

Atf İçin: Birgi Ö, Kavasoglu A S, Kavasoglu N, 2022. Işık Altında Elektrodpozisyon Yöntemi ile Üretilmiş $Ga_xO_yN_z/p$ -Si Diyot Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(4): 2129 - 2139.

To Cite: Birgi Ö, Kavasoglu A S, Kavasoglu N, 2022. Electrical Characterization of the $Ga_xO_yN_z/p$ -Si Diode Structure manufactured by Electrodeposition Method Under Illumination. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(4): 2129 - 2139.

Işık Altında Elektrodpozisyon Yöntemi ile Üretilmiş $Ga_xO_yN_z/p$ -Si Diyot Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu

Özcan BİRGİ^{1*}, Abdulkadir Sertap KAVASOĞLU¹, Neşe KAVASOĞLU¹

ÖZET: Bu çalışmada, $Ga_xO_yN_z$ yarıiletken materyal LED grubu aydınlatması altında elektrodpozisyon tekniği kullanılarak p-Si (100) üzerine biriktirilmiştir. Galyum Nitrat, Amonyum Nitrat ve deiyonize su karışımı kullanılarak elektrolit çözeltisi hazırlanmıştır. Platin levha ve p-Si sırasıyla anot ve katot olarak kullanılmıştır. $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısının üretim aşamasından sonra, 20-100 °C aralığında 10 °C adımlarla sıcaklığa bağımlı Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri alınarak iki boyutlu arayüzey durum yoğunluğu dağılımı analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısının doğrultucu diyot özelliği sergilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrodpozisyon, fotoelektrokataliz, galyum bazlı malzemeler, GaN, Ga_2O_3 , elektriksel karakterizasyon

Electrical Characterization of the $Ga_xO_yN_z/p$ -Si Diode Structure Manufactured by Electrodeposition Method Under Illumination

ABSTRACT: In this study, $Ga_xO_yN_z$ films were deposited onto p-Si (100) substrates by using electrodeposition technique under illumination. A mixture of gallium nitrate, ammonium nitrate and distilled water was utilized as electrolyte. Platinum and p-Si were used as anode and cathode, respectively. After the deposition process of $Ga_xO_yN_z/p$ -Si structure, temperature dependent Current-Voltage (I-V) measurements were performed and characterized between 20 °C and 100 °C in 10 °C steps to analyses of two dimensional density of interface states of the device. Characteristics show that $Ga_xO_yN_z/p$ -Si device structure exhibits rectification behavior.

Keywords: Electrodeposition, photoelectrocatalis, gallium based materials, GaN, Ga_2O_3 , electrical charecterisation

¹ Özcan BİRGİ ([Orcid ID: 0000-0003-3570-2654](https://orcid.org/0000-0003-3570-2654)), Abdulkadir Sertap KAVASOĞLU ([Orcid ID: 0000-0001-6758-5574](https://orcid.org/0000-0001-6758-5574)), Neşe KAVASOĞLU ([Orcid ID: 0000-0001-7249-2700](https://orcid.org/0000-0001-7249-2700)) Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Muğla, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Özcan BİRGİ, e-mail: ozcanbirgi@mu.edu.tr

Bu çalışma Özcan BİRGİ'nin Doktora tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Bilimsel ve teknolojik gelişmelerin ivme kazandığı günümüzde, yapılan bilimsel araştırmalar daima mevcut elektronik aygıtların performansını arttırmaya yöneliktir. Bu çalışmaların sonucunda, her geçen gün daha hızlı ve yüksek performanslı diyotlar, yüksek güçte çalışan yarıiletken aygıtlar, Işık Yayan Diyotlar (LED'ler), lazerler, güneş pilleri ve yapısında yarıiletken filmler barındıran birçok yeni ürün teknoloji marketlerine girmiştir. Grup IV ve III-V tabanlı aygıt teknolojileri uzun yıllardır üzerine çalışılan ve ticari olarak kullanılan en önemli yarıiletken malzemeler olmuşlardır fakat düşük güçte çalışma kapasiteleri nedeniyle günümüzdeki güç elektroniği uygulamalarında yetersiz kalmaktadır (Kim, 2017). Geniş yasak enerji aralığına (E_g) sahip yarıiletkenler ($E_g > 3 eV$) güç elektroniği uygulamaları açısından üstün özelliklere sahiptir ve bu uygulamalar için gelecek vaat etmektedir (Higashiwaki, 2017; Mochalov L, 2020). Galyum tabanlı yarıiletkenler (GaN, Ga₂O₃) yüksek enerji aralıkları ve yüksek anahtarlama gerilimleri nedeniyle yarıiletken teknolojisi uygulamalarında popüler olmuşlardır (Saron, 2021; Altuntaş, 2014; Kang, 2019).

Galyum tabanlı yarıiletkenler başlıca, moleküler ışın epitaksi (MBE), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOVCD) yöntemleriyle üretilmektedir (Higashiwaki, 2022; Jubu, 2020). Bu yöntemler üretim kalitesi bakımından iyi sonuçlar vermesine rağmen üretimde kullanılan cihazların fiyatı ve üretim maliyeti oldukça yüksektir.

Elektrodepozisyon, diğer malzeme üretim tekniklerine kıyasla düşük maliyetli olması, vakum ortamı gerektirmemesi, oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda üretim imkânı sağlaması, üretim sonrasında oluşan atığın az olması ve üretim koşullarının gerektirdiği şekilde sistemde değişiklik yapmaya elverişli olmasından dolayı tercih edilen bir yöntemdir. Buna karşın literatürde Galyum tabanlı (GaN, Ga₂O₃) yarıiletken malzemelerin elektrodepozisyon yöntemi ile üretilmesiyle ilgili çok az çalışma bulunmaktadır.

Elektrodepozisyon yöntemiyle GaN filmler ilk kez 2005 yılında R.K. Roy vd. tarafından üretilmiştir. (Roy, 2005) Bu çalışmada, elektrodepozisyon çözeltisi farklı oranlardaki galyum nitrat tuzu (Ga(NO₃)₃xH₂O), amonyum nitrat tuzu (NH₄NO₃) ve deiyonize suyun karıştırılmasıyla hazırlanmıştır ve elektrodepozisyon işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilerek GaN filmler Si ve SnO₂ alttaşlar üzerine kaplanmıştır. Bu konu üzerine yapılan diğer çalışmalarda ise üretilen filmin yapısında Galyum, Nitrojen ve Oksijen (Ga_xO_yN_z) olduğu rapor edilmiştir (Kang, 2019). Aynı çalışmada, elektrodepozisyon işlemi esnasında elektrotlara sürülen akım yoğunluğu değerine göre Galyum ve Nitrojen arasında bağlanmanın olmadığı ve üretilen filmde Ga₂O₃ fazlarının baskın olabileceği belirtilmiştir (Kang, 2019).

Literatürde, elektrodepozisyon yöntemi ile metal ya da yarıiletken filmlerin üretiminde kullanılan silisyum alttaşların (katotların) büyük bir kısmı n-tipi iletkenliğe sahiptir. Katot olarak kullanılan n-tipi Si alttaşlar, yapısında çoğunluk yükleri olarak elektron bulundurduğu için elektrodepozisyon çözeltisi içerisinde bulunan artı (+) yüklü iyonlarla alttaş yüzeyinde birleşerek homojen bir kaplamanın oluşmasını sağlarlar. p-tipi Si katotlarda ise çoğunluk yükleri olarak artı (+) yüklü boşluklar olduğu için elektrodepozisyon yöntemi ile p-tipi silisyum üzerine homojen bir şekilde metal ya da yarıiletken malzeme kaplamak daha zordur (Kawamura, 2005). Bu yüzden literatürdeki elektrodepozisyon yöntemi ile üretilen GaN filmlerin tamamında katot olarak n-Si kullanılmıştır.

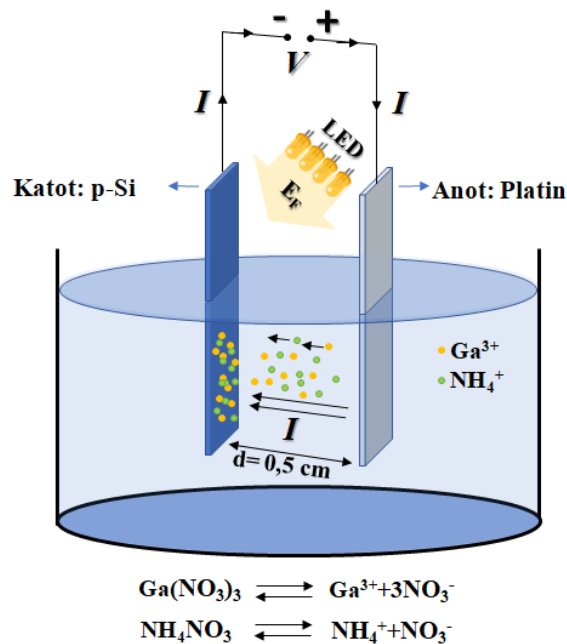
Katkısız GaN filmlerin içerisinde oksijen gibi safsızlıklar bulunduğu n-tipi yarıiletken özelliği göstermektedir (Duc, 2015). Bu yüzden elektrodepozisyon yöntemi ile üretilen GaN filmlerle pn heteroeklem, metal-yarıiletken (MY) ya da metal-yalıtkan-yarıiletken (MYI) diyot yapısı oluşturabilmek için alttaş (katot) olarak p-Si kullanmak gerekmektedir. Katot olarak p-tipi silisyum

kullanıldığında, çözelti içerisinde bulunan artı (+) yüklü iyonlar potansiyel farktan dolayı p-Si üzerinde birikmeye başlar. Fakat p-Si'un çoğunluk yük taşıyıcıları artı (+) yüklü boşluklar olduğu için, negatif kutuplu katottan pompalanan elektronlarla rekombinasyona uğramaktadır. Bundan dolayı homojen bir kaplama gerçekleşmemektedir. p-Si'un üzerinde homojen bir kaplama elde edebilmek için katotun negatifliğini arttırmak gerekir, yani elektron yoğunluğunu arttırmak gerekir. (Ivanau, 2012) Yarıiletken malzemeler, üzerine yasak enerji aralığından daha yüksek enerjili ışıkla ($E_F > E_g$) aydınlatıldığında elektron-boşluk çifti üretirler. Elektrodepozisyon işleminde katot olarak kullanılan p-Si aydınlatıldığında ise üretilen boşluklar, negatif kutuptan pompalanan elektronlarla rekombinasyona uğrarken, üretilen elektronlar ise çözelti içerisinde bulunan artı (+) yüklü iyonlarla rekombinasyona uğrar, yani çözelti içerisinde bulunan pozitif yükler rekombinasyon merkezi olarak davranır. Böylelikle p-Si elektrodun yüzeyindeki elektron yoğunluğu arttığı için daha homojen bir kaplama gerçekleşir.

Bu çalışmada ilk kez ışık altında elektrodepozisyon yöntemiyle p-Si üzerine $Ga_xO_yN_z$ kaplanarak ($Ga_xO_yN_z/p$ -Si) diyot yapısı üretilmiştir. $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısının üretim aşamasından sonra, 20-100 °C aralığında 10 °C adımlarla sıcaklığa bağımlı Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri alınarak iki boyutlu arayüzey durum yoğunluğu dağılımı analizi yapılmıştır.

MATERYAL ve METOT

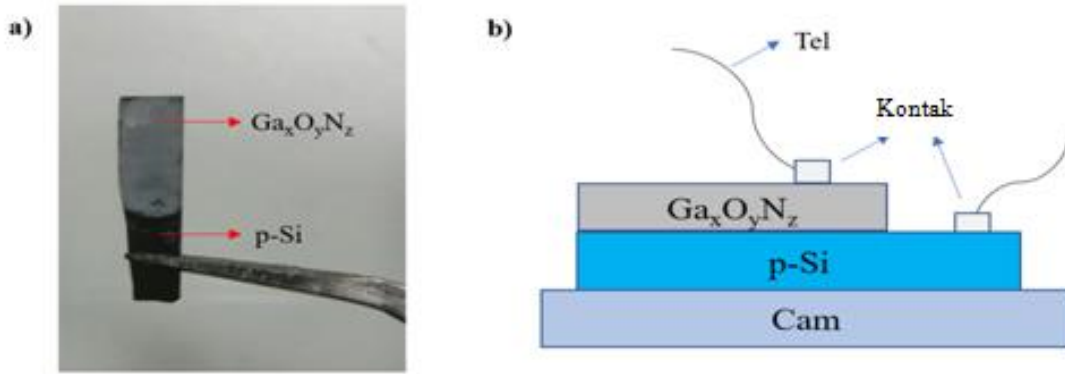
Işık altında elektrodepozisyon (ED) yöntemiyle $Ga_xO_yN_z$ filmlerin üretilmesi için $Ga(NO_3)_3 \cdot xH_2O$, NH_4NO_3 tuzları ve 25 mL deiyonize su karışımı 30 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılarak ED çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan ED çözeltisinin pH'ı oda sıcaklığında 2.9 olarak ölçülmüştür. Anot olarak platin levha, katot (alttaş) olarak ise ticari olarak satılan 2 Ω cm öz dirence sahip p-Si (100) kullanılmıştır. p-Si alttaşlar 0.5x1.5 cm boyutlarında kesilerek platin anotla aynı boyutlarda olması sağlanmıştır. ED işleminden önce p-Si alttaşlar sırasıyla toluen, aseton, etanol ve deiyonize su ile ultrasonik temizleyicide 30'ar dakika temizlenmiştir. Son olarak alttaş, %5 hidroflorik asit içerisinde 2 dakika bekletilerek üzerindeki oksit tabaka, organik ve inorganik kirlerden arındırılmıştır.



Şekil 1. Işık altında elektrodepozisyon yönteminde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi

Elektrotların 1 cm'lik kısmı ED çözeltisi içerisine daldırılmıştır ve elektrotlar arası mesafe 0.5 cm olarak ayarlanmıştır. Işık altında ED işlemini gerçekleştirebilmek için gün ışığı Işık Yayan Diyot (LED) grubu kullanılmıştır ve p-Si katotu aydınlatacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 1.).

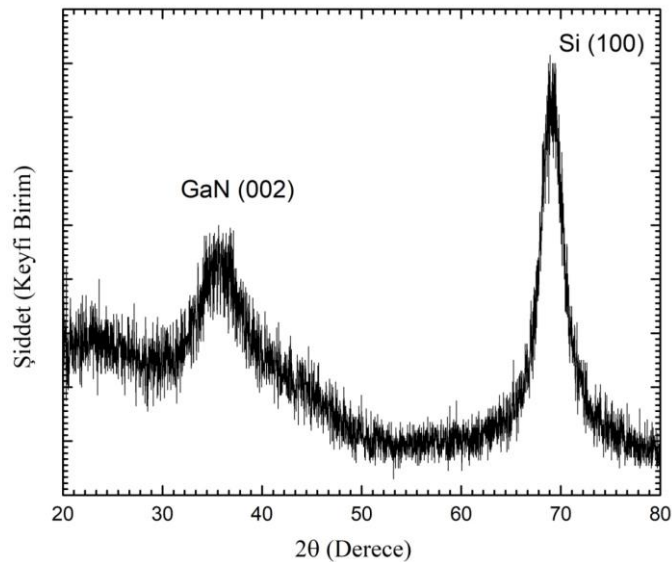
Son olarak elektrotlara sürülen akım yoğunluğu 5 mA/cm^2 olarak ayarlanmıştır ve 6 saatlik elektrodepozisyon süresi boyunca akım değişimi gözlemlenmiştir ve bu süre boyunca akım değişmez kalmıştır. ED işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve ED işlemi sonunda $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı 400°C 'de 20 dakika boyunca ısıtılma tabii tutulmuştur. Üretim aşamasından sonra aygıt yapısının XRD ve SEM ölçümleri alınarak $Ga_xO_yN_z$ 'in yapısı ve yüzey morfolojisi hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi amacıyla $Ga_xO_yN_z/p$ -Si yapısı lam (cam) üzerine yerleştirilerek iletken kontak yardımıyla örneğin üstünden ohmik kontaklar alınmıştır (Şekil 2.b.). Örnek, ev yapımı ölçüm istasyonuna yerleştirilmiştir ve Keithley 236 akım-gerilim ölçüm cihazı ile karanlık ortamda 20 - 100°C aralığında 10°C 'lik adımlarla sıcaklığa bağımlı Akım-Gerilim (I-V-T) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçüm sonuçları kullanılarak ışık altında ED yöntemi ile üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si yapısı için diyot parametreleri ve 2 boyutlu arayüzey durum yoğunluğu analizi yapılmıştır.



Şekil 2. a) Işık altında elektrodepozisyon yöntemi ile üretilmiş $Ga_xO_yN_z/p$ -Si yapısının görüntüsü. b) Elektriksel ölçüm için hazır hale getirilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si yapısının yanal şematik gösterimi

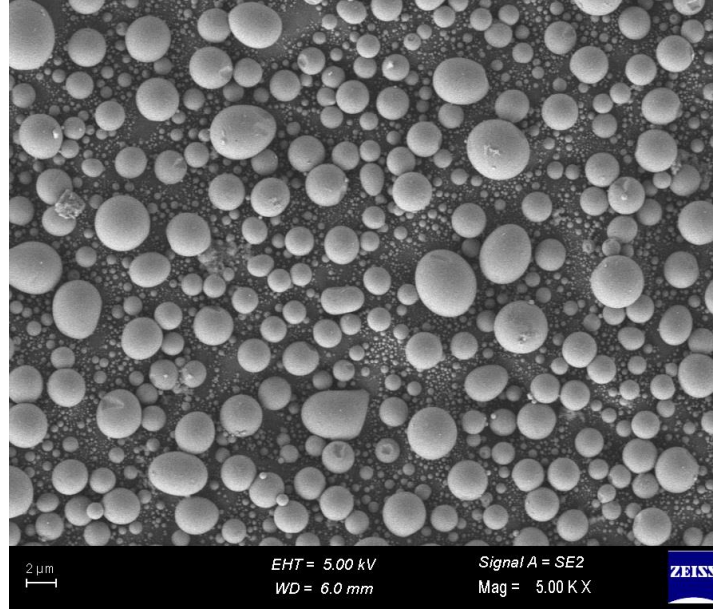
BULGULAR VE TARTIŞMA

Işık altında elektrodepozisyon yöntemiyle üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için XRD ölçümleri ve SEM görüntüleri alınarak p-Si alttaşı üzerine üretilen $Ga_xO_yN_z$ 'in yapısı ve yüzey morfolojisi hakkında bilgi sahibi olunmuştur.



Şekil 3. $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için XRD grafiği

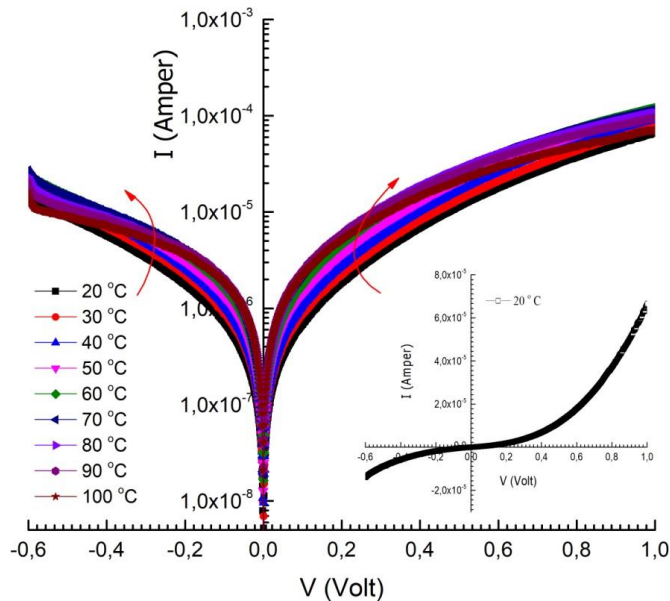
p-Si (100) üzerine ışık altında elektrodepozisyon yöntemi ile üretilmiş $Ga_xO_yN_z$ aygıt yapısı için (2θ değeri) 20° ile 80° arasında XRD ölçümleri alınmıştır. Şekil 3.'te gösterilen XRD grafiğinde 34.6° 'de ve 69.1° 'de piklerin olduğu görülmektedir. Üretilen aygıt yapısı için elde edilen bu pikler analiz edildiğinde, 34.6° 'deki pikin (002) yönelimli GaN (Roy, 2005; Jing, 2019) ve 69.1° 'deki pikin alttaşı olarak kullanılan (100) yönelimli p-Si'a (Saron, 2021) ait olduğu saptanmıştır.



Şekil 4. Işık altında ED yöntemiyle üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için SEM görüntüsü

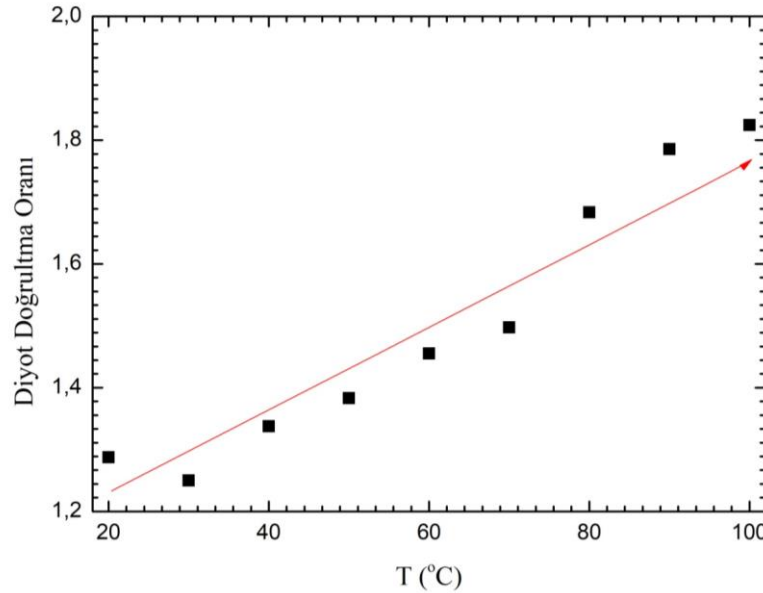
Üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısının yüzey morfolojisi hakkında bilgi sahibi olmak için SEM cihazı ile yüzey görüntüsü alınmıştır. Şekil 4.'te gösterilen 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri yardımıyla p-Si üzerine üretilen $Ga_xO_yN_z$ 'ın yüzeyinin $0.1 \mu m$ ile $2 \mu m$ arasında değişen küresel taneciklerden oluşan bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. (Lahiri, 2014; Roy, 2005)

6 saatlik ED süresine sahip $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için I-V ölçümlerinden alınan verilerin kullanılmasıyla çizilen yarı logaritmik I-V grafiği Şekil 5.'te verilmiştir. Yarı logaritmik skalada çizilen I-V grafiğinin ileri gerilimlenme bölgesinde diyot karakteristiğine uygun olarak doğrultuculuk özelliği sergilediği görülmektedir.



Şekil 5. Işık altında ED yöntemiyle üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için sıcaklık bağımlı yarı logaritmik I-V karakteristikleri (İç grafikte, $20^\circ C$ için akım-gerilim karakteristiği grafiği verilmiştir.)

Şekil 5.'te verilen yarı logaritmik I-V eğrisinde artan sıcaklıkla akım artmaktadır, bu termal olarak aktifleşen yük taşıyıcılarının varlığına işarettir (Iucolano, 2007; Zhou, 2007). Yarı logaritmik I-V karakteristiğinin yüksek ileri gerilimleme bölgesinde ise eğri, seri direnç (R_s) etkisinden dolayı doğrusal davranıştan sapmaktadır. Sıcaklığa bağımlı akımdaki değişim ve yüksek gerilimleme bölgesindeki doğrusallıktan sapma $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısında arayüzey durumlarının olabileceğini (N_{ss}) göstermektedir. Sıcaklığa bağımlı I-V karakteristiği kullanılarak 0.6 V değerinde hesaplanan diyot doğrultma oranlarının sıcaklıkla değişimi Şekil 6.'da görülmektedir.



Şekil 6. 0.6 V için hesaplanan Diyot Doğrultma Oranı değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 6.'da verilen Diyot Doğrultma Oran'larının artan sıcaklıkla 1.2'den 1.8 değerine arttığı gözlemlenmiştir.

Yarı logaritmik I-V eğrisi, Card ve Rhoderick'in (1971) Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) için önerdiği yarı logaritmik I-V karakteristiğiyle uyum içerisindedir. Bu yüzden karanlıkta yapılan I-V ölçümlerinde MYY yapılar için kullanılan analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Termiyonik emisyon teorisine göre R_s 'in varlığında bir diyodun ileri gerilimleme bölgesindeki akım-gerilim karakteristiği;

$$I = I_0 \left[\exp \frac{q}{nk_B T} (V - IR_s) \right] \quad (1)$$

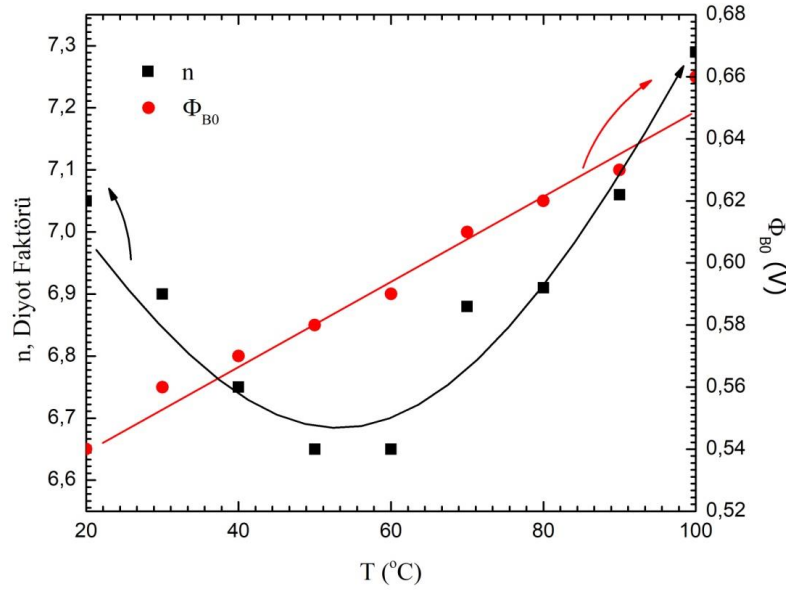
şeklinde ifade edilir. Burada n , diyot faktörü; k_B , Boltzman sabiti; T , sıcaklık; q , elektrik yükü; V , gerilim; I , ileri gerilimleme akımı; I_0 , ters gerilimleme doyma akımıdır ve

$$I_0 = SA^* T^2 e^{\frac{q\Phi_{BO}}{k_B T}} \quad (2)$$

ile ifade edilir. Burada A^* , Richardson sabitidir ve bu değer p-Si için $32 \text{ A K}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ 'dir, Φ_{BO} sıfır voltteki bariyer yüksekliği ve S diyotun etkin (ortalama) kesit alanıdır. Denklem (1)'de verilen diyot denkleminin \ln 'i alınırsa,

$$\ln I = \frac{qV}{nk_B T} + \ln I_0 \quad (3)$$

şekline dönüşür ve $\ln I$ - V grafiğinin ileri gerilimleme bölgesindeki karakteristiğinden diyot parametreleri bulunabilir. Şekil 3.'te verilen $\ln I$ - V grafiğinden diyot faktörü (n) ve ters gerilimleme doyma akımı (I_0) hesabı yapabilmek için seçilen lineer bölge 0.2 V ile 0.6 V arasındaki bölgedir. Buradan hesaplanan I_0 değerleri ile Denklem (2) kullanılarak Φ_{BO} bulunabilir.



Şekil 7. ln I-V grafiğinden bulunan n (diyot faktörlerinin) ve Φ_{B0} 'ların sıcaklıkla değişimi

Şekil 7.'de ln I-V grafiğinden bulunan diyot faktörleri ve Φ_{B0} değerlerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Diyot faktörleri sıcaklıkla 6.6 ile 7.3 aralığında değişirken, Φ_{B0} değerleri sıcaklıkla doğrusal olarak artmaktadır. Φ_{B0} değerlerinin sıcaklıkla lineer olarak artması ve diyot faktörü değerinin 1'den yüksek olması, $GaxOyNz/p$ -Si yapısında arayüzey durumlarının bulunduğunu ve bariyer yüksekliğinde homojensizliklerin olduğunu gösterir. Yüksek n değerleri, arayüzey boyunca tünelleme akım-iletim mekanizmasının geçerli olabileceğinin ve bariyer homojensizliklerinin olabileceğine işaret eder (Mohan, 2014). Ayrıca sıcaklığa n ve Φ_{B0} 'ın sıcaklığa bağımlı olması, arayüzeyde heterojen yük dağılımının olduğunu gösterir. Bariyer yüksekliğindeki homojensizlikler, $GaxOyNz/p$ -Si arayüzeyinde bulunan heterojen yük dağılımının, kusurların, oksit tabakanın ve düzensiz atomik dağılımın bir fonksiyonudur. Bu gözlem, termiyonik emisyon teorisi ve literatürde bulunan Ga tabanlı yarıiletken-Silisyum yapıları üzerine yapılan çalışmalarda bariyer yüksekliğindeki homojensizliklerin açıklanmasıyla uyum içerisindedir. (Tuan, 2015; Kumar, 2013)

Eğer Denklem (2),

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \frac{q\Phi_{B0}}{k_B T} + \ln(SA^*) \quad (4)$$

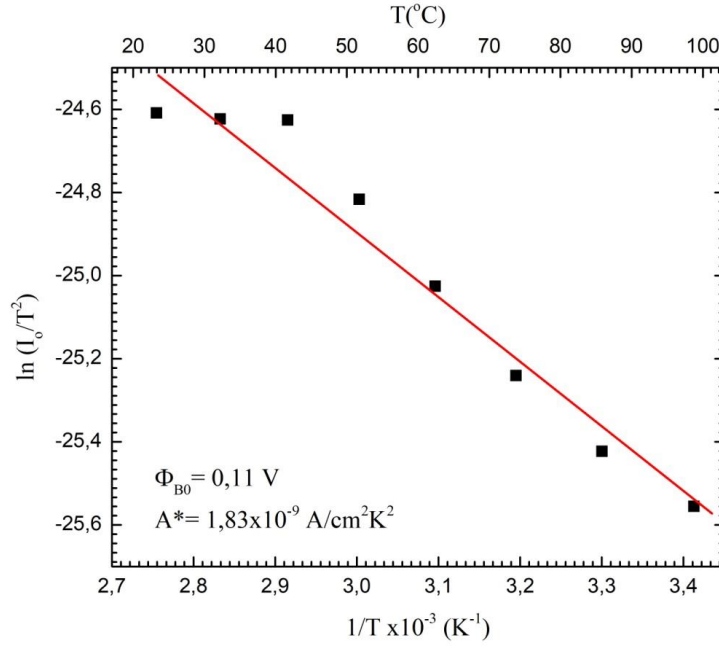
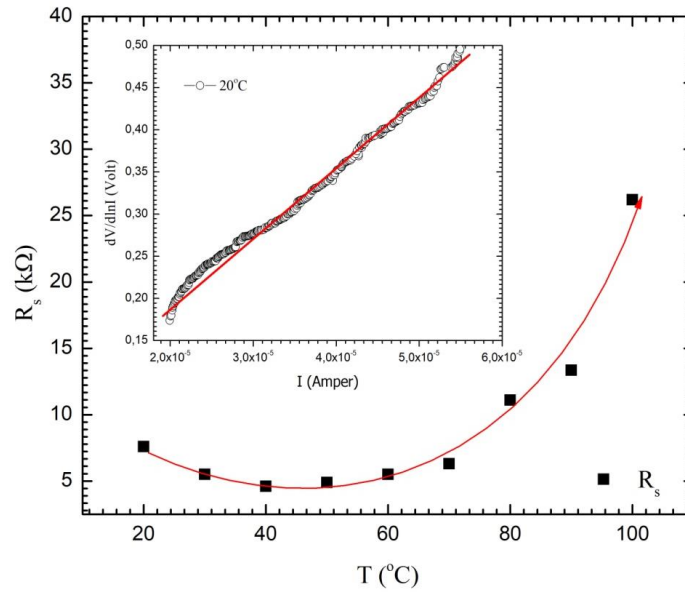
şekline dönüştürülürse, $\ln(I_0/T^2)-1/T$ grafiğinin (Richardson çizimi) eğimi Φ_{B0} 'ı ve düşey eksen kestiği nokta ise A^* değerini verir. Hesaplamalar için S, 0.5 cm^2 olarak alınmıştır.

Şekil 8'de $\ln(I_0/T^2)-1/T$ çizimi doğrusal bir azalış göstermektedir. Richardson çizimine lineer fit yapılarak $\Phi_{B0} = 0,11 \text{ V}$ ve A^* ise $1.83 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ olarak bulunmuştur. Burada hesaplanan A^* ifadesi p-Si için verilen teorik değerden 10^8 kat küçüktür. A^* 'daki bu sapmanın, kontaklardaki bariyer yüksekliği homojensizlikleri ve arayüzeyde bulunan yüksek ve düşük bariyer bölgelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. (Roul, 2015) Buna ek olarak, hesaplamada kullanılan etkin (ortalama) kesit alanı hesaplamada kullanılan değerden çok daha küçük olabileceğinden dolayı A^* değeri, teorik değerinden küçük hesaplanmış olabilir. (Bhat, 2010; Saron, 2020)

ln I-V grafiğinin 0.6 ile 1.0 V arasındaki bölgesine Cheung-Cheung modeli kullanılarak seri direnç (R_s) değerleri hesaplanmıştır. Bu modele göre diyot denklemi;

$$\frac{dV}{d \ln I} = IR_s + n \left(\frac{k_B T}{q} \right) \quad (5)$$

şekline dönüştürülür. Burada I 'ya karşılık $dV/d \ln I$ grafiğinin eğiminden R_s bulunabilir.

Şekil 8. $\ln(I_0/T^2)$ - $1/T$ karakteristiği (Richardson Çizimi)Şekil 9. Cheung-Cheung Metodu ile Bulunan Seri Dirençlerin Sıcaklıkla Değişimi. (İç grafikte, 20°C için Cheung-Cheung Metodu uyarlaması verilmiştir.)

Şekil 9'da Cheung-Cheung metodu ile hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Seri direnç değerleri sıcaklıkla birlikte $5 \text{ k}\Omega$ değerinden $25 \text{ k}\Omega$ değerine artış sergilemiştir.

Card ve Rhoderick tarafından geliştirilen matematiksel model ile 2 boyutlu arayüzey durum yoğunluğu dağılımı (N_{SS}) hesabı

$$N_{SS} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_S}{W_D} \right] \quad (6)$$

eşitliği kullanılarak yapılmıştır. Burada W_D , serbest yüklerden arındırılmış bölge genişliği, δ yalıtkan bölgenin genişliği (600 kHz 'de yapılan Kapasitans-Gerilim ölçümlerinden 0 V 'a karşılık gelen kapasitans değerinden hesaplanmıştır) ϵ_i ve ϵ_S , sırasıyla arayüzey ve yarıiletken malzeme için dielektrik geçirgenlik değerleridir. Burada $n(V)$ ise,

$$n(V) = \frac{q}{k_B T} \left(\frac{d(V - IR_S)}{d(\ln(I/I_0))} \right) \quad (7)$$

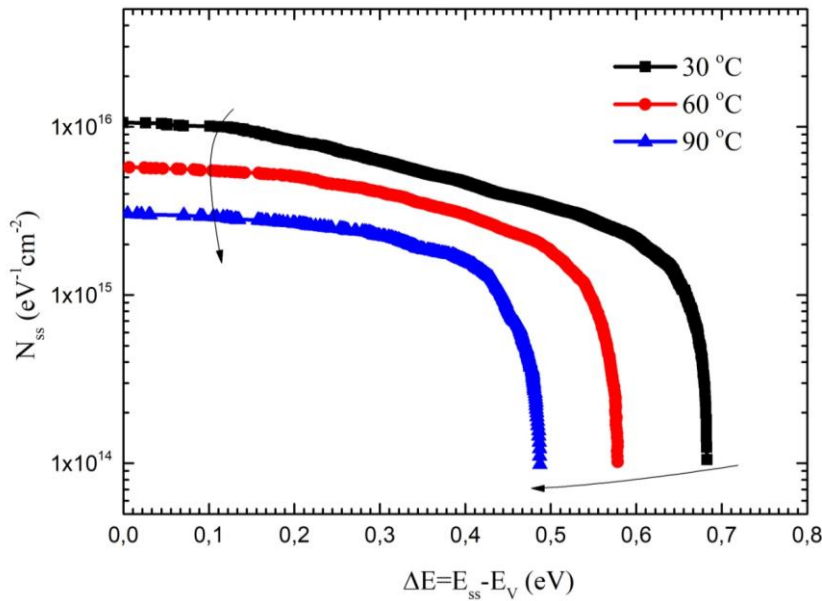
ile ifade edilir. p-tipi yarıiletken için değerlik bandının en üst enerji seviyesine (E_V) göre arayüzey durum enerjisi, E_{SS}

$$E_{SS} - E_V = q(\Phi_e - V) \quad (8)$$

ile verilir. Burada Φ_e , etkin bariyer yüksekliğidir ve arayüzey ile yarıiletken arasına yerleşmiş arayüzey durumlarının varlığında uygulanan gerilimle değişir (Denklem 9.).

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \beta(V - IR_S) = \Phi_{B0} + (1 - 1/n)(V - IR_S) \quad (9)$$

$Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için 2 boyutlu arayüzey durumlarının (N_{SS}) dağılımı p-tipi Si'nin değerlik bandına göre dağılımı Denklem (6) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 10. 2 Boyutlu arayüzey durum yoğunluğu dağılımının sıcaklığa bağımlı olarak p-Si'un valans bandı kıyasına göre değişimi

Şekil 10.'da gösterilen 2 boyutlu arayüzey durum yoğunluğu dağılımı p-Si'nin valans bandı kıyasından başlayarak iletkenlik bandı kıyasına doğru azalış göstermektedir. N_{SS} değerlerinin en yüksek olduğu valans bandı kıyasındaki değeri $10^{16} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ mertebelerindeyken, iletkenlik bandı kıyasına doğru bu değer $10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ mertebelerine azalmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, ilk kez ışık altında elektrodepozisyon yöntemi ile p-Si üzerine homojen bir şekilde $Ga_xO_yN_z$ film kaplanmıştır. Işık altında elektrodepozisyonla üretilen malzeme yapısının ne olduğunun saptanabilmesi için XRD ölçümleri, yüzey morfolojisi hakkında bilgi sahibi olmak için ise SEM görüntüleri alınmıştır. Yapısal ölçümler neticesinde p-Si üzerine üretilen malzemenin küresel taneciklere sahip (002) yönelime sahip GaN olduğu bulunmuştur.

Üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si aygıt yapısı için karanlık ortamda sıcaklığa bağımlı I-V ölçümleri yapılarak temel elektriksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda $Ga_xO_yN_z/p$ -Si yapısının diyot karakteristiği sergilediği gözlemlenmiştir. Sıcaklığa bağımlı I-V ölçümlerinin analizinden $Ga_xO_yN_z/p$ -Si yapısının akım iletim mekanizmasının ve diyot doğrultuculuk özelliklerinin sıcaklıkla değiştiği sonucuna varılmıştır. Yarı logaritmik I-V grafiğinden elde edilen n değerlerinin sıcaklığa bağımlı olarak 6.6 ile 7.3 arasında değiştiği ve Φ_{B0} 'ların sıcaklıkla lineer olarak arttığı görülmüştür. Yarı logaritmik I-V grafiğinin ileri gerilimleme bölgesinde bulunan 0.6-1 V aralığındaki

veriler kullanılarak Cheung-Cheung modeli uyarlaması ile R_S değerlerinin $k\Omega$ mertebesinde olduğu bulunmuştur. İleri gerilimleme altında ölçülen akım değerlerinin düşük olması, n değerinin 1'den büyük olması, Φ_{BO} değerlerinin sıcaklıkla lineer olarak artması, yüksek R_S değerleri ve akım-iletim mekanizmasının sıcaklığa bağlı olarak değişimi arayüzey durumlarının varlığına işaretler. 2 boyutta N_{SS} dağılımını incelemek amacıyla Chard ve Rhoderick'in önerdiği metod kullanılmıştır. Bulunan arayüzey durum yoğunluğu değerlerinin valans bandı kıyısındaki değeri $10^{16} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ mertebelerinde iken iletkenlik bandı kıyısına doğru $10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ mertebelerine azaldığı görülmüştür. Bu karakteristik bütün sıcaklık değerleri için aynıdır ve artan sıcaklık ile arayüzey durum yoğunluğu değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Artan sıcaklıkla arayüzey durum yoğunluğunun azalması ve Diyot Doğrultuculuk Oranı'nın sıcaklıkla artması üretilen diyot yapısının yüksek sıcaklıklarda çalışmaya elverişli olduğunu göstermektedir.

Işık altında elektrodpozisyon yöntemi ile p-Si üzerine $Ga_xO_yN_z$ üretilerek diyot yapısı oluşturulabileceği bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Bu yöntem kullanılarak üretilen $Ga_xO_yN_z/p$ -Si diyot yapısının aygıt özellikleri, elektrodpozisyon sürecini etkileyen parametrelerin optimizasyonu ile geliştirilebilir. Sonuç olarak, ışık altında elektrodpozisyon yöntemi ile yüksek güç elektroniğinde kullanılan Ga tabanlı yarıiletken malzemelerin, p-tipi iletkenliğe sahip alttaşlar üzerine daha az maliyetle üretilebileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "14/067" kodlu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- AL-Heuseen K, 2016. Synthesis of GaN Thin film using a low-cost electrochemical deposition technique for hydrogen gas sensing. *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 5(12):1-9.
- AL-Heuseen K, Hashim M.K, 2011. One-step synthesis of GaN thin films on Si substrate by a convenient electrochemical technique at low temperature for different durations. *Journal of Crystal Growth*, 324(1):274-277.
- Altuntaş H, Dönmez İ, Akgün Ç, 2014. Electrical characteristics of b-Ga₂O₃ thin films grown by peald. *Journal of Alloys and Compounds*, 593: 190-195.
- Bhat T. N, Roul B, Rajpalke M. K, Kumar M., Krupanidhi S. B and Sinha N, 2010. Temperature dependent transport behavior of n-Inn nanodot/p-Si heterojunction structures, *Appl. Phys. Letters*. 97: 202107
- Card HC, Rhoderick EH, 1971. Studies of tunnel mos diodes interface effects in silicon schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4: 1589.
- Cheung SK, Cheung NW, 1986. Extraction of schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49: 85-87.
- Duc T.T, 2015, Electronic properties of intrinsic defects and impurities in GaN. Linköping University, PhD Thesis.
- Guo X, Hao N, Guo D, Wu Z, An Y, Chu X, Li L, Li P, Lei M, Tang W, 2019. b-Ga₂O₃/p-Si Heterojunction solar-blind ultraviolet photodetector with enhanced photoelectric responsivity. *Journal of Alloys and Compounds*, 660: 136-140.

- Higashiwaki M., Kuramata A, Murakami H, Kumagai Y, 2017. State-of-the-art technologies of Gallium Oxide power devices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50-333002.
- Higashiwaki M., 2022. β -Ga₂O₃ material properties, growth technologies, and devices: a review. *AAPPS Bulletin*. 32:3.
- Iucolano F, Roccaforte F, Giannazzo F and Raineri V, 2007. Barrier inhomogeneity and electrical properties of pt/gan schottky contacts. *J. Appl. Physics*. 102-113701.
- Ivanou D, Ivanova Y, Kulak A, Streltsov E, 2012. Photoinduced selective copper electrodeposition on p-si(111). *Electrochemistry Communications*, 17:38-42.
- Jing H. X., Abdullah C. A. C., Yusoff M. Z. M., Mahyuddin A., Hassan Z., 2019. Structural and optical properties of AlN/GaN and AlN/AlGaIn/GaN thin films on silicon substrate prepared by plasma assisted molecular beam epitaxy (MBE). *Results in Physics*, 12: 1177-1181.
- Jubu P. R., Yam F. K., Moses A. T., 2020. Deposition of Gallium Oxide nanostructures at low substrate temperature by chemical vapor deposition. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 035-006.
- Kang K, Mitsuhashi T, Kuroda K, Okido M, 2019. Low-temperature synthesis of GaN film from aqueous solution by electrodeposition. *Journal of Applied Electrochemistry*, 49:9, 871-881.
- Kawamura Y.L, Sakka T, Ogata Y.H, 2005. Photoassisted control of Pt electrodeposition on p-type Si. *Journal of Electrochemical Society*. 152:10,701-705.
- Kim M, Jung-Hun S, Singiseti U, Ma Z, 2017. Recent advances in free-standing single crystalline wide band-gap semiconductors and their applications: GaN, SiC, ZnO, β -Ga₂O₃ and diamond. *Journal of Materials Chemistry C*, 5: 8338-8354.
- Kumar M, Roul B, Rajpalke M. K, Bhat T. N, Kalghatgi A. T and Krupanidhi S. B, 2013. Electrical transport studies of mbe grown in GaN/Si isotype heterojunctions. *Curr. Appl. Physics*, 13: 26–30.
- Lahiri A, Borisenko N, Borodin A, Endres F, 2014. Electrodeposition of Gallium in the presence of NH₄Cl in an ionic liquid: hints for GaN formation. *The Royal Society of Chemistry*, 50: 10438-10440.
- Liu Z, Li P, Zhi Y, Wang X, Chu X, Tang W, 2018. Review of Gallium Oxide based field-effect transistors and Schottky barrier diodes. *Chinese Physics B*, 28:1- 017105.
- Mochalov L, Logunova A, Vorotyntsev V, 2020. Preparation of Gallium of the special purity for semiconductors and optoelectronics. *Separation and Purification Technology*, 258(2021)118001.
- Mohan L, Chandan G, Mukundan S, Roul B and Krupanidhi S. B, 2014. Double Gaussian distribution of barrier height observed in densely packed GaN nanorods over Si (111) heterostructures. *J. Appl. Physics*, 116:234508
- Roul B., Kumar M., Rajpalke M. K, Bhat T. N. and Krupanidhi S. B., 2015. Binary Group III-Nitride based heterostructures: band offsets and transport properties. *J. Phys. D: Appl. Physics*. 48: 423001.
- Roy R. K, Pal A.K, 2005. Synthesis of Gallium Nitride Films by a novel electrodeposition route. *Material Letters*, 59: 2204-2209.
- Saron K.M, Hashim M.R, Ibrahim M, Yahyaoui M and Allam N.K, 2020. Temperature-dependent transport properties of CVD-fabricated n-GaN Nanorods/p-Si heterojunction devices. *Royal Society of Chemistry*, 10:33526.
- Saron K.M., Ibrahim M., Hashim M.R., Hemalda T. A. M. T., 2021. Leakage current reduction in n-GaN-Si (100) heterojunction solar cells. *Appl. Phys. Lett*, 118-023902
- Szklarczyk M, Bockris J. O'M, 1984. Photoelectrocatalysis and electrocatalysis on p-Silicon. *The Journal of Physical Chemistry*, 88:9.
- Tuan T. T. A, Kuo D. H, Lin K and Li G. Z, 2015. Temperature dependence of electrical characteristics of n-In_xGa_{1-x}N/p-Si hetero-junctions made totally by rf magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 589-182–187
- Zhou Y, Wang D, Ahyi C, Tin C-C, Williams J, Park M, Williams N. M, Hanser A and Preble E. A, 2007. Temperature dependent electrical characteristics of bulk GaN Schottky rectifier. *J. Appl. Physics*, 101-024506.