

GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN Tekli Lazer Diyotunun TE Modunda Elektrik ve Manyetik Alanlarının İncelenmesi

The Investigation of Electric and Magnetic Fields of Single Laser Diode GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN on TE Mode

Mehmet ÜNAL, Mustafa TEMİZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Pamukkale Üniversitesi
mehmetunal@pau.edu.tr, mustafatemiz@pau.edu.tr

Özet

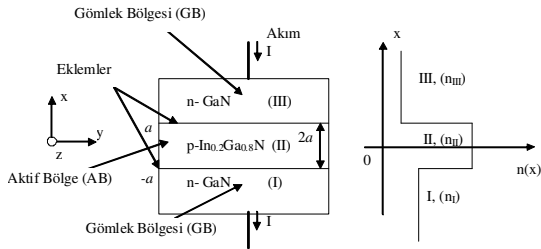
Bu çalışmada yarıiletken tekli GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN lazer diyotunun yapısal ve tasarım parametreleri Alfa Metodu ile elde edilmiş ve yarıiletken adım kırılma indisli tekli lazerin bölgelerindeki elektrik ve manyetik alanların değişimleri incelenmiştir.

Abstract

In this study, the structural and design parameters of semiconductor single GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN laser diode are obtained by Alpha Method and the variations of electric and magnetic fields in the regions of semiconductor step-index single laser are investigated.

1. Giriş

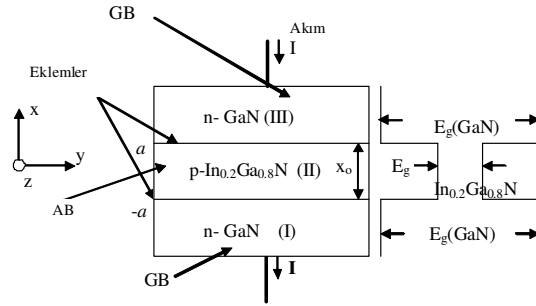
Yarıiletken adım kırılma indisli tekli asimetrik lazer (YIAKITAL) üç bölgeye sahiptir (Şekil 1). Şekil 1 ve Şekil 2'de görüldüğü gibi, bu bölgeler, iki kısımdan oluşan Gömlek Bölgeleri (GB) ve Aktif Bölge (AB) adlarını alırlar. AB'nin genişliği $2a$ ile gösterilmiştir. GB ile AB birbirinden iki farklı yapıyı eklemle ayrılırlar.



Şekil 1: YIAKITAL ve bölgelerindeki kırılma indisi profili.

Bu analizde, yarıiletken malzeme olarak galyum nitrid (GaN) seçilmiştir. GaN malzemesine indiyum (In) katkısı yapılarak kırılma indisi artırılabilir [1]. Bu bilgidен hareketle GB malzemesi olarak GaN ve AB malzemesi olarak da

In_{0,2}Ga_{0,8}N kullanılabilir. Bu çalışmada, elde edilen tüm ifadelerde ve büyüklüklerde "Alfa Metodu" kullanılmıştır [2,3,4,5]. GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN malzemeleri için kırılma indislerinin belirlenerek, dalga boyu ve aktif bölgenin genişliğinin verilmesi halinde yarıiletken lazer diyota ait çeşitli büyüklükler hesaplanabilir.



Şekil 2: İki farklı eklemli bir YIAKITSL ve enerji bant diyagramı.

Bir YIAKITSL'in geometrisi, örnek olarak, GaN ve İndiyum Galyum Nitrid (In_xGa_{1-x}N) gibi farklı iki malzeme arasındaki iki eklemde meydana gelir. Burada en önemli husus, Şekil 1'deki kırılma indisi profilinden de görüldüğü gibi, AB'de yer alan malzemenin kırılma indisinin GB'deki malzemelerin kırılma indislerinden büyük olmasıdır. Eğer GB'nin kırılma indisleri birbirine eşit ise, yarıiletken adım kırılma indisli tekli simetrik lazer (YIAKITSL) oluşur. Lazerin yapısında istenen ikinci özellik de Şekil 2'de görüldüğü gibi, AB ve GB'nin yasak bant genişliklerinin farklı olması ve GB'nin yasak bantlarının AB'nin yasak bandından büyük olmasıdır. Bu iki özellik malzeme seçimi ve tasarımla belirlenir. Optik dalga (ışık), tam yansıma ile AB'de hapsedilir. Işığın AB'de hapsedilmesi için dalga kılavuzunun kontrol edilmesiyle, elektron ve delikler, büyük bir kuvvetle AB'de tekrar tekrar birleşirler [6,7]. Böylece AB'de, optik elektromanyetik alanla yük taşıyıcıları arasında enerji geçişi (alış-veriş) meydana gelir. Bu suretle, AB optik güçlerde

değişimleri içeren elektronik etkileşim için bir kararlı platform meydana getirir [3,5,7].

2. Normalize Yayılım Sabitinin Hesaplanması

Bölgelere ait kırılma indisleriyle beraber dalga boyu ve aktif bölgenin genişliği verildiğinde, normalize frekans (NF),

$$V = ak_0 \sqrt{n_{II}^2 - n_{I,III}^2} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır [8]. Normalize yayılım sabitinin (NYS, α), NF ile aralarında, sırasıyla, çift ve tek modlu alanlar için aşağıdaki bağıntılar mevcuttur [8]:

$$\tan(\sqrt{1-\alpha}V) = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha}}, \quad \cot(\sqrt{1-\alpha}V) = -\sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (2)$$

Eğer NF biliniyorsa sayısal Newton-Raphson Yöntemi yardımıyla NYS hesaplanabilir. Buradan hareketle de normalize koordinat sisteminin apsisi (ζ) ve ordinatı (η) ise,

$$\zeta = \sqrt{1-\alpha}V = \alpha_{II}a, \quad \eta = \sqrt{\alpha}V = \alpha_{I,III}a \quad (3)$$

olarak hesaplanır [8,9].

3. TE Modunda Aktif ve Gömlek Bölgelerindeki Elektrik Alan Bileşenleri

YIAKITAL'in bölgelerindeki elektrik alan dalgaları ve enerji özdeğerleri [2,10,11] sırasıyla

$$E_{yI} = A_I \exp[\alpha_I(x+a)] F(z, \omega, t) \quad (4)$$

$$E_{yII} = A \cos(\alpha_{II}x - \theta) F(z, \omega, t) \quad (5)$$

$$E_{yIII} = A_{III} \exp[-\alpha_{III}(x-a)] F(z, \omega, t) \quad (6)$$

$$F(z, \omega, t) = \exp[j(\omega t - \beta_z z)] \quad (7)$$

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{8m^* a^2} \quad n=1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

$$e_i = V_o - E_n \quad (9)$$

$$E_i = i^2 E_1, \quad E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{8m^* a^2}, \quad i=1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

olarak verilir ki, burada n , i , m^* , V_o ve \hbar , sırasıyla, alanın mod numarasını, çukurdaki kuantum enerji seviyesini, iletim veya valans bandındaki taşıyıcının etkin kütlelerini, AB'nin çukur potansiyelini ve $\hbar = 1.05459 \times 10^{-34}$ Js olarak normalize Planck sabitini gösterir. Yukarıda bahsedilen $i=I, II, III$ alanlarına ait yayılım sabitleri

$$\alpha_i = \sqrt{\beta_z^2 - \left(\frac{\omega n_i}{c}\right)^2} = \sqrt{\beta_z^2 - k_i^2} \quad (11)$$

$$\alpha_{II} = \sqrt{\left(\frac{\omega n_{II}}{c}\right)^2 - \beta_z^2} = \sqrt{k_{II}^2 - \beta_z^2} \quad (12)$$

$$\alpha_{III} = \sqrt{\beta_z^2 - \left(\frac{\omega n_{III}}{c}\right)^2} = \sqrt{\beta_z^2 - k_{III}^2} \quad \omega = 2\pi c/\lambda \quad (13)$$

(şekilde tanımlanır ki, burada c , ışık hızını belirtmektedir [2,10,11,12].

4. TE Modunda Aktif ve Gömlek Bölgelerindeki Manyetik Alan Bileşenleri

YIAKITAL'in AB ve GB'nde TE modunda manyetik alanların X bileşenleri, $H_{xi} = 1/j\omega\mu_0(\partial E_{yi}/\partial z)$ Maxwell bağıntısı yardımıyla, $F(z, \omega, t)$ çarpanını ihmal ederek, aşağıdaki şekilde yazılabilirler [2,10,11]:

$$H_{xI}(x) = -(A_I \beta_z / \omega \mu_0) \exp[\alpha_I(x+a)] \quad (14)$$

$$H_{xII}(x) = -(A \beta_z / \omega \mu_0) \cos(\alpha_{II}x - \theta) \quad (15)$$

$$H_{xIII}(x) = -(A_{III} \beta_z / \omega \mu_0) \exp[-\alpha_{III}(x-a)] \quad (16)$$

(4)-(6) ve (14)-(16) denklemlerinde A_I, A_{III} büyüklükleri,

$$A_I = A \cos(\alpha_{II}a + \theta),$$

$$A_{III} = A \cos(\alpha_{II}a - \theta) \quad (17)$$

şeklinde bulunur [2,10,11]. Bunun yanında $H_{zi} = -1/j\omega\mu_0(\partial E_{yi}/\partial x)$ Maxwell bağıntısı yardımıyla da bölgelere ait manyetik alanların Z bileşenleri de şu şekilde ifade edilebilir [2,10,11]:

$$H_{zI}(x) = A_I (\alpha_I / j\omega\mu_0) \exp[\alpha_I(x+a)] \quad (18)$$

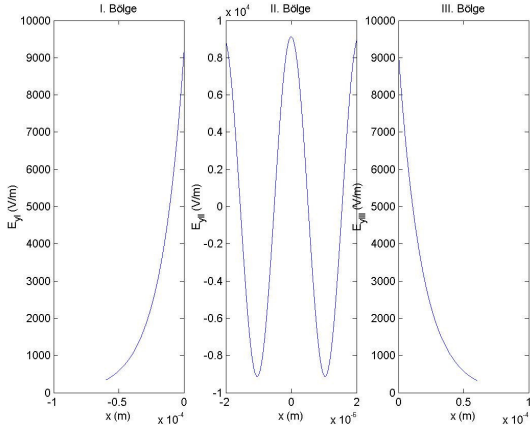
$$H_{zII}(x) = A (\alpha_{II} / j\omega\mu_0) \sin(\alpha_{II}x - \theta) \quad (19)$$

$$H_{zIII}(x) = A_{III} (\alpha_{III} / j\omega\mu_0) \exp[-\alpha_{III}(x-a)]. \quad (20)$$

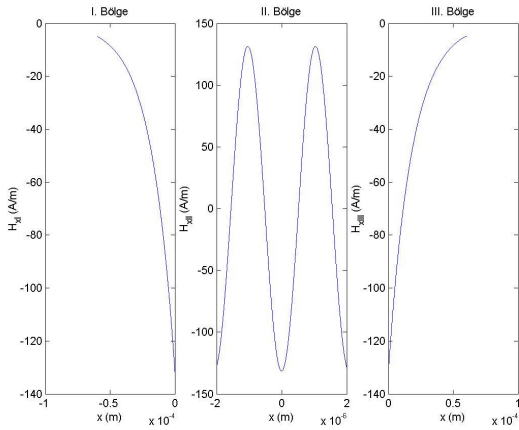
5. TE Modunda GaN/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN Tekli Lazer Diyotunun Bölgelerindeki Elektrik ve Manyetik Alanların Değişimleri

YIAKITSL'in bölgelerinin kırılma indisleri, dalga boyu $\lambda=900$ nm ve $x=0.2$ için $n_{I,III}=2.33$, $n_{II}=2.37$ olarak bulunur [13]. AB'nin genişliği $2a=120$ Å için lazerin bölgelerindeki elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin değişimleri çizdirilmiştir (Şekil 3,4,5). $V<1.57$ olduğu için tek modlu alan için çözüm yoktur [8]. Şekil 3, 4 ve 5 incelendiğinde AB'de alanların sinüsoidal değişim gösterdikleri, GB'de ise sönümlü alanların oluştuğu görülür. Şekil 4 ve 5'te dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta ise, H_x ve H_z manyetik alanlarının GB'de negatif değerler almalarıdır. Bu şu anlama gelmektedir: Her iki manyetik alan bileşeninin genliği de AB'den uzaklaştıkça üstel biçimde azalmaktadır. Fakat bu alanların yönleri negatif yöndedir. Örneğin I. bölgede $x=-100$ Å noktasında $E_{yI}=9.125699238543542 \times 10^3$ V/m, $H_{xI}=-$

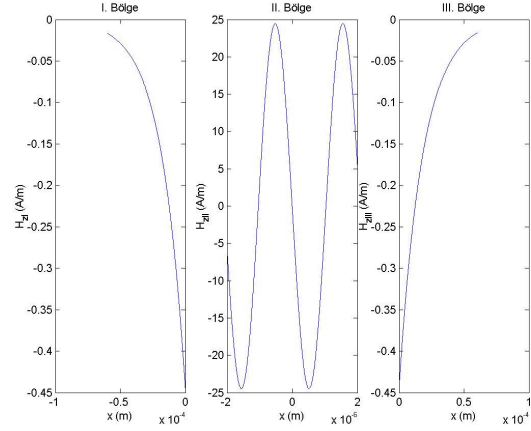
131.4170861075441 A/m ve $H_{zI}=-0.44406282088081$ A/m değerlerini alır. $x=-100000$ A° noktasında ise $E_{yI}=5.269795258303851 \times 10^3$ V/m, $H_{xI}=-75.88910385130926$ A/m ve $H_{zI}=-0.25643187296629$ A/m değerlerini alırlar.



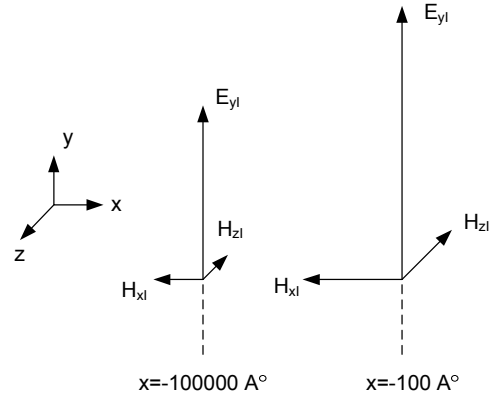
Şekil 3: GaN/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN tekli lazer diyotunun, $\lambda=900$ nm, $n_{I,III}=2.33$, $n_{II}=2.37$, $2a=120$ A° için, sırasıyla, E_{yI} , E_{yII} ve E_{yIII} elektrik alanlarının $-600000A^\circ < x < -60A^\circ$, $-20000A^\circ < x < 20000A^\circ$ ve $60A^\circ < x < 600000A^\circ$ aralıklarındaki değişimleri.



Şekil 4: GaN/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN tekli lazer diyotunun, $\lambda=900$ nm, $n_{I,III}=2.33$, $n_{II}=2.37$, $2a=120$ A° için, sırasıyla, H_{xI} , H_{xII} ve H_{xIII} manyetik alanlarının $-600000A^\circ < x < -60A^\circ$, $-20000A^\circ < x < 20000A^\circ$ ve $60A^\circ < x < 600000A^\circ$ aralıklarındaki değişimleri.



Şekil 5: GaN/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN tekli lazer diyotunun, $\lambda=900$ nm, $n_{I,III}=2.33$, $n_{II}=2.37$, $2a=120$ A° için, sırasıyla, H_{zI} , H_{zII} ve H_{zIII} manyetik alanlarının $-600000A^\circ < x < -60A^\circ$, $-20000A^\circ < x < 20000A^\circ$ ve $60A^\circ < x < 600000A^\circ$ aralıklarındaki değişimleri.



Şekil 6: GaN/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN tekli lazer diyotunun I. bölgesindeki farklı iki noktada elektromanyetik alan bileşenleri.

6. GaN/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN Tekli Lazer Diyotunun Yapısal Parametrelerine İlişkin Nümerik Sonuçlar

900 nm dalga boyunda indiyumun galyum içindeki katkılama oranı olan $x=0.2$ için GB kırılma indisi $n_{I,III}=2.33$ ve AB kırılma indisi $n_{II}=2.37$ olarak hesaplanmıştır. Bu dalga boyu ve kırılma indisleri değerleriyle birlikte AB'nin genişliği $2a=120$ A° seçilmesiyle *Alfa Metodu* yardımıyla (1-3 denklemlerinden hareket edilerek) NF, NYS ve taşıyıcıların enerji özdeğerlerinin normalize koordinat sistemindeki parametrik koordinatları olan η , ζ büyüklükleri nümerik olarak bulunmuş ve bulunan bu değerlere bağlı olarak da diğer büyüklükler hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN tekli lazer diyotunun, $\lambda=900$ nm, $n_{1,III}=2.33$, $n_{II}=2.37$, $2a=120$ Å için önemli yapısal parametre ve büyüklükleri

Büyüklik	Sembol	Değer
Norm. frekans	V	0.01816216153267
Norm. yayılım	α	$3.297191044360614 \times 10^{-4}$
Dalga numarası	$k_I(1/m)$	$1.626646862858715 \times 10^7$
Dalga numarası	$k_{II}(1/m)$	$1.654572130890624 \times 10^7$
Dalga numarası	$k_{III}(1/m)$	$1.626646862858715 \times 10^7$
Yayılım sabiti	$\alpha_I(1/m)$	$5.496526666990482 \times 10^4$
Yayılım sabiti	$\alpha_{II}(1/m)$	$3.026527846665900 \times 10^6$
Yayılım sabiti	$\alpha_{III}(1/m)$	$5.496526666990482 \times 10^4$
Faz sabiti	$\beta_z(1/m)$	$1.626656149360860 \times 10^7$
Etkin indis	n_{ef}	2.33001330193448
Faz hızı	v(m/s)	$1.287546297486483 \times 10^8$
Enerji özdeğeri	$E_1(\mu eV)$	$1.973178140313065 \times 10^3$
Çukur potans.	$V_0(\mu eV)$	$5.984421629701777 \times 10^6$
Zeta	ζ	0.01815916708000
Eta	η	$3.297916000175170 \times 10^{-4}$
Genlik	A	$9.129211006810629 \times 10^3$
Empedans	$Z_{VII}^{TE}(\Omega)$	69.44073642810494
Birim uzunluk başına düşen güç	S(W/m ²)	$6.000979964632179 \times 10^5$
Alan olasılığı	\bar{R}	$1.515775671486358 \times 10^3$
Kayıp olasılığı	\bar{K}	0.99934070672493
Hapsedicilik	Γ_{II}	$6.592932750695125 \times 10^{-4}$

7. Sonuç

Bu çalışmada GaN/In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN tekli lazer diyotunun TE modunda bölgelerindeki elektrik ve manyetik alan dalgalarının değişimleri incelenmiş, yapısal ve tasarım parametreleri *Alfa Metodu* yardımıyla nümerik olarak hesaplanmıştır.

Lazer diyotun bölgelerindeki elektromanyetik dalgaların değişimi, verilen kırılma indisleri, dalga boyu ve AB genişliğinde, incelenmiş ve çizdirilmiştir. AB’de hem elektrik alanının hem de manyetik alanın sinüsoidal değişim içerdiği, GB’de ise alanların genliklerinin AB’ye olan uzaklığın artmasıyla üstel biçimde azaldığı görülmüştür.

Tasarım parametreleri ise *Alfa Metodu* yardımıyla doğrudan malzemenin yapısına bağlı olarak hesaplanmıştır. NF, NYS, dalga numaraları, yayılım sabitleri, faz sabiti, etkin kırılma indisi, faz hızı, enerji özdeğeri, çukur potansiyeli, η , ζ parametrik koordinatları, AB’deki elektrik alanının maksimum genliği A, AB’nin empedansı, AB’de birim uzunluk başına düşen güç, alan ve kayıp olasılıkları ve hapsedicilik faktörü nümerik olarak elde edilmiştir. Bu nümerik sonuçlar, lazer diyotunun tasarımında, yarıiletken malzeme olarak GaN ve In_{0,2}Ga_{0,8}N’ün kullanılmasıyla diğer malzemelere göre bir karşılaştırma yapma olanağı sağlayacaktır.

Literatürde *Alfa Metodu* ile hazırlanmış benzer bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Nitekim elde edilen tüm büyüklükler, kullanılan yarıiletken malzemenin doğrudan doğruya yapısal parametrelerine bağlıdır. Bu durum, hesaplamalarda hem kolaylık hem de hassasiyet sağlamıştır.

8. Kaynaklar

- [1] Lin, M. E., Sverdlov, B. N., Strite, S., Morkoç, H. and Drakin, A. E., "Refractive Indices of Wurtzite and Zincblende GaN", Electronics Letters, Vol. 29, No. 20, pp. 1759-1761, 1993.
- [2] Temiz, M., "The Effects of Some Parameters of the Propagation Constant for Heterojunction Constructions on the Optical Modes", Laser Phys., Vol. 11, No. 3, pp. 297-301, 2001.
- [3] Temiz, M., Karakılıç, Ö.Ö. and Ünal, M., "A Novel Theoretical Procedure to Determine Absorption and Gain Coefficients in a Symmetric Single Step-Index Quantum Well Laser", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences (ELEKTRİK), Vol. 16, No. 1, pp. 133-136, 2008.
- [4] Ünal, M., Temiz, M. ve Karakılıç, Ö.Ö., "Basamak Kırılma İndisli İkili Bir Dalga Kılavuzunun TE Modunda Tekli Eşdeğer Modelinin Araştırılması", IEEE 16. Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı, SİU, 2008.
- [5] Temiz M., Ünal M. ve Karakılıç Ö. Ö., "Basamak Kırılma İndisli Yarıiletken Lazer Tasarımında Düzlem Dalga Metodu", Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi (yayımlanacak).
- [6] Gasiorowicz, S., Quantum Physics, McGraw-Hill Book, London, 1974.
- [7] Bhattacharya, P., Semiconductor Optoelectronic Devices, McGraw-Hill Book, London, 1998.
- [8] Iga, K., Fundamentals of Laser Optics, Plenum Press, New York, 1994.
- [9] Karakılıç, Ö.Ö. ve Temiz, M. "Yarıiletken planar çift farklı yapıli lazerlerde elektrik alan parametrelerine göre temel tasarım düşüncesi ve hesaplama prosedürü", URSl-Türkiye'2004, 2004.
- [10] Temiz, M., "Impacts on the Confinement Factor of the Propagation Constants of Optical Fields in the Some Semiconductor Devices", Laser Phys., Vol. 12, No. 5, pp. 1-18, 2002.
- [11] Temiz, M., "The Review of Electromagnetic Fields and Powers in Terms of Normalised Propagation Constant on the Optical Mode Inside Waveguide on the Heterojunction Constructions", Laser Phys., Vol. 13, No. 9, pp. 1123-1137, 2003.
- [12] Verdeyen, J.T., Laser Electronics, Prentice-Hall, London, 1989.
- [13] Thin film and bulk index of refraction and photonics calculations, <http://www.luxpop.com/>, 2008.