

Optik doğrultu kuplörlerinde performans analizi

N. Özlem ÜNVERDİ^{*1}, N. Aydın ÜNVERDİ²

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437, Güneşli, İstanbul

Özet

Optik ağlarda, optik doğrultu kuplörü, optik fiber sensör, optik kuvvetlendirici, optik filtre, optik dedektör ve optik modülatör gibi devre elemanları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu olan optik devre elemanlarından optik doğrultu kuplörünün kuplaj mekanizması ve veri iletimi, Kuplaj Mod Teorisi ve Pertürbasyon Teorisi ışığında analiz edilmiştir.

Özdeş olmayan, düzlemsel yapıdaki katmanlı (slab), paralel, zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız ve kılıfsız optik fiberlerin yer aldığı optik doğrultu kuplöründeki karşılıklı etkileşim incelenmiş ve TE ve TM modları için kuplaj katsayıları belirlenmiştir. Optik fiberler arasındaki modal kuplajda, maksimum kuplajın, senkron durumda gerçekleştiği açıklanmıştır. Analizde, TE modları arasındaki kuplajın, TM modları arasındaki kuplajdan daha büyük ve TE çift modları arasındaki kuplajın, diğer modlar arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüştür.

OptiSystem 7.0 simülatör yazılımı ile performans analizi yapılan optik doğrultu kuplörünün karakteristik özellikleri irdelenmiştir. 193.1 THz frekansında çalışan ve gücü 0 dBm olan standart bir sürekli işaretli (CW, Continuous Wave) lazer ve kuplaj katsayısı 0.5 olan optik doğrultu kuplörünün kullanıldığı düzenek hazırlanmış ve optik spektrum analizörü ve optik güçölçer ile değerlendirilmiştir. Kuplör yapısının doğal bir sonucu olarak çıkış kapılarındaki gücün, giriş kapısındaki güce göre azaldığı görülmüştür. Optik doğrultu kuplörünün çıkış kapıları, optik güçölçer ile incelenmiş ve her iki çıkış kapısı için toplam gücün, -3.010 dBm olduğu izlenmiştir. Optik doğrultu kuplörünün çıkış kapılarında gözlenen güç değerlerinin kuplaj katsayısına göre değişimlerinde, kuplörün çalışma mekanizmasını destekleyecek şekilde, birinci çıkış kapısındaki gücün azalırken, ikinci çıkış kapısındaki gücün arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İletişim teknolojileri, optik haberleşme, optik fiber, optik doğrultu kuplörü.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: N. Özlem ÜNVERDİ. unverdi@yildiz.edu.tr; Tel: (212) 383 70 70 (2491)

Performance analysis of optical directional couplers

Extended abstract

Optical fibers are the preferred choice in communication technologies, because of their small losses and high channel capacity due to their broad band width. The abundance of silisium, which is the raw material from which optical fibers are manufactured, in the nature, and occupation of small space, working in harmony with the existing systems, and not being influenced by electromagnetic fields are among the basic properties of optical fibers working at THz frequencies.

In optical communication systems, communication in both directions is achieved by using the wavelength division multiplexing mechanism, and increasing the data transmission capacity is aimed. In optical communication networks, which are rapidly spreading, elements such as optical directional couplers, optical fiber sensors, optical amplifiers, optical modulators, optical isolators, optical filters, optical resonators, optical polarisers, optical circulators, optical reflectors, optical attenuators and optical detectors are commonly used. In this study, optical directional couplers are analysed.

An optical directional coupler, which is a four-port circuit element being fed by a laser or a light emitting diode at one of the ports and providing data transmission through the other three ports, consists of two parallel optical fibers and two bent or one straight and one bent optical fibers. Evanescent fields influence each other because the distance between the axes of the optical fibers is much smaller than the working wavelength.

In this study, coupling mechanism and data transmission of an optical directional coupler is analysed by using the Coupled Mode Theory and Perturbation Theory. The interaction within an optical directional coupler, which consists of non-identical, slab, parallel, weakly guiding, lossless and bare optical fibers, is analysed for a time dependent term of $\exp(j\omega t)$, and coupling coefficients which are

independent of the coordinate z in the propagation direction are determined. Change in the propagation constant because of the coupling and the relation between the coupling coefficients are given, and it is found that the maximum coupling occurs for the synchronous case when modal coupling between the optical fibers is considered. Coupling coefficients for TE and TM modes are determined by using the Maxwell equations and dielectric-dielectric boundary conditions. The change of coupling coefficients with the radius of the second optical fiber is calculated for TE even, TE odd, TM even and TM odd modes, if the transmitted power is 1 mW, the radius of the first optical fiber is 20 μm , the refractive index of the optical fibers is 1.5, and the refractive index of the surrounding region is 1, for three different propagation constants, at 200 THz. In the analysis, it is observed that the coupling between the TE modes is bigger than that between the TM modes, and that the coupling between the TE even modes is more effective than those between the other modes.

Characteristic properties of an optical directional coupler are determined by analysing its performance with OptiSystem 7.0 simulator. A system consisting of a standard continuous wave laser which works at 193.1 THz frequency and has 0 dBm power, and an optical directional coupler with a coupling coefficient of 0.5 is configured and is evaluated with an optical spectrum analyser and an optical power meter. As a natural consequence of the coupler structure, it is observed that the powers at the exit ports are less than that at the entry port. The exit ports of the optical directional coupler are examined with the optical power meter, and it is observed that the total power is -3.010 dBm for both exit ports. When the change of the power values at the exit ports of the optical directional coupler with the coupling coefficient is calculated, it is determined that while the power at the first exit port decreases, the power at the second exit port increases, which is expected because of the working mechanism of the coupler.

Keywords: Communication technologies, optical communications, optical fiber, optical directional coupler.

Giriş

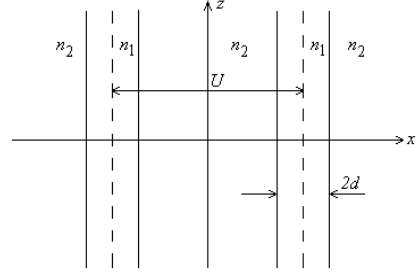
İletişim teknolojileri içinde önemli bir yere sahip olan optik haberleşmenin kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Diğer iletişim ortamlarına göre çok az kayıplı olan optik fiberler, band genişliğinin büyük olması nedeniyle, kanal kapasitesinin artmasına neden olmaktadır. Optik fiberin hammaddesinin doğada bol miktarda bulunması, az yer kaplaması, var olan sistemlerle uyumlu çalışması ve elektromagnetik alanlardan etkilenmemesi, optik haberleşme sistemlerini, aranan bir iletişim teknolojisi durumuna getirmiştir.

Bu çalışmada, optik haberleşme sistemlerinin temel elemanları arasında yer alan optik doğrultu kuplörünün karakteristik özellikleri Kupule Mod Teorisi ve Pertürbasyon Teorisi ile analiz edilmiş ve OptiSystem 7.0 simülator yazılımı ile çıkış gücü değerlendirilmiştir.

Optik doğrultu kuplöründe kuplaj mekanizması

Optik doğrultu kuplöründe, iki tane paralel, iki tane bükülmüş veya biri düz, diğeri ise bükülmüş olan optik fiber yer alır. Optik fiberlerin optik eksenleri arasındaki uzaklığın, çalışma dalgaboyuna göre çok küçük olması nedeniyle evanescent alanların karşılıklı olarak etkileşimi söz konusudur. Optik doğrultu kuplörü, bir kapısından lazer veya LED ile beslenen ve diğer üç kapısından veri iletimi sağlanan dört kapılı bir devre elemanıdır. Uygun sonlandırma elemanı kullanılarak kapıya gelen elektromagnetik dalga absorbe edilir veya kullanılan sonlandırma elemanının empedansına bağlı olarak verinin tamamının ya da bir kısmının yansması sağlanır. Birbirine paralel iki optik fiberin bulunduğu optik doğrultu kuplörü, Şekil 1'de görülmektedir.

Optik doğrultu kuplöründeki optik fiberler arasındaki karşılıklı kuplaj, Kupule Mod Teorisi ve Pertürbasyon Teorisi yardımıyla belirlenir. Optik fiberlerden birisindeki modun β propagasyon sabitinin, kupule konumundaki diğer



Şekil 1. Paralel iki optik fiberin kullanıldığı optik doğrultu kuplörü.

optik fiberdeki aynı veya farklı β propagasyon sabitine sahip olan modun etkisiyle değişimi analiz edilir (Balanis, 1989; Felsen, 1976; Haus ve Huang, 1991; Louisell, 1960; Sadıku, 2002; Snyder ve Love, 1983; Ünverdi, 1998; Zhou vd., 2006).

Zamana göre değişimin $exp(j\omega t)$ olması durumunda, c_{12} ve c_{21} , propagasyon doğrultusu z 'den bağımsız olan kuplaj katsayıları olmak üzere, optik fiberler arasındaki karşılıklı kuplaj nedeniyle propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$\Delta\beta = j(c_{12} c_{21})^{1/2} \quad (1)$$

olarak bulunur. Maxwell denklemleri kullanılarak kuplaj katsayıları,

$$|c_{12}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_I^2 - n_2^2) E_I^* \cdot E_2 dx dy \quad (2)$$

ve

$$|c_{21}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_{II}^2 - n_2^2) E_{II}^* \cdot E_I dx dy \quad (3)$$

dir. Burada, P modların gücü, n_I birinci kılavuz bölgesinin kırılma indisi, n_{II} ikinci kılavuz bölgesinin kırılma indisi ve n_2 kılavuzları saran ortamın kırılma indisidir.

Bu bölümde, Şekil 1’de görülen optik doğrultu kablolarındaki kılıfsız optik fiberlerdeki kablaj analizi, TE ve TM modları için yapılmıştır (Ünverdi, 1998). Optik fiberlerde iletilen TE çift ve TE tek modlarındaki elektrik alan,

$$E_y = \begin{cases} A \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & 0 \leq x \leq d \\ B e^{-\gamma(|x|-d)} & d \leq x < \infty \end{cases} \quad (4)$$

dur. Burada, d optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapı ve k_0 serbest uzaydaki dalga sayısı olmak üzere, çekirdek bölgesi ve dış ortama ilişkin özdeğerler,

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (5)$$

ve

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (6)$$

dir. Optik fiberlerin dielektrik ortamlar olduğu dikkate alınarak dielektrik – dielektrik sınır koşulları kullanıldığı zaman katsayılar,

$$A = \sqrt{\frac{2\omega\mu_0 P}{\beta(1 + \gamma d)}} \quad (7)$$

ve

$$B = A \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

olarak elde edilir. Burada, P , optik fiberde iletilen güçtür.

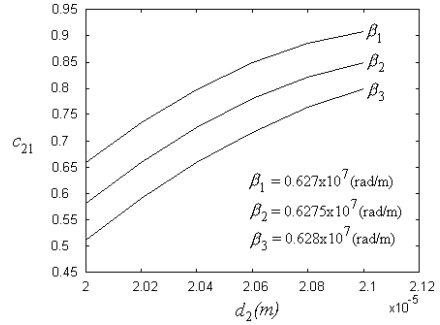
Özdeş olmayan optik fiberlerdeki kablaj katsayısı, TE çift modları için,

$$c_{21} = \frac{k_0^2}{\beta} \left(n_1^2 - n_2^2 \right) \left[\frac{\sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} + \frac{\cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right] \quad (9)$$

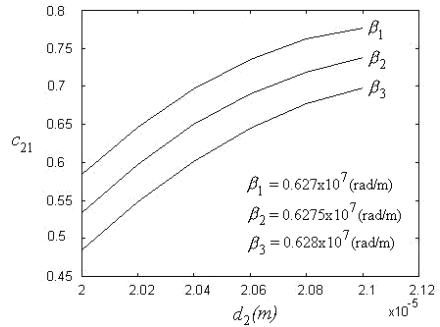
ve TE tek modları için,

$$c_{21} = \frac{k_0^2}{\beta} \left(n_1^2 - n_2^2 \right) \left[\frac{\cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} + \frac{\sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right] \quad (10)$$

formundadır. Özdeş olmayan, düzlemsel yapıdaki katmanlı, paralel, zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız ve kılıfsız optik fiberlerin yer aldığı optik doğrultu kabloları için çalışma frekansı 200



Şekil 2. Optik doğrultu kablolarında iletilen TE çift modlarının kablajında, kablaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



Şekil 3. Optik doğrultu kablolarında iletilen TE tek modlarının kablajında, kablaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

THz’de, $P=1$ mW, $d_1=20$ μm , $n_1=1.5$ ve $n_2=1$ için TE çift ve TE tek modlarındaki kablaj

katsayısı c_{21} 'in ikinci optik fiberin yarıçapı d_2 'ye göre değişimleri, Şekil 2 ve Şekil 3'te yer almaktadır.

Optik fiberlerdeki TM çift ve TM tek modlarındaki magnetik alan,

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{cases} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{cases} & 0 \leq x \leq d \\ B_1 e^{-\gamma(|x|-d)} & d \leq x < \infty \end{cases} \quad (11)$$

dur. Dielektrik – dielektrik sınırlarına göre, katsayılar,

$$A_1 = \left[\frac{2\omega\epsilon_0 n_1^2 P}{\beta \left[d + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right]^{1/2} \quad (12)$$

ve

$$B_1 = A_1 \begin{cases} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{cases} \quad (13)$$

olarak bulunur. Özdeş olmayan optik fiberlerde iletilen TM çift modları için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \omega^2 \epsilon_0^2 n_1^2 (n_1^2 - n_2^2)$$

$$\left[\left(\frac{1}{\kappa^2 \sqrt{d_1 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{\sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\beta^2 \sqrt{d_2 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right) \right]$$

$$\left(\frac{1}{\gamma^2 \sqrt{d_1 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right)$$

$$\left(\frac{\cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\beta^2 \sqrt{d_2 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right)$$

(14)

formunda iken, TM tek modları için,

$$c_{21} = \omega^2 \epsilon_0^2 n_1^2 (n_1^2 - n_2^2)$$

$$\left[\left(\frac{1}{\kappa^2 \sqrt{d_1 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right) \right]$$

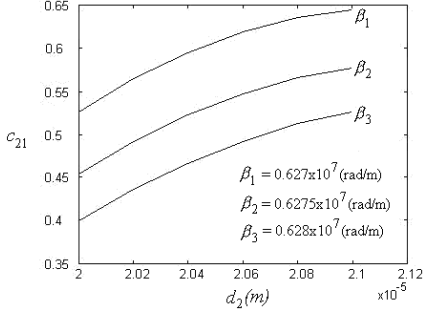
$$\left(\frac{\cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\beta^2 \sqrt{d_2 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right)$$

$$\left(\frac{1}{\gamma^2 \sqrt{d_1 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right)$$

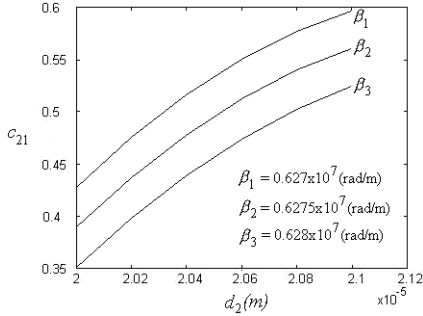
$$\left(\frac{\sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\beta^2 \sqrt{d_2 + \frac{n_1 n_2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right)$$

(15)

yapısındadır. Çalışma frekansı 200 THz'de, $P=1$ mW, $d_1=20$ μm , $n_1=1.5$ ve $n_2=1$ için TM çift ve TM tek modlarındaki kablaj katsayısı c_{21} 'in ikinci optik fiberin yarıçapı d_2 'ye göre değişimleri, Şekil 4 ve Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 4. Optik doğrultu kablolarında iletilen TM çift modların kablajında kablaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



Şekil 5. Optik doğrultu kablolarında iletilen TM tek modların kablajında kablaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

Çalışmada, TE modları arasındaki kablajın, TM modları arasındaki kablajdan daha büyük olduğu belirlenmiş ve TE çift modları

arasındaki kablajın, diğer modlar arasındaki kablajdan daha etkin olduğu gözlenmiştir.

Kayıpsız ortamda, optik fiberler arasındaki transfer faktörü,

$$F_{12} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2 |c_{12}|} \right)^2} \quad (16)$$

olduğu göz önünde tutularak, modlar arasındaki maksimum güç transferinin, senkron durumda, bir başka ifadeyle, aynı propagasyon sabitine sahip olan modlar arasında meydana geldiği; $|F_{12}| \ll 1$ durumunda ise, kablaj etkisinin çok küçük olduğu görülmektedir (Louisell, 1960; Ünverdi, 1998).

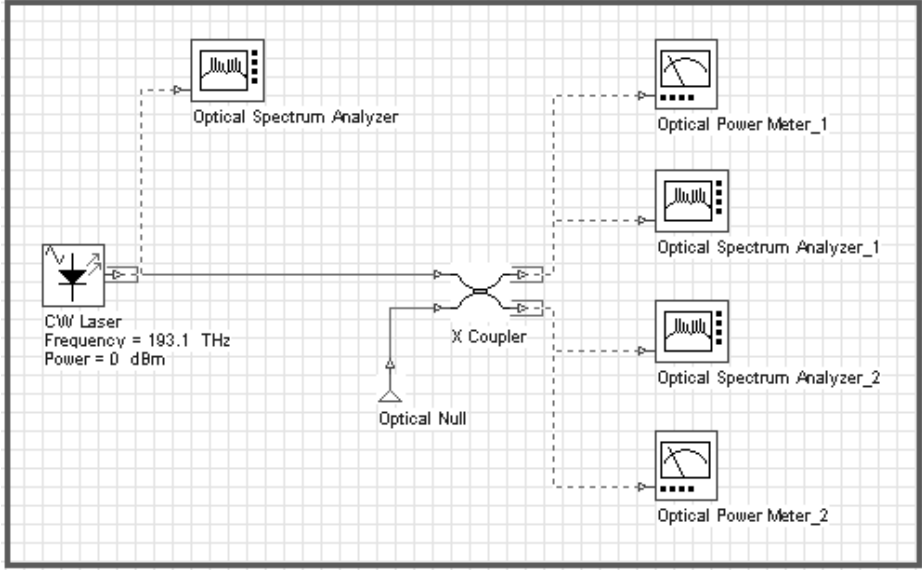
Optik doğrultu kablolarının çıkış gücü

Bu bölümde, optik doğrultu kablolarının karakteristik özellikleri, OptiSystem 7.0 simülasyon yazılımı kullanılarak incelenmiştir (OptiSystem Component Library, 2008).

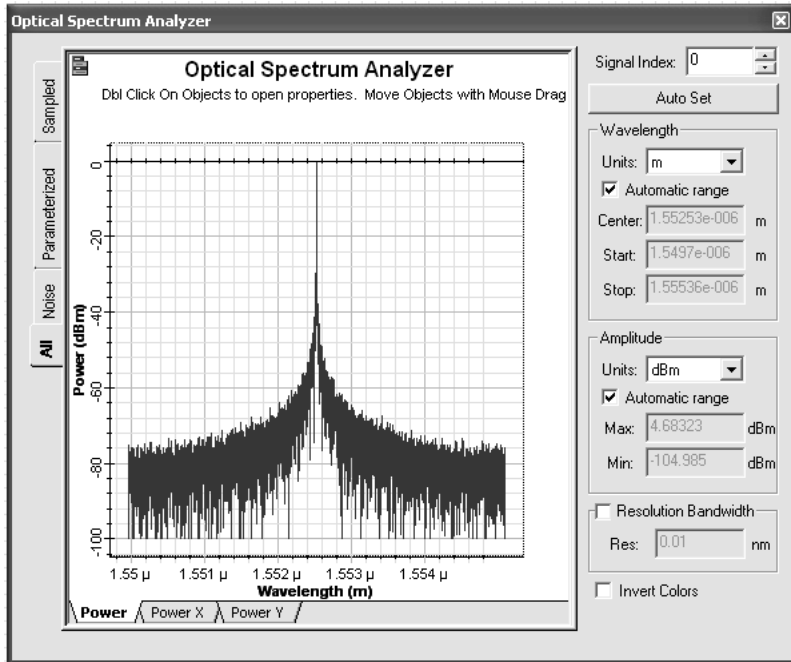
Şekil 6'da yer alan ve 193.1 THz frekansında çalışan ve gücü 0 dBm olan standart bir sürekli işaretli (CW, Continuous Wave) lazer ve kablaj katsayısı 0.5 olan optik doğrultu kablolarının kullanıldığı düzenek hazırlanarak optik spektrum analizörü ve optik güçölçer ile değerlendirilmiştir. Sürekli işaretli lazerin gücünün dalgalı boyuna göre değişimi, Şekil 7'de verilmiştir.

Optik doğrultu kablolarının çıkış kapılarındaki gücün dalgalı boyuna göre değişimi, optik spektrum analizörü ile gözlenmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9'daki çıkış karakteristiklerinin benzer özellik gösterdiği ve giriş gücünün azaldığı görülmektedir.

Optik doğrultu kablolarının çıkış kapıları, optik güçölçer ile incelenmiş ve Şekil 10'da görüldüğü gibi, her iki çıkış kapısı için toplam gücün, -3.010 dBm olduğu belirlenmiştir.

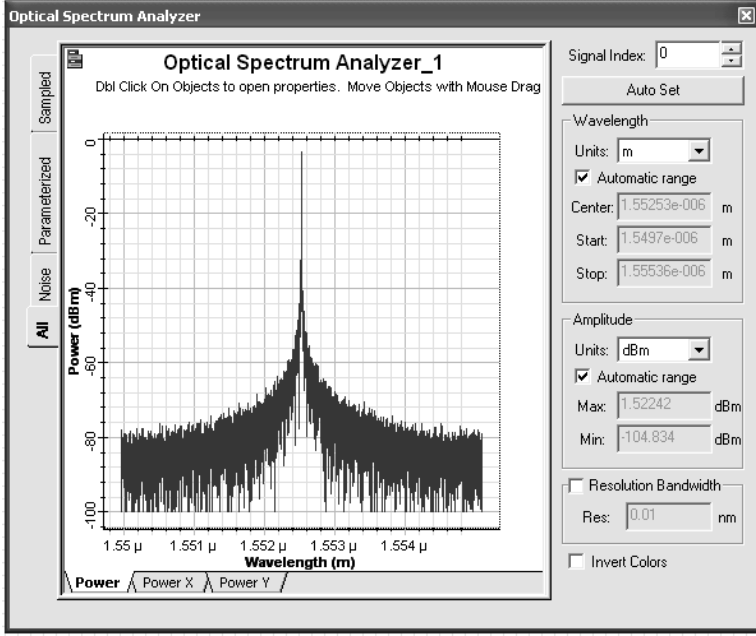


Şekil 6. 193.1 THz'de çalışan optik doğrultu koplörü düzeneği.

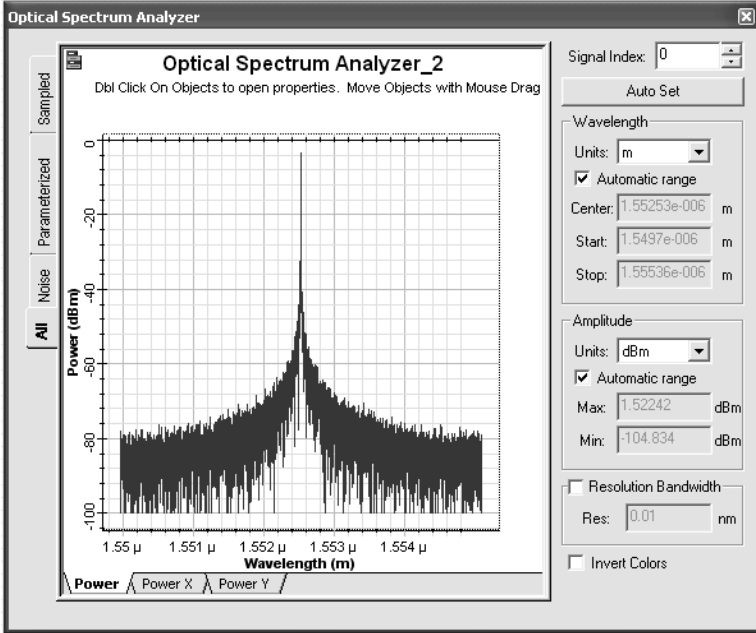


Şekil 7. 193.1 THz'de çalışan sürekli işaretli lazerin gücünün dalgaboyuna göre değişimi.

Optik doğruyu kplörlerinde performans analizi



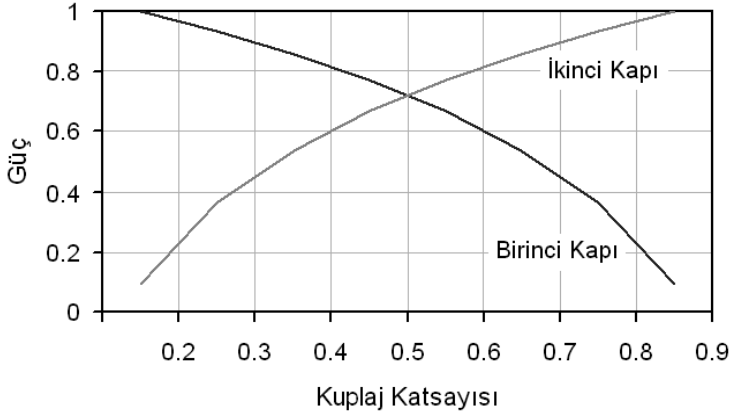
Şekil 8. Optik doğruyu kplörünün birinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi.



Şekil 9. Optik doğruyu kplörünün ikinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi.



Şekil 10. Optik doğrultu kuplörünün çıkış kapılarındaki toplam güç bilgisi.



Şekil 11. Optik doğrultu kuplörünün gücünün kuplaj katsayısına göre değişimi.

Şekil 11’de yer alan optik doğrultu kuplörünün çıkış kapılarında gözlenen güç değerlerinin kuplaj katsayısına göre değişimleri ile kuplörün çalışma mekanizmasının bir göstergesi olarak birinci çıkış kapısındaki gücün azalırken, ikinci çıkış kapısındaki gücün arttığı görülmüştür.

Semboller

- c : Kuplaj katsayısı
- d : Optik fiberin yarıçapı
- E : Elektrik alan
- F : Transfer faktörü
- k : Dalga sayısı
- n : Kırılma indisi
- P : Optik fiberde iletilen güç
- t : Zaman
- U : Optik eksenler arasındaki uzaklık
- β : Propagasyon sabiti
- γ : Optik fiberi saran bölgenin özdeğeri

- ϵ : Dielektrik sabiti (permitivite)
- κ : Optik fiberin özdeğeri
- μ : Magnetik geçirgenlik (permeabilite)
- ω : Açılmal frekans

Sonuçlar

Bu çalışmada, optik doğrultu kuplörünün çalışma mekanizmasını belirlemek amacıyla Kuple Mod Teorisi ve Pertürbasyon Teorisi’nden yararlanılarak TE ve TM modlarına ait modal analiz yapılmıştır. Özdeş olmayan, düzlemsel yapıdaki katmanlı, paralel, zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız ve kılıfsız optik fiberlerin olduğu optik doğrultu kuplöründeki karşılıklı etkileşim incelenmiş ve kuplaj katsayıları elde edilmiştir. Optik fiberler arasındaki modal kuplajda, maksimum kuplajın, aynı propagasyon sabitine sahip olan modlar arasında bir başka

değişle senkron durumda gerçekleştiği açıklanmıştır. 200 THz'de çalışılmış ve üç farklı propagasyon sabiti için, iletilen modun gücünün 1 mW, birinci optik fiberin yarıçapının 20 µm, optik fiberlerin kırılma indisinin 1.5 ve optik fiberleri saran bölgenin kırılma indisinin 1 olması durumunda, TE çift, TE tek, TM çift ve TM tek modlarındaki kuplaj katsayılarının, ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimleri incelenmiştir. Analizde, TE modları arasındaki kuplajın, TM modları arasındaki kuplajdan daha büyük olduğu ve TE çift modları arasındaki kuplajın, diğer modlar arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmada, OptiSystem 7.0 simülasyon yazılımı ile optik doğrultu kuplörünün karakteristik özellikleri incelenmiştir. 193.1 THz frekansında çalışan ve gücü 0 dBm olan standart bir sürekli işaretli lazer ile beslenen düzenek hazırlanmıştır. Optik spektrum analizörü ile kuplaj katsayısı 0.5 olan optik doğrultu kuplörünün çıkış kapılarındaki gücün dalga boyuna göre değişimi gözlemlenmiş ve giriş gücünün, beklenildiği gibi azaldığı izlenmiştir. Optik güçölçer ile her iki çıkış kapısı için toplam gücün, -3.010 dBm olduğu görülmüştür.

Optik doğrultu kuplörünün çıkış kapılarında gözlenen güç değerlerinin kuplaj katsayısına göre değişimlerinde, kuplörün çalışma

mekanizmasını destekleyecek şekilde, birinci çıkış kapısındaki gücün azalırken, ikinci çıkış kapısındaki gücün arttığı belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Balanis, C. A., (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York.
- Felsen, L. B., (1976). Evanescent Waves, *Journal of the Optical Society of America*, **66**, 8, 751-760.
- Haus, H. A. ve Huang, W. P., (1991). Coupled-Mode Theory, *Proceedings of the IEEE*, **79**, 10, 1505-1518.
- Louisell, W. H., (1960). *Coupled Mode Parametric Electronics*, John Wiley&Sons, New York.
- OptiSystem Component Library, (2008). Optiwave.
- Sadiku, M. N. O., (2002). *Optical and Wireless Communications*, CRC Press, New York.
- Snyder, A. W. ve Love, J. D., (1983). *Optical Waveguide Theory*, J.W. Arrowsmith Ltd., Bristol, Great Britain.
- Ünverdi, N. Ö., (1998). Düz ve Bükülmüş Optik Dalga Kılavuzlarının Karşılıklı Kuplajına Kılavuzlanmış Modların Evanescent Alanlarının ve Sızıntılı Modların Etkisi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhou, K., Zhang, L., Chen, X. ve Bennion, I., (2006). Low Thermal Sensitivity Grating Devices Based on Ex-45 Tilting Structure Capable of Forward-Propagating Cladding Modes Coupling, *Journal of Lightwave Technology*, **24**, 12, 5087-5094.