

## Sn/p-Si Schottky Kontaklarda Elektriksel Karakteristiklerin Belirlenmesinde Frekans Optimizasyonu

Reşit Özmenteş, Cabir Temirci

Van Yuzuncu Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, 65080, Tuşba-Van, Turkey  
[ozmentes@gmail.com](mailto:ozmentes@gmail.com)

**Özet:** Sn/p-Si Schottky kontakları üretildi. Numunelerin Akım-Voltaj ( $I-V$ ), Kapasitans-Voltaj ( $C-V$ ) ve Kapasitans-frekans ( $C-f$ ) ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında alındı. Numunelerin idealite faktörleri ( $n$ ) ve engel yükseklikleri ( $\Phi_b$ ) doğru beslem akım-voltaj ( $I-V$ ) karakteristiklerinden ve ayrıca sonuçların uyumluluğunu kontrol etmek için Cheung Fonksiyonlarından hesaplandı. Numunelerin seri dirençleri ( $R_s$ ) Cheung Fonksiyonlarından belirlendi. Diyot A'nın 100 kHz-20 MHz frekans aralığında  $C-V$  karakteristiklerinden difüzyon potansiyelini hesaplayarak, difüzyon potansiyeli-frekans değişimi gözlemlendi. İlave olarak, aynı numunenin 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz frekans değerlerinde  $C-V$  karakteristikleri kullanılarak engel yükseklikleri hesaplandı. Ölçümler ve hesaplamalar neticesinde, numunelerin engel yüksekliklerinin 1 MHz'den 5 MHz'e kadar çok az arttığı, ancak 5 MHz'den 20 MHz'e kadar sürekli olarak düştüğü tespit edildi. Elde edilen verilerden, üretilen Schottky diyotların engel yüksekliğini belirlemede  $C-V$  ölçümleri uygun bir frekansta alınır,  $C-V$  ve  $I-V$  verilerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin, birbirleri ile iyi bir uyum içinde olacağı görüldü.

**Anahtar Kelimeler:** Metal-Yarıiletken kontak, Schottky kontak, İdealite faktörü, Engel yüksekliği.

### Frequency Optimization For Determination of Electrical Characteristics In The Sn/p-Si Schottky Contacts

**Abstract:** Sn/p-Si Schottky contacts were produced. Current-voltage ( $I-V$ ), capacitance-voltage ( $C-V$ ) and capacitance-frequency ( $C-f$ ) measurements of the samples were carried out at room temperature and in dark. The values of ideality factor ( $n$ ) and barrier height ( $\Phi_b$ ) of the samples were calculated from the forward bias  $I-V$  characteristics, and also by using Cheungs Functions to check the consistency of the results. Series resistance ( $R_s$ ) of the samples were determined from the Cheungs Functions. Diffusion potential-frequency changing was observed by calculating the diffusion potential of the Diode A from  $C-V$  characteristics in the frequency range of 100 kHz-20 MHz. In addition, barrier heights were calculated using  $C-V$  characteristics at the frequency of 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz and 20 MHz of the same sample. As a result of the measurements and calculations, it was found that the barrier heights of the samples increased slightly from 1 MHz to 5 MHz, but dropped continuously from 5 MHz to 20 MHz. From the obtained data, it can be seen that the barrier height values obtained from the  $C-V$  and  $I-V$  data will be in good agreement with each other if the  $C-V$  measurements in determining the barrier height of the produced Schottky diodes are taken in a suitable frekans.

**Key words:** Metal-Semiconductor contact, Schottky diode, Ideality factor, Barrier height.

#### Giriş

Metal-yarıiletken (MS) Schottky kontaklar, modern elektronik ve optoelektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan doğrultucu kontaklardır. MS kontakların doğrultucu özellikleri ilk defa 1930'da Schottky tarafından tanımlanmıştır (Karataş ve ark. 2007). Elektronik endüstrisinde Schottky kontaklar; foto dedektörler, hızlı anahtarlama (switches) devreleri,

mikrodalga diyotlar, alan etkili transistorler (FETs), güneş pilleri ve gaz sensörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Aydın ve ark. 2008). Schottky kontaklar, elektronik aygıtların temel bir bileşeni olması nedeniyle elektriksel özelliklerinin anlaşılması ve tanımlanması oldukça önemlidir. Bu yüzden, MS yapılar üzerine son yıllarda teorik ve deneysel pek çok çalışma yapılmıştır. Bir Schottky kontağın

konfigürasyon, performas ve güvenliği, yarıiletken ile metal arayüzeyinin kalitesinden önemli derecede etkilenmektedir. Schottky kontağın fabrikasyonu iyi yapılmazsa, metal-yarıiletken (MS) arayüzeyinde yalıtkan bir tabakanın oluşumu kaçınılmazdır. Bu da MS kontağı, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısına dönüştürür (Karataş, 2005). Schottky kontakların Akım-voltaj ( $I-V$ ), kapasitans voltaj ( $C-V$ ) ve kapasitans - frekans ( $C-f$ ) karakteristikleri önemli bilgiler vermektedir (Dökme ve Altındal 2006). Bunun yanısıra Schottky kontakların elektriksel karakteristiklerinin doğasını anlamak için akım akışı ve engel oluşumu olaylarının daha iyi anlaşılması da büyük teknolojik öneme sahiptir (Karataş ve ark. 2003). Öte yandan, Sn/p-Si metal-yarıiletken kontak yapısı üzerine son yıllarda elektriksel karakteristikleri anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda; sıcaklığa bağlı elektriksel karakteristiklerin araştırılması ve arayüzey tabakasındaki elektriksel olayları açıklama çabaları oldukça dikkat çekicidir. Türüt ve ark. (1992), metal-yarıiletken (MS) arayüzey tabakasının idealite faktörü ve engel oluşumu üzerine etkilerini rapor etmişlerdir. Nonideal Al/p-Si MIS Schottky diyotlarında deneysel olarak  $I-V$  ve  $C-V$  karakteristiklerini inceleyerek, arayüzey halleri ve seri direnci de dikkate alarak kapasitans-voltaj ilişkisi için teorik bir yaklaşım ortaya koymuşlardır (Pandey ve Kal 1998). Sn/p-Si Schottky kontaklarda anodik oksidasyon yöntemiyle metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşturulacak kontrollü bir oksidasyon işlemiyle engel yüksekliğinin artırılabilceğini göstermişlerdir. Anodizasyon metodu kullanılarak farklı yüzey muamelesi ile arayüzey tabakalı Sn/p-Si Schottky diyotların engel yüksekliği

araştırılmıştır. Anodik oksidasyon yöntemiyle yüksek engelli ve düşük idealite faktörü değerine sahip, ideal özelliklere çok yakın Sn/p-Si Schottky diyotları üretildi (Temirci ve ark. 2001). Sn/p-Si MS Schottky diyotlarda sıcaklığa bağlı olarak elektriksel karakteristiklerin incelenmesi amacıyla  $I-V$  (akım-voltaj) ve  $C-V$  (kapasitans-voltaj) ölçümleri 80-320K sıcaklık aralığında incelenmiştir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri beklenenin aksine sıcaklığa güçlü bir bağlılık göstermiştir. Engel yüksekliğindeki sıcaklığa olan anormal bağlılık, Sn/Si arayüzeyine yakın derin seviyelerin varlığı ve termiyonik alan emisyonunun yüksek seviyeleri ile akımın baskın hale gelmesi ile açıklanmıştır. Bu da MS arayüzeyine yakın yük depolanmasının sıcaklığa önemli bir bağımlılık göstermesi, serbest hol konsantrasyonunun azalması nedenine bağlanmıştır (Ayyıldız ve ark. 2005). Zn/p-Si ve Sn/p-Si Schottky engel diyotlarının elektriksel parametreleri  $I-V$  ve  $C-V$  karakteristikleri ile yüksek dirençli silikon yapısı ile araştırılmıştır.  $n$ ,  $\phi_b$  ve  $R_s$ ; doğru beslem  $I-V$  ve ters beslem  $C-V$  karakteristiklerinden belirlendi. Bu şekilde Si Schottky diyotlar için arayüzey hal yoğunluğunun enerji dağılımı, doğru beslem  $I-V$  karakteristikleri ile etkin engel yüksekliğinin voltaja bağımlılığı göz önüne alınarak belirlendi. Enerji aralığı göz önüne alınarak, arayüzey hal yoğunluğunun her iki yapı için yakından uyumlu olduğu belirlendi (Karataş, 2005). Akım-voltaj-sıcaklık ( $I-V-T$ ) ve kapasitans-voltaj-sıcaklık ( $C-V-T$ ) ölçümleri ile Sn/p-Si Schottky kontakların elektriksel taşıma karakteristikleri 150-400K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Diyotların elektriksel karakteristik parametrelerinin ( $n$ ,  $\phi_b$ ,  $R_s$ ,  $N_{ss}$ ) sıcaklığa kuvvetlice bağlı olduğu belirlendi.  $I-V$  ölçümlerinden

idealite faktörü ve engel yüksekliği sıcaklığa bağlı arayüzey hal yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) enerji dağılımına bağlılığı incelendi (Karataş ve ark. 2007). Sıcaklığa bağlı  $I-V$  karakteristikleri; Sn/p-Si bariyer diyodunun engel yüksekliğinin Gaussian dağılımı ile Termiyonik Emisyon mekanizması temelinde başarılı bir şekilde açıklanabileceği gösterildi. Sn/p-Si Schottky engel diyotların  $I-V$  karakteristikleri geniş bir sıcaklık aralığında (80-300K) ölçülmüş olup engel homojensizliği Gaussian dağılım fonksiyonu ile birleştirilerek yorumlandı. Yapılan analizler; düşük sıcaklıklarda idealite faktöründe artış, engel yüksekliğinde gözle görülür derecede azalma ve aktivasyon enerjisinin lineer olmadığını ortaya koydu (Aydın ve ark. 2008). Schottky engel diyotların (SBD) elektriksel parametreleri  $\gamma$ -ışınları aydınlatması altında oda sıcaklığında incelendi.  $I-V$  ve  $C-V$  karakteristik ölçümleri kullanılarak bu aygıtların düşük enerjili  $\gamma$  ışınlarını saptamak amacıyla radyasyon sensörü olarak kullanılabilirliği görüldü (Güllü ve ark. 2008). Sn/p-Si MS Schottky diyotların  $I-V$  ve  $C-V$  ölçümleri oda sıcaklığında alınarak, arayüzey hal enerji dağılımı ve elektriksel karakteristiklerin seri direnç etkisi araştırıldı.  $C-V$  ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerinin  $I-V$  ölçümlerinden elde edilen değerinden büyük olması, Sn/p-Si nanoyapısı arayüzeyinde mevcut olan engel homojensizliği ve uzamsal dağılımı ile açıklandı. Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak parametreler hesaplandı ve karşılaştırıldı. Ayrıca arayüzey hal yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) enerji dağılımının fonksiyonu olarak ( $E_{ss}-E_v$ ) doğru beslem  $I-V$  ölçümlerinden elde edildi. Seri direnç göz önüne alınmadan elde edilen arayüzey hal yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) üstel olarak artması, p-Si yüzeyindeki pasivasyona ve MS arayüzeyindeki ince yalıtkan tabakanın

varlığına atfedildi (Karataş, 2010). 50kHz-1MHz frekans aralığında kapasitans ve kondüktans ölçümleri alınarak frekans ve voltaja bağlı olarak elektriksel karakteristikler belirlendi. Kapasitans-frekans ( $C-f$ ) karakteristiklerinden düşük frekanslarda kapasitedeki artışın ara yüzey hallerinden kaynaklandığı gösterilmiştir (Karataş ve Türüt, 2010). Sn/p-Si MS yapılarında sıcaklığa bağlı elektriksel ve dielektrik özelliklerin incelenmesi amacıyla 80-400K sıcaklık aralığında  $C-V$  (kapasitans-voltaj) ve  $G/\omega-V$  (kondüktans-voltaj) karakteristikleri kullanılmıştır.  $C-V$  karakteristikleri üzerine arayüzey hal yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) etkisi geniş sıcaklık aralığında araştırılmıştır. Sıcaklık artışı dielektrik ve elektriksel parametrelerin değerlerinde artışa neden olduğu saptanmıştır (Karataş ve Kara 2011). Sn/p-Si Schottky tipi güneş pillerinde fotovoltaj ve diyot karakteristik parametreler arasındaki yakın ilişki, anodik oksidasyon ve kimyasal aşındırma (etching) yöntemleri kullanılarak karanlık ve aydınlık ortamda  $I-V$  karakteristiklerinden elde edildi. 30 s süre etching işleminin hem diyot (idealite faktörü, seri direnç) ve hem de fotovoltaj (fill faktörü, dönüşüm verimi) özellikleri pozitif etkilediği, belirtilen süreden daha fazla etching işleminin uygulanmasının ise, numunelerin karakteristik parametrelerini olumsuz etkilediği gözlemlendi (Ozkartal ve Temirci 2016). Sn/p-Si MS Schottky kontak yapılarında elektriksel parametrelerin frekansa bağlı olarak incelenmesi önemli bir konu olmakla birlikte, bu konuda yapılan çalışmalar nispeten sınırlı kalmıştır (Karataş ve Türüt 2010).

Bu çalışmadaki amacımız, Sn/p-Si metal-yarıiletken (Schottky) kontakların elektriksel  $I-V$ ,  $C-V$  ve  $C-f$  karakteristiklerini geniş bir frekans

aralığında incelemek ve ilave olarak bir metal-yarıiletken Schottky kontağın karakteristik parametrelerinden olan engel yüksekliği değerinin  $I-V$  ve  $C-V$  ölçümlerinden hesaplandığında meydana gelen farklılığın, uygun bir frekans değerindeki  $C-V$  verilerinin engel yüksekliği hesaplamasında kullanılarak ortadan kaldırılabileceğini ortaya koymaktır.

### Materyal ve Yöntem

MS Schottky kontak üretimi, belli metaller kullanılarak silikon taban üzerinde ince bir film tabakası oluşturulması işlemidir. Fiziksel anlamda iyi bir Schottky kontak için, uygun metalin ince bir film katmanı oluşturacak şekilde, arayüzey tabakasız ve metal atomlarının yarıiletken içine difüze olmayacak şekilde yarıiletken yüzeyine tutunmalıdır. Fabrikasyon sürecinde çevre şartları, kimyasal temizleme işlemi ve üretim aşamasında oluşan bazı istenmeyen kirlilikler kontağın kalitesini etkilemektedir.

Bu çalışmada; Sn/p-Si Schottky diyotları üretmek amacıyla (100) doğrultusunda büyütülmüş, öz direnci 5-10  $\Omega$ -cm olan bor katkılı p-tipi silisyum kristalleri kullanıldı. Diyot yapımında iyi netice alınabilmesi için kullanılacak numunenin yüzeyinin organik ve mekanik kirlilerden arınmış olması gerekir. İyi temizlenmiş Si yüzeyinde bile yaklaşık 5  $\text{\AA}$  kalınlıkta bir oksit tabakasının oluşması kaçınılmazdır (Crowell ve Sze,1966; Rhoderick ve Williams,1988). Kontakları yapmadan önce p-Si kristalleri öncelikle metanol, aseton ve de-iyonize su ile ultrasonik olarak yıkandı. Daha sonra standart temizleme adımları RCA1 ( $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3;6:1:1$ ) ve ardından RCA2 ( $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl};6:1:1$ )’de 50-60  $^\circ\text{C}$  de 10 dakika kaynatma işlemleri uygulandı. Oksit tabakasını kaldırmak

için seyreltik  $\text{HF}(\text{H}_2\text{O}:\text{HF};10:1)$  çözeltisi ile 30 saniye yıkama işlemi gerçekleştirildi ve son olarak de-iyonize suyla yıkanarak azot gazı ile kurutuldu.

Diyotların laboratuvar ortamında fabrikasyon işlemi için “Edwards Auto 306” vakum kaplama cihazı kullanıldı. p-Si kristalleri temizlendikten sonra vakum kaplama cihazına alınarak omik kontak için arka yüzeylerine  $10^{-5}$  Torr basınç altında %99.999 saflıkta Aleminyum metali buharlaştırıldı. Daha sonra numune 450  $^\circ\text{C}$ ’de 3 dakika tavlansınarak omik kontak yapıldı. Daha sonra vakum ortamına alınarak maske yardımıyla %99.99 saflıktaki kalay metali buharlaştırıldı. Böylece numunelerin doğrultucu kontakları yapıldı.

### Bulgular

Sn/p-Si Schottky diyot numunelerinden dört tane alınarak Diyot A, Diyot B, Diyot C ve Diyot D olarak adlandırıldı. Numunelerin Akım-Voltaj ( $I-V$ ) ölçümleri için “Keithley 6487 Picoammeter/Voltage Source” Cihazı, Kapasitans-Voltaj ( $C-V$ ) ve Kapasitans-frekans ( $C-f$ ) ölçümleri için ise “Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer” cihazı kullanıldı. Bütün ölçümler oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı.

### Akım-voltaj ölçümleri

Numunelerin diyot karakteristiklerini belirlemek amacıyla 0.8 Volt ile 0.8 Volt aralığında oda sıcaklığında ve karanlıkta doğru ve ters beslem akım-voltaj ( $I-V$ ) ölçümleri alındı ve grafikleri çizildi (Şekil-1). Bu grafikten numunelerin doğrultucu özellik sergilediği görülmektedir. Diğer bir ifadeyle nümunelerin akım-voltaj grafikleri Termiyonik Emisyon teorisine uyum göstermektedir. Dolayısıyla üretilen nümunelerin karakteristik parametrelerini bulmak için termiyonik emisyon teorisi kullanmak uygun

olacaktır. Söz konusu teoriye göre, doğrultucu aygıtların doğru beslem akım-voltaj grafiği eksponansiyel olmalıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

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

burada,

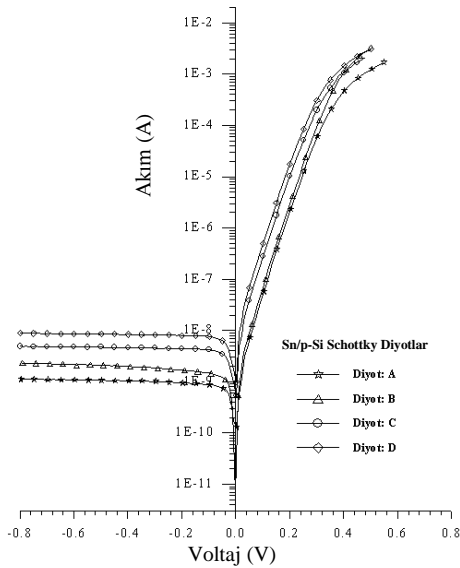
$$I_0 = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2)$$

doyma akımı olarak adlandırılır.  $q$  elektronik yük,  $V$  uygulanan voltaj,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı,  $A$  diyot alanı.  $\phi_{b0}$  sıfır beslemde engel yüksekliği ve  $R^*$  etkin Richardson sabitidir. ( $p$ -Si için  $R^*=32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ )

$qV > 3kT$  için (1) eşitliğinde köşeli parantez içindeki 1 ihmal edilebilir ve böylece temel akım denklemi aşağıdaki şekilde

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (3)$$

Burada,  $n$  idealite faktörüdür ve diyotun ideallığının bir ölçüsüdür.



Şekil 1. Sn/p-Si Schottky diyotların doğru ve ters beslem  $\ln I - V$  grafikleri.

Diyotların idealite faktörlerini hesaplamak için (3) Eşitliği kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilebilir.

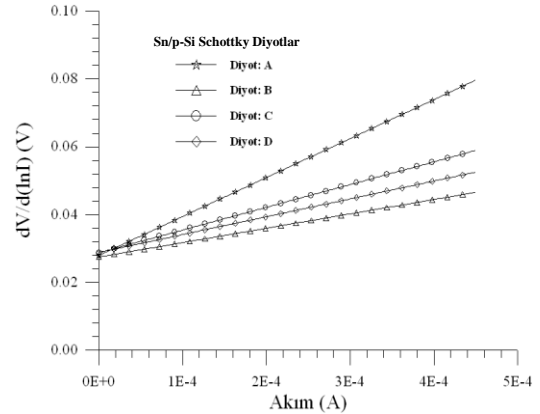
$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4)$$

Bu ifadede  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  teriminin değeri,

$\ln I - V$  grafiklerinin doğru beslem tarafındaki lineer kısımlarının eğiminden elde edildi. Engel yüksekliği için (2) Eşitliği kullanılarak,

$$q\phi_b = kT \ln\left(\frac{AR^*T^2}{I_0}\right) \quad (5)$$

denklemi elde edilir. Bu ifadede doyma akım yoğunluğu ( $I_0$ ) değerleri  $\ln I - V$  grafiğinin doğru beslem tarafındaki lineer kısmının düşey eksenini (akım eksenini) kestiği noktadan tespit edildi. Diyotların idealite faktörlerini bulmak için (4) eşitliği kullanıldı.



Şekil 2. Sn/p-Si Schottky diyotların  $dV / d(\ln I) - I$  grafikleri

Temel akım denkleminde seri direnç etkisini de göz önüne alarak,  $V$  yerine  $V - IR_s$  yazıp gerekli işlemleri yaparak elde edilen (6) ve (7) Eşitlikleri (Cheung fonksiyonları) yardımıyla seri direnç ( $R_s$ ), idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri yeniden elde edildi.

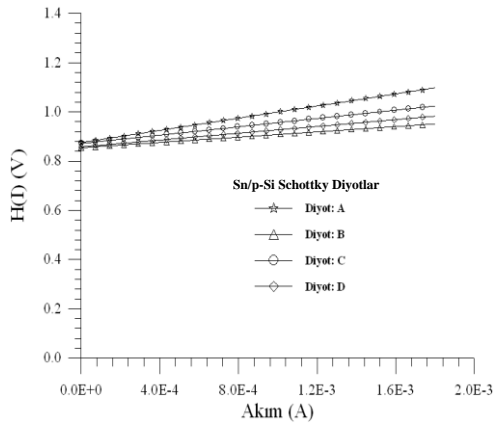
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + I.R_s \quad (6)$$

$$H(I) = n\phi_{bn} + I.R_s \quad (7)$$

Numunelerin Cheung fonksiyonlarına ait  $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$  grafikleri Şekil 2'de görülmektedir.

$dV/d(\ln I)$ 'nın  $I$ 'ya göre grafiğinde doğrunun eğimi seri direnci ( $R_s$ ), düşey eksenini kestiği nokta ise  $nkT$  değerlerini verir. Bu yolla diyotların idealite faktörü değerleri 1.06 ile 1.11 arasında, seri dirençleri ise 42.40  $\Omega$  ile 114.90  $\Omega$  arasında elde edildi (Çizelge 1).

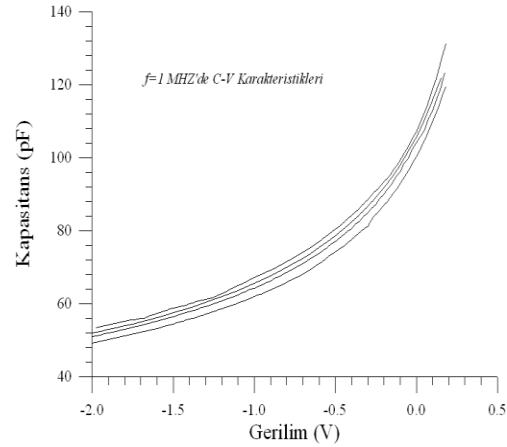
Kontaklara ait  $H(I) - I$  grafiklerinden de engel yüksekliği ( $\phi_b$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) değerleri bulundu (Şekil 3). Yine temel akım denkleminde elde edilen (7) numaralı Cheung fonksiyonu kullanılarak engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı.  $H(I) - I$  grafiğinde doğrunun  $I=0$  iken düşey eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği değeri ( $n\phi_{bn}$ ) elde edilir. Burada  $n$  değeri, (6) ifadesinden elde edilen değerdir. Bu grafikte doğrunun eğimi yine seri direnç değerini vermektedir. Bu yolla engel yüksekliği değerleri 0.77-0.81 eV arasında, seri direnç değerleri ise 53.80-123.40  $\Omega$  aralığında tespit edildi (Bkz. Çizelge 1).



Şekil 3. Sn/p-Si Schottky diyotların  $H(I) - I$  grafikleri.

### Kapasitans-voltaj ölçümleri

Numunelerin  $C-V$  ölçümleri -2 V ile 0.2 V aralığında  $f=5$  MHz ve  $f=1$  MHz'de ayrı ayrı alınarak, ters beslem  $C-V$  grafikleri çizildi (Şekil 4 ve 5).

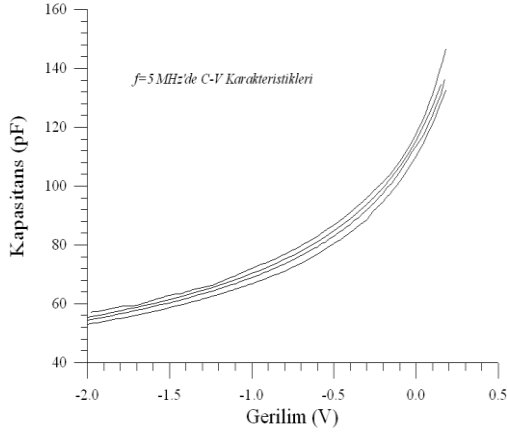


Şekil 4. Sn/p-Si Schottky diyotların  $f=1$  MHz'de ters beslem  $C-V$  grafikleri.  $C-V$  ölçümlerinden engel yükseklikleri (8) ifadesine göre,

$$\phi_{bp} = c_2 V_d + V_p \quad (8)$$

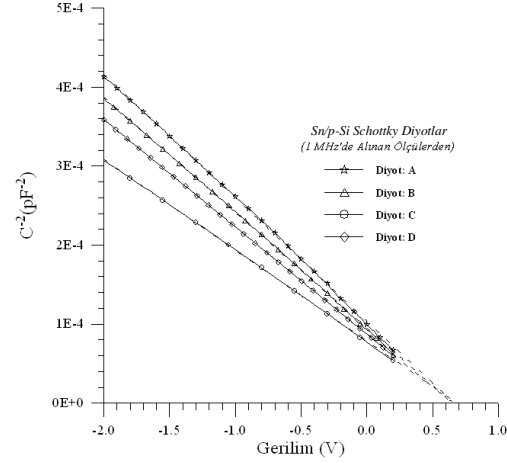
belirlenir. Buradaki  $c_2=1/n$ , yani idealite faktörünün tersine eşittir. 1 MHz ve 5 MHz frekans değerlerinde numunelerin  $C^{-2} - V$  grafikleri çizildi (Şekil 5 ve 6). Diyotların  $C^{-2} - V$  grafikleri Şekil 5 ve 6'dan görüldüğü üzere bir doğru biçimindedir. Doğrunun  $V$  eksenini (yatay eksenini) kestiği noktadan difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) belirlenir.

$C-V$  ölçümlerinden engel yüksekliği  $f=1$  MHz'de 0.79 ile 0.81 arasında,  $f=5$  MHz'de 0.80 ile 0.83 arasında bulundu.



Şekil 5. Sn/p-Si Schottky diyotların  $f=5\text{MHz}$ 'de ters beslem  $C-V$  grafikleri.

Diyotların iki ayrı frekans değeri için  $C-V$  ölçümlerine ait grafikleri Şekil 4 ve Şekil 5' de verilmiştir. Söz konusu diyotların  $C-V$  karakteristiklerindeki datalar kullanılarak aynı frekans değerlerine karşılık gelen  $C^2-V$  grafikleri ise Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere, Schottky diyotların difüzyon potansiyelleri ve engel yükseklikleri frekansın 1 MHz'den 5 MHz'e değişmesiyle yaklaşık olarak 0.01 eV kadar artmıştır. Yani frekansın 1 MHz'den 5 MHz'e çıkmasıyla engel yüksekliği de az bir miktar yükselmiştir (Çizelge 1). Ancak Schottky diyotlarda engel yüksekliğinin frekansa bağlı olarak geniş bir bölgede nasıl değiştiğini görmek için, engel yüksekliği-frekans ( $\Phi_b-f$ ) grafiği veya difüzyon potansiyeli-frekans ( $V_d-f$ ) grafiği daha iyi bir fikir verebilir. Bu grafik ( $V_d-f$ ) Şekil 9'da verilmiştir.

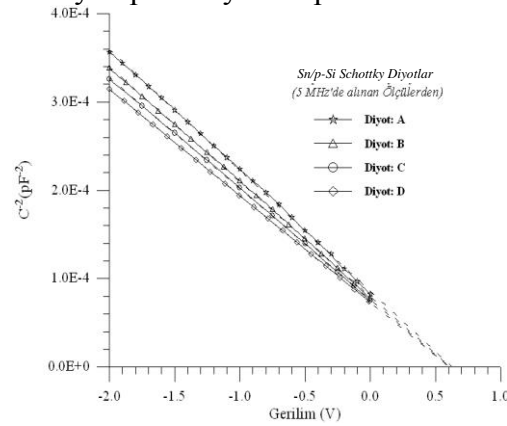


Şekil 6. Sn/p-Si Schottky diyotların 1 MHz'de ters beslem  $C^2-V$  grafikleri.

Şekil 6 ve Şekil 7'de  $C^2-V$  grafikleri görülmektedir. Bir Schottky diyoda ait  $C^2$  ile  $V$  arasındaki ilişki (Rhoderick 1978),

$$C^{-2} = \frac{2(V_{do}+V)}{q\epsilon_s A^2 N_A} \quad (9)$$

ile verilir. Bu son ifadeye göre  $C^2-V$  grafiğinde,  $C^2=0$  iken doğrunun yatay eksenini (voltaj eksenini) kestiği noktadan difüzyon potansiyeli tespit edilir.



Şekil 7. Sn/p-Si Schottky diyotların 5 MHz'de ters beslem  $C^2-V$  grafikleri.

Numunelerin 5 MHz'de alınan  $C-V$  ölçümlerinden elde edilen  $C^2-V$  grafiğinde (Şekil 7), doğruların yatay eksenini kestiği nokta değerleri, frekansın 1 MHz değeri için alınan  $C-V$  ölçümlerinden elde edilen  $C^2-V$  grafiğindeki (Şekil 6) doğruların yatay eksenini kestiği nokta değerlerinden daha

büyüktür. Bu da bize  $f=5$  MHz frekans değeri için elde edilen difüzyon potansiyel değerlerinin,  $f=1$  MHz frekans değeri için elde edilen difüzyon

potansiyeli değerlerinden daha büyük olduğunu gösterir.

Çizelge 1. Diyotların karakteristik parametrelerinin deneysel değerleri.

n (idealite faktörü)			Engel Yüksekliği(eV)				Seri direnç( $\Omega$ )	
Numune	I-V	Cheung	I-V	Cheung	C-V (1 MHz)	C-V (5 MHz)	$[dV/d(\ln I)]-I$	$H(I)-I$
A	1.07	1.08	0.79	0.81	0.80	0.81	114.90	123.40
B	1.06	1.06	0.78	0.80	0.81	0.83	42.40	53.80
C	1.11	1.11	0.75	0.78	0.79	0.80	52.65	84.60
D	1.12	1.11	0.76	0.77	0.79	0.81	52.65	69.10

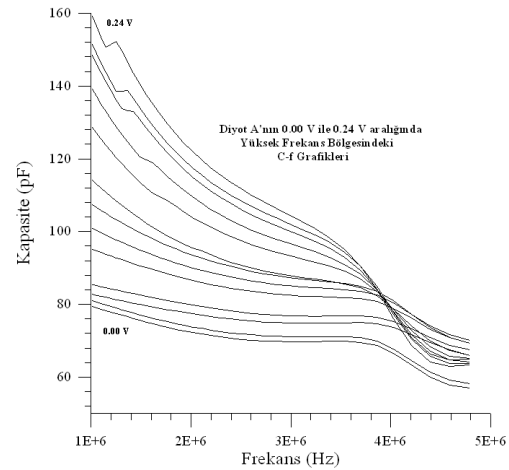
Eşitlik (8) dikkate alındığında difüzyon potansiyeli değerleri ile engel yüksekliği değerlerinin doğru orantılı olduğu anlaşılır. Şekil 6 ve Şekil 7'deki difüzyon potansiyelleri değerleri kullanılarak, eşitlik (7) yardımıyla engel yükseklikleri hesaplanmıştır. C-V karakteristikleri kullanılarak hesaplanan engel yüksekliği değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

A, B, C, D numuneleri için  $f=1$  MHz frekans değerinde elde edilen engel yüksekliği değerleri sırasıyla; 0.80 eV, 0.81 eV, 0.79 eV, 0.79 eV ve  $f=5$  MHz için elde edilen engel yüksekliği değerleri sırasıyla; 0.81 eV, 0.83 eV, 0.80 eV ve 0.81 eV tur. A numunesine ait C-V karakteristikleri kullanılarak  $f=1$  MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz frekans değerleri için elde edilen engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0.80 eV, 0.81 eV, 0.72 eV, 0.71 eV ve 0.66 eV olarak elde edilmiştir.

### Kapasitans-frekans ölçümleri

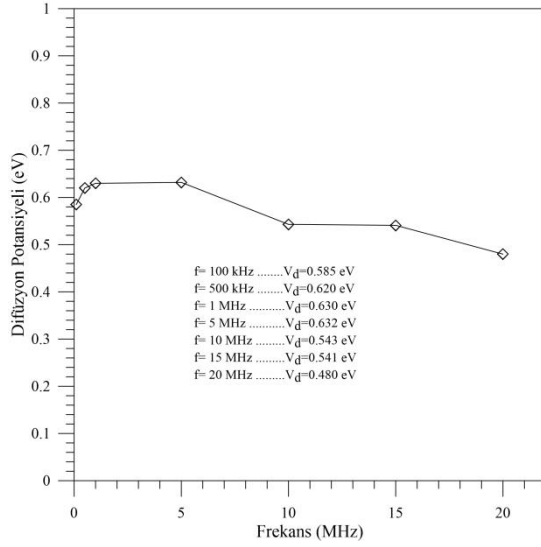
Diyot A için 100Hz ile 5MHz arasında 0V değerinden 0.24 V aralığında kapasite-frekans (C-f) ölçümleri alındı. Alınan bu ölçümler kullanılarak, 1 MHz ile 5 MHz aralığında doğru beslem C-f

grafikleri çizildi (Şekil 8). Bu grafiklerden de açıkça görüldüğü gibi numune kapasitansı, yüksek frekans bölgesine doğru azalmakta ve frekansın bir fonksiyonu olarak değişmektedir.



Şekil 8. Diyot A(Sn/p-Si)'nin 0.00 V ile 0.24 V aralığında yüksek frekans bölgesindeki C-f grafikleri.





Şekil 9. Diyot A (Sn/p-Si)'nin frekansa bağlı olarak difüzyon potansiyelindeki değişimi

A numunesinin frekansa bağlı  $C-V$  ölçümlerinden elde edilen  $C^2-V$  grafikleri kullanılarak elde edilen difüzyon potansiyeli değerleri frekansın bir fonksiyonu olarak Şekil 9'da verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, A numunesine ait difüzyon potansiyeli değerleri, frekansın 100 kHz'den 1 MHz'e kadar değerlerine karşılık, frekansın artmasıyla hızlı bir biçimde artmaktadır, frekansın 1MHz'den 5 MHz'e kadar değişimine karşılık ise difüzyon potansiyeli çok daha yavaş olarak artma göstermiştir. Frekansın 5 MHz'den 20 MHz'e kadar değişimine karşılık ise difüzyon potansiyeli sürekli bir düşme göstermiştir.

### Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Sn/p-Si Schottky diyotların elektriksel karakteristikleri üzerinde frekans etkisini araştırdık. Bunun için,  $I-V$ ,  $C-V$  ve  $C-f$  ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç ve difüzyon potansiyeli parametreleri her bir diyot için hesaplanarak elde edildi.  $I-V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği ve idealite faktörü

değerlerinin tutarlılığını kontrol etmek amacıyla aynı parametrelerin tespitinde Cheung Fonksiyonları kullanıldı. Numunelerin  $I-V$  ile  $C-V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri arasında bir fark olduğu görüldü. A numunesinin 1 MHz ve 5 MHz gibi iki ayrı frekans değerinde  $C-V$  ölçümleri ile elde edilen verilerden çizilen  $C^2-V$  grafiklerinden elde edilen difüzyon potansiyelleri kullanılarak hesaplanan engel yüksekliği değerlerine dikkat edilirse, 5 MHz'de elde edilen engel yüksekliği değerinin 1 MHz'de elde edilen engel yüksekliği değerinden az da olsa büyük olduğu anlaşılmaktadır. Ancak Schottky diyotta engel yüksekliğinin frekans bağımlılığını daha detaylı olarak ortaya çıkarmak için daha geniş bir frekans yelpazesinde incelenmesi gerekir. Bunun için biz 100 kHz ile 20 MHz frekans aralığında A numunesine ait  $C-V$  ölçümleri alarak,  $C^2-V$  grafiklerini elde ettik ve bunları kullanarak belirlediğimiz difüzyon potansiyellerinin frekansın bir fonksiyonu olarak grafiğini çizdik (Şekil 9). Bu son grafikten görüleceği üzere difüzyon potansiyeli, frekansın 100 kHz değerinden 1 MHz değerine kadar hızlı bir artış, 1 MHz değerinden 5 MHz değerine kadar yavaş bir artış ve 5 MHz değerinden 20 MHz değerine kadar ise düşme göstermektedir.

Engel yüksekliği değerinin  $I-V$  ve  $C-V$  ölçümlerinden hesaplandığında meydana gelen farklılığın, uygun bir frekans değerindeki  $C-V$  verilerinin kullanılmasıyla giderilebileceği gösterilmiş oldu.

### Kaynaklar

Aydın, M. E., Güllü, Ö. ve Yıldırım, N. (2008). Temperature dependence of current-voltage characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts, *Physica B*, Vol. 403, pp. 131-138.

- Ayyildiz, E., Cetin, H. ve Horvath, Zs. J. (2005). Temperature dependent electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky diodes, *Applied Surface Science*, Vol. 252, pp. 1153–1158.
- Barret, C., Vapaille A., 1979. Interface States in a Cleaved M-S Junction, *J. Appl. phys.*, 50(6): 4217-4222.
- Braun, K.F., 1874. *Ann. Phys. Chem.*, 153: 556.
- Card, H.C., Rhoderick, E. H., 1973. The Effect of an Interfacial Layer on Minority Carrier Injection in Forward Biased Silicon Schottky Diodes, *Solid-State Electron.*, 16: 365-373.
- Chattopadhyay, P., Das, K., 1991. Control of Barrier Height of MIS Tunnel Diodes Using Deep Level Impurities, *Solid-State Electron.*, 34(4): 367-371.
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1993. Frequency dependence of Forward Capacitance-Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes, *Solid-State Electron.*, 36(4): 605-610.
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1992. Origin of The Anomalous Peak in The Forward C-V Plot of a Schottky Barrier diode, *Solid-State Electron.*, 35(6): 875-878.
- Cheung, S. K., Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky Diode parameters from Forward Current-Voltage Characteristics, *Appl. Phys. Lett.*, 49: 85-87.
- Cowley, A.M., Sze S.M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems, *J. Appl. Phys.* 36 (10): 3212-3220.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1965. Electron-optical-phonon Scattering in the emitter and collector barriers of Semiconductor-Metal-Semiconductor Structures, *Solid State Electronics*, 8(12): 979-990.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1966. Current Transport in Metal-Semiconductors Barriers, *Solid State Electronics*, 9: 1035-1048.
- Fonash, S. J., 1975. Role of the Interfacial Layer in Metal-Semiconductor Solar Cells, *J. Appl. Phys.*, 46(3) :1286-1289.
- Dökme, İ. And Altındal, Ş. (2006). On the intersecting behaviour of experimental forward bias current-voltage (I-V) characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes at low temperatures, *Semicond. Sci. Technol.* Vol. 21, pp. 1053–1058.
- Güllü, Ö. Demir, F., Cimilli, F. E., ve Biber, M. (2008).  $\gamma$ -Irradiation-induced changes at the electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts, *Vacuum*, Vol. 82 pp. 789–793.
- Hickmott, T. W., 1980. Dipole Layers at the Metal-SiO<sub>2</sub> Interface, *J. Appl. Phys.*, 51(9): 4269-4281.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., Türüt, A., ve Özmen, A. (2003). Temperature dependence of characteristic parameters of the H-terminated Sn/p-Si (100) Schottky contacts, *Applied Surface Science*, Vol. 217, pp. 250–260.
- Karataş, Ş. (2005). Comparison of electrical parameters of Zn/p-Si and Sn/p-Si Schottky barrier diodes, *Solid State Communications*, Vol. 135 pp. 500–504.
- Karataş, Ş. (2010). Effect of series resistance on the electrical characteristics and interface state energy distributions of Sn/p-Si (MS) Schottky diodes, *Microelectronic Engineering*, Vol. 87, pp. 1935–1940.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., Türüt, A., ve Çakar, M. (2011). Electrical transport characteristics of Sn/p-Si schottky contacts revealed from I-

- V-T and C-V-T measurements, *Physica B*, Vol. 392, pp. 43-50.
- Karataş, Ş. ve Türüt, A., (2010). The frequency-dependent electrical characteristics of interfaces in the Sn/p-Si metal semiconductor structures, *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, pp. 351-355.
- Karataş, Ş. ve Kara, Z., (2011). Temperature dependent electrical and dielectric properties of Sn/p-Si metal-semiconductor (MS) structures, *Microelectronics Reliability*, Vol. 51, pp. 2205-2209.
- Meirhaeghe, R. L., Cardon, F., Gomes, W. P., 1980. Effects of Thin Oxide Layers on the Characteristics of GaAs MIS Solar Cells, *Phys. Status Solidi (a)*, 59(2): 477-484.
- Morgan, D. V., Frey, J., 1979. Schottky Barrier Height: A Design Parameter for Device Applications, *Solid-State Electronics*, 22(10): 865-873.
- Pandey, S., Kal, S., 1998. A simple approach to the capacitance technique for determination of interface state density of a metalsemiconductor contact, *Solid-State Electronics*, 42(6), 943-949.
- Polyakov, A.Y., Milnes, A.G., Smirnov, N.B., Kozhukhova, E.A., Druzhinina, L.V., Govorkov, A.V., Dolginov, L.M., Tunitskaya, I.V., 1994. Properties of MIS structures prepared on InGaAsSb quaternary solutions by anodic oxidation. *Solid-State Electronics*, 37 (10), 1691-1694.
- Rhoderick, E.H., 1970. The Physics of the Schottky Barriers, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 3: 1153-1167.
- Rhoderick, E. H., 1978. *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford University Press, London.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H., 1988. *Metal-Semiconductors Contacts*. Clarendon Pres, Oxford, USA.
- Rideout, V.L., 1978. A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers, *Thin Solid Films*, 48(3): 261-291.
- Schottky, W., Spenke, E., 1939. *Wiss. Veröff. Siemens-Werke*, 18: 225.
- Schottky, W., 1938. Raumladungsschwächung beim schrotoeffekt und funkeleffekt, *Physica*, 4: 175.
- Singh, A., 1985. Characterization of Interface State at Ni/n-CdF<sub>2</sub> Schottky Barrier Diodes and the Effect of CdF<sub>2</sub> Surface Preparation, *Solid-State Electron.* 28(3): 223-232.
- Sze, S.M., Crowell, C.R., Kahng, D., 1964. Photoelectric Determination of the Image Force Dielectric Constant for Hot electrons in Schottky Barriers, *J. Appl. Phys.*, 35(8): 2534-2536.
- Sze, S.M., 1981. *Physics of Semiconductors Devices*. John-Wiley and Sons, New York.
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt, A., 2001. High-Barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodizasyon process., *Appl. Surf. Sci.*, 172: 1-7.
- Temirci, C. ve Ozkartal, A., (2016). Relationship between photovoltaic and diode characteristic parameters in the Sn/p-Si Schottky type photovoltaics, *Solar Energy*, Vol. 132, pp. 96-102.
- Torrey, H.C., Whitmer, C.A., 1948., *Crystal Rectifiers*. McGraw Hill, New York.
- Türüt A., Batı, B., Sağlam, M., Yalçın, N., 1996. The Bias-Dependence Change of Barrier Height of Schottky diodes under Forward Bias by Including the Series

- Resistance Effect, Phys. Scr., 53(1): 118-122.
- 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 Electron., 35(6): 835-841.
- Türüt, A. and Sağlam, M., 1992. Determination of the Density of Si-metal Interface State and Excess Capacitance Caused by Them Phys. B., 179(4): 285-294.
- Werner, J., Levi, A.F.J., Tung R.T., 1988. Anzlovar M. and Pinto M., 1988. Origin of Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts, Phys. Review Lett., 60: 53-56.
- Werner, J.H., Ploog, K., Queisser, H. J., 1992. Interface-State Measurements at Schottky Contact a New Admittance Technique, Phys. Review. Lett., 57(8): 1080-1083.
- Williams, R. H., 1985. Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces. (Edited by Wilmsen, C. W.), 57, Plenum Pres, New York and London.
- Wu, X., Yang, E. S., 1989. Interface Capacitance in Metal-Semiconductor Junctions, J. Appl. Phys., 65(9): 3560-3567.
- Ziel, A., 1968. Solid State Physical Electronics. Prentice-Hall, Inc., New Jersey