



MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
HENDESE TEKNİK BİLİMLER VE MÜHENDİSLİK DERGİSİ
MUŞ ALPARSLAN UNIVERSITY
JOURNAL OF HENDESE TECHNICAL SCIENCES AND ENGINEERING

Muş Alparslan Üniversitesi Külliyesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 49250, Muş, Türkiye

<https://dergipark.org.tr/en/pub/hendese/board>

e-ISSN: 3023-7777

HENDESE Nisan 2026, 3 (1): 1-37

Cilt / Volume: 3

Sayı / Issue: 1

Yıl / Year: 2026

**Doğal Oksit Arayüz Tabakasının Metal-Oksit-
Yarıiletken (Al/n-Si/Al) Yapısının Elektriksel
Özelliklerine Etkisi**

Effect of Natural Oxide Interface Layer on the
Electrical Properties of (Al/n-Si/Al) Metal-Oxide-
Semiconductor Structure

Halil SEYMEN¹

¹Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Muş, TÜRKİYE

h.seymen@alparslan.edu.tr —ORCID> [0000-0001-5115-952X](https://orcid.org/0000-0001-5115-952X)

Makale Bilgisi / Article Information

Makale Türü / Article Types	Araştırma Makalesi / Research Article
Alınış Tarihi / Received	15 Mart / March 2026
Kabul Tarihi / Accepted	28 Nisan / April 2026

Yıl / Year: 2026 | **Cilt / Volume:** 3 | **Sayı / Issue:** 1 | **Sayfa / Pages:** 15-24

Atıf Formatı / Cite as: H. Seymen, "Doğal oksit arayüz tabakasının metal-oksit-yarıiletken (Al/n-Si/Al) yapısının elektriksel özelliklerine etkisi," *Hendese Journal of Technical Sciences and Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-24, 2026, doi: 10.5281/zenodo.19899920.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Halil SEYMEN



Doğal Oksit Arayüz Tabakasının Metal-Oksit-Yarıiletken (Al/n-Si/Al) Yapısının Elektriksel Özelliklerine Etkisi

Halil SEYMEN *¹ 

¹ Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Muş, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 15.03.2026, Kabul / Accepted: 28.04.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2026)

Anahtar Kelimeler

Arayüzey Halleri,
Schottky Diyodu,
Omik Kontak,
Seri Direnç,
Metal-Yalıtkan-
Yarıiletken (MIS)
Schottky Diyodu,
C-V

ÖZ

Günümüz teknolojisinde geniş bir kullanım alanına sahip olan Schottky kontaklar, katkılama düzeyine bağlı olarak iletkenliklerinin ayarlanabilmesi sayesinde hem katihal fiziği hem de malzeme bilimi araştırmalarının odak noktasında yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında, *n*-tipi silisyum (Si) taban üzerine alüminyum (Al) metali kullanılarak hem doğrultucu hem de omik kontaklardan oluşan Al/n-Si/Al Schottky diyot yapıları üretilmiştir. Araştırmanın temel amacı; arayüzey durumları ve seri direncin diyotun karakteristik parametreleri üzerindeki etkisini analiz etmektir. Deneysel süreçte, kimyasal ve fiziksel temizlik aşamaları özdeş olan iki numune hazırlanmıştır. İlk numunenin (Diyot 1) doğrultucu kontağı omik kontakla aynı gün oluşturulurken; ikinci numunenin doğrultucu kontağı, çevresel etkileri gözlemlemek amacıyla yedi gün sonra aynı koşullarda tamamlanmıştır. Numunelerin akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri üzerinden; engel yüksekliği ($e\Phi_{bn}$), idealite faktörü (*n*), donör yoğunluğu (*N_d*), doyma akımı (*I_o*) ve seri direnç (*R_s*) değerleri hesaplanmış; elde edilen veriler Cheung fonksiyonları ile doğrulanmıştır. Ayrıca, arayüzey özelliklerinin cihaz performansı üzerindeki etkisi kapasitans-voltaj (*C-V*) ve kapasitans-frekans (*C-f*) analizleri ile detaylandırılarak bariyer yükseklikleri ve idealite faktörleri belirlenmiştir.

Effect of Natural Oxide Interface Layer on the Electrical Properties of (Al/n-Si/Al) Metal-Oxide-Semiconductor Structure

Keywords

Interface States,
Schottky Diode,
Ohmic Contact,
Series Resistor,
Metal-Insulator-
Semiconductor (MIS)
Schottky Diode,
C-V

ABSTRACT

Schottky contacts, which are widely used in contemporary technologies, are among the most prominent research topics in both solid-state physics and materials science due to the ability to tune their conductivity based on doping levels. In this study, Al/n-Si/Al Schottky diode structures, consisting of both rectifying and ohmic contacts, were fabricated by depositing aluminum (Al) onto n-type silicon (Si) substrates. The primary objective of the research is to analyze the effects of interface states and series resistance on the characteristic parameters of the diode. During the experimental process, two samples were prepared using identical chemical and physical cleaning procedures. For the first sample (Diode 1), the rectifying contact was formed on the same day as the ohmic contact, while the rectifying contact of the second sample was completed seven days later under the same conditions to observe environmental effects. Based on the current-voltage (*I-V*) measurements of the samples, parameters such as barrier height ($e\Phi_{bn}$), ideality factor (*n*), donor density (*N_d*), saturation current (*I_o*), and series resistance (*R_s*) were calculated. The obtained data were further verified using Cheung functions. Additionally, the impact of interface properties on device performance was detailed through capacitance-voltage (*C-V*) and capacitance-frequency (*C-f*) analyses to determine barrier heights and ideality factors.



Published by Muş Alparslan University, Muş, Türkiye
This is an open access article under the CC BY-NC license

*Corresponding Author / Sorumlu Yazar: h.seymen@alparslan.edu.tr

Cilt / Volume: 3

Sayı / Issue: 1

Atıf Formatı / Cite as: H. Seymen, "Doğal oksit arayüz tabakasının metal-oksit-yarıiletken (Al/n-Si/Al) yapısının elektriksel özelliklerine etkisi," *Hendese Journal of Technical Sciences and Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-24, 2026, doi: 10.5281/zenodo.19899920.

Doi: 10.5281/zenodo.19899920

1. GİRİŞ

Mikro-elektronik dünyasındaki teknolojik ilerlemenin temel itici gücü, devre elemanlarının giderek küçülmesidir. Bu bağlamda, temelleri Schottky tarafından atılan Schottky diyotlar, modern elektronik uygulamalarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve yoğun araştırma konularından biri olmuştur. Metal-yarıiletken (MS) kontakların karakteristik özelliklerinin tam olarak anlaşılması, bu bileşenlerin elektronik devrelerdeki elektriksel iletkenlik potansiyelinden maksimum düzeyde faydalanılabilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

Metal ile yarıiletken arayüzüne bir oksit tabakasının dahil edilmesi, yapıyı Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) formuna dönüştürür [1], [2]. Bu yalıtkan tabaka, kontrollü bir şekilde oluşturulabileceği gibi, numunenin dış etkenlere maruz kalması sonucu doğal bir oksit katmanı olarak da ortaya çıkabilir [3]. Arayüzeyde meydana gelen bu katman, kalınlığına bağlı olarak diyotun temel elektriksel parametrelerini doğrudan etkiler [2], [4]. Schottky, engel yüksekliğinin arayüzey durumlarının enerji dağılımı ve uygulanan voltajla kontrol edildiğini öne sürerek; ileri ve ters beslem altındaki kapasite ve kondüktans değerlerinin analitik olarak hesaplanabileceğini kanıtlamıştır [5], [6].

Tarihsel süreçte ilk olarak dedektör amacıyla kullanılan metal-yarıiletken doğrultucular, mikrodalga radarlarının gelişimiyle birlikte nokta kontak diyotları olarak yeniden stratejik önem kazanmıştır. Bu yapılar günümüzde özellikle mikrodalga dedektörleri ve frekans dönüştürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Modern elektrik endüstrisinde ise Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) ve (MS) yapıları, yeni nesil optoelektronik cihazların performansını belirleyen temel bileşenler olarak kabul edilmektedir [8].

Seymen ve ark. [27], yaptıkları deneysel çalışmada ($I-V$) ve ($C-V$) ölçümleri kullanılarak SiO_2 ara katmanlı $\text{Au}/n\text{-Si}$ yapılarının idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnci gibi önemli elektriksel parametreleri araştırıp, SiO_2 ara katmanının varlığının bariyer yüksekliğini ve arayüz durum yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirdiğini ve elektro-optik cihaz performansının iyileştirilmesi için potansiyel taşıdığını ortaya koymuşlar.

Bu bağlamda, çalışmamızda n-tipi silisyum (Si) taban üzerine alüminyum (Al) metali kullanılarak oluşturulan $\text{Al}/n\text{-Si}/\text{Al}$ Schottky diyot yapılarının karakteristik özellikleri mercek altına alınmıştır. Alüminyumun seçilme nedeni hem düşük maliyetli olması hem de n-tipi Si ile uygun kontak özelliklerini sergilemesidir. Bu çalışma, özellikle metal ile yarı iletken arayüzeyinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlerin diyot performansı üzerindeki etkilerini analiz etmeyi hedeflemektedir.

Deneysel sürecin en kritik aşamalarından biri, yüzeyin dış etkilere maruz bırakılma süresinin elektriksel parametreler üzerindeki etkisidir. Bu amaçla, fiziksel ve kimyasal temizlik süreçleri özdeş olan iki numuneden birinin doğrultucu kontağı hemen oluşturulurken (Diyot 1); diğer numunenin kontağı ise kontrollü bir şekilde yedi günlük bir bekleme süresinin

ardından tamamlanmıştır. Bu bir haftalık süre, yarı iletken yüzeyinde doğal bir oksit tabakasının oluşum hızını ve bu tabakanın arayüzey halleri ile seri direnç üzerindeki modifikasyonlarını gözlemlemek adına stratejik bir öneme sahiptir. Bekleme süresinin diyotun engel yüksekliği ($e\Phi_{bn}$), idealite faktörü (n) ve donör yoğunluğu (ND) gibi temel parametrelerinde yarattığı değişimler, akım-voltaj ($I-V$) ve kapasitans-frekans ($C-f$) analizleri üzerinden detaylandırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Numunelerin hazırlanma süreci, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Prosrad Laboratuvarı bünyesinde bulunan, yüksek vakum kapasitesine sahip "AUTO 306 Vacuum Coater with Turbo Molecular Pumping System" cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buharlaştırma işlemleri sırasında vakum seviyesi hassasiyetle kontrol edilerek metal kaplama kalitesi standardize edilmiştir.

Hazırlanan diyotların elektriksel karakterizasyonu ise Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Numunelere ait akım-voltaj ($I-V$) ve kapasitans ölçümleri, yüksek çözünürlüklü veri toplama yeteneğine sahip "KEITHLEY 6487 Picoammeter Voltage Source" cihazı yardımıyla alınmıştır. Bu cihaz, özellikle düşük akımların (pikoamper seviyesinde) hassas ölçümü ve voltaj kaynağı olarak stabilitesi sayesinde diyot parametrelerinin güvenilir bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır.

2.1. Numunelerin Kimyasal ve Mekanik Temizlenmesi

Deneysel çalışmada, [100] yönelimli, 350 μm kalınlığında ve 15 $\Omega\text{-cm}$ öz dirençli, fosfor (P) katkılı n+ tipi silisyum taban kullanılmıştır. Bu taban üzerine, LPE (Sıvı Faz Epitaksi) tekniğiyle 15 μm kalınlığında, 2 $\Omega\text{-cm}$ öz dirençli ve antimon (Sb) katkılı n-tipi bir epitaksiyel tabaka büyütülmüştür. Kristal yapının kalitesini korumak ve başarılı sonuçlar elde etmek amacıyla numuneler; organik ve metalik kalıntılardan arındırılmak üzere standart RCA temizlik prosedüründen [9] geçirilmiş, mekanik ve kimyasal temizlik işlemleri titizlikle uygulanmıştır.

Kaplama kullanılan Al malzemesi, metanol içinde beş dakika ultrasonik banyo cihazında temizlendi. Numuneler, kaplama ünitesine yerleştirilmeden önce kapsamlı bir yüzey hazırlık sürecinden geçirilmiştir. Kristal yüzeyindeki yapısal kusurları ve organik olarak bulaşan kirleri yüzeyde minimize etmek amacıyla uygulanan ardışık temizleme protokolü şu adımları içermektedir: İlk olarak izopropil alkol banyosu ile yüzeydeki yağ ve organik kalıntılar uzaklaştırılmıştır. Oksit tabakasını ve safsızlıkları gidermek için numuneler sırasıyla; sulandırılmış hidroflorik asit (HF), seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl, 1/10 oranında) ve tekrar sulandırılmış HF çözeltilerine daldırılmıştır. Kimyasal kalıntıların tamamen giderilmesi için işlem saf su ile sonlandırılmıştır [10].

2.2. Al/n-Si/Al Schottky Diyotunun Yapılması

Kristal numuneler, parlatılmış yüzeyleri altlık ile temas edecek şekilde, potadan 6 cm yükseklikteki numune tutucuya yerleştirilmiştir. Omik kontak oluşumu iki aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, izopropil alkol ile temizlenmiş

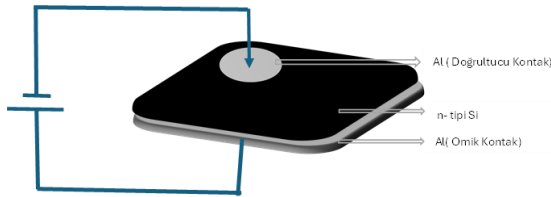
saf alüminyum (Al), 10^{-7} Torr (mg Hg) basınçlı vakum ortamında numune yüzeyine termal olarak buharlaştırılmıştır. Ardından, metal-yarıiletken ara yüzeyinde elektriksel iletimi optimize etmek amacıyla numuneler $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 dakika boyunca ısıtılma (tavlamaya) tabi tutulmuştur. Doğrultucu kontak için yüzde (%99,95) saf Al kullanıldı. Numunelerin hazırlık aşamasında, yüzey bulaşmayı gidermek için Al buharlaştırma öncesinde dairesel maskeler ve numuneler seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl:H₂O; 1:10) içerisinde ultrasonik olarak temizlenmiştir. Kristal yüzeyinde kontak geometrisini oluşturmak adına n-Si kristalinin parlak tarafına 1 mm çapında dairesel maskeler yerleştirilmiştir. Bu düzenek, potadan 6 cm yükseklikteki sehpaye konumlandırılarak 10^{-7} Torr basınç altında saf Alüminyum buharlaştırma işlemiyle metal kontaktlar tamamlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, n-tipi silisyum (Si) kristal tabanlar kullanılarak iki adet Al/n-Si/Al Schottky diyot yapısı imal edilmiştir. Deney sürecinde izlenen adımlar aşağıda detaylandırılmıştır:

Öncelikle, n-tipi Si kristalinden kesilen iki parça, yüzeydeki safsızlıkları gidermek amacıyla aynı deneysel koşullarda standart kimyasal temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Temizleme işleminin ardından numuneler, yüksek vakumlu buharlaştırma sistemine yerleştirilerek mat yüzeylerine yüksek saflıkta alüminyum (Al) metali kaplanmıştır. Metal-yarıiletken arayüzeyinde düşük dirençli bir geçiş sağlamak amacıyla numuneler, azot atmosferinde $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 dakika boyunca ısıtılma (tavlama) tabi tutulmuş; böylece kararlı omik kontaktlar elde edilmiştir.

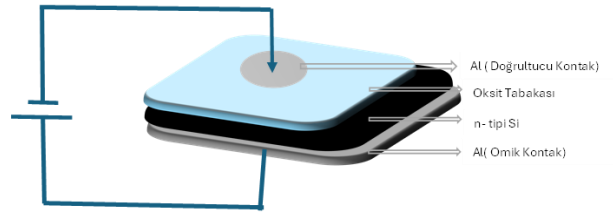
Diyotların arayüzey özelliklerini ve zamana bağlı değişimlerini incelemek amacıyla doğrultucu kontaktların oluşturulma süreçleri farklılaştırılmıştır:

Diyot 1: Omik kontak hazırlığından bir gün sonra buharlaştırma cihazına alınarak ön yüzeyine saf Al kaplanmıştır.



Şekil 1. Diyot 1 (Al/n-Si/Al) (MS)

Diyot 2: Aynı şartlar altında hazırlanan ikinci numune, yedi gün (bir hafta) bekletildikten sonra doğrultucu kontağı oluşturulmak üzere saf Al ile kaplanmıştır.



Şekil 2. Diyot 2 (Al/n-Si/Oksit/Al) (MOS).

Bu stratejik bekleme süresi, yüzeyde oluşan doğal oksit tabakasının ve arayüzey hallerinin Schottky bariyeri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz etmeye olanak tanımıştır. Her iki numunenin de fiziksel ve kimyasal hazırlık parametreleri, doğrultucu kontak zamanlaması haricinde tamamen özdeş tutulmuştur.

2.3. Schottky Diyotlarında Akım-Gerilim Ölçümleri

Diyotların akım-gerilim ($I-V$) karakteristikleri, KEITHLEY 6487 PICOAMMETER VOLTAGE SOURCE kullanılarak oda sıcaklığında belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, cihazların elektriksel davranışını analiz etmek amacıyla ileri beslem (forward bias) ve ters beslem (reverse bias) $\ln I-V$ grafikleri oluşturulmuştur. İncelenen diyotlara ait karakteristik $\ln I-V$ eğrileri Şekil 1'de sunulmuştur. Diyotların $\ln I-V$ grafiğinin doğru kesiminin eğimi kullanılarak;

$$I_n = AN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{1/2 m_n^* V_x^2}{kT} \right) dV_x \quad (1)$$

denkleminde yerine yazılarak diyotların temel parametreleri hesaplanmıştır. Burada donör yoğunluğunu yarıiletkendeki elektronların etkin kütleleri, $((N_d)(m_n^*)k)$ Boltzmann sabiti ve (T) mutlak sıcaklıktır. İleri beslem karakteristiği üzerinden diyotun ideal çalışma davranışını gösteren (n) idealite faktörü belirlenmiştir. Ayrıca, doğrusal bölgenin düşey eksenini kestiyi noktadan elde edilen (I_0) doyuma akımı değerleri kullanılarak hem ters hem de doğru beslem durumları için akım yoğunlukları alınarak ters ve doğru beslem için;

$$N_d = 2 \left(\frac{2\mu m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-E_f/kT) \quad (2)$$

denkleminde göre engel yükseklikleri bulunur. Diyotların karakteristik parametrelerini belirlemek amacıyla, deneysel veriler ilgili teorik denklemlerde yerine konularak engel yükseklikleri (ϕ_B) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda n-tipi Si için Richardson sabiti $R = 112\text{ A/cm}^2\text{K}^2$ ve diyot etkin alanı $A = 7,85 \cdot 10^{-8}\text{ cm}^2$ olarak alınmıştır. Özdirenci $\rho = 15\text{ }\Omega\text{-cm}$ olan n-tipi silisyum kristalinin elektriksel özelliklerini belirlemek için oda sıcaklığında ($T=3000\text{K}$) mobilite değeri $\mu = 1350\text{ cm}^2\text{Vxsn}$ ve iletkenlik bandı hal yoğunluğu $N_c = 2,4 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ verileri kullanılmıştır. Bu parametreler yardımıyla kristalin donör yoğunluğu (N_d) ve Fermi enerji seviyesi (E_f) değerleri tespit edilmiştir.

Bu değerler,

$$N_d = N_c \exp(-E_F / kT) \quad (3)$$

$$N_d = 1 / e\rho\mu_n \quad (4)$$

denklemlerinde yerine koyulduğunda, donör yoğunluğu $ND=154 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ve Fermi enerji seviyesi $E_f = 0,21 \text{eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, kullanılan yarı iletkenin yapısal ve elektriksel özelliklerini doğrudan yansıtmaktadır. Diyotun ideal çalışma karakteristiğini belirleyen idealite faktörünün (n) hesaplanmasında ise temel akım denklemlerinden yararlanılmıştır. Bu bağlamda, taşıyıcı iletim mekanizmasını açıklayan termiyonik emisyon teorisinin temel denklemi;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

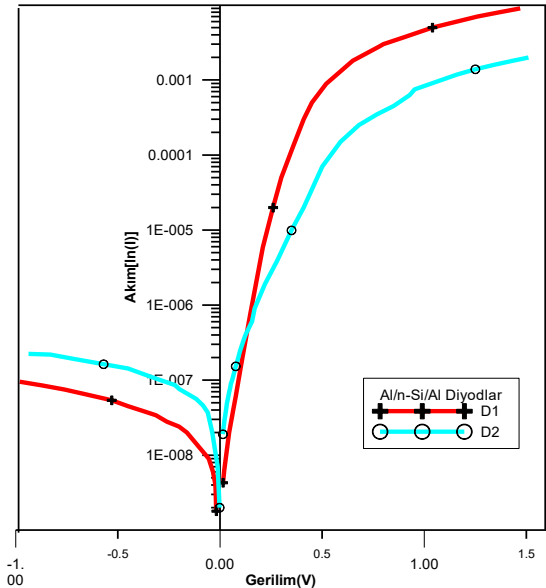
şeklinde yazılabilir. Bu ifadede n idealite faktörünü temsil etmektedir. Uygulanan gerilimin $eV \gg 3kT$ koşulunu sağlaması durumunda, denklemdeki "1" terimi ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bu yaklaşımla denklemin doğal logaritması alınıp V parametresine göre türevi düzenlendiğinde, idealite faktörü şu formülle ifade edilir:

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln I} \quad (6)$$

Buradaki terimi, deneysel olarak elde edilen $I \frac{dV}{d \ln I} - V$ grafiğinin doğrusal bölgesindeki eğimin tersinden doğrudan hesaplanabilmektedir.

3. DENEYSSEL BULGULAR

"KEİTHLEY 6487 Picoammeter Voltage Source" cihazı kullanılarak alınan veriler yardımıyla çizilen grafik aşağıda görülmektedir.



Şekil 3. Al/n-Si Schottky diyotlarında $\ln I-V$ değişimi.

Deneysel veriler doğrultusunda, $\ln I-V$ grafiğinin doğrusal bölgesinden elde edilen eğim ($dV/d(\ln I)$) (6) numaralı

denklemlerde kullanılarak her iki diyot için idealite faktörleri belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Diyot 1 için $n1=1,32$ ve Diyot 2 için ise $n2=1,45$ değerlerine ulaşılmıştır. İdealite faktörlerinin teorik birim değerden ($n=1$) büyük çıkması, metal-yarıiletken ara yüzeyinde oluşan yalıtkan tabaka ve bu bölgedeki arayüzey hallerinin (NSS) etkisine atfedilmektedir [11].

Doyma akım yoğunluğu;

$$I_n \int_0^d \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) dx = \epsilon_s \epsilon_0 kT / N_d e^2 d \quad (7)$$

denklemden dolayı

$$I_0 = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{BN}}{kT}\right) \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden engel yüksekliği için

$$e\phi_{BN} = kT \ln(AR_n^* T^2 / I_0) \quad (9)$$

elde edilir. Doyma akım yoğunlukları ve engel yükseklikleri akım gerilim grafiğinden okunup yerine yazılarak Çizelge 1'deki gibi bulundu. Numunelerin etkin alanları $A=7.85 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ ve numune sıcaklığı oda sıcaklığı ($T=300 \text{ }^{\circ}\text{K}$) dir.

Çizelge 1. Doyma akım yoğunlukları ve engel yükseklikleri akım gerilim grafiğinden elde edilen değerleri.

Diyotlar	n	I0 (düz beslem)	I0 (ters beslem)	ØBn	Rs
Diyot (1)	1,32	$3,5 \cdot 10^{-9} \text{ (A)}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ (A)}$	0,83eV	17,2
Diyot (2)	1,45	$2,8 \cdot 10^{-8} \text{ (A)}$	$8 \cdot 10^{-8} \text{ (A)}$	0,89eV	11,58

Ayrıca temel akım ifadesi

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

denklemden türetilen

$$V = RAJ + n\phi_{bn} + (n/\beta) \ln(J/R_n^* T^2) \quad (11)$$

ve

$$dV/d(\ln I) = RI + n/\beta \quad (12)$$

denklemleri ile verilen Cheung fonksiyonları grafiklerinin çizim için, Şekil 2'de verilen doğru beslem, $\ln I-V$ grafiğinin, büyük voltajlara karşılık gelen lineer olmayan kısmına;

$$dV/d(\ln I) = (nkT/q) + R_s I \quad (13)$$

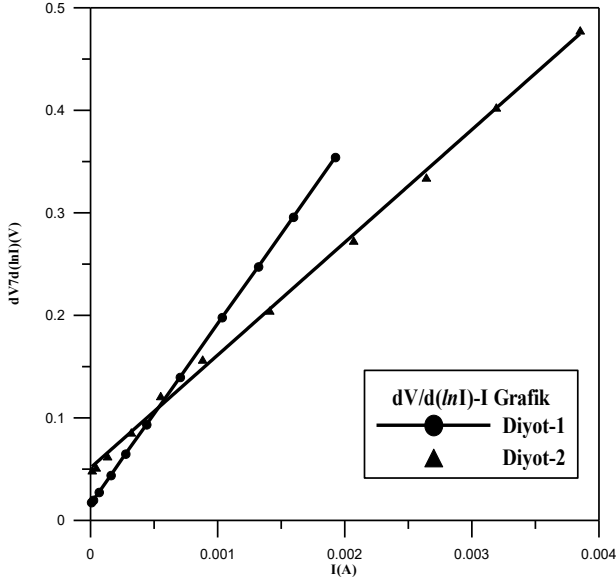
ve

$$H(I) = n\phi_{BN} + IR_s \quad (14)$$

denklemlerine göre $dV/d \ln I-I$ grafikleri çizildi. Diyotların elektriksel parametrelerini daha hassas belirlemek amacıyla $dV/d \ln I-I$ grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerin eğimi,

cihazın nötral bölge seri direncini (R_s) doğrudan vermektedir. Yapılan analizler sonucunda seri direnç değerleri; Diyot 1 için $R_s=17,2 \Omega$, Diyot 2 için ise $R_s=11,58\Omega$ olarak hesaplanmıştır.

Aynı grafiklerin düşey eksenini kestiği noktalar e/kT terimine oranlanarak idealite faktörleri (n) yeniden hesaplanmıştır. Bu yöntemle elde edilen değerleri; Diyot 1 için $n_1=1,31$, Diyot 2 için ise $n_2=1,46$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, önceki hesaplamalarla tutarlılık göstermekte ve seri direnç etkisinin parametreler üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır.



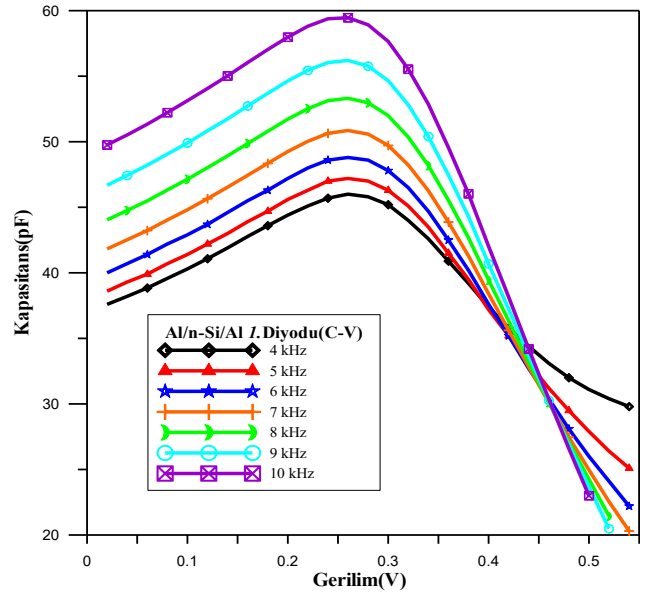
Şekil 4. Diyot 1 ve Diyot 2'nin Schottky diyotlarında $\ln I - V$ grafiğinden elde edilen Cheung Fonksiyonları $dV/d(\ln I) - I$ grafiği.

Elektrik endüstrisinde Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) veya Metal-Yarıiletken (MS) yarı iletken yapılar en yaygın kullanılan doğrultucu kontaklardan biridir. Bu temaslar yeni nesil optoelektroniklerin performansı için çok önemlidir. Bu nedenle yarı iletkenler ve uygulamaları elektronik endüstrisindeki elektronik cihazların önemli bileşenleridir [9].

3.1. Al-n tipi Si Schottky Diyotlarında C-V Karakteristikleri

Al/n-Si Schottky diyotların kapasitans-gerilim (C-V) karakteristikleri, oda sıcaklığında (300^0 K) "Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer" cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler; 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 kHz frekans aralıklarında gerçekleştirilmiş ve bu veriler doğrultusunda hazırlanan karakteristik eğriler Şekil 5 ve 6'te sunulmuştur.

C-V grafikleri analiz edildiğinde, düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru gidildikçe gözlenen kapasitans piklerinin, artan voltaj değerlerine doğru kayma sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 5. (Diyot 1)'nin 4 kHz ile 10 kHz arasında C-V değişimleri.

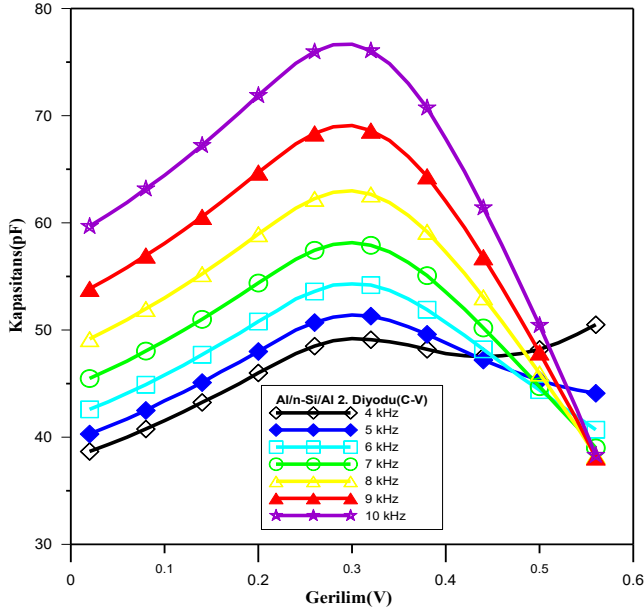
Al/n-Si Schottky diyotların dielektrik davranışlarını ve arayüzey özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen frekans bağımlı C-V ölçümleri, yapıdaki yük iletim mekanizmalarına dair önemli veriler sunmuştur. İlk numune (Diyot-1) için 5-10 kHz frekans aralığında ve 0-0.6 V potansiyel bandında alınan ölçümler sonucunda elde edilen C-V grafiklerinde, frekans artışıyla birlikte kapasitans piklerinin daha yüksek voltaj değerlerine doğru kaydığı ve pik genliklerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Bu olay arayüzey hallerinin (interface states) uygulanan alternatif akım (AC) sinyaline verdiği yanıtla doğrudan ilişkilidir. Düşük frekanslarda, arayüzey halleri AC sinyalini takip edebilecek yeterli zamana sahip olduklarından, toplam kapasitansa ilave bir katkıda bulunmakta ve bu durum yüksek kapasitans piklerinin oluşmasına yol açmaktadır [11]. Ancak frekans yükseldikçe, bu haller sinyalin değişim hızına ayak uyduramamakta; dolayısıyla kapasitansa olan katkıları minimize olarak değerler arınma bölgesi (depletion region) kapasitansına yaklaşmaktadır [12].

Diyot-2 üzerinde 4-10 kHz aralığında gerçekleştirilen geniş kapsamlı ölçümler, her iki numunenin kapasitans davranışları arasındaki belirgin farkları ortaya koymuştur. Şekil 4'te sunulan karşılaştırmalı veriler incelendiğinde, aynı frekans değerlerinde Diyot-1'in sergilediği kapasitans pik değerlerinin, bir hafta bekletilen Diyot-2'ye oranla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Her iki diyotta da ortak bir davranış olarak; artan frekansla birlikte pik değerlerinin küçüldüğü ve pik merkezlerinin pozitif voltaj yönünde hafif bir kayma gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, arayüzey durumlarının düşük frekanslarda AC sinyaliyle eşzamanlı hareket ederek kapasitansı artırdığını, yüksek frekanslarda ise bu etkinin sönümlendiğini doğrulamaktadır [1], [12]. Diyot-1 ve Diyot-2 arasındaki kapasitans genişliği farkı, bekletilme süresine bağlı olarak

arayüzeyde gelişen doğal oksit tabakasının ve arayüzey tuzaklarının yoğunluğundaki değişimin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6. (Diyot 2)'in 4 kHz ile 10 kHz arasında C-V değişimi.

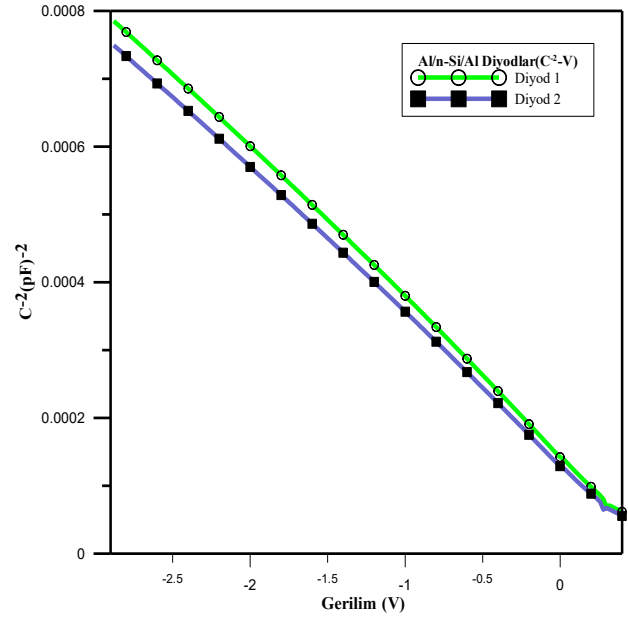
Aynı diyotun 1 MHz yüksek frekans değerinde, 0–0,6 V aralığındaki kapasitans verileri kullanılarak oluşturulan C^2-V grafiği Şekil 7'de sunulmuştur. Schottky engel yapısının karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan;

$$\frac{1}{n} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 N_D \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]} \quad (15)$$

denklemleri aracılığıyla hesaplanan idealite faktörü (n) değerlerinin, daha önce $I-V$ yöntemiyle elde edilen sonuçlarla yüksek uyum sergilediği saptanmıştır. C^2-V grafiğinin gerilim eksenini kestiği noktadan ekstrapolasyon yöntemiyle kesim potansiyeli (V_0) 0,8 eV olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu analizde Fermi enerji seviyesi $E_f=0,30$ V olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca bu doğrunun eğimini

$$\phi_{Bn} = \frac{1}{n} V_0 + E_f \quad (16)$$

denklemleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, engel yükseklikleri sırasıyla $e\phi_{Bn}=0,82$ eV ve $0,89$ eV olarak tespit edilmiştir. (15) numaralı denklem yardımıyla hesaplanan donör yoğunluğu ise $ND=6.8.10^{14}cm^{-3}$ olarak bulunmuştur. Diyotun yüksek frekans (1 MHz) davranışını incelemek amacıyla, -3 V ile 0,5 V aralığındaki ters beslem kapasitans ölçümleri kullanılarak oluşturulan C^2-V grafiği elde edilmiştir.



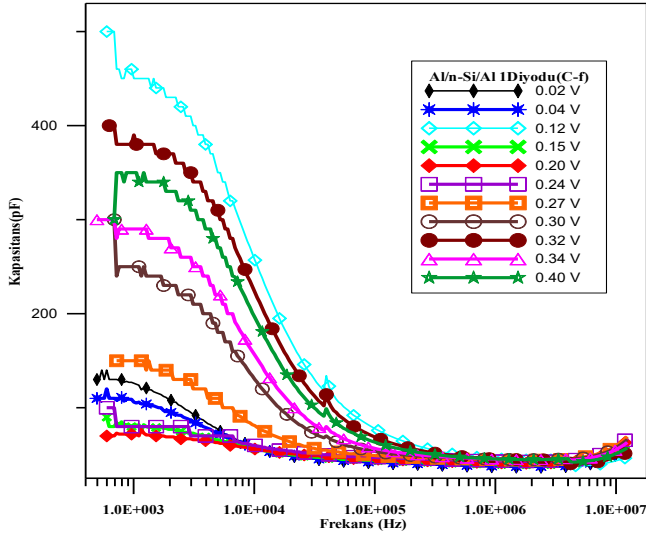
Şekil 7. Diyot 1 ve Diyot 2'nin 1MHz frekansta -2.8V ile 0,4V aralığında ters beslem C^2-V ölçülerinden elde edilen C^2-V grafiği.

3.2. Al-n tipi Si Schottky Diyotlarında C- f Karakteristikleri

Diyotların frekans bağımlı kapasitans davranışlarını incelemek amacıyla; 0,025 V ile 0,4 V aralığında değişen farklı ileri beslem gerilimleri altında C-f ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 8 ve Şekil 9'daki grafiklerde sunulmuştur.

Grafiklerin analizi sonucunda, özellikle düşük frekans bölgelerinde belirgin bir artık kapasitans (excess capacitance) varlığı tespit edilmiştir. Bu artık kapasitans değerinin, artan ileri beslem voltajıyla doğru orantılı olarak yükseldiği gözlemlenmiştir. Literatürle uyumlu olarak, düşük frekanslardaki bu kapasitans artışı; diyot yapısındaki arayüz hallerinin (interface states) varlığına ve omik kontak direncinin yüksek olmasına atfedilmektedir [9].

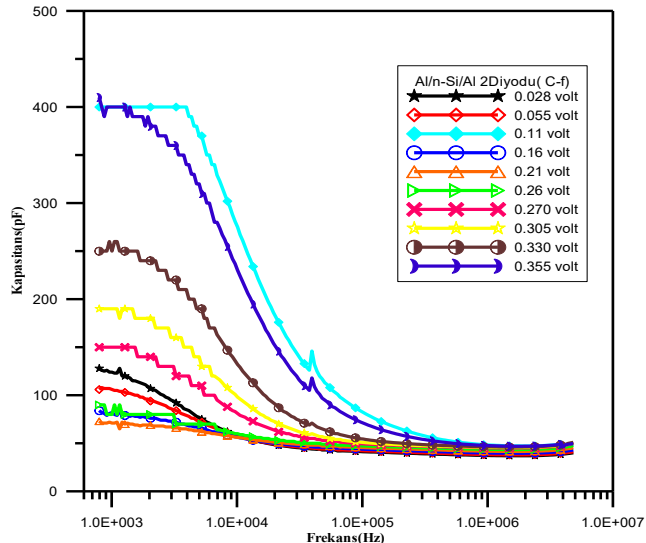
Düşük frekanslarda arayüzey halleri AC sinyalini takip ederek toplam kapasitansa katkıda bulunurken, frekans arttıkça bu hallerin sinyal değişim hızına yetişememesi nedeniyle kapasitans değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Yapılan ölçümlerde, belirli bir frekans eşliğinden sonra kapasitansın kararlı bir seyir izlediği ve artık kapasite değerinin $C_0=75pF$ seviyesinde sabitlendiği tespit edilmiştir.



Şekil 8. (Diyod 1)'nin 0,2V ile 0,4 volt aralığında C- f değişimi.

C-f (kapasitans-frekans) eğrilerinden elde edilen veriler, arayüz hallerinin frekansa bağlı dinamiklerini ortaya koymaktadır. Düşük frekanslarda arayüz halleri, uygulanan alternatif akım (a.c.) sinyalini takip edebildikleri için sisteme ek bir kapasitans katkısı sunmaktadır. Ancak frekans arttıkça bu hallerin sinyale tepki verme hızı yetersiz kalmakta ve etkileri sönümlenmektedir.

Bu durum, artan frekansla birlikte hem toplam sığanın hem de kapasitans pik değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sığa piklerinin artan frekansla düşük voltaj bölgelerine doğru kaydığı gözlenmiştir. Yapılan analizler, arayüz hallerinin sinyali takip etme kabiliyetinin seri direnç (RS) ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Özellikle akım yoğunluğunun yükseldiği bölgelerde seri direnç etkisi baskın hale gelmekte ve bu da kapasite değerinde belirgin bir düşüşe yol açmaktadır.



Şekil 9. (Diyod 2) 'nin 0,28V ile 0,35 V aralığında C- f değişimi.

Düşük frekans bölgelerinde, arayüz hallerinin diyot kapasitansına baskın katkısı nedeniyle seri direnç (RS) etkisi

belirgin bir şekilde gözlenmemektedir. Literatürde, C-V eğrilerinde frekansa bağlı olarak ortaya çıkan piklerin doğası üzerine farklı yaklaşımlar mevcuttur; bu durum Horvth (1987) tarafından arayüz hallerine, Werner ve ark. (1987) tarafından doğrultucu kontakten enjekte edilen azınlık taşıyıcılarına, Chattopadhyay ve Raychaudhuri (1993) tarafından ise yüksek frekanslardaki seri direnç etkisine dayandırılmıştır. Çalışmamızdan elde edilen deneysel veriler, özellikle yüksek RS değerlerinde düşük frekanslarda dahi kapasitans piklerinin gözlenmesi yönüyle Chattopadhyay ve Raychaudhuri'nin teorik öngörülleri ile güçlü bir uyum sergilemektedir [10].

Her iki numuneye ait C-f (Kapasitans-Frekans) karakteristikleri, diyotların ideal Schottky davranışından saptığını açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek voltaj ve düşük frekans kombinasyonunda gözlemlenen artık kapasitans (excess capacitance) olgusu, literatürde düşük frekanslarda arayüz hallerinin alternatif akım (AC) sinyalini takip edebilmesine, ancak artan voltaj ve frekans değerlerinde bu uyumun kaybolmasına atfedilmektedir [9], [11].

Dikkat çekici bir bulgu olarak, Diyot 2'nin kapasitans değerlerinin Diyot 1'e oranla bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yedi günlük bekleme süresi boyunca arayüzde gelişen modifikasyonların ve buna bağlı olarak artan non-ideal (ideal olmayan) davranışların bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

3.3. Arayüzey Hallerinin Yoğunluğunun Etkileri

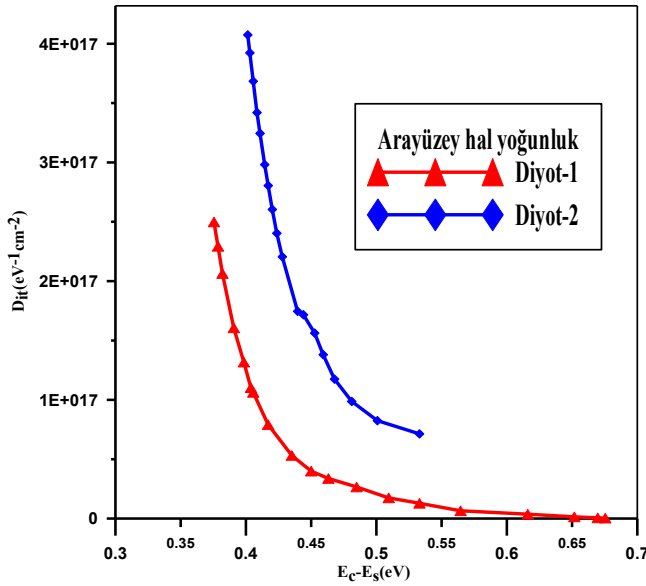
Arayüzey hallerinin C-V ve C-f grafikleri üzerindeki etkilerini daha derinlemesine analiz etmek amacıyla, bu hallerin yoğunluğu uygulanan potansiyel ve yasak enerji aralığının bir fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, diyotun arayüzey hal yoğunluğunun enerji dağılımını ifade eden grafikleri, deneysel C-V karakteristiklerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. ($D_{it} - K$)

$D_{it} - K$ grafiği

$$D_{if} = \left[\frac{q\epsilon N_d}{2(\phi_{bn} - V_n)} \right]^{1/2} \frac{C_{Df} - C_{if}}{qC_{if}} \quad (17)$$

denkleminde faydalanılarak hesaplandı. Burada arayüzey hal enerjisidir. $K = (E_c - E_s) = \phi_{bn} - V_n$

Arayüzey hallerinin enerji dağılımını belirlemek amacıyla oluşturulan grafikleri, yüksek frekans (10 MHz) ve düşük frekans (100 kHz) kapasite değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu analizde, deneysel C-V verilerinden çekilen ($C(D_{it} - K)_{Df}$) ve (C_{if}) değerleri ilgili teorik denklemlerde yerine konulmuş ve arayüzey durum yoğunluğunun yasak enerji aralığındaki değişimi karakteristik eğriler halinde sunulmuştur [2].



Şekil 10. Diyetlerin (C-V) grafiğinden elde edilen ara yüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine göre değişimi.

Ancak sayısal karşılaştırma yapıldığında, Diyet 2'nin arayüzey hal yoğunluğu değerlerinin, Diyet 1'e kıyasla yaklaşık 10 ile 100 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Czochralski yöntemiyle büyütülmüş, [100] yönelimli, 500 μm kalınlığında ve 15 $\Omega\text{-cm}$ özdirence sahip n-tipi Si kristali kullanılmıştır. Kristalden kesilen iki numune, özdeş kimyasal temizleme işlemlerinin ardından yüksek vakum altında alüminyum (Al) buharlaştırılarak metalize edilmiştir. Kontak kararlılığını sağlamak amacıyla numuneler 430°C'de tavlansarak omik kontaklar oluşturulmuştur. Doğrultucu kontaklar; birinci numunede hazırlık aşamasından bir gün sonra, ikinci numunede ise bir hafta sonra oluşturulmuştur. Bu zaman farkı, metal-yarıiletken arayüzeyinde doğal bir oksit tabakasının gelişimine izin vererek yapının MS'den MIS (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken) formuna dönüşmesini sağlamıştır [13].

Diyotların -2V ile +2V aralığında alınan $\ln(I)-V$ karakteristikleri incelendiğinde, hesaplanan idealite faktörlerinin (n) 1.32 ve 1.45 değerlerinde olduğu ($n > 1$) tespit edilmiştir. Bu yüksek değerler, arayüzeyde 15-40 Å kalınlığında bir yalıtkan oksit tabakasının varlığını ve cihazın tipik bir Schottky diyotundan ziyade MIS yapısı sergilediğini doğrulamaktadır [14], [15].

Doğru beslem karakteristiklerinin doğrusal olmayan bölgeleri, Cheung ve Norde metodları kullanılarak analiz edilmiş; $d(V)/d(\ln I)-I$ grafiği üzerinden elde edilen idealite faktörleri ile engel yüksekliklerinin birbirleriyle tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda engel yükseklikleri doğru beslem için 0.89 eV, ters beslem için ise 0.83 eV olarak belirlenmiştir [16].

Arayüzey Halleri ve Kapasitans Analizi İdealite faktöründeki artış; omik kontak direnci, arayüzey durum yoğunluğu ve nötral bölgedeki seri direnç gibi parametrelerin bileşik bir etkisi

olarak değerlendirilmektedir [17], [19]. Literatürle uyumlu olarak, n-tipi yapılarda pozitif uzay yükü artışının potansiyel engelini düşürdüğü ve arayüzey tabakasındaki gerilim düşümünün idealite faktörünü yükselttiği sonucuna varılmıştır [20].

Ayrıca, 1 MHz frekansta gerçekleştirilen C^2-V analizleri, I-V ölçümleriyle elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Kapasitans verilerinden elde edilen bariyer yüksekliklerinin, arayüzeydeki tuzak safsızlıkları ile doğru orantılı bir ilişki içerisinde olduğu ve MIS tünelleme mekanizmalarının cihaz performansında belirleyici rol oynadığı saptanmıştır [21].

Diyotların C^2-V karakteristikleri üzerinden hesaplanan idealite faktörlerinin 1'den büyük olması, Al/n-Si yapılarında metal ile yarı iletken arayüzeyinde doğal bir yalıtkan (oksit) tabakasının varlığını kanıtlamaktadır [22]. Bu bulgu, hazırlanan numunelerin klasik bir Metal-Yarıiletken (MS) Schottky diyotundan ziyade, Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapısı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Literatürle uyumlu olarak, bu tür yapılarda arayüzeyde genellikle 15-40 Å kalınlığında bir oksit katmanı olduğu kabul edilmektedir [23]. Arayüzeyde konumlanan bu yalıtkan tabaka, arayüzey hallerinin (interface states) metal ile doğrudan etkileşimini engelleyen bir bariyer görevi görmekte ve cihazın elektriksel iletim mekanizmasını doğrudan modüle etmektedir [1].

4.1. İdealite Faktörü ve Arayüzey Mekanizmaları

Literatür verileriyle uyumlu olarak; omik kontak direnci, arayüzey hal yoğunluğu (N_{ss}) ve nötral bölgedeki seri direnç (R_s) değerlerinin büyüklüğü, idealite faktörünü (n) doğrudan ve doğrusal olarak artırmaktadır [19]. n-tipi Schottky diyotlarda, pozitif uzay yükü artışının potansiyel engelini düşürdüğü ve arayüzey tabakasında meydana gelen gerilim düşümünün doğru beslem karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünü yükselttiği bilinmektedir [24]. Ayrıca, MIS tünel diyotlarında engel yüksekliğinin (eV), tuzak safsızlık yoğunluğu ile doğru orantılı olarak değiştiği saptanmıştır [25].

4.2. Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri ve Frekans Bağımlılığı

Al/n-Si diyotların 4-10 kHz frekans bandında ve 0-0.58 V aralığında gerçekleştirilen $C-V$ ölçümleri, her iki numunenin kapasitans davranışları arasında belirgin farklar ortaya koymuştur. Aynı frekans değerlerinde Diyet-1'in kapasite pik değerlerinin Diyet-2'den daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Her iki numunede de artan frekansla birlikte pik değerlerinin küçüldüğü ve pik merkezlerinin yüksek voltajlara doğru kaydığı tespit edilmiştir. Bu durum, düşük frekanslarda arayüzey hallerinin AC sinyali takip ederek kapasitansa ek katkı sağlamasına; yüksek frekanslarda ise bu hallerin sinyal hızına yetişemeyerek etkilerinin sönümlenmesine ve kapasitansın arınma bölgesi değerlerine gerilemesine atfedilmektedir [26], [17].

4.3. C-f Analizi ve Arayüzey Hal Yoğunluğu Farkı

Diyotların C-f (Kapasitans-Frekans) eğrileri, yapıların ideal Schottky davranışından saptığını teyit etmektedir. Yüksek

voltaj ve düşük frekans değerlerinde gözlenen artık kapasite, Werner ve ark. (1989) tarafından arayüzey hallerinin sinyalle eşzamanlı hareket edebilme yeteneği ile açıklanmaktadır [6].

DeneySEL sonuçlarımıza göre, Diyot-2'nin arayüzey hal yoğunluğunun (N_{ss}), Diyot-1'e oranla 10 ila 100 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Diyot-2'nin kapasite değerlerindeki sapmalar ve gözlenen bu yoğunluk artışı, yedi günlük bekleme süresince arayüzeyde gelişen doğal oksit tabakasının ve buna bağlı artan non-ideal (ideal olmayan) davranışların doğrudan bir sonucudur.

Çizelge 2: Diyot 1 ve Diyot 2'nin Karşılaştırmalı Elektriksel Parametreleri.

Parametreler	Diyot 1 (0 Gün Bekletilen)	Diyot 2 (7 Gün Bekletilen)
İdealite Faktörü	1,32	1,45
Engel Yüksekliği (+ Doğru Beslem)	0,89 eV	0,89 eV
Engel Yüksekliği (- Ters Beslem)	0,83 eV	0,83 eV
Arayüzey Tabaka Yapısı	Çok İnce Oksit (MIS)	Daha Kalın Oksit (MIS)
Kapasite Pik Değeri	Daha Yüksek	Daha Düşük
Non-İdealite Derecesi	Düşük	Yüksek

Bu sonuçlar, metal-yarıiletken arayüzeyindeki doğal oksit gelişiminin ve tünelleme mekanizmalarının cihaz performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR

Numunelerin yapımında kullanılan malzemelerin alımında, ölçülerin alımında kullanılan araştırma laboratuvarlarına kurulmasında ve verilerin hazırlandığı bilgisayarın sağlanmasında büyük desteklerinden dolayı Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] A. Türüt, "On current-voltage and capacitance-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts," *Turkish Journal of Physics*, vol. 44, no. 4, pp. 302–347, 2020, doi: [10.3906/fiz-2007-11](https://doi.org/10.3906/fiz-2007-11).
- [2] H. C. Card and E. H. Rhoderick, "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 4, no. 10, pp. 1589–1601, 1971, doi: [10.1088/0022-3727/4/10/319](https://doi.org/10.1088/0022-3727/4/10/319).
- [3] C. R. Crowell and S. M. Sze, "Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures," *Solid-State Electronics*, vol. 8, no. 12, pp. 979–990, 1965, doi: [10.1016/0038-1101\(65\)90164-4](https://doi.org/10.1016/0038-1101(65)90164-4).
- [4] M. E. Aydin, K. Akkılıç, and T. Kilicoglu, "The importance of the neutral region resistance for the calculation of the interface state density distribution in Pb/p-Si Schottky contacts," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 352, no. 1–4, pp. 312–317, 2004, doi: [10.1016/j.physb.2004.08.003](https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.08.003).
- [5] Ş. Karataş, Ş. Altındal, and M. Çakar, "Current transport in Zn/p-

- Si(1 0 0) Schottky barrier diodes at high temperatures," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 357, no. 3–4, pp. 386–397, 2005, doi: [10.1016/j.physb.2004.12.003](https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.12.003).
- [6] B. Batı, "İdeal ve ideal olmayan omik ve doğrultucu kontaklı Au/n-Si Schottky diyotlarda doğru besleme karakteristikleri," Ph.D. dissertation, Atatürk Univ., Erzurum, Turkey, 1999.
- [7] Ö. Demircioğlu, Ş. Karataş, N. Yıldırım, and Ö. F. Bakkaloğlu, "Effects of temperature on series resistance determination of electrodeposited Cr/n-Si/Au-Sb Schottky structures," *Microelectronic Engineering*, vol. 88, no. 9, pp. 2997–3002, 2011, doi: [10.1016/j.mee.2011.04.060](https://doi.org/10.1016/j.mee.2011.04.060).
- [8] V. L. Rideout, "A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers," *Thin Solid Films*, vol. 48, no. 3, pp. 261–291, 1978, doi: [10.1016/0040-6090\(78\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0040-6090(78)90007-X).
- [9] B. Batı, Ç. Nuhoğlu, M. Sağlam, E. Ayyıldız, and A. Türüt, "On the forward bias excess capacitance at intimate and MIS Schottky barrier diodes with perfect or imperfect ohmic back contact," *Physica Scripta*, vol. 61, no. 2, pp. 209–212, 2000, doi: [10.1238/Physica.Regular.061A00209](https://doi.org/10.1238/Physica.Regular.061A00209).
- [10] J. H. Werner, R. T. Tung, A. F. J. Levi, and M. Anzlowar, "Admittance measurements at epitaxial and nonepitaxial silicide Schottky contacts," *MRS Proceedings*, vol. 91, pp. 433–438, 1987, doi: [10.1557/PROC-91-433](https://doi.org/10.1557/PROC-91-433).
- [11] R. F. Werner, "Quantum states with Einstein-Podolsky-Rosen correlations admitting a hidden-variable model," *Physical Review A*, vol. 40, no. 8, pp. 4277–4281, 1989, doi: [10.1103/PhysRevA.40.4277](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.40.4277).
- [12] P. Chattopadhyay, "The effect of shunt resistance on the electrical characteristics of Schottky barrier diodes," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 29, no. 3, pp. 823–829, 1996, doi: [10.1088/0022-3727/29/3/047](https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/3/047).
- [13] A. Tataroğlu and Ş. Altındal, "Characterization of current-voltage (I-V) and capacitance-voltage-frequency (C-V-f) features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes," *Microelectronic Engineering*, vol. 83, no. 3, pp. 582–588, 2006, doi: [10.1016/j.mee.2005.12.014](https://doi.org/10.1016/j.mee.2005.12.014).
- [14] Ş. Karataş, "Effect of series resistance on the electrical characteristics and interface state energy distributions of Sn/p-Si (MS) Schottky diodes," *Microelectronic Engineering*, vol. 87, no. 10, pp. 1935–1940, 2010, doi: [10.1016/j.mee.2009.11.168](https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.11.168).
- [15] I. Orak, "Saçırma yöntemiyle elde edilen Co/n-GaP Schottky diyotların tavlama ve numune sıcaklığına bağlı elektriksel karakterizasyonu," Ph.D. dissertation, Atatürk Univ., Erzurum, Turkey, 2013.
- [16] H. Seymen, "Al/n-Si (MIS) Schottky diyotlarda arayüzey hallerinin ve seri direncin I-V, C-V, C-f karakteristiklerine etkileri," M.S. thesis, Yüzüncü Yıl Univ., Van, Turkey, 2007.
- [17] P. Chattopadhyay and B. RayChaudhuri, "Frequency dependence of the forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes," *Solid-State Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 605–610, 1993, doi: [10.1016/0038-1101\(93\)90272-R](https://doi.org/10.1016/0038-1101(93)90272-R).
- [18] H. C. Card and E. H. Rhoderick, "The effect of an interfacial layer on minority carrier injection in forward-biased silicon Schottky diodes," *Solid-State Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 365–374, 1973, doi: [10.1016/0038-1101\(73\)90011-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(73)90011-7).
- [19] H. Norde, "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 7, pp. 5052–5053, 1979, doi: [10.1063/1.325607](https://doi.org/10.1063/1.325607).

- [20] P. S. Ho, E. S. Yang, H. L. Evans, and X. Wu, "Electronic states at silicide-silicon interfaces," *Physical Review Letters*, vol. 56, no. 2, pp. 177–180, 1986, doi: [10.1103/PhysRevLett.56.177](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.177).
- [21] P. Chattopadhyay and A. N. Daw, "On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode," *Solid-State Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 555–560, 1986, doi: [10.1016/0038-1101\(86\)90078-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(86)90078-X).
- [22] A. Kumta, Rusli, C.-C. Tin, and J. Ahn, "Design of field-plate terminated 4H-SiC Schottky diodes using high-k dielectrics," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, no. 8, pp. 1295–1302, 2006, doi: [10.1016/j.microrel.2005.11.009](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.11.009).
- [23] H. Águas, L. Pereira, R. J. C. Silva, E. Fortunato, and R. Martins, "Effect of the tunnelling oxide growth by H₂O₂ oxidation on the performance of a-Si:H MIS photodiodes," *Materials Science and Engineering B*, vol. 109, no. 1–3, pp. 256–259, 2004, doi: [10.1016/j.mseb.2003.10.075](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2003.10.075).
- [24] X. Wu and E. S. Yang, "Interface capacitance in metal-semiconductor junctions," *Journal of Applied Physics*, vol. 65, no. 9, pp. 3560–3567, 1989, doi: [10.1063/1.342631](https://doi.org/10.1063/1.342631).
- [25] A. N. Daw and P. Chattopadhyay, "Low-frequency C–V characteristics of MIS-Schottky barrier diodes," *IETE Journal of Research*, vol. 32, no. 2, pp. 69–72, 1986, doi: [10.1080/03772063.1986.11436565](https://doi.org/10.1080/03772063.1986.11436565).
- [26] M. A. Heine and P. R. Sperry, "The distribution of defects in aluminum oxide films near the metal-to-oxide interface," *Journal of The Electrochemical Society*, 1965.
- [27] H. Seymen, O. Doğmuş, and Ş. Karataş, "Analysis of the electrical characteristics and interface state densities of Au/n-type Si metal structures with SiO₂ interlayer," *Indian Journal of Physics*, pp. 1–7, 2026, doi: [10.1007/s12648-026-03965-1](https://doi.org/10.1007/s12648-026-03965-1).