



## ANTİMON KATKILI $TiO_2/n$ -Si METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN DİYODUN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN FARKLI YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Savaş SÖNMEZOĞLU, Seçkin AKIN

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 70100, Karaman, svssonmezoglu@kmu.edu.tr, seckinakin@kmu.edu.tr

Geliş Tarihi:31.05.2011 Kabul Tarihi:23.11.2011

### ÖZET

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyotların,  $I-V$  karakteristikleri yardımıyla elde edilen parametreleri elektronik tasarımlarda önemli yer tutmaktadır. Çığ gibi büyüyen elektronik sanayisinde, değişik yöntemlerle malzeme parametrelerinin her geçen gün iyileştirilmesi ve çeşitliliğinin artması, malzemelerin karakterizasyonlarından yapılan parametre hesaplamalarında yeni metotlar bulunmasının yolunu açmıştır. Bu çalışmada, antimon katkılı  $TiO_2/n$ -Si MIS diyot oluşturulmuş ve yapının idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\phi_b$ ) ve seri direnç değeri ( $R_s$ ) gibi temel elektriksel parametreleri ileri beslem  $I-V$ , Cheung fonksiyonları, Norde metodu, Bohlin metodu, Hernandez metodu ve Chattopadhyay metodu gibi farklı metotlarla hesaplanmıştır. Tüm yöntemlerden elde edilen engel yüksekliği değerlerinde iyi bir uyum gözlenirken, idealite faktörü ve seri direnç değerlerinin sırasıyla 2.74-3.42 ile 94 - 4118  $\Omega$  arasında değiştiği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Sb-katkılı  $TiO_2/n$ -Si MIS yapı,  $I-V$  karakteristiği, Bohlin metodu, Hernandez metodu, Chattopadhyay metodu.*

## THE DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR DIODES BASED ON ANTIMONY-DOPED $TiO_2/n$ -Si BY DIFFERENT METHODS

### ABSTRACT

Metal-insulator-semiconductor (MIS) diodes-parameters which are obtained by  $I-V$  characteristics are very important in electronic design. In rapidly developing electronic industry, the improvements of material parameters by using various methods, hence the increasing of diversity provides to find new methods in parameter solutions, which is calculated from material characterizations. In this study, antimony doped  $TiO_2/n$ -Si MIS diode was fabricated and basic electrical parameters of the device such as ideality factor ( $n$ ), barrier height ( $\phi_b$ ), and series resistance ( $R_s$ ) were determined from the forward bias  $I-V$  characteristics, Cheung functions, Norde's method, Bohlin's method, Hernandez's method and Chattopadhyay's method. While there was a good agreement for the values of barrier height obtained from all methods, the ideality factor and series resistance values vary between 2.74 - 3.42 and 94 - 4118  $\Omega$ , respectively.

**Keywords:** *Sb-doped  $TiO_2/n$ -Si MIS structure,  $I-V$  characteristics, Bohlin's method, Hernandez's method, Chattopadhyay's method.*

### 1. GİRİŞ

Bir metalin, bir yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırılarak büyütülmesi ile elde edilen metal-yarıiletken (MS) kontakların tarihçesi 18. yüzyılın sonlarına kadar uzanmaktadır. MS diyot çalışmaları 1874 yılında demir, bakır ve kurşun sülfür gibi kristaller üzerine metalik kontak yapıldığını belirleyen Braun'un [1], nokta kontak metal-

yarıiletken doğrultucular ve dedektörleri uygulamaya sokmasıyla başlamıştır. İkinci dünya savaşı sırasında silisyum ve germanyum ile nokta kontak doğrultucular mikrodalga radarlarda kullanılmıştır. Giderek önemli bir araştırma alanı haline gelen MS diyotlar üzerine yapılan teorik çalışmalar teknolojik çalışmalardan daha sonra olmuştur. İlk defa Schottky, metal-vakum sistemlerde imaj kuvvetten dolayı engel alçalmasının elde edilmesini bulmuştur [2]. Metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koyduğu için bu kontaklara Schottky diyotlar ya da Schottky kontaklar da denilmektedir. 1930'lu yıllarda kayda enerji engelinden taşıyıcı difüzyonu olayını esas alan doğrultma teorisi Schottky ve Spenke [3] tarafından geliştirilmiştir. Bir yıl sonra Wilson [4], Schottky kontaklar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirmiş ve doğrultma için ters polariteyi açıklamıştır. 1940'lı yıllarda Schottky difüzyon teorisini, Bethe ise termoiyonik emisyon teorilerini geliştirmişlerdir [5]. Daha sonraları Crowell ve Sze bu iki teoriyi birleştirerek, ideal Schottky diyotlarda akım iletim mekanizmasını termoiyonik difüzyon emisyon teorisi olarak sunmuşlar ve MS diyotlar üzerine yapılan teorik çalışmaların hızla gelişmesine öncülük etmişlerdir [6].

Metal-yarıiletken diyotlar anahtar uygulamaları [7], sensörler [8], güneş pilleri [9], metal-yalıtkan-yarıiletken alan etkili transistörler (MISFET) [10], gibi uygulamalarda kullanımından dolayı günümüz mikroelektronik aygıt teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Bu yapılardan kullanılacak amaca göre en verimli şekilde yararlanabilmek ancak diyot karakteristiklerinin iyi bilinmesiyle mümkündür. Direnç, yalıtkan ara tabaka, arayüzey durumlarının enerji dağılımı, Schottky bariyer yüksekliğindeki homojensizlik gibi bazı karakteristik parametrelerin aygıt performansını önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [11–16]. Metal-yarıiletken diyotlarda potansiyel bariyer yüksekliği en önemli karakteristik parametrelerden biridir [17,18]. Bariyer yüksekliği metal-yarıiletken kontakın arayüzeyinde istenilmeyen etkenlerden dolayı, beklenilenden farklı bir yükseklik değerinde oluşabilmektedir [19–21]. Potansiyel engelinin ve diyot parametrelerinin kararlı kalması, metal ile yarıiletken arayüzeyine yalıtkan bir tabaka oluşturularak sağlanabilir [22,23]. Yani engel yüksekliği metal ve yarıiletken arasında yalıtkan bir malzeme yerleştirilerek yapay olarak değiştirilebilen bir parametredir. Metal ile yarıiletken arasında doğal yolla ya da yapay olarak oluşturulabilen bir yalıtkan arayüzey tabaka MS diyotu metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyota çevirir. Bu yalıtkan tabaka sayesinde hem metal ile yarıiletken birbirinden ayrılıp izole olur hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişleri düzenlenebilir. Genellikle yalıtkan tabaka olarak SiO<sub>2</sub> seçilmesinin nedeni, SiO<sub>2</sub>'nin silisyum üzerine doğal ve homojen olarak büyümesi ve örgü sabitinin silisyuma yakın olmasındandır [24]. Ancak SiO<sub>2</sub> düşük dielektrik sabitine sahip olduğu için aygıtta kaçak akıma neden olur. Kaçak akımları azaltmak ve yüzey pasivasyonunu sağlamak için son zamanlarda SiO<sub>2</sub> yerine daha yüksek dielektrik sabitine sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [25], SnO<sub>2</sub> [26], Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [27], ve TiO<sub>2</sub> [28-30] gibi ince filmler sıkça kullanılmaktadır. Son yıllarda, diğerlerine göre yüksek elektriksel geçirgenlik [31], yüksek dielektrik sabiti [32,33] ve geniş bant aralığı [34] gibi üstün özelliklere sahip olan TiO<sub>2</sub>'in aygıt teknolojisinde yalıtkan arayüzey tabaka olarak kullanımı artmıştır. Mikroelektronik teknolojisinin gelişmesi ve ilerlemesi üzerine araştırmalar yapan bazı bilim adamları, aygıt performansını ve kalitesini arttırmak için kullanılan materyallerin katkılanması üzerinde çalışmalar yaparken [34–37], bazıları da bu aygıtların seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü [38–42] gibi elektronik parametrelerinin daha iyi belirlenmesi için teorik çalışmalar yapmıştır. Yapılan bu çalışmaların amacı, bir yandan bu yapıların fiziksel özelliklerini belirlemek, diğer yandan da bu fiziksel özelliklerden faydalanarak yeni devre elemanları geliştirmektir.

Bu çalışmada, literatürden yapılan araştırmalara göre, ilk defa antimon katkılı TiO<sub>2</sub> yalıtkan arayüzey tabakası kullanılarak Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyotu oluşturulmuş ve bu diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel parametreleri *I-V* karakteristiği Cheung metodu, Norde metodu, Bohlin metodu, Hernandez metodu ve Chattopadhyay metodu gibi farklı metotlar kullanılarak hesaplanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Antimon Katkılı TiO<sub>2</sub> 'in Sentezlenmesi

TiO<sub>2</sub> çözeltisi hazırlamak için öncelikle 25 mL etanol [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, 99.9%, Merck] içerisine 2.4 mL titanyum tetraisoprosit [Ti(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>, ex. Ti ≥ 98%, Merck] eklendi ve çözelti manyetik karıştırıcıda 1 saat kadar bekletilmiştir. Daha sonra, çözeltiye 5 mL glasiyel asetik asit [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, 99.9%, Merck], 1.5 mL trietilamin [(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>N, 99%, Merck] ve 25 mL etanol eklenmiştir. Bu işlemten sonra, çözelti manyetik karıştırıcıda bir saat daha karıştırılmıştır. Son adım olarak, 25 mL etanole, 0.072 gr antimon triklorür (SbCl<sub>3</sub>, ≥99.0%, Merck) eklenmiş ve çözelti manyetik karıştırıcıda 2 saat karıştırılmıştır. Daha sonra, antimon triklorür çözeltisi TiO<sub>2</sub>

çözeltisine eklendi ve ilaveten 2 saat daha manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Son olarak, Sb katkılı TiO<sub>2</sub> (Sb/Ti = 1/10) çözeltisi kaplama öncesinde bir gün kadar oda sıcaklığında bırakılmıştır.

## 2.2. Sb-katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyodun Fabrikasyonu

Bu çalışmada, (100) yönelime sahip, 400 µm kalınlıkta ve 1-10 Ωcm öz dirençli n-tipi silisyum (Si) yarıiletken alttaş kullanılmıştır. Si alttaş RCA temizleme prosedürüne göre temizlenmiştir. RCA temizleme prosedürü sırasıyla yapılan üç ana adımı kapsamaktadır. 1) Organik malzemenin temizlenmesi, çözülmeyen organik atıkların NH<sub>4</sub>OH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 6H<sub>2</sub>O çözeltisinde 10 dakika kaynatılarak uzaklaştırılmasını içermektedir. 2) Oksit tabakanın kaldırılması, 1. adımın sonucu olarak ince silikon dioksit (SiO<sub>2</sub> ≈ 10 Å<sup>0</sup>) tabakada biriken metalik atıkların uzaklaştırılmasını içermektedir. Alttaşın ön yüzeyindeki oksit, HF:H<sub>2</sub>O (1:10) çözeltisinde yok edilmiş ve son olarak taban deiyonize su içinde 30 saniye durulanmıştır. 3) İyonik temizleme işlemi ise, HCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 6H<sub>2</sub>O [43] çözeltisi içinde 10 dakika kaynamayı kapsamaktadır. Daha sonra Si kristali bir süre N<sub>2</sub> gazı ortamında kurumaya bırakılmıştır. Kurutma işlemi takiben, n-tipi Si kristalinin arka yüzeyine tungsten filamen kullanılarak, 10<sup>-7</sup> Torr basınç altında, yüksek saflıkta altın (99.9%) termal olarak buharlaştırılmıştır. Düşük dirençli bir omik kontak elde etmek için, Si kristali 580°C, N<sub>2</sub> gazı ortamında 3 dakika kadar kurumaya bırakılmıştır.

Daldırma işlemi el yapımı motorize bir birim kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her örnek, çözelti içerisine beş defa daldırılmıştır. Her daldırma işleminden sonra kaplanan n-tipi silisyum kristalin yüzeyinde oluşan alaşımlar etanol ile temizlenmiştir. Her daldırma işleminden sonra, örnekler 5 dakika boyunca 300 °C'de ara tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Sb katkılı TiO<sub>2</sub> ile kaplanmış n-tipi Si'nin ön yüzeyine, doğrultucu bir kontak elde etmek için, yüksek bir vakum ve 10<sup>-7</sup> Torr basınç altında gölgeli bir maske kullanılarak yüksek saflıkta altın tabakası (99.9%) termal olarak buharlaştırılmıştır. Doğrultucu nokta kontaklar yaklaşık 1.0 mm çapında dairesel bir geometriye sahiptir (diyot alanı = 7.85x10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>). Böylece Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyot elde edilmiş ve bu diyotun akım-voltaj (*I-V*) karakteristikleri Keithley 6487 Picoammeter/Voltaj kaynağı ile incelenmiştir.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

*Termoionik emisyon*; sıcak bir yüzeyden termal enerji nedeniyle taşıyıcıların salınması olayına denir. Termoionik emisyon teorisi MIS diyotlarında taşıyıcıların kazanacağı termal enerji nedeniyle potansiyel engeli aşarak yarıiletken yalıtkan veya metalden yalıtkan geçmesi sırasındaki akım olaylarını izaha çalışmaktadır. Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda bu olay elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise holler tarafından, yani MIS diyotlarında akım, çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Termoionik emisyon, doğrultucu kontakın potansiyel engelini *kT* enerjisinden büyük ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının da çok küçük olduğunu kabul eder [18]. MIS aygıtlarda azınlık taşıyıcıların etkisi ihmal edilerek TE teorisine göre doğru beslemde akım denklemi [18],

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

ile ifade edilir. Uygulanan gerilim *V*'nin *IR<sub>s</sub>* kadarlık miktarı seri direnç üzerine düşeceği için *V* yerine *V - IR<sub>s</sub>* yazılabilir. Seri direnç etkisi göz önüne alınırsa akım ifadesi yeniden,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1\right) \quad (2)$$

olarak elde edilir. Burada  $V$  uygulanan gerilim,  $q$  elektron yükü,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  mutlak sıcaklık ifadesi,  $n$  idealite faktörü,  $R_s$  seri direnç değeri ve  $I_0$ ,  $\ln I - V$  grafiğinin lineer kısmının akım eksenini sıfır voltajda kestiği noktadan bulunan doyum akımı olup,

$$I_0 = A.A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $A$  diyodun etkin alanı,  $(\phi_b)$  potansiyel engel yüksekliği,  $A^*$  ise Richardson sabiti olup, n-tipi Si için  $112 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$  [44] değerine sahiptir. Eşitlik 1'de eşitliğin her iki tarafının da logaritması alınıp yeniden düzenlendiğinde,

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (4)$$

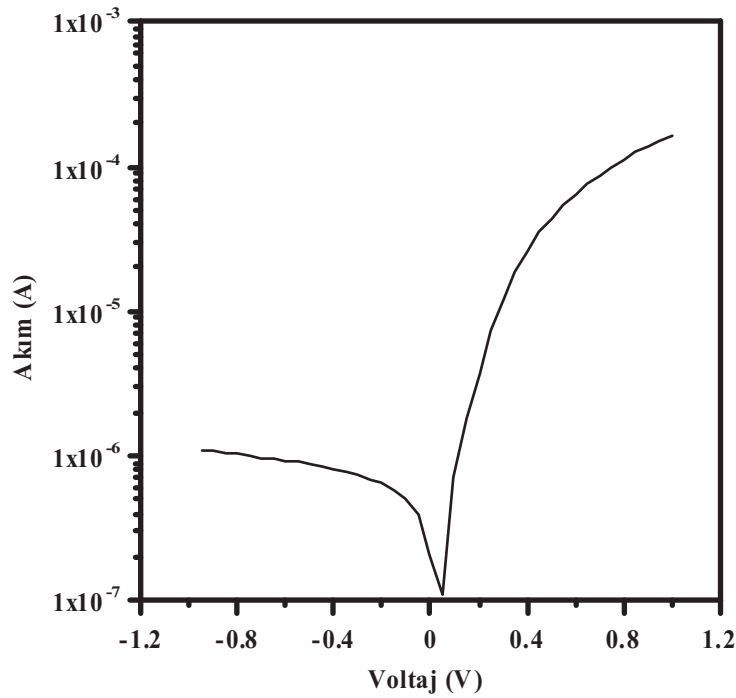
buradan  $V$  nin  $3kT/q$ ' dan büyük değerleri için idealite faktörü,

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (5)$$

ile tanımlanır. Doğru beslem  $\ln I - V$  grafiğinin lineer bölgesinde eğrinin eğiminden bulunan idealite faktörü, diyodun ideallik ölçüsünü gösteren bir sabit olup, ideal bir diyot için  $n=1$  değerine sahiptir. Eşitlik 5, Eşitlik 2'de yerine yazılırsa engel yüksekliği için,

$$q\phi_b = kT \ln\left(\frac{A.A^*T^2}{I_0}\right) \quad (6)$$

ifadesi elde edilir. Şekil 1'de doğrultucu karakteristik gösteren Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyot için yarı logaritmik  $\ln I - V$  grafiği verilmiştir. Eşitlik 5 ve 6 yardımıyla elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 2.79 ve 0.68 eV'dur. Ayrıca  $\ln I - V$  grafiğinden diyodun seri direnç değeri de  $4118 \Omega$  olarak hesaplanmıştır.  $I - V$  metodu ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 1'de gösterilmiştir. İdealite faktörünün yüksek çıkmasının sebebi bariyer yüksekliğindeki homojensizlik, seri direnç etkisi, yalıtkan tabaka veya arayüzey durumları olabilir [18,44,45].



Şekil 1. Oda sıcaklığında yarı logaritmik  $\ln I - V$  karakteristiği.

Şekil 1’de görüldüğü gibi, Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyotun  $I - V$  karakteristiği iyi bir doğrultucu davranış göstermektedir. Fakat bu doğrultucu özellik yüksek gerilim bölgelerinde etkin olmaya başlayan seri direnç etkisi sebebiyle diyotta akımın azalmasına sebep olmaktadır. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliği  $I - V$  karakteristiğinin hem lineer hem de lineer olmayan bölgelerinde etkin olurken, seri direnç sadece doğru beslemin lineer olmayan bölgesinde etkilidir. MIS diyotların ( $n$ ) idealite faktörü, ( $R_s$ ) seri direnci ve ( $\phi_b$ ) bariyer yüksekliği gibi elektriksel parametrelerini belirlemek için  $I - V$  karakteristiğinin yanısıra birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki Norde tarafından ideal durumda seri direnç ve engel yüksekliğini belirlemek için geliştirilen  $F(V)$  fonksiyonudur [38]. İleriki yıllarda Bohlin, bu modeli modifiye etmiştir [39]. İkinci olarak ideal ve ideal olmayan diyotlar için Cheung tarafından düz beslem  $I - V$  karakteristikleri kullanılarak Schottky diyotlarda engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnci hesaplamak için farklı bir hesaplama modeli daha ileri sürülmüştür [40]. Daha sonra Chattopadhyay, uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak yüzey potansiyeli grafiği ile hesaplama modeli ileri sürmüştür [41]. Son olarak Hernandez ve arkadaşları  $Z(V, T)$  fonksiyon eğrileri olarak bilinen hesaplama yöntemini geliştirmişlerdir [42].

Çizelge 1. Farklı metotlarla hesaplanmış temel elektriksel parametreler.

Parametreler	$I - V$	$dV/d(\ln I)$	$H (I)$	$F (V)$	$F(V_0, \gamma)$	$Z(V, T)$	$\psi_s - V$
$n$	2.79	3.42	-	-	3.29	2.74	2.85
$(\phi_b)$ (eV)	0.68	-	0.41	0.50	0.44	0.68	0.68
$(R_s)$ ( $\Omega$ )	4118	3370	3213	94.25	117	-	-

### 3.2. Norde Fonksiyonu Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

Özellikle yüksek seri dirence sahip metal-yarıiletken kontaklarda seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi fiziksel (elektronik) parametrelerin tayin edilmesi amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan ilki Norde tarafından  $n = 1$  durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan  $F(V)$  fonksiyonudur. Bu yöntem  $R_s$  ve  $(\phi_b)$ 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulandığı için sadece bir sıcaklıkta  $I-V$  eğrisine ihtiyaç vardır [38]. İlerleyen yıllarda, Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda da ( $1 < n < 2$ )  $n$ ,  $R_s$  ve  $\phi_b$  değerinin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Bu yöntem  $R_s$  ve  $\phi_b$ 'nin sıcaklığı değiştiği durumlarda da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki  $I-V$  eğrisine ihtiyaç vardır. Benzer yöntem Mc Lean tarafından da belirtilmiştir [46].

Termoionik emisyon teorisi sadece diyodun düz beslem  $I-V$  karakteristiğinin lineer bölgesinde kullanılır. Yüksek seri direnç nedeniyle lineer bölge  $kT/e \ll V \ll IR_s$  aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Bu durumda  $\ln(I)-V$  grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır ve bu bölgede doyma akımı  $I_0$  ve engel yüksekliği  $(\phi_b)$  değeri güvenilir olarak hesaplanamaz.  $R_s$ ,  $\phi_b$  ve  $n$  değeri hesaplamak için daha güvenilir metotlar mevcuttur [38-42]. İlk olarak Norde tarafından sunulan fonksiyon aşağıdadır [38].

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{A.A^* T^2} \right) \quad (7)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $F(V)$  özel tanımlı Norde fonksiyonu,  $\gamma$  idealite faktöründen büyük tam sayı çarpanı,

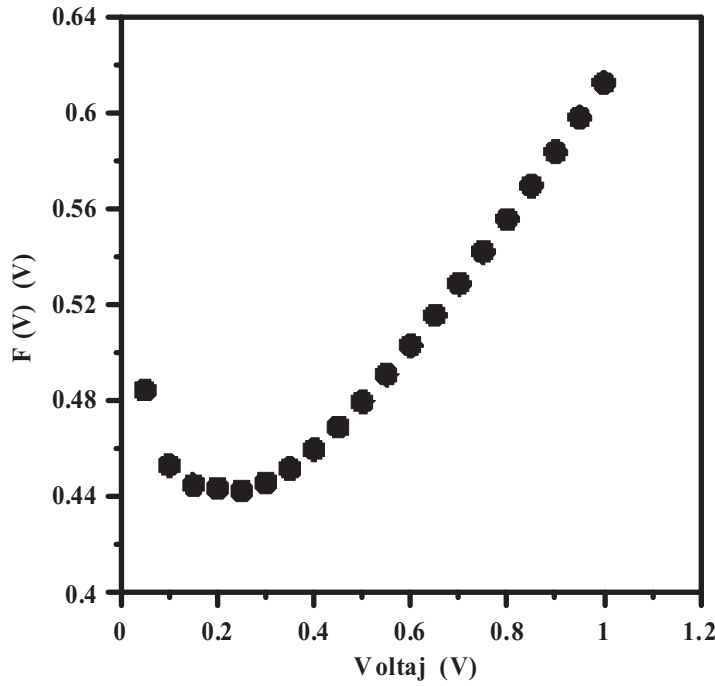
$I(V)$  akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen akım değeridir.  $\gamma$  çarpanı Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyot için 3 olarak alınmıştır. Şekil 2'de  $F(V)-V$  grafiği gösterilmiştir. Bu grafik yardımıyla engel yüksekliği için,

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (8)$$

ifadesi kullanılır. Burada  $F(V_0)$ , Şekil 2'deki  $F(V)-V$  grafiğinde  $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki değeri,  $V_0$  ise bu değere karşılık gelen  $V$  voltajıdır. Norde fonksiyonuna göre MIS diyot için seri direnç değeri aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$R_s = \left( \frac{kT(\gamma - n)}{qI'} \right) \quad (9)$$

Burada  $I'$  Şekil 2'de gösterilen  $F(V_0)$  yardımıyla elde edilen akım değeridir. Eşitlik 8 ve 9 yardımıyla elde edilen  $(\phi_b)$  ve  $(R_s)$  değeri sırasıyla 0.50 eV ve 94.25  $\Omega$ 'dur. Norde metodu ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 1'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyotun  $F(V) - V$  grafiği.

### 3.3. Bohlin Metodu Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

Norde metodunda idealite faktörünün 1 olarak kabul edilmesi ve bariyer yüksekliğini hesaplarırken kullanılan  $F(V_0)$  değerlerindeki data eksikliği gibi dezavantajlarından dolayı, Bohlin MIS engel diyotunun  $I - V$  ölçümünden elde edilen  $R_s, \phi_b$  ve  $n$  değerlerinin belirlenmesini mümkün kılan iki farklı fonksiyon tanımlamıştır [39]. Norde fonksiyonun ilk terimi olan  $\frac{V}{2}$  yerine  $\frac{V}{\gamma}$  terimini kullanmıştır. Buradaki  $\gamma$  idealite faktöründen büyük olmak kaydıyla ( $1 < n < \gamma$ ) keyfi bir sabittir. Bu durumda, Norde metodundaki Eşitlik 8 ve 9 aşağıdaki gibi modifiye edilerek  $1 < n < \gamma$  için,

$$\phi_b = F(V_0, \gamma) + \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma} \right) V_0 - \frac{(\gamma - n)}{\beta n} \quad (10)$$

$$R = \frac{(\gamma - n)}{\beta I'} \quad (11)$$

eşitlikleri elde edilmiştir. Burada  $\beta = q/kT$  yerine kullanılmıştır. Eşitlik 10 ve 11'deki denklemler farklı iki  $\gamma$  değeri ile çözüldüğünde,

$$\phi_b = F(V_{01}, \gamma_1) + (1/n - 1/\gamma_1)V_{01} - (\gamma_1 - n)/\beta n \quad (12)$$

$$\phi_b = F(V_{02}, \gamma_2) + (1/n - 1/\gamma_2)V_{02} - (\gamma_2 - n)/\beta n \quad (13)$$

$$R_s = (\gamma_1 - n) / \beta I_1' \quad (14)$$

$$R_s = (\gamma_2 - n) / \beta I_2' \quad (15)$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 12 ve 13'den idealite faktörü,

$$n = (V_{01} - V_{02} + \gamma_2 / \beta - \gamma_1 / \beta) / \left[ F(V_{02}, \gamma_2) - F(V_{01}, \gamma_1) - V_{02} / \gamma_2 + V_{01} / \gamma_1 \right] \quad (16)$$

Eşitlik 12 ve 13'deki ( $\phi_b$ ) değerleri ile Eşitlik 14 ve 15'deki ( $R_s$ ) değerlerinin ortalamaları alınarak,  $\gamma_1 = 3.0$  ve  $\gamma_2 = 3.1$  için elde edilen aygıt parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu yöntemle elde edilen idealite faktörünün, diğer yöntemlerle elde edilen idealite faktörü değerlerine göre daha büyük çıkması arayüzey tabakaya, azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna ve bariyerdeki tünellemeye atfedilebilir [47, 48].

#### 3.4. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

1986 yılında Cheung tarafından Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmaları için düz beslem  $I-V$  karakteristikleri kullanılarak farklı bir hesaplama modeli ileri sürülmüştür. Eşitlik 2'nin algoritması alınır  $V$  çekilirse,

$$V = IR_s + n\phi_b + \left( n \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (17)$$

ifadesi elde edilir. Bu son eşitliğin  $\ln I$  'ya göre diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n \frac{kT}{q} \quad (18)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadeye birinci Cheung fonksiyonu denir. Bu son ifade de  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  nin  $I$  'ya karşı grafiği çizilirse bu bir doğru olacaktır. Bu doğrunun eğimi ve düşey eksenini kestiği noktasından sırasıyla  $R_s$  seri direnç ve  $n$  idealite faktörü değerleri bulunur [40]. Ayrıca engeli yüksekliği  $\phi_b$  'yi bulmak için aşağıdaki şekilde bir  $H(I)$  fonksiyonu tanımlanmıştır.

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (19)$$

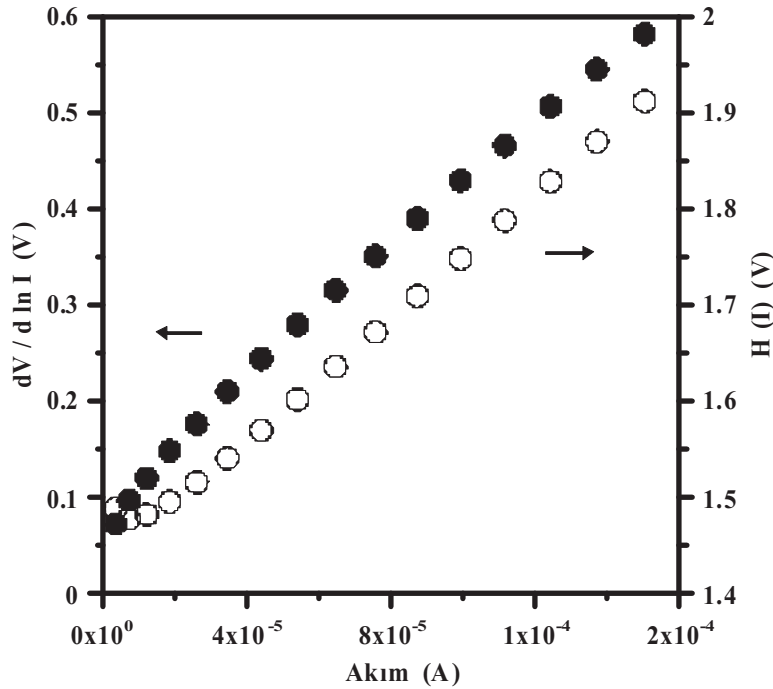
Eşitlik 17'deki  $V$  ifadesi bu son ifade de yerine yazılır ise,

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad (20)$$

ifadesi elde edilir. Bu tanımlanan ifadeye ise ikinci Cheung fonksiyonu denir.  $H(I)$  'ya karşı  $I$  grafiği çizilirse yine bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi ve  $H(I)$  'nin ekseninin kesim noktasından sırasıyla nötral bölge direnci olan seri direnç  $R_s$  ve  $\phi_b$  engel yüksekliği bulunur.



Buradan da anlaşılacağı gibi Şekil 3’de gösterilen  $dV/d\ln(I)-I$  grafiği bir doğru verecektir. Doğrunun  $dV/d\ln(I)$  eksenini akımın sıfır olduğu değerde kestiği noktadan idealite faktörü ( $n$ ), doğrunun eğiminden ise seri direnç değeri ( $R_s$ ) sırasıyla, 3.42 ve 3370  $\Omega$  olarak bulundu.  $dV/d\ln(I)$  metodu ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 1’de verilmiştir. İdealite faktörünün birden büyük çıkması diyotun ideal durumundan yani TE teorisinden saptığını göstermektedir. Yine Cheung fonksiyonlarından Eşitlik 20 yardımıyla  $H(I) - I$  grafiği çizildi. Şekil 3’de gösterilen  $H(I) - I$  grafiğinde doğrunun  $H(I)$  eksenini akımın sıfır olduğu değerde kestiği noktadan ( $\phi_b$ ) potansiyel engel yüksekliği, doğrunun eğiminden ise seri direnç değeri ( $R_s$ ) sırasıyla, 0.41 eV ve 3213  $\Omega$  olarak bulundu.  $H(I)$  metodu ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyotun  $dV/d(\ln I) - I$  ve  $H(I) - I$  grafiği.

Akım-voltaj karakteristiğinden bulunan idealite faktörü değeri ile Cheung fonksiyonlarından bulunan idealite faktörü değeri arasındaki fark seri direnç etkisine atfedilebilir.  $\ln I - V$  ölçümlerinden elde edilen idealite faktörü değeri için sadece arayüzey durumları etkili olurken, Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü değerinde hem arayüzey durumları hem de seri direnç etkisi söz konusudur. Diğer taraftan,  $dV/d\ln(I)-I$  ve  $H(I) - I$  grafiklerinden elde edilen seri direnç değerlerinin birbiriyle iyi bir uyum içerisinde bulunduğu görülmektedir. Cheung fonksiyonları, elektriksel parametrelerin elde edilmesi için tek bir  $I-V$  ölçümünün yeterli olması ve seri direnç değerlerinin geçerliliğinin kontrol edilebilmesi açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin, Norde ve Bohlin fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinden büyük çıkma sebebi; Cheung fonksiyonlarının sadece lineer olmayan bölgelerde geçerli olurken, Norde ve Bohlin fonksiyonlarının tüm doğru beslem  $I-V$  karakteristiği boyunca geçerli olmasıdır. Yani,  $I-V$  karakteristiğinde tüm doğru beslem bölgesinin eğimi, lineer olmayan bölgenin eğiminden daha büyüktür [49,50].

### 3.5. Chattopadhyay Metodu Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

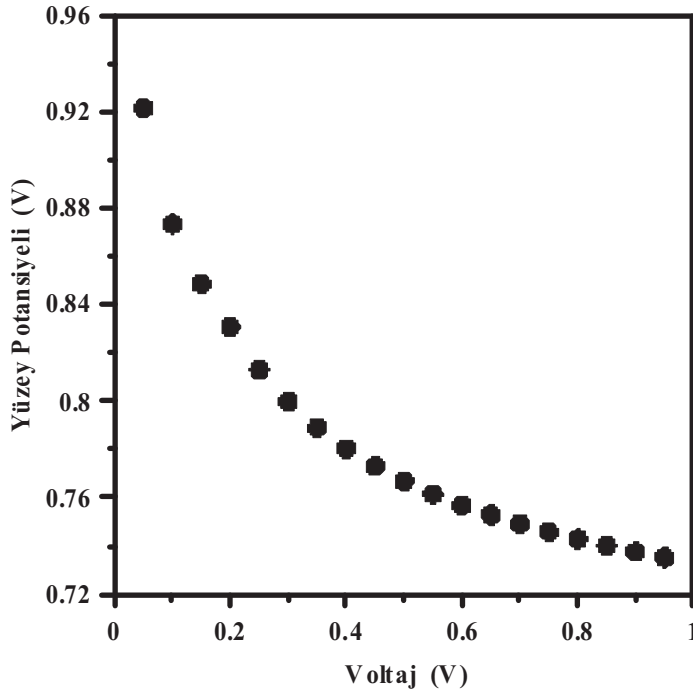
Chattopadhyay yönteminde ise engel yüksekliğinin, uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak yüzey potansiyelinin grafiğinin çizilerek bulunabileceği ileri sürülmüştür. Chattopadhyay metodunda [41] yüzey potansiyeli,

$$\psi_s = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I} \right) - V_n \quad (21)$$

ile tanımlanır. Burada  $\psi_s$  yarıiletkenin yüzey potansiyeli,  $V$  ise taşıyıcı konsantrasyonundan elde edilen Fermi enerji seviyesinin derinliğidir. Eşitlik 21 ile elde edilen yüzey potansiyeli değerlerine karşılık çizilen uygulanan voltaj grafiği Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 4'de  $\psi_s$  değerlerinin uygulanan gerilimle kritik bir gerilime ( $V_c$ ) kadar lineer olarak azaldığı görülmektedir, daha sonra ise seri direncin etkisiyle doğrusallıktan sapmaktadır. Benzer sonuçlar Chattopadhyay [41] tarafından da elde edilmiştir. Kritik voltaja denk gelen  $\psi_s(I_c, V_c)$  değeri ve idealite faktörünün tersi olan  $C_2 = 1/n = -(d\psi_s/dV)_{I_c, V_c}$  parametresi kullanılarak, engel yüksekliği için [51],

$$\phi_b = \psi_s(I_c, V_c) + C_2 V_c + V_n \quad (22)$$

ifadesi yazılabilir.  $\psi_s - V$  grafiğinden bulunan  $\psi_s(I_c, V_c)$ ,  $V_c$  ve  $C_2$  değerleri yardımıyla Eşitlik 22'den engel yüksekliği ve idealite faktörü sırasıyla, 0.68 eV ve 2.85 olarak elde edildi.  $\psi_s - V$  metodu ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 1'de gösterilmiştir.  $I-V$  karakteristiğinden ve Hernandez yönteminden elde edilen  $\phi_b$  ve  $n$  değerleri ile Chattopadhyay yönteminden elde edilen  $\phi_b$  ve  $n$  değerlerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyotun ileri beslem yüzey potansiyeli-voltaj grafiği.

### 3.6. Hernandez Metodu Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

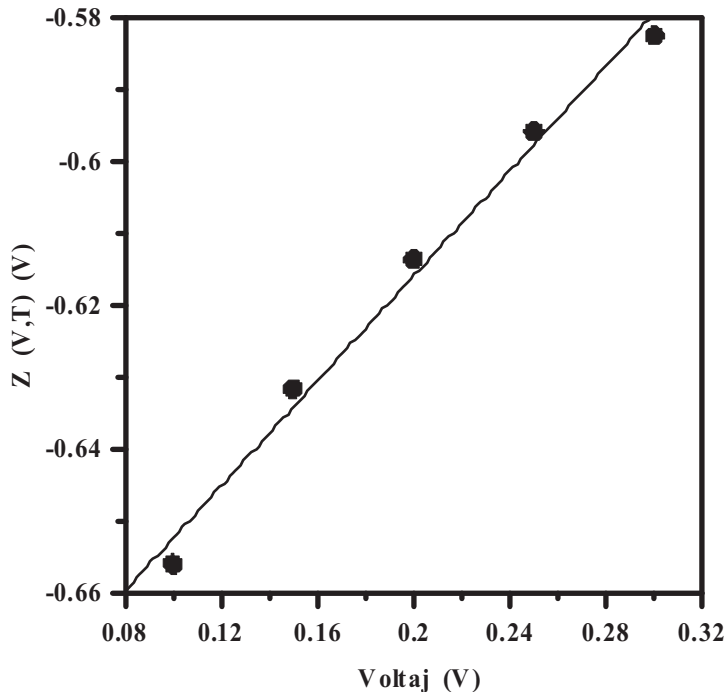
İdealite faktörü ve bariyer yüksekliğini hesaplamak için kullanılan diğer bir yöntem de Hernandez yöntemidir. Bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değerlerinin voltaja bağlı olarak değiştiğini ifade eden Hernandez yönteminde Eşitlik 1 ve 3' ten yararlanılarak aşağıdaki gibi bir  $Z(V, T)$  fonksiyonu tanımlamak gerekmektedir [42].

$$Z(V, T)_i = \frac{kT}{q} \frac{I}{AA^* T^2 [1 - \exp(-qV/kT)]} \quad (23)$$

$I$  ve  $V$  değerleri kullanılarak Eşitlik 23 yardımıyla elde edilen  $Z(V, T)$  fonksiyonuna karşılık  $V$  değerleri Şekil 5'deki gibi çizilmiştir.  $Z(V, T)$  değerlerinin uygulanan gerilimle lineer olarak değiştiği bölgede, grafik fit edilerek elde edilen doğrunun eğiminden idealite faktörü, kesim noktasından ise bariyer yüksekliği,

$$Z(V, T)_i = -\phi_{b(V, T)} + \frac{V}{n(V, T)_i} \quad (24)$$

Eşitliği ile tayin edilebilir. Eşitlik 24 ve Şekil 5 yardımıyla elde edilen idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri sırasıyla, 2.74 ve 0.68 eV'dur.  $Z(V, T)$  metodu ile elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 5. Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyot için  $Z(V, T)$  fonksiyonuna karşılık  $V$  değerleri.

Hernandez metodu ile belirli voltaj aralığında  $Z(V, T)$  ve  $n(V, T)_i$  aracılığıyla akım iletim mekanizmasını tanımlamak da mümkündür. Belirli bir voltaj aralığında en az bir baskın iletim mekanizması varsa, TE mekanizmasından sapmaya sebep olan etkiler belirlenebilir. Elde edilen verilerden idealiteden sapma olduğu

açıkça görülmektedir bu sapmanın nedenleri, farklı bir taşıyıcı mekanizmanın varlığı ya da bariyer yüksekliğindeki homojensizlik olabilir [42].

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ideal bir davranış göstermeyen fakat doğrultucu özelliğe sahip Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyotun  $I-V$  ölçümü yardımıyla idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\phi_b$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) gibi temel elektriksel parametreleri çeşitli yöntemlerle belirlenmiştir. Farklı yöntemlerden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. İdealite faktörü değerlerinin ise 2.74 ile 3.42 arasında değiştiği belirlenmiştir. İdealite faktörünün birden büyük çıkmasının sebebi olarak; arayüzey durumları, seri direnç ve yalıtkan ara tabaka olarak gösterilebilir. Sonuç olarak, Sb katkılı TiO<sub>2</sub>/n-Si MIS diyot için elde edilen tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip aygıtlar için arayüzey durumlarının, seri direnç ve yalıtkan tabakanın  $I-V$  ölçümleri üzerine etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Bu nedenle yapının elektriksel karakteristiklerinin analizinde bu parametrelerin mutlaka dikkate alınması sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Yaptığımız çalışmada üretilen MIS diyotun iyi bir doğrultucu olması ve maliyetinin uygun olması mikroelektronik sanayisinde kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır.

#### KAYNAKÇA

- [1] F. Braun, "On the current conduction through metal sulphides (in German)", Ann. Rev. Phys. Chem., 153, 556 (1874).
- [2] W. Schottky, "Zur halbleitertheorie der sperrschichtund spitzengleichrichter", Springer Berlin/Heidelberg, Berlin, (1938).
- [3] H. A. Bethe, "Theory of the boundary layer of crystal rectifiers", MIT Radiat. Lab. Rep., 43, 12 (1942).
- [4] A. H. Wilson, "A note on the theory of rectification", Proceeding of the Royal. Society A, 136, 487 (1932).
- [5] V. L. Rideout, "Metal-semiconductor rectifiers", Thin Solid Films, 48, 261 (1978).
- [6] A.M. Cowley, and S.M. Sze, "Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems", J. Appl. Phys., 36, 3212 (1965).
- [7] M. Dragoman, A. Cismaru, H. Hartnagel, and R. Plana, "Reversible metal-semiconductor transitions for microwave switching applications", Appl. Phys. Lett., 88, 073503 (2006).
- [8] B. C. Yadav, R. Srivastava, and C. D. Dwivedi, "Synthesis and characterization of ZnO-TiO<sub>2</sub> nanocomposite and its application as a humidity sensor", Phil. Mag., 88, 1113 (2008).
- [9] Q. Wang, "High-efficiency hydrogenated amorphous/crystalline Si heterojunction solar cells", Phil. Mag., 89, 2587 (2009).
- [10] K. T. Sung, W. Q. Li, S. H. Li, S. W. Pang, and P. K. Bhattacharya, "Application of high-quality SiO<sub>2</sub> grown by multipolar ECR source to Si/SiGe MISFET", Electron. Lett., 29, 277 (1993).
- [11] S. Sönmezoğlu, S. Şenkul, R. Taş, G. Çankaya, and M. Can, "Electrical characteristics of an organic thin copolymer/p-Si Schottky barrier diode", Thin Solid Films, 518, 4375 (2010).
- [12] S. Sönmezoğlu, Ö. A. Sönmezoğlu, G. Çankaya, A. Yıldırım, and N. Serin, "Electrical characteristics of DNA based metal-insulator-semiconductor structures", J. Appl. Phys., 107, 124518 (2010).
- [13] S. Sönmezoğlu, C. B. Durmuş, R. Taş, G. Çankaya, and M. Can, "Fabrication and electrical characterization of pyrrole-aniline copolymer-based Schottky diodes", Semicond. Sci. Technol., 26, 055011 (2011).

- [14] S. Sönmezoğlu, S. Şenkul, R. Taş, G. Çankaya, and M. Can, “Electrical and interface state density properties of polyaniline–poly-3-methyl thiophene blend/p-Si Schottky barrier diode”, *Solid State Sci.*, 12, 706 (2010).
- [15] P. Cova, and A. Singh, “Temperature-dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/N-CdF<sub>2</sub> Schottky-barrier type diodes”, *Solid State Electron.*, 33, 11 (1990).
- [16] B. Akkal, Z. Benamara, L. Bideux, and B. Gruzza, “Electrical characterization of the Au/InP(100) and Au/InSb/InP(100) structures”, *Microelectron. J.*, 30, 673 (1999).
- [17] G. Y. Robinson, “Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces”, C. W. Wilmsen, Plenum Pres., New York (1985).
- [18] E. H. Rhoderick, and R. H. Williams, “Metal-Semiconductor Contacts, 2nd ed.”, Clarendon, Oxford, (1988).
- [19] M. Sağlam, and A. Türüt, “Effect of thermal annealing in nitrogen on the I - V and C - V characteristics of Cr - Ni - Co alloy/LEC n-GaAs Schottky diodes”, *Semicond. Sci. Tech.*, 12, 1028 (1997).
- [20] A. Türüt, S. Tüzemen, M. Yıldırım, B. Abay, and M. Sağlam, “Barrier height enhancement by annealing Cr-Ni-Co alloy Schottky contacts on LEC GaAs”, *Solid State Electron.*, 35, 1423 (1992).
- [21] L. J. Brillson, “Contacts to Semiconductors”, Noyes publications, New Jersey, (1993).
- [22] K. Yu, S. Cheung, T. Sands, J. Jaklevic, N. Cheung, and E. Haller, “Schottky barrier degradation of the W/GaAs system after high temperature annealing”, *J. Appl. Phys.*, 60, 3235 (1986).
- [23] H. C. Cheng, C. Y. Wu, and J. J. Shy, “Excellent thermal stability of cobalt-aluminum alloy Schottky contacts on GaAs substrates”, *Solid State Electron.*, 33, 863 (1990).
- [24] A. Tataroğlu, and Ş. Altındal, “Characterization of current-voltage (I-V) and capacitance-voltage-frequency (CVf) features of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes”, *Microelectron. Eng.*, 83, 582 (2006).
- [25] M. Perego, G. Seguini, G. Scarel, M. Fanciulli, and F. Wallrapp, “Energy band alignment at TiO<sub>2</sub>/Si interface with various interlayers”, *J. Appl. Phys.*, 103, 043509 (2008).
- [26] M. Özer, D. E. Yıldız, Ş. Altındal, and M. M. Bülbül, “Temperature dependence of characteristic parameters of the Au/SnO<sub>2</sub>/n-Si (MIS) Schottky diodes”, *Solid State Electron.*, 51, 941 (2007).
- [27] M. M. Bülbül, S. Zeyrek, Ş. Altındal, and H. Yüzer, “On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes”, *Microelectron. Eng.*, 83, 577 (2006).
- [28] S. Chakraborty, M. K. Bera, P. K. Bose, and C. K. Maiti, “Analysis of interface states of Al/TiO<sub>2</sub>/Si<sub>0.3</sub>Ge<sub>0.7</sub> MIS structures using conductance technique”, *Semicond. Sci. Tech.*, 21, 335 (2006).
- [29] O. Pakma, N. Serin, T. Serin, and Ş. Altındal, “The influence series resistance and interface states on intersecting behaviour of I-V characteristics of Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures at low temperatures”, *Semicond. Sci. Tech.*, 23, 105014 (2008).
- [30] O. Pakma, N. Serin, T. Serin, and Ş. Altındal, “The double Gaussian distribution of barrier heights in Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (metal-insulator-semiconductor) structures at low temperatures”, *J. Appl. Phys.*, 104, 014501 (2008).
- [31] C. T. Dervos, E. Thirios, J. Novacovich, P. Vassiliou, and P. Skafidas, “Permittivity properties of thermally treated TiO<sub>2</sub>”, *Mater. Lett.*, 58, 1502 (2004).
- [32] C. S. Rao, T. Srikumar, Y. Gandhi, V. Ravikumar, and N. Veeraiah, “Dielectric and spectroscopic investigations of lithium aluminium zirconium silicate glasses mixed with TiO<sub>2</sub>”, *Phi. Mag.*, 91, 958 (2011).

- [33] M. M. Frank, S. Kim, S. L. Brown, J. Bruley, M. Copel, M. Hopstaken, M. Chudzik, and V. Narayanan, "Scaling the MOSFET gate dielectric: From high-k to higher-k", *Microelectron. Eng.*, 86, 1603 (2009).
- [34] U. Diebold, "The surface science of titanium dioxide", *Surf. Sci. Rep.*, 48, 53 (2003).
- [35] L. H. Xu, L. X. Shi, and X. Y. Li, "Effect of TiO<sub>2</sub> buffer layer on the structural and optical properties of ZnO thin films deposited by E-beam evaporation and sol-gel method", *Appl. Surf. Sci.*, 255, 3230 (2008).
- [36] S. Sönmezoğlu, G. Çankaya, and N. Serin, "Optical properties of nano-structured TiO<sub>2</sub> thin films deposited by sol-gel dip coating method", *Int. J. Nat. and Eng. Sci.*, 5, 51 (2011).
- [37] I. N. Kholmanov, E. Barborini, S. Vinati, P. Piseri, A. Podesta, C. Ducati, C. Lenardi, and P. Milani, "The influence of the precursor clusters on the structural and morphological evolution of nanostructured TiO<sub>2</sub> under thermal annealing", *Nanotechnology*, 14, 1168 (2003).
- [38] H. Norde, "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance", *J. Appl. Phys.*, 50, 5052 (1979).
- [39] K. E. Bohlin, "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor", *J. Appl. Phys.*, 60, 1223 (1986).
- [40] S. K. Cheung, and N. W. Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Appl. Phys. Lett.*, 49, 85 (1986).
- [41] P. Chattopadhyay, "A new technique for the determination of barrier height of Schottky barrier diodes", *Solid State Electron.*, 38, 739 (1995).
- [42] M. P. Hernandez, C. F. Alonso, and J. L. Pena, "Barrier height determination in homogeneous nonideal Schottky contacts", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 34, 1157 (2001).
- [43] W. Kern, "Handbook of Semiconductor Cleaning Procedure", Noyes, New York, (1993).
- [44] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", Wiley, New York, (1981).
- [45] K. K. Kwok, "Complete Guide to Semiconductor Devices", McGraw-Hill, New York, (1995).
- [46] K. Sato, and Y. Yasamura, "Study of forward I-V plot for Schottky diodes with series resistance", *J. Appl. Phys.*, 58, 3655 (1985).
- [47] C. R. Crowell, "The Richardson constant for thermionic emission in Schottky barrier diodes", *Solid State Electron.*, 8, 395 (1965).
- [48] L. Stolt, K. Bohlin, P. A. Tove, and H. Norde, "Schottky rectifiers on silicon using high barriers", *Solid State Electron.*, 26, 295 (1982).
- [49] R. M. Cibils, and R.H. Buitrago, "Forward I-V plot for nonideal Schottky diodes with high series resistance", *J. Appl. Phys.*, 58, 1075 (1985).
- [50] J. H. Werner, "Schottky barrier and pn-junction I/V plots – small signal evaluation", *Appl. Phys. A*, 47, 291 (1988).
- [51] T. Kılıçoğlu, M. E. Aydın, and Y. S. Ocağ, "The determination of the interface state density distribution of the Al/methyl red/p-Si Schottky barrier diode by using a capacitance method", *Physica B*, 388, 244 (2007).