

# TAM OPTİK ANAHTARLAMA İÇİN FAZ ANALİZİ

Mehmet Salih Dinleyici, Osman Akın

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Gülbahçe köyü, 35430 Urla, İzmir, Türkiye

salihdinleyici@iyte.edu.tr, osmanakin@iyte.edu.tr

## ÖZETÇE

Bu çalışmada, iki Gauss hüzmelerinin girişimi sonucu oluşturulan geçici kırınım ızgarası yardımıyla tamamen optik anahtarlama üzerine yeni bir yöntem öneriliyor. Kırınım ızgarasından yansıyan ışık demetinin fazında meydana gelen değişiklik, doğrusal olmayan ortamda Gauss ışın demetlerinin girişimi ve yüksek anahtarlama süreleri gibi kavramlar önerilen yöntemin temelini oluşturuyor. Dalga kılavuzunun kılıf bölgesinde dört dalga karışımı inceleniyor, oluşan faz farkını bulmak için oluşturulan kırınım ızgarası standart metotlarla çözümleniyor.

## ABSTRACT

In this work we investigate an all-optical switching node that can be controlled by means of a transient grating, which is formed by interference of two Gaussian beams. This design considers phase effect in the reflection of light from transient grating, real profile of Gaussian beams and fast switching time requirements. Four Wave Mixing (FWM) technique is applied in the evanescent field region of waveguide, showing  $\chi^{(3)}$  nonlinearity. The formed grating is analysed by standart methods to obtain the phase of diffracted light and reflection coefficients to find the power exchange between reflection orders.

## 1. GİRİŞ

Optik sinyal işleme alanındaki çalışmaların en önemli amaçlarından biri daha hızlı çalışan optik yönlendiriciler geliştirmektir. Bu amaçla kullanılacak olan hızlı olgu Kerr etkisidir. Simetrik veya simetrik olmayan optik malzemelere herhangi bir uyarı (ışık) uygulandığında anlık cevap verirler, dolayısıyla Kerr etkisi pek yüksek hızlarda optik yönlendirici tasarımı için kullanılabilir(1). Günümüzde 1 femto saniyelik tepki süreleri literatürde bildirilmiştir(2). Fotokırılım (photorefractive) etki de tamamen optik anahtarlama için kullanılacak olgulardan biridir. Ancak bu olgu, taşıyıcı hareketliliğine dayandığı için tepki süresi milisaniye ile ölçülmektedir ve oldukça yavaştır. Dolayısıyla, bu özelliği gösteren malzemelerin, günümüzde 100 Gbit/s civarında olan iletişim hızlarında anahtarlama için kullanılmalarını önlemektedir. Diğer taraftan, fotokırılım etkisi gösteren malzemeler bilgiyi uzun süre saklayabildikleri

için yapay sinir ağları ve hacimsel holografi uygulamaları için daha uygundurlar.

Önerilen tasarım üçüncü dereceden doğrusal olmayan optik etki kullanılarak çok yüksek hızda kırınım ızgarası oluşumu gerektirir. Bu süreç dört dalga karışımı olarak incelenir, faz ve frekans eşleştirmesi gerektirdiği için de karmaşıktır. Bu karmaşıklığın dışında bir kırınım ızgarasında elde edilen yansıma verimi düşüktür. Ayrıca, geçici ızgara oluşturmak için gereken ışık şiddeti belirli bir eşik değerinin üstünde olmalıdır. Aksi halde girişim örüntüsü herhangi bir ızgara oluşturmaz ve girişim olayı şiddetli ışıktan zayıf olana enerji aktarımı olarak kalır(1).

Bu çalışmada lazer ışınlarıyla oluşturulmuş bir ızgara tarafından kontrol edilen tamamen optik anahtar tasarımı önerilmektedir. Bu tasarım bir dalga kılavuzunun yanal rezonans veya tam iç yansıma sınırlarında çalışmaktadır.

## 2. ANAHTAR TASARIMI

Kerr tipi bir ortamda, geçici kırınım ızgarası doğrudan doğruya Gauss hüzmelerinin girişimiyle oluşturulur. Dolayısıyla doğrusal olmayan malzemenin kırılma indisi modülasyonu, girişim yapan ışınların ışık şiddetine bağlıdır. Bu bağlılık aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$n_2(I) = n_2 + \Delta n I \quad (1)$$

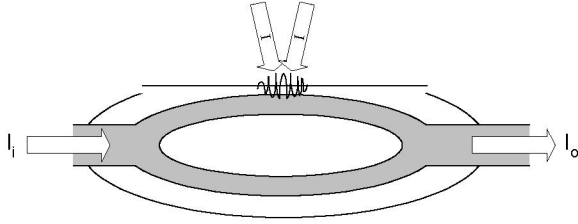
Bu ifadede  $I$  ışık şiddeti,  $n_2$  doğrusal kırılma indisi ve  $\Delta n$  de ortamın doğrusal olmayan Kerr katsayısını göstermektedir (literatürdeki  $n_2$  Kerr katsayısı ile karıştırılmamalıdır). Kerr katsayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$\Delta n = \frac{6 \times \eta_0}{n_2^2 \times \epsilon_0} \times \chi^{(3)} \quad (2)$$

Bu denklemde  $\chi^{(3)}$  üçüncü dereceden doğrusal olmayan geçirenlik katsayısıdır.

Bu çalışmada iki lazer hüzmeleri, dalga kılavuzunun kılıfında, geçici kırınım ızgarası oluşturmak için girişilir. Geçici ızgara kılıf-damar sınırına çok yakındır ve dalga kılavuzunun iletim özelliğini değiştirir, diğer bir deyişle geçici ızgara hüzmelerinin yansıma açısını ve bağlı fazını değiştirerek tam iç yansıma özelliğini ortadan kaldırır. Bu problem değişik tekniklerle incelenebilir. Öncelikle dalga kılavuzunun kılıfında varolan sönümlü dalgalar düşünülerek, kılıf-damar sınırına dört dalga karışım tekniği uygulanabilir. Başka bir yöntem de

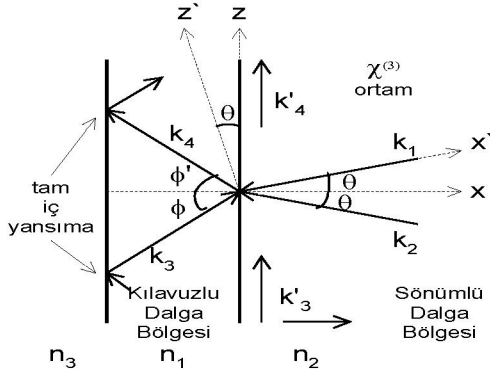
geçici ızgara, durağan (stationary) ızgara olarak düşünülebilir ve bu ızgaradan yansıyan dalgalar düşünülerek çözüm yapılabilir. Diğer bir yöntemde de kılıf bölgesine yasak bantları olan tek boyutlu fotonik kristal yerleştirilebilir. Böyle bir yapıda fotonik kristal dalga kılavuzunun bazı modlarının yayılımını engelleyecektir. Şekil 1, Mach Zender girişim düzeneğindeki optik anahtarlama düğümünü göstermektedir(8). Anahtarlama süreci 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada gelen ışık iki ayrı kola ayrılır. Eğer anahtarlama yapılacaksa, ikinci aşamada kollardan birinin kılıf bölgesinde iki lazer hüzmesi geliştirilir ve geçici kırınım ızgarası oluşturulur. Bu ızgara yardımıyla kolda ilerleyen dalganın fazı değiştirilebilir.



Şekil 1. Geçici kırınım ızgarası oluşumu ve anahtarlama

Geçici ızgaradan yansıyan ışığın genliğini ve fazını bulabilmek için dört dalga karışımı yaklaşımı kullanılacaktır. Üçüncü aşamada ise kollardan gelen uyumlu (coherent) ışık, düğümün çıkışında birleştirilir. Oluşan faz farkına bağlı olarak bu iki sinyal birbirini güçlendirir (faz farkı oluşmamış) ya da söndürür (faz farkı  $\pm \pi$ ).

Şekil 2'de görüldüğü gibi geliştirilen sistemde, dalga kılavuzunda ilerleyen modun dalga boyu ile geçici ızgarayı oluşturan lazer ışınlarının dalga boyu birbirinden farklıdır.



Şekil 2. Kılıf - damar sınırında Dört Dalga Karışımı

Geçici ızgara, düğümün bir dalında - kılıf bölgesinde,  $k_1$  ve  $k_2$  dalga sayılı Gauss hüzmelerinin girişimi ile oluşur. Bu bölgeye gelen üçüncü dalga ise  $k_3$  dalga sayılı, kılavuzun içinde yayılan dalgadır. Dört dalga karışımı yöntemine göre bu üç sinyalin birleşiminden  $k_4$  dalga sayılı yeni bir sinyal ortaya çıkar ve bu sinyalin ızgaradan yansımaya açısı  $\phi'$  olarak gösterilebilir. Eğer ızgara olmasaydı  $\phi' = \phi$  olurdu. Şekil 2'de gösterilen Dört Dalga Karışımı (DDK) olayında, sürece dahil olan dalgaların frekans ve fazlarının eşlenmesi gerekmektedir. Buna göre eşleme denklemleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir

$$\omega_4 = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 \quad (3)$$

$$\vec{k}'_4 = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 + \vec{k}_3 \quad (4)$$

Faz eşleme şartı uygulandığında aşağıdaki ifade elde edilir

$$|k_4| \sin(\phi') = -2 |k_1| \sin(\theta) + |k_3| \sin(\phi) \quad (5)$$

Oluşturulan geçici ızgaranın (Şekil 2) z yönündeki periyodunu düzlem dalgalar için  $\Lambda$  olarak kabul edersek

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2n_2 \sin(\theta)} \quad (6)$$

olarak tanımlanabilir.  $|k_1| = |k_2|$  ile  $|k_3| = |k_4|$  olduğuna göre aşağıdaki denklem kolayca çıkarılabilir

$$\sin \phi' = \sin(\phi) - \frac{\lambda}{n_1 \Lambda} \quad (7)$$

olarak bulunur. Denklem(7)'den görüleceği gibi dalga kılavuzunda kırınım ızgarası olması durumunda yansımaya açısı, geliş açısından farklıdır. Örneğin,  $\phi = 81.8^\circ$ , dalga boyu  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $n_1 = 1.4801$  ve  $n_2 = 1.465$  olsun. Bu durumda yayılma katsayısı  $\beta = n_1 k_0 \sin(\phi) = 5.94 \times 10^6$  olarak bulunur. ızgarayı oluşturan hüzmelerin geliş açısı  $\theta = 1^\circ$  ve dalga boyları  $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$  ise, ızgaranın periyodu  $\Lambda = 19.55 \mu\text{m}$  olur. Bu değerler için ızgaradan yansımaya açısı  $\phi' = 69.42^\circ$ .

### 3. IZGARA OLUŞUMU VE FAZ DEĞİŞİMİ

Şekil 2'de ızgarayı oluşturan hüzmelerin x eksenine  $\theta$  kadar açı yaparak ( $x'$  ekseninde) yayılmasını gösteren denklemin genel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E(x') = A_1 \exp[jk(x' - L)] \exp\left[jk \frac{\rho'^2}{2q(x')}\right] \quad (8)$$

Burada L hüzmenin başlangıç noktası ile girişim düzlemi arasındaki uzaklık, ışımsal uzaklık  $\rho'^2 = (z')^2 + y'^2$  ve  $q(x') = (x' - L) - jx'_0$ . " $\theta$ " çok küçük olduğundan birinci dereceden yaklaşım kullanılabilir. Dolayısıyla, x eksenine küçük bir açı yaparak ilerleyen Gauss hüzmesi genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir

$$U(x, z, \theta) = \frac{A}{q(x)} \exp\left[jk \left( \eta(x, z, \theta) + \frac{\Phi}{2q(x)} \right)\right] \quad (9)$$

Burada

$$\eta(x, z, \theta) = \begin{cases} \eta_+(x, z, \theta) \cong z\theta + x - L, & \theta > 0 \\ \eta_-(x, z, \theta) \cong -z\theta + x - L, & \theta < 0 \end{cases} \quad (10a)$$

$$\Phi = \begin{cases} \Phi_+ \cong z(z - 2x\theta), & \theta > 0 \\ \Phi_- \cong z(z + 2x\theta), & \theta < 0 \end{cases} \quad (10b)$$

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mathbf{q} = \mathbf{x} - L - j\mathbf{x}'_0, \theta > 0 \\ \mathbf{q}^* = \mathbf{x} - L + j\mathbf{x}'_0, \theta < 0 \end{cases} \quad (10c)$$

Kırınım ızgarasının yayılan bir dalgaya etkisini görmek için şekil 2 incelenirse, Dört Dalga Karışım frekans ve faz eşleme şartları denklem(3) ve denklem(4)'te çıkarılmıştır. Bu denklemlere dayanarak bağlaşım ifadeleri şu şekilde yazılır(5)

$$(\nabla^2 + k_4^2)E_4 = -\zeta E_1 E_3 E_2^* - \gamma_4 E_4 \quad (11)$$

$$(\nabla^2 + k_3^2)E_3 = -\zeta E_2 E_4 E_1^* - \gamma_3 E_3 \quad (12)$$

burada

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_0, \omega_3 = \omega_4 = \omega$$

$$\zeta = 6\mu_0\omega^2\chi^{(3)}, I = \frac{|E|^2}{2\eta}$$

$$\gamma_3 = 6\mu_0\omega^2\chi^{(3)}\eta(2I_T - I_3)$$

$$\gamma_4 = 6\mu_0\omega^2\chi^{(3)}\eta(2I_T - I_4)$$

I ışık şiddeti ve  $\eta$  ortamın empedansdır. Elektrik alanını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz

$$U(\mathbf{r}, t) = E(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2}[U(\mathbf{r})\exp(j\omega t) + U^*(\mathbf{r})\exp(-j\omega t)] \quad (13)$$

Şekil 2'de görüldüğü gibi ızgara  $k_1$  ve  $k_2$  dalga sayılı hüzmeler tarafından oluşturulur. Dolayısıyla  $E_1, E_2^*$  ızgarayı oluşturan ifadedir. Faz gecikmesi  $\delta$  ise, ızgarayı oluşturan durağan denklem aşağıdaki gibidir

$$E_1, E_2^* = \frac{2A^2}{|q|^2} \exp\left[-\frac{x_0 z^2}{|q|^2}\right] \cos\left[|k| \left[2z\theta - \frac{2zx\theta(x-L)}{|q|^2}\right] + \delta\right] \quad (14)$$

Denklem (14), denklem(11)'in ve denklem(12)'nin içine yerleştirilirse, aşağıdaki ifadeler elde edilir

$$(\nabla^2 + k_3^2)E_3 = -\zeta \cos(K(\theta, x)z) \exp(-\alpha z^2) E_4 - \gamma_3 E_3 \quad (15)$$

$$(\nabla^2 + k_4^2)E_4 = -\zeta \cos(K(\theta, x)z) \exp(-\alpha z^2) E_3 - \gamma_4 E_4 \quad (16)$$

Bu ifadelerde

$$K(\theta, x) = 2k \sin(\theta) \left[1 - \frac{x(x-L)}{(x-L)^2 + X_0^2}\right] \text{ ve } \alpha = \frac{X_0^2}{(x-L)^2 + X_0^2}$$

Değişikliğe uğratılmış dalga kılavuzunda yayılan  $E_3$  ve  $E_4$  alanları modların toplamı şeklinde yazılabilir

$$E_3 = \sum_1 A_1(z) E_1(x, y) \exp(-j\beta_1 z) \quad (17a)$$

$$E_4 = \sum_k B_k(z) E_k(x, y) \exp(-j\beta_k z) \quad (17b)$$

Denklem(17), denklem(15) ve denklem(16) içine yerleştirirse aşağıdaki bağlaşım denklemleri elde edilir

$$\frac{\partial A_l}{\partial z} = -j \frac{\xi}{4\omega\mu} C_{lk} B_k e^{-\alpha z^2} e^{-j\Delta\beta z} \quad (18a)$$

$$\frac{\partial B_k}{\partial z} = -j \frac{\xi}{4\omega\mu} C_{kl} A_l e^{-\alpha z^2} e^{j\Delta\beta z} \quad (18b)$$

Burada  $\Delta\beta = \Delta\beta' - \delta$ ,  $\Delta\beta' = \beta_k - \beta_l$  ve

$$\delta_i = 3\mu\omega^2 \chi^{(3)} \frac{(2I_T - I_i)}{\beta_i} \eta_0 \quad (18c)$$

Burada  $\delta$ , ızgarayı yaratan hüzmelerinin ışık şiddetinin, dalga kılavuzunda ilerleyen modun yayılma katsayısının değişimini göstermektedir. Burada  $I_T \gg I_i$  olduğundan cebirsel işlemler sonucunda

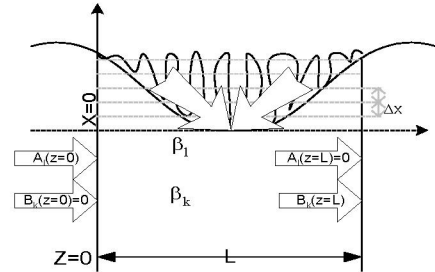
$$\delta = \Delta n I_T \beta \quad (18d)$$

olarak bulunur.

Kırınım ızgarası, şekil 2'de gösterildiği gibi, x yönünde genişliği  $\Delta x$  olan aralıklara bölünürse, her bir aralık için bağlaşım katsayısı şu şekilde bulunabilir

$$C_{kl} = \sum_m \int_{m\Delta x}^{(m+1)\Delta x} B_k^* e^{\beta_k z} \cos(K(\theta, x)z) A_l e^{-\beta_l z} dx \quad (19)$$

$m = 0, 1, \dots$



Şekil 3. Dalga kılavuzuna yazılmış ızgara ve bağlaşım denklemleri için sınır şartları

Bağlaşım katsayısının en büyük olması için aşağıdaki şart sağlanmalıdır.

$$\beta_k = \beta_l - K_0(\theta_0, \Delta x) \quad (20)$$

Diğer taraftan denklem(20) ile ifade edilen bağlaşım denklemleri çözümlerse ve şekil 3'te gösterilen sınır şartları uygulanırsa aşağıdaki sonuçlar elde edilir

$$A_l(z=L) = e^{j\frac{1}{2}\Delta\beta L} \left\{ \cos(sL) - j \frac{\Delta\beta}{2s} \sin(sL) \right\} A_l(0) \quad (21a)$$

$$B_k(z=L) = e^{-j\frac{1}{2}\Delta\beta L} \left\{ -j \frac{C_{kl}^*}{s} \sin(sL) \right\} A_l(0) \quad (21b)$$

Burada  $s = \sqrt{C_{kl} C_{kl}^* + \frac{1}{2} \Delta\beta}$  olarak tanımlanır.

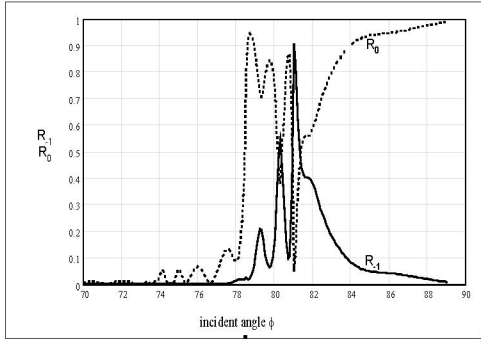
Denklem(21) kullanılarak, dalga kılavuzunda ilerleyen iki mod arasındaki bağıl faz farkı  $\psi$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\psi = -L \left\{ \beta_k - \beta_l + \beta_k \left( \frac{6\eta_0 \chi^{(3)}}{\epsilon_0 n_2^2} I_T \right) \right\} \quad (22)$$

Anahtarlama olabilmesi için  $\psi = \pm\pi$  olmalı. Bu durumda aşağıdaki ifade elde edilir

$$\frac{\pi}{L} = \frac{12\pi\eta_0\chi^{(3)}}{\lambda_0\epsilon_0 n_2} I_T - K_0(\theta_0, \Delta x) \quad (23)$$

Bu ifadenin sağ tarafındaki ilk terim indis değişimini sağlayan hüzmelerin ışık şiddetine bağlı olarak oluşan faz farkıdır. İkinci terim ise ızgaradan dolayı oluşan faz farkıdır. Dolayısıyla bu ızgaradan elde edilecek yüksek verim anahtarlama düğümünü önemli bir parametredir. Şekil 4'te böyle bir ızgaranın yansıma başarımı hesaplanmıştır.



Şekil 4. Geliş açısına bağlı olarak kırınım başarımı

Burada  $n_1=1.4801$ ,  $n_2=1.465$  and  $\Delta n=0.01$  olarak alınmış ve benzetim için standart ızgara çözümü yazılımı kullanılmıştır.  $R_0$  ve  $R_1$  sırayla sıfıncı ve birinci dereceden yansıma katsayılarını ifade etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 81.8 derecelik giriş açısı için %90'a yakın başarımlar elde edilmektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, üçüncü dereceden doğrusal olmayan (Kerr tipi) bir dalga kılavuzu ortamında, dört dalga girişimi metodu kullanılarak, kontrol ışığı ile ilerlemekte olan bir dalganın faz etkileşimi analizi yapılmıştır. Böylece, Mach-Zehnder düzeneğindeki iki koldan birisinde sağlanacak 180 derecelik faz kayması tam optik anahtarlama sağlayacaktır. Dört dalga girişiminde, güç sağlayan iki dalga Gauss forma, diğer iki dalga ise dalga kılavuzunun kılıfında sönümlenmekte olan dalga kılavuzu modundan oluşmaktadır. Bu etkileşim sonucunda kılavuz içerisindeki modun fazı iki şekilde etkilendiği gösterilmiştir. İlk olarak Kerr ortamının ortalama

indisinin değişmesi sonucu oluşan faz gecikmesi ki, bu etki güç dalgalarının toplam yoğunluğuna bağlıdır. Bu etki ile 180 derece faz kayması sağlamak için gerekli olan optik güç ve mesafe: Güç 100 mW dan daha az olmak koşuluyla 10 mm civarındadır, bu rakam  $n_2=10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$  için hesaplanmıştır (doğrusal olmayan katkılı camlar için  $n_2$  tipik değeridir)(6). İkinci olarak, girişimle oluşan duran dalganın geometrisine bağlı olarak mod dalgasının bir çok kırınım moduna dağılması sonucu oluşan durumdur. Bu durumda faz kayması elde etmek çok daha kolay olmakla birlikte, değerini kılavuzun yapısı ve diğer faktörler belirlemektedir. Ancak, daha önemlisi bu moda ne kadar güç aktarıldığıdır. Kırınım modları için yapılan benzetim ile iki Gauss ışın hüzmesi girişimiyle oluşan kırınım ızgarası geometrisi için %90'lara varan bir verimlilik elde edilebilmiştir(7).

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] T. Schneider, D.Wolfframm, R.Mitzner, J.Reif, Femtosecond index grating in barium fluoride: efficient self-diffraction and enhancement of surface SHG, *Applied Surface Science* 154-155, 565-570,(2000).
- [2] J.Reif, R.P. Schmid and T. Schneider, Femtosecond third harmonic generation: self phase matching through a transient Kerr grating and the way to ultrafast computing, *Appl.Phys. B* 74, 745-748 (2002).
- [3] T. Schneider, D.Wolfframm, R.Mitzner, J.Reif, Ultrafast optical switching by instantaneous laser-induced grating formation and self-diffraction in barium fluoride *Appl.Phys. B* 68, 749-751 (1999).
- [4] T. Schneider, D.Wolfframm, J. Reif, Ultrafast laser - induced index grating in transparent insulators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 166-167,809-814, (2000).
- [5] B.E.A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of photonics* (John Wiley & Sons,1991)
- [6] R. L. Sutherland, *Handbook of Nonlinear Optics* (Marcel Dekker,2003)
- [7] M.S.Dinleyici, O.Akım 3-D Switching Fabric Node Design, Communication Systems and Networks – CSN2004, Marbella-Spain, (2004)
- [8] Yabu, T., Geshiro, M., Kitamura, T., Nishida, K., Sawa, S. All-optical logic gates containing a two-mode nonlinear waveguide, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Volume 38, 37-46, (2002).