

## Au/Al/p-Si eklem yapının akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı karakterizasyonu

Murat GÜLNAHAR\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrics/Vocational School, Erzincan Binali Yıldırım University, Turkey

\*[mgulnahar@erzincan.edu.tr](mailto:mgulnahar@erzincan.edu.tr) Başlıca yazarın mail adresi

**Özet** – Schottky diyotlarda akım-gerilim karakteristikleri ve onların analizleri daima ilgi çekici olmuştur. Bu yapıların sıcaklığa bağlı karakterizasyonu ara yüzeyde engel oluşumunun doğası hakkında ayrıntılı bilgi vermekte ve iletkenlik mekanizmasının anlaşılmasında derinlik sağlamaktadır. Bu çalışmada bir Au/Al/p-Si çoklu eklem yapının elektriksel karakteristikleri 150-300 K sıcaklık aralığında ölçülmüş akım-gerilim (I-V) karakteristikleriyle engel yüksekliği, idealite faktörü ve Richardson grafiği gibi bazı engel parametrelerinin analizi yapıldı. Analizler sonucunda, düşük sıcaklıklarda engel yüksekliğinde ki azalma ve idealite faktöründe de ki artış gibi anormallikler metal-yarıiletken ara yüzeyinde ortaya çıkan engel yüksekliklerindeki homojensizliklerden kaynaklandığı tespit edildi.

**Anahtar Kelimeler** – Schottky Yapılar, Akım-Gerilim, Engel Yüksekliği, İdealite Faktörü, Arayüzey

### I. GİRİŞ

Metal-yarıiletken kontak yapılar çok çeşitli elektronik yapılarda ve özellikle güneş pillerinde, fotodetektörlerde ve çeşitli ışık yayan diyotlarda genişçe kullanım alanı bulmaktadırlar [1]. Bu yapılarda doğrultma özellikleri büyük önem arz etmekte ve metal-yarıiletken tabakaları arasında kontak esnasında oluşan dielektrik yapıdaki arayüzey tabakasından doğrudan etkilenmektedir. Arayüzey tabakasından bulunan lokalize olmuş arayüzey yükleri arayüzey hallerine neden olmakta ve engel parametrelerinin uygulanan gerilime ve sıcaklığa bağlı olarak dalgalanmasına neden olmaktadır.

Metal ve yarı iletken arasında bulunan arayüzey tabakası, eklem yapıdaki kararlılığı, güvenilirliği ve onun performansını etkileyen etkin bir aktördür. Arayüzey bileşimi, kalitesi ve stokiyometrik olmayan yapısı ve arayüzdeki elektrik yüklerinin konumu, arayüz halleri olarak bilinir. Arayüzey halleri, engelde Schottky engel homojensizliklerine neden olur ve idealite faktörü ve bariyer yüksekliği

gibi diğer tüm Schottky engel parametrelerini etkilerler.

İdeal şartlarda ani bir eklem yapıya sahip olan kontak yapı arayüzeyi olmayan bir kontak yapısına sahiptir ve akım taşıma mekanizması termiyonik emisyon tarafından yönetilmektedir. Bu koşullarda eklem parametrelerinden idealite faktörünün 1 olması ve engel yüksekliğinin sabit olması beklenen durumlardır. Bununla birlikte, ideal olmayan koşullarda akım taşıma mekanizmasını açıklamada, termiyonik emisyon teorisi yetersiz kalmaktadır. Ölçülen akım-gerilim (I-V) eğrileri, engeldeki termiyonik emisyon akımının yanı sıra termiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu gibi bazı akım taşıma mekanizmalarından kaynaklanan aşırı akımların olduğunu göstermektedir [1-9]. Bu etkilerin bir sonucu olarak, idealite faktörü birden sapmakta ve engel yüksekliği geniş bir sıcaklıkta sabit kalmamaktadır [10-14].

Bu çalışmada, p-tipi bir Si alt tabaka üzerine termal yolla fabrikasyon işlemleri yapılan Au/Al metalizasyon işlemleriyle oluşturulan Au/Al/p-Si

kontakt yapıda sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri yapılarak, bu ölçümlerden bazı engel parametrelerinin sıcaklığa bağlı analiz işlemleri yapılmaktadır.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada 1-3  $\Omega$ .cm öz direnç değerine sahip olan p tipi yarıiletken numuneler kullanıldı ve p tipi Si üzerine sırasıyla alüminyum ve altın metal tabakalarının fabrikasyon işlemleri termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. İlk işlem olarak p tipi Si numunelerin organik ve inorganik kirliliklerden temizlenmesi için RCA1 ve RCA2 temizleme prosedürleri kullanıldı. Numunelerin arka kısımlarına uygulanan hidroflorik (HF) asitle temizleme prosedüründen sonra yaklaşık  $2 \times 10^{-6}$  Torr vakum basınç ortamında alüminyumun (Al) termal yöntemle buharlaştırılıp azot gazı ortamında tavlama ile omik kontaktların yapım işlemleri tamamlanmış oldu. Omik kontakt fabrikasyon işleminden sonra numunenin ön yüzeyine Schottky kontakt operasyonu önce alüminyumun (Al) sonra altının (Au) termal olarak yaklaşık  $2 \times 10^{-6}$  Torr vakum basınç ortamında 0.5 mm çaplı dairesel gölge maskelerin kullanımıyla gerçekleştirilerek Schottky kontaktların imalat işlemleri tamamlanmış oldu. Numuneler üzerinde akım-gerilim (I-V) ölçüm işlemleri otomasyon sistemi içerisinde bir Keithley 2400'in kullanıldığı ve bir kryostat soğutma sisteminin dahil olduğu otomize ölçüm sistemi yardımıyla sıcaklığa bağlı ölçümlerin alınmasıyla gerçekleştirildi.

## III. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bir metal-yarıiletken yapıda tüm taşıyıcıların eklem yoluyla akmış olduğu şartlarda akım-taşıma mekanizması termiyonik emisyon yoluyla ve termiyonik emisyon şartlarında akım-taşıma denklemi

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

ve

$$I_0 = AA * T^2 \exp(-q\phi/kT) \quad (1.b)$$

Bu denklemde T sıcaklık, k Boltzman sabiti, q elektronik yük, V uygulanan gerilim, n idealite faktörü,  $\phi$  engel yüksekliği, A diyot alanını ifade etmektedir.

(1.a) ve (1.b) denklemlerinden n idealite faktörü ve  $\phi$  engel yüksekliği ifadeleri,

$$n = q/kT \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.a)$$

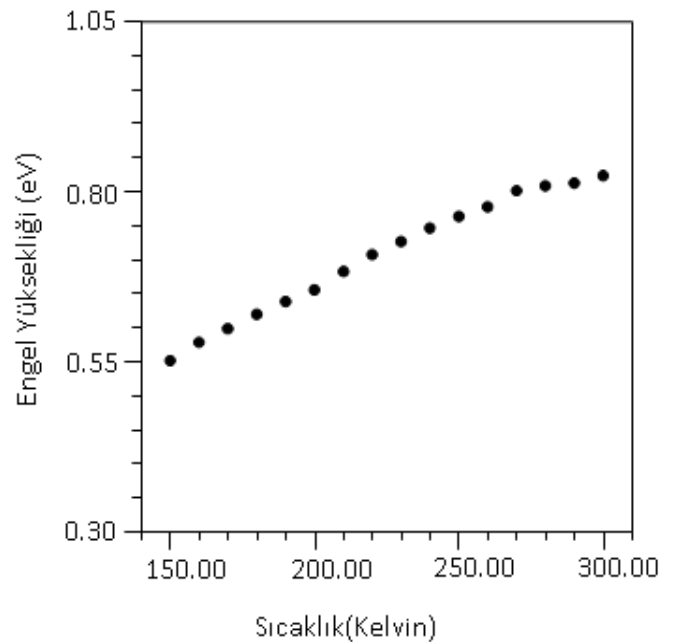
ve

$$\phi = -kT/q \ln(I_0/(AA * T^2)) \quad (2.b)$$

şeklinde. İdealite faktörü ve engel yüksekliği Schottky engel yüksekliğini karakterize eden ve eklem performansını doğrudan açıklayabilen önemli parametrelerdir. Engel yüksekliği, yarıiletken tarafındaki bantların bükülmesiyle meydana gelen ve taşıyıcıların metalden yarıiletkene doğru ya da tersi yönde geçmek zorunda oldukları bir enerji-bant yapısıdır.

Arayüzde, eklem potansiyel dağılımını etkileyen ve metal arayüzey ve yarı iletken arayüzey etkileşimlerinden kaynaklanan çeşitli mekanizmalar vardır. Arayüzey çevresinde dislokasyonlar ve yarı iletken donör atomları bu mekanizmalardan biridir. Donör atomları arasındaki mesafeler düzensizdir ve rastgele dağılmıştır. İlave olarak, atomik adımlar, dislokasyonlar, metaldeki grain sınırları ve/veya polikristal yapı ve metalin kalınlık modülasyonu arayüz yapısını etkilemektedir.

Şekil 1, Au/Al/pSi Schottky eklem yapının akım-gerilim eğrilerinden Denk. (2.b) yardımıyla hesaplanmış

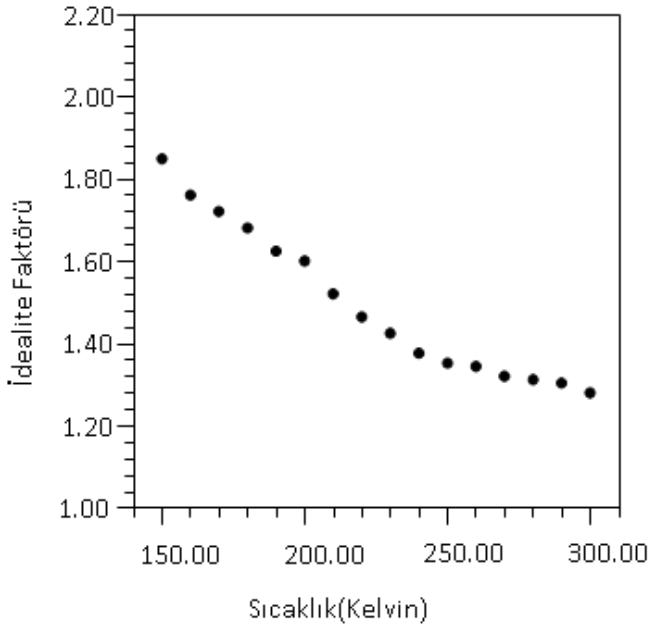


Şekil 1. Au/Al/p-Si eklem yapının engel yüksekliği değerlerinin 150-300 K sıcaklık aralığında sıcaklığa bağlı değişimi.

olan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini göstermektedir. Engel yüksekliği değerleri, 300 K'de 0.82 eV ve 150 K'de 0.55 eV olarak hesaplanmıştır. n idealite faktörü, homojen olmayan eklem yapısındaki dielektrik arayüz tabakasının etkilerini içerisinde saklayan bir parametredir. İdealite faktörünün 1'den büyük olması, yüksek katkılı yarı iletkenlerdeki tünelleme akımlarına, deplasyon bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon akımlarına, metal ve yarı iletken arasındaki arayüzey hallerine ve eklemde oluşan görüntü yük etkisi gibi birçok faktöre atfedilmektedir.

Şekil 2, Denk. (2.a) yardımıyla hesaplanmış olan idealite faktörü değerlerinin 150-300 K sıcaklık aralığında sıcaklığa bağlı değerlerinin değişimini göstermektedir. İdealite faktörü değerleri 300 K'de 1.35 ve 150 K'de 1.87 olarak hesaplandı.

Şekil 1'de engel yüksekliği değerleri sıcaklığa bağlı olarak 300 K'den başlayarak azalan sıcaklıkla azalmakta ve özellikle 270 K'den daha düşük sıcaklıklarda hızla azalmakta ve sıcaklığa bağlı olarak kararlılık göstermektedir. Benzer sıcaklık bağımlılığı Şekil 2'deki idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinde gözlemlenmektedir. Şekil 2'de de idealite faktörü



Şekil 2. Au/Al/p-Si eklem yapımının idealite faktörü değerlerinin 150-300 K sıcaklık aralığında sıcaklığa bağlı değişimi.

değerlerinin azalan sıcaklıkla arttığı gözlemlenmekte ve özellikle 240 K'den daha düşük sıcaklıklarda bu artış hızlanmakta ve sonuçta idealite faktörü değerlerinin kararlı sıcaklık bağımlılığı tespit edilmektedir.

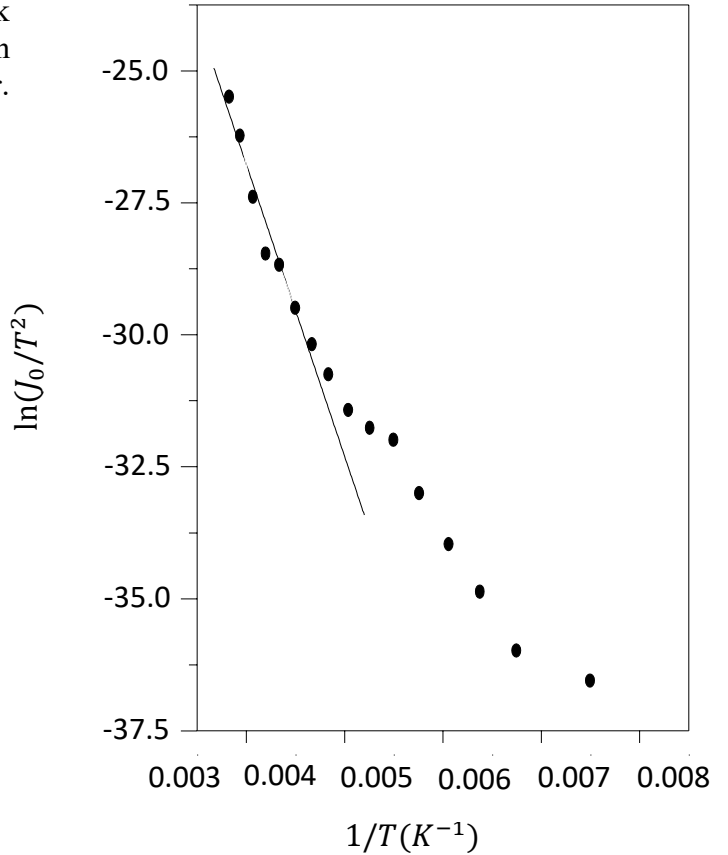
Akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinden hesaplanan sıcaklığa bağlı engel yüksekliği ve idealite faktörünün değişimlerinden farklı olarak bir diğer analiz de geleneksel Richardson çizimleriyle yapılabilmektedir. Bu nedenle Denk. (1.b) deki doyma akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_0 = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (3)$$

denklemini biçiminde düzenlenebilmektedir. Bu denklemin her iki tarafının doğal logaritması alındığında,

$$\ln\left(\frac{J_0}{T^2}\right) = \ln(A^*) - \frac{q\phi_b}{kT} \quad (4)$$

denklemini biçimine düzenlenmiş olur. Elde edilmiş olunan bu denklem geleneksel olan Richardson



Şekil 3. Au/Al/p-Si eklem yapımının 150-300 K sıcaklık aralığında Richardson grafiği.

denklemleri olarak bilinmektedir. Bu denklemlerde  $J_0$  doyma akım yoğunluğunu ve  $A^*$  Richardson değerini ifade etmektedir.

Denk. (4)'e göre  $\ln(J_0 / T^2)$  'nin  $1/T$ 'ye göre grafiği Richardson grafiği olarak bilinmektedir. Şekil 3, Au/Al/pSi Schottky ekleminden Denk. (4)'e göre çizilmiş olan Richardson grafiğini göstermektedir.

Denk. (4)'e göre Şekil 3'teki  $\ln(J_0 / T^2)$  'nin  $1/T$ 'ye göre grafiğinin değişiminden bu grafiğin eğimi ortalama engel yüksekliği değerini verirken y-eksenini kesmiş olduğu noktanın eksponansiyel değeri ise deneysel  $A^*$  Richardson değeri hesaplanmış olur. Buna göre, Şekil 3'ten Denk. (4)'e göre  $A^*$  Richardson sabiti değeri  $7,34 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  olarak hesaplandı. İlâveten, bu grafikten ortalama engel yüksekliği olarak ifade edilen aktivasyon enerjisi değeri ise,  $0,57 \text{ eV}$  olarak hesaplandı.

Ayrıca Şekil 3'de görüldüğü gibi Richardson grafiğinde yüksek sıcaklık bölgesinde ki  $\ln(J_0 / T^2)$  değerleri nisbeten kararlı bir değişime sahipken düşük sıcaklık değerlerinde ise bu kararlılık bozulmakta ve bu lineer değişimden sapan bir görünüm vermektedir.

Literatürde, deneysel verilerle elde edilen Richardson sabitindeki bu sapmanın arayüzeyin yapısından ve engel yapıdaki homojensizliklerden kaynaklandığı rapor edilmektedir. Ayrıca literatürde sıcaklığa bağlı I-V karakteristiğinden elde edilen Richardson sabitindeki sapmanın engeldeki anormalliklerden dolayı kaynaklandığı ifade edilmektedir [15].

Şekil 1'deki engel yüksekliği değerlerinin azalan sıcaklıkla hızla azalması, Şekil 2'de idealite faktörü değerlerinin azalan sıcaklıkla hızla artması ve Şekil 3'deki Richardson grafiğinde sıcaklıkla lineerlikten sapan görünüm ve yine bu grafikten hesaplanan  $A^*$  Richardson sabitinin  $7,34 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  değeriyle p tipi Si'un teorik değeri olan  $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ nden oldukça farklı olarak hesaplanması yapıdaki eklem anormallikleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Böylece, Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'de gözlemlenebilen bu anormal değişimler, Schottky eklem homojensizliklerine atfedilebilir.

#### IV. SONUÇ

P tipi Si yarıiletken tabaka üzerine önce alüminyumun (Al) sonra altının (Au) termal yolla

buharlaştırılmasıyla bir Au/Al/p-Si Schottky kontak yapısının fabrikasyon işlemleri gerçekleştirilmiş oldu. Au/Al/p-Si ekleminden akım-gerilim (I-V) ölçümleri  $150\text{-}300 \text{ K}$  sıcaklık aralığında  $10 \text{ K}$  sıcaklık aralıklarıyla yapıldı. Ölçüm sonuçlarının analizlerinden engel yüksekliği değerleri sıcaklığa bağlı olarak azaldı, idealite faktörü değerleri ise hızla artış gösterdi. Aynı zamanda Richardson grafiğinde de özellikle düşük sıcaklık değerlerinde sapma gösterdi ve bu grafikten  $A^*$  Richardson sabiti değeri  $7,34 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  olarak hesaplandı. Au/Al/p-Si eklem yapısında gözlemlenen tüm bu anormallikler Schottky eklem anormallikleri ile ilişkilendirildi ve bu anormalliklerin oluşmasında metal ve yarıiletken tabakaları arasında oluşan arayüzey tabakasının yoğunca etkin olduğu rapor edildi.

#### KAYNAKLAR

- [1] Rhoderick EH and Williams RH. Metal-Semiconductor Contacts, 2<sup>nd</sup> ed., Oxford: Clarendon; 1988.
- [2] R. T. Tung, *Physical Review B*, vol. 45, 13 pp. 509, 1992.
- [3] W. Mönch, *Applied Physics Letters*, vol. 72, pp. 1899, 1998.
- [4] V.L. Rideout, C.R. Crowell, *Solid State Electronics*, vol. 13, pp. 993-1009, 1970.
- [5] J. Oswald and E. Dobrocka, *Semiconductor Science and Technology*, vol. 11, pp. 1198-1202, 1996.
- [6] H. C. Card and E. H. Rhoderick, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 4, pp. 1602, 1971.
- [7] K. Maeda, I. Umezu, H. Ikoma and T. Yoshimura, *Journal of Applied Physics*, vol. 68, pp. 2858, 1990.
- [8] A. M. Cowley and S. M. Sze, *Journal of Applied Physics*, vol. 36, pp. 3212, 1965.
- [9] J. H. Werner, K. Ploog and H. J. Queisser, *Physical Review Letters*, vol. 57, pp. 1080, 1986.
- [10] V. L. Rideout, C. R. Crowell, *Solid State Electronics*, vol. 13, pp. 993, 1970.
- [11] J. H. Werner and H. H. Güttler, *Journal of Applied Physics*, vol. 69, pp. 1522, 1991.
- [12] J. Oswald, *Solid State Electronics*, vol. 35, pp. 1629, 1992.
- [13] K. Maeda, *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 5659, 2006.
- [14] C. R. Crowell and S. M. Sze, *Solid State Electronics*, vol. 9, pp. 1035, 1966.
- [15] Z. J. Horvath, *Mater Res Soc Symp Proc*, vol. 260, pp. 367, 1992.