

OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA KUPLAJ MEKANİZMASININ ANALİZİ

N.Özlem ÜNVERDİ¹

N.Aydın ÜNVERDİ²

Nuhi BAYIR³

^{1,3} Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Elektrik-Elektronik Fakültesi

Yıldız Teknik Üniversitesi, 34349, Beşiktaş, İstanbul

² Makina Mühendisliği Bölümü, Makina Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34437,
Gümüşsuyu, İstanbul

¹ e-posta: unverdi@yildiz.edu.tr

² e-posta: unverdi@itu.edu.tr

³ e-posta: nuhi@hotmail.com

Anahtar sözcükler: Optik Haberleşme, Optik Dalga Kılavuzu, Kuplaj Analizi

ABSTRACT

In this study, the mutual coupling mechanism between a pair of cladded, weakly guiding, lossless, slab and unidentical optical waveguides analyzed using the Coupled Mode Theory. The coupling coefficient in TE modes and TM modes is evaluated.

1. GİRİŞ

1960'lı yıllardan itibaren iletişim teknolojisinde yer almaya başlayan optik dalga kılavuzları, günümüzde, data haberleşmesi, telefon ağları, kablolu televizyon sistemleri, bilgisayar haberleşmesi, ulaşım, tıp ve askeri uygulamalar gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Optik haberleşmenin temel taşı olan optik fiberler, özellikle az kayıplı olmaları ve büyük band genişliğine sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, düzlemsel yapıdaki katmanlı, kayıpsız, kılıflı ve özdeş olmayan optik dalga kılavuzlarının birbirlerine zayıfça kuple oldukları düşünülerek modlar arasındaki kuplaj incelenmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümü'nde, optik fiberler arasındaki karşılıklı kuplaj mekanizması, Kuple Mod Teorisi yardımıyla ortaya konmuş ve kuplaj katsayıları elde edilmiştir. 3. Bölüm'de, özdeş olmayan optik fiberlerde aynı propagasyon sabitine sahip olan modlar arasındaki kuplaj irdelenerek, TE ve TM modları için, kuplaj nedeniyle meydana gelen değişim analiz edilmiştir. 4. Bölüm'de, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yorumlanmıştır.

2. KUPLE OPTİK FİBERLER

Kuple optik fiberlerden birisindeki modun elektromagnetik özelliklerinin, diğer kılavuzdaki

modun etkisiyle nasıl değiştiğini açıklayan Kuple Mod Teorisi yardımıyla, aynı propagasyon sabitine sahip olan modlara ilişkin kuple mod denklemleri,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta a_1 + c_{12}a_2 \quad (1)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta a_2 + c_{21}a_1 \quad (2)$$

yapısında bulunur [1,2]. Burada, a_1 ve a_2 , z doğrultusunda propagasyon yapan modların genlikleri, c_{12} ve c_{21} ise, propagasyon doğrultusu z' 'den bağımsız olan kuplaj katsayılarıdır.

Kuplaj nedeniyle propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$\Delta\beta = j(c_{12} c_{21})^{1/2} \quad (3)$$

olarak bulunur. P gücüne sahip modlar için kuplaj katsayıları,

$$|c_{12}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_I^2 - n_3^2) E_1^* \cdot E_2 dx dy \quad (4)$$

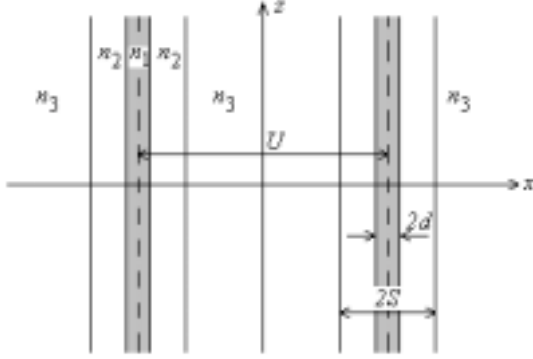
ve

$$|c_{21}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_{II}^2 - n_3^2) E_2^* \cdot E_1 dx dy \quad (5)$$

şeklinde elde edilir [3,4]. Burada, n_I birinci kılavuz bölgesinin, n_{II} ikinci kılavuz bölgesinin, n_3 ise, kılavuzları saran ortamın kırılma indisidir.

3. KUPLE OPTİK FİBERLERDE KUPLAJ KATSAYILARI

Bu çalışmada, optik eksenleri arasındaki uzaklığın U olduğu Şekil-1’de görülen kılıflı optik fiberlerdeki kuplaj mekanizması, TE ve TM modları için incelenmiştir.



Şekil-1 Kuplaj kılıflı ve düzlemsel yapıdaki optik fiberler.

Şekil-1’deki kılavuzlardan birisinde, TE çift ve TE tek modları için elektrik alan,

$$E_y = \begin{cases} A \begin{cases} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{cases} & 0 \leq x \leq d \\ B e^{\gamma x} + C e^{-\gamma x} & d \leq x \leq S \\ F e^{-\rho x} & S \leq x < \infty \end{cases} \quad (6)$$

dur [5,6]. Burada, d çekirdek bölgesinin yarıçapı, S , kılıf bölgesinin yarıçapıdır; κ , n_1 kırılma indisli çekirdek bölgesinin, γ , n_2 kırılma indisli kılıf bölgesinin, ρ ise, kılavuzları saran dış ortamın özdeğerleridir ve

$$\kappa = (n_1^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\gamma = (\beta^2 - n_2^2 k_0^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$\rho = (\beta^2 - n_3^2 k_0^2)^{1/2} \quad (9)$$

olarak ifade edilirler. Burada, k_0 , serbest uzaydaki dalga sayısıdır. Sınır koşullarına göre, katsayılar,

$$B = \frac{A}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} e^{-\gamma d} e^{-2\gamma(S-d)} \quad (10)$$

$$C = A e^{\gamma d} \begin{cases} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{cases} \quad (11)$$

$$F = \frac{2 \kappa \gamma A}{(\gamma + \rho)(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} e^{\rho S} e^{-2\gamma(S-d)} \quad (12)$$

olarak bulunur. Burada,

$$A = \left(\frac{2 \omega \mu_0 \gamma}{\beta(1 + \gamma d)} P \right)^{1/2} \quad (13)$$

dir.

Kılıf bölgesinin kalınlığının arttıkça, B katsayısının, sifra yakınsayacağı açıkça görülmektedir.

Özdeş olmayan optik fiberlerin kuplajında, (5) eşitliğindeki kuplaj katsayısı, TE çift modları için,

$$c_{21} = \frac{k_0^2 (n_2^2 - n_3^2)}{\beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \left\{ \frac{\sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2} + \right.$$

$$\left. \left[\frac{1}{\gamma^2} \left[\cos(\kappa d_1) e^{\gamma d_1} (1 - e^{\gamma(d_2 - S_2)}) \right] \left[\cos(\kappa d_2) e^{\gamma d_2} (1 - e^{\gamma(d_1 - S_1)}) \right] \right] + \frac{4 \kappa^2 \gamma^2 e^{\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2)}}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \right\} \quad (14)$$

iken, TE tek modları için,

$$c_{21} = \frac{k_0^2 (n_2^2 - n_3^2)}{\beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \left\{ \frac{\cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2} + \right.$$

$$\left. \left[\frac{1}{\gamma^2} \left[\sin(\kappa d_1) e^{\gamma d_1} (1 - e^{\gamma(d_2 - S_2)}) \right] \left[\sin(\kappa d_2) e^{\gamma d_2} (1 - e^{\gamma(d_1 - S_1)}) \right] \right] + \frac{4 \kappa^2 \gamma^2 e^{\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2)}}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \right\} \quad (15)$$

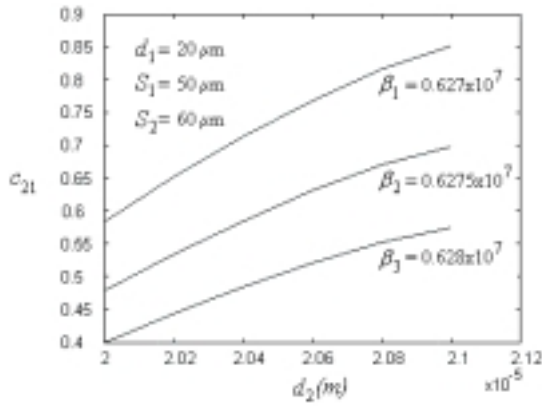
olarak elde edilir [7]. Burada, çekirdek ve kılıf bölgelerinin yarıçaplarındaki “1” alt indisleri, birinci

optik fibere, “2” alt indisleri ise, ikinci optik fibere ait olan bilgileri ifade eder.

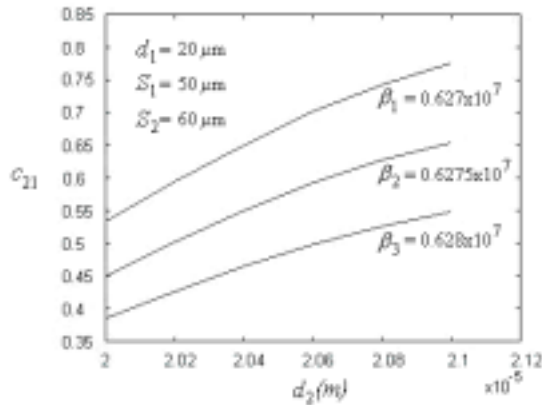
Bu çalışmada, ν , azimutal mod sayısı ve V , normalize frekans olmak üzere,

$$(\kappa d)_c \cong V_c = \nu \frac{\pi}{2}, \quad \nu = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

ifadesi [8], (14) ve (15) eşitlikleri referans alınmıştır. Analizde, aynı propagasyon sabitine sahip olan modlar arasındaki kuplajın, diğer modlar arasındaki kuplajdan daha fazla olduğu görülmüştür [2]. Çalışma frekansı 200 THz’de, $P=1$ mW, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.49$, $n_3 = 1$, $d_1 = 20 \mu\text{m}$, $S_1 = 50 \mu\text{m}$, $S_2 = 60 \mu\text{m}$ olmak üzere, (7) ve (8) eşitlikleri ışığında, $n_2 k_0 < \beta \leq n_1 k_0$ bölgesi dikkate alınarak kuplaj analizi yapılmıştır. Optik fiberlerin kılavuzlanmış modlarında, TE çift ve TE tek modlarındaki kuplaj katsayısı c_{21} ’in ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapı d_2 ’ye göre değişimleri, Şekil-2 ve Şekil-3’de yer almaktadır.



Şekil-2 Kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.



Şekil-3 Kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.

Şekil-1’deki kılavuzlardan birisinde, TM çift ve TM tek modları için,

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & 0 \leq x \leq d \\ B_1 e^{\gamma x} + C_1 e^{-\gamma x} & d \leq x \leq S \\ F_1 e^{-\rho x} & S \leq x < \infty \end{cases} \quad (17)$$

dur. Sınır koşullarına göre, katsayılar,

$$A_1 = \left[\frac{2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\beta \left[d + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right]^{1/2} \quad (18)$$

$$B_1 = \frac{A_1}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} e^{-\gamma d} e^{-2\gamma(S-d)} \quad (19)$$

$$C_1 = A_1 e^{\gamma d} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (20)$$

olarak elde edilir.

Özdeş olmayan optik fiberlerdeki kuplaj katsayısı TM çift modları için,

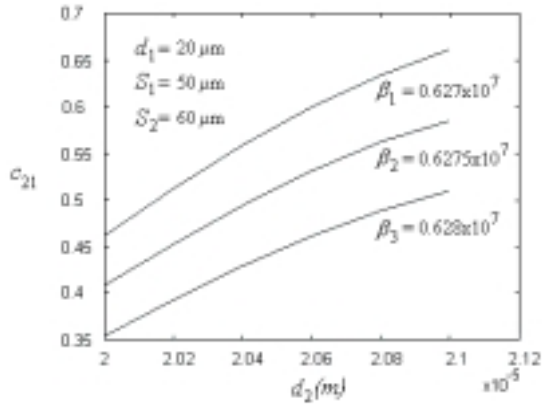
$$c_{21} = \frac{\omega^2 \epsilon}{\beta \left(d_1 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right)} \frac{(n_2^2 - n_3^2)}{\left(d_2 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right)} \left\{ \frac{\sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2} + \left[\frac{1}{\gamma^2} \left[\cos(\kappa d_1) e^{\gamma d_1} (1 - e^{\gamma(d_2 - S_2)}) \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \cos(\kappa d_2) e^{\gamma d_2} (1 - e^{\gamma(d_1 - S_1)}) \right] \right] + \frac{4 \kappa^2 \gamma^2}{\rho (\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} e^{\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2)} \right\} \quad (21)$$

şeklinde iken, TM tek modları için ise,

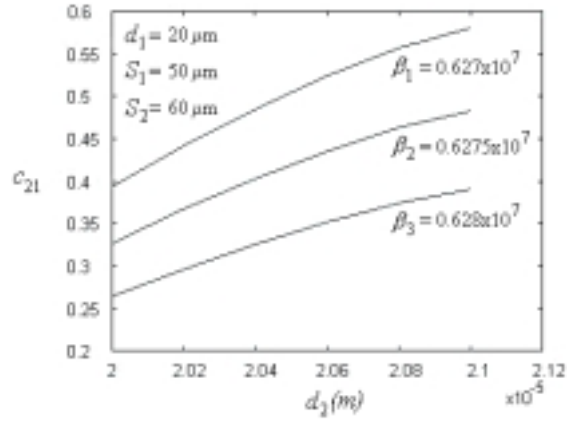
$$c_{21} = \frac{\omega^2 \varepsilon}{\beta \left(d_1 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right)} \frac{(n_2^2 - n_3^2)}{\left(d_2 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right)} \left\{ \frac{\cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2} + \left[\frac{1}{\gamma^2} \left[\sin(\kappa d_1) e^{\gamma d_1} (1 - e^{\gamma(d_2 - S_2)}) \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \sin(\kappa d_2) e^{\gamma d_2} (1 - e^{\gamma(d_1 - S_1)}) \right] \right] + \frac{4 \kappa^2 \gamma^2}{\rho (\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} e^{\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2)} \right\} \quad (22)$$

formunda bulunur [7].

(16), (21) ve (22) eşitliklerinden yararlanılarak, çalışma frekansı 200 THz'de, $P=1$ mW, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.49$, $n_3 = 1$, $d_1 = 20 \mu\text{m}$, $S_1 = 50 \mu\text{m}$, $S_2 = 60 \mu\text{m}$ olmak üzere, $n_2 k_0 < \beta \leq n_1 k_0$ bölgesinde kuplaj analizi yapılmıştır. Optik fiberlerin kılavuzlanmış modlarında, TM çift ve TM tek modlarındaki kuplaj katsayısı c_{21} 'in ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapı d_2 'ye göre değişimleri, Şekil-4 ve Şekil-5'de görülmektedir.



Şekil-4 Kuple kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı optik fiberlerde TM çift modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.



Şekil-5 Kuple kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı optik fiberlerde TM tek modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.

Kuplaj katsayısının, ikinci optik fiberin kılıf bölgesinin yarıçapının artmasıyla artacağı, optik fiberler arasındaki uzaklığın artmasıyla da azalacağı açıktır [2,9].

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, düzlemsel yapıdaki katmanlı, zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız, kılıflı ve özdeş olmayan optik fiberler arasındaki karşılıklı etkileşim mekanizması, Kuple Mod Teorisi ışığında, bir modal analiz problemi olarak incelenmiştir. Modal kuplajda, TE ve TM modları için kuplaj katsayısı elde edilmiş ve fonksiyonel yapısı değerlendirilmiştir.

Optik fiberler arasındaki maksimum kuplajın, aynı propagasyon sabitine sahip olan modlar arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. TE modları arasındaki kuplajın, TM modları arasındaki kuplajdan daha büyük olduğu görülmüş ve TE çift modları arasındaki kuplajın, diğer modlar arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu ortaya konmuştur.

Analizde, fiziksel yapının bir sonucu olarak, optik fiberlerdeki kılıf bölgesinin, kuplajın etkisini azaltacağı görülmüş ve kuplajın, doğrultu kuplörünü oluşturan optik fiberler arasındaki uzaklıkla, ters orantılı olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Louisell, W.H., Coupled Mode Parametric Electronics, John Wiley&Sons, New York, 1960.
- [2] Ünverdi, N.Ö., Düz ve Bükülmüş Optik Dalga Kılavuzlarının Karşılıklı Kuplajına Kılavuzlanmış Modların Evanescent Alanlarının ve Sızıntılı Modların Etkisi, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.

- [3] Ünverdi, N.Ö., Ünverdi, N.A., Optik Kuplörlerde Güç Kaybı Analizi, Elektrik Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, Gaziantep Üniversitesi-Gaziantep, Cilt II, S.494-497, 1999.
- [4] Marcuse, D., Investigation of Coupling Between a Fiber and an Infinite Slab, J. LIGHTWAVE TECH., vol.7, no.1, pp.122-130, 1989.
- [5] Haus, H.A., Huang W.P., Coupled-Mode Theory, PROC. IEEE, vol.79, no.10, pp.1505-1518, 1991.
- [6] Snyder, A.W., Love J.D., Optical Waveguide Theory, J.W. Arrowsmith, Bristol, 1983.
- [7] Bayır, N., Optik Dalga Kılavuzlarında Karşılıklı Kuplaj Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [8] Marcuse, D., Pulse Propagation in Multimode Dielectric Waveguides, BELL SYST. TECH. J., vol.51, no.6, pp.1199-1232, 1972.
- [9] Huang, H.S. and Chang, H.C., Vector Coupled-Mode Analysis of Coupling Between Two Identical Optical Fiber Cores, OPT. LETT., vol.14, no.1, pp. 90-92, 1989.