*Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*
*Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*
*GU J Sci Part:C*
*4(3):159-163 (2016)*

# InGaAsP/InP Yapısının Yapısal, Morfolojik ve Elektriksel Karakterizasyonları

Barış Kınacı[1, ♠]

[1]*İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Vezneciler 34134, İstanbul, Türkiye*

*Başvuru: 19/05/2016 Düzeltme: 27/06/2016 Kabul: 13/07/2016*

**ÖZ**

Bu çalışmada, InGaAsP tabakası InP alttaş üzerine Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği kullanılarak büyütüldü. InGaAsP/InP yapısının yapısal ve morfolojik özellikleri yüksek çözünürlüklü x–ray kırınımı (HR–XRD) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri ile incelendi. Ayrıca, InGaAsP/InP yapısının deneysel ileri ve ters besleme akım–voltaj (I–V) karakteristiği oda sıcaklığında incelendi. İdealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi temel elektriksel parametreler ileri besleme I–V karakteristiğinden belirlendi.

***Anahtar Kelimeler:*** *InGaAsP/InP yapısı, MBE tekniği, HR–XRD; AFM; I–V karakteristik*

## The Structural, Morphological and Electrical Characterizations of InGaAsP/InP Structure

**ABSTRACT**

In this study, InGaAsP layer is grown on InP substrates by using Molecular Beam Epitaxy (MBE) technique. The structural and morphological properties of InGaAsP/InP structure have been investigated by means of high resolution x–ray diffraction (HR–XRD) and atomic force microscopy (AFM) measurements. In addition, the experimental forward and reverse bias current–voltage (I–V) characteristic of InGaAsP/InP structure was investigated at room temperature. The electrical parameters such as idealite factor, barrier height and series resistance were extracted from forward bias I–V characteristics.

***Key words****: InGaAsP/InP structure; MBE technique; HR–XRD; AFM; I–V characteristic*

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

InGaAsP temelli yapılar lazerler [1, 2], güneş hücreleri [3–5], foto-dedektörler [6] kuantum kuyuları [7–9], foto-diyotlar [10] ve çeşitli opto–elektronik ve mikro–elektronik cihaz uygulamalarında [11–13] yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları arasında, lazerler, kompakt ve çok küçük boyutlu olması, elektriksel olarak sürülebilmesi, ucuz olması, uzun ömrü, yüksek güvenilirliği ve yüksek verimliliğe sahip olması dolayısıyla günümüzde fiber optik haberleşme sistemlerinde, optik zaman-çoğullamalı sistemlerde, elektro-optik ve fotonik anahtarlamada, askeri ve medikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [14]. Yarıiletken lazerlerin en önemli uygulama alanlarından biri fiber optik haberleşmedir. InGaAsP/InP lazer yapısı fiber optik haberleşme dalgaboylarında çalışmaktadır. Fiber optik haberleşmede 1300 nm ve 1550 nm dalgaboyları oldukça önem kazanmaktadır, çünkü bu dalgaboylarındaki kayıplar oldukça düşüktür. Bu nedenle bu dalgaboyunda çalışan yarıiletken lazerler

♠*İletişim yazarı, e-mail: baris.kinaci@istanbul.edu.tr*

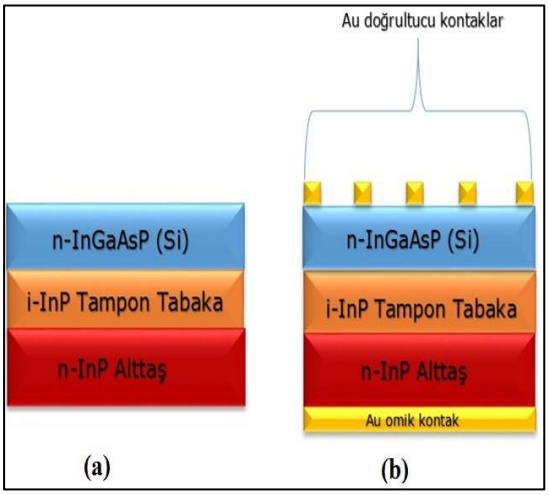
özellikle fiber optik haberleşme sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılmaktadırlar [14].

InGaAsP temelli yapılar MBE, MOVPE, MOCVD gibi çeşitli teknikler kullanılarak büyütülür [3–6, 11, 13]. Bu teknikler arasında MBE tekniği yüksek kaliteli malzeme hazırlanırken önemli olan yüksek vakum altında malzeme büyütmede kullanılır [15]. Ayrıca tampon tabaka epitaksiyel tabakaların kalitesini belirlemede en önemli faktörlerden birisidir [16]. Metal–yarıiletken (MS) kontaklar elektriksel cihazların gelişmesinde önemli bir rol oynar [15]. MS diyodun elektronik özellikleri, diyodun yapısı hakkında faydalı bilgiler veren ve ileri besleme I–V karakteristiğinden elde edilen idealite faktörü ($n$), bariyer yüksekliği ($\Phi_b$) ve seri direnç ($R_s$) gibi temel elektriksel parametreler ile belirlenir [15, 17].

Sunulan bu çalışmada, InGaAsP/InP yapısının karakterizasyon sonuçları ile ilgili yapılan araştırmalar rapor edildi. Bu çalışma aşağıda belirtildiği gibi organize edildi. InGaAsP yapısı InP alttaş üzerine MBE tekniği ile büyütüldü. Yapının kristal kalitesi ve yüzey morfolojisi sırası ile HR–XRD ve AFM ölçümleri ile belirlendi. Au/InGaAsP/InP yapısının deneysel ileri ve ters besleme I–V karakteristiği oda sıcaklığında incelendi. $\Phi_b$, $n$, $R_s$ gibi elektriksel parametreler ileri besleme I–V karakteristiğinden elde edildi.

## 2. DENEYSEL DETAYLAR (EXPERIMENTAL DETAILS)

InGaAsP/InP yapısı V80H katı kaynaklı MBE sistemi kullanılarak büyütüldü. Büyütme sürecine başlamadan önce InP alttaş organik çözücüler kullanılarak temizlendi. Temizlik sürecinden sonra katkısız 3000 Å kalınlıklı i–InP tampon tabaka alttaş ve epi tabaka arasında örgü uyumu sağlamak ve alttaştan üzerine büyütülen epi-tabakaya kontaminasyon geçmemesi için InP alttaş üzerine büyütüldü. Yapı 15000 Å kalınlıklı Si katkılı n tipi InGaAsP epi–tabakasının büyütülmesi ile tamamlandı. Yapının şematik diyagramı Şekil 1 (a) da verildi. X–ray ölçümleri D–8 Bruker marka yüksek çözünürlüklü difraktometre ile alındı. AFM ölçümü Omicron değişken sıcaklıklı STM/AFM cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Elektriksel karakterizasyonlar için, öncelikle omik arka kontak $10^{-6}$ mbar vakum altında 350 $^{o}$C de 1500 Å kalınlıkta yüksek saflıkta Au (%99.999) biriktirilmesi ile oluşturuldu. Daha sonra yapı başarılı omik kontak davranışı sergilemesi için 320 $^{o}$C de 5 dk tavlandı. Son olarak 1000 Å kalınlığa ve 2 mm çapa sahip nokta şeklinde doğrultucu kontaklar 70 $^{o}$C de yüksek saflıkta Au (%99.999) biriktirilmesi ile oluşturuldu. Au/InGaAsP/InP yapısının şematik gösterimi Şekil 1. (b) de verildi. Au/InGaAsP/InP yapısının I–V karakteristiği oda sıcaklığında Keithley 2400 source–meter kullanılarak elde edildi.

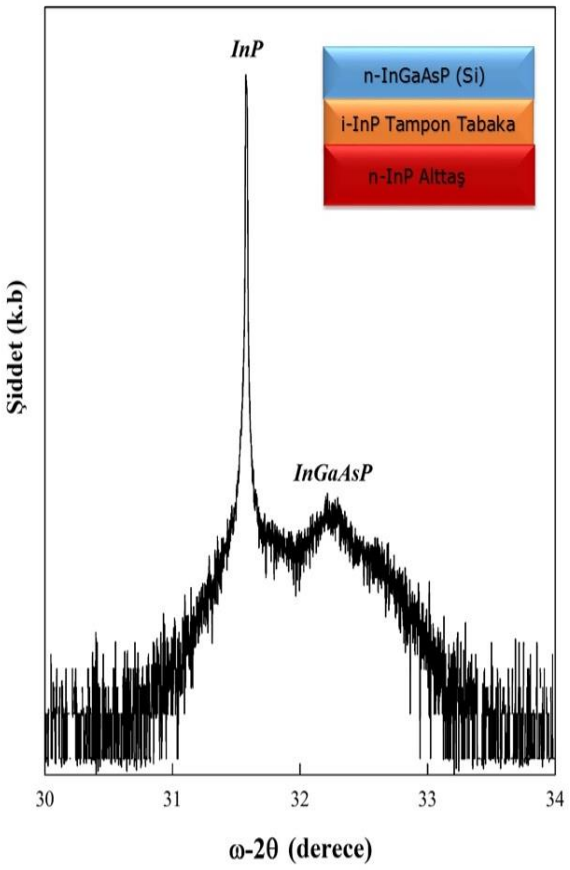



**Şekil. 1. (a)** InGaAsP/InP yapısının şematik diyagramı, **(b)** Au/InGaAsP/InP yapısının şematik diyagramı.

(**(a)** The schematic diagram of InGaAsP/InP structure, **(b)** The schematic diagram of Au/InGaAsP/InP structure)

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

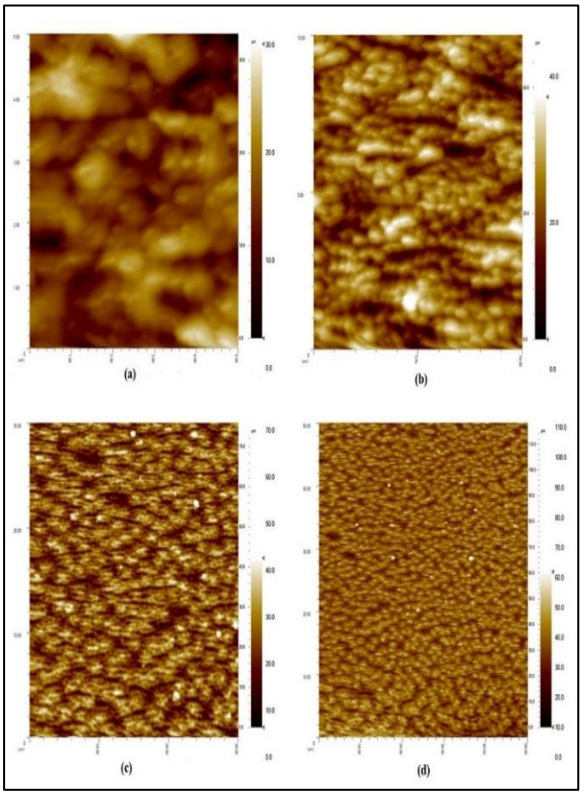
Şekil 2'de InGaAsP/InP yapısının HR–XRD ω–2Θ taraması gösterildi. Bu şekilden de görüleceği gibi en yüksek pik InP altaştan diğer pik ise InGaAsP epi–tabakadan gelmektedir. InP alttaş pikinin keskinliğinden alttaş üzerine büyütülen tampon tabakanın alttaşa tam olarak oturduğu görülmektedir. Bu desenler InGaAsP tabakasının InP üzerine düzgün, tek kristal olarak büyüdüğünü göstermektedir. XRD kırınım deseninde InGaAsP pik açılarının InP pikine göre açısal olarak ayrılması, yapıdaki In oranının belirlenmesine imkân verir. Alaşım oranın belirlenmesi dinamik kırınım teorisinin Takagi–Taupin denklemlerinin [18, 19] çözümüne dayanan LEPTOS yazılımı ile [20] deneysel veriler simüle edilerek, $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$/InP yapılarının In alaşım oranı ($x$) ve dolayısıyla Ga alaşım oranı ($1–x$) belirlendi. In alaşım oranı ($x$) 50.01, Ga alaşım oranı ($1–x$) 49.99 olarak bulundu. Ayrıca P alaşım oranı ($y$) ve dolayısıyla As alaşım oranı da ($1–y$) belirlendi. P alaşım oranı ($y$) 12.37, As alaşım oranı ($1–y$) 87.63 olarak bulundu.




**Şekil 2.** InGaAsP/InP yapısının HR–XRD ω–2Θ taraması

(HR–XRD ω–2Θ scan of InGaAsP/InP structure)

Şekil 3(a) – (d) de InGaAsP tabakasının yüzey morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenebilmesi için InGaAsP yüzeyinden elde edilen iki boyutlu (2D) ve sırasıyla 5μm$^2$, 10μm$^2$, 30μm$^2$ ve 50μm$^2$ lik tarama alanlarına sahip AFM görüntüsü verildi. InGaAsP tabakasının yüzey morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olarak daha fazla bilgiye sahip olmak için farklı alanlarda taramalar yapıldı. Yüzey karekök ortalama (*RMS*) değerleri 5μm$^2$, 10μm$^2$, 30μm$^2$ ve 50μm$^2$ lik tarama alanları için sırasıyla 31.68 nm, 56.23 nm, 177.32 nm ve 541.14 nm olarak bulunmuştur. Tarama alanında ki artışa bağlı olarak *RMS* değerinin de artması beklenen bir davranıştır.




**Şekil 3**. InGaAsP tabakasının yüzey morfolojisinin iki boyutlu AFM görüntü taramaları **(a)** 5μm$^2$, **(b)** 10μm$^2$, **(c)** 30μm$^2$ ve **(d)** 50μm$^2$

(Two dimensional AFM image scans the surface morphology of InGaAsP layer **(a)** 5μm$^2$, **(b)** 10μm$^2$, **(c)** 30μm$^2$ and **(d)** 50μm$^2$)

Yüzey pürüzlülük değerinin AFM gibi yüzey görüntüleme sistemlerinde birkaç nanometre civarında olması yüzeyin kalitesinin iyi olduğunu gösterir. Ancak bazı sistemler için yüzey pürüzlülük değerinin yüksek olması istenilmektedir. Örneğin, güneş hücre yapılarında yüzeyin pürüzlü olması gelen ışığın yansımasını önleyeceğinden dolayı daha fazla ışığın soğrulmasını sağlayacaktır ve verimlilik değerinde artış meydana getirecektir. AFM ölçümü ile yüzey pürüzlülük değerinin belirlenmesi yapının kullanılacağı sistem açısından büyük öneme sahiptir. Ayrıca, Şekil 3(d) de 50μm$^2$ lik tarama alanı için InGaAsP yüzeyinde In ayrılmaları diğer taramalara göre daha net bir şekilde gözlemlenmiştir. Yüzey taraması yapılırken sadece 5μm$^2$ ve 10μm$^2$ lik taramalar değil daha yüksek taramaların da yapılarak karşılaştırma yapılması gerektiği görüldü.

InGaAsP/InP yapısının yapısal ve morfolojik özellikleri belirlendikten sonra, Au/InGaAsP/InP yapısının elektriksel karakterizasyonu oda sıcaklığında I–V karakterizasyonu ile gerçekleştirildi ve Şekil 4'de verildi. Deneysel I–V data ileri beslemede iyi bilinen eşitlik kullanılarak analiz edildi [15].

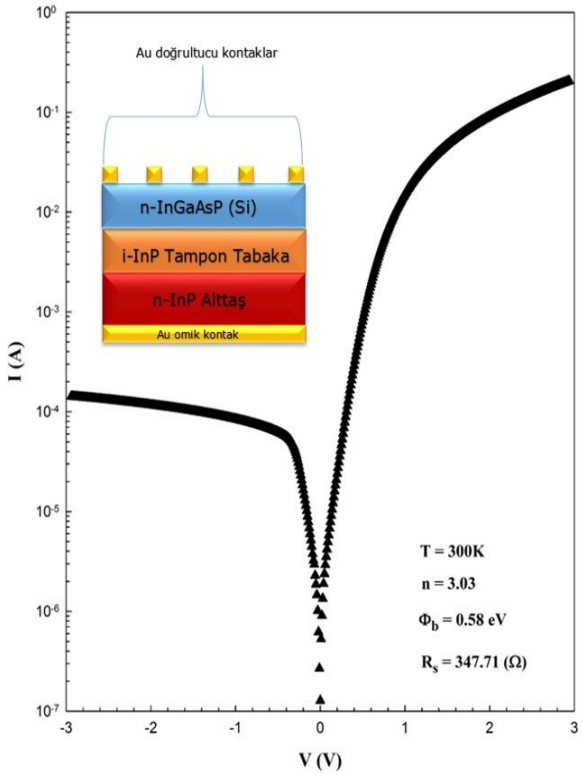
$$I = I_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (1)$$

Burada q elektronik yük, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık Kelvin cinsinden, $I_o$ doyum akımıdır. $\Phi_b$ ve $n$ değerleri sırasıyla Eşitlik (2) ve Eşitlik (3) den elde edildi.

$$\Phi_b = \frac{kT}{q}\ln\left[\frac{AA^*T^2}{I_0}\right] \quad (2)$$

$$n = \frac{q}{kT}\left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (3)$$

Burada $A$ diyot alanı, $A^*$ Richardson sabitidir. Bu eşitlikler kullanılarak $\Phi_b$ değeri 0.58 eV, $n$ değeri 3.03 olarak bulundu. Ayrıca, $R_s$ değeri I–V karakteristiğinden elde edilen yapı direncinin ($R_i$) uygulanan voltaja ($V_i$) karşı eğrisinden belirlendi. Yeterince yüksek ileri besleme voltajlara gidildikçe yapı direnç değerinin $R_s$ gibi sabit bir değere yaklaştığı görüldü. Buradan yapının $R_s$ değeri 347.71 (Ω) olarak belirlendi. I–V karakteristiğinden elde edilen temel diyot parametrelerine göre InGaAsP/InP yapısının cihaz uygulamaları için uygun bir yapı olduğu belirlendi.




**Şekil 4.** Au/InGaAsP/InP yapısının oda sıcaklığında ileri ve ters besleme I–V karakteristiği

(The forward and reverse bias I–V characteristics of Au/InGaAsP/InP at room temperature)

## 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada InGaAsP/InP yapısının yapısal ve morfolojik özellikleri HR–XRD ve AFM ölçümleri ile belirlendi. Yapının kristal kalitesi HR–XRD ölçümü ile incelendi. InGaAsP tabakasının yüzey morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğü AFM ölçümü ile incelendi. AFM görüntülerine göre artan tarama alanına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlendi. Au/InGaAsP/InP yapısının deneysel ileri ve ters besleme I–V karakteristiği oda sıcaklığında incelendi. Temel diyot parametreleri olan $\Phi_b$, $n$, $R_s$ değerleri I–V eğrisi kullanılarak hesaplandı. InGaAsP/InP yapısından elde edilen deneysel sonuçlara göre, bu yapının cihaz uygulamaları için uygun olabileceği kanaatine varıldı.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Tsaia, C.L, Yena, C.T, Choua, C.Y, Chang, S.J, Wuc, M.C, "1.3–μm InGaAsP planar buried heterostructure laser diodes with AlInAs electron stopper layer", Optics & Laser Technology, 44(4), 1026–1030, 2012.

[2] Liu, N, Dubowski J.J, "Chemical evolution of InP/InGaAs/InGaAsP microstructures irradiated in air and deionized water with ArF and KrF lasers", Applied Surface Science, 270, 16–24, 2013.

[3] Jia, L, Lua, S, Wua, Y, Daia, P, Biana, L, Arimochib, M, Watanabeb, T, Asakac, N, Uemurac, M, Tackeuchic, A, Uchida, Shiro, Yang, H, "Carrier recombination dynamics of MBE grown InGaAsP layers with 1 eV bandgap for quadruple–junction solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, 127, 1–5, 2014.

[4] Jia, L, Tana, M, Honda, K, Harasawa, R, Yasue, Y, Wua, Y, Dai, P, Tackeuchi, A, Bian, L, Lua, S, Yang, H, "Investigation of InGaAsP solar cells grown by solid–state molecular beam epitaxy", Solar Energy Materials and Solar Cells, 137, 68–72, 2015.

[5] Sugaya, T, Makita, K, Mizuno, H, Mochizuki, T, Oshima, R, Matsubara, K, Okano Y, Niki, S, "InGaP/GaAs/InGaAsP triple junction solar cells grown using solid–source molecular beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, 425, 322–325, 2015.

[6] Xi, S.P, Gu, Y, Zhang, Y.G, Chen, X.Y, Ma, Y.J, Zhou, L, Du, B, Shao, X.M, Fang J.X, "InGaAsP/InP photodetectors targeting on 1.06 μm wavelength detection", Infrared Physics & Technology, 75, 65–69, 2016.

[7] Carrère, H, Truong, V.G, Marie, X, Amand, T, Urbaszek, B, Brenot, R, Lelarge, F, Rousseau, B, "Strained InGaAsP multi-quantum-well structures for InP–based wide linewidth and polarization-

insensitive semiconductor optical amplifiers", Microelectronics Journal, 40, 827–829, 2009.

[8] Jo, B, Lee, C.R, Kim, J.S, Han, W.S, Song, J.H, Leem, J.Y, Noh, S.K, Ryou, J.H, Dupuis, R.D, "Investigation on the lasing characteristics of InAs/InGaAsP quantum dots with additional confinement structures", Journal of Crystal Growth, 393, 59–63, 2014.

[9] Lin, T, Zhang, H, Sun, R, Duan, Y, Lin, N, Ma, X, "Red–shift in the InGaAsP/GaInP active region using impurity free vacancy diffusion induced quantum well intermixing", Journal of Alloys and Compounds, 644, 398–403, 2015.

[10] Luryi, S, Kastalsky, A, Gouzman, M, Lifshitz, N, Semyonov, O, Stanacevic, M, Subashiev, A, Kuzminsky, V, Cheng, W, Smagin, V, Chen, Z, Abeles, J.H, Chan, W.K, Shellenbarger, Z.A, "Epitaxial InGaAsP/InP photodiode for registration of InP scintillation", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 622, 113–119, 2010.

[11] Kulkova, I.V, Kadkhodazadeh, S, Kuznetsova, N, Huck, A, Semenova, E.S, Yvind, K, "High–quality MOVPE butt-joint integration of InP/AlGaInAs/InGaAsP–based all–active optical components", Journal of Crystal Growth, 402, 243–248, 2014.

[12] Fekecs, A, Chicoine, M, Ilahi, B, Thorpe, A.J.S, Schiettekatte, F, Morris, D, Charette, P.G, Arès, R, "Critical process temperatures for resistive InGaAsP/InP heterostructures heavily implanted by Fe or Ga ions", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 359, 99–106, 2015.

[13] Salehzadeh, O, He, C, Benyon, W, Thorpe, A.J.S, "The effects of zinc–doping on the composition of InGaAsP layers grown by MOCVD", Journal of Crystal Growth, 445, 110–114, 2016.

[14] Çakmak, B, Duman, Ç, "Uzun dalgaboylu ve konik yapılı yarıiletken lazerlerin üretimi, deneysel ve teorik olarak incelenmesi", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27(3), 623–630, 2012.

[15] Kınacı, B, Özen, Y, Kızılkaya, K, Asar, T, Çetin, S.Ş, Boyalı, E, Öztürk, M.K, Memmedli, T, Özçelik, S, "Effect of alloy composition on structural, optical and morphological properties and electrical characteristics of $Ga_xIn_{1-x}P$/GaAs structure", J. Mater. Sci: Mater Electron, 24, 1375–1381, 2013.

[16] Lisesivdin, S.B, Demirezen, S, Caliskan, M.D, Yildiz, A, Kasap, M, Ozcelik, S, and Ozbay, E, "Growth parameter investigation of $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$/GaN/AlN heterostructures with Hall effect measurements", Semicond. Sci. Tech., 23, 095008, 2008.

[17] Uslu H, Bengi A, Çetin S.Ş, Aydemir U, Altındal Ş, Aghaliyeva S.T, Özçelik S, "Temperature and voltage dependent current–transport mechanism in GaAs/AlGaAs single–quantum–well lasers", Journal of Alloys Compounds, 507, 190–195, 2010.

[18] Takagi, S, "Dynamical theory of diffraction applicable to crystals with any kind of small distortion", Acta Crystallogr., 15, 1311-1312, 1962.

[19] Taupin, D, "Dynamic theory of x–ray diffraction in crystals", Bull. Soc. Fr. Mineral. Crystallogr., 87: 469-511 (1964).

[20] LEPTOS User Manual (www.bruker–axs.de), Version 2, 2004.