

Cu/n-InP/In Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Ölçümlerinden Elde Edilen Karakteristik Parametrelerinin İncelenmesi

Fulya Esra CİMİLLİ ÇATIR

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü,
Erzincan, Türkiye

Geliş / Received: 08/01/2018, Kabul / Accepted: 24/07/2018

Öz

Schottky engel diyotları n-tipi InP (100) yarıiletkeni kullanılarak elde edildi. Ohmik kontaklar In metali buharlaştırıldıktan sonra 320°C’de ve N₂ ortamında tavlansak yapıldı. Schottky kontakları 0,5 mm çapında ve yarıiletkenin ön yüzünde imal edildi. I-V karakteristikleri 20K ve 300K sıcaklık aralığında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Deneysel I-V karakteristiklerinin Cu/n-tipi Inp Schottky diyotları için geleneksel Termiyonik Emisyon (TE) teorisi ile uyum içerisinde olduğu gözlemlendi. Cu/n-tipi InP Schottky diyotlarının kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri 300-10 K sıcaklık aralığında ve 10K adımlarla 1 MHz frekansta alındı. Numune sıcaklığına bağlı olarak diyotlarımızın elektriksel karakterizasyonunda değişikliklerin olduğu tespit edildi. Cu/n-InP/In Schottky kontakların sıcaklığa bağlı engel karakteristiklerinin “engel inhomojenliği modeline” uyduğu belirlendi. 20-150 K ve 150-300 K sıcaklık aralığında Schottky diyotlara iki farklı ortalama engel yüksekliğinin eşlik etmesi engel yüksekliğinin çift Gaussian modeli ile uyum içerisindedir. Ayrıca sıcaklığa bağlı I-V ve C-V karakteristiklerinden seri direnç, taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerjisi gibi parametreleri de hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: Çift Gaussian Modeli, İdealite Faktörü, İnhomojen Engel Yüksekliği, Schottky Diyot, Seri Direnç

Investigation of Characreristics Parameters Obtained from Current-Voltage and Capacity-Voltage Measurements of Cu/n-InP/In Schottky Barrier Diodes

Abstract

The Schottky barrier diodes were prepared using n-type InP (100) wafer. The ohmic contact was made by evaporating In and annealing at 320°C under N₂ atmosphere. The Schottky contacts with 0,5 mm diameter were formed on the front face of sample. The I-V characteristics of the devices were measured in the temperature range of 20K and 300K. The I-V characteristics of Cu/n-type InP Schottky diodes were obtained as a function of temperature. The experimental I-V characteristics of the Cu/n-type InP Schottky diodes are in a good agreement with the traditional thermionic emission (TE) theory. The capacitance-voltage (C-V) characteristics of the Cu/n-type InP Schottky diodes have been measured between 300-10 K with 10K steps at 1 MHz frequency. Depending on sample temperature, the change of the electrical characterization of the device has been examined. The temperature dependent barrier characteristics of Cu/n-Type InP Schottky diodes are in a good agreement with “barrier inhomogeneous model” of Schottky contacts. In temperatures between 20-150 K and 150-300 K, show a double slope structure in a harmony of “The double Gaussian model” of Schottky contacts. In addition, the characteristic parameters as series resistance, carrier concentration, diffusion potential and Fermi energy values are calculated from temperature dependent I-V and C-V characteristics.

Keywords: Double Gaussian Model, Ideality Factor, Inhomogeneous Barrier Height, Schottky Diode, Series Resistance

1. Giriş

Metal-yarıiletken kontaklar entegre devre teknolojisinde önemli rol oynamaktadırlar (Sullivan vd., 1991; Patel vd., 2008; Ahmad ve Sayyad, 2009; Ejderha vd. 2010). Geniş

band aralığına sahip III-IV bileşik yarıiletkenlerden biri olan InP yarıiletkeni üzerine metal film biriktirme modern yüksek hız iletişim sistemlerinde kullanılan optoelektronik, mikrodalga ve entegre devrelerin yapımı için çok fazla dikkat

çekmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988; Williams ve Robinson, 1988; Çetin ve Ayyıldız, 2005, 2007; Meirhaeghe vd., 1994). Elektronik endüstrisinde metal-yarıiletken doğrultucu kontaklar en yaygın olarak kullanılmaktadır (Williams ve Robinson, 1988; Gür vd. 2007; Kim vd., 2007). MS kontakların akım-voltaj (I-V) karakteristikleri genellikle ideal termiyonik emisyon akım modelinden sapmaktadır (Arehart vd., 2006; El-Nahass vd., 2007; Quasrawi, 2006; Çakici et al. 2015). Bu güne kadar MS kontakların engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi karakteristik parametreleri üzerine sayısız deneysel araştırma mevcuttur (Osvold ve Horvath, 2004; Kumar vd., 2006; Yakuphanoglu, 2007). Metal-yarıiletken kontak yapımında elemental silisyumun yanı sıra InP, yüksek hız ve güç gerektiren devre elemanı uygulamaları için kullanılan GaAs'e bir alternatif malzeme olarak düşünülmeye başlanmıştır. Bu yüzden InP metal kontakların Schottky engel yüksekliği, birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir. InP yarıiletkeni, güneş hücreleri, lazer diyotlar, foto-dedektörler ve yüksek hız metal-yarıiletken alan etkili transistörler (MISFETS), mikrodalga kaynaklar, yüksek güç ve yüksek frekansta düşük gürültüyle çalışan amplifikatörlerde kullanım avantajlarından dolayı III-VI bileşik yarıiletkenler içinde dikkat çekici bir malzeme olarak son yıllarda büyük öneme sahiptir (Türüt vd., 1992; Sağlam vd., 1996; Çetinkara vd., 2003; Sing vd., 1990). Schottky engel diyotların oda sıcaklığında yapılan I-V karakteristiklerinin analizi onların sadece iletim mekanizması hakkında ayrıntılı bilgi vermez, metal-yarıiletken ara yüzeyinde engelin oluşum tabiatı hakkında da bilgiler verir (Song vd., 1986; Werner ve Güttler, 1991; Chand ve Kumar, 1997). Buna rağmen yük taşıyıcılarının MS kontak boyunca transferine ait tam bir açıklama bulunamaması hala önemli bir problem oluşturmaktadır. Termiyonik emisyon teorisine göre SBD'ların I-V karakteristikleri,

azalan sıcaklıkla birlikte engel yüksekliğinde (Φ_b) anormal bir azalma ve idealite faktöründe n ise bir artma göstermektedir (Zhu vd., 2004; Tung, 1992). Düşük sıcaklıklarda engel yüksekliğindeki azalma aktivasyon enerjisi $\ln(I_0/T^2)$ ve $1/T$ grafiğinde bir non-lineerlik gösterir. Bazı çalışmalarda (Sullivan vd., 1991; Tung, 1992), engel yüksekliğinin azalması ve idealite faktörünün artması durumunun oluşumu termiyonik emisyon teorisinin inhomojen Schottky kontak yapısı ile başarılı bir şekilde açıklanmıştır. Engel yüksekliği metal-yarıiletken (MS) ara yüzeyindeki tane sınırlarının (grain boundaries), çoklu fazların, kusurların, gözeneklerin (facets) ve değişik fazların karışımının vs. sebep olduğu ara yüzeyin atomik yapısı ve atomik inhomojenliklerin bir fonksiyonudur (Wang ve Ye, 2009; Sullivan vd., 1991; Tung, 1992). Metal yarıiletken ara yüzeyindeki istenmeyen reaksiyon ürünleri ve parçacıklarının oluşturduğu kirlilik genellikle yarıiletken elektroniği endüstrisinde kullanılan rutin işlem metotlarından kaynaklanır. Bu kirlilikler direkt inhomojenlik olarak davranabilir veya kusurların oluşması sayesinde inhomojenliklerin oluşmasına yardım edebilir (Song vd., 1986; Tung, 1992). SBD'ların ideal olmayan davranışının eklemenin gerçek engel yüksekliğinden daha düşük engele sahip nanometre mertebesindeki küçük ara yüzey bölgelerinin spesifik dağılımlarının varlığını kabul ederek açıklanabileceği görüşü gelişmiştir. Metal kontak (MS) boyunca akan akım SBH inhomojenliğinin varlığından büyük ölçüde etkilenmektedir (Ejderha vd., 2010; Rhoderick ve Williams, 1988). Tung ve arkadaşları (1992) engel yüksekliğinin yanal değişimlerini kabul ederek ideal olmayan Schottky kontakların bir modelini oluşturdular ve engellerin inhomojenliğini artırınca etkin engel yüksekliğinin küçüldüğünü ve idealite faktörlerinin arttığını buldular. Bu çalışmada, [100] doğrultusunda büyütülmüş, 400 μm

kalınlığında, 0,145 Ω -cm öz direncine sahip n-InP yarıiletken kristali kullanılarak yapılan Cu/n-InP/In Schottky diyotlarının akım-voltaj (I-V) ve kapasite-voltaj (C-V) değişimleri ve bu değişimler üzerine numune sıcaklığının etkisi araştırıldı ve Cu/n-InP/In Schottky kontakların sıcaklığa bağlı engel karakteristikleri Tung ve arkadaşlarının önerdiği inhomojen Schottky kontakların termiyonik emisyon teorisi görüşüne göre (Tung, 1992; Sullivan vd., 1991) açıklandı.

2. Materyal ve Metot

Cu/n-InP/In Schottky engel diyotları (SBDs) n-tipi InP kristali istenilen büyüklükte kesildikten sonra trikloretilen, aseton ve metanol ile 5'er dakika sürekli çalkalandı. Daha sonra H₂SO₄:H₂O₂:H₂O (5:1:1) çözeltisi ile 1 dakika kimyasal aşındırma ile yüzey kusurları ve istenmeyen kirlilikleri uzaklaştırıldı. Numunenin kimyasal temizliği titizlikle yapıldı ve mümkün olduğunca numunenin oksijenle temasından kaçınıldı. Azot gazı ile kurutulduktan sonra numunelerin arka yüzüne indiyum (In) metali buharlaştırıldı ve 450°C'de N₂ gazı içerisinde 3 dk. tavlansak omik kontak yapıldı. Schottky kontaklar ise ön yüze 1.0 mm çapında dairesel şekilde Cu metali buharlaştırılarak yapıldı (diyot alanı =7.85x10⁻³ cm²). Bütün buharlaştırma işlemleri 10⁻⁵ mbar basınç altında vakum kaplama ünitesinde gerçekleştirildi. Diyotların I-V karakteristikleri 4-450 K sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen sıcaklık kontrol ünitesi vpf-475 kriyostat, Keithley 220 programlanabilir sabit akım kaynağı ve Keithley 199 dmm/tarayıcı ile karanlıkta ve 10-300 K sıcaklık aralığında ölçüldü. C-V ölçümleri ise HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile alındı. Numune sıcaklığı sürekli copper-constant termokapıl ve lakeshore 321 auto-tuning temperature controller ile ± 0.1 K hassasiyetle takip edildi. Cu/n-InP/In Schottky diyotlarının çeşitli parametreleri I-V ve C-V ölçümlerinden elde edildi. I-V karakteristiklerinden diyotların

idealite faktörleri ve engel yükseklikleri hesaplandı. C-V karakteristiklerinden diyotların difüzyon potansiyelleri ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Ayrıca Cheung fonksiyonları yardımıyla diyotların idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri dirençleri hesaplandı.

3. Bulgular

3.1. Cu/n-InP Schottky Diyotların Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

Schottky kontakların temel yapısını açıklayan karakteristik parametreleri ve akım mekanizmaları I-V ölçümlerinden elde edilebilir (Rhoderick ve Williams, 1988). Bu parametrelerin iyi bir analizini yapmak için, I-V ölçümlerinin sıcaklığa bağlı yapılması tercih edilir. Genelde sıcaklığa bağlı I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği, idealite faktörü, doyma akım yoğunluğu gibi parametrelerle diyotların sıcaklığa bağlı birçok davranışını gözlemlemek ve diyotun sıcaklığa bağlı karakteristiğini belirlemek mümkündür. Schottky diyotların akım iletim mekanizmaları engel üzerinden Termiyonik Emisyon (TE), engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme, deplasyon bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu ve jenerasyonu ile azınlık taşıyıcı enjeksiyonu olarak temelde dört farklı şekilde gerçekleşir. Termiyonik emisyon çoğunluk taşıyıcıların Schottky engelini aşacak yeterli enerjiye sahip olduklarında oluşur ve TE mekanizması sıcaklığın bir fonksiyonudur (Al-Ahmadi vd. 2017). Hazırlanan Cu/n-InP Schottky kontaklar arasında örnek olarak seçilen bir numunenin 20-300K sıcaklık aralığında ölçülen akım voltaj karakteristikleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilde I-V karakteristiklerinin sıcaklığa büyük ölçüde bağlı oldukları görülmektedir bu sebeple Cu/n-InP Schottky diyotunun I-V karakteristikleri termiyonik emisyon teorisi kullanılarak incelendi (Rhoderick ve Williams, 1988). Termiyonik emisyon

teorisine göre diyot üzerindeki akım ile gerilim arasındaki ilişki

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

şeklinde verilmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988). Burada n idealite faktörüdür. Düz beslem durumunda $eV \gg 3kT$ olduğunda, bu ifadedeki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu durumda 1 denklemi

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. 2 eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alındıktan sonra V'ye göre türevi alınırsa idealite faktörü

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3)$$

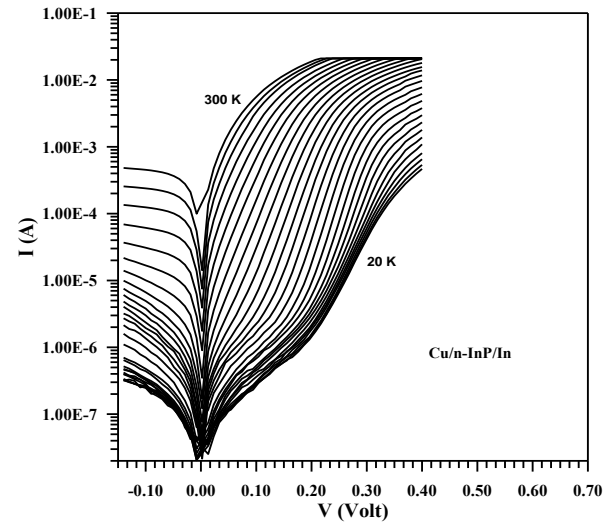
olarak elde edilir. İdealite faktörü diyotun ideal olup olmadığına dair fikir veren boyutsuz bir parametre olup n ile temsil edilir ve engel yüksekliğinin gerilime bağlı olduğunu gösterir. Cu/n-InP/In Schottky diyotuna ait 300-20K sıcaklık aralığında alınan doğru beslem ve ters beslem I-V karakteristikleri Şekil 1'de verilmektedir. Eşitlik 3 kullanarak idealite faktörleri hesaplanabilir. Bu ifadedeki $dV/d(\ln I)$ değerini I-V grafiğinden okuyabiliriz. $\ln I$ -V grafiği çizilirse, bu grafiğin düz beslem durumundaki lineer kısmına bir doğru fit edilerek bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ bulunur. Bulunan bu değer ve diğer sabit terimler 3 eşitliğinde yerine yazılarak idealite faktörleri hesaplanmıştır. Cu/n-InP/In Schottky diyotunun numune sıcaklığına bağlı idealite faktörleri 1,075 ile 14,798 arasında değişmektedir. Fit edilen doğrunun $V = 0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. Eşitlik 2 ifadesindeki I_0 doyma akım yoğunluğu

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4)$$

şeklinde verilmektedir. 4 eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınarak, Φ_b 'ye göre çözümlerse,

$$e\Phi_b = kT \ln(A A^* T^2 / I_0) \quad (5)$$

şeklinde engel yüksekliği ifadesi elde edilir. Bu ifadede A, diyotun etkin alanı ($A = 7.85 \times 10^{-3} \text{cm}^2$) A^* , Richardson sabiti (n-InP için $A^* = 9.4 \text{ A/K}^2 \text{cm}^2$) (Rhoderick ve Williams, 1988); T, Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığı ($T = 300 \text{ K}$) ve k, Boltzmann sabitidir ($k = 8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$). $\ln I$ -V grafiğine yapılan fitlerin $V = 0$ 'da düşey eksenini kestiği yerlerden doyma akım yoğunluğu ve 5 eşitliğinden de Schottky engel yüksekliği hesaplanabilir. Deneysel olarak doyma akım yoğunluğu, $\ln I$ -V grafiğindeki eğrinin doğru kısmının düşey eksenini kestiği noktadan tespit edildi. Doyma akım yoğunlukları akım gerilim grafiğinden okunup yerine yazılarak engel yükseklikleri bulundu. Bu grafiklerden elde edilen engel yüksekliği değerleri Cu/n-InP/In Schottky diyotu için 0.441 eV ile 0,043 eV arasında değerler almaktadır. Her iki parametrenin de numune sıcaklığına kuvvetle bağlı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1. Cu/n-InP/In Schottky diyotunun sıcaklığa bağlı I-V karakteristikleri.

Günümüzde metal-yarıiletken yapıların seri direncini belirlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Biz çalışmamızda, seri direnci belirlemek için Cheung'ler (1986) tarafından

geliştirilmiş olan yöntemi kullandık. Bu yöntemde, I-V karakteristiklerinden türetilen $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I fonksiyonlarından yararlanılır. Bu grafiklerden diyotun temel parametreleri olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanır. 1 eşitliğiyle verilen temel akım denklemini kullanarak,

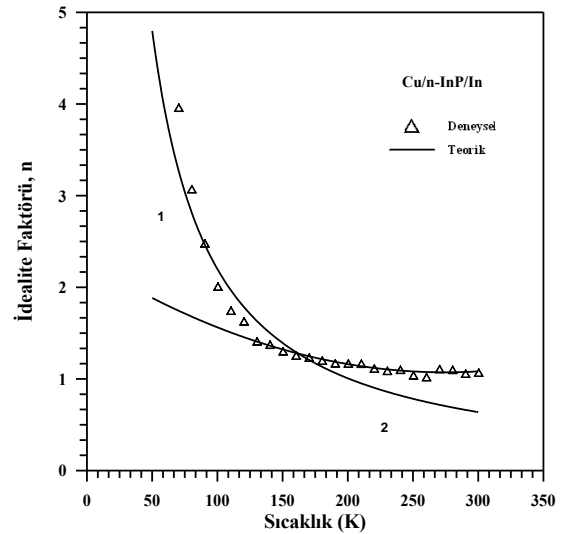
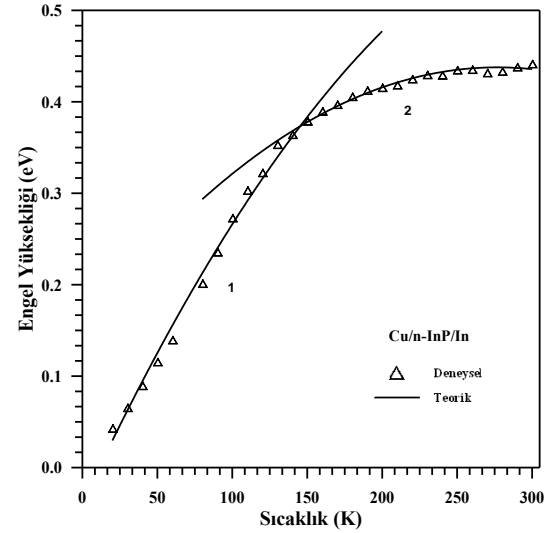
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (7)$$

ve

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (8)$$

eşitlikleriyle verilen Cheung fonksiyonları elde edilir. 7 denkleminin I'ya göre grafiği bir doğru vermektedir. Bu doğrunun I = 0 iken düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ve bu doğrunun eğiminden de seri direnç elde edilir. Cu/n-InP/In Schottky diyotun bu şekilde bulunan seri direnç değerleri 5,191-107,906Ω arasındadır. Eşitlik 8'de verilen H(I)'nın I'ya karşı grafiğini çizdiğimizde yine bir doğru ortaya çıkmaktadır. Eşitlik 7'den elde edilen idealite faktörü değerleri kullanılarak, H(I)-I grafiğindeki doğrunun I=0 iken düşey eksenini kestiği noktadan, diyotun engel yüksekliği değerleri elde edilmekte ve bu doğrunun eğiminden de seri direnç bulunabilmektedir. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için H(I)-I grafiklerinden elde edilen seri direnç 5,192-106,535 Ω değiştiği görülmektedir. $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiklerinden elde edilen seri direnç değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görüldü. Termoyonik emisyon teorisinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin ve idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı grafiği Şekil 2'de verilmiştir. Bu grafiklerden idealite faktörü değerlerinin artan sıcaklıkla azaldığı engel yüksekliği değerlerinin ise artmakta olduğu görülmüştür. Her iki parametrenin de numune sıcaklığına kuvvetle bağlı olduğu tespit edilmiştir. Metal-yarıiletken ara yüzeyi boyunca akan akım sıcaklığa bağlı bir işlem olduğu için,

elektronlar düşük sıcaklıklarda en düşük engeli aşmayı başarırlar ve sıcaklık arttıkça, daha fazla elektron yeterli miktarda enerjiyi alarak daha yüksek engeli aşabilmektedir. Bu nedenle numune sıcaklığı arttıkça engel yüksekliği artmaktadır (Tung, 1992; Sullivan vd., 1991; Huang vd., 2007).



Şekil 2. Cu/n-InP/In Schottky diyotunun sıcaklığa bağlı I-V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliklerinin ve idealite faktörlerinin numune sıcaklığı ile değişimi.

Schottky kontaklarda engel yüksekliği, akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümleri için farklı sonuçlar verir. Schottky kontaklarda I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yüksekliğinin değişimi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır: Metal/yarıiletken ara yüzeyinin düzgün olmaması (pürüzlü olması) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal

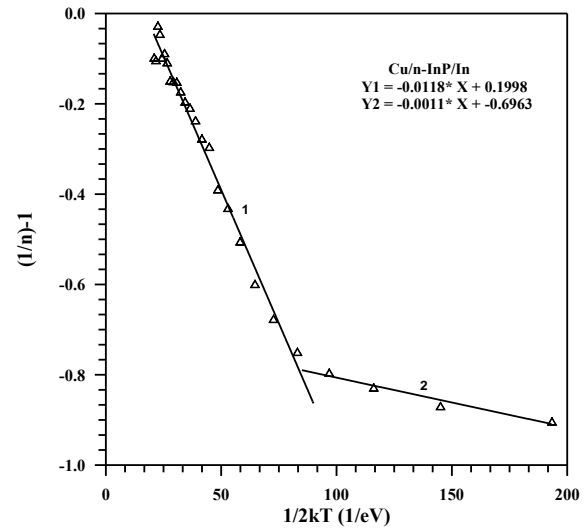
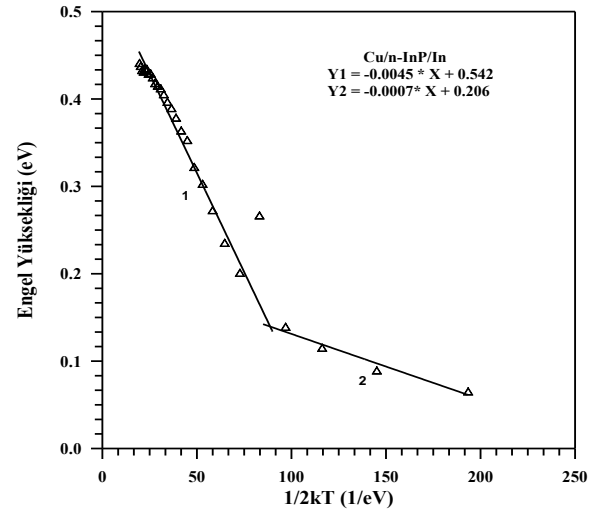
değişimlerine neden olarak inhomojen bir dağılıma neden olacaktır. Metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tane sınırlarının yanı sıra metalin kalınlığının değişimi ara yüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Schottky diyotlardaki ideal durumdan sapmaları açıklayan modellerden birinin “engel inhomojenliği modeli” olduğu bilinmektedir. Bu durumdaki davranışlar Gauss dağılımı kullanılarak açıklanabilmektedir. Ortalama engel yüksekliği $\bar{\Phi}_b$, ve standart sapması σ_s olan bir Schottky diyot için Gauss dağılımında, bu parametreler beslem gerilimine lineer olarak bağlı olan parametrelerdir. Böyle bir dağılım için Φ_{ap} ve n_{ap} sırasıyla, sıfır gerilimdeki görünür engel yüksekliği ve idealite faktörüdür. İdeal durumda ($n=1$), Φ_{ap} ve n_{ap} parametreleri

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_0^2}{2kT} \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1 \right) = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (10)$$

bağıntıları ile verilir (Biber, 2003). σ_s 'nin sıcaklığa bağlılığı genellikle küçüktür ve bu yüzden ihmal edilebilir. Bu ifadelerden hesaplanan idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin teorik değerleri de sırasıyla Şekil 2’de deneysel değerlerle birlikte çizilmiştir ve bu teorik değerlerin düşük sıcaklıklar ve yüksek sıcaklıklar olmak üzere iki bölgeyi ifade etmesi engel inhomojenliği modeli ile uyum içerisinde (Tung, 1991, 1992, 2001; Sullivan vd., 1991). Eşitlik 9’a göre, Φ_b 'nin $1/2kT$ 'ye karşı çizilen grafiği bir doğru olacaktır. Bu doğrunun eğiminden yararlanarak 9 eşitliği yardımıyla ortalama engel yüksekliği ($\bar{\Phi}_b$) ve σ_0 standart sapması bulunur. Şekil 3’te bu grafiğe fit edilen doğru denkleminde Cu/n-InP/In Schottky diyotu için $\bar{\Phi}_{b1}=0,542$ eV,

$\bar{\Phi}_{b2}=0,206$ eV ve $\sigma_{01}=-0,0045$ eV, $\sigma_{02}=-0,0007$ eV olarak bulundu.



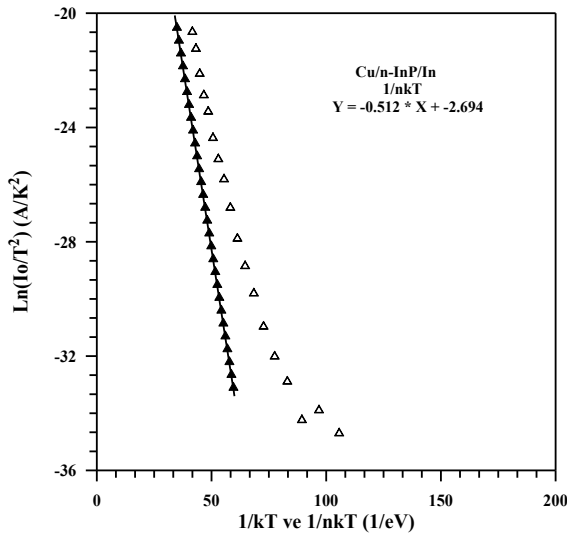
Şekil 3. Cu /n-InP/In Schottky diyotuna ait engel yüksekliğinin ve $[(1/n)-1]$ 'nin $1/2 kT$ 'ye karşı değişimi.

Bulunan bu engel yüksekliği değerlerinin daha önce bulduğumuz değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için eşitlik 10 ifadesi kullanılarak, Şekil 3’te gösterilen $[(1/n)-1]$ 'in $1/2kT$ 'ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları $\rho_2=-0,0118$ ve $\rho_3 =0,1998$ V ile $\rho_2=-0,0011$ ve $\rho_3 =-0,6963$ V olarak bulunmuştur.

Eşitlik 4 ifadesinde her iki tarafın \ln 'i alınırsa ve ifade yeniden düzenlenirse

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\Phi_b}{kT} \quad (11)$$

eşitliği elde edilir. Burada, $\ln(I_0/T^2)$ 'nin sıcaklığa bağlı $1/nkT$ 'ye göre değişimini veren grafiğin eğimi $\frac{e\Phi_b}{kT}$ 'yi ve y eksenini kestiği nokta ise $\ln(AA^*)$ olan bir doğru olmalıdır. Cu/n-InP/In Schottky diyotları için $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Buradan, Cu/n-InP/In Schottky diyotu için $\ln(I_0/T^2)$ 'nin sıcaklığa bağlı $1/nkT$ 'ye göre değişiminden sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{b0}) değeri 0.512 eV olarak bulunmuştur.



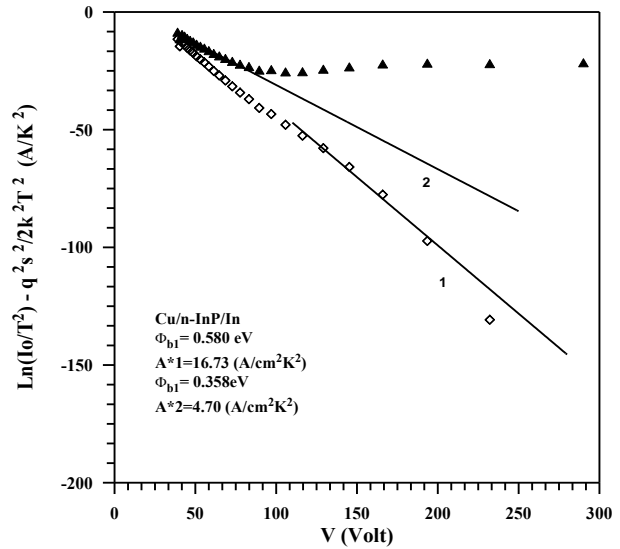
Şekil 4. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi.

Geleneksel aktivasyon enerji $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/kT$ 'ye göre grafiği düşük sıcaklıklarda lineerlikten sapma gösterir. Bu farklılığı açıklamak için 4 ve 9 eşitlikleri birleştirilerek engel yüksekliğinin Gaussian dağılımına göre;

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2 \sigma_s^2}{2k^2 T^2}\right) = \ln(AA^*) - \left(\frac{q\overline{\Phi_{b0}}}{kT}\right) \quad (12)$$

bağıntısı yazılabilir ve bu ifadeden modifiye edilmiş aktivasyon enerji grafiğini elde edilir. 12 eşitliği ve deneysel Cu/n-InP/In diyotu için I_0 değerleri kullanılarak $\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_s^2 / (2k^2 T^2)$ $-1/kT$ modifiye edilmiş aktivasyon enerji grafiği çizilmiş ve Şekil 5'de verildi. Bu grafiğin eğimi doğrudan $\overline{\Phi_{b0}}$ 'ı vermektedir. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için buradan bulunan ortalama engel

yüksekliği $\overline{\Phi_{b01}}=0.580$ ve $\overline{\Phi_{b02}}=0.358$ eV değerlerini almaktadır. Yine bu grafiğe yapılan fit denklemi kullanılarak Cu/n-InP/In Schottky diyotu için Richardson sabiti değerleri sırasıyla $A^*_1=16,73$ ve $A^*_2=4,70$ A/K^2cm^2 olarak bulunmuştur ve bu A^* değerlerinin bilinen $9.4 A/K^2cm^2$ ifadesi ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için Modifiye edilmiş $\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_s^2 / (2k^2 T^2)$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi.

3.2. Cu/n-InP Schottky Diyotlarının Kapasite-Gerilim (C-V) Ölçümleri

Schottky diyotlarda uzay yükü bölgesinin kapasitesi, metal/yarıiletken ara yüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Kapasitenin ters beslem durumunda gerilime bağlı değişiminden doğrultucu kontakın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler tayin edilebilir (Wilmsen, 1985). Cu/n-InP/In Schottky diyotu için C-V ölçümleri (10K-300K) sıcaklık aralığında, 1 MHz frekansta, -1 V ve 0 V aralığında, HP 4192 A LF Impedance Analyzer cihazı ile yapıldı. Numune sıcaklığı sürekli copper-constantan termokapıl ve lakeshore 321 auto-tuning temperature controller ile ± 0.1 K hassasiyetle takip edildi. Şekil 6, Cu/n-InP/In Schottky diyotunun dört farklı numune sıcaklığı için 1 MHz frekanstaki ters beslem

C-V değişimini göstermektedir (300K, 200K, 100K, 60K). Ters beslem uygulama gerilimi arttıkça, kapasite hızlı bir şekilde azalmaktadır. Şekil 7, Cu/n-InP/In Schottky diyotunun dört farklı numune sıcaklığı için ters beslem C-V grafiklerinden faydalanılarak elde edilen $1/C^2$ -V değişimini göstermektedir (300K, 200K, 100K, 60K). Grafiklerden de görüldüğü gibi uygulama gerilimi ters beslem bölgesi için azaldıkça, $1/C^2$ azalmaktadır. C-V ölçümleri aşağıda verilen diyot kapasitesine ait 13 eşitliği düzenlenerek değerlendirilir.

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

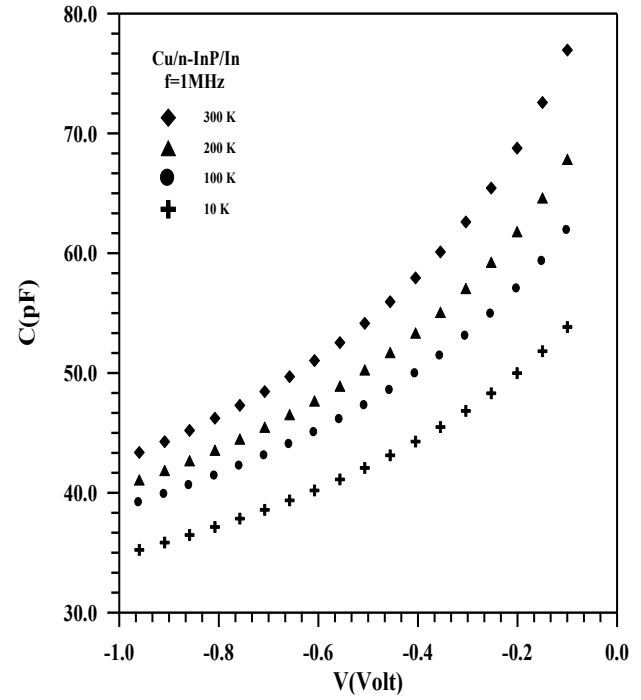
Burada, ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti (InP için $\epsilon_s=12,4$), $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/m olup, boşluğun dielektrik sabiti, e, elektronun yükü, V_d , difüzyon potansiyeli, $k= 8,625 \times 10^{-5}$ eV/K (Boltzmann sabiti), N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonu ve T, Kelvin cinsinden sıcaklıktır. 13 eşitliği düzenlenecek olursa,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (14)$$

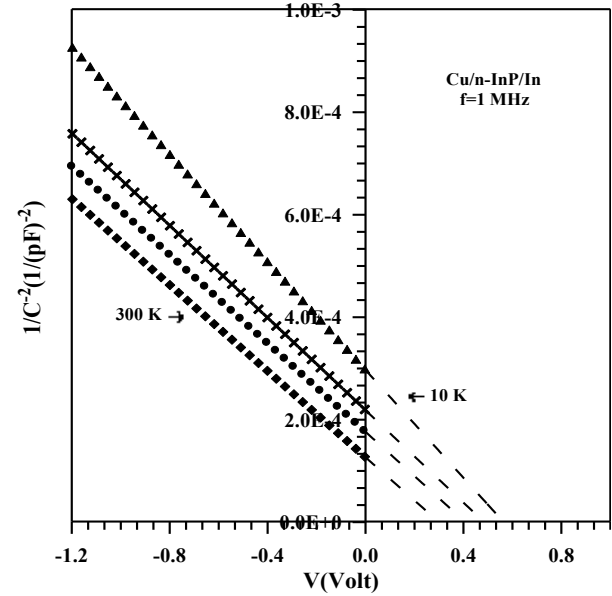
eşitliği elde edilir. Burada V uygulama gerilimidir. C^{-2} -V grafiği çizildiğinde yapılacak uygun lineer fit ile $C^{-2}=0$ için $V_d=-V$ olur.

C^{-2} -V grafiği 14 eşitliği kullanılarak çizildiğinde yapılacak uygun lineer fit ile $C^{-2}=0$ için $V_d=-V$ olur. Dolayısı ile difüzyon potansiyeli elde edilmiş olur. Bu grafiklerden yararlanılarak Cu/n-InP/In Schottky diyotu için farklı sıcaklıklarda bulunan difüzyon potansiyelleri hesaplandı. C^{-2} -V grafiğindeki lineer kısmın eğimi $d(C^{-2})/dV$ 'yi verir. Eğim değerleri bulunduktan sonra 16 ifadesinde yerine yazılarak her bir sıcaklık için N_d taşıyıcı konsantrasyonları elde edildi. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için (C^{-2} -V) grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları hesaplandı. N_d 'nin bu değerlerinin Cu/n-InP/In Schottky diyotu için

$2,3397 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ile $1,10781 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 6. Cu/n-InP/In Schottky diyotuna ait f=1 MHz'de sıcaklığa bağlı ters beslem C-V grafiği.



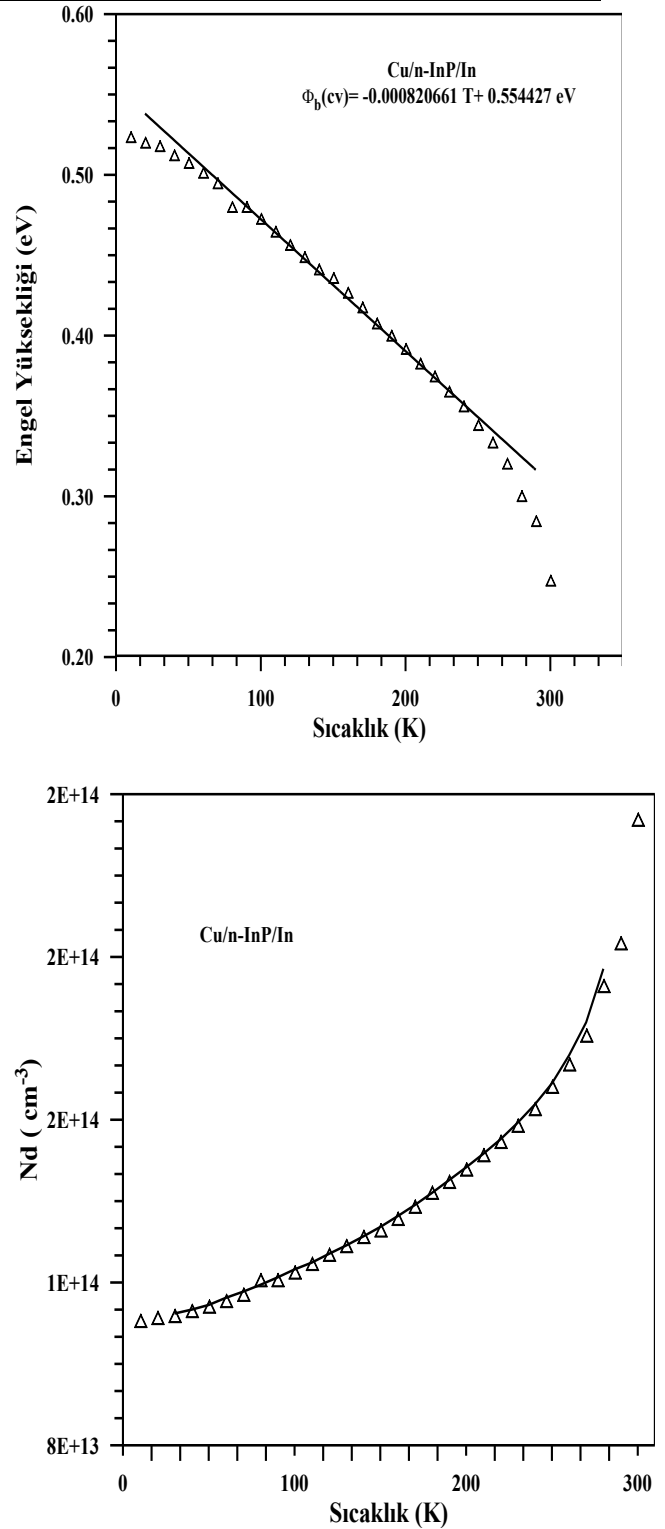
Şekil 7. Cu/n-InP/In Schottky diyotunun C^{-2} -V değişimi (300, 200, 100, 60 K).

Bütün sıcaklıklar için elde edilen N_d taşıyıcı konsantrasyonu değerlerinin N_c 'den küçük oldukları gözlemlendi. Yine Cu/n-InP/In Schottky diyotları için (C -V) ve (C^{-2} -V) grafikleri sırasıyla Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Ayrıca Cu/n-InP/In Schottky diyotuna ait engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı

değişimleri ve taşıyıcı yoğunluklarının sıcaklığa bağlı değişimleri de Şekil 8'de verilmiştir. Cu/n-InP/In Schottky diyotuna ait Fermi enerji seviyesi değerleri hesaplanarak E_f 'nin hesaplanan bu değerlerinin Cu/n-InP/In Schottky diyotu için 0,198 eV ile 0,007 eV arasında olduğu tespit edildi. Ayrıca C-V grafiğinden engel yükseklikleri, her diyot için ayrı ayrı fit edilen C^{-2} -V grafiklerinin V eksenini kestiği noktalar tespit edilip $V_d - \frac{kT}{e}$ değerleri elde edildi ve eğiminden elde edilen donör yoğunluğu kullanılarak iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark hesaplanarak engel yükseklikleri bulundu. Buradaki n değeri, I-V grafiklerinden elde edilen idealite faktörüdür. Bu bağıttan hesaplanan engel yükseklikleri Cu/n-InP/In Schottky diyotu için 0,248 eV ile 0,523 eV arasındadır. Schottky kontaklarda yapılan I-V ve C-V ölçümlerinde, etkin engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün uygulanan voltaja bağlı olarak değiştiği ve sıcaklığa kuvvetle bağlı oldukları görülmektedir. C-V'den elde edilen engel yüksekliği değerlerinin I-V'den elde edilen engel yüksekliği değerlerinden farklı olmasının görüntü-yük etkisinden kaynaklandığı bildirilmektedir (Schmitsdorf ve Mönch, 1999). Beklendiği gibi, C-V ölçümlerinin, I-V ölçümlerinden türetilenden çok daha yüksek bir engel yükseklik değeri verdiği görülmektedir. I-V ve C-V metotlarıyla ölçülen Schottky engel yükseklikleri arasındaki farklılıklar Schottky engel yüksekliği inhomojenliğinin kanıtıdır (Sönmezoğlu 2013).Tünellemenin uygun olduğu Schottky diyotlarda idealite faktörü için

$$n_{tun} = \frac{E_{00}}{kT(1 - \beta)} \quad (15)$$

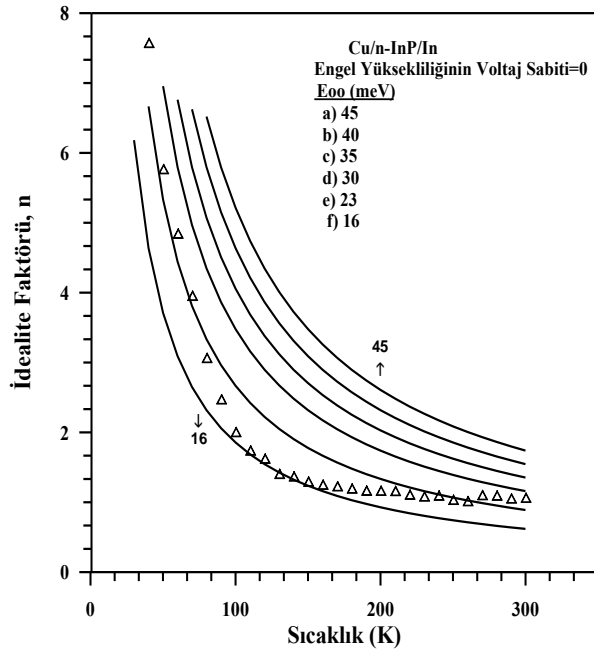
ifadesi verilir.



Şekil 8. Cu/n-InP/In Schottky diyotunun C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği ve taşıyıcı yoğunluğu değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Eşitlik 15 dikkate alınarak ve $\beta=0$ alınarak E_{00} 'a değerler verilerek n_{tun} değerleri elde edildi ve n_{tun} -T grafiği çizildi. Aynı zamanda Cu/n-InP/In Schottky diyotunun $\ln(I-V)$ grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri de Şekil 9'da verilen aynı grafik üzerinde çizildi ve $E_{00}=23 \text{ meV}$ değeri ile

uyumlu olduğu görüldü. E_{oo} 'ın bulunan bu değerinin Cimilli vd (2009) tarafından hesaplanan tünelleme aktivasyon enerjisinin teorik değeri olan $E_{oo}= 0.69$ meV değeri birbiriyle uyumlu değildir (Chand ve Kumar, 1996).Cu/n-InP/In numunedeki uzay yükü bölgesinin genişliğinden dolayı tünellemenin pek mümkün olamayacağı görülmektedir. Bu nedenle engel yüksekliği ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlılığını analiz etmek için inhomojen engel yüksekliği modeli kullanıldı.



Şekil 9. Cu/n-InP/In Schottky diyotuna ait idealite faktörünün deneysel ve teorik değerlerinin T'ye karşı değişimi.

Yukarıdaki gözlemler kontak alanındaki engel yüksekliğinin ikili Gaussian dağılımının varlığını göstermektedir. Cu/n-InP/In Schottky diyotu için yaklaşık olarak 70-150 K sıcaklık aralığında 0.36 eV'luk bir engel yüksekliğinin, 150-300 K sıcaklık aralığında da 0.58 eV'luk bir engel yüksekliğinin var olduğu inhomojen engel yüksekliği modelinden elde edilmektedir. Metal yarıiletken kontaklarda çift Gaussian'ın varlığı inhomojenliklerin yapısına atfedilebilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada Cu/n-InP/In Schottky engel diyotlarının numune sıcaklığına bağlı olarak

karakteristik parametrelerinin değişimi incelendi. Bu devre elemanlarının karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği bu kontakların elektronik devre elemanları sanayisinde kullanımları bakımından önemlidir. Bu parametrelerin termiyonik emisyon teorisinden sapmalarının nedeni metal-yarıiletken ara yüzeydeki inhomojenlikten ileri gelmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988; Chand ve Kumar, 1996; Ahaithouf vd., 2000; Hastas vd., 2004; Horvath vd., 2003). Schottky engel homojensizliklerine uzay yükü bölgesinde oluşan tekrardan birleşim ve tekrardan oluşum akımları yüksek katkı yarıiletkenlerde tünelleme akımları, ara yüzey tabakasının kalınlık ve kompozisyonu, görüntü-yük etkisi ve seri direnç gibi çok çeşitli mekanizmaların neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Schottky kontakta farklı engel yüksekliğine sahip küçük lokal bölgelerin varlığının Schottky engelinde inhomojenliklere neden oldukları bildirilmiştir (Tung, 1991, 1992, 2001; Cimilli vd., 2007, 2009a, 2009b). Bu ara yüzeydeki inhomojenliklerden dolayı Cu/n-InP/In Schottky diyotlarının engel yüksekliği bir çift Gaussian dağılım göstermiştir. Schottky kontaklarda bu çift Gaussian'ın varlığı, inhomojenliğin doğasına atfedildi (Tung, 2001; Wilmsen, 1985; Chand ve Kumar, 1996; Büyükbaş Uluşan vd. 2018). İnhomojenliklerin özellikle düşük sıcaklıklarda Schottky diyotların temel elektriksel karakteristiklerini etkilemeleri önemlidir. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda I-V ve C-V ölçümleri kontak alanında mevcut engel inhomojenliğinin doğasını açığa çıkarmaktadır.

5. Teşekkür

Bu çalışma Erzincan Üniversitesi Bap Birimi tarafından Proje No: FEN-A-080715-0168 nolu proje ile desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

- Ahaitouf, A., Losson, E., Bath, A. 2000. On the determination of interface state density in n-InP Schottky structures by current-voltage measurements: Comparison with DLTS results, *Solid-State Electronics*, 44, 515-520.
- Al-Ahmadi, N.A., Ebrahim, F.A., Al-Jawhari, H.A., Mari R.H., Henini, M. 2017. Impact of doping on the performance of p-type Be-doped Al 0.29 Ga 0.71 As Schottky diodes, *Modern Electronic Materials*, 3 2, 66-71.
- Ahmad, Z., Sayyad, M.H. 2009. Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic semiconductor methyl-red. *Physica E* 41 631.
- Arehart, A.R., Moran, B., Speck J.S., Mishra U.K., DenBaars, S.P., Ringel, S.A. 2006. Effect of threading dislocation density on Ni/n-GaN Schottky diode I-V characteristics. *Applied Physics*.100, 023709.
- Biber, M. 2003. Low-temperature current-voltage characteristics of MIS Cu/n-GaAs and inhomogeneous Cu/n-GaAs Schottky diodes, *Physica B*, 325, 138-148.
- Büyükbaş Uluşan, A., Tataroğlu, A., Azizian, Y., Altındal, Ş. 2017. On the conduction mechanisms of Au/Cu₂O-CuO-PVA/n-SiMPS Schottky barrier diodes SBDs using current-voltage-temperature I-V-T characteristics, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29,159-170.
- Chand, S., Kumar, J. 1997. Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *Applied Physics A*,65, 497.
- Chand, S., Kumar, J. 1996. Current transport in Pd₂Si/N-Si 100 Schottky barrier diodes at low temperatures, *Applied Physics A*, 63, 171-178.
- Chand, S., Kumar, J. 1997. Effect of barrier height distribution on the behavior of a Schottky diode, *Journal of Applied Physics*, 82 10, 5005-5010.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Applied Physics Letters*, 58, 382.
- Cimilli, F.E., Efeoğlu, H., Sağlam, M., Türüt, A. 2009a. Temperature-dependent current-voltage and capacitance-voltage characteristics of the Ag/n-InP/In Schottky diodes, *Journal of Material Science Material Electronics*, 20, 105-112.
- Cimilli, F.E., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Türüt, A. 2009b. Temperature-dependent current-voltage characteristics of the Au/n-InP diodes with inhomogeneous Schottky barrier height, *Physica B*, 404, 1558-1562.
- Cimilli, F.E., Sağlam, M., Türüt, A. 2007. Determination of the lateral barrier height of inhomogeneous Au/n-type InP/In Schottky barrier diodes, *Semiconductor Science and Technology* 22, 851-854.
- Çakıcı, T., Güzeldir, B., Sağlam, M. 2015. Temperature dependent of electrical characteristics of Au/n-GaAs/In Schottky diode with In₂S₃ interfacial layer obtained by using spray pyrolysis method, *Journal of Alloys and Compounds*, 646, 954-965.
- Çetin, H., Ayyıldız, E. 2005. Temperature dependence of electrical parameters of the Au/n-InP Schottky barrier diodes, *Semiconductor Science and Technology* 20, 625.
- Çetinkara, H.A., Türüt, A.D. Zengin, M, Erel, S. 2003. The energy distribution of the interface state density of Pb/p-Si Schottky contacts exposed to clean room air, *Applied Surface Science* 207, 190.
- Ejderha, K., Yıldırım, N., Türüt, A., Abay, B. 2010. Influence of interface states on the temperature dependence and current-voltage characteristics of Ni/p-InP Schottky diodes, *Superlattices and Microstructures*, 47, 241-252.

- El-Nahass, M.M., Zeyada, H.M., Abd-El-Rahman, K.F., Darwish, A.A.A. 2007. Fabrication and characterization of 4-tricyanovinyl-N,N-diethylaniline/p-silicon hybrid organic-inorganic solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 1120.
- Gür, E., Tüzemen, S., Kılıç, B., Coskun C. 2007. High-temperature Schottky diode characteristics of bulk ZnO, *Journal of Physics: Condensed Matter* 19, 196206.
- Horváth, Z.S.J., Rakovics, V., Püspöki, S. 2003. Schottky Junction on n-type InP for Zero Bias Microwave Detectors, *Physica Status Solidi (c)*, 3, 916-921.
- Huang, S., Shen, B., Wang, M.J., Xu, F.J., Wang, Y., Yang, H.Y., Lin, F., Lu, L., Chen, Z.P., Qin, Z.X., Yang, Z.J., Zhang, G.Y. 2007. Current transport mechanism of Au/Ni/GaN Schottky diodes at high temperatures, *Applied Physics Letters*, 91, 072109-3.
- Kim, D.M., Kim, D.H., Lee, S.Y. 2007. Palladium composite membranes using supercritical CO₂ impregnation method for direct methanol fuel cells, *Solid-State Electronics*, 51, 865.
- Kumar, S., Katharria, Y.S., Kumar, S., Kanjilal, D. 2006. Temperature-dependent barrier characteristics of swift heavy ion irradiated Au/n-Si Schottky structure, *Journal of Applied Physics* 100, 113723.
- Osvald, J., Horvath, Z.J. 2004. Theoretical study of the temperature dependence of electrical characteristics of Schottky diodes with an inverse near-surface layer, *Applied Surface Science*, 234, 349-354.
- Patel, S.S., Patel, B.H., Patel, T.S. 2008. Characteristics of Al/p-AgGaTe₂ polycrystalline thin film Schottky barrier diode, *Crystal Research and Technology* 43, 542-546.
- Pirri, C.F., Ferrero, S., Scaltrito, L., Perrone, D., Guastella, S., Furno, M., Richieri, G., Merlin, L. 2006. Intrinsic 4H-SiC parameters study by temperature behaviour analysis of Schottky diodes, *Microelectronic Engineering* 83, 86.
- Qasrawi, A.F. 2006. Fabrication and characterization of TO/GaSe/Ag, Au Schottky diodes, *Semiconductor Science and Technology* 21, 794.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H. 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, 2ndedn. Clarendon, Oxford, 1-225.
- Sağlam, M., Ayyıldız, E., Gümüş, A., Türüt, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S. 1996. Series resistance calculation for the Metal-Insulator-Semiconductor Schottky barrier diodes, *Applied Physics A* 62, 269.
- Sing, A., Reinhardt, K.C., Anderson, W.A. 1990. Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions, *Journal of Applied Physics* 68, 3475.
- Schmitsdorf, R.F., Mönch, W. 1999. Influence of the interface structure on the barrier height of homogeneous Pb/n-Si₁₁₁ Schottky contacts, *The European Physical Journal B*, 7, 457-466.
- Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflère, W.H., Cardon, F. 1986. On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers, *Solid-State Electronics* 29, 633.
- Sönmezoğlu, S. 2013. Processing and Electrical Characterization of Metal-Oxide-Semiconductor Structures Prepared by DBSA-Doped TiO₂ Nanoparticles, *Current Nanoscience*, 9, 39-45.
- Sullivan, J.P., Tung, R.T., Pinto, M.R., Graham, W.R. 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study, *Journal of Applied Physics*, 70, 7403-7424.
- Tung, R.T. 1992. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers, *Applied Physics Letters*, 58, 2821-23.

- Tung, R.T. 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts, *Materials Science and Engineering R*, 35, 1-138.
- Tung, R.T., Levi, A.F.J., Sullivan, J.P., Schrey, F. 1991. Schottky-Barrier Inhomogeneity at Epitaxial NiSi₂ Interfaces on Si 100, *Physical Review Letters*, 66, 1.
- Türüt, A., Yalçın, N., Sağlam, M. 1992. Parameter extraction from non-ideal C-V characteristics of a Schottky diode with and without interfacial layer, *Solid-State Electronics* 35 835.
- Van Meirhaeghe, R.L., Laflère, W.H., Cardon, F. 1994. Influence of defect passivation by hydrogen on the Schottky barrier height of GaAs and InP contacts, *Journal of Applied Physics*, 76, 403.
- Wang, K., Ye, M. 2009. Parameter determination of Schottky-barrier diode model using differential evolution, *Solid-State Electronics* 53, 234.
- Werner, J.H., Güttler H.H. 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts, *Journal of Applied Physics*, 69, 1522.
- Williams, R.H., Robinson, G.Y. 1985. In *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*, ed. by C.W. Wilmsen Plenum Press, New York
- Wilmsen, C.W. 1985. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interface* New York: Plenum.
- Yakuphanoglu, F. 2007. The current-voltage characteristics and inhomogeneous-barrier analysis of ddq/p-type Si/Al diode with interfacial layer, *Physica B*, 389, 306.
- Zhu, S., Van Meirhaeghe, R.L. Forment, S., Ru, G. Li, B. 2004. Effects of the annealing temperature on Ni silicide/n-Si 100 Schottky contacts, *Solid-State Electronics* 48, 29.