

Atıf İçin: Ayarcı Kuruoğlu N, 2022. MOCVD ile büyütülen GaN p-i-n yapısındaki sarı ışık merkezinin elektro-optik ölçümlerle incelenmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(1): 207-216.

To Cite: Ayarcı Kuruoğlu N, 2022. Investigation of the yellow light center in GaN p-i-n structure grown by MOCVD with electro-optical measurements. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(1): 207-216.

MOCVD ile büyütülen GaN p-i-n yapısındaki sarı ışık merkezinin elektro-optik ölçümlerle incelenmesi

Neslihan AYARCI KURUOĞLU^{1,*}

ÖZET: Bu çalışmada, metal organik buhar fazlı epitaksi ile üretilmiş GaN p-i-n yapı, elektrolüminesans (EL) ve sıcaklığa akım-gerilim ölçümleriyle incelenmiştir. GaN p-i-n yapının, düz besleme geriliminde uzay yükü sınırlamalı bölgeye karşılık gelen 50 mA enjeksiyon akımı altında, tepe noktası 2.2 eV enerjisinde olan sarı ışık yaydığı gözlenmiştir. Ayrıca, uzay yükü sınırlamalı bölgeden türetilen mobilitenin, elektrik alan bağıllığının Poole-Frenkel türünde olduğu saptanmış ve termal enerji aralığı 0.299 eV olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu enerji aralığı, EL ölçümünden elde edilen sonuçlarla desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GaN, p-i-n yapı, elektrolüminesans, akım-gerilim karakterizasyonu, mobilite.

Investigation of the yellow light center in GaN p-i-n structure grown by MOCVD with electro-optical measurements

ABSTRACT: In this study, GaN p-i-n structure grown by metal-organic vapor phase epitaxy was investigated by temperature-dependent current-voltage and electroluminescence (EL) measurements. It has been observed that the GaN p-i-n structure emits yellow light with a peak energy of 2.2 eV under 50 mA injection current corresponding to the space charge limited region at forward voltage. In addition, the electric field dependence of the mobility derived from the space-charged region was determined to be Poole-Frenkel and the thermal energy gap was calculated as 0.299 eV. This calculated energy range was supported by the results obtained from the EL measurement.

Keywords: GaN, p-i-n structure, electroluminescence, current-voltage characterization, mobility.

¹Neslihan AYARCI KURUOĞLU ([Orcid ID: 0000-0002-9659-7280](https://orcid.org/0000-0002-9659-7280)), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Neslihan AYARCI KURUOĞLU, e-mail: nayarci@yildiz.edu.tr

GİRİŞ

GaN geniş bant aralığının sağladığı optik özellikleri nedeniyle ışık yayan diyot (Amano 2016; Pimputkar ve ark. 2009), lazer diyot (Murayama ve ark. 2018; Nakamura 1998; Zhang ve ark. 2019), detektör gibi optoelektronik uygulamalar için kullanılmaktadır. Bu özelliklerinin yanında, radyasyon dayanıklılığı nedeniyle, radyoaktif beta kaynağından yayınlanan elektronların kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürerek, beta kaynağının yarı ömrüne bağlı olarak uzun yıllar (örneğin Nikel-63 için 100.2 yıl) elektrik üretilmesini sağlayan betavoltaik pil uygulamaları (N. Kuruoğlu, Özdemir, and Bozkurt 2017; Munson ve ark. 2018; Yoon ve ark. 2020) için de ilgi çekici bir yarı iletkenidir.

GaN p-i-n yapılar, moleküler ışın epitaksi (MBE), Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) ve hidrit buhar faz epitaksi (HVPE) (Tan 2020) gibi farklı büyütme yöntemlerle büyütülebilmektedir. GaN yapılar, yoğun kullanımına rağmen, altlık ile örgü parametresi uyumsuzluğu ve büyütme için pahalı olmayan, büyük alanlı bir bulk GaN altlık olmaması nedeniyle, hala teknik sorunlar içermektedir (Avrutin ve ark. 2010; Tan 2020). Safir altlık, yüksek termal ve kimyasal kararlılığı ve düşük maliyeti olması nedeniyle GaN tabanlı yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Narayanan ve ark. 2002). Ancak, GaN ile safir arasındaki yüksek örgü uyumsuzluğu (%13.3) (Liu and Edgar 2002; Tan 2020), vida dislokasyonuna yol açan kusurların üretilmesine neden olmaktadır (Chichibu ve ark. 2020; Ning ve ark. 1996; O'Hanlon ve ark. 2021; Sheremet ve ark. 2018). GaN üretimindeki bir diğer problem de akseptör katkılama problemidir (Nakano and Jimbo 2002; Usami ve ark. 2017). MOCVD ile büyütülen filmlerde, p türü GaN oluşturmak için genellikle magnezyum (Mg) kullanılmaktadır (Usami ve ark. 2017; Y. Wang ve ark. 2020). Literatürdeki çalışmalarda, düşük Mg konsantrasyonu ile katkılanan GaN yapılarda, azot (N) ve galyum (Ga) boşluklarının oluşturduğu nokta kusurları nedeniyle 2.2 eV (560 nm) civarında sarı ışık (YL) gözlemlenmiştir (Arifin, Sugianto, ve ark. 2020; M. A. Reshchikov and Morkoç 2006; Soh ve ark. 2004; Sui and Yu 2011). Mg konsantrasyonu arttırıldığında, YL'nin baskılanmaya başladığı ve Mg konsantrasyonu daha da arttırıldığında, 2.8 eV (422 nm) enerjisinde (dalga boyunda) mavi ışık yayıldığı gözlemlenmiştir (Sui and Yu 2011). Gözlenen bu mavi ışık, valans bandının üzerindeki 0.5 eV enerjili derin kusura atfedilir (Maruska, Stevenson, and Pankove 1973; Maruska and Tietjen 1969; Oh, Park, and Park 1998; Smith ve ark.; Ves ve ark. 2000) ve derin bir vericiden sığ Mg alıcısına optik geçiş olarak yorumlanır (Kaufmann ve ark. 1998). GaN yapı içerisinde yer alan safsızlık ve boşluklar, ışımsız rekombinasyona neden olarak optoelektronik cihazlarda kuantum verimliliğini azaltmaktadır (Dreyer ve ark. 2016). Bununla birlikte, betavoltaik uygulamalarda, GaN'daki yerel kusurların, Ga boşluklarının neden olduğu akseptör benzeri tuzakların, pil verimini azalttığı gözlemlenmiştir (Yoon ve ark. 2020). Bu nedenlerden dolayı, yapı içerisindeki kusurların tanımlanması ve anlaşılması büyük önem arz etmektedir.

Yapı içerisindeki kusurları belirlemek ve karakterize etmek için pek çok teknik kullanılmaktadır. GaN p-i-n diyotun elektriksel ve optik analizi için, akım-gerilim (Cao ve ark. 2003; N. A. Kuruoğlu ve ark. 2017; Yang ve ark. 2014), admitans spektroskopisi (N. A. Kuruoğlu ve ark. 2017), derin seviye geçiş spektroskopisi (Lee ve ark. 2017), fotoiletkenlik, fotolüminesans ve elektrolüminesans (EL) ölçüm teknikleri kullanılmaktadır (Belahsene ve ark. 2015; Bozkurt ve ark. 2019; Shan ve ark. 2017; W. J. Wang ve ark. 2013). Akım-gerilim ölçümleriyle yük taşıyıcılarının mobilitesi belirlenmektedir (Berleb and Brütting 2002; Blom ve ark. 1998). Böylece aktivasyon enerjisi değeri hesaplanarak kusur seviyelerinin tanımlanması mümkündür (Ayarıcı ve ark. 2016). Bu konuda pek çok çalışma olmasına rağmen, GaN'taki kusurların araştırılması üzerine çalışmalar halen devam etmektedir (M. A. Reshchikov ve ark. 2018). Özellikle, MBE, MOCVD ve HVPE gibi farklı büyütme teknikleriyle

üretilen GaN yapılarında gözlenen YL uzun zamandır tartışılmaktadır (Michael A. Reshchikov and Morko 2005).

Bu makalede, betavoltaik pil için son teknoloji ürünlerinden olan GaN p-i-n (Munson ve ark. 2018) yapının yüzey morfolojisinin analizi, yapı içerisindeki elementlerin tayini ve elektronik, optoelektronik karakterizasyonu hakkındaki analizler yer almaktadır. Bu analizler ile, GaN p-i-n yapı içerisinde, betavoltaik pil verimini azaltan kusur seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla mevcut GaN p-i-n yapının sıcaklığa bağlı akım yoğunluğu (J)- gerilim (V) ölçümlerinden yararlanılarak sıfır alan mobilitesi hesaplanmış ve bu parametrenin sıcaklığa bağımlılığıyla termal enerji aralığı belirlenmiştir. Belirlenen bu kusur seviyesi, EL ölçümü ile desteklenmiştir.

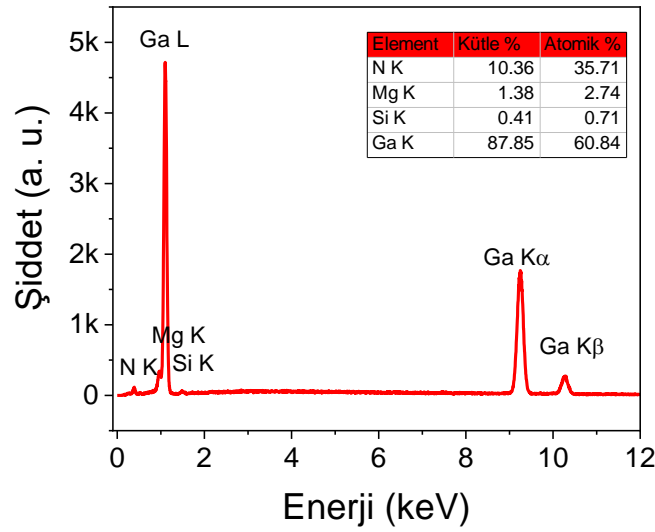
MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, MOCVD tekniği ile büyütülmüş GaN p-i-n eklem kullanılmıştır. Mevcut yapının, p-i-n katmanların kalınlıkları sırasıyla 0.27 μm , 0.6 μm ve 1 μm 'dir. p katmanı $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ konsantrasyonuyla Mg ve n katmanı $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ konsantrasyonunda silisyum (Si) katkılanmıştır. n tipi GaN'a 20/20 nm kalınlığında paladyum(Pd)/altın(Au) ve p tipi GaN'a 10 nm/30 nm/300 nm kalınlığında titanyum (Ti)/alüminyum (Al) /Au kaplanarak, 4*4 mm² kontak alanına sahip numune elektriksel özellikleri incelemek için hazır hale getirilmiştir (N. A. Kuruoğlu ve ark. 2017; Munson ve ark. 2018).GaN p-i-n yapının yüzey morfolojisinin belirlenmesi için FEI Versa 3D ile SEM ve Park System XE-110 ile AFM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca, GaN p-i-n yapının büyüme esnasında, kaplama oranlarının deneysel olarak belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu'na (SEM) eklenmiş EDAX, Octane Super SDD ile enerji dağılımlı X ışını spektroskopisi (EDS) ölçümü gerçekleştirilmiştir. GaN tabanlı p-i-n yapının elektriksel ve optoelektronik özelliklerini incelemek için, numune Janis Kreostat içerisinde yerleştirildi. Sonrasında numune ortam sıcaklığı oda sıcaklığından başlayarak 20 K aralıklarla Lake Shore 334 model sıcaklık kontrolcüsüyle 300-400 K aralığında değiştirildi. Böylece, sıcaklığa bağlı akım gerilim ölçümü, 0-10 V düz besleme geriliminde Keithley 2400 kaynak ölçer ile gerçekleştirildi. EL ölçümünde ise, Keithley 2400 kaynak ölçer ile örneğe gerilim/akım uygulanmış, yayılan spektrum fiber kablo bağlantılı Ocean Optics 2000+ spektrometre ile kaydedilmiştir

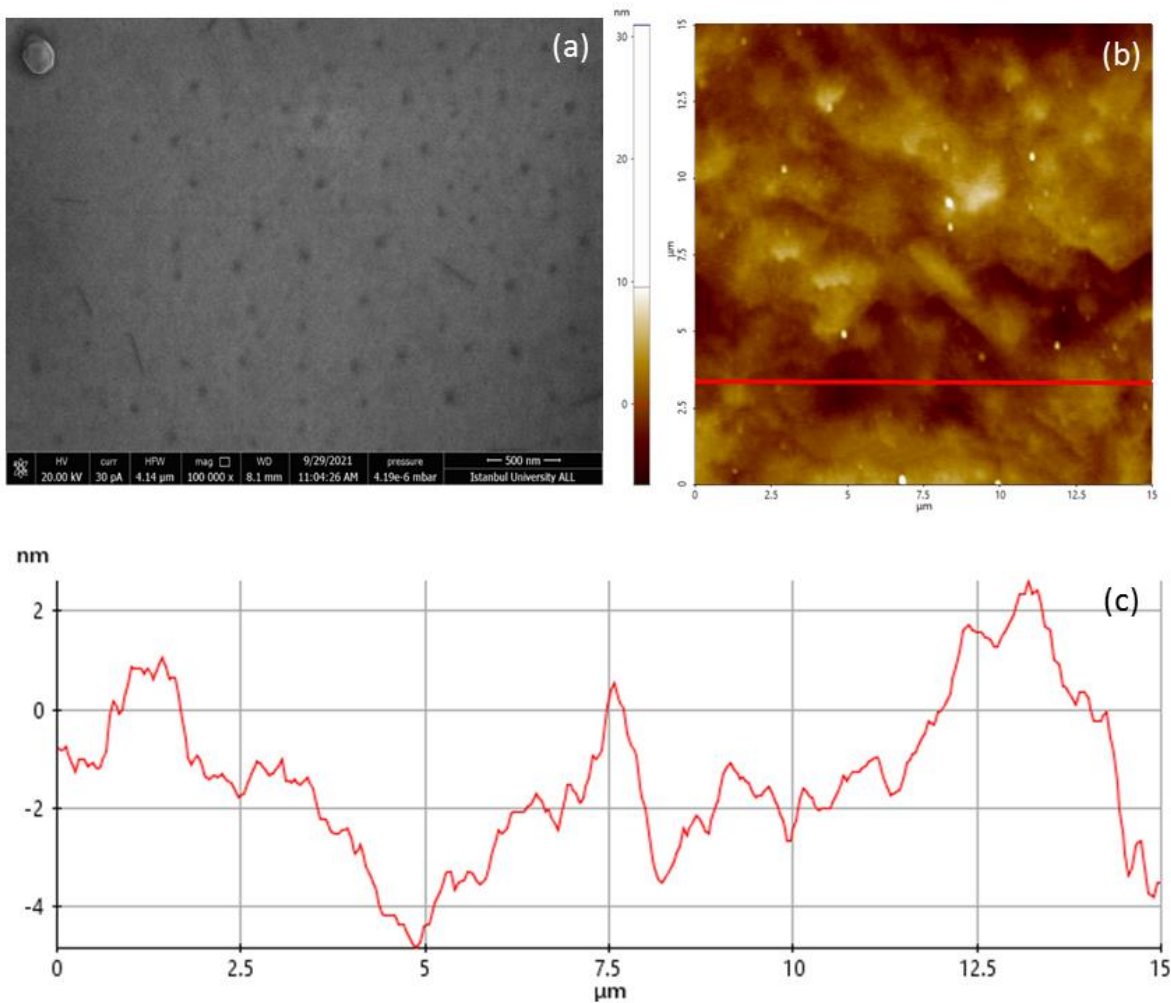
BULGULAR VE TARTIŞMA

GaN p-i-n yapının p-GaN'ın üst yüzeyinden alınan EDS spektrumu Şekil 1'de gösterildiği gibidir. EDS spektrumu GaN p-i-n yapının Ga, N, Mg ve Si ana elementlerini içerdiğini göstermektedir. gözlenen elementlerin atomik ve kütle yüzdeleri Şekil 1 içerisinde gösterilmiştir. EDS spektrumunda, Ga:N oranı, %60:%36 olarak saptanmıştır. Ayrıca, GaN p-i-n yapının toplam hacmi içerisinde, p ve n katmanlarının sahip olduğu katkı atomlarının Ga ve N elementlerine göre daha az bulunması sebebiyle, EDS analizinde Şekil 1'de görüldüğü üzere, görece zayıf Si ve Mg pikleri gözlenmiştir.

GaN p-i-n yapının p-GaN tabakasının üst yüzeyinden alınmış SEM, AFM görüntüleri ve AFM görüntüsünden elde edilen yüzey kesit profili Şekil 2'de gösterildiği gibidir. AFM görüntüleri incelendiğinde, 15×15 μm^2 tarama alanında oldukça düzgün süreklilik gösterdiği ve literatürle (Ke ve ark. 2012) uyumlu olarak, 1.2 nm Ra değerine sahip olduğu görülmüştür.

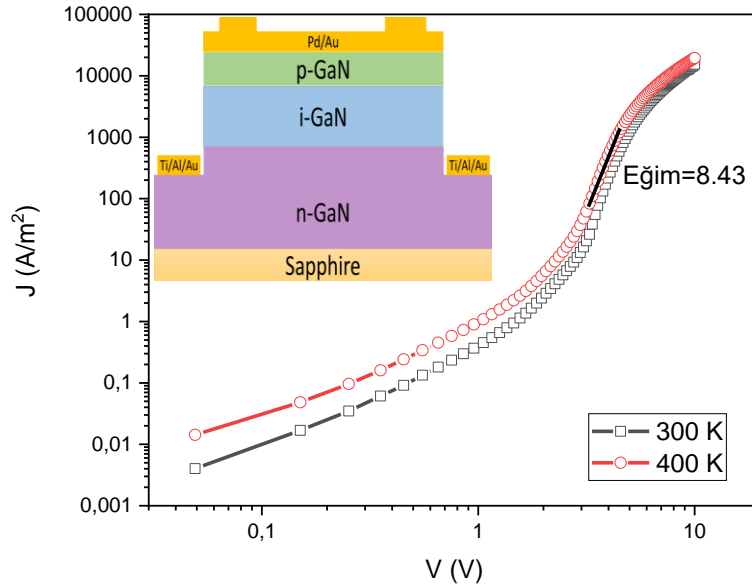


Şekil 1. GaN p-i-n yapının EDS spektrumu.



Şekil 2. MOCVD ile büyütülen GaN p-i-n yapının p-GaN üst yüzeyinden alınan (a) SEM görüntüsü (b) AFM görüntüsü ve (c) AFM görüntüsünden elde edilen yüzey kesit profili.

GaN p-i-n yapı için, oda sıcaklığında, karanlık ortam içerisinde akım yoğunluğunun, düz besleme gerilimi ile değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Yüksek düz besleme gerilimlerinde ($V > 5$ V), şekilde görüldüğü üzere, akım yoğunluğunun gerilimin kuvveti ile orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Akım yoğunluğunu ve gerilim arasında, şekilde gösterildiği üzere, $J=KV^m$, $m>2$ güç bağıntısının geçerli olması, bu bölgede uzay sınırlamalı akım iletim mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir (Gonzalez 2015; Lampert and Mark 1970).



Şekil 3. GaN p-i-n yapının akım yoğunluğunun düz besleme gerilimi ile değişimi.

Tek taşıyıcı için uzay yük sınırlamalı akım yoğunluğu,

$$J = \frac{9}{8} \mu \frac{E^2}{L} \quad (1)$$

ile verilir (Blom ve ark. 1998; Gill 1972; Martens, Brom, and Blom 1999; Novikov ve ark. 1998). Burada, J akım yoğunluğu, E elektrik alan, L malzeme kalınlığı, μ mobilitedir. Mobilitenin Poole Frenkel türünde olması durumunda, $\mu(E)$ ilişkisi

$$\mu = \mu_0 e^{\gamma \sqrt{E}} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada γ elektrik alan katsayısı, μ_0 ise sıfır alan katsayısıdır. Denklem (1)-(2) kullanılarak elde edilen J/E^2 - $E^{1/2}$ grafiği, sıcaklığa bağlı olarak, Şekil 4'de gösterilmiştir. J-V grafiğinde eğimin 8.3 olarak gösterildiği bölgeye karşılık gelen uzay yük sınırlamalı bölge, $E^{1/2}$ - J/E^2 grafiğinde, $E^{1/2}$ 'nin 2400-2800 $V^{1/2}m^{-1/2}$ aralığına karşılık gelmektedir. $E^{1/2}$ - J/E^2 grafiğinde, uzay yükü sınırlamalı bölgedeki doğrunun eğiminden μ_0 sıfır alan katsayısı, eksenini kestiği noktadan ise γ elektrik alan katsayısı elde edilmiştir. μ^* mobilite ön katsayısı, Δ termal enerji aralığı, k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık, B ve T_0 sabit elektrik alan katsayısı olmak üzere, μ_0 sıfır alan katsayısı

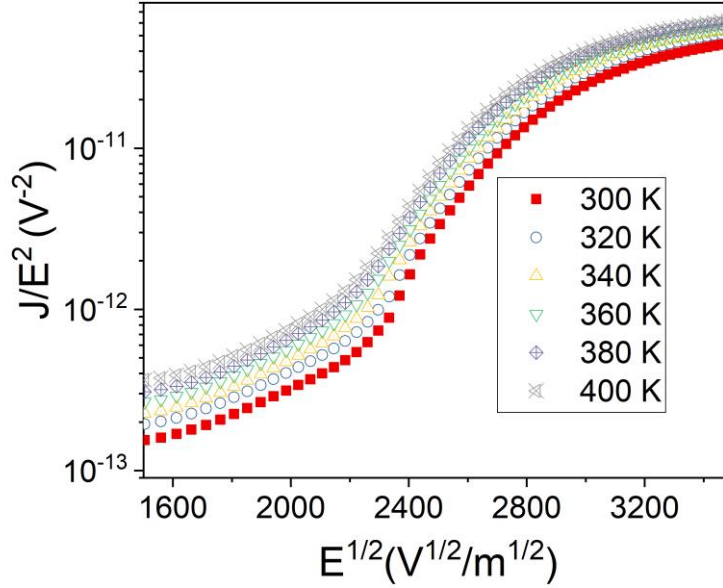
$$\mu_0 = \mu^* e^{-\frac{\Delta}{k_B T}} \quad (3)$$

ve γ elektrik alan katsayısı,

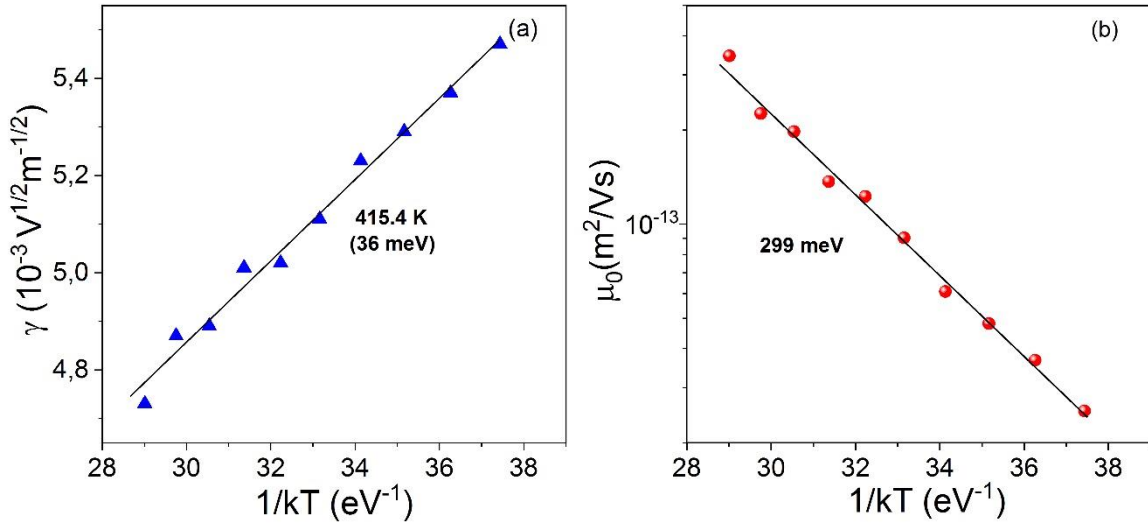
$$\gamma = B \left(\frac{1}{k_B T} - \frac{1}{k_B T_0} \right) \quad (4)$$

denklemleri ile ifade edilir (Blom ve ark. 1998; Gill 1972; Martens, Brom, and Blom 1999; Novikov ve ark. 1998).

$E^{1/2}$ - J/E^2 grafiğinde doğru eğiminin ve eksenini kestiği noktadan hesaplanan sıfır alan mobilitesinin sıcaklığa bağlı değişimi, sırasıyla, Şekil 5a ve Şekil 5b’de gösterilmiştir. Denklem (3)-(4) kullanılarak, doğru eğiminin sıcaklığa bağlılığından T_0 sabiti 415 K (36 meV) ve sıfır alan mobilitesinin sıcaklığa bağlılığından Δ termal enerji aralığı 0.299 eV olarak elde edilmiştir.

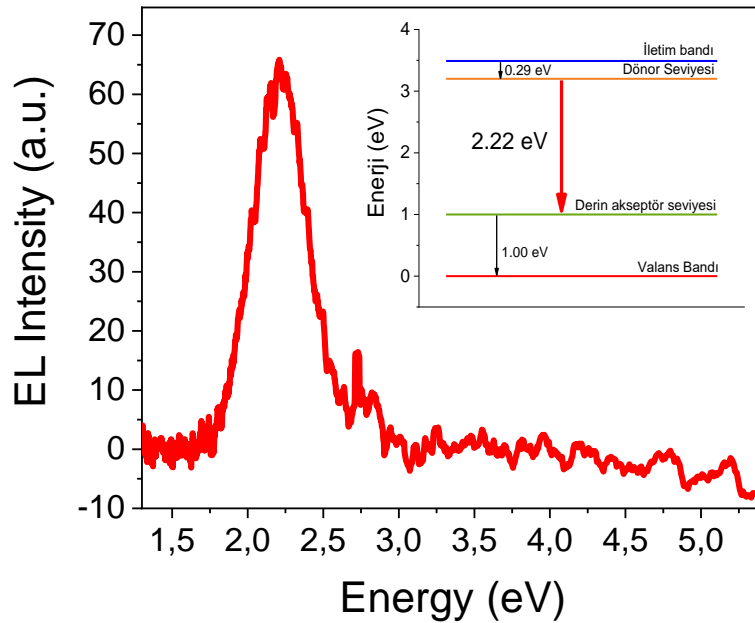


Şekil 4. GaN tabanlı p-i-n yapı için düz besleme gerilimi altında sıcaklığa bağlı $E^{1/2}$ - J/E^2 grafiği.



Şekil 5. GaN tabanlı p-i-n yapıda düz besleme gerilimi altında (a) γ elektrik alan katsayısı ve (b) μ_0 'ın sıcaklığa bağlı değişimi.

GaN p-i-n yapının oda sıcaklığında, 50 meV enjeksiyon akımı altında EL ölçümü alınmıştır. Şekil 6’da gösterildiği gibi, numuneden oda sıcaklığında keskin ve parlak YL çıkışı gözlenmiştir. EL spektrumunun tepe noktası 2.2 eV’a karşılık gelmektedir. 2.2 eV enerjili bu pik değeri, literatürde (Arifin, Subagio, ve ark. 2020), MOCVD ile büyütülmüş Mg katkılı GaN yapılar için önerilen alıcı verici ve rekombinasyon seviyelerinden, valans bandının 1 eV üzerindeki derin akseptör seviyesi ve iletim bandının 0.299 eV üzerindeki donör seviyesi arasındaki geçişe karşılık gelmektedir (Arifin, Subagio, ve ark. 2020) ve Şekil 6 içerisinde ek olarak bu geçiş gösterilmiştir.



Şekil 6. GaN tabanlı p-i-n yapının oda sıcaklığında 50 mA enjeksiyon akımı altında EL spektrumu.

SONUÇ

GaN p-i-n yapı sabit sıcaklıklarda akım yoğunluğunu düz besleme voltajı bağılılığı ile incelenmiştir. Yüksek düz besleme bölgesinde, uzay yük sınırlamalı akım iletim mekanizması tanımlanmış ve taşıyıcılarının mobilitesi akım ölçümleriyle belirlenmiştir. Mobilitenin sıcaklığa bağılılığı ile aktivasyon enerjisi 0.299 eV olarak bulunmuştur. Elde edilen bu aktivasyon enerjisi EL ölçümünde gözlenen 2.2 eV pik değerindeki YL ışınmasında rol aldığı anlaşılmıştır. Belirlenen bu kusur varlığı, betavoltaik uygulamalar için kullanılan p-i-n yapının verim düşünü açıklar niteliktedir.

TEŞEKKÜR

Örnek üretimi ve litografi işlemleri Fransa, Fransa Ulusal Bilimsel Araştırma Merkezi (CNRS) Fotonik ve Nanoyapılar Laboratuvarı (LPN)'de Prof. Dr. Abderrahim Ramdane ve grubu tarafından gerçekleştirilmiştir. SEM, AFM ve EDS ölçümleri için İstanbul üniversitesi Nano ve Optoelektronik araştırma laboratuvarı olanaklarını kullanmamı sağlayan Prof. Dr. Ayşe Erol'a ve ölçümleri gerçekleştiren Dr. Öğr. Üyesi Furkan Kuruoğlu'na çok teşekkürlerimi sunarım. Çalışma içerisindeki çok değerli yorumları ve desteği için Prof. Dr. Orhan Özdemir'e içtenlikle teşekkür ederim

Çıkar Çatışması

Makalenin planlanması, yürütülmesi ve yazılması sırasında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

Yazar Katkısı

Makalenin planlanmasının, yürütülmesinin ve yazılmasının makalenin tek yazarı olarak tarafımdan yapıldığını beyan ederim.

KAYNAKLAR

- Amano H, 2016. Development of GaN-Based Blue LEDs, Metalorganic Vapor Phase Epitaxy of GaN, Related Materials. *Progress in Crystal Growth, Characterization of Materials*, 62 (2): 126-135.
- Arifin P, Sugianto, Subagio A, Sutanto H, Dwiputra D, Florena F F, Keintjem A C, Khaeroni R, 2020. Room-Temperature Photoluminescence of Mg-Doped GaN Thin Films Grown by Plasma-Assisted MOCVD. *AIP Advances*, 10: 045123.
- Avrutin V, Silversmith D J, Mori Y, Kawamura F, Kitaoka Y, Morkoc H, 2010. Growth of Bulk GaN, AlN: Progress, Challenges. In *Proceedings of the IEEE*, 98 (7): 1302–1315.
- Ayarcı N, Özdemir O, Bozkurt K, Ramdane A, Belahsene S, Martinez A, 2016. Discrimination of Carrier Conduction Mechanisms of InP/InGaAsP/InAs/InP Laser Structure Through J–V–T Measurements. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63 (5): 1866–1870.
- Ayarcı Kuruoğlu N, Özdemir O, Bozkurt K, Sundaram S, Salvestrini, J-P, Ougazzaden, A. Gaimard Q, Belahsene S. Merghem K, Ramdane A, 2017. Dc, Ac Electrical Response of MOCVD Grown GaN in P-i-n Structure, Assessed through I – V, Admittance Measurement. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50 (50): 505109.
- Ayarcı Kuruoğlu N, Özdemir O, Bozkurt K, 2017. Betavoltaic Study of a GaN pin Structure Grown by Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy with a Ni-63 Source. *Thin Solid Films*, 636: 746-750.
- Belahsene S, Al Saqri N.A, Jameel D, Mesli A, Martinez A, De Sanoit J, Ougazzaden A, Salvestrini J P, Ramdane A, Henini M, 2015. Analysis of Deep Level Defects in GaN P-i-n Diodes after Beta Particle Irradiation. *Electronics*, 4 (4): 1090–1100.
- Berleb S, Wolfgang B, 2002. Dispersive Electron Transport in tris(8-Hydroxyquinoline) Aluminum (Alq₃) Probed by Impedance Spectroscopy. *Physical review letters*, 89 (28): 286601.
- Blom P W M, Vissenberg, M C J M, 1998. Dispersive Hole Transport in Poly (p -Phenylene Vinylene). *Physical review letters*, 80 (17): 3819–22.
- Bozkurt K, Özdemir Ö, Ayarcı Kuruoğlu N, Alshehri B, Dogheche K, Gaimard Q, Ramdane A, Dogheche E, 2019. Impact of Trap States on Inductive Phenomena in 30% InGaN/GaN MQW LED Devices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52 (10): 105102.
- Cao X A, Sandvik P M, LeBoeuf S F, Arthur S D, 2003. Defect Generation in InGaN/GaN Light-Emitting Diodes under Forward, Reverse Electrical Stresses. *Microelectronics Reliability*, 43 (12): 1987–91.
- Chichibu S F, Shima K, Kojima K, Ishibashi S, Uedono A, 2020. Origin, Dynamic Properties of Major Intrinsic Nonradiative Recombination Centers in Wide Bandgap Nitride. *Semiconductors*, 11280 (10): 112800B.
- Dreyer C E, Alkauskas A, Lyons J L, Speck J S, Van de Walle C G, 2016. Gallium Vacancy Complexes as a Cause of Shockley-Read-Hall Recombination in III-Nitride Light Emitters. *Applied Physics Letters*, 108: 141101.
- Gill W D, 1972. Drift Mobilities in Amorphous Charge-transfer Complexes of Trinitrofluorenone, Poly-n-vinylcarbazole. *Journal of Applied Physics*, 43(12): 5033.
- Gonzalez G, 2015. Quantum Theory of Space Charge Limited Current in Solids. *Journal of Applied Physics*, 117 (8): 22–25.
- Kaufmann U, Kunzer M, Maier M, Obloh H, Ramakrishnan A, Santic B, Schlotter P, 1998. Nature of the 2.8 eV Photoluminescence B, in Mg Doped GaN. *Applied Physics Letters*, 72: 1326-1328.
- Ke W-C, Jian S R, Chen I C, Jang J S-C, Chen W-K, Juang J-Y, 2012. Influence of Mg-containing precursor flow rate on the structural, electrical and mechanical properties of Mg-doped GaN thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 136 (2-3): 796–801
- Lampert M A, Mark P, 1970. Current Injection in Solids Current Injection in Solids. *Semiconductors and Semimetals*, Elsevier, 6: 1-96.

- Lee I-H, Polyakov A Y, Smirnov N B, Zinovyev R A, Bae K-B, Chung T-H, Hwang S-M, Baek J-H, Pearton S-J, 2017. Changes in Electron , Hole Traps in GaN-Based Light Emitting Diodes from near-UV to Green Spectral Ranges. *Applied Physics Letters*, 110 (19): 192107.
- Liu L, Edgar J H, 2002. Substrates for Gallium Nitride Epitaxy. *Materials Science, Engineering: R: Reports*, 37 (3): 61–127.
- Martens H, Brom H, Blom P, 1999. Frequency-Dependent Electrical Response of Holes in Poly(p-Phenylene Vinylene). *Physical Review B*, 60 (12): R8489--R8492.
- Maruska H P, Stevenson D A, 1973. Violet Luminescence of Mg-Doped GaN. *Applied Physics Letters*, 22: 303.
- Maruska H P, Tietjen J J, 1969. The Preparation, Properties of Vapor-Deposited Single-Crystal-Line GaN. *Applied Physics Letters*, 15: 327.
- Munson C E, Gaimard Q, Merghem K, Sundaram S, Rogers D J, Sanoit J, Voss P L, Ramdane A, Salvestrini J P, Ougazzaden A, 2018. Modeling, Design, Fabrication, Experimentation of a GaN-Based, 63Ni Betavoltaic Battery. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51: 035101.
- Murayama M, Nakayama Y, Yamazaki K, Hoshina Y, Watanabe H, Fuutagawa N, Kawanishi H, Uemura T, Narui H, 2018. Watt-Class Green (530 nm) , Blue (465 nm) Laser Diodes. *Physica Status Solidi (A) Applications, Materials Science* 215 (10): 1700513.
- Nakamura S, 1998. The Roles of Structural Imperfections in InGaN-Based Blue Light-Emitting Diodes, *Laser Diodes. Science*, 281 (5379): 956–61.
- Nakano Y, Takashi J, 2002. Electrical Characterization of Acceptor Levels in Mg-Doped GaN. *Journal of Applied Physics*, 92: 5590.
- Narayanan V, Lorenz K, Kim W, Mahajan S, 2002. Gallium Nitride Epitaxy on (0001) Sapphire. *Philosophical Magazine A*, 82 (5): 885–912.
- Ning X J, Chien, F R, Pirouz P, Yang J W, Khan M A, 1996. Growth Defects in GaN Films on Sapphire: The Probable Origin of Threading Dislocations. *Journal of Materials Research*, 11 (3): 580–92.
- Novikov S V, Dunlap D H, Kenkre V M, Parris P E, Vannikov A V, 1998. Essential Role of Correlations in Governing Charge Transport in Disordered Organic Materials. *Physical Review Letters*, 81 (20): 4472–75.
- O’Hanlon T J, Zhu T, Massabuau F C P, Oliver R A. 2021. Dislocations at Coalescence Boundaries in Heteroepitaxial GaN/Sapphire Studied after the Epitaxial Layer Has Completely Coalesced. *Ultramicroscopy*, 113258.
- Oh E, Park H, Park Y, 1998. Excitation Density Dependence of Photoluminescence in GaN:Mg. *Applied Physics Letters*, 72: 70.
- Pimputkar S, Speck J S, DenBaars S P, Nakamura S, 2009. Prospects for LED Lighting. *Nat Photonics*, 3 (4): 180–82.
- Reshchikov M A, Albarakati N M, Monavarian M, Avrutin V, Morkoç H, 2018. Thermal Quenching of the Yellow Luminescence in GaN. *Journal of Applied Physics*, 123: 161520
- Reshchikov M A, Morkoç H, 2006. Luminescence from Defects in GaN. In *Physica B: Condensed Matter*, 376-377: 428-431.
- Reshchikov M A, Morkoç H, 2005. Luminescence Properties of Defects in GaN. *Journal of Applied Physics*, 97: 061301
- Shan L-W, Liu Z-Y, Lin M-P, Yu C-J, Hsieh K-C, Wu M-C, 2017. Electrical Analyses of GaN PIN Diodes Grown on Patterned Sapphire Substrates. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 35: 052203.
- Sheremet V, Gheshlaghi N, Sözen M, Elçi M, Sheremet N, Aydınlı A, Altuntaş I, Ding K, Avrutin V, Özgür Ü, Morkoç H, 2018. InGaN Stress Compensation Layers in InGaN/GaN Blue LEDs with Step Graded Electron Injectors. *Superlattices and Microstructures*, 116: 253-261.

- Walker D, Saxler A, Kung P, Zhang X, Hamilton M, Diaz J, Razeghi M, 1998. Visible-Blind GaN PIN Photodiodes. *Applied Physics Letters*, 72 (25): 366–67.
- Soh C B, Chua S J, Lim H F, Chi D Z, Tripathy S, Liu W, 2004. Assignment of Deep Levels Causing Yellow Luminescence in GaN. *Journal of Applied Physics*, 96: 1341.
- Sui Y P, Guang H Y, 2011. Effect of Mg Doping on the Photoluminescence of GaN:Mg Films by Radio-Frequency Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy. *Chinese Physics Letters*, 28 (6): 067807.
- Tan S, 2020. GaN-Based LEDs Using Homo-Epitaxial Technology, the Progress, Challenges of HVPE Method. *IOP Conference Series: Materials Science, Engineering*, 729: 012004.
- Usami S, Miyagoshi R, Tanaka A, Nagamatsu K, Kushimoto M, Deki M, Nitta S, Honda Y, Amano H, 2017. Effect of Dislocations on the Growth of P-Type GaN, on the Characteristics of p-n Diodes. *Physica Status Solidi (A)*, 214: 1600837
- Ves S, Venkateswaran U D, Loa I, Syassen K, 2000. Pressure Dependence of the Blue Luminescence in Mg-Doped GaN. *Applied Physics Letters*, 77: 2536.
- Wang W, Liao C, Chang Y, Lee Y, Ho C, Wu M, 2013. DLTS Analyses of GaN P-i-n Diodes Grown on Conventional, Patterned Sapphire Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 34 (11): 1376-1378.
- Wang Y, Huynh K, Liao ME, Yu H, Bai T, Tweedie J, Breckenridge M H, Collazo R, Sitar Z, Bockowski M, Liu Y, Goorsky M S, 2020. Strain Recovery, Defect Characterization in Mg-Implanted Homoepitaxial GaN on High-Quality GaN Substrates. *Physica Status Solidi (B) Basic Research*, 257 (4): 1900705.
- Yang W, Li D, He J, Wang C, Hu X, 2014. Temperature-dependent Ac Current-voltage-capacitance Characteristics of GaN-based Light-emitting Diodes under High Forward Bias. *Physica Status Solidi C*, 11 (3-4): 714–17.
- Yoon Y J, Lee J S, Kang I M, Lee J H, Kim D S, 2020. Design, Analysis of Gallium Nitride-Based p-i-n Diode Structure for Betavoltaic Cell with Enhanced Output Power Density. *Micromachines*, 11: 1100.
- Zhang H, Shih C-W, Martin D, Caut A, Carlin J-F, Butté R, Grandjean N, 2019. Short Cavity InGaN-Based Laser Diodes with Cavity Length below 300 μm . *Semiconductor Science, Technology*, 34: 085005.