

W-Ir Alaşım Schottky Engel Diyotların Performansının Sonlu Elemanlar Metoduyla İncelenmesi

Osman KAHVECİ^{1*}, Mehmet Fatih KAYA²

¹Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isı Tekniği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 06.06.2022, Kabul / Accepted: 01.08.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 23.08.2022)

Anahtar Kelimeler

Schottky Engel Diyot,
Sonlu Elemanlar Metodu,
COMSOL Multiphysics,
W-Ir alaşımı.

Öz: Bu çalışmada elektronik devrelerde yüksek hızlı anahtarlama özellikleriyle ön plana çıkan Schottky engel diyotlar, sonlu elemanlar metoduyla incelenmiştir. Schottky kontak modelleme çalışması için W-at.%10Ir, W-at.%20Ir, W-at.%30Ir, W-at.%50Ir ve W-at.%70Ir olmak üzere beş farklı oranda alaşım ile saf W ve saf Ir metalleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan sayısal modelin literatürdeki deneysel çalışmalarla uyumu gösterilerek doğrulanmıştır. Schottky engel diyotların engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri, ileri beslem yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri, Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, alaşımdaki Ir oranı arttıkça iş fonksiyonunun ve engel yüksekliğinin arttığı belirlenmiştir. Alaşım diyotlar içinde en büyük engel yüksekliği, 4.951 eV iş fonksiyonuna sahip W-at.%70Ir alaşımıyla modellenen, W70Ir/n-Si diyot için yaklaşık 1.02 eV olarak elde edilmiştir. Ayrıca ileri beslem altında diyotların yüzey elektriksel potansiyeli, elektron ve hol konsantrasyonlarının dağılımı simule edilerek görsel grafikler oluşturulmuştur. Diyotların akım iletimi gerçekleşirken özellikle hollerin dağılımında önemli değişiklikler olmuştur. Bu çalışma ile olası bir üretim sürecinden sonra diyotların sahip olabileceği parametreler elde edilerek farklı alaşımların Schottky diyotun çalışma şartlarına etkileri belirlenmiştir.

Investigation the W-Ir Alloy Schottky Barrier Diodes Performance Using Finite Element Method

Keywords

Schottky Barrier Diode,
Finite Element Method,
COMSOL Multiphysics,
W-Ir alloy.

Abstract: In this study, Schottky barrier diodes, which stand out with their high-speed switching properties in electronic circuits, were investigated using the finite element method. For Schottky contact modeling study, five different alloy ratios were used like W-at.10%Ir, W-at.20%Ir, W-at.30%Ir, W-at.50%Ir and W-at.70%Ir, pure W and pure Ir metals. The numerical model studied using the finite element method has been verified by showing its compatibility with the experimental studies in the literature. Barrier height, ideality factor and series resistance values of Schottky barrier diodes were calculated using forward-bias semi-logarithmic current-voltage characteristics by using Cheung functions and Norde method. According to the obtained results, it was determined that the work function and barrier height increased by the Ir ratio in the alloying samples. The largest barrier height among alloy diodes was obtained as approximately 1.02 eV for W70Ir/n-Si diode, which has aW-at.70%Ir alloy with a work function of 4.951 eV. In addition, visual plots were created by simulating the surface electrical potential of the diodes, the distribution of electron and hole concentrations under forward-bias situation. While the diodes conduct current, significant changes in the distribution of the halls were observed. In this study, the effects of different alloys on the working conditions of the Schottky diode were determined by obtaining the parameters that the diodes can have at the end of a possible production process.

*İlgili Yazar, email: kahveci@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Güç elektroniğinde önemli bir yere sahip olan Schottky kontakların, engel oluşum mekanizmaları, bu kontakların ilk keşfinden bu yana önemli bir araştırma konusu olmuştur [1-3]. Schottky engel diyot olarak ta isimlendirilen metal/yarıiletken kontağın temel parametrelerinden birisi olan, engel yüksekliği (Φ_b)'dir. Diyot üzerinden geçen akımın doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve cihazların çalışma koşullarının tespit edilmesi için Φ_b 'nin hatasız olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu anlamda metal/yarıiletken kontakların doğrultma davranışını tanımlamak için ilk çalışmalar Schottky tarafından gerçekleştirilmiş ve geliştirilmiştir [4, 5]. Schottky ve Mott engelin oluşumunu tanımlamak ve engel yüksekliğini hesaplamak için bir model önermişlerdir [4, 6]. Schottky-Mott kuralına [7] göre, engel yüksekliği Eş.1 ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (1)$$

Eş. 1'e göre, engel yüksekliğini, idealde, yarıiletkenin elektron ilgisi (χ_s) ve metalin iş fonksiyonu (Φ_m) belirlemektedir. Metalin iş fonksiyonu, yüzey yük dağılımı ve yüzey durumlarıyla ilişkili olan iki bileşene bağlıdır. Bu bileşenlerden biri hacim diğeri de yüzey dipolüdür [8]. Ancak, metal ve yarı iletken arayüzey tabakası olmadan birbirine temas ettirilirse, atomik bölgelerin ve yük dağılımlarının değiştiği ve böylece de yüzey dipolünün katkısının değiştiği bilinmektedir. Ayrıca, metal ile yarıiletken kontaklarda arayüzey tabakasının olması da engel yüksekliğinin oluşumunu etkilemektedir [7, 9, 10]. Farklı yarıiletkenler ve farklı metaller kullanılarak kontak yapılarının oluşturulduğu, engel yüksekliklerinin araştırıldığı birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir [11-16] ve hali hazırda araştırmalar devam etmektedir. Ancak metal/yarıiletken kontak oluşumunda arayüzey tabakasının engel yüksekliği üzerindeki etkisi, arayüzey tabakasız olarak oluşan kontağın etkisinden daha az olduğu da bilinmektedir [17]. Bu bağlamda kontakların engel yüksekliği metal ve yarıiletken seçiminden oldukça etkilenmektedir. Bu etkilerin incelenmesi amacıyla araştırmacılar Schottky diyot konusunda, yarıiletkenlerle metallerin kontak özelliklerinin yanı sıra alaşımların kontak özelliklerini de araştırmaktadır [18-20]. Zaten arayüzey tabakasının varlığında engel yüksekliğinin açıklanması için farklı modeller [10, 21, 22] önerilse de, önerilen tüm modeller henüz metal/yarı iletken kontakların özelliklerini tam olarak açıklayamamaktadır ve engel yüksekliği metalin türü, temizleme yöntemi, metal biriktirme yöntemi gibi farklı parametrelerle değişebilmektedir [8]. Elektronik uygulamalarda belirli bir amaç için üretilecek diyotların diyot parametrelerinin belirlenmesi, genellikle farklı iş fonksiyonlarına sahip metallerin veya elektron ilgisi farklı olan yarı iletkenlerin kullanılmasıyla mümkün ve yeterli olmaktadır [8, 23, 24].

Schottky diyot konusunda deneysel çalışmalar için, yüksek vakum, birçok kimyasal işlem ve hassas ölçümler gibi gereklilikler sağlanmalıdır. Ayrıca literatürde deneysel çalışmalar sırasında karşılaşılan güçlüklerden ve sorunlardan bahsedilmektedir. Bu sorunlardan bazıları şu şekildedir; alttaş üzerine büyütülen filmin deney bitiminde yüzeyden hemen ayrılması sorunu [25], kontaklar için alaşım ince film oluştururken makul stokiometrik oranda alaşımların hazırlanmasında yaşanan güçlük [26], düzlemsel diyotların desenlerinin oluşumunda kullanılan maskelerde yaşanan sıkıntılar, geometrinin zorluğu ve kısa devre sorunları [27], yüksek kaliteli ve geniş alanlı Schottky kontakları geliştirmede büyük miktarda yüzey kusuru nedeniyle yaşanan olumsuzluklar [28]. Böylesi zorluklar içeren deneysel çalışmalar gerçekleştirilmeden, sonuçları hakkında ön bilgi sahibi olmak ve deneylerin sonucu hakkında yaklaşık tahminde bulunabilmek önemlidir. Bu imkân deneysel uyumu kanıtlanabilen modelleme çalışmaları ile sağlanabilir. Schottky diyotların akım iletim mekanizmalarını anlamak ve engel oluşumunu açıklamak amacıyla modelleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir [29-32]. Diyotların modelleme çalışmalarında Termiyonik Emisyon Teorisi (TE) yaygın olarak kullanılmaktadır [33-35] ve modelleme sonuçları özellikle donör konsantrasyonu (N_d) $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ mertebesine kadar olan yarıiletkenler için başarılı ve geçerli olduğu kanıtlanmıştır [36].

Yarı iletken özelliklerinin aynı kalması, ara yüzeyin durumlarının değişmediği düşünülerek, Schottky diyot metalindeki bileşimin değişmesi yani alaşım işlemi, engel yüksekliğini değiştirmesi beklenmektedir. Tungsten (W) malzemesi, Schottky diyot araştırmalarında önemli bir yere sahiptir, bu türden yansıtıcı metaller Schottky diyotların, ısıl işlem aşamasında daha esnek ve sıcaklıklar arttıkça daha güvenilir olmaları nedeniyle [37] birçok kez tercih edilmiştir [38-40] ve güncel çalışmalarda da araştırma konusu olmaya devam etmektedir [41, 42]. Ayrıca, farklı metaller kullanılarak örneğin; Titanyum (Ti) [43], Silisyum (Si) ile [44], Paladyum (Pd) ve Platin (Pt) [45] gibi W alaşımları metal/yarıiletken kontak araştırmalarının konusu olmuştur. Özellikle alaşım yapılırken iş fonksiyonu daha yüksek olan metal ile katkılama yapmak kaçak akımı azaltarak [46] diyot performansını olumlu etkileyebilir. İridyum (Ir)'un iş fonksiyonunun W ile kıyaslandığında daha yüksek olması, termal olarak kararlı Schottky kontak oluşturabilmesi [47], kimyasal kararlılığı, mekanik mukavemetinin yüksek olması, oksitlenmeye karşı dirençli, yüksek elektrik iletkenliği [48] ve Ir/Pt alaşımı gibi Ir alaşımlarının kararlı, korozyona karşı dirençli ve dayanıklı kontak oluşturması [46] gibi özelliklerinden dolayı ikinci metal olarak Ir tercih edilmiştir. Ayrıca Ir'nin yüksek ergime noktası nedeniyle deneysel çalışmalarda güçlükleri tespit

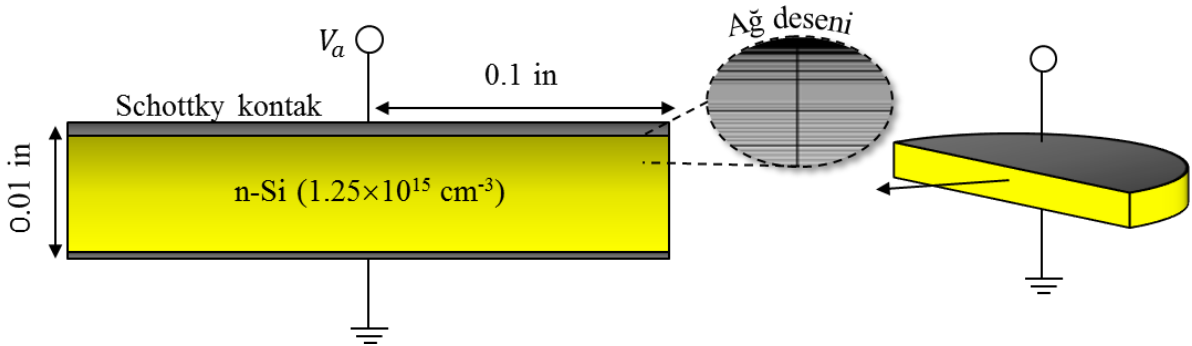
edebilmek için modelleme çalışmalarının yapılması bu malzeme ile oluşturulan çeşitli alaşımların farklı koşullardaki davranışlarını incelemek için oldukça önemlidir. Bunun yanında, yazarların bilgisi dahilinde W-İr ikili alaşımının Schottky diyot özellikleri konusunda yapılan incelemelerde herhangi bir bilimsel çalışmaya da rastlanamamıştır. Bu yüzden, bu konuda hem deneysel hem de modelleme çalışmalarına ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, alaşımların bileşimine bağlı olarak Schottky diyot için kullanılan metalin ϕ_m değerindeki değişimin etkisi sayısal modelleme çalışması ile araştırılmıştır. Schottky diyotun doğrultma özelliği, W, İr metalleri ve W-İr alaşımları için n tipi Si yarıiletkeni üzerine kontak modeli için sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır. Akım iletiminde TE mekanizması temel alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Modellenen Schottky diyotların idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b), seri direnç değeri (R_s) gibi karakteristik parametreleri belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca ileri beslem altında diyotların elektriksel potansiyel dağılımı, hol ve elektron konsantrasyonlarının dağılımı da simule edilerek görsel olarak sonuçlara eklenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Schottky Diyot Modelinin Yapısı

Bu çalışmada önerilen Schottky diyotun enine kesit görüntüsü şematik olarak Şekil 1'de gösterilmektedir. Yarıiletken olarak, $1.25 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ katkılama konsantrasyonuna sahip olan n tipi Si modellenmiştir. Diyot, 298 K oda sıcaklığında, V_a uygulama voltajı altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Schottky diyotun önerilen boyutları ve katkılama miktarı optimize edilerek belirlenmiştir. Diyotlar, kalınlığı 0.01 in (254 μm) ve yarıçapı ise 0.1 in ölçülerinde dairesel olarak şekillendirilmiştir.



Şekil 1. Schottky diyot modelin şematik görünümü.

COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak, cihaz yapısı ince bir şekilde hacimsel ağlara bölünerek yakınsak çözümler uygulanmıştır. Ağ desenleri oluştururken üç farklı ağ deseni dağılımı olacak şekilde belirlenmiştir. Birincisi, metal ile yarıiletkenin birleştiği kontak bölgesi (Schottky kontak) $1 \mu\text{m}$ yüksekliğinde aritmetik sıra olacak şekilde ve ters yönde 50 yatay elemente ayrılmıştır. İkincisi, geriye kalan $253 \mu\text{m}$ 'lik kısım, aritmetik sıralı ve simetrik dağılım olacak şekilde 200 yatay elemente ayrılmıştır. Son olarak diyot yapısının tamamı sabit aralıklı olarak 50 adet düşey elemente ayrılmıştır. Böylece Schottky diyotun model yapısı içerisinde toplam 5×10^5 adet sonlu hacimsel eleman ile oluşturulmuştur.

2.2 Matematiksel Model

- Alaşımların İş Fonksiyonu

İş fonksiyonu, malzeme yüzeylerinin en temel özelliklerinden biridir ve metal-yarı iletken kontakların elektriksel özelliklerini doğrudan etkiler. Metallerin iş fonksiyonları bazı elementler için iyi belirlenmiş olsa da, alaşımlara ait iş fonksiyonları ve alaşımdaki elementlerin bileşimine bağımlılığı hakkındaki bilgiler sınırlıdır [49]. Alaşımlara ait iş fonksiyonunu belirlemek için çalışmalarda genellikle Gelatt ve Ehrenreich'in önermiş olduğu model kullanılmaktadır [18, 50-52]. W metaline farklı yüzdelik oranlarda (x) İr katkısı için, $W_x\text{Ir}_{1-x}$ formundaki alaşıma ait iş fonksiyonu Eş. 2'deki gibi belirlenir [18].

$$\phi_m = x\phi_{m,W} + (1-x)\phi_{m,İr} + x(1-x) \left[\frac{(\phi_{m,W} - \phi_{m,İr})(\rho_W/\rho_{İr}) - 1}{x(\rho_W/\rho_{İr}) + (1-x)} \right] \quad (2)$$

Burada, ρ_W , tungsten için, ρ_{Ir} ise iridyum için durum yoğunluklarıdır. $\phi_{m,W}$ ve $\phi_{m,Ir}$ sırasıyla tungsten ve iridyum için iş fonksiyonlarıdır. Fermi seviyesinde durum yoğunluğu, elektronik spesifik ısı sabitine (C_e) bağlıdır. C_e 'nin formülü, T , sıcaklık ve k_B , Boltzmann sabiti olmak üzere Eş. 3'teki gibi ifade edilebilir:

$$C_e = (1/3)\pi^2\rho k_B^2 T \quad (3)$$

Buradan hesaplanan C_e değerleri, W için $1.3 \text{ mJ mol}^{-1} \text{ K}^{-2}$ ve Ir için $3.1 \text{ mJ mol}^{-1} \text{ K}^{-2}$ şeklindedir [52]. İkili alaşımdaki metallerin C_e değerleri birbirlerine yakın değerler olmadığı için alaşımın iş fonksiyonundaki değişimin katkılama oranıyla lineer bir şekilde değişmesi beklenmemektedir. Bundan dolayı iş fonksiyonunun hesaplamalarında yukarıda verilen Eş. 2'den yararlanılmıştır.

- Diyotların Akım İletim Mekanizması

Temel Schottky diyot özelliklerini incelemek için, metal-yarıiletken kontakların elektrik iletimini tanımlayan, yarı iletken cihazlar için akım-iletim denklemlerinden J-V eğrileri simule edilmiştir. Nispeten düşük katkılama seviyelerine ($< 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sahip bir Schottky engel diyotu için akımın termiyonik emisyonundan kaynaklandığı varsayılabilir, yani iletim bandındaki elektronların potansiyel engelin üzerinden geçerek akım iletimini sağladığı, ancak engelin içerisinden geçmediği durumu göz önüne alarak, uygulama voltajına (V_a) bağlı olarak akım yoğunluğu (J), Eş. 4'teki gibi ifade edilebilir [53]:

$$J = J_0 \left(e^{qV_a/nk_B T} \right) \left\{ 1 - e^{-qV_a/k_B T} \right\} \quad (4)$$

Burada q , elektronun yükü, n , idealite faktörüdür değeri genellikle 1'den büyüktür ve pratikte diyotların ideal TE'den sapmasını belirtmek için kullanılır. J_0 ise sıfır beslem altında doyma akım yoğunluğudur ve $\ln(J)$ 'nin lineer kısmının sıfır voltajdaki eksenin kesim noktasından belirlenir. Schottky diyot için, J_0 Eş. 5'teki gibidir:

$$J_0 = A^* T^2 e^{-q\Phi_b/k_B T} \quad (5)$$

Burada, A^* , etkin Richardson sabiti ve Φ_b , engel yüksekliğidir. TE'ye göre, ileri besleme bölgesinde ($V_a \geq 3k_B T/q$ için) diyotun kontak bölgesinden geçen akım yoğunluğu (J), Eş. 6'daki gibi hesaplanır [7]:

$$J = J_0 \left(e^{qV_a/nk_B T} \right) \quad (6)$$

Modellenen Schottky diyotların, uygulama voltajı 0V değerinden 0.6V sınır değerine kadar artırıldığında, bu aralıkta yarı logaritmik ileri beslem J-V karakteristiği simule edilebilmektedir.

- Karakteristik Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Yarı logaritmik J-V grafiğinin eğiminden ise diyotların idealite faktörü, n , Eş. 7'deki gibi hesaplanabilir:

$$n = \left(q / k_B T \right) \left(\partial V_a / \partial \ln J \right) \quad (7)$$

Schottky diyotların engel yüksekliği Φ_b ise Eş. 8'deki gibi hesaplanabilir:

$$q\Phi_b = (k_B T) \ln \left(A^* T^2 / J_0 \right) \quad (8)$$

Diyotların J-V karakteristiği incelenirken, ileri besleme gerilimi nispeten arttığında akım değerlerindeki artış miktarında bir azalma eğilimi görülebilir. Bu durum, tükenme bölgesi ile yarıiletken arasında ve ohmik kontakta kaynaklanan seri direncin etkisinden (R_s) kaynaklanır. Schottky diyotlar için R_s değerleri Cheung'ler [54] veya Norde [55] tarafından, ileri yönlü akım denklemlerinden geliştirilen yöntemlerle belirlenebilmektedir. Cheung ve Cheung teorisine göre Φ_b , n ve R_s gibi diyot parametreleri Cheung fonksiyonları kullanılarak Eş. 9.a ve 9.b'deki eşitliklerle belirlenebilir [54].

$$dV_a / d \ln(I) = nk_B T / q + IR_s \quad (9.a)$$

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \quad (9.b)$$

Burada I , diyottan geçen toplam akımdır ve akım yoğunluğunun diyot alanıyla (A) çarpılmasıyla elde edilir ($I = J \times A$). Norde metoduyla hesaplamalarda ise Eş. 10a'daki gibi ifade edilen Norde fonksiyonu kullanılmaktadır [55].

$$F(V_a) = V_a/\gamma - k_B T/q \ln \left(I(V_a)/AA^*T^2 \right) \quad (10.a)$$

Burada, $I(V_a)$, I-V grafiğinden elde edilir ve uygulama voltajına bağlı akım değeridir. γ ise idealite faktöründen daha büyük boyutsuz bir tam sayıdır. Diyot parametrelerinden olan R_S , Eş. 10.b'den ve Φ_b , Eş.10.c'den elde edilmektedir.

$$R_S = \frac{k_B T(\gamma - n)}{qI_{min}} \quad (10.b)$$

$$\Phi_b = F(V_{min}) + V_{min}/2 + k_B T/q \quad (10.c)$$

Burada $F(V_{min})$, $F(V_a)$ fonksiyonunun minimum noktasıdır. I_{min} , akım değerinin minimumu ve V_{min} ise voltaj değerinin minimumudur.

2.3 Modelleme Parametreleri ve Sabitler

Model geometrisi oluşturulan diyotların matematiksel temelleri tanımlandıktan sonra, matematiksel model için gerekli olan malzemeye ait parametrelerin, sabitlerin ve çözümleme yönteminin seçilmesi gibi işlemlerin programa kaydedilmesi gerekmektedir. Alaşımların hesaplanan iş fonksiyonları, dairesel olarak modellenen diyotlara ait geometrik veriler ve sabitler Tablo 1'de yer almaktadır.

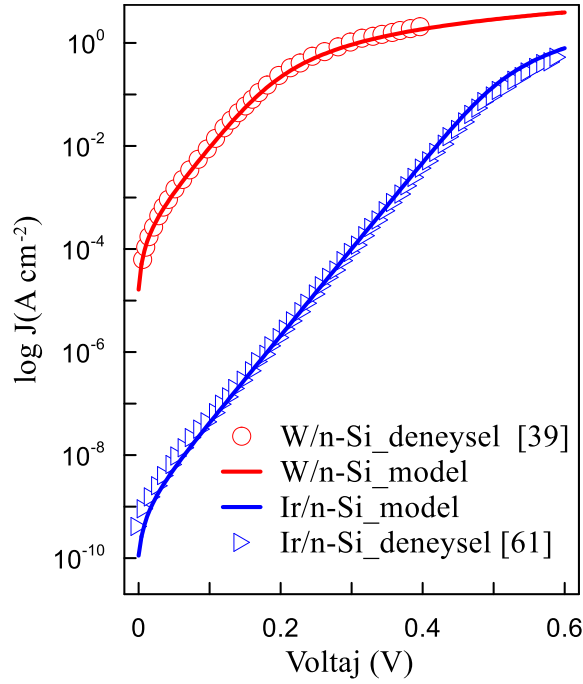
Tablo 1. Metal alaşım-Schottky diyot modeli için giriş parametreleri, sabitler ve açıklamaları.

Parametre	Değeri	Birimi	Açıklama
V_a	0-0.6	V	Uygulama voltajı:0 V'den 4×10^{-3} V adımlar ile 0.6V'ye kadar
ρ_w	1.3	mJ mol ⁻¹ K ⁻²	Elektronik spesifik ısı sabitine bağlı durum yoğunlukları, ρ_w : W için ρ_{Ir} : Ir için
ρ_{Ir}	3.1		
χ_s	4.05 [56]	eV	Si yarıiletkenin elektron ilgisi
ϕ_m	W	4.680 [57]	Metallerin iş fonksiyonları ve Eş.2'den hesaplanan alaşımların iş fonksiyonları. W10Ir: W-at.%10Ir alaşımı W20Ir: W-at.%20Ir alaşımı W30Ir: W-at.%30Ir alaşımı W50Ir: W-at.%50Ir alaşımı W70Ir: W-at.%70Ir alaşımı
	W10Ir	4.747	
	W20Ir	4.800	
	W30Ir	4.842	
	W50Ir	4.905	
	W70Ir	4.951	
	Ir	5.000 [58]	
A	20.26	cm ²	Modellenen diyotların yüzey alanı
T	298	K	Sıcaklık
N_d	1.25×10^{15}	cm ⁻³	Modelleme için seçilen n tipi Si donör konsantrasyonu
A^*	110 [59]	Acm ⁻² K ⁻²	n tipi Si için etkin Richardson sabiti
E_g	1.12 [60]	V	Si yarıiletken bant aralığı
q	1.6×10^{-19}	C	Elektron yükü

2.4. Deneysel Doğrulama

Metal alaşım/n-Si Schottky modelleme çalışması için W ve Ir metalleri önerilmiştir. Hem W hem de Ir için Schottky diyot çalışmaları literatürde bulunmaktadır. Modelleme çalışmasının içeriğine uygun olarak, n-Si üzerine yapılan deneysel çalışmalardan W metalinin kullanıldığı çalışma ile [39] Ir metalinin kullanıldığı çalışma [61] deneysel doğrulama için referans alınmıştır. Modelleme parametrelerine ait veriler daha önce Tablo 1'de

verilmişti. Modellenen diyotlar ile deneysel olarak üretilen diyotlara ait ileri beslem altında yarı logaritmik J-V grafiği Şekil 2'de görülmektedir.



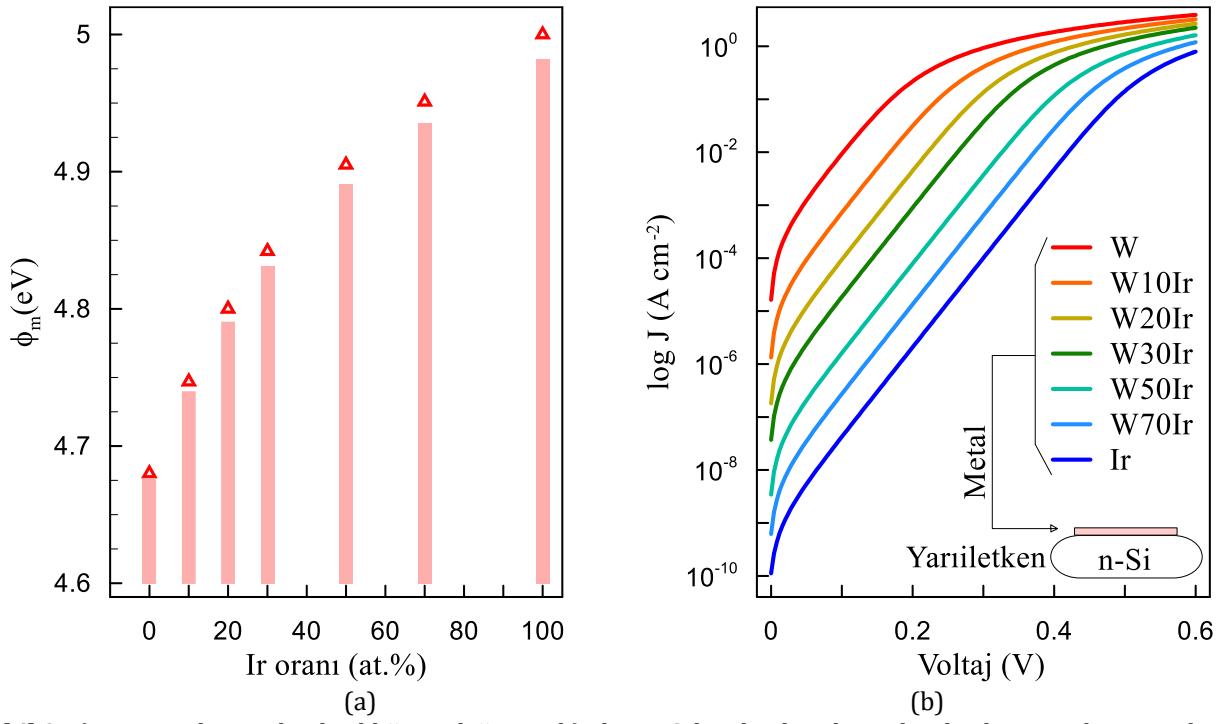
Şekil 2. Schottky diyot modellerin J-V grafiğinin deneysel verilerle karşılaştırılması.

Modellenen her iki diyot için de deneysel verilerle uyumlu grafikler elde edilmiştir. W/n-Si ve Ir/n-Si Schottky diyotların uygulama gerilimi iki diyotun deneysel uygulama aralığını kapsayacak şekilde 0V ile 0.6V aralığında alınmıştır. Her iki metal içinde $1.25 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğuna sahip n-Si yarıiletkeni seçilerek modellenmiştir. Alaşımlarının modelleme çalışmaları için kullanılacak olan metallerin deneysel verilerle uyumlu olduğu ve bu açıdan oluşturulan modelleme çalışmasının da başarılı olduğu görülmektedir. Her iki metal için elde edilen bu sonuçlar incelenerek, Comsol Multiphysics yazılımında farklı alaşım oranlarında modelleme çalışmaları yapılarak alaşıma bağlı olarak diyot parametreleri belirlenmiştir.

3. Bulgular

3.1. Akım-Gerilim Karakteristiği

Alaşımlar için W ve Ir metalleri tercih edilerek W-at.% 10 Ir, W-at.% 20 Ir, W-at.% 30 Ir, W-at.% 50 Ir, W-at.% 70 Ir şeklinde beş farklı oranda alaşım ve iki adet de W ve Ir olmak üzere saf metalden elde edilen diyotlar olmak üzere toplam yedi farklı Schottky diyot için çözümler yapılmıştır. Alaşımların yüzdelik oranlarıyla ilgili açıklamalara Tablo 1'den ulaşılabilir. W-Ir ikili alaşımındaki Ir oranına bağlı olarak iş fonksiyonunun değişiminin lineer olmadığı Şekil 3.a'da da görülebilmektedir. Matematiksel modelde yer alan Eş.2'nin iş fonksiyonlarının hesaplanması için uygun olduğunu, katkılama oranına bağlı iş fonksiyonunun değişim grafiği desteklemektedir. Belirlenen iş fonksiyonları yardımı ile Schottky diyot için karakteristik I-V grafiği simüle edilmiştir. Uygulama voltajının değeri, 0 V'den başlayarak 4×10^{-3} V adımlar ile 0.6 V maksimum değerine kadar değiştiğinde, Şekil 3.b'de yer alan model diyotların ileri beslem altında yarı logaritmik J-V grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3. a) Ir oranıyla engel yüksekliğinin değişimi, b) alaşım Schottky diyotların ileri beslem yarı logaritmik J-V grafiği.

Alaşım/n-Si Schottky diyotlar için modelleme ile elde edilen I-V karakteristiğinden hesaplanan diyot parametreleri, Eş. 9'daki Cheung fonksiyonlarından elde edilen ve Eş.10'dan Norde metoduyla elde edilen diyot parametrelerinin sonuçları Tablo 2'de yer almaktadır. Diyot parametrelerinin hesaplamaları SeCLaS-PC programı [62] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. W-Ir alaşım/n-Si Schottky diyotların 298K sıcaklık değerinde elde edilen karakteristik parametreleri

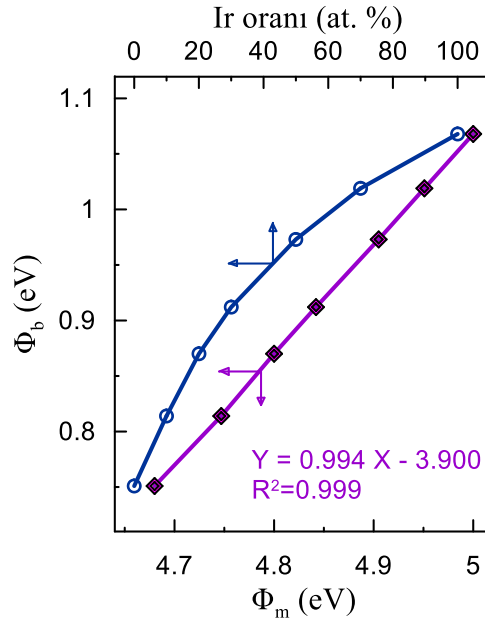
Alaşım	n	Φ_b (eV)	I_0 (A)	Cheung			Norde	
				n	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)
W	1.015	0.751	4.03×10^{-4}	1.017	0.75	43.359	0.692	44.268
W10Ir	1.031	0.814	3.49×10^{-5}	1.015	0.816	43.472	0.737	43.330
W20Ir	1.008	0.87	4.06×10^{-6}	1.014	0.868	43.510	0.871	44.984
W30Ir	1.005	0.912	7.87×10^{-7}	1.012	0.91	43.888	0.914	43.419
W50Ir	1.012	0.973	7.31×10^{-8}	1.016	0.971	43.378	0.978	42.225
W70Ir	1.008	1.019	1.21×10^{-8}	1.012	1.018	43.412	1.023	43.680
Ir	1.005	1.068	1.84×10^{-9}	1.032	1.055	41.222	1.070	42.894

Modellenen diyotlar içerisinde en düşük engel yüksekliği W/n-Si diyot için elde edilirken en büyük engel yüksekliği Ir/n-Si diyottan elde edilmiştir. Alaşım Schottky diyotların engel yüksekliği ise Ir oranının değişimiyle farklılık göstermektedir. Engel yüksekliklerinin hesaplanması için kullanılan iç yöntemin sonuçlarına bakıldığında tüm çözümlerde artan Ir oranıyla diyotların engel yüksekliği değerlerinin arttığı görülmektedir. Diyotların R_s değerleri alaşım işlemi ile önemli bir değişim göstermese de W/n-Si model diyota göre Ir/n-Si model diyotun R_s değeri biraz daha düşük elde edilmektedir. Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerleri ele alındığında W/n-Si model diyotun R_s değeri 43.36 Ω iken, Ir/n-Si için elde edilen R_s değeri yaklaşık 41.22 Ω olmaktadır.

Engel yüksekliklerinin literatürdeki deneysel çalışmalarla uyumu ele alındığında, Bouziane ve ark. [39] Magnetron saçtırma yöntemiyle ürettikleri W/Si diyotlar için, maksimum engel yüksekliği değerini 0.613 eV elde etmişlerdir. Bu değer W/n-Si model için, Norde metoduyla elde edilen 0.692 eV değerine oldukça yakın bir değerdir. Başka bir çalışmada Durcan ve ark. [63] n-Si üzerine electron beam evaporation metoduyla W kontak yaparak ürettikleri Schottky diyot için ortalama engel yüksekliği değerini 0.76 eV elde etmişlerdir. Modelleme ile elde edilen diyotların engel yüksekliği değeri ise hem ileri beslem I-V grafiğinden elde edilen hem de Cheung fonksiyonlarından elde edilen 0.75 eV engel yüksekliği değeri literatürdeki bu deneysel sonuca oldukça yakın

değerlerdedir. Ir/n-Si kontaklar için Jime'nez-Leube ve ark. [61] yaptıkları deneysel çalışmada ise ileri beslem I-V grafiğinden elde ettikleri engel yüksekliği değeri, yaklaşık olarak 0.9 eV mertebesindedir. Yine bu değer de Ir/n-Si model diyot için, bu çalışmada üç ayrı metotla hesaplanan yaklaşık 1 eV mertebesinde elde edilen engel yüksekliği değerinden uzak değildir. Böylece hem W hem de Ir için literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilen engel yüksekliği değerleri bu çalışmadaki modelleme ile elde edilen engel yüksekliği değerleriyle uyum içerisindedir. Alaşım ile yapılan modelleme sonuçlarına göre diyotların engel yüksekliklerinin ise bu değerler arasında olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar göz önüne alındığında model Schottky diyotların engel yüksekliğinin alaşımın etkisiyle değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla metalin iş fonksiyonu da alaşımın etkisiyle değişmektedir. Şekil 4'te engel yüksekliğinin alaşımdaki Ir oranına bağlı olarak değişimi ve iş fonksiyonuna bağlı olarak engel yüksekliğinin değişimi görülmektedir. Engel yüksekliği iş fonksiyonuyla lineer olarak değişirken, Ir oranıyla Şekil 3.a'dakine benzer şekilde %30 Ir katkısına kadar hızlı bir artış gösterirken, %30 Ir katkısından sonra artış miktarı giderek azalmaktadır. Dolayısıyla engel yüksekliği Ir oranıyla lineer olmayan bir değişim göstermektedir. İş fonksiyonuyla engel yüksekliğinin değişimi literatürde deneysel çalışmalarda da araştırılmıştır. Sonuçlar engel yüksekliği ile iş fonksiyonu arasındaki lineer ilişkiyi desteklemektedir [18].



Şekil 4. Schottky diyotların engel yüksekliğinin iş fonksiyonu ve Ir oranına bağlı değişimi.

Engel yüksekliği ile iş fonksiyonu ilişkisinde eğriye uydurulan lineer doğrunun eğimi 1'e yakınsa Schottky limiti olarak adlandırılmaktadır ve bu durum arayüzey hallerinin yoğunluğunun düşük bir değerde olduğu anlamına gelmektedir [64]. Şekil 4'teki fit denklemlerinden görüldüğü gibi eğim 0.994 olarak hesaplanmıştır ve 1'e oldukça yakın bir değerdedir. Bu durum model diyotların arayüzey hallerinin yoğunluğunun çok düşük olduğunu göstermektedir.

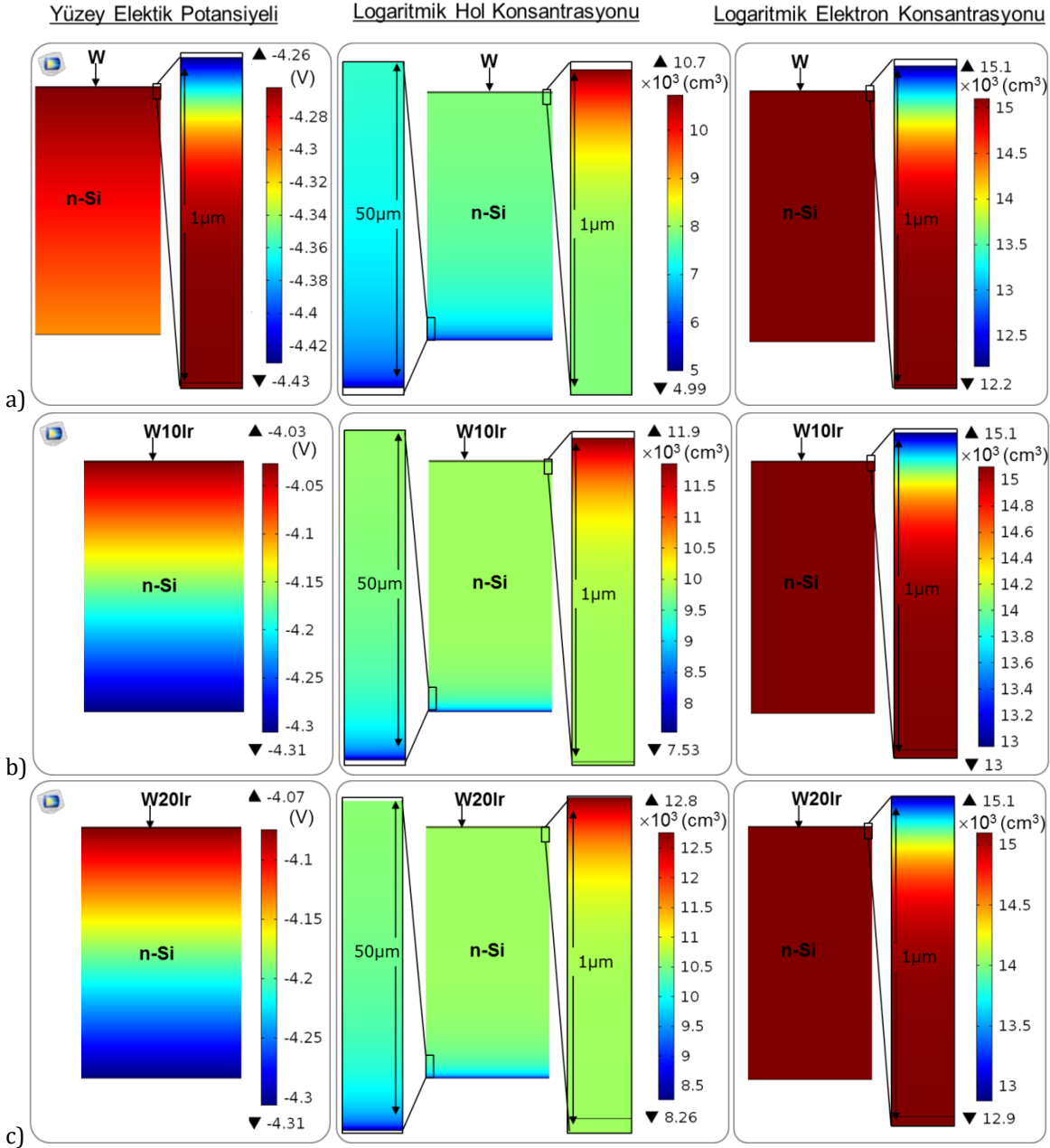
3.1. Elektriksel Potansiyel, Elektron ve Hol Konsantrasyonlarının Dağılımı

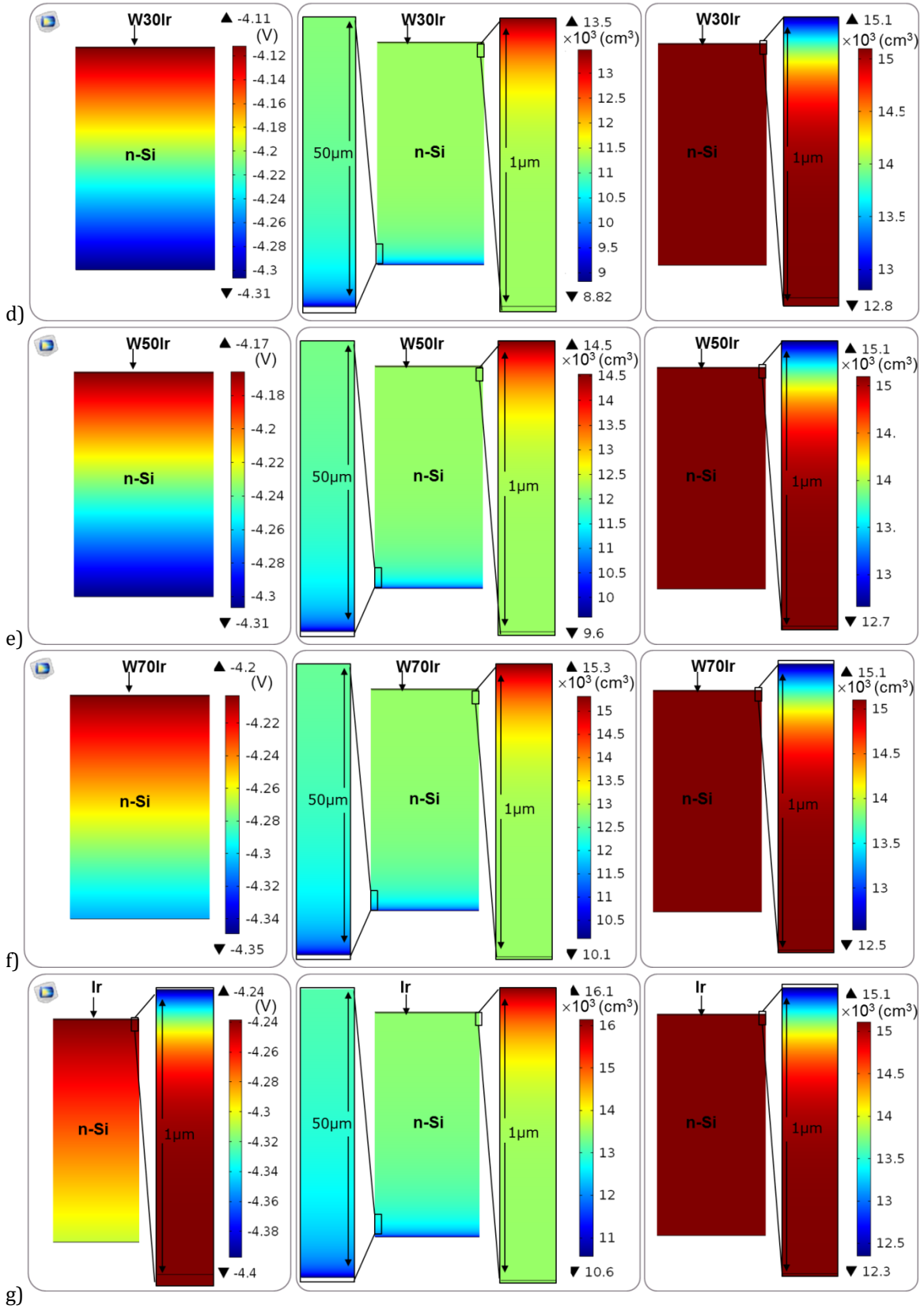
Modellenen Schottky alaşım diyotların TE'ye göre sayısal analizi yapıldığında elde edilen akım-gerilim karakteristiği ele alınmıştır. Modellenen diyotların engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi karakteristik parametreleri belirlenmiştir. Akım iletim mekanizmasını daha iyi gözlemlemek amacıyla, ileri beslem altında model geometrisi ele alındığında yarıiletken boyunca elektriksel potansiyelin dağılımı, hol ve elektron konsantrasyonlarının dağılımı simüle edilerek elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir.

Yüzey elektriksel potansiyelin dağılımı ele alındığında W/n-Si diyot için -4.43 V ile -4.26 V aralığında dağılırken Ir/n-Si kontakta -4.4 V ile -4.24 V aralığında dağılmaktadır. Her iki diyot için Schottky kontak tarafındaki 1µm'lik kısmı yakından incelendiğinde elektriksel potansiyel hızlıca değişim göstermektedir ancak yarıiletkenin kalan kısmında, W/n-si diyot için yaklaşık -4.3 V ile -4.26 V aralığında, Ir/n-Si diyotta -4.31 V ile -4.24 V aralığında küçük bir değişim gözlenmektedir. Alaşım diyotlar incelendiğinde ise maksimum elektriksel potansiyel, alaşımı oluşturan metallerin potansiyeline göre daha pozitif değerlerde ve potansiyel dağılımı yarıiletken yapının tamamına yayılmış olarak görülmektedir.

Diyotların hol konsantrasyonları incelendiğinde hem Schottky kontak tarafı hem de ohmik kontak tarafında bütün diyotlar için hızlı bir değişim görülmektedir. Alaşımdaki Ir oranı arttıkça maksimum hol konsantrasyonu da artmaktadır. Örneğin W/n-Si diyot için maksimum hol konsantrasyonu değeri $10.7 \times 10^3 \text{ cm}^3$, %50 Ir katkılı W50Ir/n-Si diyotta $14.5 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ve Ir/n-Si diyotta ise $16.1 \times 10^3 \text{ cm}^3$ değerindedir.

Model diyotların tamamında elektron konsantrasyonları Schottky diyot bölgesinin özellikle $1 \mu\text{m}$ 'lik kısmında hızlı bir değişim sergilemektedir. Elektron konsantrasyonlarının en geniş aralığı W/n-Si diyot' ta 12.2×10^3 - $15.1 \times 10^3 \text{ cm}^3$ değerindedir. Ir oranına bağlı olarak elektron konsantrasyonunun dağılımı incelendiğinde ise Ir oranı arttıkça maksimum elektron konsantrasyonu değişmezken yarıiletken yapının tamamındaki dağılım aralığı genişlemektedir. Örneğin, %10 Ir katkılı W10Ir/n-Si diyotta elektron konsantrasyonunun dağılım aralığı 13×10^3 - $15.1 \times 10^3 \text{ cm}^3$ değerinde iken, %70 Ir katkılı W70Ir/n-Si diyotta elektron konsantrasyonunun dağılım aralığı 12.5×10^3 - $15.1 \times 10^3 \text{ cm}^3$ değerinde hesaplanmıştır.





Şekil 5. Diyotların yüzey elektrik potansiyel dağılımı, logaritmik hol ve elektron konsantrasyonlarının dağılımları, a) W/n-Si için, b) W10Ir/n-Si için, c) W20Ir/n-Si için, d) W30Ir/n-Si için, e) W50Ir/n-Si için, f) W70Ir/n-Si için ve g) Ir/n-Si için.

Sonuçlar alaşımın etkisi ile ileri beslem altında diyotların akım iletimi gerçekleşirken özellikle hollerin dağılımında önemli değişiklikler meydana geldiğini hem yüzey elektriksel potansiyeli hem de elektron konsantrasyonlarında da değişiklikler olduğunu göstermektedir. Böylece diyotların ileri beslem altında çalışma şartları simüle edildiğinde görsel olarak elektrik potansiyeli, hol konsantrasyonu ve elektron konsantrasyonu

gibi parametrelerin dağılımlarını da gözlemlemek ve Schottky kontak tasarımlarını bu parametrelere göre oluşturmak mümkün olmaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada W ve Ir metalleri, W-at.% 10 Ir, W-at.% 20 Ir, W-at.% 30 Ir, W-at.% 50 Ir, W at.% 70 Ir olarak beş farklı oranda alaşım diyot modellenmiştir. Ayrıca iki adet te alaşımda kullanılan saf metalden elde edilen diyotlar olmak üzere toplamda yedi farklı Schottky diyot başarılı bir şekilde modellenmiştir. Comsol Multiphysics yazılımı yardımıyla sonlu elemanlar metodu kullanılarak diyotların karakteristik parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca yüzey elektrik potansiyeli, hol ve elektron konsantrasyonlarının dağılımı görsel grafikler şeklinde verilmiştir.

Schottky kontak için kullanılan metallerin iş fonksiyonu alaşım oranına bağlı olarak hesaplanmıştır. En düşük iş fonksiyonu W-at.% 10 Ir alaşımı için 4.747 eV olarak hesaplanırken, en yüksek iş fonksiyonu W-at.% 70 Ir alaşımı için 4.951 eV olarak hesaplanmıştır. Alaşımdaki Ir oranı yükseldikçe Schottky diyotların engel yüksekliği artmaktadır. Bütün model diyotlar içinde, en büyük engel yüksekliği Saf Ir için Norde metoduyla 1.07 eV olarak hesaplanırken, alaşım diyotlar içinde en büyük engel yüksekliği ise W70Ir/n-Si diyot için yaklaşık 1.02 eV olarak hesaplanmıştır. Yapılan modelleme çalışmasında Schottky diyot bölgesinin özellikle 1 μ m'lik kısmında elektron konsantrasyonunda hızlı bir değişim olduğu gözlemlenmiş olup ve en geniş aralık değeri de W/n-Si diyot modelinde $12.2 \times 10^3 - 15.1 \times 10^3 \text{ cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Ir'ın etkisi de bu çalışma ile ortaya çıkarılmış olup, Ir artışı ile elektron konsantrasyonunun değişmediği ancak yarı iletken yapıdaki dağılım aralığının değişiklik gösterdiği ortaya çıkarılmıştır. Bu da bu alanda çalışmalar yürüten araştırmacılar için çok faydalı bir veri olarak sonlu elemanlar metodunun, alaşım Schottky diyotların olası bir üretim sonucunda karakteristik parametrelerinin belirlenmesi için kullanılabilirliğini göstermektedir. Böylece deneysel süreci planlarken yol gösterici bilgiler modelleme ile elde edilebilmektedir.

İlerleyen araştırmalarda metal yarıiletken kontakların farklı sıcaklıklardaki çalışma şartlarının araştırılması amacıyla, Schottky diyotların sıcaklığa bağlı akım-gerilim karakteristiklerini incelemek amacıyla modelleme çalışmaları yapılarak literatüre daha farklı katkılar yapılması planlanmaktadır.

Kaynakça

1. Bardeen, J. 1947. "Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact", Physical Review, 71(10), 717.
2. Cowley, A., Sze, S. 1965. "Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems", Journal of Applied Physics, 36(10), 3212-3220.
3. Spitzer, W., Mead, C. 1963. "Barrier Height Studies on Metal-Semiconductor Systems", Journal of Applied Physics, 34(10), 3061-3069.
4. Schottky, W., Stormer, R., Waibel, F. 1931. "Rectifying Action at the Boundary between Cuprous Oxide and Applied Metal Electrodes", Z. Hoch Frequenztechnik, 37, 162.
5. Schottky, W. 1991. Semiconductor Theory of the Blocking Layer: World Scientific
6. Mott, N. F., Note on the Contact between a Metal and an Insulator or Semi-Conductor, Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 568-572, 1938.
7. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. 1988. Metal-Semiconductor Contacts Oxford: Clarendon Press
8. Myburg, G., Auret, F., Meyer, W., Louw, C., Van Staden, M. 1998. "Summary of Schottky Barrier Height Data on Epitaxially Grown N-and P-Gaas", Thin solid films, 325(1-2), 181-186.
9. Tung, R. T. 2014. "The Physics and Chemistry of the Schottky Barrier Height", Applied Physics Reviews, 1(1), 011304.
10. Tung, R. T. 2001. "Formation of an Electric Dipole at Metal-Semiconductor Interfaces", Physical review B, 64(20), 205310.
11. Ayyıldız, E., Türüt, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S., Sağlam, M., Yoğurtçu, Y. K. 1996. "Effect of Series Resistance on the Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Diodes in the Presence of Interfacial Layer", Solid-State Electronics, 39(1), 83-87.
12. Ayyıldız, E., Türüt, A. 1999. "The Effect of Thermal Treatment on the Characteristic Parameters of Ni/-, Ti/- and Niti Alloy/N-Gaas Schottky Diodes", Solid-State Electronics, 43(3), 521-527.

13. Kahveci, O., Akkaya, A., Ayyildiz, E., Türüt, A. 2017. "Comparison of the Ti/N-Gaas Schottky Contacts' parameters Fabricated Using Dc Magnetron Sputtering and Thermal Evaporation", *Surface Review and Letters*, 24(04), 1750047.
14. Akkaya, A. 2018. "The Current-Voltage and Capacitance-Voltage Characterization of the Au/Methylene Blue/N-Gaas Organic-Modified Schottky Diodes", *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 19(3), 756-767.
15. Grillo, A., Di Bartolomeo, A. 2021. "A Current-Voltage Model for Double Schottky Barrier Devices", *Advanced Electronic Materials*, 7(2), 2000979.
16. Çaldıran, Z. 2021. "Modification of Schottky Barrier Height Using an Inorganic Compound Interface Layer for Various Contact Metals in the Metal/P-Si Device Structure", *Journal of Alloys and Compounds*, 865, 158856.
17. Aboelfotoh, M. 1987. "Schottky-Barrier Behavior of a Ti-W Alloy on Si (100)", *Journal of applied physics*, 61(7), 2558-2565.
18. Akkaya, A. 2021. "Au-Ag Binary Alloys on N-Gaas Substrates and Effect of Work Functions on Schottky Barrier Height", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(13), 17448-17461.
19. Beştaş, A., Yazıcı, S., Aktaş, F., Abay, B. 2014. "Double Gaussian Distribution of Barrier Height for Fecrnic Alloy Schottky Contacts on P-Si Substrates", *Applied surface science*, 318, 280-284.
20. Aboelfotoh, M., Tu, K.-N. 1986. "Schottky-Barrier Height of a Ti-W Alloy on N-Type and P-Type Si", *Physical Review B*, 33(10), 6572.
21. Hasegawa, H., Ohno, H. 1986. "Unified Disorder Induced Gap State Model for Insulator-Semiconductor and Metal-Semiconductor Interfaces", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*, 4(4), 1130-1138.
22. Spicer, W., Chye, P., Skeath, P. R., Su, C. Y., Lindau, I. 1979. "New and Unified Model for Schottky Barrier and Iii-V Insulator Interface States Formation", *Journal of Vacuum Science and Technology*, 16(5), 1422-1433.
23. Tsukamoto, D., Shiro, A., Shiraishi, Y., Sugano, Y., Ichikawa, S., Tanaka, S., Hirai, T. 2012. "Photocatalytic H₂O₂ Production from Ethanol/O₂ System Using TiO₂ Loaded with Au-Ag Bimetallic Alloy Nanoparticles", *ACS catalysis*, 2(4), 599-603.
24. Küp, S., Taşer, A., Kanmaz, İ., Güzeldir, B., Sağlam, M. 2019. "Effects of Au-Ag and Au-Cu Alloy Ratios on the Temperature Dependent Current-Voltage Characteristics of Au-Ag/N-Gaas/in and Au-Cu/N-Gaas/in Schottky Diodes", *Materials Today: Proceedings*, 18, 1936-1945.
25. Glesener, J., Morrish, A., Snail, K. 1991. "A Thin-Film Schottky Diode Fabricated from Flame-Grown Diamond", *Journal of applied physics*, 70(9), 5144-5146.
26. Cai, L., Wang, L., Huang, J., Yao, B., Tang, K., Zhang, J., Qin, K., Min, J., Xia, Y. 2013. "Preparation of Polycrystalline Cdznte Thick Film Schottky Diode for Ultraviolet Detectors", *Vacuum*, 88, 28-31.
27. Bishop, W. L., Crowe, T. W., Mattauch, R. J., Planar Gaas Schottky Diode Fabrication: Progress and Challenges, *Proc. 4th Int. Space THz Tech. Symp., Los Angeles, CA. 1993.*
28. Chen, D., Huang, Y., Liu, B., Xie, Z., Zhang, R., Zheng, Y., Wei, Y., Narayanamurti, V. 2009. "High-Quality Schottky Contacts to N-in Ga N Alloys Prepared for Photovoltaic Devices", *Journal of Applied Physics*, 105(6), 063714.
29. Bouzid, F., Pezzimenti, F., Dehimi, L., Megherbi, M. L., Della Corte, F. G. 2017. "Numerical Simulations of the Electrical Transport Characteristics of a Pt/N-Gan Schottky Diode", *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(9), 094301.
30. Kaushal, P., Chand, S., Osvald, J. 2013. "Current-Voltage Characteristics of Schottky Diode Simulated Using Semiconductor Device Equations", *International Journal of Electronics*, 100(5), 686-698.
31. Rabehi, A., Amrani, M., Benamara, Z., Akkal, B., Ziane, A., Guermoui, M., Hatem-Kacha, A., Monier, G., Gruzza, B., Bideux, L. 2018. "Simulation and Experimental Studies of Illumination Effects on the Current Transport of Nitridated Gaas Schottky Diode", *Semiconductors*, 52(16), 1998-2006.
32. Chand, S., Kaushal, P., Osvald, J. 2013. "Numerical Simulation Study of Current-Voltage Characteristics of a Schottky Diode with Inverse Doped Surface Layer", *Materials science in semiconductor processing*, 16(2), 454-460.

33. Husain, M. K., Li, X. V., de Groot, C. H. 2009. "Observation of Negative Differential Conductance in a Reverse-Biased Ni/Ge Schottky Diode", IEEE electron device letters, 30(9), 966-968.
34. Donoval, D., Snowden, C. M., Barus, M., Racko, J., Bedlek, M. 1994. "Critical Analysis of the Schottky Boundary Condition for Numerical Simulation of Schottky and Mesfet Structure", Physica Scripta, 50(4), 432.
35. Li, W., Nomoto, K., Jena, D., Xing, H. G. 2020. "Thermionic Emission or Tunneling? The Universal Transition Electric Field for Ideal Schottky Reverse Leakage Current: A Case Study in B-Ga₂O₃", Applied Physics Letters, 117(22), 222104.
36. Osvald, J. 2007. "Numerical Simulation of Tunneling Current in Gan Schottky Diodes", Journal of applied physics, 101(10), 103701.
37. Takano, H., Kimura, M., Ando, T., Niemcharoen, S., Yasumura, Y., Sato, K. 2000. "Optical Response of Planar Mo/N-Si/Mo Structures with Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends", Solid-State Electronics, 44(12), 2161-2164.
38. Mamor, M., Dufour-Gergam, E., Finkman, L., Tremblay, G., Meyer, F., Bouziane, K. 1995. "Wsi Schottky Diodes: Effect of Sputtering Deposition Conditions on the Barrier Height", Applied surface science, 91(1-4), 342-346.
39. Bouziane, K., Mamor, M., Meyer, F. 2005. "Dc Magnetron Sputtered Tungsten: W Film Properties and Electrical Properties of W/Si Schottky Diodes", Applied Physics A, 81(1), 209-215.
40. Mamor, M., Finkman, E., Meyer, F., Bouziane, K. 1994. "W/Si Schottky Diodes: Effect of Metal Deposition Conditions on the Barrier Height", MRS Online Proceedings Library (OPL), 356.
41. Baltakesmez, A., Tekmen, S., Güzeldir, B. 2020. "Temperature Dependent Current-and Capacitance-Voltage Characteristics of W/N-Si Structures with Two-Dimensional Ws₂ and Three-Dimensional Wo₃ Interfaces Deposited by Rf Sputtering Technique", Materials Science in Semiconductor Processing, 118, 105204.
42. Kumari, P., Rao, V. R., High Performance W/N-Si Schottky Diode Using Black Phosphorus as an Interlayer, 2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). 1-3, 2019.
43. Bauza, D. 1993. "Effect of Deep Traps on the Capacitance-Voltage Plots of Schottky Barrier Diodes: Application to the Study of Sputter-Etched Ti-W/N-Si Diodes", Journal of applied physics, 73(4), 1858-1865.
44. Okada, N., Uchida, N., Ogawa, S., Endo, K., Kanayama, T., Cluster-Preforming-Deposited Amorphous Wsi N (N= 12) Insertion Film of Low Sbh and High Diffusion Barrier for Direct Cu Contact, 2017 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). 22.25. 21-22.25. 24, 2017.
45. Eizenberg, M., Tu, K.-N. 1982. "Formation of Shallow Silicide Contacts of High Schottky Barrier on Si: Alloying Pd and Pt with W Versus Alloying Pd and Pt with Si", Journal of Applied Physics, 53(3), 1577-1585.
46. Chang, P., Su, Y., Lee, K., Yu, C., Chang, S., Liu, C. 2010. "Improved Performance of Gan-Based Schottky Barrier Photodetectors by Annealing Ir/Pt Schottky Contact in O₂", Journal of Alloys and Compounds, 504, S429-S431.
47. Jeon, C. M., Jang, H. W., Lee, J.-L. 2003. "Thermally Stable Ir Schottky Contact on Algan/Gan Heterostructure", Applied physics letters, 82(3), 391-393.
48. Kohli, S., Niles, D., Rithner, C. D., Dorhout, P. K. 2002. "Structural and Optical Properties of Iridium Films Annealed in Air", JCPDS-International Centre for Diffraction Data, Advances in X-ray Analysis, 45, 352-358.
49. Fain Jr, S., McDavid, J. 1974. "Work-Function Variation with Alloy Composition: Ag-Au", Physical Review B, 9(12), 5099.
50. Turut, A., Yıldız, D., Karabulut, A., Orak, İ. 2020. "Electrical Characteristics of Atomic Layer Deposited Au/Ti/Hfo₂/N-Gaas Mis Diodes in the Wide Temperature Range", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 31(10), 7839-7849.
51. Akkaya, A., Esmer, L., Kantar, B. B., Çetin, H., Ayyıldız, E. 2014. "Effect of Thermal Annealing on Electrical and Structural Properties of Ni/Au/N-Gan Schottky Contacts", Microelectronic engineering, 130, 62-68.
52. Kittel, C. 2021. "Introduction to Solid State Physics Eighth Edition".
53. Sze, S. M., Li, Y., Ng, K. K. 2021. Physics of Semiconductor Devices John wiley & sons.
54. Cheung, S., Cheung, N. 1986. "Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics", Applied physics letters, 49(2), 85-87.

55. Norde, H. 1979. "A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance", *Journal of applied physics*, 50(7), 5052-5053.
56. Baik, D., Cho, S. 1999. "Application of Sol-Gel Derived Films for ZnO/N-Si Junction Solar Cells", *Thin Solid Films*, 354(1-2), 227-231.
57. Zafar, S., Cabral Jr, C., Amos, R., Callegari, A. 2002. "A Method for Measuring Barrier Heights, Metal Work Functions and Fixed Charge Densities in Metal/SiO₂/Si Capacitors", *Applied physics letters*, 80(25), 4858-4860.
58. Rankin, D. W., *Crc Handbook of Chemistry and Physics*, Edited by David R. Lide. 2009, Taylor & Francis.
59. Tōyama, N. 1988. "Variation in the Effective Richardson Constant of a Metal-Silicon Contact Due to Metal-Film Thickness", *Journal of applied physics*, 63(8), 2720-2724.
60. Wang, Q., Xu, B., Sun, J., Liu, H., Zhao, Z., Yu, D., Fan, C., He, J. 2014. "Direct Band Gap Silicon Allotropes", *Journal of the American Chemical Society*, 136(28), 9826-9829.
61. Jiménez-Leube, F., Clement, M., Sanz Maudes, J., Rodríguez, T. 1997. "Electrical Characterization of Iridium Schottky Contacts to Silicon: Early Stages of Silicidation", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 15(4), 903-907.
62. Akkaya, A., Ayyıldız, E. 2020. "Automation Software for Semiconductor Research Laboratories: Electrical Parameter Calculation Program (Seclas-Pc)", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 29(13), 2050215.
63. Durcan, C. A., Balsano, R., LaBella, V. P. 2015. "Time Dependent Changes in Schottky Barrier Mapping of the W/Si (001) Interface Utilizing Ballistic Electron Emission Microscopy", *Journal of Applied Physics*, 117(24), 245306.
64. Cohen, M. L. 1979. "Schottky and Bardeen Limits for Schottky Barriers", *Journal of Vacuum Science and Technology*, 16(5), 1135-1136.