

Atf İçin: Asıl Uğurlu H, 2022. Ti/ p-GaN Schottky Diyotunun Elektriksel Parametrelerinin İncelenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2): 752-760.

To Cite: Asıl Uğurlu H, 2022. Investigation of Electrical Parameters of Ti/ p-GaN Schottky Diode. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(2): 752-760.

Ti/ p-GaN Schottky Diyotunun Elektriksel Parametrelerinin İncelenmesi

Hatice ASIL UĞURLU^{1*}

ÖZET: Ti/p-GaN Schottky diyotunun elektriksel özellikleri araştırıldı. İdealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi temel diyot parametreleri akım-gerilim ($I-V$) karakteristiği özelliklerinden faydalanarak geleneksel $I-V$ yöntemi, Cheung fonksiyonları ve Norde yöntemi ile incelendi. İdealite faktörü (n) $I-V$ yönteminde 1.62 ve Cheung fonksiyonlarından 3.54 olarak hesaplandı. Farklı yöntemlerden hesaplanan engel yüksekliği (Φ_b) değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu bulundu. Ti / p-GaN Schottky diyotunun hesaplanan seri direnç (R_s) değerleri de kohm mertebesinde olduğu görüldü. Ti/p-GaN Schottky diyotunun arayüzey durum yoğunluğunun büyüklüğü $6.35 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $3.48 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değiştiği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, engel yüksekliği, Norde yöntemi, Cheung fonksiyonları, $I-V$ yöntem

Investigation of Electrical Parameters of Ti/ p-GaN Schottky Diode

ABSTRACT: The electrical properties of the Ti/p-GaN Schottky diode were investigated. Fundamental diode parameters such as ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) were analyzed using the traditional $I-V$ method, Cheung functions and Norde method by utilizing current-voltage ($I-V$) characteristics. The ideality factor (n) was calculated as 1.62 in the $I-V$ method and 3.54 from the Cheung functions. It was found that the barrier height (Φ_b) values calculated from different methods were close to each other. The calculated serial resistance (R_s) values of the Ti / p-GaN Schottky diode were also found to be of the order of kohm. The magnitude of the interface state density of the Ti/p-GaN Schottky diode was determined to vary between $6.35 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ and $3.48 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$.

Keywords: Schottky diode, barrier height, Norde method, Cheung functions, $I-V$ method

¹Hatice ASIL UĞURLU ([Orcid ID: 0000-0002-1114-3627](https://orcid.org/0000-0002-1114-3627)) Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta OSB Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hatice ASIL UĞURLU, e-mail: haticeasil@isparta.edu.tr

Makalenin bir kısmı (seri direnç kısmı) 26-28 Temmuz 2021 tarihlerinde online düzenlenen “6. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi”nde (UBCAK)” özet bildiri olarak sunulmuştur.

GİRİŞ

Günümüzde, geniş bant aralıklı yarı iletken malzemeler, yüksek enerji verimliliğine sahip yeni nesil güç elektroniği cihazları ve optoelektronik cihazları için en iyi aday olarak kabul edilmektedir. Özellikle galyum nitrid (GaN), metal-yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET), yüksek elektron hareketlilik transistörleri (HEMT'ler) (Zhou ve ark., 2021), morötesi ışık yayan cihazlar (Deng ve ark., 2020), güneş pilleri (Saron ve ark. 2021), heteroeklemler (Asıl ve ark., 2009) ve Schottky doğrultucular (Pearson ve ark., 2001) gibi yüksek güçlü, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren ve yüksek frekanslı elektronik cihazların geliştirilmesi için geniş bant aralıklı yarıiletkenler arasında gelecek vaat eden yarıiletken malzemelerden biridir.

Cihaz performansını iyileştirmek için metal/p-GaN Schottky diyotlarının elektriksel özelliklerinin analizi ile ilgili birçok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Fukushima ve ark. (2015), p-GaN yarıiletkeni üzerinde nadir toprak metalleri Dy, Er ve Gd ile Schottky kontaklarını üretmiş ve Schottky bariyer yükseklikleri değerlerini $I-V$ ölçümlerinden sırasıyla 1.91 eV, 2.38 eV ve 2.16 eV ve kapasite-gerilim ($C-V$) ölçümlerinden 1.79 eV, 1.78 eV ve 1.70 eV olduğunu belirlemişlerdir. Tan ve ark. (2006), 27-100 °C sıcaklık aralığında akım-gerilim-sıcaklık ($I-V-T$) ölçümleri ile p-GaN yarıiletkeni üzerindeki Zr, Ti, Cr ve Pt Schottky kontaklarının elektriksel özelliklerini araştırmış ve oda sıcaklığında idealite faktörlerini sırasıyla 2.28, 1.82, 1.51 ve 2.63 olarak bulmuşlardır. Schottky bariyer yükseklikleri değerlerini de 0.84 eV, 0.82 eV, 0.77 eV ve 0.41 eV olarak Norde metodunu kullanarak hesaplamışlardır. Kim ve Lee (2005), bir Ti/Al/p-GaN Schottky bariyer diyotunun elektriksel özelliklerini araştırmışlar ve 1.5 kHz'deki $C-V$ ölçümlerini kullanarak 300 K'da 1.43 eV ve 500 K'da 1.41 eV bariyer yükseklikleri değerlerini bulmuşlardır.

Nagaraju ve ark. (2015), Ti/p-GaN/Ni/Au Schottky diyotunun elektriksel, yapısal ve yüzey morfolojik özellikleri üzerinde hızlı termal tavlama etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmada Norde yöntemi ve Cheung fonksiyonlarını kullanarak, Ti/p-GaN Schottky diyotunun seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü değerlerini çeşitli tavlama sıcaklıklarında (200 °C, 300 °C ve 400 °C) hesaplamışlardır. Deneysel olarak bulunan elektriksel parametrelerin Ti/p-GaN diyotunun arayüzey mikro yapısı ile ilişkili olduğunu ve tavlama nedeniyle Ti/p-GaN diyotunun engel yüksekliğindeki artış veya azalmayı arayüzeyde Ti-N ve Ga-Ti arayüzey fazlarının oluşumundan olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Metal-yarıiletken diyotlar elektronik cihazların önemli bir yönü olduğu için ve GaN-tabanlı cihazların elektronik özelliklerinin optimizasyonu, kararlı ve güvenilir omik ve Schottky diyotların detaylandırılmasını gerektirir. Metal-yarıiletken arayüzeyinin $I-V$ ve $C-V$ karakteristiği, yarı iletken malzemenin ve onun arayüzeyinin fiziksel ve elektriksel özellikleri hakkında çok fazla bilgi verir. Bu nedenle, elektriksel parametrelerin farklı yöntemlerle analizi, cihaz üretim teknolojisi için son derece gerekli olan akım taşıma mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına yol açmaktadır. $I-V$ yöntem (Rhoderick yöntemi) (Rhoderick ve Williams, 1988), Cheung yöntemi (Cheung ve Cheung, 1986) ve Norde yöntemi (Norde, 1979) gibi farklı yöntemlerle elektriksel parametrelerin çıkarılmasına yönelik çalışmalar oldukça önemlidir ve metal-yarıiletken Schottky arayüzeylerinin elektriksel özelliklerini daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur.

Bu çalışmada, yüksek engel yüksekliğine ve 1'e yakın idealite faktörüne sahip diyotun üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen Ti / p-GaN Schottky diyotunun elektriksel karakterizasyonu için $I-V$ ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Schottky diyotun, idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel parametreleri $I-V$, Cheung ve Norde yöntemleri yardımıyla hesaplanmıştır. Farklı yöntemlerden elde edilen diyot parametreleri karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Mg katkılı p -GaN/ Al_2O_3 yarıiletkeni alttaş malzemesi olarak kullanılmıştır. Yarıiletkenin taşıyıcı konsantrasyonu yaklaşık $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'tür. p -GaN yarıiletkenin temizliği 5 dk aseton, 5 dk metanol, 5 dk etanolda bekletilerek yapılmıştır ve her aşamada yarıiletken malzeme deiyonize su ile durulanmıştır. Metaller buharlaştırılmadan önce, doğal oksit tabakasını yok etmek için; önce $NH_4OH: H_2O = 1:20$ çözeltisi sonra da $HF: H_2O = 1:50$ çözeltisine daldırılmıştır. p - GaN yarıiletkeni düzlemsel yapıda olduğu için omik kontak, p -GaN yarıiletkenin yarısına Al metali buharlaştırılarak elde edilmiştir. p -GaN yarıiletkeninin yüzeyinin diğer yarısına Ti metali buharlaştırılarak Schottky kontak üretilmiştir. Üretilen diyotlar 1.00 mm çapında ve yaklaşık 1500 Å kalınlığındadır. Bütün buharlaştırma işlemleri yaklaşık 10^{-6} Torr basınç altında vakum kaplama ünitesinde gerçekleştirilmiştir. I-V ölçümleri Keithley 487 Picoammeter/Voltage kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'de oda sıcaklığında ve karanlıkta Ti/ p -GaN Schottky diyota ait düz ve ters beslem I-V karakteristiği verilmiştir. Termiyonik emisyon (TE) teorisine göre, akım ve gerilim arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir (Rhoderick ve Williams, 1988):

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V-IR_S)}{kT}\right)\right] \quad (1)$$

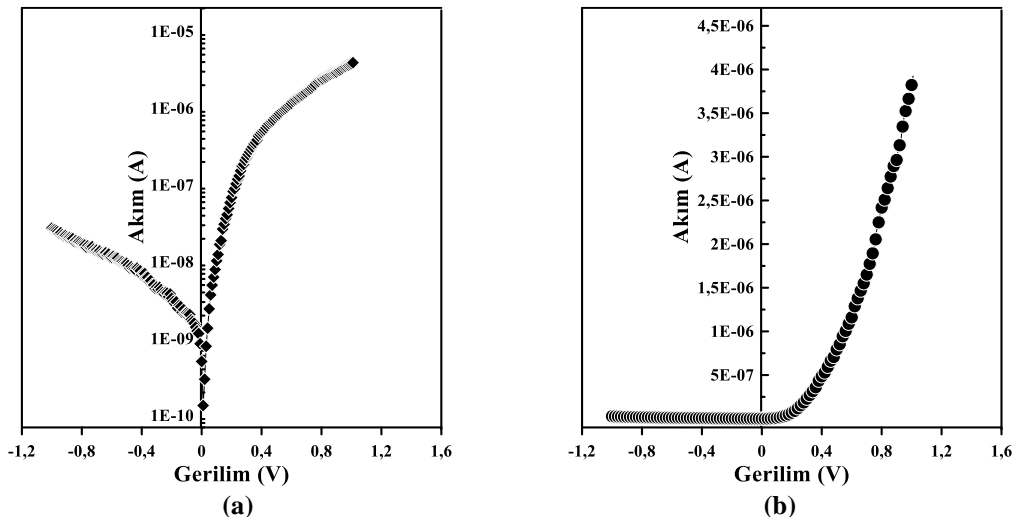
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2)$$

Burada; I_0 doyma akımı, q elektronun yükü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık, IR_S seri direnç (R_S) üzerindeki potansiyel düşmesi, A diyot alanı, A^* Richardson sabiti ve p -GaN için $103.8 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dir (Lin ve ark.,2008; Çınar ve ark., 2009), Φ_{b0} engel yüksekliği, n idealite faktörüdür. I_0 değeri $\ln(I)$ -V grafiğinin düz beslem kısmında $V=0$ da eksenini kestiği noktadan belirlenir. Eşitlik (2) tekrar yazılırsa sıfır beslem engel yüksekliği,

$$\Phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3)$$

eşitliği ile elde edilir. Eşitlik (1)'den idealite faktörü şu şekilde yazılabilir:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (4)$$

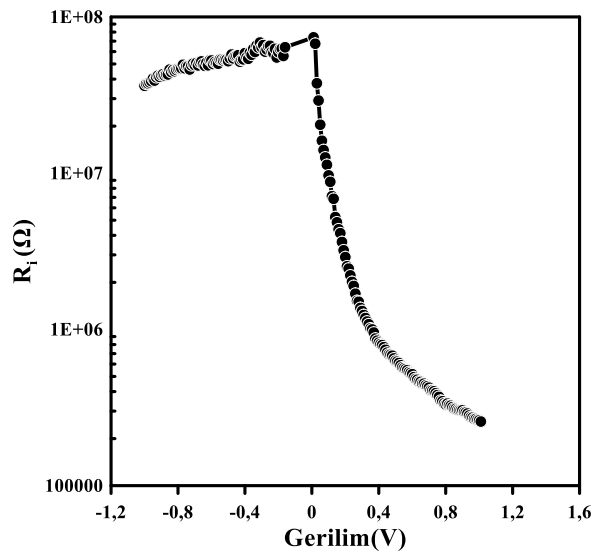


Şekil 1. Ti/ p -GaN Schottky diyotunun (a) yarılogaritmik (b) lineer I-V karakteristikleri

İdealite faktörü ve engel yüksekliğinin deneysel değerleri eşitlik (3) ve (4) kullanılarak belirlenmiştir ve Çizelge 1’de hesaplanan değerler verilmiştir. n ve Φ_b değerleri 1.62 ve 0.829 eV olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda Ti/p-GaN diyotu için n ve Φ_b değerleri 1.82 ve 0.77 eV (Tan ve ark. 2006), 1.65 ve 0.88 eV (Nagaraju ve ark. 2015) olarak bildirilmiştir. Hesaplanan n ve Φ_b değerleri literatürde bulunan değerlere yakındır. Aynı zamanda (Pt, Zr, Cr)/p-GaN (Tan ve ark. 2006), V/p-GaN (Padma ve ark. 2016) nadir toprak metalleri (Dy, Er, Gd)/p-GaN (Fukushima ve ark. 2009) gibi çeşitli metallerle de Schottky diyotlar oluşturulmuştur. Bu metallerle yapılan diyotların Φ_b değerleri hesapladığımız Φ_b değerleri ile uyumludur, ancak nadir toprak metalleri ile yapılan diyotların Φ_b değerleri bulduğumuz değerlerden daha büyüktür.

Lineer I-V karakteristiği kullanılarak çalışma voltajı bulunabilir. Şekil 1(b)’de verilen grafiğin düz beslem bölgesine lineer fit yapılarak x eksenini kestiği noktadan çalışma voltajı 0.452 V olarak belirlenmiştir. İdealite faktörünün yüksek değerinin arayüzey durumlarının, seri direncin ve arayüzey ince doğal oksit tabakasının etkilerinden ve metal-yarıiletken arayüzündeki bariyer homojensizliklerinden kaynaklandığı varsayılabilir (Asil ve ark., 2021).

Yüksek cihaz performansı için seri direnç mümkün olduğunca düşük ve şönt direnci (R_{sh}) yüksek olmalıdır. Ti/p-GaN diyotu için R_s ve R_{sh} değerleri Ohm Yasası kullanılarak I-V karakteristiğinden belirlenebilir. Şekil 2’de gösterildiği gibi I-V karakteristiği kullanılarak uygulanan gerilime karşılık yapının direnci ($R_i=dV_i/dI_i$) çizilerek bulunur. İdeal durumda, R_s ve R_{sh} değerleri sıfır ve 10^8 ’den büyük olmalıdır, ama gerçekte bu durum farklıdır (Çakıcı ve ark. 2015). Yeterince yüksek düz beslem bölgesi için yapının direnci (R_i), R_s ’nin gerçek değerine karşılık gelen sabit bir değere ve yeterince düşük ters beslem bölgesi için R_{sh} ’nin gerçek değerine karşılık gelir (Duman ve ark 2015; Çakıcı ve ark. 2015). I-V karakteristiğinden ve ohm kanunundan yararlanarak R_s değeri 257.23 k Ω ve R_{sh} değeri 36.25 M Ω olarak hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar literatür ile de uyumludur (Padma ve ark 2016). Ti/p-GaN diyotunun I-V karakteristiğinde görüldüğü üzere arayüzeyde bir potansiyel engeli vardır ve doğrultucu özellik göstermektedir (Güçlü ve ark., 2019; Tataroğlu, 2013). Doğrultma oranı ($RR= I_F/I_R$) 1 V’da ve ters ve düz beslem akımları arasındaki orandan 1.42×10^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Ti/p-GaN Schottky diyotunun Ohm kanunundan elde edilen direnç değerleri

Schottky diyotlarda akım iletimini etkileyen parametrelerden biri seri dirençtir. Literatürde Schottky diyotların seri direnç değerlerini hesaplamak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en

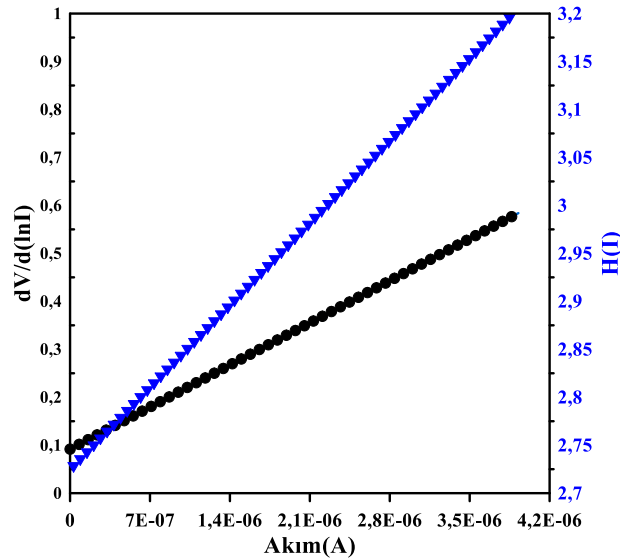
yaygın olanı Cheung yöntemidir (Cheung ve Cheung, 1986). Cheung yöntemi ile engel yüksekliği ve idealite faktörü de hesaplanabilir. Cheung fonksiyonları;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (5)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (6)$$

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir. Ti / p-GaN Schottky diyotu için $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ deneysel grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. $I-V$ karakteristiğinin yarılogaritmik düz beslem verileri, eşitlik (5) kullanılarak tekrar bir grafik elde edilir ve bu grafik lineer değişim şeklindedir. Grafiğin y eksenini kestiği noktadan ve eğiminden n ve R_s değerleri bulunur. $H(I)$ ve I grafiklerinden de y eksenini kestiği noktadan ve eğiminden Φ_b ve R_s değerleri elde edilir. Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametrelerin değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. $dV/d(\ln I)$ ve $H(I) - I$ grafiklerinden hesaplanan seri direnç değerleri sırasıyla 125.35 k Ω ve 122.44 k Ω 'dur. Cheung fonksiyonları kullanılarak n ve Φ_b değerleri 3.54 ve 0.768 eV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Ti/p-GaN Schottky diyotun $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafiği

Engel yüksekliğini ve seri direnç değerlerini belirlemek için alternatif bir yöntem de Norde (Norde, 1979) yöntemidir. Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu şöyle yazılabilir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (8)$$

Burada γ ideallik faktörü n 'den büyük olan ilk tam sayıdır, $I(V)$, $I-V$ eğrisinden elde edilen akım değerleridir. Ti / p-GaN Schottky diyotu için $F(V)$ ile V 'nin grafiği Şekil 4'te gösterilmektedir. $F(V)-V$ eğrisinden, Schottky diyotunun Φ_b değeri eşitlik (9)'dan belirlenir.

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (9)$$

Ayrıca, bir Schottky diyotunun R_s ,

$$R_s = \frac{(\gamma-n)kT}{qI_{min}} \quad (10)$$

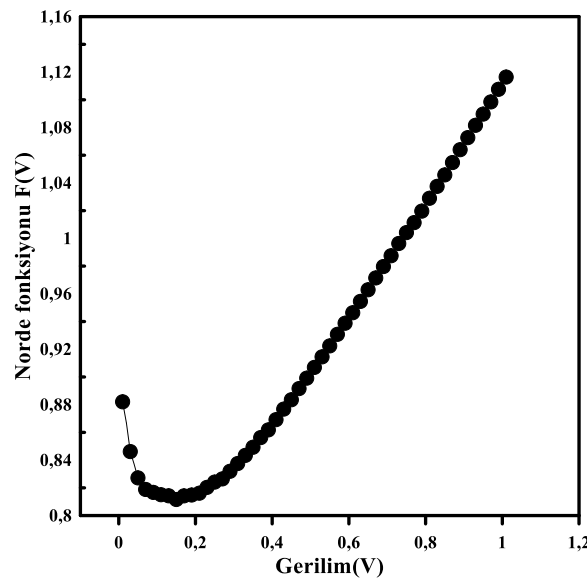
ifadesinden bulunabilir. $F(V)$ - V grafiğinin minimum noktasına karşılık gelen I_{min} ve V_{min} ve $F(V_{min})$ değerleri belirlenerek diyot parametreleri hesaplanmıştır.

R_s ve Φ_b parametreleri belirlenirken I - V yöntemden elde edilen n değeri kullanılmıştır. Modifiye edilmiş Norde fonksiyonlarına göre hesaplanan seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Çizelge 1'de gösterilmektedir. $F(V)$ - V grafiklerinden Φ_b ve R_s değerleri 0.866 eV ve 269.01 k Ω olarak hesaplanmıştır.

Farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan Φ_b değerleri arasında farklılıklar görülmüştür. Cheung fonksiyonlarından hesaplanan Φ_b değerleri, I - V ve Norde ve yöntemleri kullanılarak elde edilenlerden daha küçüktür. Schottky diyotların elektriksel parametrelerini belirlemek için kullanılan yöntemler I - V karakteristiğinin farklı bölgelerini dikkate alarak geliştirilmiştir. I - V yöntemi, I - V grafiğinin doğrusal bölgedeki verileri, Norde yöntemi yönteminde ise düz beslem verilerinin tümü kullanılarak diyot parametreleri hesaplanır. I - V grafiğinin lineer kısmının, seri direncin etkisinden ziyade arayüzey parametrelerinin etkisini içerir. Cheung yönteminden bulunan Φ_b değerleri, I - V karakteristiğinin doğrusal olmayan bölgeden alınan veriler kullanılarak elde edilir ki, burada R_s 'nin yanı sıra arayüzey durumları da etkisi olduğu bilinmektedir (Sağlam ve ark., 2004; Çakıcı ve ark., 2015).

Çizelge 1. Ti/p-GaN Schottky diyotunun farklı yöntemlerle edilen elektriksel parametreleri

	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)
I-V metot	9.24E-10	1.62	0.829	
Norde Fonksiyonu F(V)			0.866	269.01
Cheung Fonksiyonları				
dV/d ln(I)		3.54		125.35
H(I)			0.768	122.44



Şekil 4. Ti/p-GaN Schottky diyotun $F(V)$ - V grafiği

Parametreleri hesaplamada kullanılan yöntemler, $\ln I$ - V karakteristiğinin farklı bölgelerini kullandığından, n ve Φ_b değerleri arasında da tutarsızlığa sebep olabilmektedir. I - V karakteristiklerinin doğrusal olmamasından dolayı, Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörünün değerleri, I - V karakteristiklerinden elde edilen değerlerden daha yüksek olabilir. İdealite faktörlerinin değerleri arasındaki fark, doğrusal bölgede sadece arayüzey özelliklerinin etkili olmasına, doğrusal olmayan

bölgede ise hem arayüzey özelliklerinin hem de seri direncin etkisi altında olmasına bağlanabilir (Karataş ve ark., 2013).

Çizelge 1’de de görüldüğü gibi $dV/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ doğrularından elde edilen R_s değerleri birbirine yakın olduğu bulunmuştur ve bu Cheung fonksiyonlarının uyumluluğunu gösterir. Çoğunlukla, Norde ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametreler birbiriyle uyumlu değildir. Genel olarak, Norde fonksiyonlarından elde edilen değerler Cheung yönteminden elde edilenler değerlerden daha büyüktür. Bunun nedenini, Cheung fonksiyonları, $\ln I -V$ grafiğinin düz beslemdeki yalnızca doğrusal olmayan bölgesine uygulanmasıyla ve Norde fonksiyonlarının da düz beslem $I-V$ grafiğinin tümüne uygulanmasıyla açıklanabilir (Asıl ve ark., 2021).

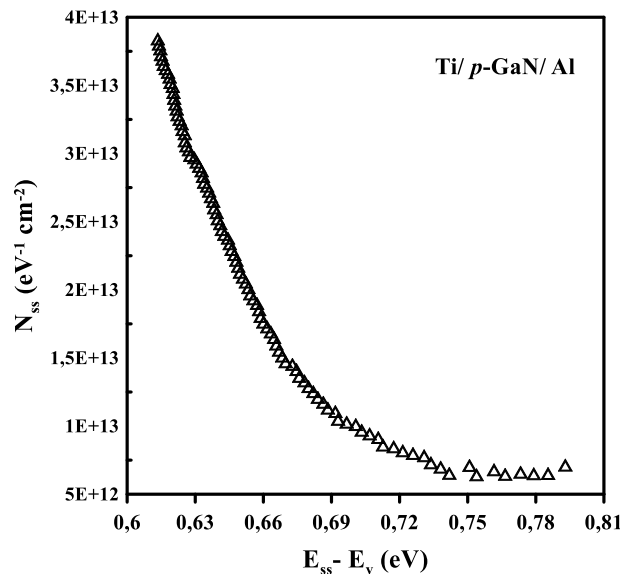
Arayüzey durum yoğunluğuna, bariyer yüksekliğine, seri dirence ve diğer karakteristik parametrelere bağlı olarak yüksek akımlarda idealite faktöründe bir sapma vardır (Padma ve ark., 2016). Arayüzey durumları metal-yarı iletken kontaklarda önemli bir rol oynar. Card ve Rhoderick'e (Card ve Rhoderick, 1971) göre, yarıiletken ile dengede arayüzey durumlarına sahip metal-yarıiletken diyot için idealite faktörü, birden büyük olur ve böylece arayüzey durum yoğunluğu N_{ss} şu şekilde ifade edilebilir:

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (11)$$

ε_i ve ε_s sırasıyla arayüzey tabakasının ve yarı iletkenin geçirgenliği, δ arayüzey tabakasının kalınlığı, W_D uzay yükü genişliği ve $n(V) = [V/kT/q \ln(I/I_0)]$ gerilime bağlı idealite faktörüdür. p -tipi yarıiletkende, arayüzey durumlarının enerjisi (E_{ss}) yarıiletkenin yüzeyindeki değerlik bandının tepesine göre şu şekilde tanımlanır:

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (12)$$

Burada Φ_e etkin bariyer yüksekliği, V deplasyon (tükenme) tabakası boyunca uygulanan voltaj düşüşüdür. N_{ss} 'nin enerji dağılım eğrileri, düz beslem $I-V$ karakteristiklerinin deneysel verilerinden belirlenir. Ti/ p -GaN Schottky diyotu için N_{ss} 'ye karşı $E_{ss}-E_v$ grafiği Şekil 5’de verilmiştir. Açıkça, Şekil 5’den görüldüğü gibi, $E_{ss} - E_v$ değerindeki artışla N_{ss} değeri azalır ve N_{ss} değerleri bant aralığının ortasından valans bandının tepesine doğru artar. N_{ss} 'ye karşı $E_{ss}-E_v$ grafiğinden görüldüğü üzere arayüzey durum yoğunluğu değişimi $6.35 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ($0.78 - E_v$) ile $3.48 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ($0.62 - E_v$) aralığındadır.



Şekil 5. Ti/ p-GaN Schottky diyotunun $E_{ss}-E_v$ fonksiyonuna karşılık N_{ss} arayüzey durum yoğunluğu grafiği

SONUÇ

Bu çalışmada, Ti/p-GaN Schottky diyotlarının elektriksel karakterizasyonu oda sıcaklığında $I-V$ ölçümleri kullanılarak geliştirilen yöntemler yardımıyla araştırıldı ve bu yöntemlerin sınırlamaları karşılaştırıldı. Geleneksel ($I-V$), Norde ve Cheung yöntemleri ile n , Φ_b ve R_s gibi diyot parametreleri belirlendi. Schottky diyot parametrelerinin hesaplanan değerleri incelendiğinde kullanılan yönteme bağlı olduğu görülmektedir.

n 'nin değerinin farklı yöntemlerde 1.62 ile 3.54 arasında değiştiği ve ideal olmayan $I-V$ davranışı gösterdiği bulunmuştur. Φ_b değerinin kullanılan yöntemlerde 0.768 ile 0.866 eV arasında değiştiği hesaplanmıştır. Cheung fonksiyonları kullanılarak belirlenen seri direnç değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Norde yöntemi ve ohm kanunundan elde edilen seri direnç değerlerinin ise birbirleri ile küçük farklılıklar gösterdiği bulunmuştur.

Burada kullanılan yöntemlerden elde edilen sonuçlara göre standart yöntemin özellikle seri direnç değeri ile sınırlı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Norde tarafından önerilen yöntem bazı iyileştirmelere yol açsa da doğruluğu seçilen γ değerine bağlıdır. Bununla birlikte, Cheung yönteminin bazı avantajları vardır ve bu avantajlar kullanımının basit ve hassas bir yöntem olmasıdır.

Bu yöntemlerden elde edilen Schottky diyot parametrelerinin değerlerindeki farklılıklar, düz beslem ($I-V$) grafiğinin farklı bölgelerindeki veri kullanılmasından kaynaklanabilir. Schottky diyot parametrelerinin değerlerinin büyük ölçüde kullanılan yönteme bağlı olduğu görülmüştür.

Ti/ p-GaN Schottky diyotunun $E_{ss}-E_v$ fonksiyonuna karşılık N_{ss} arayüzey durum yoğunluğu grafiği çizilmiştir. Bu grafiğe göre arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}), valans bandının ortasından tepesine doğru sapma ile üstel bir artışa sahip olduğu görülmüştür.

GaN yarıiletkeninin özellikleri ve deneysel sonuçlar dikkate alındığında, Ti/p-GaN Schottky diyotu elektronik uygulamaların geliştirilmesi ve üretimi için umut verici olduğu ifade edilebilir.

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

- Asıl H, Gür E, Çınar K, Coşkun C, 2009. Electrochemical Growth of n-ZnO onto the p-type GaN Substrate: p-n Heterojunction Characteristics. Applied Physics Letters, 94: 253501, 1-3.
- Asıl Uğurlu H, Çınar Demir K, Coşkun C, 2021. The Effect of Thermal Annealing on Ti/p-Si Schottky Diodes. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32:15343–15351.
- Card HC, Rhoderick EH, 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. Journal of Physics D: Applied Physics, 4: 1589–1601.
- Cheung SK, Cheung NW, 1986. Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. Applied Physics Letters, 49: 85-87.
- Çakıcı T, Sağlam M, Güzeldir B, 2015. The Comparison of Electrical Characteristics of Au/n-InP/In and Au/In₂S₃/n-InP/In Junctions at Room Temperature. Materials Science and Engineering B, 193: 61–69.
- Çınar K, Yıldırım N, Coşkun C, Türüt A, 2009. Temperature Dependence of Current-Voltage Characteristics in Highly Doped Ag/p-GaN/In Schottky Diodes. Journal of Applied Physics, 106: 073717, 1-5.

- Deng G, Zhang Y, Yu Y, Han X, Wang Y, Shi Z, Dong X, Zhang B, Du G, Liu Y, 2020. High-Performance Ultraviolet Light-Emitting Diodes Using n-ZnO/p-hBN/p-GaN Contact Heterojunctions. *ACS Applied Materials Interfaces*, 12 (5): 6788–6792.
- Duman S, Özçelik FS, Gürbulak B, Gülnahar M, Türüt A, 2015. Current–Voltage and Capacitance–Conductance–Voltage Characteristics of Al/SiO₂/p-Si and Al/Methyl Green (MG)/p-Si Structures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(1): 347-353.
- Fukushima Y, Ogisu K, Kuzuhara M, Shiojima K, 2009. I-V and C-V Characteristics of Rare-Earth-Metal/p-GaN Schottky Contacts. *Physica Status Solidi C*, 6 (2): 856–859.
- Güçlü ÇŞ, Özdemir AF, Aldemir DA, 2019. Mo/n-Si Schottky Diyotların Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Karakteristiklerinin Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7: 2142-2155.
- Karataş Ş, Yıldırım N, Türüt A, 2013. Electrical Properties and Interface State Energy Distributions of Cr/n-Si Schottky Barrier Diode. *Superlattices and Microstructures*, 64: 483–494.
- Kim JW, Lee JW, 2005. Ti/Al p-GaN Schottky Barrier Height Determined by C–V Measurements. *Applied Surface Science*, 250: 247–251.
- Lin YJ, Lee CT, Chang SS, Chang HC, 2008. Electronic Transport and Schottky Barrier Height of Ni Contact on p-type GaN. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41: 095107, 1-5.
- Nagaraju G, Dasaradha Rao L, Rajagopal Reddy V, 2015. Annealing Effects on the Electrical, Structural and Morphological Properties of Ti/p-GaN/Ni/Au Schottky Diode. *Applied Physics A*, 121:131–140.
- Norde H, 1979. A Modified Forward IV Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 50: 5052-5053.
- Padma R, Nagarajua G, Rajagopal Reddy V, Chel-Jong Choi, 2016. Effect of Annealing Temperature on the Electrical and Structural Properties of V/p-GaN Schottky Structures. *Thin Solid Films*, 598: 236–242.
- Pearton SJ, Ren F, Zhang AP, Dang G, Cao XA, Lee KP, Cho H, Gila BP, Johnson JW, Monier C, Abernathy CR, Han J, Baca AG, Chyi JI, Lee CM, Nee TE, Chuo CC, Chu SNG, 2001. GaN Electronics for High Power, High Temperature Applications. *Materials Science and Engineering B*, 82: 227–231.
- Rhoderick, EH, Williams, RH, 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, Second Edition pp. 257-267, Clarendon Press, Oxford.
- Sağlam M, Biber M, Çakar M, Türüt A, 2004. The Effects of the Ageing on the Characteristic Parameters of Polyaniline/p-type Si/Al Structure. *Applied Surface Science*, 230: 404–410.
- Saron KMA, Ibrahim M, Hashim MR, Taha TA, Elfadill NG, Mkawi EM, Allam NK, 2021. Leakage Current Reduction in n-GaN/p-Si (100) Heterojunction Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 118: 023902, 1-7.
- Tan CK, Abdul Aziz A, Yam FK, 2006. Schottky Barrier Properties of Various Metal (Zr, Ti, Cr, Pt) Contact on p-GaN Revealed from I–V–T Measurement. *Applied Surface Science*, 252: 5930–5935.
- Tataroğlu A, 2013. Comparative Study of the Electrical Properties of Au/n-Si (MS) and Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Schottky Diodes. *Chinese Physics B*, vol. 22(6): 068402, 1-6.
- Zhou G, Jiang Y, Yang G, Wang Q, Fan M, Jiang L, Yu H, Xia G, 2021. Formation of Ultra-High-Resistance Au/Ti/p-GaN Junctions and the Applications in AlGaIn/GaN HEMTs. *AIP Advances*, 11: 045207, 1-6.