



FOTONİK KRİSTAL TEMELLİ SICAKLIK ALGILAYICISININ DUYARLILIĞININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ENHANCEMENT OF SENSITIVITY OF PHOTONIC CRYSTAL BASED TEMPERATURE SENSOR

Fulya BAĞCI^{1*}, Seda TEZCAN¹, Barış AKAOĞLU¹

¹Fizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
fbagci@eng.ankara.edu.tr, tezcanseda@gmail.com, akoglu@eng.ankara.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.02.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 02.05.2014
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2014.94695
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Üçgen örgülü GaAs fotonik kristal yapısı kullanılarak sayısal ortamda bir sıcaklık algılayıcısı önerilmiş ve algılayıcının duyarlılığı kavite çevresinde yapısal değişimler yapılarak ve yavaş ışık özelliği kullanılarak iyileştirilmiştir. Fotonik kristal dalga kılavuzunun bir sıra ilerisinde bir noktasal kusur oluşturularak kavite rezonans frekanslarındaki ışık bu noktasal boşluğa bağlanmıştır ve sıcaklığa bağlı olarak rezonans frekansın değişimi incelenmiştir. Duyarlılığın artırılması için kavitenin yanlarındaki deliklerin yarıçapı ve kavite alanı değiştirilmiştir. 0.1001 nm/°C olan sıcaklık algılayıcısının duyarlılığı yapısal iyileştirmeler ile 1.4%±0.1% artırılmıştır. Dalga kılavuzu çevresindeki ilk sıra deliklerin yarıçapı değiştirilerek ve dalga kılavuzuna paralel doğrultuda kaydırılarak kavite rezonans dalga boyunu da içeren 20.23 nm'lik aralıkta ışık 14 kat yavaşlatılmıştır. Yavaş ışık etkisi ile kipin kavite ile daha fazla optiksel olarak örtüşmesi sonucu algılayıcının duyarlılığı %2.8±%0.1 artmıştır.

Anahtar kelimeler: Algılayıcı, Fotonik kristal, Fotonik kristal dalga kılavuzu, Yavaş ışık

Abstract

A temperature sensor is proposed in the computational environment using triangular lattice GaAs photonic crystal structure and the sensitivity of the sensor is enhanced by employing structural improvements around the cavity and by using slow light feature. By creating a point defect one row ahead from the photonic crystal waveguide, light in the cavity resonance frequencies is coupled to this point defect and the change of the resonance frequency related to the temperature is investigated. The radius of the holes around the cavity and the cavity area are changed to enhance the sensitivity. 0.1001 nm/°C sensitivity of the temperature sensor is increased by 1.4%±0.1% with structural optimizations. Light is slowed down by 14 times in a 20.23 nm range including the cavity resonance wavelength by changing the radius of the first rows of holes surrounding the waveguide and shifting them in a direction parallel to the waveguide. The sensitivity of the sensor is increased by 2.8%±0.1% as a result of increasing optical overlap of the mode with the cavity by slow light effect.

Keywords: Sensor, Photonic crystal, Photonic crystal waveguide, Slow light

1 Giriş

Küçük boyutlarından ve aletlere kolaylıkla entegre edilebilir olmalarından ötürü mikro boyutlardaki algılayıcılara olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Nanofabrikasyon yöntemlerinin gelişmesiyle mikroalgılayıcılarda fotonik kristaller kullanılmaya başlanmıştır [1],[2]. Fotonik kristaller dielektrik sabitinin ışığın dalga boyu ölçeğinde periyodik olarak değiştiği ve belirli doğrultuda ve spektral aralıkta iletim ve yansımaya özellikleri ayarlanabilen malzemelerdir [3]. Fotonik kristaller güç bölücüler [4],[5] filtreler [6],[7] dalga boyu ayrıştırıcılar [8],[9] lazerler [10] gibi birçok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Fotonik kristallerin algılayıcı olarak kullanılması bu uygulamalar arasında nispeten yenidir. Oldukça küçük boyutlara indirgenebilme, yüksek spektral seçicilik, yüksek duyarlılık ve mikroelektromekaniksel sistemlere entegre olabilme özelliklerinden dolayı fotonik kristaller algılama uygulamalarında umut vericidir. Kumar ve diğ. tarafından yapılan çalışmada Si ve havadan oluşan bir boyutlu fotonik kristal (FK) yapısının merkezine bir katman Si tabakası yerleştirilerek sayısal ortamda 0.064 nm/K duyarlıklığı bir sıcaklık algılayıcısı geliştirilmiştir [11]. Kılavuz kipin merkez dalga boyundaki kayma miktarına bağlı olarak geniş bir aralıkta sıcaklık ayarlanmıştır. Hsu ve diğ. çalışmalarında fotonik kristal fiber interferometresi kullanılarak bir sıcaklık algılayıcısı geliştirmiştir [12]. Silikanın termo-optik katsayısı düşük olduğundan hava ortamında duyarlılık 0.01 nm/°C

olarak ölçülmüştür. Fiber çevresi kırılma indisi fiberinkine çok yakın bir malzeme ile kaplandığında duyarlılık 0.92 nm/°C'ye artış göstermiştir. Fakat geliştirilen sıcaklık algılayıcı, fiberi saran malzemenin kırılma indisine oldukça duyarlıdır. Malzemenin kırılma indisindeki ufak değişiklik sıcaklık algılayıcısının duyarlılığını azaltmaktadır [12].

Yavaş ışık bir optik atmanın çok düşük grup hızı ile ilerlemesidir. Oda sıcaklığında çalışabilir, dalga boyu ve bant genişliği ayarlanabilir olmasından ve yüksek dereceden dağınım etkilerinin düşük olmasından ötürü fotonik kristal yapılar yavaş ışık uygulamaları için idealdir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda fotonik kristal yapılarda yavaş ışık rejiminde algılayıcıların performansının iyileştiği gözlenmiştir [13]-[16]. Fotonik kristal dalga kılavuzu temelli bir biyosensör geliştirilerek antikor algılaması yapılmıştır [13]. Brillouin bölgesi sınırındaki yavaş ışık rejiminde algılayıcının duyarlılığı 174.8 nm/RIU olarak ölçülmüştür [13]. Fotonik kristal temelli gaz algılayıcılarında yavaş ışık Zhao ve diğ. tarafından yapılan çalışmada CO gazının [14] ve Zhang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada ise asetilen gazının [15] soğurma özelliğini artırmıştır. Bir başka çalışmada ise fotonik kristal temelli bir termo-optik Mach-Zehnder interferometresi üretilmiştir [2]. İnterferometrenin aktif kolundaki fotonik kristal dalga kılavuzunun yakınına bir mikrosırtıcı yerleştirilerek dalga kılavuzunun sıcaklığı değiştirilmiştir. Algılayıcının duyarlılığı yavaş ışık özelliği kullanılarak artırılmıştır [2]. Lai ve diğ. L13 kaviteyi bir fotonik kristal dalga kılavuzu (FKD) yapısında

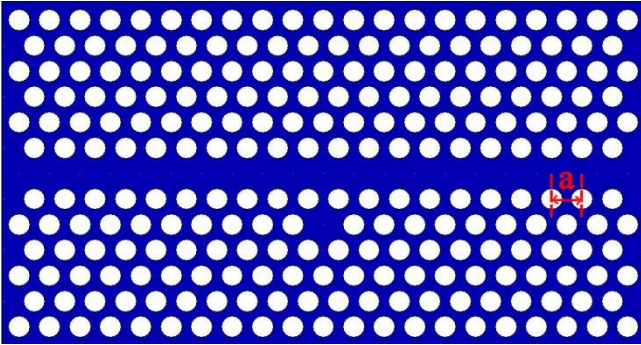
ışığın hızının yavaşlama oranının artırılarak kırılma indisi algılayıcısının duyarlılığının arttırıldığını deneysel olarak da göstermiştir [16].

Fotonik kristallerin band yapısında Brillouin bölgesi sınırlarındaki frekanslarda ışığın grup hızı oldukça düşüktür [17]. Fakat düşük grup hızlı bölge oldukça dar bir spektral aralıktadır ve yüksek grup hızı dağılımını göstermektedir [17],[18]. Daha geniş spektral aralıktaki ve dağılımdan bağımsız yavaş ışık rejimi oluşturmak için FKD'nun yapısında değişiklikler yapılabilir. Bu değişikliklere örnek olarak dielektrik içinde delikli bir FKD yapısında dalga kılavuzu çevresindeki deliklerin boyutlarının değiştirilmesi [19],[20] veya deliklerin dalga kılavuzu boyunca [21] veya dalga kılavuzuna dik yönde [22] kaydırılması verilebilir.

Bu çalışmada kaviteli bir fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı tasarlanarak sıcaklık algılama performansı kavite ve dalga kılavuzu çevresinde yapılan yapısal optimizasyonlarla iyileştirilmiştir. Dalga kılavuzu için yapılan optimizasyonda yavaş ışık olgusundan yararlanılmıştır. Işığın dalga kılavuzu içerisinde yavaş ilerlemesi kavite ile daha fazla etkileşime girmesine yol açarak sıcaklık algılayıcısının duyarlılığını %2.8±%0.1 geliştirmiştir.

2 Materyal ve Metod

Bu çalışmada üçgen örgülü, delik yarıçapı 0.35a (a: örgü sabiti) olan GaAs malzemeli fotonik kristal yapısı ele alınmıştır. Optik haberleşme dalga boyu olan 1.55 µm'de çalışılması için örgü sabiti 387 nm olarak seçilmiştir. GaAs seçilmesinin sebebi Si, CdS, ZnS, GaP gibi yarı iletkenlere göre termo-optik katsayısının daha yüksek olmasıdır [23]. GaAs'in her sıcaklıktaki kırılma indisi değerleri Ref. [24]'teki termal genişleme katsayıları kullanılarak belirlenmiştir. Γ-K doğrultusunda bir sıra deliklerin çıkarılması ile FKD oluşturulmuştur. Dalga kılavuzunun bir sıra ilerisinden bir delik çıkartılarak bir nokta kusuru (kavite) yaratılmıştır. İncelenen kaviteli FKD yapısı ve örgü sabiti Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Kaviteli FKD yapısı.

Benzetimlerde manyetik alan bileşeninin hava delikleri boyunca olduğu Enine Elektromanyetik (TE) kutuplu ışık kullanılmıştır. Bant yapısının ve grup hızının (grup indisinin) belirlenmesinde Massachusetts Institute of Technology tarafından geliştirilen ve düzlem dalga açılımı yöntemini kullanan fotonik bant yazılım paketi (MPB) kullanılmıştır [25]. Çözünürlük dalga kılavuzu boyunca a/32, dalga kılavuzuna dik doğrultuda ise a/64 olarak alınmıştır. Zamanda atmanın ilerlemesi ve iletim özellikleri ise CrystalWave yazılım paketinin zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) modülü kullanılarak belirlenmiştir [26]. FDTD benzetimlerinde FK yapısı Γ-K doğrultusunda 21 hava deliği ve dalga kılavuzunun

her iki yanında 6 sıra hava deliği olacak boyutta alınmıştır. Benzetim alanının ızgara aralığı örgü sabitinin 20'de biri ve mükemmel uyumlu tabaka kalınlığı (perfectly matched layer) bir örgü sabiti olarak seçilmiştir. Fotonik kristalin TE fotonik bant aralığı boyunca geniş bantlı Gaussyen çizgisel ışık kaynağı çizgi kusurunun başına yerleştirilmiştir. Böylelikle ışığın FKD'na bağlaştırılması sırasında ortaya çıkacak sorunlar araştırma kapsamı dışında tutulmuştur. Girişteki elektrik akısını ölçen algılayıcı ışık kaynağından hemen sonra, çıkıştaki elektrik akısını ölçen algılayıcı ise dalga kılavuzunun bitimine yerleştirilmiştir. İletim spektrumları çıkış akısı girişte ölçülen akıya normalize olarak çizdirilmiştir.

Yavaş ışığı niteleyen bazı parametreler bulunmaktadır. Bunlardan ilki grup hızıdır ve büyüklüğünün c'ye oranı ışığın ne kadar yavaşladığının bir göstergesidir. Grup hızı,

$$v_g = d\omega/dk \quad (1)$$

ile tanımlıdır. Bu eşitlikte ω frekans, k ise dalga vektördür. Grup indisi ise ışığın c hızının grup hızına oranıdır. Grup indisi ne kadar büyükse ışığın grup hızı o kadar düşüktür.

Grup indisinin artışı bant genişliğini azalttığından normalize gecikme-bant genişliği çarpanı (NDBP) kıstas bir parametre olarak kabul edilmektedir [20]-[23], NDBP.

$$NDBP = \langle n_g \rangle \times \Delta\omega/\omega_0 \quad (2)$$

olarak tanımlıdır. Bu ifadedeki ω_0 yavaş ışığın merkez frekansı, $\Delta\omega$ bant genişliğidir. Bu ifadedeki ortalama grup indisi,

$$\langle n_g \rangle = \frac{\int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega} n_g(\omega) d\omega}{\Delta\omega} \quad (3)$$

olarak tanımlanmaktadır. Ortalama grup indisi değerinin hesaplanmasında bant genişliği, literatürle uyumlu olarak yavaş ışık bölgesindeki grup indisinin minimum değerinin ±10% aralığına karşı gelen frekans aralığı alınmıştır.

Yavaş ışık FKD'nun geniş bir bant aralığında yüksek grup indisi göstermesi yanında düşük grup hızı dağılımına sahip olması da beklenmektedir. Grup indisi değerinin neredeyse sabit olduğu spektral aralık yavaş ışık uygulamaları için önemlidir. Çünkü bu aralıktaki ışık FKD yapısında en az dağılımla yol almaktadır. Grup hızı dağılımını atmanın birim yol aralığında ve birim bant genişliğinde zaman bölgesinde ne kadar genişlemeye uğrayacağını göstermektedir. Grup hızı dağılımı,

$$D_\lambda = (-2\pi c/\lambda^2) \times (\partial^2 k/\partial\omega^2) \quad (4)$$

ile tanımlıdır.

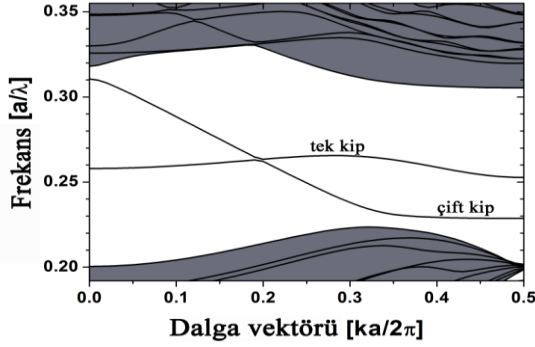
Sıcaklık algılayıcısının performansı duyarlılık parametresi, S ile belirlenmektedir. S parametresi birim sıcaklık başına rezonans dalga boyunun ne kadar kaydığını göstermektedir.

$$S = \frac{\partial\lambda}{\partial T} \quad (5)$$

3 Bulgular

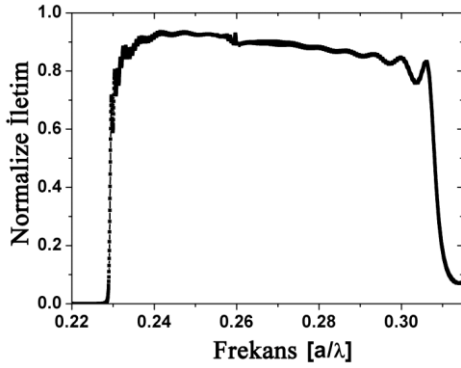
Üçgen örgülü 0.35a yarıçaplı, delikli GaAs FKD yapısına ait fotonik bant yapısı grafiği Şekil 2'de verilmiştir. TE fotonik bant aralığı 0.229(a/λ) ile 0.31(a/λ) frekansları arasında bulunmaktadır. Bant aralığı içerisindeki kiplerden biri çift, diğeri tek kiptir. Işığın fotonik kristal yapısına daha

rahat bağlaştırlabilmesi için bu çalışmada TE-çift kipler ile çalışılmıştır.



Şekil 2: Fotonik kristal dalga kılavuzunun bant yapısı.

FDTD yöntemi ile elde edilen iletim spektrumundan Şekil 3'te görüldüğü gibi TE-çift bandın bulunduğu frekans aralığında iletim %80'nin üzerindedir.



Şekil 3: Fotonik kristal dalga kılavuzunun iletim spektrumu.

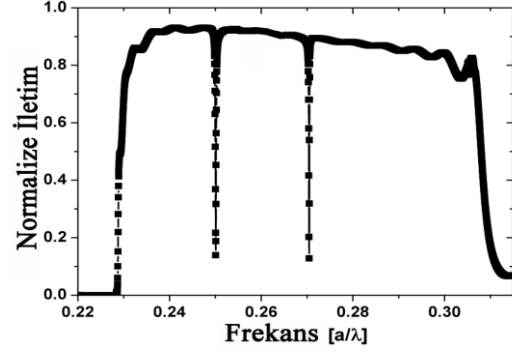
FK yapısının başlangıcından 10a mesafe öteye, dalga kılavuzundan sonra bir sıra atlanılarak bir hava deliğinin kaldırılmasıyla bir nokta kusuru oluşturulmuştur. Böylelikle dalga kılavuzunda ilerleyen geniş bantlı ışığın içerisinde kavite rezonansına ait frekansların kavite içerisine bağlaştırmaları ve orada hapsedilmesi sağlanmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi FK yapısında nokta kusuru oluşturulması ile iletim spektrumunda 0.25(a/λ) ve 0.27(a/λ) frekanslarında keskin düşme bantları yaratılmıştır.

Bu çalışmada rezonans frekanslardan 0.25(a/λ) kullanılmıştır. Bu frekansta, bant genişliği çok dar olan bir atma ışık kaynağından gönderildiğinde zamana bağlı atmanın ilerleyişinden atmanın tamamen kavite içerisine bağlaştığı, çıkış algılayıcısına ulaşan alan olmadığı ve alanın zamanla kavite içerisinde zayıfladığı ve sönmüldüğü gözlenmiştir. Atmanın kavite içerisinde ne kadar süre hapsedildiğinin bir ölçüsü kalite faktörüdür ve bu parametrenin değeri ne kadar büyükse o kadar uzun süre atma kavite içerisinde depolanır. Yüksek duyarlılık için sıcaklık algılamasının yapıldığı kavite bölgesindeki GaAs ile elektromanyetik alan uzun süre etkileşmelidir. Kalite faktörü Q ,

$$Q = \frac{f}{\Delta f} \quad (6)$$

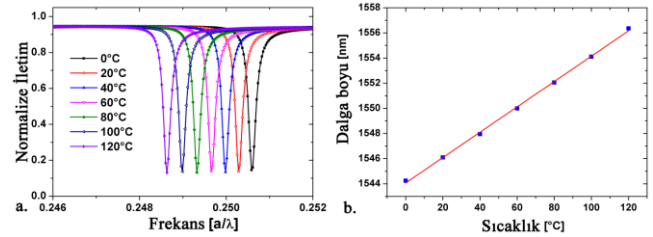
ile tanımlıdır. Burada, f kavite rezonansının olduğu frekansı, Δf ise rezonans bandının genişliğinin yarıya düştüğü noktadaki bant genişliğidir. Rezonans düşmesi Lorentz

fonksiyonuna fit edilerek Q faktörü 1215 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4: Kaviteli fotonik kristal dalga kılavuzunun iletim spektrumu.

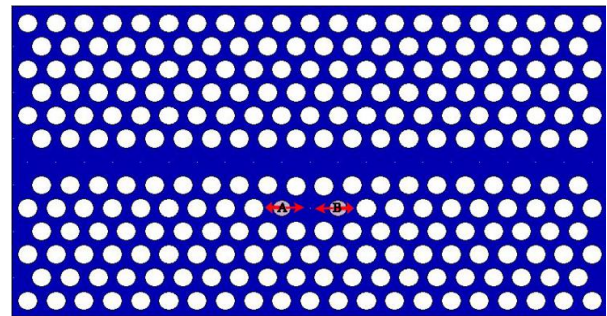
Rezonans bandın merkez dalga boyunun sıcaklık ile değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Sıcaklık arttıkça rezonans eğrisi daha düşük frekanslara kaymaktadır. Bu kaymanın sıcaklıkla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrusallık bu yapının sıcaklık algılayıcısı olarak kullanımına imkan tanımaktadır. Doğrunun eğiminden sıcaklık algılayıcısının duyarlılığı 0.1001 nm/°C olarak belirlenmiştir.



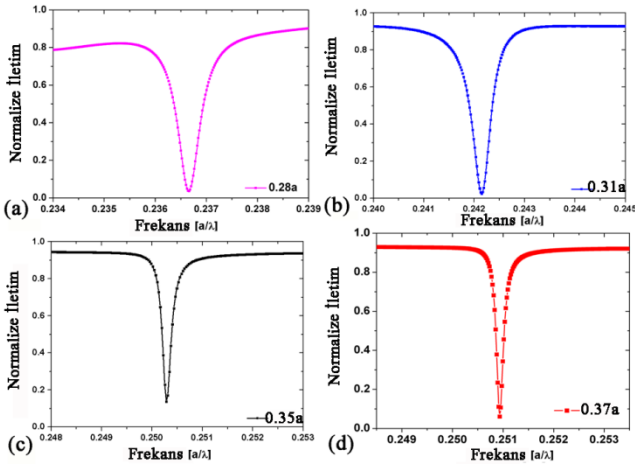
Şekil 5: Kaviteli FK yapısının sıcaklığa bağlı olarak kavite rezonans bandının değişimi, b) kavite rezonans merkez dalga boyunun sıcaklıkla değişimi.

3.1 Kavite Deliklerinin Optimize Edilmesi

Şekil 6'da A ve B harfleri ile gösterilen kavitenin sağ ve sol yanlarındaki deliklerin yarıçapları değiştirilerek kalite faktörüne etkisi incelenmiştir. Deliklerin yarıçapı arttıkça Şekil 7'den görüldüğü gibi rezonans eğrileri daha keskin bir düşüş bandı halini almaktadır. Deliklerin yarıçapı 0.28a iken kalite faktörü 496, 0.31a iken 580, 0.35a iken 1215 ve 0.37a iken 1521 olarak hesaplanmıştır. Kavite deliklerinin yarıçapı, komşusundaki deliklere çok yaklaşarak üretimde sorun çıkarmaması için 0.37a'dan fazla artırılmamıştır. Sonraki analizlerde Şekil 6'da A ve B ile gösterilen deliklerin yarıçapı 0.37a olarak alınmıştır.

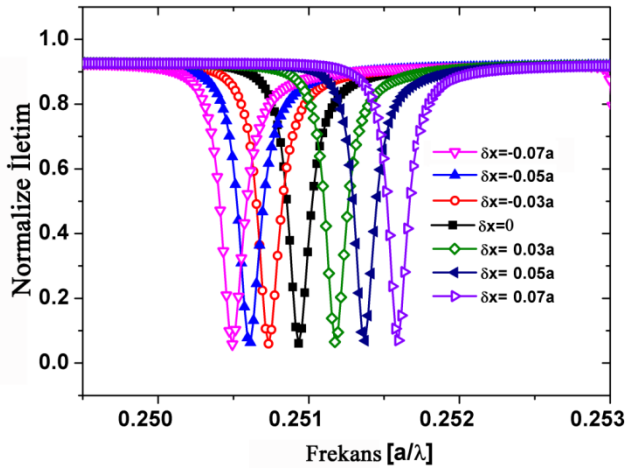


Şekil 6: Kaviteli FKD yapısında A ve B ile gösterilen deliklerin yarıçaplarının değiştirilmesi veya içe veya dışa doğru kaydırılması.



Şekil 7: Farklı yarıçapta kavite delikli FKD yapılarının rezonans iletim bantları.

Sıcaklık duyarlılığının değerini daha da iyileştirmek için kaviteyi çevreleyen delikler ilk konumundan 0.03a, 0.05a veya 0.07a kadar içe veya dışa doğru kaydırılmıştır. Bu kaydırma dalga kılavuzuna paralel yönde gerçekleştirilmiştir. İçe doğru kaydırma '+' işareti ile, dışa doğru kaydırma ise '-' işareti ile gösterilmiştir. Dışarı doğru kaydırma oranı arttıkça Şekil 8'den görüldüğü gibi rezonans düşüş bandı dalga boyu kırmızıya doğru kaymaktadır. Ayrıca deliklerin dışa doğru kaydırılmasının kavite alanını artırarak Q faktörü değerini azalttığı, içe doğru kaydırılmasının ise kavite alanını azaltarak Q faktörü değerini artırdığı tespit edilmiştir. Kaviteyi çevreleyen deliklerin kaydırılması ile kalite faktörünün değişimi Tablo 1'de sunulmuştur.

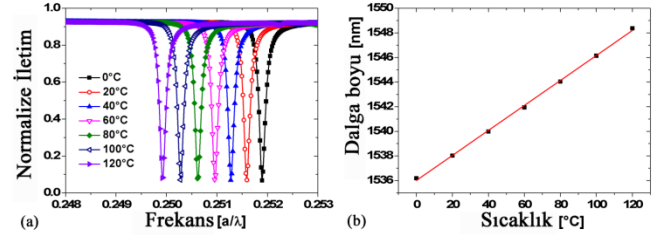


Şekil 8: Kavitedeki deliklerin kaydırılma miktarına bağlı olarak kavite rezonans düşüş bandının değişimi.

Tablo 1: Kavite deliklerinin kaydırılması ile kalite faktörünün değişimi.

Kavite deliklerinin kayması, δx	Kalite faktörü, Q
-0.07a	1426
-0.05a	1439
-0.03a	1475
0	1512
0.03a	1578
0.05a	1632
0.07a	1695

Delikler 0.07a kadar içe doğru kaydırıldığı durumda en yüksek kalite faktörü değeri elde edildiğinden, bu konfigürasyonun sıcaklık değişimine karşı performansı incelenmiştir. Sıcaklık 0 °C'den 120 °C artırıldığında rezonans bandının merkez frekansı Şekil 8'a'da görüldüğü gibi daha düşük frekanslara kaymaktadır. Bu kayma doğrusaldır ve doğrunun eğiminden sıcaklık duyarlılığı 0.1015 nm/°C olarak elde edilmiştir. Sonuç itibarıyla, kavitenin sağ ve sol yanlarındaki deliklerin yarıçapı 0.37a alınarak ve bu delikler 0.07a kadar içe kaydırılarak sıcaklık duyarlılığı %1.4 oranında artırılmıştır.

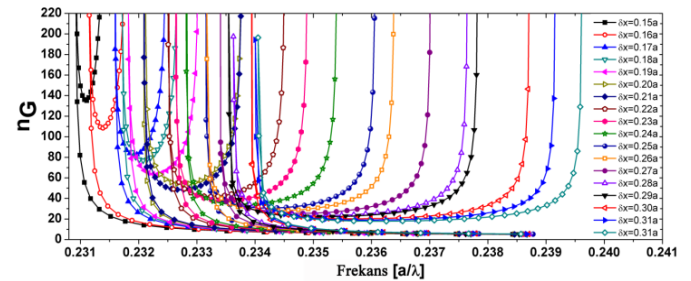


Şekil 9: Optimize edilmiş kaviteli FKD yapısının sıcaklığa bağlı olarak. (a): Kavite rezonans düşüş bandının değişimi. (b): Kavite rezonans merkez dalga boyunun sıcaklıkla değişimi.

3.2 Yavaş Işık Rejimi Kullanılarak Sıcaklık Duyarlılığının Artırılması

Bu kısımda sıcaklık algılayıcısının duyarlılığını artırmak için yavaş ışık olgusundan yararlanılmıştır. Işığın hızı yavaşladıkça ortam ile daha fazla etkileşimde bulunmaktadır. Bu durum algılayıcı performansı bakımından avantaja dönüştürülebilir.

Dalga kılavuzunu çevreleyen ilk sıra delikler dalga kılavuzu doğrultusunda kaydırılarak kavite rezonans frekansında grup indisinin sabit olduğu yavaş ışık rejimi yakalanmaya çalışılmıştır. Şekil 10'da ilk sıra delikler dalga kılavuzu boyunca kaydırıldıkça U-şeklindeki n_g -frekans eğrilerinin değişimi gösterilmiştir. Kaydırma miktarı, δx arttıkça grup indisinin değeri azalmakta, bant genişliği ise oldukça artmaktadır. Kaydırma miktarı grup indisi değeri çok azaldığından 0.31a'dan daha fazla artırılmamıştır. Grup indisinin sabit olduğu bölgenin merkez frekans değeri, 0.25(a/λ) olan kavite rezonans frekansından çok düşüktür. Yavaş ışığın oluştuğu merkez frekansı değerini 0.25(a/λ)'ya artırmanın bir yolu fotonik kristal yapısındaki hava oranını artırmaktadır. Bu amaçla dalga kılavuzunu çevreleyen ilk sıra deliklerin yarıçapı 0.35a'dan 0.40a'ya artırılmıştır.

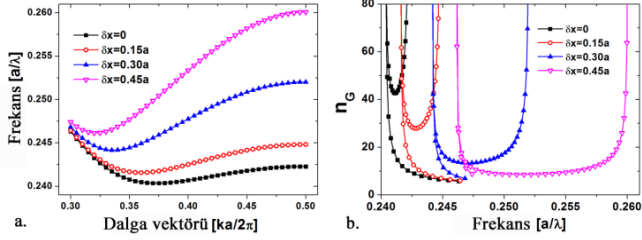


Şekil 10: FKD yapısının dalga kılavuzu çevresindeki ilk sıra deliklerinin kaydırılması ile grup indisi-frekans eğrisinin değişimi.

0.40a yarıçaplı ilk sıra delikler dalga kılavuzuna paralel yönde 0'dan en yüksek kaydırma değeri olan 0.50a'ya kadar kaydırılmıştır. 0, 0.15a, 0.30a ve 0.45a kaydırma miktarları için dağılım eğrisi Şekil 11a'da, grup indisi-frekans eğrisi ise

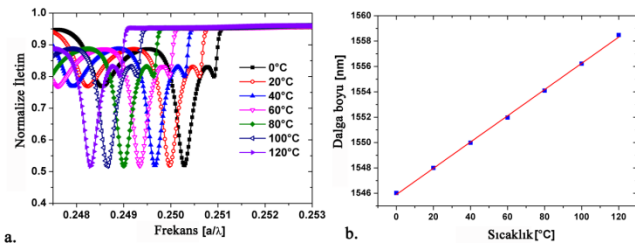
Şekil 11b'de verilmiştir. Kaydırma miktarı arttıkça dağınım eğrisi daha yüksek frekanslara doğru kıvrılmaktadır (Şekil 11a). İlk sıra deliklerin 0.30a kaydırılması ile grup indisi-frekans eğrisinin sabit grup indisi kabul edilen bölgesi $0.25(a/\lambda)$ kavite rezonans frekansından geçmektedir. $\delta x = 0.30a$ için ortalama grup indisi değeri 14.02, bant genişliği 20.23 nm ve NDBP çarpanı 0.1815 olarak bulunmuştur.

Kavite rezonansının olduğu $0.25(a/\lambda)$ frekansında (1548.45 nm) $\delta x = 0.30a$ kaydırma için grup indisi değeri 17'dir. Bu şu anlama gelmektedir: Bu dalga boyunca ışık hızı boş uzaydaki değerinden 1/17'sine azalmaktadır.



Şekil 11: Dalga kılavuzu çevresindeki ilk sıra delikleri 0.40a olarak alınmış FKD yapısında, bu deliklerin kaydırılması ile. (a): Dağınım eğrisinin değişimi, (b): Grup indisi-frekans eğrisinin değişimi.

İlk sıra deliklerin 0.40a yarıçaplı (155 nm) olduğu ve dalga kılavuzu boyunca 0.30a kadar kaydırıldığı durum için FK temelli sıcaklık algılayıcısının performansı incelenmiştir. Kavite rezonans bandı yavaş ışık durumunda genişlemiştir ve kalite faktörü değeri 640 olarak hesaplanmıştır. Kavite rezonans bandının sıcaklıkla değişimi Şekil 12'a da, kavite rezonans merkez dalga boyunun sıcaklıkla değişimi ise Şekil 12b'de verilmiştir. Sıcaklık arttıkça rezonans bandı daha düşük frekanslara kaymaktadır. Rezonans bandının merkez dalga boyu sıcaklık ile doğru orantılı olarak değişim göstermektedir ve doğrunun eğiminden sıcaklık duyarlılığı 0.1029 nm/°C olarak bulunmuştur. Fabrikasyon hatalarından ötürü hava deliklerinin çapının 2 nm standard sapma ile değişim göstermesine karşın duyarlılık ± 0.0001 nm/°C oynama yapmıştır. İlk duruma göre yavaş ışık kullanılarak kaviteli FKD temelli sıcaklık algılayıcısının duyarlılığı $2.8\% \pm 0.1\%$ iyileştirilmiştir.



Şekil 12: Optimize edilmiş kaviteli yavaş ışık FKD yapısının sıcaklığa bağlı olarak kavite rezonans bandının değişimi. (b): Kavite rezonans merkez dalga boyunun sıcaklıkla değişimi.

4 Sonuçlar

Üçgen örgülü GaAs fotonik kristal yapısı kullanılarak bir sıcaklık algılayıcısı önerilmiş ve algılayıcının duyarlılığı kavite çevresinde yapısal değişimler yapılarak ve yavaş ışık özelliği kullanılarak iyileştirilmiştir. Düzlem dalga açılımı yöntemi kullanılarak fotonik kristal dalga kılavuzunun kılavuz kipleri ve sıcaklık algılayıcısının çalışma frekans aralığı belirlenmiştir.

0 °C'den 120 °C'ye sıcaklık artışının GaAs malzemesinin kırılma indisine etkisi dikkate alınarak zamanda sonlu farklar yöntemi hesapları ile kavitenin rezonans bandının sıcaklık değişimi ile kayması incelenmiştir. Sıcaklık ile kavite rezonans frekansının doğrusal değişiminden algılayıcının duyarlılığı 0.1001 nm/°C olarak hesaplanmıştır.

Sıcaklık algılayıcısının duyarlılığının artırılması için kavite özellikleri optimize edilmiştir. Kavitenin sağ ve sol yanlarındaki deliklerin yarıçapları 0.37a olarak değiştirilerek ve bu delikler 0.07a kadar birbirlerine doğru kaydırılarak sıcaklık duyarlılığında $1.4\% \pm 0.1\%$ artış sağlanmıştır.

Son olarak, fotonik kristal dalga kılavuzu yapısı kavite rezonansının olduğu frekansta yavaş ışık olgusu kullanılarak optimize edilmiştir. Dalga kılavuzu çevresindeki ilk sıra deliklerin yarıçapları 0.40a olarak ayarlanarak ve bu delikler dalga kılavuzu doğrultusunda 0.30a kadar kaydırılarak 20.23 nm spektral aralıkta 14.02 değerinde ortalama grup indisine sahip yavaş ışık bölgesi (sabit grup indisi) oluşturulmuştur. Bu fotonik kristal konfigürasyonunda sıcaklık duyarlılığı 0.1029 nm/°C olarak hesaplanmıştır. Yavaş ışık kullanılarak başlangıç durumuna göre sıcaklık algılayıcısının duyarlılığı $2.8\% \pm 0.1\%$ artırılmıştır.

5 Teşekkür

13B4343015 numaralı bilimsel araştırma projesi ile sağlamış olduğu destekten ötürü Ankara Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

6 Kaynaklar

- [1] Nair V, Vijaya R. "Photonic Crystal Sensors: An Overview". *Progress in Quantum Electronics*, 34(3), 89–134, 2010.
- [2] Gu L, Jiang W, Chen X, Chen Ray T. "Thermooptically Tuned Photonic Crystal Waveguide Silicon-On-Insulator Mach-Zehnder Interferometers". *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(5), 342-344, 2007.
- [3] Joannopoulos JD, Johnson SG, Winn JN, Meade RD. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. 2nd ed. New Jersey, USA, Princeton University Press, 2008.
- [4] Monifi F, Djavid M, Ghafari A, Abrishamian MS. "Design of Efficient Photonic Crystal Bend and Power Splitter Using Super Defects". *Journal of Optical Society of America B*, 25(11), 1805-1810, 2008.
- [5] Boscolo S, Midrio M, Krauss TF. "Y Junctions in Photonic Crystal Channel Waveguides: High Transmission and Impedance Matching". *Optics Letters*, 27(12), 1001-1003, 2002.
- [6] David M, Ghaffari A, Monifi F, Abrishamian MS. "T-Shaped Channel Drop Filters Using Photonic Crystal Ring Resonators". *Physica E*, 40(10), 3151-3154, 2008.
- [7] Wang CC, Chen LW. "Channel Drop Filters With Folded Directional Couplers in Two-Dimensional Photonic Crystals". *Physica B*, 405(4), 1210-1215, 2010.
- [8] Manzacca G, Paciotti D, Marchese A, Moreolo MS, Cincotti G. "2D Photonic Crystal Cavity-Based WDM Multiplexer". *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 5(4), 164-170, 2007.
- [9] Tekeste MY, Yarrison-Rice JM. "High Efficiency Photonic Crystal Based Wavelength Demultiplexer". *Optics Express*, 14(17) 7931-7942, 2006.
- [10] Altug H, Englund D, Vuckovic J. "Ultrafast Photonic Crystal Nanocavity Laser". *Nature Physics*, 2, 484-488, 2006.

- [11] Kumar A, Kumar V, Suthar B, Bhargava A. "Wide Range Temperature Sensors Based on One-Dimensional Photonic Crystal with a Single Defect". *International Journal of Microwave Science and Technology*, 2012, 182793-182799, 2012.
- [12] Hsu JM, Lee CL, Huang PJ, Hung CH, Tai PY. "Temperature Sensor With Enhanced Sensitivity Based on Photonic Crystal Fiber Interferometer with Material Overlay". *IEEE Photonics Technology Letters*, 24(19), 1761-1764, 2012.
- [13] García-Rupérez J, Toccafondo V, Bañuls MJ, Castello JG, Griol A, Peransi-Llopis S, Maquieira A. "Label-Free Antibody Detection using Band Edge Fringes in SOI Planar Photonic Crystal Waveguides in the Slow-Light Regime". *Optics Express*, 18(23), 24276-24286, 2010.
- [14] Zhao Y, Zhang Y, Wang Q. "High Sensitivity Gas Sensing Method Based on Slow Light in Photonic Crystal Waveguide". *Sensors and Actuators B*, 173, 28-31, 2012.
- [15] Zhang Y, Zhao Y, Wang Q. "Multi-Component Gas Sensing Based on Slotted Photonic Crystal Waveguide with Liquid Infiltration". *Sensors and Actuators B*, 184, 179-188, 2013.
- [16] Lai WC, Chakravarty S, Zou Y, Guo Y, Chen RT. "Slow Light Enhanced Sensitivity of Resonance Modes in Photonic Crystal Biosensors". *Applied Physics Letters*, 102(4), 041111-041114, 2013.
- [17] Notomi N, Yamada K, Shinya A, Takahashi T, Takahashi C, Yokohama I. "Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs". *Physical Review Letters*, 87(25), 253902-1-253902, 2001.
- [18] Engelen RJP, Sugimoto Y, Watanabe Y, Korterik JP, Ikeda N, Hulst NF, Asakawa K, Kuipers L. "The Effect of Higher-Order Dispersion on Slow Light Propagation in Photonic Crystal Waveguides". *Optics Express*, 14(4), 1658-1672, 2006.
- [19] Baba T. "Slow Light in Photonic Crystals". *Nature Photonics*, 2, 465-473, 2008.
- [20] Frandsen LH, Lavrinenko AV, Fage-Pedersen J, Borel PI. "Photonic Crystal Waveguides with Semi-Slow Light and Tailored Dispersion Properties". *Optics Express*, 14, 20, 9444-9450, 2006.
- [21] Hao R, Cassan E, Kurt H, Roux XL, Marris-Morini D, Vivien L, Wu H, Zhou Z, Zhang X. "Novel Kind of Semislow Light Photonic Crystal Waveguides with Large Delay Bandwidth Product". *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(11), 844-846, 2010.
- [22] Li JT, White TP, O'Faolain L, Gomez-Iglesias A, Krauss TF. "Systematic Design of Flat Band Slow Light in Photonic Crystal Waveguides". *Optics Express*, 16(9), 6227-6232, 2008.
- [23] Samara GA. "Temperature and Pressure Dependences of the Dielectric Constants of Semiconductors". *Physical Review B*, 27(6), 3494-3505, 1983.
- [24] McCaulley JA, Donnelly VM, Vernon M, Taha I. "Temperature Dependence of the Near-Infrared Refractive Index of Silicon, Gallium Arsenide and Indium Phosphide". *Physical Review B*, 49(11), 7408-7417, 1994.
- [25] MIT Fotonik-Bantlar Yazılım Paketi. "MIT Photonic-Bands (MPB) Package". <http://ab-initio.mit.edu/mpb/> (10.04.2014).
- [26] Photon Design Fotonik Kristal Benzetim Programı. "Photon Design, CrystalWave Photonic Crystal Simulator". <http://www.photondesign.com/products/crystalwave.htm> (10.04.2014).