

Ara Yüzeyine Grafen/Grafit katkılamanın Au/n-6H SiC/Au Schottky Bariyer Diyotunun Elektriksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Ercan ERDOĞDU¹, Mehmet Mahir BÜLBÜL², Murat ULUSOY³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Ankara.

^{2,3}Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara.

Sorumlu yazar e-posta: erdogdu.ercan@gmail.com

e-posta: mahir@gazi.edu.tr

e-posta: ulusoymurat@gazi.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0926-0821>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0555-0637>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9842-0318>

Geliş Tarihi: 30 Mayıs 2023 ; Kabul Tarihi: 13 Kasım 2023

Özet

Anahtar kelimeler

Schottky Bariyer Diyot;
Grafen;
Grafit;
n-6H-SiC;
İdealite Faktörü

Au/n-6H SiC/Au yapısı ve ara yüzeyine grafit ve grafen katkılı durumları 300 K sıcaklıkta incelendi. Her üç numune için Raman, Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yapı analizleri yapıldı. Hem karanlıkta hem de ışık altında (100 mW/cm², 300-1800 nm, AM 1,5G standardı) akım-voltaj (I-V) ölçümleri ve değişik frekanslarda karanlıkta kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri kullanılarak temel bazı elektriksel parametreleri hesaplandı. Yapılan çalışma sonucunda Au/n-6H SiC/Au yarıiletken yapısının dielektrik özelliklerini iyileştirme noktasında grafen'in, elektriksel özelliklerini iyileştirme noktasında grafitin olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir.

Investigation of the Effect of Graphene/Graphite Doping at the Interface on the Electrical Properties of Au/n-6H SiC/Au Schottky Barrier Diode

Abstract

Keywords

Schottky Barrier Diode;
Graphene;
Graphite;
n-6H-SiC;
Ideality factor

The Au/n-6H SiC/Au structure and the graphite and graphene doped states at the interface of this sample were examined at 300 K temperature. Raman, Scanning electron microscopy (SEM) and Energy distribution spectroscopy (EDS) structure analyzes were performed for all three samples. Some basic electrical parameters were calculated using current-voltage (I-V) measurements both in the dark and under light (100 mW/cm², 300-1800 nm, AM 1.5G standard) and capacitance-voltage (C-V) measurements in the dark at different frequencies. As a result of the study, it was observed that graphene had a positive effect at the point of improving the dielectric properties of the Au/n-6H SiC/Au semiconductor structure, and graphite had a positive effect at the point of improving the electrical properties.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Metal ve yarıiletkenin sıkı kontak edilmesi ile oluşturulan yapıların yarıiletken teknolojisinde önemli bir yeri vardır. Bu kontakın omik mi yoksa doğrultucu mu özellik göstereceğini belirleyen ise metal ve yarı iletkenin iş fonksiyonudur. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonunun uygun seçimi ara yüzde bir potansiyel engel yüksekliğinin oluşmasına yol açacaktır. ϕ_s , yarıiletkenin iş fonksiyonu, ϕ_m metalin iş fonksiyonu olmak üzere, N-tipi yarıiletkende doğrultucu kontak oluşumu için $\phi_m >$

ϕ_s , omik kontak oluşumu için ise $\phi_s > \phi_m$ olması gerekmektedir(Aydoğan 2015).

Metal-Yarıiletken kontakların arasına kaplanan ya da büyütülen ince ara yüzey tabakalar (yalıtkan, polimer, oksit vb.) hem bu iki yapıyı birbirinden ayırmakta hem de yük geçişlerinin düzenleyerek yapının elektriksel özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada grafit ile grafenin Au/n-6H SiC/Au yapısının elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Fabrikasyon süreci tarafımızdan yapılmamış olup, numuneler EZGİN vd. (2022) tarafından hazırlanmıştır. Kimyasal Temizleme, Omik Kontak Oluşturma, Arayüz Malzemenin Hazırlanması ve Yarıiletken Yüzeyine Kaplanması, Schottky Kontaktların Oluşturulması başlıklarıyla özetleyebileceğimiz fabrikasyon sürecinin ayrıntıları konuyla ilgili yapılan çalışmadan takip edilebilir (Ezgin 2022).

Fabrikasyon süreci şu şekilde özetlenebilir (EZGİN vd. 2022);

Kimyasal temizleme sürecinde, alttaş olarak kullanılan n-6H SiC yarıiletken kristal 5 er dakika izopropanol, aseton ve metonal ile ultasonik banyoda temizlendi, her temizleme işlemi sonrasında deiyonize su ile yıkandı ve yüzeyden oksit tabakanın uzaklaştırılması için 1/10 oranında seyreltilmiş ($\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$) çözeltisinde 15 saniye tutularak azot gazı ile kurutuldu.

Omik kontak oluşturmak için yarıiletkenin mat yüzeyi termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak saf Au (99,995%) metali ile kaplandı ve 400 °C de 3 dakika tavlandı.

Toz halinde temin edilen ara yüzey malzemeler çözelti haline getirilerek damlat kurut yöntemi ile yarıiletken malzemenin parlak yüzeyine kaplandı.

Daha sonra aynı yüzey üzerinde 1 mm çapında deliklere sahip maske yardımıyla termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak Schottky kontaktlar oluşturularak fabrikasyon süreci tamamlandı.

2.1 I-V / C-V Ölçümleri

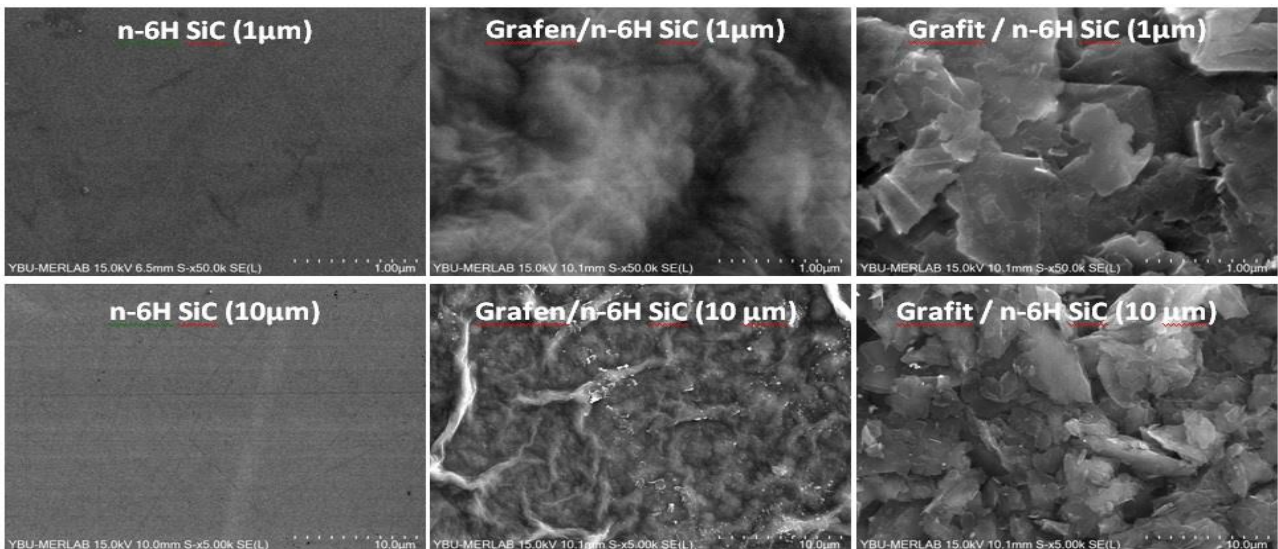
I-V ölçümleri 300 Kelvin sıcaklıkta hem karanlıkta hem de ışık altında (Abet Solar Similatör, 100mW/cm², 300-1800 nm, AM 1,5G standartı) KEITHLEY Keysight cihazı kullanılarak alındı. Karanlıkta alınan ölçüm sonuçları kısaca (k) ile ışık altında alınan ölçüm sonuçları ise kısaca (ı) ile ifade edilmiştir.

C-V ölçümleri ($1/C^2$ -V ölçümü) 300 Kelvin sıcaklıkta karanlıkta 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz, 800 kHz frekanslarında Gamry Interface cihazı kullanılarak alındı.

2.2 Yapı Analizi

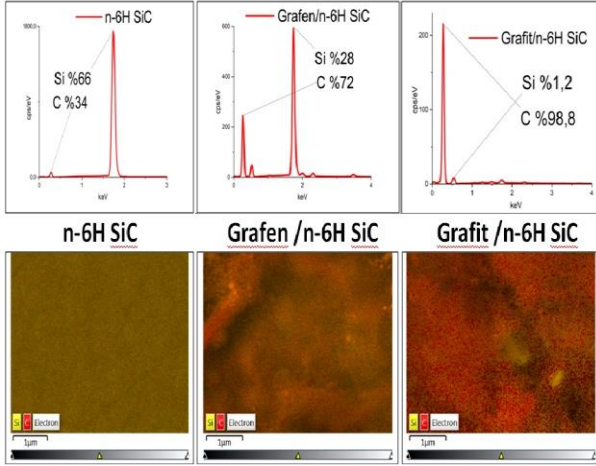
Au/n-6H-SiC/Au yapısının ve ara yüzeyine grafit ve grafen katkılı hallerinin yapısal karakterizasyonu SEM, EDS ve Raman Spektroskopisi cihazları kullanılarak belirlendi.

Şekil 1 de n-6H SiC yapısı ile grafen/grafit katkılı ara yüzeylerinin 1µm ve 10µm çözünürlüklü karakteristik SEM görüntüleri görülmektedir.



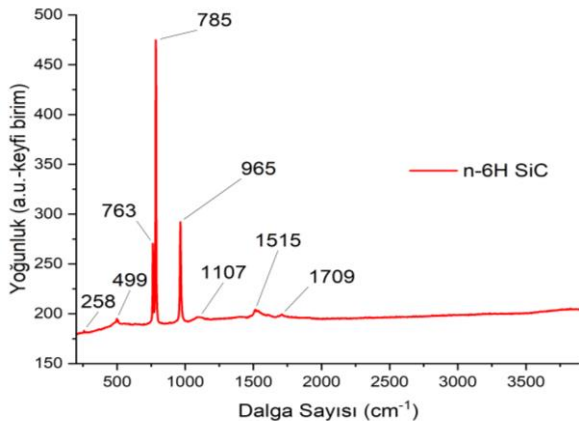
Şekil 1 n-6H SiC yapısı ve katkılı arayüzleri

SEM Analizine ek olarak EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) kullanılarak numunelerin kimyasal bileşimleri araştırıldı. Şekil 2 de numunelerin EDS spektrumları ve EDS görüntüleri görülmektedir. Numunelerdeki silisyum ve karbonun ağırlık yüzdeleri sırasıyla n-6H SiC yapısı için %66, %34, grafen/n-6H SiC yapısı için %28, %72 ve grafit/n-6H SiC için %1,2, %98,8 dir. Bu sıra ile ara yüzeydeki karbon miktarının arttığı için bu beklenen bir ölçümdür.



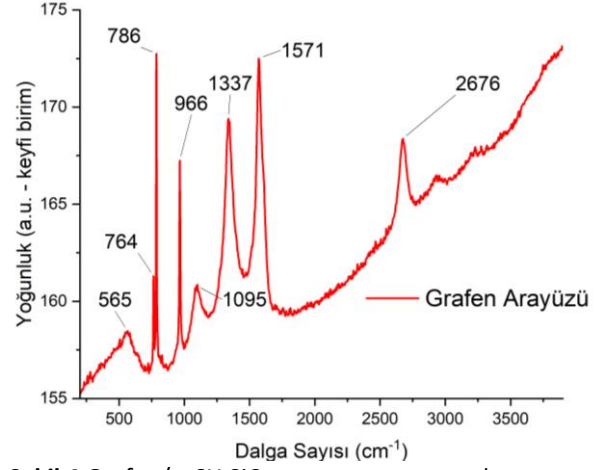
Şekil 2 n-6H SiC yapısı ve katkı arayüzleri

Numuneler aynı zamanda Raman spektrumu ile de incelendi. Raman spektrumu EDS spektrumunun aksine nitel bir analiz yöntemidir. Bir nevi sınıflandırmadır diyebiliriz. Bilinmeyen numune ile ilgili olarak elde edilen spektrum bilinen mevcut spektrumlarla karşılaştırılarak bir sonuca varılır. Şekil 3 de n-6H SiC yapısına ait Raman spektrumu görülmektedir. Bacherikov vd. (2020) nin yapmış olduğu çalışmaya benzer olarak spektrumda 258, 499, 763, 785 ve 965 cm^{-1} dalga sayılarında 6H-SiC için karakteristik pikler mevcuttur.

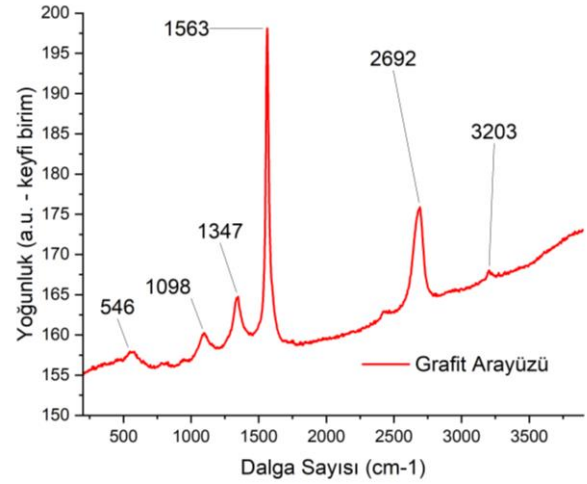


Şekil 3 n-6H SiC yapısının raman spektrumu

Şekil 4 de ara yüzeyine grafen katkılanmış n-6H SiC yapısına ait Raman spektrumu, şekil 5 de ise ara yüzeyine grafit katkılanmış n-6H SiC yapısına ait Raman spektrumu görülmektedir.



Şekil 4 Grafen/n-6H SiC yapısının raman spektrumu



Şekil 5 Grafit/n-6H SiC yapısının raman spektrumu

1300(D-piki), 1580(G-piki) ve 2700 (2D-piki) cm^{-1} dalga sayılarında görülen piklerin mevcudiyeti sentezlenen karbon filmlerde grafen ve benzeri malzemelerin oluşumunu göstermektedir. G ve 2D piklerinin şiddetlerinin oranı ise grafenin tabaka sayısı ile orantılıdır(Ayhan ve Gür 2020).

Grafen ve grafitin Raman özellikleri arasındaki fark 2D bandında görülebilir. Keskin ve simetrik bir 2D bandının varlığı, grafeni tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır(Bunch et al. 2009). Ayrıca söz konusu banda grafit için iki tepe noktasının da takılabileceğini Zhenhua vd. (2008) ve G bandının

yoğunluğunun grafenin kalınlığı arttıkça artacağını Wang vd. (2008) belirtmiştir.

3. Bulgular

Termiyonik emisyon teorisine göre akım voltaj arasındaki ilişki

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) \quad (1)$$

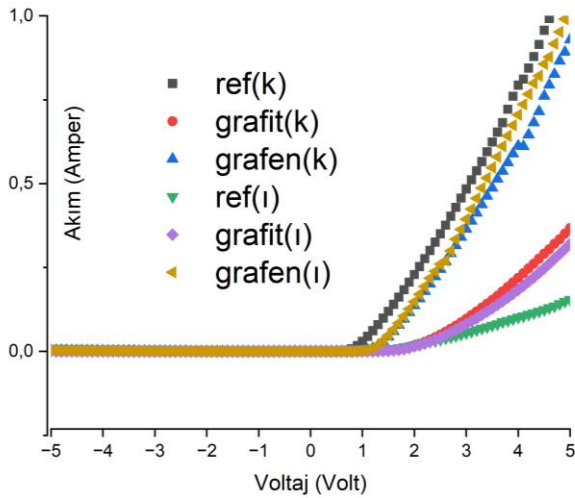
eşitliği ile verilir(Sze ve Kwok, 2007). Burada I diyot akımı (amper), V diyot uçlarına uygulanan gerilim (volt), I_0 doyma akımı-ters polarmada sızıntı akımı (amper), q elektronun yükü (coulomb), T ortam sıcaklığı (kelvin), k boltzman sabiti (joule/kevin), n idealite faktörü (biri msiz) dür.

Sızıntı akımı ise

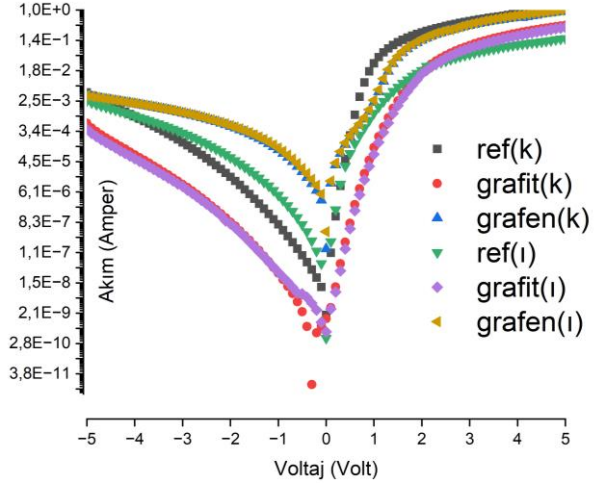
$$I_0 = AA^*T^2 e^{\frac{-q\phi_{Bo}}{kT}} \quad (2)$$

eşitliği ile verilir(Sze ve Kwok, 2007). Burada ϕ_{Bo} sıfır beslemedeki schottky engel yüksekliği (eV), A yarıiletkenin alanı, A* richardson sabitidir.

Au/n-6H SiC/Au referans(ref) numunesi ve ara yüzeyde grafen ve grafit katkılı hallerinin 300 K sıcaklıkta akım/voltaj ölçümleri Keithley 2400 cihazı kullanılarak alındı. Söz konusu üç numunenin akım voltaj grafiği şekil 6'da ve sonuçları daha anlamlı görebilmek için logaritmik gösterimi şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6 Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin akım voltaj grafiği



Şekil 7 Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin ln(I)-V grafiği

Referans numunenin karanlıkta ve ışık altında göstermiş olduğu karakteristik davranış ile katkılı hallerinin göstermiş olduğu davranışa dikkat edelim. Grafit ve grafen katkılanan numuneyi ışık altında ve karanlıkta daha kararlı/değişmez/stabil hale getirmiştir.

3.1. Akım – Voltaj Ölçümlerinden Hesaplanan Parametreler

Numunelerin ölçülen akım-voltaj (I-V) değerleri kullanılarak her bir numune için sızıntı akımı (I_0), engel yüksekliği (ϕ_{Bo}), idealite sabiti (n) ve doğrultma oranı(DO) temel parametreleri hesaplanmıştır.

Bu parametreleri hesaplamak için eşitlik 1'in her iki tarafının ln'ini alınır;

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

elde edilir. Bu eşitliğin V ye göre türevi alınır;

$$\frac{d \ln I}{dV} = \frac{q}{n * k * T} = \tan \theta \quad (4)$$

elde edilir. Bunu 3 numaralı eşitlikte yerine konulursa;

$$\ln I = \ln I_0 + \tan \theta * V \quad (5)$$

elde edilir. Bu eşitliğin ($Y = Y_0 + mX$) gibi bir doğru denkleminde benzediğine dikkat ediniz. lnI-V

grafitin eğiminden $\tan\theta$ hesaplanır. Eşitlik 4 den idealite faktörü şu şekilde elde edilebilir;

$$n = \frac{q}{k \cdot T \cdot \tan\theta} \quad (6)$$

3 numaralı eşitlikte $V=0$ değeri için şekil 7 de doğrunun akım eksenini kestiği noktadan I_0 elde edilebilir.

$$I_0 = e^{(lnI)} \quad (7)$$

Artık sızıntı akımı bilindiğine göre eşitlik 2'den engel yüksekliği hesaplanabilir. Buradan ϕ_{Bo} çekilecek olursa;

$$\phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA \cdot T^2}{I_0}\right) \quad (8)$$

olarak hesaplanır.

Sabit gerilim altında düz beslem akımı I_d , ters beslem akımı I_t olmak üzere, doğrultma oranı (DO) düz ve ters belsem için aynı voltaj değerlerinde;

$$DO = \frac{I_d}{I_t} \quad (9)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

Yukarıda özetlenen matematiksel işlemler sonucu hesaplanan temel parametreler aşağıda özetlenmiştir.

Çizelge 1. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katlı hallerinin 300K sıcaklıkta karanlıkta ve ışık altındaki I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri

YAPI	I_0 Sızıntı Akımı (Amper)	n İdealite Sabit (birimsiz)	ϕ_{Bo} engel yüksekliği (eV)	DO Doğrultma Oranı (birimsiz)
Ref(k)	2,86E-08	2,14	0,75	240
Grafit(k)	7,99E-10	2,82	0,84	642
Grafen(k)	8,13E-06	5,80	0,60	266
Ref(i)	1,26E-07	3,03	0,71	61
Grafit(i)	5,93E-10	2,87	0,85	822
Grafen(i)	9,47E-06	5,89	0,60	289

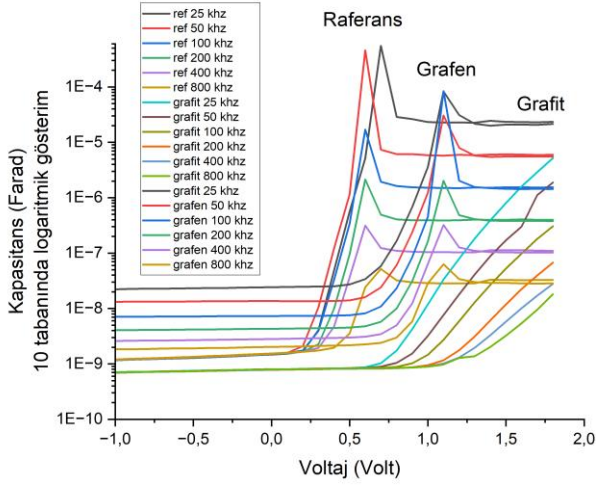
Grafit katlı Au/n-6H SiC/Au yapısının diğer yapılara göre sızıntı akımının daha az olduğu, doğrultma oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ara yüzeye grafit katkılamanın bu açıdan elektriksel parametreler üzerinde olumlu etki yaptığı söylenebilir.

Doğrultma oranı üzerinde grafitin grafenden daha iyi sonuç vermesi daha az sızıntı akımı dolayısıyla olabilir. Bunun nedeni, grafitin, grafenden daha az arayüzey durum yoğunluğuna sahip olması olabilir. Grafen, tek bir karbon atomunun bir tabaka halinde diziliminden oluşur. Grafen tabakalarının yüzeyi, kirleticiler ve kusurlar bakımından grafitte oranla daha zengin olabilir. Bu kirleticiler ve kusurlar, arayüzey durumlarının oluşumuna neden olabilir. Arayüzey durumları, elektronların yarıiletken metale veya metalden yarıiletkenine geçişine izin verir. Bu nedenle, grafen Schottky diyotlarda, sızıntı akımının artmasına dolayısıyla grafitin daha iyi bir doğrultma göstermesine neden olmuş olabilir. Numunenin fabrikasyon sürecinde daha saf ve kirlilikten uzak bir grafen kullanmanın grafitten daha iyi sonuç vermesi beklenebilir.

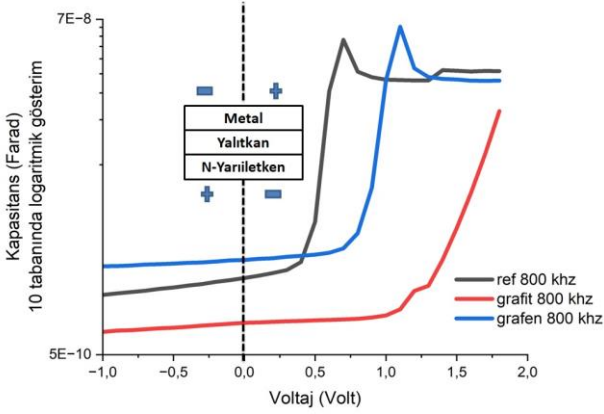
3.2. Kapasitans – Voltaj Ölçümlerinden Hesaplanan Parametreler

Söz konusu üç yapının $1/C^2 - V$ ölçümleri 300K sıcaklıkta, karanlık ortamda, 25 kHz, 50 kHz, 100kHz, 200 kHz, 400kHz ve 800kHz frekanslarında yapılmıştır. Alınan ölçümlerden her bir voltaj değeri için kapasitans değerleri hesaplandı ve C-V grafikleri elde edildi. Ölçüm sonuçlarından her üç yapının da kapasitansının frekansın azalması ile arttığı görülmüştür. Kapasitansın düşük frekanslarda artması, arayüzey durumları ile ilişkilendirilebilir. Düşük frekanslarda arayüz durumları alternatif akım sinyalinin takip edebilir (Kumar *et al.* 2009).

Au/n-6H SiC/Au yapısını referans malzeme olarak adlandıracak olursak, referans malzemenin ve ara yüzeyine grafit ve grafen katlı hallerinin 25 kHz, 50 kHz, 100kHz, 200 kHz, 400kHz ve 800kHz frekansları için C-V grafiği Şekil 8 de, sonucu daha sade görebilmek için 800 khz frekansı için C-V grafiği Şekil 9 da gösterilmiştir. 800 kHz frekansını seçme amacımız ara yüzey durumlarından kaynaklanan etkilenmeleri en aza indirmektir.



Şekil 8 Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin değişen frekanslarda C-V grafiği



Şekil 9 Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin 800 kHz frekansında C-V grafiği

C-V ölçümlerinden temel parametreler hesaplanırken seçilen potansiyel aralığı önemlidir. C-V ölçümlerinden bir bakıma DC uygulama gerilimi altında arayüzey faz kayması ölçülür. Bu yüzden kapasite ölçümü yarıiletkenin tüketim bölgesindeki yük dağılımları ile ilgilidir (Aydoğan 2015).

Tüketim (Depletion) bölgesi, yarıiletkenin metalle temas ettiği bölgedeki iletkenlik tabakasının yok olduğu bölgedir. Terslenim (İnversiyon) bölgesinde ise yarıiletkenin metalle temas ettiği bölgedeki iletkenlik tabakası varlığını sürdürür. Tüketim (Depletion) bölgesinde Schottky diyotunun kapasitansının, metal ve yarı iletken arasındaki potansiyel engele bağlı olarak doğru bir şekilde hesaplanabilmesi açısından daha sağlıklı olduğu düşünölmektedir. Terslenim (İnversiyon) ve yığılma (accumulation) bölgelerinde ise metal ve yarı iletken arasındaki potansiyel engele ek olarak,

serbest yük taşıyıcılarının yoğunluğu da söz konusudur. Bu nedenle, Schottky diyotların kapasitansını doğru bir şekilde hesaplamak için depletion bölgesindeki hesaplamalar tercih edilmiştir.

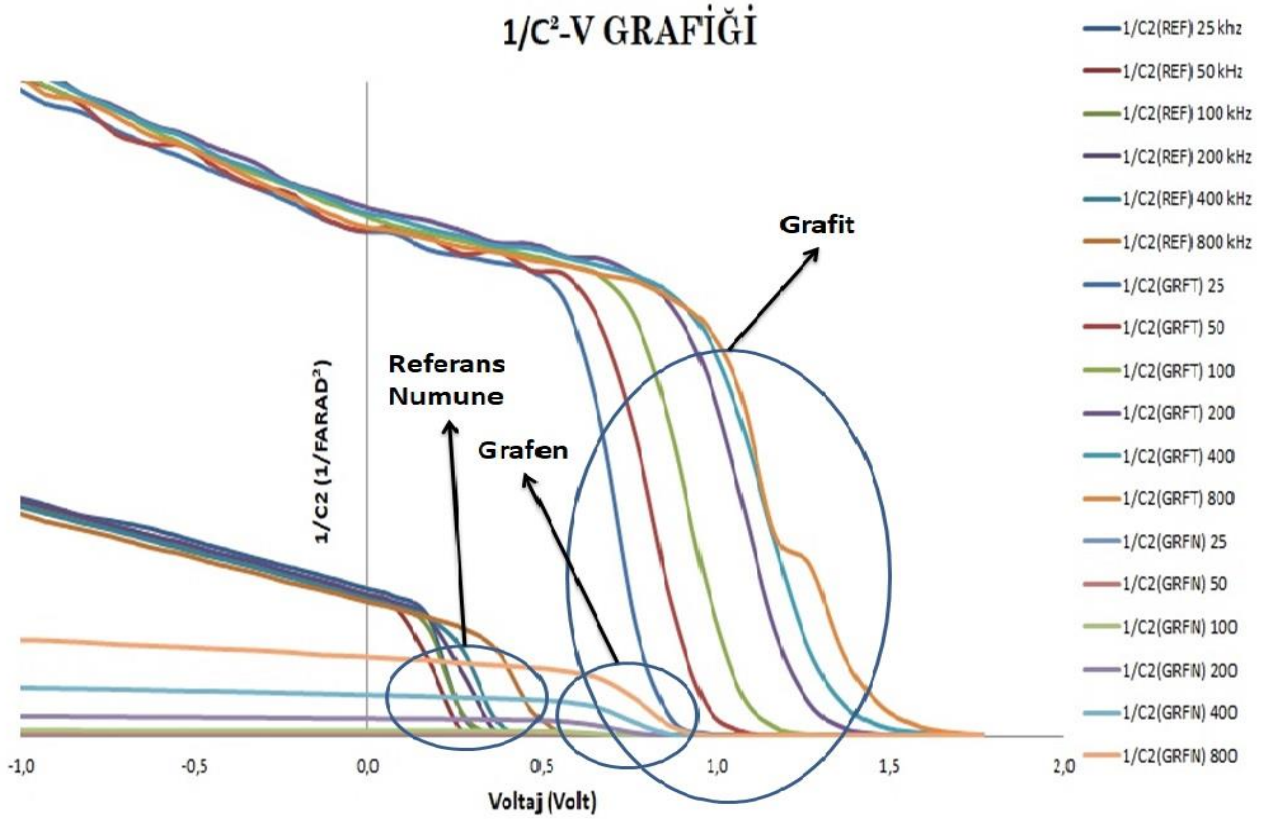
Konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalara bakıldığında tüketim (depletion) bölgesinin bazen ters belsem, bazen düz belsem, bazen ise her iki bölgeyi de kapsayabildiği görölmüştür. Düz belsem bölgesinde yapılan hesaplamalar olduğu gibi (Sönmezoğlu ve Akın, 2011), tüketim (depletion) bölgesinin düz belsem bölgesinde olmasına rağmen hesaplamaların ters belsem bölgesinde yapıldığı çalışmalarda mevcuttur.

Yapılan hesaplamalarda ters ve düz belsem bölgelerinden ziyade (Aydoğan 2015)'ın da belirttiği gibi tüketim bölgesi dikkate alınmış ve Şekil-8 deki C-V grafiğinde tüketim (depletion) bölgesinin bulunduğu voltaj aralığında hesaplamalar yapılmıştır.

Metal, yalıtkan, yarıiletken yapısında kullanmış olduğumuz yarıiletken yapmış olduğumuz çalışmada olduğu gibi n tipi ise metale uyguladığımız voltaja göre terslenim (inversion) bölgesi şekil 8 ve 9 da göröldüğü gibi solda, biriktirme (accumulation) bölgesi sağda, yarıiletken p tipi ise bunun tam tersi olacaktır. Her iki durumda da tüketim (depletion) bölgesi ortadadır.

$1/C_2 - V$ grafiğindeki linear bölgenin eğim ve kesme noktasından aşağıda hesaplaması yapılan bazı temel parametreler hesaplandı.

Şekil 9 daki CV grafiğinin $1/C_2 - V$ grafiği şekil 10 da gösterilmiştir. Şekil 10 daki grafikte gösterilen linear bölgelerin eğim ve kesme noktasından yarıiletkenin kesme gerilimi (V_0 -Volt), difüzyon potansiyeli (V_d -volt), verici/serbest taşıyıcı konsantrasyonu (N_d -1/cm³), doğrultucu kontağın engel/bariyer yüksekliği (ϕ_B -volt), fermi enerjisi (E_f -eV), Tüketim Tabakasının Genişliği (W_d -cm) gibi parametreleri hesaplandı.



Şekil 10 Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin değişik frekanslarda $1/C^2 - V$ grafiği

C kapasitans(farad), ϵ dielektrik sabiti (birimsiz), ϵ_0 dielektrik sabiti (farad/m), A yüzey alanı (m^2), d yüzeyler arası mesafe (m) olmak üzere $C = \epsilon\epsilon_0 \frac{A}{d}$ eşitliğinde A ve d sabit olduğu için kapasitanstaki değişimin dielektrik sabitinden kaynaklandığı açıktır. Arayüzeye yapılan katkılama dielektrik sabitini etkilemektedir.

A yüzey alanı, ϵ_s n-6H-SiC yarıiletken kristalinin geçirgenliği, N_d verici/serbest taşıyıcı konsantrasyonu, V_R geri beslem gerilimi, V_0 kesme gerilimi olmak üzere $1/C^2 - V$ eğrisinin potansiyel eksenini kestiği noktadan V_0 kesme gerilimi bulunur.

$$V_d = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (10)$$

eşitliliğinden faydalanılarak V_d (difüzyon potansiyeli) bulunur.

Schottky diyotlarında tüketim tabakası kapasitansı aşağıdaki gibidir (Rhoderick and Williams, 1988):

$$C^{-2} = \frac{2(V_0 + V_R)}{q\epsilon_s A^2 N_d} \quad (11)$$

Eşitlik 11 den faydalanılarak her iki tarafın potansiyele göre türevi alınacak olursa;

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 \left(\frac{\partial C^{-2}}{\partial V}\right)} \quad (12)$$

verici konsantrasyonu hesaplanabilir. Eşitlik 12 de parantez içerisindeki ifade $1/C^2 - V$ eğrisinin eğimidir. (eğim = $\frac{\partial C^{-2}}{\partial V}$)

Fermi seviyesi ve iletkenlik bandının minimumu arasındaki potansiyel farkı;

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (13)$$

Bariyer yüksekliği;

$$\Phi_{B_0}(C - V) = V_0 + V_n \quad (14)$$

Tüketim tabakasının genişliği ise,

$$W_d = \sqrt{\frac{2e_s(V_0 + V_R)}{qN_d}} \quad (15)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir(Ezgin 2022).

N_c ifadesi iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur. V_n ifadesinin q yükü ile çarpımından fermi enerji seviyesi bulunur.

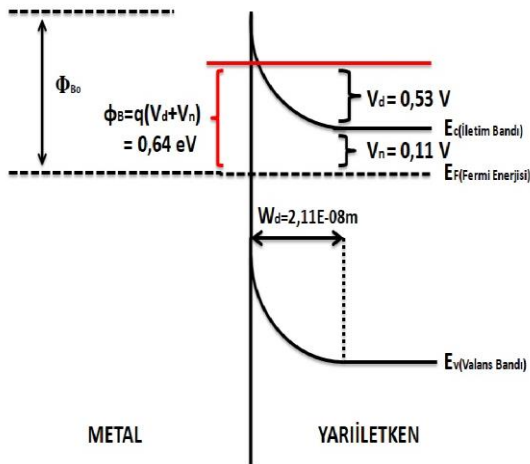
Her üç yapının C-V ölçümleri kullanılarak hesaplanan temel parametreler Çizelge 2’de

gösterilmiştir. Çizelgede Au/n-6H SiC/Au yapısı için referans, Grafen katkılı Au/n-6H SiC/Au yapısı için Grafen, Grafit katkılı Au/n-6H SiC/Au yapısı için grafit ifadesi kullanılmıştır.

Çizelge2. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen arayüzlü durumlarının 300 K sıcaklıkta C-V ölçümlerinden hesaplanan parametreleri

	Yapı	25 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz	800 kHz
V_0 (V)	Referans	0,30	0,25	0,27	0,35	0,45	0,45
	Grafen	0,80	0,50	0,71	0,50	1,00	1,00
	Grafit	1,00	1,00	1,25	1,33	1,33	1,50
V_d (V)	Referans	0,33	0,28	0,29	0,38	0,48	0,48
	Grafen	0,83	0,53	0,74	0,53	1,03	1,03
	Grafit	1,03	1,03	1,28	1,36	1,36	1,53
N_d (cm^{-3})	Referans	7,94E+16	1,19E+17	7,94E+16	1,19E+17	1,19E+17	1,19E+17
	Grafen	4,77E+19	1,19E+19	3,40E+18	1,19E+18	5,96E+17	3,40E+17
	Grafit	5,96E+16	5,96E+16	5,96E+16	7,94E+16	7,94E+16	1,19E+17
Φ_B (eV)	Referans	0,51	0,45	0,47	0,55	0,65	0,65
	Grafen	0,84	0,58	0,82	0,64	1,16	1,17
	Grafit	1,22	1,22	1,47	1,54	1,54	1,70
W_d (cm)	Referans	6,33E-06	4,72E-06	5,97E-06	5,58E-06	6,33E-06	6,33E-06
	Grafen	4,22E-07	6,67E-07	1,49E-06	2,11E-06	4,22E-06	5,58E-06
	Grafit	1,33E-05	1,33E-05	1,49E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,16E-05
E_f (eV)	Referans	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17
	Grafen	0,02	0,05	0,08	0,11	0,13	0,14
	Grafit	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17

CV ölçümlerden hesapladığımız değerleri daha anlamlı görebilmek için arayüzüne grafen katkılanmış Au/n-6H SiC/Au yapısının 200 kHz frekansı için potansiyel enerji diyagramı şekil-11 de gösterilmiştir.



Şekil 11 Arayüzüne grafen katkılanmış Au/n-6H SiC/Au yapısının 200 kHz frekansı için potansiyel enerji diyagramı

4. Tartışma ve Sonuç

Referans numune için 300 K’de I-V ölçümlerinden hesaplanan sonuçlar daha önce yapılan çalışmalara (Kaya vd. 2015) (Güzel vd. 2018) yakındır. İhmal edilebilir fark fabrikasyon sürecinden, temizlik aşamasından ve ölçüm hassaslığından kaynaklanıyor olabilir. Ara yüzey durumları bariyer yüksekliğinde homojensizliğe neden olmaktadır. Elektronlar düşük bariyer yüksekliğinin olduğu bölgeleri tercih ederler.

Çizelge 3. Au/n-6H SiC/Au yapısının 300K sıcaklıkta karanlıkta I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri

	I_0 Sızıntı Akımı (Amper)	n İdealite Sabiti (birimsiz)	Φ_{B0} engel yüksekliği (eV)
Yaptığımız Çalışma	2,86E-08	2,14	0,75
Kaya vd. 2015	1,95E-08	1,91	0,76
Güzel vd. 2018	3,66E-07	2,1	0,68

Her üç numune için C-V ölçümlerinden elde edilen bariyer yüksekliklerinin frekansa bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Çoğunlukla, hesaplanan bariyer yüksekliği değerleri frekans ile doğru orantılı olup, I-V ölçümlerinden elde edilen değerden büyük olduğu görülmüştür.

Yaptığımız çalışmada referans numuneye grafen katkılamanın dielektrik özelliklerine katkı sağlamakla birlikte idealite sabitini ve kaçak akımı arttırdığı gözlenmiştir. Benzer bir çalışmada (Tataroğlu et al. 2021) Au/n-Si referans yapısı için grafen katkılamanın idealite sabitini 3,32 den 6,04'e çıkarttığı hesaplanmıştır. Bu çalışmada Au/n-6H SiC referans yapısı ve ara yüzeyine grafen katkılı durumu için idealite sabitini sırasıyla 2,14 ve 5,80 olarak hesaplanmıştır.

Au/n-6H SiC referans yapısına grafit katkılamanın ise yapının elektriksel özelliklerini ciddi miktarda iyileştirdiği Çizelge 1 den görülmektedir. Benzer bir çalışmada (Demirezen et al. 2022) Au/n-Si referans yapısı için grafit katkılamanın yüksek performans özelliklerine sahip arayüz katmanı olarak başarıyla kullanılabileceğini belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yarıiletken cihazların dielektrik özelliklerini iyileştirme noktasında grafenin, elektriksel özelliklerini iyileştirme noktasında grafitin dikkate alınabileceği / değerlendirilebileceği / üzerinde çalışılabileceği sonucuna varılmıştır.

Numunelerin I-V ölçümlerinden grafit ve grafen katkılamanın yapıyı karanlık ve ışık altında daha kararlı/benzer/stabil hale getirdiği görülmektedir. Referans numuneye yapılan katkılama I-V ölçümlerinden görüleceği üzere tetikleme voltajını bir miktar arttırsa da numuneleri sızıntı akımı ve doğrultma oranları üzerinden değerlendirildiğinde grafit katkılamanın hem ışık altında hem de karanlıkta sızıntı akımını azalttığı, doğrultma oranını arttırdığı görülmüştür. Aslında bir numunenin/yapının hangisinin daha iyi olduğu onun kullanılış amacına bağlıdır. Bu nedenle referans yapının ara yüzeyine katkılanan grafen ve grafitin temel parametrelerine olan etkisi ihtiyaç duyulan malzemenin kullanılış amacına uygun olarak değerlendirilmelidir.

Teşekkür

I-V / C-V ölçümleri-hesaplamaları konusunda tecrübesinden faydalandığımız Prof Dr. Abdullah YILDIZ'a, Prof Dr. Muharrem GÖKÇEN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Kenan ÖZEL'e, SEM/EDS ve Raman ölçümlerinde yardımını esirgemeyen Öğretim Görevlisi Dr. Abdullah ATILGAN 'a teşekkür ederim.

Numunelerin fabrikasyonu için (benzer bir doktora çalışmasını MWCNT'ler ile yapan) Dr. Hüseyin EZGİN, Prof. Dr. Metin ÖZER ve diğer emeği geçenlere teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Aydoğan Ş., 2015. Katıhal Elektronik, Ankara. 105-114, 50.
- Ayhan M.E., Gür B., 2020. Yüzeyi kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle grafen kaplanmış gümüş yüzeyin yansıtma ve ıslatabilme özelliklerinin incelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **10(1)**, 141-148. <https://doi.org/10.21597/jist.665111>
- Bacherikov Y.Y., Goroneskul v.Y., Gudymenko O.Y., Kladko V.P., Kolomys O.F., Krishchenko I.M., Okhrimenko O.B., Strelchuk V.V., 2020. Influence of microwave radiation on relaxation processes in silicon carbide. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. **23(2)**, 175-179. <https://doi.org/10.15407/spqeo23.02.175>
- Bunch J.S., Zande A.M., Verbridge S.S., Frank I.W., Tanenbaum D.M., Parpia J.M., Craighead H.G., McEuen P.L., 2007. Electromechanical resonators from graphene sheets. *Science*, **315**, 490-493. <https://doi.org/10.1126/science.1136836>
- Demirezen S., Altındal Ş., Kalandaragh Y.A., Akbaş A.M., 2022. A comparison of Au/n-Si Schottky diodes (SDs) with/without a nanographite (NG) interfacial layer by considering interlayer, surface states (Nss) and series resistance (Rs) effects. *Physica Scripta*, **97**, 5. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac645f>
- Ezgin H., Demir E., Acar S., Özer M., 2022. Investigation of temperature-dependent electrical parameters in a Schottky barrier diode with multi-walled carbon nanotube (MWCNT) interface. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **147**, 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106672>

Ezgin H., 2022. n-6H-SiC Yarıiletken tabanlı çok duvarlı karbon nanotüp arayüzlü schottky diyot üretimi ve karakteristiklerinin belirlenmesi (Doktora), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Haziran, 77.

Güzel T., Bilgili A.K. and Özer M., 2018. Investigation of inhomogeneous barrier height for Au/n-type 6H-SiC Schottky diodes in a wide temperature range. *Superlattices and Microstructures*, **124**, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.10.004>

Kaya A., Sevgili Ö., Altındal S. and Öztürk M.K., 2015. Current-conduction mechanism in Au/n-4H-SiC Schottky barrier diodes. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, **15**, 56-65.

Kumar A.A., Rao L.D., Reddy V.R., Choi C.J., 2013. Analysis of electrical characteristics of Er/p-InP Schottky diode at high temperature range. *Current Applied Physics*, **13(6)**, 975-980. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.01.046>

Rhoderick E. H. and Williams, R. H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford: Clarendon Press.

Sönmezoğlu S., Akın S. 2011. Kapasitans-Voltaj (C-V) Yöntemiyle Sb Katkılı TiO₂ / n-Si MIS Yapının Seri Direnç Parametresinin Hesaplanması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, **011101** (1-8)

Sze S.M., Kwok K.N., 2007. Physics of Semiconductor Devices, 3rd, ed John Wiley & Sons, New Jersey. 154-158.

Tataroğlu A., Altındal Ş. and Kalandaragh Y.A., 2021. Electrical characterization of Au/n-Si (MS) diode with and without graphene-polyvinylpyrrolidone (Gr-PVP) interface layer. *J Mater Sci: Mater Electron*, **32**, 3451–3459.

Torğut G., Gürler N., 2021. Grafen Katkılı Nişasta Filmlerinin Dielektrik Özelliklerinin Geniş Frekans Aralığında İncelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **11(2)**, 1393-1401. <https://doi.org/10.21597/jist.830255>

Wang Y.Y., Ni Z.H., Shen Z.X., Wang H.M., Wu Y.H., 2008. Interference enhancement of Raman signal of graphene. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 043121. <https://doi.org/10.1063/1.2838745>

Zhenhua N., Yingying W., Ting Y., Zexiang S., 2008. Raman Spectroscopy and Imaging of Graphene. *Nano Res.* **1**, 273-291 <https://doi.org/10.1007/s12274-008-8036-1>