

## YARIİLETKEN TEKLİ ADIM KIRILMA İNDİSLİ SİMETRİK LAZERİN AKTİF BÖLGESİNDEKİ KUVVETLENDİRMEDE KAZANÇ VE SOĞURMA SABİTLERİNE İLİŞKİN YENİ BİR HESAPLAMA YÖNTEMİ

Mustafa TEMİZ\*, Ö. Önder KARAKILINÇ, Adem UKTE, Mehmet ÜNAL, M. Zeki ÇELİK

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 20070  
Denizli

### Özet

Bu çalışmada kullanılan yeni yöntem, yarıiletken tekli adım kırılma indisli simetrik lazerlerde, çift ve tek fonksiyonlu elektrik alan dalgalarının her birinin en düşük modunda, kazanç ve soğurma sabitlerinin hesaplanmasını mümkün kılar. Bunun için lazerin sadece aktif bölgesinin genişliği, bölgelere ait kırılma indisleri ve dalga boyu verilmelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Kazanç, soğurma, normalize frekans, normalize yayılım sabiti

## A NOVEL COMPUTATIONAL METHOD RELATED GAIN AND ABSORPTION COEFFICIENTS BELONGING TO AMPLIFICATION IN ACTIVE REGION OF A SEMICONDUCTOR SINGLE STEP-INDEX SYMMETRIC LASER

### Abstract

A novel method used in this paper enables the computations of gain, gain and absorption coefficients for the semiconductor single step-index symmetric lasers at the least mode of each of even and odd-function electric field waves. For this reason it must be given the wave length, the refractive indices of the regions and the width of active region of laser for the semiconductor single step-index symmetric laser.

**Keywords:** Gain, absorption, normalized frequency, normalized propagation constant

---

\* E-posta: mustafatemiz@pau.edu.tr

## 1. Giriş

Yarıiletken dalga kılavuzlarının işlemsel fonksiyonları, yapıldığı malzemenin fiziksel özelliklerinden şiddetle etkilenirler. Yarıiletken tekli basamak kırılma indisli simetrik bir lazer de özel anlamda bir dalga kılavuzudur; dolayısıyla onun da işlemsel fonksiyonları yapıldığı malzemenin bölgelerinin özelliklerine şiddetle bağlıdır.

Bu çalışma, yarıiletken tekli adım kırılma indisli simetrik lazerlerde, malzemenin fiziksel etkilerine bağlı olarak, çift ve tek fonksiyonlu elektrik alan dalgalarının her birinin en düşük modunda, kazanç ve soğurma sabitlerinin özellikle normalize yayılım sabiti (NYS)  $\alpha$  cinsinden hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. NYS  $\alpha$ , malzemenin yapısal bir parametresidir. Bu nedenle  $\alpha$ , yarıiletken dalga kılavuzlarının doğrudan doğruya analizinde anahtar bir rol oynar.

Literatürde yarıiletken bir dalga kılavuzunun doğrudan doğruya normalize edilmiş yayılım sabiti cinsinden toplu bir analizi bulunmamakta ancak normalize edilmiş yayılım sabitinin hesaplanmasına ait [1] ve/veya bununla yakın bir ilişki içinde bulunan normalize frekansa bağlı münferit büyüklüklere ilişkin çalışmalara rastlanmaktadır [2]. Kendi içinde uyumlu olan yeni tanımlanmış notasyonlarla üretilmiş yeni formüller içeren bu çalışmada ise, yarıiletken basamak kırılma indisli tekli bir dalga kılavuzunun doğrudan doğruya normalize edilmiş yayılım sabiti cinsinden toplu bir analizi yapılmıştır.

Kullanılan bu yöntemle yeni bir teorik hesaplama yolu ortaya konulmaktadır. YİTBKİSL'de arzu edilen eşik durumundaki  $G_{in}$  [ $G'_{in}$ ] kuvvetlendirmesi ve kazanç durumundaki  $G$  [ $G'$ ] kuvvetlendirmesi ile aktif bölgenin  $\ell_g$  uzunluğu, aynaların  $R_1$  ve  $R_2$  yansımaya sabitleri verildiğinde, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgaları için eşik ve kazanç durumlarındaki soğurma sabitleri, kazanç sabitleri, toplam kayıp sabitleri kolaylıkla ve çok hassas olarak hesaplanabilmektedirler.

Buna karşılık, 1. ve 2. referanslardaki hesaplamalar, sırasıyla, sonlu elemanlar yöntemi ve ikinci mertebeden varyasyonel metotları kullandıklarından bulunan sonuçlar, sunduğumuz metot kadar hassas değildirler. Çünkü, bulduğumuz sonuçlar, yöntemin temelde efektif kırılma indisine bağlı olması nedeniyle, çok hassas olarak elde edilebilmektedirler.

## 2. Teorik Ön Bilgiler

Yarıiletken tekli basamak kırılma indisli simetrik lazer (YİTBKİSL) bölgeleri Şekil 1'de görülmektedir. Şekilde aktif bölge (AB) genişliği  $2a$  ile verilmiştir. AB'nin genişliği  $2a=50-100 \text{ A}^\circ$  den büyüğe lazer geleneksel dalga kılavuzu tipindedir. AB'nin genişliği  $2a=50-100 \text{ A}^\circ$  civarında ve daha küçük olursa, o zaman kuantum çukurlu lazer elde edilir [3]. Şekildeki  $n_{II}$  ve  $n_{I,III}$ , YİTBKİSL'in bölgelerine ait kırılma indislerini göstermektedirler.

YİTBKİSL'de kılavuzlanmanın oluşması için  $n_{II} > n_{I,III}$  olmalıdır [3,4,5,6,7].  $\alpha_{II}$  ve  $\alpha_{I,III}$ , bölgelerin yayılım sabitlerini göstermektedirler.  $\zeta$  ve  $\eta$  parametrik değişkenleri, sırasıyla,  $\zeta = \alpha_{II} a$  ve  $\eta = \alpha_{I,III} a$  olarak tanımlanırlar. Bölgelerin yayılım sabitleri,

$$\alpha_{II} = \sqrt{(2\pi n_{II}/\lambda)^2 - \beta_z^2} = \sqrt{(k_{II})^2 - \beta_z^2}, \quad \alpha_{I,III} = \sqrt{(2\pi n_{I,III}/\lambda)^2 - \beta_z^2} = \sqrt{(k_{I,III})^2 - \beta_z^2}$$

ile bellidirler. Burada  $\beta_z$  faz sabitidir,  $k_{II}$ ,  $k_{I,III}$  bölgelere ilişkin dalga numaralarıdır [3,4,5,6,7].

Taşıyıcılar, AB'de hapsolurlar. AB'deki taşıyıcıların enerji durumlarını belirleyen çift [tek] fonksiyonlu ve en düşük modlu elektrik alan dalgasının  $E_{y,II} = A \cos \alpha_{II} x$  [ $e_{y,II} = B \sin \alpha_{II} x$ ] ile temsil edildiği bilinmektedir [3,4,5,6,7].

Bu çalışmada normalize yayılım sabiti (NYS)  $\alpha$  ile gösteriliyor. NYS  $\alpha$ , YİTBKİSL malzemesine ait yapısal özellikleri içerir. YİTBKİSL'in AB'sine ilişkin elektrik alan ifadesinin çift fonksiyonlu olması halinde, (boyutsuz-normalize edilmiş) NYS  $\alpha$ , parametrik değişkenler  $\zeta$  ve  $\eta$ , sırasıyla,

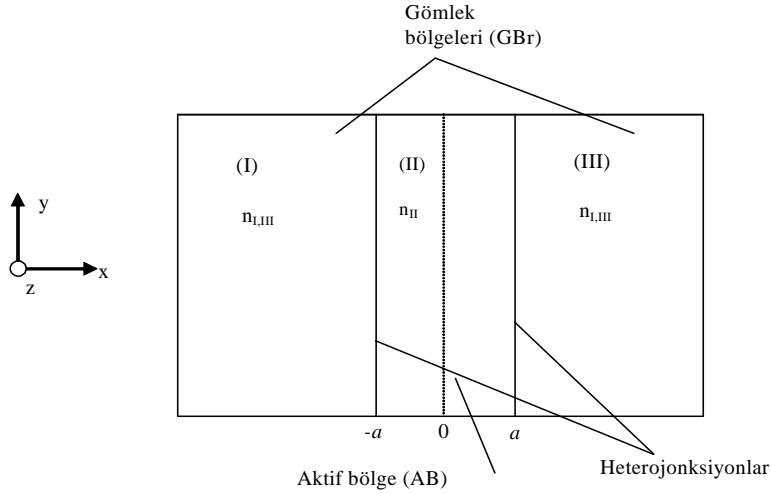
$$\alpha = \sin^2 \zeta, \quad \zeta = \alpha_{II} a = V \cos \zeta = V \sqrt{1 - \alpha}, \quad \eta = \alpha_{I,III} a = V \sin \zeta = V \sqrt{\alpha}$$

ile verilirler [3,4,5,6,7].

Yazıda tek fonksiyonlu büyüklükler üs (') ile temsil edilmektedirler. Formüllerdeki V büyüklüğüne normalize frekans (NF) ya da V-Sayısı denir ve bu  $V = \sqrt{\zeta^2 + \eta^2} = ak_0NA$  ile bellidir.  $k_0 = (2\pi)/\lambda$  boşluğun dalga numarası,  $k_{II} = k_0n_{II}$  büyüklüğü AB'nin ve  $k_{I,III} = k_0n_{I,III}$  büyüklüğü ise gömlek bölgesinin dalga numaraları olmak üzere, faz sabiti,

$$\beta_z = k_{II}\sqrt{1 - (\alpha_{II}/k_{II})^2} = k_0\sqrt{n_{II}^2 - (1 - \alpha)NA^2}$$

ile ve faz hızı  $v = c/n_{ef}$  formülüyle bellidir [6,7,8,9]. Burada  $n_{ef} = n_{II}\sqrt{1 - 2D(1 - 2\alpha)}$  ve  $D = (n_{II}^2 - n_I^2)/(2n_{II}^2)$  ile verilir. NA, nümerik açıklık olarak bilinir [5,6,7].  $V < \pi/2 = 1.74$  için yalnızca en düşük modlu çift fonksiyonlu elektrik alan çözümü vardır [3,4,5,6,7]. Örnek olarak  $n_{II} = 5.287$ ,  $n_{I,III} = 5.285$   $a = 3 \times 10^{-6}$  m,  $\lambda = 1.55 \times 10^{-6}$  m için  $\alpha = 0.691597145163121$ ,  $V = 1.76832871782734$ ,  $NA = 0.14540976583435$   $\zeta = 0.982024210261731$ ,  $\eta = 1.47058318525431$ ,  $k_{I,III} = 2.142363506351233 \times 10^7$  m<sup>-1</sup> ve  $k_{II} = 2.143174239939256 \times 10^7$  m<sup>-1</sup>,  $\alpha_{II} = 3.273414034207062 \times 10^5$  m<sup>-1</sup>,  $\alpha_{I,III} = 4.901943950846822 \times 10^5$  m<sup>-1</sup>,  $n_{ef} = 5.28638327498464$ ,  $\beta_z = 2.142924240096993 \times 10^7$  m<sup>-1</sup>,  $v = 5.674957421638552 \times 10^7$  m/s bulunur.



Şekil 1. YİTBKİSL'in bölgeleri.

### 3. Eşik Kazancı, Eşik Kayıp Sabitleri

Bir iki seviyeli lazer sisteminde soğurma sabiti, düşük enerji seviyesi  $E_1$ , yüksek enerji seviyesi  $E_2$  arasındaki popülasyon farkına bağlıdır. İki seviyeli lazerde  $N_1$  ve  $N_2$ , sırasıyla, düşük ve yüksek enerji seviyelerindeki elektron yoğunluklarını göstermek üzere, genel olarak,  $E_2 > E_1$  ve  $N_1 > N_2$  için AB'deki soğurma sabiti  $k_2$  pozitifdir. Bu durumda lazer kayıplı olur. Çünkü, bu durumda bir zayıflama oluşmaktadır [10]. AB'deki popülasyon inversiyonundaki (ters birikim) ( $N_2 > N_1$ ) soğurma sabiti ise  $-k_2$  şeklinde negatif olur. Buna  $g$  kazanç sabiti de denir ve bu  $g = -k_2$  ile verilebilir. Bu durum, lazerde bir kuvvetlendirme işleminin olduğunu gösterir [10].

AB genişliği  $\ell_g$  olan bir lazerde kuvvetlendirme, malzemenin yapısal özelliklerine ve  $\ell_g$  uzunluğunun iki tarafında oluşturulan aynaların yansıtıcılıklarına bağlıdır. Aynaların yansıtılma işlemi, dışardan teknolojik bir elatma (müdahale) ile yapılmaktadır. Teknolojik işlem ne kadar kaliteli olursa yansıtma o derece iyi olur.

AB'deki uyarılmış emisyon düzeyi artarken, öyle belirli bir kazanç düzeyine gelinir ki, bu belirlenmiş özel kazanç, kılavuz boyunca bir tur süren döngüde meydana gelen kazanç olup yalnızca kayıpları karşılayan bir kazançtır. Bu düzeye eşik düzeyi denir ve lazer etkisi bu düzeyde başlar. Eşik düzeyinde oluşan bu kazanç eşik kazanç sabiti adı verilir ve bu sabit, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için  $g_{th}$  [ $g'_{th}$ ] ile gösterilebilir. Lazerin AB'sinde meydana gelen elektrik alan modları da bu eşik kazançta oluşmaya başlarlar.

Lazerin ışık şiddeti, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için,  $G = G_0(R_1R_2)\exp^{2(g - |g_0|)\ell_g}$  [ $G' = G'_0(R_1R_2)\exp^{2(g' - |g'_0|)\ell_g}$ ] ile verilir [10]. Burada  $G$  [ $G'$ ], çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için, lazer tarafından yapılan kuvvetlendirmedir.  $2\ell_g$  uzunluğu, bir turluk bir ilerlemeyi gösterir. Burada  $R_1$  ve  $R_2$ ,  $\ell_g$  uzunluğundaki AB'nin iki tarafında oluşturulan, lazer aynalarının yansıtma sabitleridirler.  $G_0$  [ $G'$ ], çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için, kuvvetlendirmenin başlangıçtaki değeri olup  $g$  [ $g'$ ] ve  $g_0$  [ $g'_0$ ], sırasıyla, kılavuzda birim uzunluk başına düşen toplam kazanç sabitini ve malzeme kayıp sabitini gösterir. Kazanç artmayı sürdürürken YTBKİSL, kuvvetlendirme durumuna geçer. Bir an için kuvvetlendirme, tam olarak kuvvetlendirmenin başlangıçtaki değerine eşit olur ve dolayısıyla çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için,  $G = G_0$  [ $G' = G'_0$ ]'dan dolayı,  $1 = (R_1R_2)\exp[2(g - |g_0|)\ell_g]$  [ $1 = (R_1R_2)\exp[2(g' - |g'_0|)\ell_g]$ ] denklemi elde edilir.  $G = 1$  [ $G'_0 = 1$ ] olduğu duruma eşik durumu denir [10]. Bu eşitlik yardımıyla çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için aşağıdaki eşik bağıntısı çıkarılabilir:

$$g_{th} = g_{0th} + (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2) \quad [g'_{th} = g'_{0th} + (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2)]. \quad (1)$$

Burada  $g_{th}$  [ $g'_{th}$ ] ve  $g_{0th}$  [ $g'_{0th}$ ], sırasıyla, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için YTBKİSL'de birim uzunluk başına meydana gelen eşik kazanç sabiti ve eşik kaybıdır. (1)'deki denklemde çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için sağ taraftaki ikinci terim, faydalı lazer kuvvetlendirmesidir. Buna göre, eşik kazancı (eşik kazanç sabiti), eşik kaybı ile eşik durumundaki faydalı lazer kuvvetlendirmesinden ibarettir. Buradan görülmektedir ki, faydalı eşik lazer kuvvetlendirmesi doğrudan doğruya aynaların  $R_1$  ve  $R_2$  yansıtma sabitlerine ve  $\ell_g$ 'ye bağlıdır. Bir kuvvetlendirmede eşik durumunun incelenmesi, pompalamayla uyandırılarak kuvvetlendirmeye sokulan, eşik atom sayılarının değerlendirilmesine fırsat verdiği için önemlidir [11].

Eşik atom yoğunluğunun yaklaşık  $(N_2 - N_1)_{th} = 10^{24}$  atom/m<sup>3</sup> civarında olduğu bilinmektedir.  $S$  ve  $\sigma$ , sırasıyla, lazerin AB'nin dik kesit alanı ve soğurma kesiti olmak üzere, atom yoğunlukları ve lazer içindeki toplam atom sayıları, eşik durumunda  $n_{th} = (N_2 - N_1)_{th} = g_{th}/\sigma$ ,  $N_{th} = S\ell_g(N_2 - N_1)_{th}$ , ve kazanç durumunda  $n = (N_2 - N_1)g/\sigma$ ,  $N = S\ell_g(N_2 - N_1)$  ile verilirler. Lazerin çalışma şartnamesinde genel olarak ilk ters birikim (inversiyon) yoğunluğu,  $n_i = 4n_{th}$  olarak alınmaktadır [11].

$\Gamma_{II}$  [ $\Lambda_{II}$ ], çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanına ilişkin hapsedicilik faktörünü gösterir [3,4,5,6,7] ve  $g_{th}$   $\Gamma_{II}$  [ $g'_{th}$   $\Lambda_{II}$ ], eşik modal kazancı adımı alınır [10]. Çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için, eşik modal kazancı ile gömlek bölgelerine ilişkin soğurma sabiti  $k_{13th}$  [ $k'_{13th}$ ] arasında  $g_{th}$   $\Gamma_{II} = \bar{K}k_{1,3th}$  [ $g'_{th}$   $\Lambda_{II} = \bar{q}k'_{1,3th}$ ] ilişkisi vardır [3,5,10]. Bunlara benzer olarak, herhangi bir kazanç düzeyindeki modal kazancı ile gömlek bölgelerine ilişkin soğurma sabiti  $k_{13}$  [ $k'_{13}$ ] arasında da çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için,  $g\Gamma_{II} = \bar{K}k_{1,3}$  [ $g'\Lambda_{II} = \bar{q}k'_{1,3}$ ] ifadesi yazılabilir: Burada  $\bar{K} = 1/(1 + 1/\bar{R})$  [ $\bar{q} = 1/(1 + 1/\bar{r})$ ],  $\Gamma_{II} = \bar{K}/\bar{R}$  [ $\Lambda_{II} = \bar{q}/\bar{r}$ ] ile verilirler [3,4,5,6,7,11,120,13]. Dolayısıyla eşik kazanç sabiti, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için hapsedicilik faktörü, soğurma sabiti ve lazer aynalarının yansıtma sabitleri cinsinden, eşik düzeyinde

$$g_{th} = (1/\Gamma_{II})\bar{K}k_{1,3th} = (1/\Gamma_{II})(g_{0th} + (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2)) \quad (2)$$

$$[g'_{th} = (1/\Lambda_{II})\bar{q}k'_{1,3th} = (1/\Lambda_{II})(g'_{0th} + (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2))] \quad (3)$$

### ve herhangi bir kazanç düzeyinde

$$g = (1/\Gamma_{II})\bar{K}k_{1,3} = (1/\Gamma_{II})(g_0 + (1/2\ell_g)\ln(G/R_1R_2)) \quad (4)$$

$$[g' = (1/\Lambda_{II})\bar{q}k'_{1,3} = (1/\Lambda_{II})(g'_0 + (1/2\ell_g)\ln(G'/R_1R_2))] \quad (5)$$

olarak elde edilir. İstenirse eşik ve kazanç düzeylerinde, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için, kazanç sabitlerine karşı düşen kayıp sabitleri, aynaların yansıtma sabitleri cinsinden de

$$g_{0th} = g_{th} \Gamma_{II} - \frac{1}{2\ell_g} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad [g_{0th} = g'_{th} \Lambda_{II} - \frac{1}{2\ell_g} \ln \frac{1}{R_1 R_2}] \quad (6)$$

$$g_0 = g \Gamma_{II} - \frac{1}{2\ell_g} \ln \frac{1}{R_1 R_2}, \quad [g'_0 = g' \Lambda_{II} - \frac{1}{2\ell_g} \ln \frac{1}{R_1 R_2}] \quad (7)$$

olarak hesaplanabilirler.

#### 4. YİTBKİSL'de Kuvvetlendirmeler

Bir YİTBKİSL'de, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için, AB'nin aktif uzunluğu  $\ell_g$ , kayıp sabiti (malzemenin soğurma sabiti)  $k_{1,3th}$  [ $k'_{1,3th}$ ] ve kazanç sabiti  $g$  [ $g'$ ] verildiğinde, lazerin eşik ve kazanç durumunda küçük-ışaretili güç kuvvetlendirmeleri, sırasıyla,

$$G_{th} = \exp(k_{1,3th} \ell_g \bar{K}) \quad [G'_{th} = \exp(k'_{1,3th} \ell_g \bar{q})], \quad G = \exp(k_{1,3} \ell_g \bar{K}) \quad [G' = \exp(k'_{1,3} \ell_g \bar{q})] \quad (8)$$

ve  $g_{th} \Gamma_{II} = \bar{K} k_{1,3th}$ , [ $g'_{th} \Lambda_{II} = \bar{q} k'_{1,3th}$ ] ifadesi yardımıyla

$$G_{th} = \exp(g_{th} \ell_g \Gamma_{II}) \quad [G'_{th} = \exp(g'_{th} \ell_g \Lambda_{II})], \quad G = \exp(g \ell_g \Gamma_{II}) \quad [G' = \exp(g' \ell_g \Lambda_{II})] \quad (9)$$

olarak elde edilirler [10,11]. Ayrıca, yukarıdaki ifadelerden faydalanarak çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için malzemenin soğurma sabitinin  $g_{th}$  [ $g'_{th}$ ], kazanç sabiti cinsinden eşik ve kazanç durumlarında

$$k_{1,3th} = g_{th} / \bar{R} \quad [k'_{1,3th} = g'_{th} / \bar{r}], \quad k_{1,3} = g / \bar{R} \quad [k'_{1,3} = g' / \bar{r}] \quad (10)$$

olarak elde edilebilecekleri de görülebilir [3].

$G_{th} = 1$  [ $G'_{th} = 1$ ] olmak üzere, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alanı için kuvvetlendirmeler  $G_{th}$  [ $G'_{th}$ ] ve  $G$  [ $G'$ ] ve AB uzunluğu  $\ell_g$  verildiğinde, kayıp soğurma sabitleri, sırasıyla, eşik ve kazanç durumlarında  $k_{1,3th} = \ln G_{th} / \ell_g \bar{K}$  [ $k'_{1,3th} = \ln G'_{th} / \ell_g \bar{q}$ ] ve  $k_{1,3} = \ln G / \ell_g \bar{K}$  [ $k'_{1,3} = \ln G' / \ell_g \bar{q}$ ] olup [3], AB'ye ilişkin kazanç sabiti ve toplam kayıp, yansıtma sabitleri  $R_1$  ve  $R_2$  cinsinden sırasıyla eşik durumunda,

$$g_{th} = (1/\Gamma_{II}) K_{I,III} k_{1,3th} = (1/\Gamma_{II}) (g_{0th} + (1/2\ell_g) \ln(G_{th}/R_1 R_2)) \quad (11)$$

$$[g'_{th} = 1/\Lambda_{II} \bar{q} k'_{1,3th} = (1/\Lambda_{II}) (g'_{0th} + (1/2\ell_g) \ln(G'_{th}/R_1 R_2))]$$

$$g_{0th} = \ln G_{th} / \ell_g - (1/2\ell_g) \ln(1/R_1 R_2), \quad (12)$$

$$[g'_{0th} = \ln G'_{th} / \ell_g - (1/2\ell_g) \ln(1/R_1 R_2)]$$

ve kazanç durumunda

$$g = (1/\Gamma_{II}) K_{I,III} k_{1,3} = (1/\Gamma_{II}) (g_0 + (1/2\ell_g) \ln(G/R_1 R_2)) \quad [g' = 1/\Lambda_{II} \bar{q} k'_{1,3} = (1/\Lambda_{II}) (g'_0 + (1/2\ell_g) \ln(G'/R_1 R_2))] \quad (13)$$

$$g_0 = \ln G / \ell_g - (1/2\ell_g) \ln(G/R_1 R_2), \quad (14)$$

$$[g'_0 = \ln G' / \ell_g - (1/2\ell_g) \ln(G'/R_1 R_2)]$$

olarak bulunurlar. Eşik durumunda  $G_{th} = 1$  [ $G'_{th} = 1$ ]'dir. Ancak,  $\ln G_{th}$  ifadesinin sıfır olmaması için,  $G_{th} = 1$  [ $G'_{th} = 1$ ] yerine  $G_{th} = 1.001$  [ $G'_{th} = 1.001$ ] veya 1.00001 gibi, önemsiz olan bir kesirle, 1'den büyük seçilir. Eşik ve kazanç durumunda, sırasıyla,

$$g_{th} - g_{0th} = (1/2\ell_g)(G'_{th}/R_1R_2) \quad [g'_{th} - g'_{0th} = (1/2\ell_g)(G'_{th}/R_1R_2)] \quad (15)$$

$$g - g_0 = (1/2\ell_g)(G/R_1R_2) \quad [g' - g'_0 = (1/2\ell_g)(G'/R_1R_2)] \quad (16)$$

eşitlikleri geçerlidir. (15) ve (16) eşitlikleri, sırasıyla, eşik ve kazanç durumundaki kazanç kayıp farkının kuvvetlendirme işleminden başka AB genişliği ile yansıtıcılık özelliklerine bağlı olduğunu gösterirler.

Kazanç, Işığın aynalar arasında 1 turdaki kuvvetlendirmenin üstel kuvveti ile artar. Örnek vermek gerekirse net kazanç  $G=4$  ise, 1 çevrim  $2\ell_g$  olmak üzere, 5 çevrimden sonra yoğunluk şiddeti  $4^{2 \times 5} = 1048576$  olur [11]. Böyle bir yoğunluk durumunda artık kuvvetlendirme başlamıştır, sonuç 1'den çok büyüktür. Eşik durumunda yansıtıcılık ne kadar büyürse  $g_{th} - g_{0th} = (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2)$  farkı, o derece sifıra yaklaşır. Dolayısıyla, AB'nin soğurma sabiti, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgası için eşik ve kazanç durumlarında

$$k_{2th} = -g_{0th} - (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2) \quad [k'_{2th} = -g'_{0th} - (1/2\ell_g)\ln(1/R_1R_2)] \quad (17)$$

$$k_2 = -g_0 - (1/2\ell_g)\ln(G/R_1R_2) \quad [k'_2 = -g'_0 - (1/2\ell_g)\ln(G'/R_1R_2)] \quad (18)$$

olur. Lazerde yansıtma olayı yoksa kazanç sabitleri sadece malzeme özelliklerine bağlı kalır.

### 5. Nümerik Örnekler ve Bulunan Formüllerin Doğrulanması

Bulunan bazı önemli formüllerin doğrulanmasına ilişkin olmak üzere, bir örnek vermek mümkündür:  $n_{II} = 3.351$ ,  $n_{I,III} = 3.350$ ,  $a = 50 \times 10^{-10}$  A°,  $\lambda = 1.55 \times 10^{-6}$  m<sup>-1</sup>,  $\ell_g = 0.05$  m için  $V = 0.00165915890946$ ,  $\alpha = 2.752800000000000 \times 10^{-5}$ ,  $\zeta = 0.00165913607264$ ,  $\eta = 8.705131045570183 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{R} = 2.759829038076617 \times 10^4$ ,  $\Gamma_{II} = 3.623281563416194 \times 10^5$ ,  $\bar{K} = 0.99996376718437$  elde edilir. Bu durumda lazer aynalarının  $R_1 = 0.25$ ,  $R_2 = 0.15$  yansıtıcılıkları için toplam eşik kayıp sabiti,  $G_{th} = 1.0001$  (eşik) durumunda, (12)'den  $g_{0th} = 0.01477054060082$ , (2)'den  $k_{1,3th} = 0.00199997247130$  ve  $g_{th} = 55.19582101646966$  m<sup>-1</sup> ve dolayısıyla lazerin eşik durumundaki kazanç sabiti,  $k_{2th} = -g_{th}$ 'den  $k_{2th} = -55.19582101646966$  m<sup>-1</sup> olarak elde edilir.  $S = 0.9 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>,  $\sigma = 5.5 \times 10^{-24}$  m<sup>-2</sup> olarak alınırsa eşik durumundaki atom yoğunluğu  $n_{th} = 1.0036 \times 10^{25}$  atom/m<sup>3</sup>, başlangıç inversiyonu  $n_i = 4n_{th} = 4.0144 \times 10^{25}$  atom/m<sup>3</sup> ve eşik atom sayısı  $N_{th} = 4.5162 \times 10^{19}$  atom bulunur. Hesaplanan  $k_{1,3th}$  ve  $g_{th}$  büyüklüklerinin  $k_{1,3th}/g_{th} = 1/\bar{R} = 3.623412849859019 \times 10^{-5}$  denklemini sağladığı gösterilebilir.  $G_{th} = 1.0001$  alındığı için, yine bulunan sonuçlar kullanılarak  $G_{th} = \exp(g_{th}\Gamma_{II}\ell_g) = \exp(\ell_g\bar{K}k_{1,3th}) = 1.00010$  olduğu görülebilir. Dikkat edilmelidir ki,  $\ln G_{th}$ 'de seçilen hassasiyet bu sonuçlarda açık olarak görülmektedir. Yani,  $\ln G_{th} = \ln 1.00000001$  alınsaydı, sonuçtaki hassasiyet 1.000000010 olarak ortaya çıkacaktı. Kuşkusuz, 1.00010 ve 1.000000010 örneklerinin verilmesi, pratik bir anlamdan öte, sunulan yöntemin hassasiyetini göstermek içindir. Demek oluyor ki, verilen bu alfa metodunda parametrelerin hesaplama hassasiyetlerinin baştan belirlenmesi de mümkün olmaktadır.

$G_{th} = 1.001$ ,  $\ell_g = 0.05$ ,  $R_1 = 0.65$  ve  $R_2 = 0.60$  olarak  $G = 20$  olan bir kuvvetlendirme elde etmek için kılavuzun kayıp sabiti, (14)'den  $g_0 = 59.83775109654913$  m<sup>-1</sup> olarak bulunur. Bu kuvvetlendirmede hesaplanan soğurma (absorpsiyon) sabiti ise (13) ifadesinden  $k_{1,3} = 59.91681642604276$  m<sup>-1</sup> olarak elde edilir.  $G = 20$  kazancına ilişkin kazanç sabiti  $-k_2 = g = (1/\Gamma_{II})\bar{K}k_{1,3}$  ifadesinden hesaplanabilir ve  $-k_2 = g = 1.653601698416988 \times 10^6$  m<sup>-1</sup> olarak bulunur ve  $\bar{K} = 0.99996376718437$  için  $G = \exp(k_{1,3}K\ell_g) = 20.0$  olduğu da görülebilir. Verilen bu örnekte  $V/\pi/2 = 1.74$  olduğu için, sadece çift fonksiyonlu elektrik alanına ilişkin çözüm vardır.  $S = 0.9 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>,  $\sigma = 5.5 \times 10^{-24}$  m<sup>-2</sup> alınırsa; kazanç durumundaki atom yoğunluğu  $n = 3.0065 \times 10^{29}$  atom/m<sup>3</sup> ve atom sayısı  $N = 1.3529 \times 10^{24}$  atom olarak elde edilirler.

İkinci bir örnek olarak  $V = 2$  ( $V/\pi/2 = 1.74$ ) alındığında [8], çift tek fonksiyonlu elektrik alan fonksiyonunun her birine ilişkin birer çözüm vardır: NF  $V = 2$  için  $\alpha = 0.734844$ ,  $\zeta = 1.02986601070236$ ,  $\eta = 1.71446084819689$  bulunur. Bu büyüklüklere ilişkin çift fonksiyonlu elektrik alanı için  $\Gamma_{II} = 0.90231725015443$ ,  $\bar{K} = 0.09768296770903$ ,  $\bar{R} = 0.10825765530787$ ,  $k_{1,3} = 1.698160556129860 \times 10^3$  m<sup>-1</sup> ve  $-k_2 = g = 1.838388801429323 \times 10^2$  m<sup>-1</sup> olup  $k_{1,3}/g = 1/\bar{R} = 9.23722204361564$  m<sup>-1</sup> ve tek fonksiyonlu elektrik alanı

için  $\Lambda_{II}=0.78698176090098$ ,  $\bar{q}=0.21301557178411$ ,  $\bar{r}=0.27067408975303$  elde edilir.  $\ell_g=0.05$ ,  $R_1=0.65$  ve  $R_2=0.60$  ve  $G=G'=5$  alarak soğurma ve kazanç sabitleri, çift fonksiyonlu elektrik alan dalgası için  $-k_2=g=53.51015661593447 \text{ m}^{-1}$ ,  $g_0=22.77267285009742 \text{ m}^{-1}$   $k_{13}=4.942840958399699 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$  olup burada da  $k_{1,3}/g=1/\bar{R}=9.23720144173156$  olduğu görülür. Tek fonksiyonlu elektrik alan dalgası için ise,  $-k'_2=g'=40.90142108792441 \text{ m}^{-1}$ ,  $g'_0=32.15052336856299 \text{ m}^{-1}$ , ve  $k'_{13}=1.511094805019706 \times 10^2$  sonuçları bulunmuş olup  $k'_{1,3}/g'=1/\bar{r}=3.69447995895144$  bulunur. Benzer şekilde tek fonksiyonlu alanda AB'deki soğurma sabiti  $k'_2=-g'$ den  $k'_2=-40.90142108792441 \text{ m}^{-1}$  olmaktadır.

## 6. Sonuçlar

YİTBKİSL'de kuvvetlendirmenin söz konusu olması için, lazerin AB'nde, taşıyıcı soğurulmasından, malzeme hatalarından, homojensizlikten ve diğer radyatif olmayan geçişlerden ileri gelen, kayıp sabitini aşacak şekilde, kazanç sağlayan bir kuvvetlendirme gerekir. Bu da eşik kazancından daha fazla bir kazanç sağlamakla mümkündür. Kayıp durumunda pozitif olan soğurma sabiti, kazanç durumunda (populasyon inversiyonunda) iken negatif olur. Bu durumda, AB'de zorlanmış emisyon oranı artarken, çevrim kazancı, kayıpları yenerek kazanç sağlamaya, lazer çalışmaya başlar. Bu durum, kılavuzun yeteri kadar elektron kaynağı ile sürülmesine bağlıdır. Eşik ve kazanç durumlarındaki elektronların miktarları, bu durumlara ilişkin ifadelerden teorik olarak belirlenebilir. Bu çalışmada, bir YİTBKİSL'de çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgaları için  $\zeta$  ve  $\eta$  parametrik değişkenleri bulunmuş, bölgelerin yayılım sabitleri, AB'nin faz sabiti ve faz hızı, eşik ve kazanç durumlarında soğurma sabitleri, kazanç sabitleri, güç kuvvetlendirmeleri, V-sayısı ve/veya  $\zeta$  ve  $\eta$  parametrik değişkenleri cinsinden ayrı ayrı hesaplanmışlardır. Diğer yandan, çift [tek] fonksiyonlu elektrik alan dalgaları için eşik durumundaki kayıp ifadeleri de YİTBKİSL'in yapısal özelliklerine bağlı olarak elde edilmişlerdir. Uygulanan yöntemle elde edilen bu ifadelere şimdiye kadar literatürde rastlanılmamıştır.

## Kaynaklar

- [1] Popescu, V. A., and Puscas N. N., "Determination of Propagation Constants in an Optical Waveguide Obtained in Glass By Double Ion Exchange", **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**, Vol. 7, No. 3, p. 1589–1592, June 2005.
- [2] Popescu, V. A., "Determination of Normalized Propagation Constant for Optical Waveguides by Using Second Order Variational Method", **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**, Vol. 7, No. 5, p. 2783–2786, October 2005.
- [3] Temiz, M., Karakılınc, Ö.Ö., and Ünal ,M., "A Novel Theoretical Procedure to Determine Absorption and Gain Coefficients in a Symmetric Single Step-Index Quantum Well Laser" **Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.**, 16, 133-136, 2008.
- [4] Temiz, M., Karakılınc, Ö.Ö., and Ünal ,M., "An Analysis for Losses and Confinement Factors for the Regions of a Semiconductor Single Asymmetric Step-Index Laser in Terms of Normalized Propagation Constants for Even and Odd Fields", **Gazi University Journal of Science GU J Sci** 23(2):171-176 , 2010.
- [5] Temiz, M., "The Effects of Some Parameters of the Propagation Constant for Heterojunction Constructions on the Optical Modes", **Laser Phys.**, Vol.11, 3, pp.297, 2001.
- [6] Temiz, M., "Impacts on the Confinement Factor of the Propagation Constants of Optical Fields in the Some Semiconductor Devices", **Laser Phys.**, Vol.12, pp.989, 2002.
- [7] Temiz, M., "Review of Electromagnetic Fields and Powers in Terms of the Normalized Propagation Constant on the Optical Mode Inside Waveguide on Double Heterojunction Constructions", **Laser Physics**, Vol. 13, No. 9, pp. 1123–1137, 2003.
- [8] Selvarajan A. and Srinivas T., "Optical Amplification and Photoresistivity in Solgel Based Waveguides", **Journal of Quantum Electronics**, Vol.37, No.9, 1120, 2001.
- [9] Paiano, G. and Pellicoro, M., "Propagation Constant of Weakly Guiding Optical Fibers: A New Eigenvalue Condition", **Journal of Lightwave Technology**, Vol.19, No.10, 1992, 2001.
- [10] Bhattacharya, P., **Semiconductor Optoelectronic Devices**, Prentice Hall, pp. 262-263, 1998.
- [11] Verdeyen, J. T., **Laser Electronics**, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1989.
- [12] Temiz, M., and Ünal ,M., "Yarıiletken Tekli Basamak Kırılma İndisli Lazerlerde Olasılık ve Kayıp Oranlarının Alternatif Analizi", **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt 15, Sayı 2, Sayfa 300-304, 2009.
- [13] Temiz, M., Ünal M., and Karakılınc, Ö.Ö., "Yarıiletken tekli adım kırılma indisli lazerlerde olasılık ve kayıp oranları", **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt 14, Sayı 3, Sayfa 301-308, 2008.