştır. Şekil 4(a) ve (b)'de dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen düzlem dalganın gücü zayıftır, Şekil 4(c)'de ise düzlem dalga, dalga kılavuzu içinde belirgin olarak görülmektedir.)

Şekil 2(a)'da gösterilen serbest hava alanı ve FKD yapısı için sensör2'ye gelen elektromanyetik akı sensör1'dekine bölünerek iletim grafikleri hesaplanmış ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Hesaplamalarda sensör2'nin konumu hep aynı tutulmuş, FKD önüne sadece yüzey tabakası veya yüzey tabakası ve kırınım ağı tabakası birlikte eklenmiştir. Yüzey tabakası (YT) ve kırınım ağı tabakası (KT) birlikte eklendiğinde yüzey kipi oluştuğu dalga boyunda iletim, düz FKD yapısına göre yaklaşık beş kat artış göstermiştir.



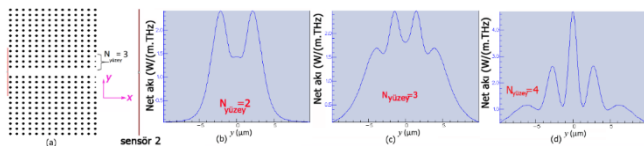
Şekil 4. Işığın havadan (a) fotonik kristal dalga kılavuzuna, (b) yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna, (c) kırınım ağı ve yüzey tabakası eklenmiş fotonik kristal dalga kılavuzuna bağlanması. (Coupling of light from air to (a) photonic crystal waveguide, (b) surface layer added photonic crystal waveguide, (c) surface and diffraction grating layers added photonic crystal waveguide)



Şekil 5. FKD'nin, YT eklenmiş FKD'nin ve YT ve kırınım ağı tabakası eklenmiş FKD'nun iletim spektrumu. (Transmission spectrum of photonic crystal waveguide, surface layer added photonic crystal waveguide, surface and diffraction grating layers added photonic crystal waveguide)

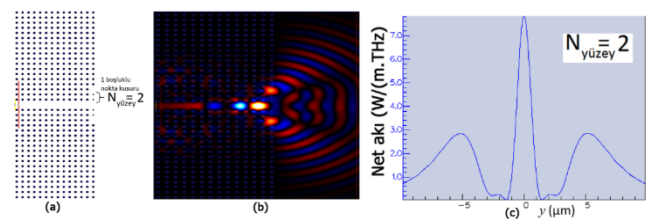
3.2. Fotonik Kristal Dalga Kılavuzundan Işığın Havaya Bağlaştırılması (Coupling of Light From Photonic Crystal Waveguide to Air)

Benzer biçimde FKD yapısından serbest hava alanına ışığın verimli bir biçimde bağlaştırılabilmesi için bir yüzey tabakası ve bir kırınım ağı tabakasının FKD sonuna eklenmesi gerektiği aşikârdır. Bu kısımda bir demet bölücü tasarlayabilmek için yüzey kusuru yaratılarak, örgü yarıçapına göre daha küçük yarıçaplı dielektrik çubuklar FKD çıkışına bir tabaka halinde değil, dalga kılavuzunu çevreleyen sırasıyla iki, üç veya dört çubuk olarak eklenmiştir (Şekil 6(a)). FKD çıkışında iki, üç veya dört Si çubuk $r=0.1a$ yarıçapında tutularak serbest hava alanının sonunda bulunan sensör2'deki elektromanyetik dalga akısı kaynaktan çıkan ışık atmaları tamamen zayıflayıp yok olana kadar toplanmıştır. 7a kadarlık serbest hava alanı sonuna sensör2 eklenmiştir. Bu sensöre ulaşan ışık akısının 20 μm olan sensör uzunluğu boyunca olan saçılım dağılımı grafiği FKD çıkışında iki, üç veya dört kusurlu Si çubuk olması durumları için sırasıyla Şekil 6(b), (c) ve (d)'de verilmiştir. $N_{\text{yüzey}}=2$ olduğunda merkez boyunca olan akı azalırken $y=-3$ ve $+3$ μm mesafelerde akı doruk yapmaktadır. Bu sebeple gelen dalganın kısmen ikiye ayrıldığı söylenebilir. $N_{\text{yüzey}}=3$ olduğunda $N_{\text{yüzey}}=2$ durumundaki doruk noktaları birbirine yaklaşmakta ve $y=-4$ μm ve 4 μm konumlarında çok daha zayıf şiddette saçaklar oluşmaktadır. $N_{\text{yüzey}}=4$ olduğunda ise $N_{\text{yüzey}}=3$ olduğu duruma göre birbirine yakın olan merkezdeki iki kırınım bandının daha da birbirine yaklaşmasıyla bir doruk oluşmakta ve bu doruğun kenarlarında çok daha zayıf güçte ikinci ve daha da zayıf güçte üçüncü kırınım saçakları meydana gelmektedir. FKD çıkışında demeti odaklayabilmek, eşit güçte ikiye, üçe veya dörde bölebilmek için bu tasarım üzerinde başka kusurların da oluşturulması gerektiği aşikârdır.



Şekil 6(a) FKD çıkışında dalga kılavuzu çevresindeki N sayıdaki Si çubuğun yarıçapları $r=0.1a$ 'ya azaltıldığında benzetim ortamı yapısı ve sensör2 boyunca gözlenen net akı değişim grafikleri, (b) $N_{\text{yüzey}}=2$, (c) $N_{\text{yüzey}}=3$, (d) $N_{\text{yüzey}}=4$. ((a)Simulation environment when N number of Si rods have $r=0.1a$ radius, net flux over sensor2 for b) $N_{\text{surface}}=2$, (c) $N_{\text{surface}}=3$, (d) $N_{\text{surface}}=4$)

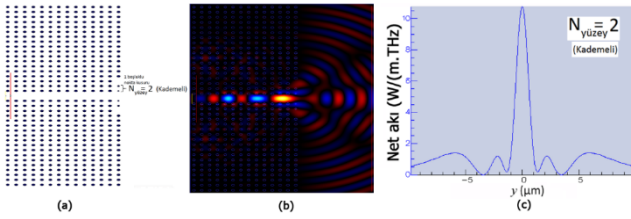
Bu amaçla, $N_{\text{yüzey}}=2, 3$ ve 4 durumlarının her biri için kusurlu çubukların bitiminden bir sonraki örgü noktasındaki Si çubuk çıkarılarak nokta kusuru oluşturulmuştur. Bir nokta kusurlu $N_{\text{yüzey}}=2$ için serbest hava alanını da içeren FKD yapısı Şekil 7(a)'da, zamanla düzlem dalga ilerleyişi Şekil 7(b)'de ve sensör2 üzerine düşen toplam akının grafiği Şekil 7(c)'de gösterilmiştir. Bir nokta kusurlu $N_{\text{yüzey}}=2$ için merkez boyunca ışık dalgaları yoğunlaşmaktadır (odaklama). Dolayısıyla FKD çıkış yüzeyinde dalga kılavuzunu çevreleyen iki dielektrik çubuğun yarıçapı azaltıldığında ve sonrasında bir nokta kusuru oluşturulduğunda sanki dalga kılavuzu içerisinde bir mercek varmış gibi odaklama etkisi olduğu görülmektedir. Fakat merkez bandı çevreleyen zayıf şiddette birer kırınım saçığı bulunmaktadır. Bu saçıkların gücünü daha da zayıflatarak odaklanan ışığın merkezdeki gücünü artırmak için merkezi çevreleyen ikinci Si çubuğun yarıçapı $r=0.10a$ 'dan $r=0.125a$ 'ya artırılmıştır. Bu durumdaki benzetim alanı Şekil 8(a)'da, düzlem dalga ilerleyişi Şekil 8(b)'de, sensör2 üzerine düşen toplam akının saçılım dağılımı grafiği ise Şekil 8(c)'de gösterilmiştir. Şekil 8(c)'den merkezde odaklanan ışığın gücü artarken merkez etrafındaki istenmeyen kırınım saçıklarının da Şekil 7(c)'ye göre zayıflatıldığı görülmektedir. Yüzey kusuru oluşturan çubukların kademeli artan yarıçapta seçilmesinin odaklama özelliklerini geliştirdiği ilk defa bu çalışmayla gösterilmiştir. FKD çıkış kısmındaki bölge daha uzun tutularak dalganın önce odaklandığı sonra tekrar dağıldığı Şekil 9 ile daha net gösterilmiştir.



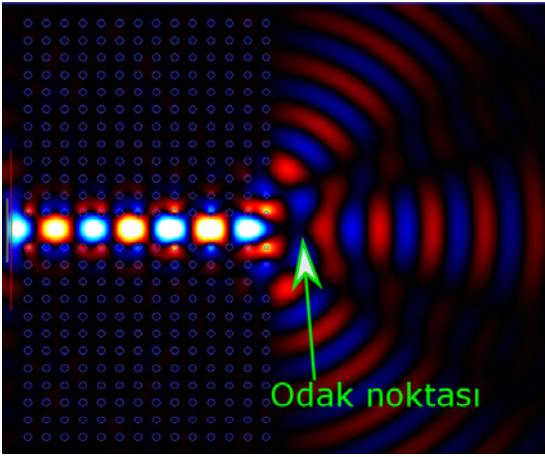
Şekil 7(a) FKD çıkışında $r=0.1a$ 'lık ikişer Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapı, (b) bu yapı içerisinde ilerleyen dalgaların havaya bağlanması, (c) sensör2 konumuna bağlı algılanan net akı. (Structure having 2 rods with $r=0.1a$ radius and a point defect at the waveguide exit, (b)coupling of light propagating in this medium to air, (c) net flux dedected over the position of sensor2)

$N_{\text{yüzey}}=3$ için ise 3 adet kusurlu Si dielektrik çubuktan sonra birer nokta kusuru bırakıldığında (Şekil 10(a)) sensör2 üzerine düşen toplam akının konuma bağlı grafiğinden dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen atmanın ikiye yarıldığı anlaşılmaktadır (Şekil 10(c)). İkiye yarılan atmanın kenarlarında ise çok daha zayıf güçte saçıklar oluşmaktadır. Zamana göre dalga

kılavuzundan serbest hava alanına çıkan atmaların profiline bakıldığında da bu ikiye yarıma ve kenarlarda oluşan saçaklar görülmektedir (Şekil 10(b)).



Şekil 8(a) FKD çıkışında $r=0.1a$ ve $r=0.125a$ olmak üzere ikişer Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapı, (b) bu yapı içerisinde ilerleyen dalgaların havaya bağlaşması, (c) sensör2 konumuna bağlı algılanan net akı. (Structure having 2 rods with $r=0.1a$ and $r=0.125a$ radius and a point defect at the waveguide exit, (b)coupling of light propagating in this medium to air, (c) net flux dedected over the position of sensor2)

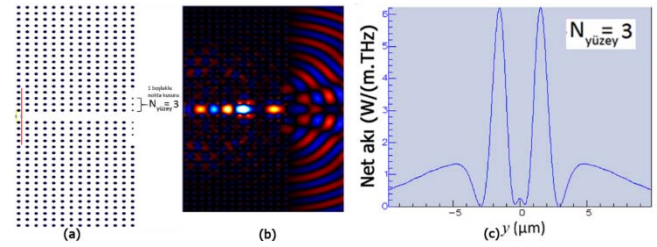


Şekil 9. FKD çıkışında $r=0.1a$ ve $r=0.125a$ olmak üzere ikişer Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapıda düzlem dalgaların odaklanıp açılması (Focusing and expanding of plane waves in a structure having 2 rods with $r=0.1a$ and $r=0.125a$ radius and a point defect at the waveguide exit)

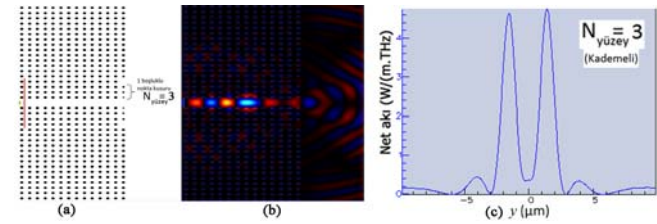
$N_{yüzey}=3$ için de dalga kılavuzu etrafındaki ikinci çubukların yarıçapı $r=0.10a$ 'dan $r=0.125a$ 'ya, üçüncü çubukların yarıçapları ise $r=0.15a$ 'ya artırılmıştır. Bu durumdaki benzetim alanı, düzlem dalga ilerleyişi ve sensör2 üzerine düşen toplam akının saçılım dağınımı grafiği sırasıyla Şekil 11(a), Şekil 11(b) ve Şekil 11(c)'de gösterilmiştir. Şekil 10(c) ve Şekil 11(c)'nin karşılaştırılmasından görüldüğü gibi kademeli yarıçaplı çubukların kılavuz çevresine yerleştirilmesiyle merkezdeki iki bandın etrafındaki kırınım saçaklarının şiddeti azalmaktadır.

$N_{yüzey}=4$ için, benzer biçimde 4 adet kusurlu Si dielektrik çubuktan sonra birer nokta kusuru bırakılmıştır (Şekil 12(a)). Hava tabakası sonuna yerleştirilen sensör2 boyunca toplanan akının

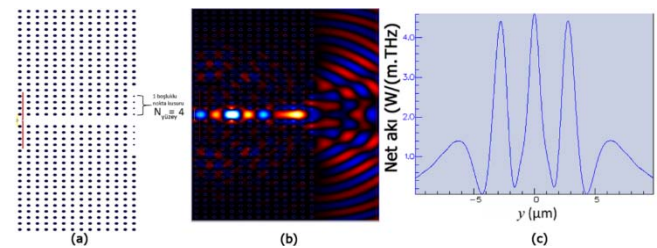
sensör2 uzunluğu boyunca dağılım grafiği incelendiğinde atmanın birbirine çok yakın güçlerde üçe ayrıldığı ve bu üç bandın kenarlarında zayıf güçte saçaklanmaların olduğu gözlenmektedir (Şekil 12(c)). Zamanla ilerleyen ışık dalgalarının sensör2'ye ulaştığı durumdaki profili Şekil 12(b)'de gösterilmiştir ve Şekil 12(c)'deki sensör2 üzerindeki net akı dağılımı grafiğini destekler biçimde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10(a) FKD çıkışında $r=0.1a$ 'lık üçer Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapı, (b) bu yapı içerisinde ilerleyen dalgaların havaya bağlaşması, (c) sensör2 konumuna bağlı algılanan net akı. (Structure having 3 rods with $r=0.1a$ radius and a point defect at the waveguide exit, (b)coupling of light propagating in this medium to air, (c) net flux dedected over the position of sensor2)



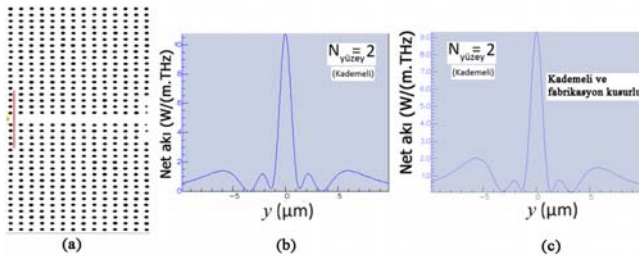
Şekil 11(a) FKD çıkışında $r=0.1a$, $r=0.125a$ ve $r=0.15a$ olmak üzere üçer Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapı, (b) bu yapı içerisinde ilerleyen dalgaların havaya bağlaşması, (c) sensör2 konumuna bağlı algılanan net akı. (Structure having 3 rods with $r=0.1a$, $r=0.125a$ and $r=0.15a$ radius and a point defect at the waveguide exit, (b)coupling of light propagating in this medium to air, (c) net flux dedected over the position of sensor2)



Şekil 12(a) FKD çıkışında $r=0.1a$ 'lık dörder Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapı, (b) bu yapı içerisinde ilerleyen dalgaların havaya bağlaşması, (c) sensör2 uzunluğunca algılanan net akı değişimi. (Structure having 4 rods with $r=0.1a$ radius and a point defect at the waveguide exit, (b)coupling of light propagating in this medium to air, (c) net flux dedected over the position of sensor2)

Nokta kusurlu $N_{yüzey}=4$ için dalga kılavuzu çıkışında ışık demeti dörde ayrılmış, fakat ayrılma farklı güçlerde gerçekleştiğinden bir demet bölücü olarak tasarlanamayacağı fikri ile analizi buraya eklenmemiştir. Nokta kusurlu $N_{yüzey}=2, 3$ ve 4 durumlarının her birinde de nokta kusuru sayısı birden ikiye çıkartıldığında, benzer şekilde, bölünen ışık demetlerinin güçleri farklı olduğundan karakteristik özellikleri burada belirtilmemiştir. Yüzey kiplerinden yararlanılarak demet ayırıcı analizinde FKD sonrasında $7a$ yerine $10a$ veya $20a$ uzaklık alındığında algılanan akıda düşme olmakla birlikte odaklama ve demet ayırıcı karakteristik özelliklerinde bir değişim olmadığı görülmüştür.

Gerçek yapılarda fotonik kristal çubuklar örgü periyotlarından bir miktar kayma yapabilir. Bu amaçla, tepkinin ne ölçüde değiştiği hususunda fikir kurmak için Şekil 8(a)'da gösterilen fotonik kristal çubuklar örgü merkez noktalarından 10 nm standart sapma ile rastgele kaydırılmıştır. Oluşan yapı Şekil 13(a)'da, yapının sensör2 uzunluğu boyunca demet profili Şekil 8(c)'nin yer aldığı Şekil 13(b) ile birlikte Şekil 13(c)'de verilmiştir. Odaklanan demet akısında bir miktar azalma ve ikincil kırınım saçaklarında bir miktar artış gözlemlense de örgü konumlarından 10 nm'lik standart sapmanın odaklanmaya zarar vermediği ve genel sonuçların korunduğu görülmüştür.

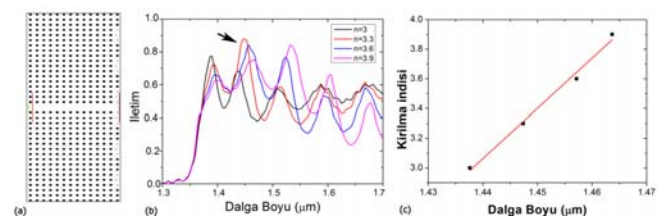


Şekil 13(a) Örgü noktaları olması gereken yerlerinden 10 nm standart sapma ile rastgele oynatılmış ve FKD çıkışında $r=0.1a$ ve $r=0.125a$ olmak üzere ikişer Si çubuk ve birer nokta kusuru içeren yapı, (b) kusurlu olmayan yapı için ve (c) kusurlu yapı için sensör2 konumuna bağlı algılanan net akı. (a) Structure having randomly disordered photonic crystal lattice points with 10 nm standard deviation and, 2 rods with $r=0.1a$ and $r=0.125a$ radius and a point defect at the waveguide exit, net flux detected over the position of sensor2 for (b) the perfect and (c) defected structure.)

3.3. Çıkış Yüzeyindeki Seçici Saçıcılarda Değişiklikler Yapılarak Kırılma İndisi Sensörü Tasarımı (Design of Refractive Index Sensor by Modifying Selective Scatterers at the Exit Surface)

Bu bölümde FKD çıkışındaki bazı Si çubuklar kaldırılarak (1-3., 7.-9. ve 13.-15. çubuklar) yerine

farklı kırılma indisli $r=0.1a$ yarıçapta çubuklar eklenmiştir. Dalga kılavuzu etrafındaki ikinci, sekizinci ve onördüncü çubuklar örgü noktasından 0.1 μm sola doğru kaydırılarak dalga kılavuzundan çıkan dalganın yüzey saçıcıları ile daha güçlü bağlaşması sağlanmıştır. Çalışılan FKD yapısı, yüzey saçıcıları ile birlikte Şekil 14(a)'da, FKD çıkışındaki sinyalin girişteki sinyale oranından elde edilen iletim spektrumu Şekil 14(b)'de gösterilmiştir. İletim spektrumunda okla gösterilen ikinci doruk noktasının kırılma indisini değiştirilmiş çubukların kırılma indisine bağlı grafiği Şekil 14(c)'de verilmiştir. Kırılma indisini 3.0'den 3.9'a doğru değiştirirken ilgilenilen iletim doruk noktası dalga boyu artış göstermektedir. Bu artış neredeyse doğrusal bir davranış sergilemekte olup, doğrunun eğiminden kırılma indisini duyarlılığı 33.807 nm/KİB (KİB, kırılma indisini birimi) olarak hesaplanmıştır. Kurt vd. fotonik kristal çıkış yüzeyinde kusur oluşturarak farklı kırılma indisini sensörleri tasarlamışlardır [20]. Kare örgülü dielektrik çubuklardan oluşan ilk tasarımda dalga kılavuzu çıkışında örgü çubukları yarıçapından daha büyük yarıçapta halka şeklinde fotonik kristal çubuklar yerleştirilerek deliklerin içi farklı kırılma indisli malzemelerle doldurulmuş ve 93 nm/KİB duyarlılığında bir algılayıcı geliştirilmiştir [20]. Tasarımımızda Fabry-Perot rezonansından kaynaklı saçılmalar azaltılarak ve yarıçapta optimizasyona gidilerek kırılma indisini duyarlılığı artırılabilir. Çubuklu yapılarda bir mikrokanal aracılığıyla kırılma indisini ölçümü yapıldığından hava olan kısmın kırılma indisinin yerel olarak değiştirilmesi uygulama açısından daha pratik sonuçlar doğuracaktır.



Şekil 14(a) Kırılma indisini sensörü için tasarlanan yapı, (b) iletim spektrumu, (c) kırılma indisini değişiminin dalga boyuna göre grafiği ((a) Structure designed for refractive index sensor, (b) transmission spectrum, (c) graph of refractive index change versus wavelength)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada düzlem dalga açılımı ve zamanda sonlu farklar yöntemi ile yüzey düzeni değiştirilmiş fotonik kristalin yüzey kipi özelliğinden yararlanılarak elektromanyetik dalga

bağlaştırıcı, demet bölücü ve algılayıcı tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle kara örgülü Si dielektrik çubuklardan 1.5 µm dalga boyunda dalgaları kılavuzlayan bir fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı oluşturulmuştur. Fotonik kristal dalga kılavuzunun girişine 1.5 µm dalga boyundaki yüzey kipini destekleyen 54 nm yarıçaplı ($r=0.1a$) Si çubuklardan oluşan yüzey tabakası ve ışığı serbest hava alanından yüzey kipine bağlaştırmak için örgü periyodunun iki katı periyotta Si çubuklardan oluşan bir kırınım ağı tabakası eklendiğinde ışığın fotonik kristal dalga kılavuzu içerisine daha iyi bağlaştırdığı tespit edilmiştir. Herhangi bir fazladan bağlaştırıcı yapıya ihtiyaç duyulmaksızın Si çubuklar kullanılarak ışığın dalga kılavuzuna bağlaştırılması optik haberleşme dalga boyu olan 1.5 µm civarında çalışan optik entegre devrelerde kullanım açısından avantaj yaratmaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmında fotonik kristal dalga kılavuzu çıkışında dalga kılavuzunu çevreleyen belirli sayıdaki Si çubukların yarıçapı değiştirilerek fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyindeki demetin odaklanması veya bölünmesi sağlanmıştır. Dalga kılavuzu etrafında sırasıyla ikişer, üçer veya dörder kusurlu Si çubuk ve sonrasında birer nokta kusuru oluşturularak sırasıyla odaklayıcı, 1×2 veya 1×3 demet bölücü tasarımları gerçekleştirilmiştir. İlk defa bu çalışma ile dalga kılavuzunu çevreleyen kusurlu çubukların yarıçapı kademeli artan biçimde tasarlandığında merkez etrafındaki istenmeyen yan lobların bastırıldığı ortaya konmuştur.

Çalışmanın üçüncü kısmında ise fotonik kristal dalga kılavuzu çıkış yüzeyindeki belirli periyottaki çubukların kırılma indisi değiştirilerek yüzey kiplerinin frekansları kaydırılmış ve iletim spektrumunda etkileri gözlenerek bir kırılma indisi sensörü tasarlanmıştır. Bu basit, üretimi kolay bağlaştırıcı, demet bölücü ve algılayıcı tasarımlarının entegre optik devrelerde önemli bir potansiyel uygulama alanı bulunmaktadır.

ACKNOWLEDGMENTS

Bu çalışma 16B0443005 ve 17B0443006 numaralı Ankara Üniversitesi BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

REFERENCES

- [1] H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, T. W. Ebbesen, "Beaming light from a subwavelength aperture," *Science*, vol. 297, pp. 820-822, 2002.
- [2] L. Martin-Moreno, F.J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, A. Degiron, T.W. Ebbesen, "Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, pp. 167401, 2003.
- [3] F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, T.W. Ebbesen, L. Martin Moreno, "Multiple paths to enhance optical transmission through a single subwavelength slit", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, pp. 213901-1-4, 2003.
- [4] E. Moreno, F. J. García-Vidal, L. Martín-Moreno, "Enhanced transmission and beaming of light via photonic crystal surface modes", *Phys. Rev. B*, vol. 69, no. 12, pp. 121402, 2004.
- [5] P. Vojtisek, I. Richter, "Surface states in photonic crystals", *EPJ Web of Conferences*, Liberek, Çek Cumhuriyeti, vol. 48, pp. 00030, 2013.
- [6] B. Jiang, W. Zhou, W. Chen, A. Liu, W. Zheng, "Design of surface mode photonic crystal T-junction waveguide using coupled-mode theory", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 28, no. 8, pp. 2038-2041, 2011.
- [7] B. Jiang, Y. Zhang, Y. Wang, A. Liu, W. Zheng, "Ultracompact 1×4 TM-polarized beam splitter based on photonic crystal surface mode", *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 13, pp. 2361-2366, 2012.
- [8] H. Kurt, M. N. Erim, N. Erim, "Various photonic crystal bio-sensor configurations based on optical surface modes", *Sens. Actuators B*, vol. 165, pp. 68– 75, 2012.
- [9] M. N. Erim, N. Erim, H. Kurt, "Optical surface modes of photonic crystals for dual-polarization waveguide", *Photonic Nanostruct.*, vol. 11, pp. 123–131, 2013.
- [10] A. Gaspar-Armenta, F. Villa-Villa, "Coupling of a 2D photonic crystal–metal surface wave to photonic crystal waveguide modes", *J. Opt.*, vol. 16, no. 3, pp. 035501-1-7, 2014.

- [11] J. A. Guel-Tapia, F. Villa-Villa, J. A. Gaspar-Armenta, F. Ramos-Mendieta, A. Mendoza-Suarez, "Coupling of photonic crystal-photonic crystal interface and guided modes in two-dimensional heterostructures", *Opt. Rev.*, vol. 22, pp. 637-646, 2015.
- [12] A. C. Tasolamprou, L. Zhang, M. Kafesaki, T. Koschny, C. M. Soukoulis, "Frequency splitter based on the directional emission from surface modes in dielectric photonic crystal structures", *Opt. Express*, vol. 23, pp. 13972- 13982, 2015.
- [13] R. Moussa, B. Wang, G. Tuttle, Th. Koschny, C.M. Soukoulis, "Effect of beaming and enhanced transmission in photonic crystals", *Phys. Rev. B*, vol. 76, pp. 235417, 2007.
- [14] S. K. Morrison, Y.S. Kivshar, "Engineering of directional emission from photonic-crystal waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, pp. 081110, 2005.
- [15] S. Wojciech, "Model of light collimation by photonic crystal surface modes", *Phys. Rev. B*, vol. 75, pp. 205430, 2007.
- [16] H. Chen, Y. Zeng, X. Chen, J. Wang, W. Lu, "Modulation of focus using photonic crystal waveguide", *Physics Letters A*, vol. 372, pp. 5096-5100, 2008.
- [17] S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis", *Opt. Express*, vol. 8, no. 3, pp. 173-190, 2001.
- [18] CrystalWave, Photon Design Software
- [19] D. Maystre, "Photonic crystal diffraction gratings", *Opt. Express*, vol. 8, pp. 209-216, 2001.
- [20] H. Kurt, M. N. Erim, N. Erim, "Various photonic crystal bio-sensor configurations based on optical surface modes", *Sens. Actuators B*, vol. 165, pp. 68- 75, 2012.