



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Al/NiO/p-Si Schottky Diyotun frekansa bağılı elektriksel özellikleri ve üretimi

The frequency-dependent electrical properties and fabrication of Al/NiO/p-Si Schottky Diode

Yazar(lar) (Author(s)): Ömer SEVGİLİ¹, İkrâm ORAK², Sultan Süleyman ÖZEL³, Faruk ÖZEL⁴

ORCID¹: 0000-0003-1740-1444

ORCID²: 0000-0003-2318-9718

ORCID³: 0000-0002-3935-9649

ORCID⁴: 0000-0002-3689-0469

To cite to this article: Sevgili Ö., Orak İ., Özel S.S. and Özel F., “Al/NiO/p-Si Schottky Diyotun Frekansa Bağlı Elektriksel Özellikleri ve Üretimi”, *Journal of Polytechnic*, 29(4):290423:1-7 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Sevgili Ö., Orak İ., Özel S.S. and Özel F., “Al/NiO/p-Si Schottky Diyotun Frekansa Bağlı Elektriksel Özellikleri ve Üretimi”, *Politeknik Dergisi*, 29(4):290423:1-7 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1626006

Al/NiO/p-Si Schottky Diyotun Frekansa Bağlı Elektriksel Özellikleri ve Üretimi

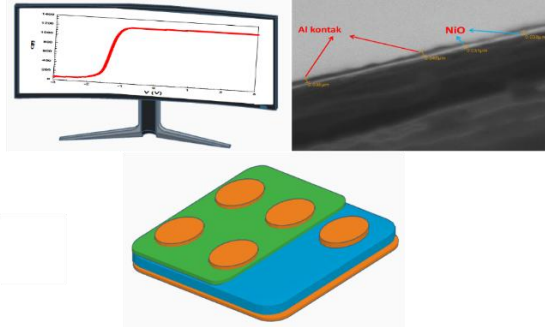
The Frequency-Dependent Electrical Properties and Fabrication of Al/NiO/p-Si Schottky Diode

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bu makale Al/NiO/p-Si Schottky diyotun (SD) elektriksel özelliklerine odaklanmaktadır. (This article focuses on the electrical properties of the Al/NiO/p-Si Schottky diode (SD))
- ❖ NiO, elektronik cihazlarda geleneksel yalıtım katmanlarına alternatif olabilir. (The NiO may serve as an alternative to conventional insulation layers in electronic devices.)
- ❖ Yüzey durumunun ve seri direncin elektriksel özellikler üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. (The effect of surface state and series resistance on electrical properties has been revealed.)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada Al/NiO/p-Si Schottky Diyot'un üretimi ve onun elektriksel özellikleri frekansa bağlı incelenmiştir. (In this study, the fabrication of Al/NiO/p-Si Schottky diode and its electrical properties are investigated in frequency dependence.)



Şekil. Üretilen aygıtın şematik diyagramı ve onun bazı özellikleri /Figure. Schematic diagram of the fabricated device and some of its features

Amaç (Aim)

Al/NiO/p-Si Schottky diyotun enerji depolama aygıtları veya ayarlanabilir elektronik bileşenler gibi uygulamalarda üstün özellikler sergileyerek kullanımının araştırılması. / Investigation of the use of Al/NiO/p-Si Schottky diode with its superior properties in applications such as energy storage devices or tunable electronic components.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Termal kaplama yöntemi kullanılarak bir arayüz katmanı elde edilmiş ve aygıtın elektriksel ölçümleri HP 4192A LF empedans analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. / An interface layer was obtained using the thermal coating method and electrical measurements of the device were carried out using an HP 4192A LF impedance analyser.

Özgünlük (Originality)

NiO'nun enerji depolama aygıtları gibi uygulamalarda diğer metal oksitlere nazaran üstün özellik sergilemesi. / NiO exhibits superior properties compared to other metal oxides in applications such as energy storage devices.

Bulgular (Findings)

NiO arayüz katmanının kalınlığının $0,0345 \mu\text{m}$ olduğu ve N_{ss} değerinin $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olduğu görülmüştür. / It was observed that the thickness of the NiO interfacial layer was $0.0345 \mu\text{m}$ and the N_{ss} value was of the order of $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$.

Sonuç (Conclusion)

NiO'nun elektronik cihazlardaki geleneksel yalıtım katmanlarına umut verici bir alternatif olduğu ortaya konulmuştur. / NiO has been shown to be a promising alternative to conventional insulator layers in electronic devices.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Al/NiO/p-Si Schottky Diyotun Frekansa Bağlı Elektriksel Özellikleri ve Üretimi

Araştırma Makalesi / Research Article

Ömer SEVGİLİ^{1*}, İkrâm ORAK^{2,3}, Sultan Süleyman ÖZEL⁴, Faruk ÖZEL⁵

¹Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, 43000 Kütahya, Türkiye

²Yenilenebilir Enerji Sistemleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl 12000, Türkiye

³Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, Bingöl 12000, Türkiye

⁴Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BUMER), Bayburt Üniversitesi, 69000, Bayburt, Türkiye

⁵Makine Mühendisliği Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye

(Geliş/Received : 23.01.2025 ; Kabul/Accepted : 21.10.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 29.10.2025)

ÖZ

Al/NiO/p-Si Schottky diyot (SD) üretimi bir termal buharlaştırma sistemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bir arayüzey tabakası olarak kullanılan NiO'nun yapısal analizi Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve SEM yan kesit görüntüsünden NiO arayüzey tabakasının kalınlığı 0,0345 µm olarak bulunmuştur. Al/NiO/p-Si SD'nin elektriksel özelliklerini frekansa bağlı incelemek amacıyla C-V ve G/ω-V ölçümleri 50-5000 kHz frekans aralığında ve -3 V ile +3 V aralığında gerçekleştirilmiştir. Seri direnci (R_s) hesaplamak için Nicollian-Brews yöntemi kullanılırken, arayüzey durumlarını (N_{ss}) hesaplamak için yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemi (C_{HF-CLF}) kullanılmıştır. N_{ss} değerinin 10¹² eV⁻¹cm⁻² mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, NiO'nun elektronik cihazlardaki geleneksel yalıtkan katmanlara kıyasla umut verici bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: NiO, frekansa bağlılık, seri direnç, arayüzey durumları.

The Frequency-Dependent Electrical Properties and Fabrication of Al/NiO/p-Si Schottky Diode

ABSTRACT

The fabrication of Al/NiO/p-Si Schottky diode (SD) was formed using a thermal evaporation system. The structural analyze of NiO using an interfacial layer was conducted using a Scanning Electron Microscope (SEM) and the SEM cross-section revealed a thickness of 0.0345 µm for NiO interfacial layer. The capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) measurements of the fabricated SD were performed in the 50 kHz to 5 MHz frequency range and in the -3 V to +3 V range. The Nicollian-Brews method was employed to calculate the series resistance (R_s), while the high-low frequency capacitance method (C_{HF-CLF}) was used to calculate the surface states (N_{ss}). The value of the N_{ss} was determined to be in the order of 10¹² eV⁻¹cm⁻². These findings suggest that NiO is a promising alternative to conventional insulating layers in electronic devices.

Keywords: NiO, frequency-dependent, series resistance, surface states.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Arayüzey tabakasına sahip cihazlar, arayüzey bir tabakaya sahip olmayan cihazlarla karşılaştırıldığında, böyle bir tabakanın varlığı cihazların elektriksel özellikleri iyileştirmede büyük öneme sahiptir. Diğer bir deyişle, arayüzey tabakaları yük taşımamı kolaylaştırmaktan ışık toplama kabiliyetlerini artırmaya kadar çeşitli durumlarda kritik bir rol oynamaktadır. Dahası böyle bir arayüzey tabakası metal-yarı iletken (MS) yapıların daha büyük enerji depolamasına katkıda bulunmasının yanında, üretimi düşük maliyetli olan, iyi performans gösteren, düşük moleküler ağırlığa sahip, büyük ölçekte üretilebilen ve geleneksel SiO₂ veya SnO₂ gibi arayüzey tabakalarına kıyasla kolayca işlenebilen esnek malzemelerin kullanımı ile sağlanabilir. Dahası, SiO₂ ve SnO₂ gibi geleneksel arayüzey tabakalarının MS yapılarda kullanılması özellikle yarıiletkenlerdeki aktif bağları yeterince pasifleştirmez ve bunun sonucunda da

kaçak akımda artış olur [1]. Tüm bu nedenlerden dolayı bu geleneksel arayüzeyler yerine farklı bir arayüzey katmanı oluşturmak bu dezavantajı ortadan kaldırabilir. Bu nedenle, bazı araştırmacılar arayüzey tabakasının varlığının çeşitli cihazlarda belirli elektriksel parametreleri iyileştirdiğini göstermiştir [2–8]. Sevgili ve arkadaşları [9] tarafından yapılan bir araştırmada, spin kaplama tekniği kullanılarak bir organik arayüz tabakasına (Brushite + Monetite: PVC) sahip Schottky diyotları (SD) üretmişler. Araştırmacılar bu çalışmada, bu arayüz tabakasının kullanımının cihazların elektriksel performansını önemli ölçüde artırdığını göstermişler.

Metal oksitler farklı amaçlar ve hedefler için birden fazla uygulamada kullanılmasının yanında özellikle son yıllarda fotodiyotlar ve güneş pilleri de dahil olmak üzere SD tabanlı çeşitli aygıt tiplerinde farklı amaç ve hedefler için kullanılmıştır [10–16]. Örneğin, Taşcıoğlu ve arkadaşları [17] yapmış oldukları çalışmada

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : omersevgili06@gmail.com

Al/nanostructure CdO/p-GaAs diyotlarını üretmişler ve bu aygıtların elektriksel özelliklerini incelemişler. Bu aygıt için diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 2,29 ve 0,62 eV olarak elde etmişler [17]. Bir başka çalışma örneğinde ise, Jang ve arkadaşları [18] SnO₂ film kalınlıklarının enerji bant aralığını ve elektriksel özellikleri etkilediğini belirtmişler ve optik enerji bant aralığının 3,6 eV'den 4,2 eV'ye kadar değiştiğini gözlemlenmişler. Nikel oksit (NiO), yüksek optik şeffaflık, iyi elektrik iletkenliği ve uygun bant aralığı (~3,6 eV) sayesinde fotodiyotlar, perovskit tabanlı cihazlar, ultraviyole (UV) dedektörler, ışık yayan diyotlar (LED) ve güneş pilleri gibi çeşitli optoelektronik uygulamalarda önemli ilgi görmektedir [19–25]. Bu nedenle, NiO bu tür uygulamalar için umut verici bir adaydır. Enns ve arkadaşları [26] p-NiO/n-GaN fotodedektör üretmiş ve bu dedektörün hassasiyetinin ve algılama gücünün 365 nm ışıkta ve sıfır voltajda sırasıyla 3.11 mA/W ve 8.69x10⁹ Jones olduğunu bulmuşlar ve çalışmanın sonucunda NiO/GaN heteroeklem diyotların UV uygulamaları için son derece hassas fotodedektörlerin üretimi için önemli bir potansiyel sergilediğini göstermişlerdir. Bir başka çalışmada ise, Demirezen ve arkadaşları [1] farklı ağırlık oranlarında (2, 10, 20% NiO) Al(PCBM/NiO:ZnO)/p-Si aygıtını oluşturmuşlar ve bu aygıtın kapasitans ve iletkenlik özelliklerini farklı frekans ve gerilim altında incelemişler ve (PCBM/NiO:ZnO) polimer arayüzey tabakasının geleneksel arayüzey tabakası yerine başarıyla kullanılabilceğini göstermişler. Bir diğer çalışmada ise, Gozeh ve arkadaşları [27] farklı oranlarda Zn içeriklerine (0, 0,1, 0,5, 2 ve 4 %) sahip CdO arayüz tabakasıyla oluşturulan Al/Zn-CdO/p-Si/Al fotodiyotlarını üretmişler ve bu aygıtın hem I-V karakteristikleri ve elektriksel özelliklerini hem de kapasitans ve iletkenlik özelliklerini farklı frekans ve gerilim altında incelemişler. Bu çalışmanın sonucunda da Zn katkılı CdO malzemesinin fotovoltaik cihaz teknolojisi, özellikle fotodiyot uygulamaları için uygun olduğu söylenebileceğini belirtmişlerdir. Özetle, SD tabanlı çeşitli aygıt tiplerinde NiO arayüzey katmanlarının kullanılması, algılama, foto-tepki ve fotovoltaik özellikler gibi uygulamaların elektriksel özelliklerini geliştirmek için umut verici bir arayüzey katmanını temsil etmektedir.

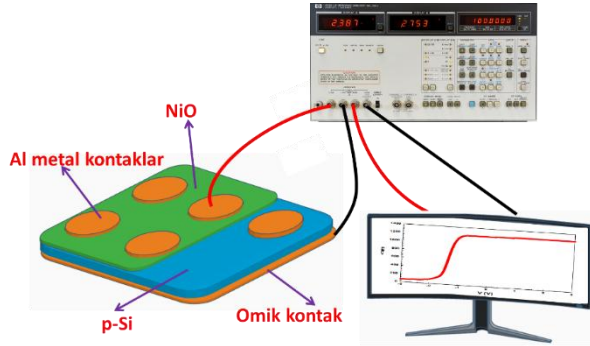
Bu çalışmada, Al/NiO/p-Si SD üretimi tamamında termal buharlaştırma sistemi kullanılmış ve aygıt oluşturulmuştur. NiO arayüzey tabakasının yapısal analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Üretilen aygıtın frekansa bağlı elektriksel özellikleri 50-5000 kHz frekans aralığında ve -3 V ile +3 V aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede frekansın aygıtların elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, N_{ss} davranışı oda sıcaklığında C_{HF}-C_{LF} yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, N_{ss} ve R_s kaynaklarına ilişkin derinlemesine bir araştırma yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

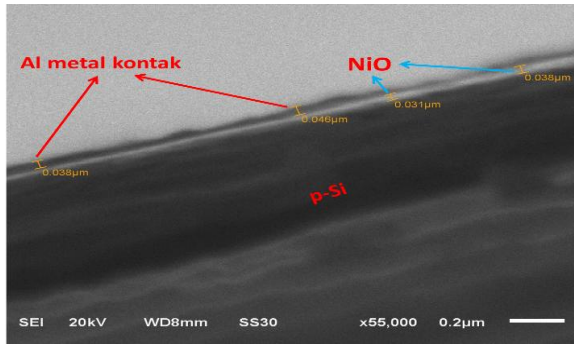
NiO sentezi için, 2 mmol NiCl₂ üç boyunlu şişe içerisinde 30 ml deiyonize su ile çözüldü ve 70 °C sıcaklıkta tutuldu. Daha sonra, 30 ml toluen, 5 ml oleik asit ve 10 ml amonyak çözeltisinden oluşan bir karışım şişesine konuldu. Reaksiyon bu sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletildi. Bu sürenin sonunda reaksiyon durduruldu ve çözelti bir ayırma hunisine aktarıldı. Toluen fazındaki ürünler, santrifüjleme yoluyla izole edilerek su fazından etkin bir şekilde ayrıldı. Elde edilen çökeltiler daha sonra 500 °C'de 1 saat süreyle tavlansak NiO nanopartiküllerinin kristalizasyonu tamamlanmıştır. NiO'in sentezine dair ayrıntılı bilgi kaynak [28]'de bulunabilir.

SD'nin üretimi için 525 µm kalınlığına sahip bir p-tipi silisyum (p-Si) yarıiletkeni kullanılmıştır. p-Si kullanılmak üzere 1 cm x 1 cm'lik parçalar halinde kesilmiştir. Temizleme prosedürü, metal ve yarıiletken arasındaki temas kalitesini artırmak için çok önemlidir, bu nedenle p-Si üzerindeki oksitleri ve kirlilikleri ortadan kaldırmak gerekir. Bunun için yarıiletken parça 30 °C'de ultrasonik banyoda sırasıyla 10 dakika asetonda ve 10 dakika izopropanolde daha sonra 60 °C'de 10 dakika RCA1 (H₂O:H₂O₂:NH₃; 6:1:1) içinde yıkayıp, 30 saniye seyreltik HF (H₂O:HF; 10:1) çözeltisinde ve son olarak da 30 °C'de ultrasonik banyoda 10 dakika boyunca deiyonize suda yıkandı ve sonrasında azot gazı (N₂) ile kurutma işlemlerine tabi tutuldu. Bu hazırlık p-Si'yi daha ileri işlemler için uygun hale getirdi. Daha sonra, omik kontak oluşturmak için termal buharlaştırma sistemi aracılığıyla p-Si'nin arka mat yüzeyine alüminyum (Al) kaplandı. Burada termal buharlaştırma sisteminde pota olarak kullanılan molibden potaya 0,10 g Al yerleştirildi. Ardından, termal buharlaştırma cihazı 6x10⁻⁶ Torr vakum seviyesine getirildi ve termal buharlaştırma işlemi bu seviyede başlatıldı. Termal buharlaştırma, Al içeren potaya kademeli olarak artan DC akım uygulanarak yaklaşık 25 volt (V) değerinde gerçekleştirildi ve doğru akım kademeli olarak azaltılarak işlem tamamlandı. Sonrasında Al katman, p-Si ile sağlam bir bağ oluşmasını sağlamak amacıyla 10 dakika süreyle 450 °C sıcaklıkta tavlama tabi tutulmuştur. Sentezlenen NiO, termal buharlaştırma sistemi aracılığıyla p-Si'in ön tarafına kaplanmıştır. SD, temas yüzeyinde elektriksel bir engel oluşturarak diyot özelliklerini ortaya çıkarır. Bu amaçla, Al kontaklar termal buharlaştırmada 1 mm çapında deliklere sahip bir maske kullanılarak yapılmıştır. Böylelikle NiO arayüzeye sahip aygıt (Al/NiO/p-Si) elde edilmiştir. Aynı prosedür kullanılarak referans aygıt olan NiO arayüzeyli aygıt (Al/p-Si) elde edilmiştir. Kapasitans (C)-gerilim (V) ve iletkenlik (G/ω)- gerilim (V) ölçümleri için HP 4192A LF empedans analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen SD'nin ve ölçüm sisteminin şematik diyagramı Şekil 1'de gösterilmektedir. Morfolojik özellikleri analiz etmek için SEM kullanılmıştır. Al/NiO/p-Si SD'nin SEM kesit görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu şekilde gösterildiği gibi, Al doğrudan kontaklarının ve NiO

arayüzey tabakasının kalınlığı sırasıyla yaklaşık 0,042 μm ve 0,0345 μm 'dir.



Şekil 1. Al/NiO/p-Si SD ve C-V ölçüm sisteminin şematik diyagramı (The schematic diagram of the Al/NiO/p-Si SD and C-V measurement system)



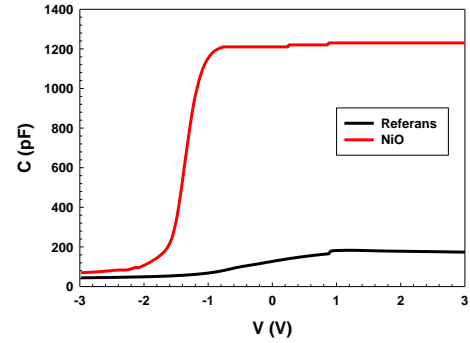
Şekil 2. Al/NiO/p-Si SD'nin SEM kesit görüntüsü (SEM cross-sectional image of Al/NiO/p-Si SD)

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

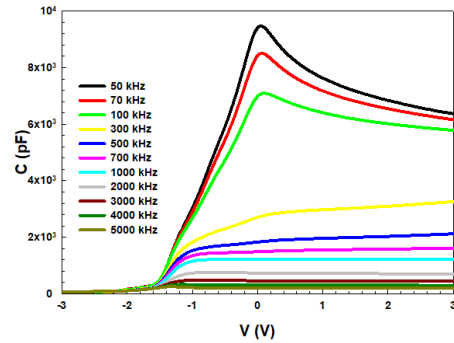
Al/p-Si (Referans) ve Al/NiO/p-Si SD'nin frekansa bağlı elektriksel özelliklerini karakterize etmek amacıyla C-V ve G/ω -V ölçümleri 50-5000 kHz frekans aralığında ve -3 V ile +3 V aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'den da görüleceği üzere NiO arayüzeyi tüm gerilim bölgelerinde referans aygıtına göre önemli ölçüde daha yüksek bir kapasitans değerine sahiptir. NiO arayüzey tabakasının varlığı, artan arayüz polarizasyonu nedeniyle yük depolama kapasitesini büyük ölçüde artırdığını göstermektedir [29,30].

Şekil 4 ve 5 Al/p-Si ve Al/NiO/p-Si SD'nin frekansa bağlı elektriksel ölçümlerini göstermektedir. Şekil 4 ve 5'te gösterildiği gibi, Al/NiO/p-Si SD'nin C-V ve G/ω -V grafikleri uygulanan ön gerilim ve frekansa bir bağıllık göstermektedir. Bu şekiller terslenim ($<-1,5$ V), tükenme ($-1,5 < V < 1,5$) ve yığılma ($>+1,5$ V) olmak üzere üç farklı bölgenin varlığını ortaya koymaktadır. Hem Şekil 4 hem de Şekil 5'ten de görüldüğü üzere üretilen aygıtın kapasitans ve iletkenlik değerleri terslenim ve yığılma bölgelerinde sabit kaldığı, tükenme bölgesinde ise hem artan frekans hem de uygulanan ön gerilim ile artış göstermektedir. Ayrıca hem C hem de G/ω düşük frekanslarda tükenme bölgesinde bir pik değerine sahiptir ki bu pik düşük frekanslarda daha net belli olmaktadır. Bu davranışın nedeni N_{ss} 'nin kendine özgü yoğunluk

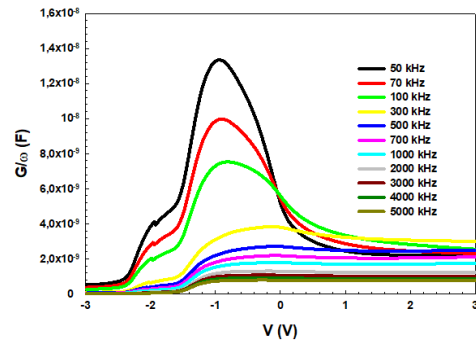
dağılımı ve polarizasyon kaynaklı yüzey dipol momentidir [31]. Yine Şekil 4 ve 5'te de görüleceği gibi, frekans arttıkça tükenme bölgesindeki pikin büyüklüğü azalmaktadır. Bu durum N_{ss} 'in düşük frekansta AC sinyalini takip edebilmesinden, ancak yüksek frekansta bu sinyali takip edememesinden dolayıdır. Bir diğer deyişle, N_{ss} yüksek frekanslarda kapasitans ve iletkenliğe katkıda bulunmaz. Özellikle, N_{ss} ve yüzey polarizasyonu, terslenim ve tükenme bölgelerindeki düşük frekanslarda iyi performans gösterir. Bununla birlikte, seri direnç (R_s) sadece birikim bölgesinde ve özellikle yüksek frekanslarda etkilidir.



Şekil 3. Al/p-Si ve Al/NiO/p-Si SD'nin C-V karşılaştırması (The comparison of C-V plot for Al/p-Si and Al/NiO/p-Si SD)



Şekil 4. Al/NiO/p-Si SD'nin çeşitli frekanslardaki C-V grafiği (The C-V plot for Al/NiO/p-Si SD at various frequencies.)

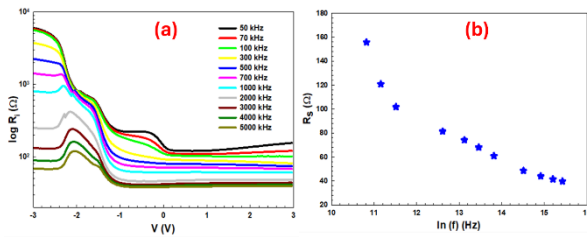


Şekil 5. Çeşitli frekanslarda Al/NiO/p-Si SD'nin G/ω -V grafiği (The G/ω -V plot for Al/NiO/p-Si SD at various frequencies)

Direnç (R_i), Nicollian ve Brews yöntemi kullanılarak hesaplanabilir ki burada R_i için ifade aşağıdaki gibidir [32];

$$R_i = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (1)$$

Burada C_{ma} ölçülen kapasitans G_{ma} ise ölçülen iletkenliktir. R_i 'nin uygulanan gerilime bağlı değerleri her bir frekans için hesaplanmış ve Şekil 6 (a)'da verilmiştir. Şekil 6 (a)'dan görüldüğü gibi, R_i değeri terslenim, tükenim ve yığılma bölgelerinde artan frekansla birlikte azalmaktadır. Ayrıca, R_i değeri ait olduğu frekans değeri için terslenim ve yığılma bölgelerinde neredeyse sabittir. Seri direnç (R_s), yığılma bölgesinde yeterince yüksek frekanslarda (≥ 1 MHz) R_i değerine eşittir [32]. Eşitlik (1) kullanılarak +3 V'ta hesaplanan R_s değerleri Tablo 3'te verilmiştir ve R_s 'nin frekansa bağlı davranışı Şekil 6 (b)'de gösterilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü gibi, R_s değeri artan frekansla birlikte azalmaktadır. R_s 'nin değerini, arayüz kalitesi, yüzey pürüzlülüğü, temas noktaları gibi çeşitli faktörler etkilemektedir [33].



Şekil 6. Çeşitli frekanslarda Al/NiO/p-Si SD'nin (a) R_i -V, (b) R_s -ln (f) (a) R_i -V, (b) R_s -ln (f) for Al/NiO/p-Si SD at various frequencies)

SD aygıtların frekansa bağlı Fermi enerji seviyesi (E_F), difüzyon potansiyeli (V_D), donör atomların yoğunluğu (N_D), tükenme bölgesi genişliği (W_D) ve frekansa bağlı bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) gibi bazı elektriksel özellikleri, eşitlikler (2)-(7) ile birlikte ters öngörilimde C^{-2} -V'nin eğimi ve kesişim değeri kullanılarak hesaplanır [5,34]. Bunlar ile Al/NiO/p-Si SD'nin frekansa bağlı elektriksel parametreleri hesaplanmış ve Tablo 1'te verilmiştir.

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (2)$$

$$N_V = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (3)$$

$$N_A = \frac{2}{q \epsilon_s A^2 \tan(\theta)} \quad (4)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (5)$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s V_D}{q N_A}} \quad (6)$$

$$\Phi_{B(C-V)} = V_D + E_F \quad (7)$$

Burada N_V etkin durum yoğunluğu, A diyotun alanı, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, N_D taşıyıcı yoğunluğu, q elektron yükü ve V_D ise sıfır gerilimdeki difüzyon potansiyelidir [35–37]. Tablo 1'den de görüleceği üzere frekans arttıkça V_D , E_F ve Φ_{B0} artarken N_A ve W_D azalır. Frekans arttıkça, V_D , W_D ve Φ_{B0} artar çünkü arayüz durumları artık AC sinyalini takip edemez, N_A frekansla

ters orantılıdır ve frekansın artmasıyla azalır çünkü daha az tuzak kapasitansa katkıda bulunur ve bu da daha doğru değerlerle sonuçlanırken E_F , N_A 'ya olan zayıf bağımlılığı nedeniyle hafif bir değişim gösterir [33,38]. Ayrıca, elektriksel parametrelerin böyle davranışları arayüzey durumlarının ve arayüzey tabakasının belirli yoğunluk dağılımına atfedilebilir [39]. Düşük frekanslarda Φ_{B0} değeri, bu frekanslarda AC sinyalini takip etme kapasitesine sahip olan N_{ss} tarafından belirlenir. Ancak, yüksek frekanslarda N_{ss} AC sinyalini takip edemez. Ayrıca deneysel sonuçlar gösteriyor ki, üretilen aygıt için C-V verilerinden elde edilen engel yüksekliğinin, Si için bilinen 1,12 eV bant aralığı değerinden büyüktür. Bu durum metal ve Si arasındaki arayüzey yüklerinin homojen olmamasından ve arayüzey oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak engel yüksekliğinin homojen olmamasından kaynaklanabilir.

Çizelge 1. Üretilen Al/NiO/p-Si SD'nin farklı frekanslarda elde edilen frekansa bağlı çeşitli elektriksel parametreler (Various electrical parameters of the produced Al/NiO/p-Si SD obtained at different frequencies depending on the frequency)

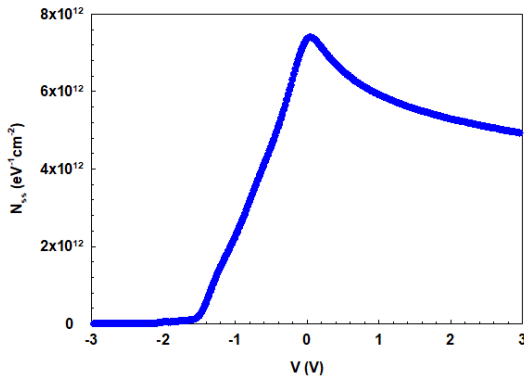
Frekans (kHz)	V_D (eV)	$N_A \times 10^{15}$ (cm ⁻³)	E_F (eV)	$W_D \times 10^{-5}$ (cm)	Φ_{B0} (eV)	R_s (W) 3V'da
50	0,473	1,481	0,251	7,98	0,724	155,79
70	0,594	1,412	0,252	9,15	0,846	120,78
100	0,687	1,366	0,253	10,01	0,940	101,78
300	0,959	1,236	0,255	12,43	1,215	81,33
500	1,053	1,190	0,256	13,28	1,310	74,12
700	1,098	1,158	0,257	13,74	1,355	67,97
1000	1,150	1,137	0,257	14,19	1,408	60,89
2000	1,215	1,098	0,258	14,85	1,473	48,49
3000	1,123	1,127	0,258	14,09	1,380	43,90
4000	1,132	1,127	0,258	14,14	1,389	41,42
5000	1,139	1,003	0,260	15,04	1,400	39,68

Önceki bölümlerde de çokça bahsedildiği gibi N_{ss} aygıtların elektriksel özellikleri üzerinde çok etkin bir faktördür. Bir diğer deyişle metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey durumlarının varlığı SD'ler için kritik bir rol oynar. Böyle diyotlarda ideal olmayan bir davranış yarıiletken yüzeyin oksidasyonu, yüzey dipolleri ve eksik kovalent bağlar gibi nedenlerle ilişkilendirilir. Bu yüzden N_{ss} 'nin davranışı hem kapasitansı hem de iletkenliği önemli ölçüde etkilediği için analiz yapıp değerlendirilmesi gerekmektedir. Dahası bu arayüzey durumları, elektronları hapsederek aygıtların elektriksel özelliklerini etkiler. Bundan dolayı, arayüzey özelliklerinin tam olarak tanımlanması, aygıtların performansını için son derece önemlidir. Bu nedenle, yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemi (C_{HF} - C_{LF}) N_{ss} 'i hesaplamak için kullanılan alternatif bir yöntemdir [40]. Bu teknikte N_{ss} değerleri daha kolay ve hızlı hesaplanabilir. Bu yöntemde oldukça yüksek değerdeki frekans ($f \geq 1$ MHz) ve oldukça düşük değerdeki frekans ($f \leq 1$ kHz) verileri kullanılır.

Bu yöntemle göre, N_{ss} ile C_{HF} - C_{LF} arasındaki ilişki [32];

$$\left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (8)$$

Burada C_i arayüzey tabakasının kapasitansdır. Bu çalışma için, 5 MHz'de ölçülen kapasitans C_{HF} olarak alınırken, 50 kHz'de ölçülen kapasitans C_{LF} olarak alınmıştır. Sonuç olarak, N_{ss} 'nin gerilime bağlı profili bu yöntem kullanılarak çizilmiştir ve Şekil 7'de verilmiştir. Bu şekilde gösterildiği gibi, N_{ss} değerinin $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Son zamanlarda benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da bulunmuştur [41–44].



Şekil 7. C_{LF} - C_{HF} frekans kapasitans yönteminden elde edilen Al/NiO/p-Si SD'nin N_{ss} -V grafiği (The N_{ss} -V plot of Al/NiO/p-Si SD obtained from the C_{LF} - C_{HF} frequency capacitance method.)

Çizelge 2. Çeşitli metal oksit arayüzeye sahip aygıtların 1 MHz frekansta elektriksel değerlerinin karşılaştırması (The comparison of electrical values at 1 MHz frequency for devices with various metal oxide interfaces)

Kaynak	V_D (eV)	N_A or N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	W_D (cm)	Φ_{B0} (eV)
Bu çalışma	1,123	$1,127 \times 10^{15}$	0,258	$14,09 \times 10^{-5}$	1,380
[5]	0,688	$0,75 \times 10^{15}$	0,263	$10,9 \times 10^{-5}$	0,951
[17]	0,523	$6,08 \times 10^{13}$	0,326	$3,45 \times 10^{-4}$	0,843
[27]	-	$9,57 \times 10^{15}$	0,132	$3,53 \times 10^{-5}$	1,014
[45]	0,68	$2,46 \times 10^{14}$	0,283	$1,91 \times 10^{-4}$	0,95
[46]	1,058	$1,68 \times 10^{15}$	0,25	-	1,29
[47]	1,47	$7,8 \times 10^{15}$	0,22	-	1,40

Tablo 2 literatürde çeşitli metal oksit arayüzeye sahip aygıtların frekansa bağlı elektriksel özelliklerine dair karşılaştırılmalı bir çizelge sunar. Tablo 2 incelendiğinde, bu çalışma neticesinde elde edilen elektriksel değerler için yüksek V_D ve en yüksek Φ_{B0} değerini, geniş bir W_D ve yüksek N_A değerleri sergileyerek literatürdeki çalışmalara kıyasla üstün bir performans göstermektedir. Bu özellikler iyi optimize edilmiş bir bağlantıya işaret ederek, bu çalışmayı yarı iletken cihaz uygulamalarında umut vadeden önemli bir ilerleme olarak konumlandırmaktadır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Al/NiO/p-Si SD'nin üretimi başarıyla gerçekleştirilmiş ve frekansa bağlı elektriksel özelliklerinin incelenmesi sunulmuştur. Al/NiO/p-Si SD'nin elektriksel özellikleri kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümlerinin uygulanması yoluyla değerlendirilmiştir. NiO arayüzey tabakasının kalınlığı, SEM'den elde edilen kesit görüntüsü kullanılarak $0,0345 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, C ve G/ω 'nin özellikle N_{ss} ve R_s 'nin etkili olduğu tükenme ve yığılma bölgelerinde frekans ve voltajdan önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. SD'nin R_s değerinin artan frekansla birlikte azaldığı ve +3 V için 50 kHz'de $155,79 \Omega$ 'dan 5 MHz'de $39,68 \Omega$ 'a kadar bir düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca N_{ss} değerinin elektronik aygıtlar için uygun olan $10^{12} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ mertebesinde olduğu belirlenmiştir. Bu deneysel çalışma, arayüzey tabakası olarak NiO kullanılmasının kapasitansın önemli ölçüde artmasına katkıda bulunmasından dolayı enerji depolama aygıtları veya ayarlanabilir elektronik bileşenler gibi uygulamalarda kullanılması açısından umut verici bir malzeme olduğunu göstermektedir. Ayrıca frekansa bağlı elektriksel değerlerin literatürle kıyaslandığında ortalama değerlerden yüksek olması, metal ile arayüzey tabakası arasında yüksek performanslı bir bağlantı oluştuğunu ortaya koymaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Ömer SEVGİLİ: Sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazımını sağlamıştır.

İkram ORAK: Aygıt fabrikasyonu, elektriksel ölçümlerin analizlerini ve makalenin yazımını sağlamıştır.

Sultan Süleyman ÖZEL: Arayüz tabakasının sentezi ve makalenin yazımını sağlamıştır.

Faruk ÖZEL: Makalenin yazımını ve dilbilgisi açısından kontrolünü sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Demirezen S., Çetinkaya H. G., Kara M., Yakuphanoglu F. ve Altındal Ş., "Synthesis, electrical and photo-sensing characteristics of the Al/(PCBM/NiO: ZnO)/p-Si nanocomposite structures", *Sensors and Actuators A: Physical*, 317: 112449, (2021).
- [2] Jeong S., Kyhm J., Cha S.-K., Hwang D. K., Ju B.-K., Park J.-S., Kang S. J. ve Han I. K., "High-Speed Colloidal

- Quantum Dot Photodiodes via Accelerating Charge Separation at Metal–Oxide Interface”, *Small*, 15: 1900008, (2019).
- [3] Çiçek O., Altındal Ş. ve Azizian-Kalandaragh Y., “A highly sensitive temperature sensor based on Au/Graphene-PVP/n-Si type Schottky diodes and the possible conduction mechanisms in the wide range temperatures”, *IEEE Sensors Journal*, 20: 14081–14089, (2020).
- [4] Seven S., Yiğit E., Bayındır S., Akman F., Sevgili Ö., Dayan O. ve Orak İ., “The photodiode performances of NDI-appended ruthenium complexes”, *Nano Express*, 5: 025002, (2024).
- [5] Altındal Ş., Sevgili Ö. ve Azizian-Kalandaragh Y., “The structural and electrical properties of the Au/n-Si (MS) diodes with nanocomposites interlayer (Ag-doped ZnO/PVP) by using the simple ultrasound-assisted method”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66: 3103–3109, (2019).
- [6] Alarabi A. A., Çiçek O., Makara H., Ünal F., Zurnacı M. ve Altındal Ş., “Comparison of p-n and p-i-n vertical diodes based on p-PMItz/n-Si, p-PMItz/n-4HSiC and p-PMItz/i-SiO₂/n-Si heterojunctions”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35: 957, (2024).
- [7] Hossain E., Sk R., Das M., Goura J., Roy S., Ray P. P., Mir M. H., Frontera A. ve Mukhopadhyay S., “Comparison of electrical conductivity and Schottky behavior of 4-[2-(9-anthryl)vinyl]pyridine based two 1D coordination polymers of Zn(II) and Cd(II)”, *European Journal of Inorganic Chemistry*, 27: e202300736, (2024).
- [8] Torrisi L., Havranek V., Mackova A., Torrisi A. ve Cutroneo M., “SiC and Si detectors comparison for high carbon energy spectrometry”, *Journal of Instrumentation*, 19: P07005, (2024).
- [9] Sevgili Ö., Şafak Asar Y., Altındal Ş., Ulusoy M. ve Azizian-Kalandaragh Y., “On comparison of Au/n-Si (MS) Schottky diodes with and without (Brushite + Monetite: PVC) an interlayer grown by spin coating technique”, *Electrical Engineering*, (2024).
- [10] Genç N. ve Durna Pişkin E., “Grafit katot ve karışık metal oksit kaplı Ti anotların kullanıldığı S2O8²⁻, H2O2 ve O3 ile desteklenen elektro-oksiasyon prosesinin optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 27: 1453–1461, (2024).
- [11] Durmuş H., Şenel R., Taştekin R. A., Gül C. ve Çömez N., “Alüminyum alaşımlarına uygulanan alüminyum oksit takviyeli alüminyum/çinko soğuk sprey kaplamaların morfoloji ve aşınma dayanımına etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 1, (2025).
- [12] Pepe Y., “NiO kompozit filmlerin geliştirilmiş optik sınırlama davranışı”, *Politeknik Dergisi*, 28: 979–985, (2025).
- [13] Sarcan F., Doğan U., Althumali A., Vasili H. B., Lari L., Kerrigan A., Kuruoğlu F., Lazarov V. K. ve Erol A., “A novel NiO-based p-i-n ultraviolet photodiode”, *Journal of Alloys and Compounds*, 934: 167806, (2023).
- [14] Nagy B., Al-Rawhani M. A., Cheah B. C., Barrett M. P. ve Cumming D. R. S., “Immunoassay multiplexing on a complementary metal oxide semiconductor photodiode array”, *ACS Sensors*, 3: 953–959, (2018).
- [15] Politzer P. ve Weinstein H., “Some relations between electronic distribution and electronegativity”, *Journal of Chemical Physics*, 71: 4218–4220, (1979).
- [16] Hublikar L. V., Ganachari S. V., Shilar F. A. ve Raghavendra N., “Recent advances in transition metal oxide nanomaterials for solar cell applications: A status review and technology perspectives”, *Materials Research Bulletin*, 187: 113351, (2025).
- [17] Taşçıoğlu İ., Soylu M., Altındal Ş., Al-Ghamdi A. A. ve Yakuphanoglu F., “Effects of interface states and series resistance on electrical properties of Al/nanostructure CdO/p-GaAs diode”, *Journal of Alloys and Compounds*, 541: 462–467, (2012).
- [18] Jang B., Kim T., Lee S., Lee W.-Y. ve Jang J., “Schottky nature of Au/SnO₂ ultrathin film diode fabricated using sol-gel process”, *IEEE Electron Device Letters*, 39: 1732–1735, (2018).
- [19] Hossain M. A., Zhang T., Zakaria Y., Lambert D., Burr P. A., Rashkeev S. N., Abdallah A. ve Hoex B., “Doped nickel oxide carrier-selective contact for silicon solar cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11: 1176–1187, (2021).
- [20] Liu S., Liu R., Chen Y., Ho S., Kim J. H. ve So F., “Nickel oxide hole injection/transport layers for efficient solution-processed organic light-emitting diodes”, *Chemistry of Materials*, 26: 4528–4534, (2014).
- [21] Park H., Chaurasiya R., Jeong B. H., Sakthivel P. ve Park H. J., “Nickel oxide for perovskite photovoltaic cells”, *Advanced Photonics Research*, 2: 2000178, (2021).
- [22] Marnadu R., Venkatesan S., Alkallas F. H., Ben Gouider Trabelsi A., Shkir M. ve AlFaify S., “Facile synthesis and characterization of metal ions (Ce, Cu, Gd, Mn and Y) doped nickel oxide nanostructures for spintronic and photodiode applications”, *Physica Scripta*, 97: 095804, (2022).
- [23] Narmada A., Ponnusamy K., Mohan L., Subramanian S. ve Raj M. C. J., “Jet nebuliser spray pyrolysed indium oxide and nickel doped indium oxide thin films for photodiode application”, *Optik (Stuttgart)*, 202: 163701, (2020).
- [24] Nakagomi S., “Ultraviolet photodetector based on a beta-gallium oxide/nickel oxide/beta-gallium oxide heterojunction structure”, *Sensors*, 23, (2023).
- [25] Cai X., Hu T., Hou H., Zhu P., Liu R., Peng J., Luo W. ve Yu H., “A review for nickel oxide hole transport layer and its application in halide perovskite solar cells”, *Materials Today Sustainability*, 23: 100438, (2023).
- [26] Enns Y., Timoshnev S., Kazakin A., Shubina K., Uvarov A., Vorobyev A., Nikitina E., Mizerov A., Andreeva V., Fedorenko E., Koroleva A. ve Zhizhin E., “Characterization of the p-NiO/n-GaN heterojunction and development of ultraviolet photodiode”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 181: 108624, (2024).
- [27] Gozeh B. A., Karabulut A., Ismael C. B., Saleh S. I. ve Yakuphanoglu F., “Zn-doped CdO effects on the optical, electrical and photoresponse properties of heterojunctions-based photodiodes”, *Journal of Alloys and Compounds*, 872: 159624, (2021).
- [28] Güneş O., Sarılmaz A., Baş S. Z., Özmen M., Özel F. ve Ersöz M., “Electrochemical detection of epinephrine based on a screen-printed electrode modified with NiO–

- ERGO nanocomposite film”, *Electroanalysis*, 33: 2460–2468, (2021).
- [29] Afandiyeva İ. M., Dökme İ., Altındal Ş., Bülbül M. M. ve Tataroğlu A., “Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al–TiW–Pd₂Si/n-Si structures”, *Microelectronic Engineering*, 85: 247–252, (2008).
- [30] Moloi S. J. ve Bodunrin J. O., “Characterisation of interface states of Al/p-Si Schottky diode by current–voltage and capacitance–voltage–frequency measurements”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34: 1712, (2023).
- [31] Gupta R. K., Hendi A. A., Cavas M., Al-Ghamdi A. A., Al-Hartomy O. A., Aloraini R. H., El-Tantawy F. ve Yakuphanoglu F., “Improvement of photoresponse properties of NiO/p-Si photodiodes by copper dopant”, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 56: 288–295, (2014).
- [32] Nicollian E. H. ve Brews J. R., *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology*, John Wiley & Sons, New York, (1982).
- [33] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, (1981).
- [34] Sevgili Ö., Orak İ. ve Tıraş K. S., “The examination of the electrical properties of Al/Mg₂Si/p-Si Schottky diodes with an ecofriendly interfacial layer depending on temperature and frequency”, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 144: 115380, (2022).
- [35] Ulusoy M., Altındal Ş., Azizian-Kalendaragh Y., Özçelik S. ve Mirzaei-Kalar Z., “The electrical characteristic of an MIS structure with biocompatible minerals doped (Brushite+Monetite: PVC) interface layer”, *Microelectronic Engineering*, 258: 111768, (2022).
- [36] Manjunath V., Rajagopal Reddy V., Sekhar Reddy P. R., Janardhanam V. ve Choi C. J., “Electrical and frequency-dependent properties of Au/Sm₂O₃/n-GaN MIS junction with a high-k rare-earth Sm₂O₃ as interlayer”, *Current Applied Physics*, 17: 980–988, (2017).
- [37] Sevgili Ö., “The investigation of the electrical characteristics and photo-response properties of the Al/(CMAT)/p-Si structures”, *Solid State Sciences*, 117: 106635, (2021).
- [38] Rhoderick E. H. ve Williams R. H., *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press, Oxford, (1988).
- [39] Demirezen S., Sönmez Z., Aydemir U. ve Altındal Ş., “Effect of series resistance and interface states on the I–V, C–V and G/ω–V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature”, *Current Applied Physics*, 12: 266–272, (2012).
- [40] Castagné R. ve Vapaille A., “Description of the SiO₂–Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements”, *Surface Science*, 28: 157–193, (1971).
- [41] Alptekin S. ve Altındal Ş., “Electrical characteristics of Au/PVP/n-Si structures using admittance measurements between 1 and 500 kHz”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31: 13337–13343, (2020).
- [42] Çetinkaya H. G., Bengi S., Sevgili Ö. ve Altındal Ş., “The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Al/(CMAT)/p-Si structures”, *Physica Scripta*, 99: 025955, (2024).
- [43] Erbil Tanrıkulu E. ve Taşçıoğlu İ., “Variation of the surface states and series resistance depending on voltage, and their effects on the electrical features of a Schottky structure with CdZnO interface”, *Journal of Electronic Materials*, 52: 2432–2440, (2023).
- [44] Hameed S., Berkün Ö. ve Altındal Yerişkin S., “On the voltage dependent series resistance, interface traps, and conduction mechanisms in the Al/(Ti-doped DLC)/p-Si/Au Schottky barrier diodes (SBDs)”, *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 11: 235–244, (2024).
- [45] Tataroğlu A., Al-Ghamdi A. A., El-Tantawy F., Farooq W. A. ve Yakuphanoglu F., “Analysis of interface states of FeO–Al₂O₃ spinel composite film/p-Si diode by conductance technique”, *Applied Physics A*, 122: 220, (2016).
- [46] Kaya S. ve Yılmaz E., “A comprehensive study on the frequency-dependent electrical characteristics of Sm₂O₃ MOS capacitors”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62: 980–987, (2015).
- [47] Çaldıran Z., Taşyürek L. B. ve Nuhoglu Y., “The effect of different frequencies and illuminations on the electrical behavior of MoO₃/Si heterojunctions”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32: 27950–27961, (2021).