

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

85073

METAL-GÖZENEKLİ SİLİSYUM EKLEMLERİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Suna ÖZTEMEL

F.B.E.Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Fatma Tepehan
Tepehan

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tayyar CAFEROV

Prof. Dr. T. Caferov
Caferov

Prof. Dr. E. Gıncı
E. Gıncı

85073

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2 Gözenekli Silisyum	2
1.2.1 Gözenekli Silisyumun Elde Edilmesi	3
1.2.2 Gözenekli Silisyumun Yapısı	4
1.2.3 Gözenekli Silisyumun Özellikleri	6
1.3 Metal – Yarıiletken Eklemler	8
1.4 Metal – Yarıiletken Eklemlerin Kapasitansı	17
1.5 Heteroeklemler	19
1.6 Metal – Gözenekli Silisyum Yapıların Özellikleri	23
1.7 Nemin Metal – Gözenekli Silisyum Eklemlerin Özelliklerine Etkisi.....	24
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
2.1 Gözenekli Silisyumun ve Metal – Gözenekli Silisyum Yapıların Elde Edilmesi	28
2.2 Özdirenç ve Yük Taşıyıcılarının Konsantrasyonlarının Ölçümleri	29
2.2.1 Van der Pauw Yöntemi ile Özdirenç Ölçümleri	29
2.2.2 Yük Taşıyıcılarının Konsantrasyonunun Ölçümleri	31
2.3 Fotoiletkenliğin Spektral Dağılım Ölçümleri	37
2.4 Akım – Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümleri	38
2.5 Kapasitans – Gerilim Ölçümleri	39
2.6 Akım – Gerilim Karakteristiklerinin Nem Ortamında Ölçümleri	41
3. BULGULAR ve TARTIŞMA	43
3.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Elektriksel Özellikleri	43
3.2 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Akım – Gerilim Karakteristikleri	43
3.3 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Fotoduyarlılığının Spektral Dağılımı	46
3.4 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Akım–Gerilim Karakteristiklerine Nemin Etkisi.....	47
3.5 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Gerilim – Nem Karakteristikleri	52
3.6 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Kapasitansı	53
3.7 Cu – Gözenekli Silisyum Yapıların Akım – Gerilim Karakteristikleri.....	55

3.8	Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Neme Duyarlılık Modeli	57
3.9	Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Enerji Bant Diyagramı	58
4.	SONUÇLAR	60
	KAYNAKLAR	62
	ÖZGEÇMİŞ	64



ŞEKİL LİSTE

Sayfa

Şekil 1.1	p^+ - tipi silisyum katmanından oluşan gözenekli silisyumun elektron mikroskopu ile çekilmiş görüntüsü	2
Şekil 1.2	(a)-(c) silindirik boşlukları, (d)-(f) dikdörtgen boşlukları içeren anodize edilmiş (100) silisyum katmanının idealleştirilmiş görüntüsü	5
Şekil 1.3	Metal-n tipi yarıiletken kontakların enerji diyagramları a)Doğrulma kontak ($\Phi_m > \Phi_s$) b)Doğrultma olmayan kontak ($\Phi_m < \Phi_s$)	8
Şekil 1.4	Metal-p tipi kontakların enerji diyagramları a)Doğrultma olmayan kontak ($\Phi_m > \Phi_s$) a)Doğrultma kontak ($\Phi_m < \Phi_s$).....	9
Şekil 1.5	İnversiyon tabakalı metal-n tipi yarıiletken kantağın enerji bant diyagramı	12
Şekil 1.6	Metal-n tipi yarıiletken doğrultma kantağın enerji diyagramı A) Denge durumunda b)Ters yönde gerilim uygulandığında (“+” n tipi yarıiletken) c)Doğru yönde gerilim uygulandığında (“-“ n tipi yarıiletken)	13
Şekil 1.7	Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiği 1)Diyot teorisine göre 2)Difüzyon teorisine göre	15
Şekil 1.8	a)İzole edilmiş iki yarıiletkenin enerji bant diyagramı, b)Dengede İdeal n-p heteroeklemin enerji bant diyagramı.....	20
Şekil 1.9	a)İdeal keskin n-n heteroeklemin enerji bant diyagramı, b) ve c) İdeal p-n ve p-p heteroeklemin enerji bant diyagramı	21
Şekil 1.10	a)Arayüz durumlu Ge-Si n-n heteroeklemin diyagramı b)Büyütülmüş arayüz bölgesi.....	22
Şekil 1.11	Metal-Gözenekli silisyum-Silisyum yapının ters akımının nispi neme (N.N.) bağımlılığı	26
Şekil 1.12	Farklı nispi nemlerde (N.N.) metal-gözenekli silisyum-silisyum yapının akım-gerilim karakteristikleri	26
Şekil 2.1	Gözenekli silisyumun hazırlanması için kullanılan devre düzeneği	28
Şekil 2.2	Van der Pauw yöntemiyle öz direnç ölçümünde kontakların yerleştirilmesi	29
Şekil 2.3	$f(R_1/R_2)$ düzeltme fonksiyonunun grafiği	30
Şekil 2.4	Van der Pauw yöntemi ile öz direnç ölçümlerinde kullanılan örneklerin geometrik formları	31
Şekil 2.5	Magnetik alandaki (B), pozitif yüklü parçacığın hızının (v) ve Lorentz kuvvetinin (F_L) yönlerinin gösterimi	32
Şekil 2.6	a) p tipi ve b) n tipi yarıiletkende Hall olayı	32
Şekil 2.7	Örneğin fotoduyarlılık ölçümleri için kullanılan devrenin şeması	37
Şekil 2.8	Metal-silisyum yapıların akım-gerilim karakteristiklerinin ölçümleri için örneğe yapılan kontaklar	38
Şekil 2.9	Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi	39
Şekil 2.10	Schottky diyotun eşdeğer devresi	39
Şekil 2.11	Metal-gözenekli silisyum nem ölçerin şematik gösterimi	41
Şekil 2.12	Metal-gözenekli silisyum nem ölçerin kalibrasyonu için kullanılan devrenin şematik gösterimi	42

Şekil 3.1	Ag-GS-Si yapının 1-2 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri (karanlık ve aydınlıkta)	44
Şekil 3.2	Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri (karanlık ve aydınlıkta)	45
Şekil 3.3	Ag-GS-Si yapının 2-3 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri (karanlık ve aydınlıkta)	46
Şekil 3.4	Ag-GS-Si yapının (1-3 kontaklar) fotoakımının spektral dağılımı	47
Şekil 3.5	Ag-GS-Si yapının kontaklar arası, farklı nem ortamında doğru akım-gerilim karakteristikleri	48
Şekil 3.6	Ag-GS-Si yapının kontaklar arası, farklı nem ortamında ters akım-gerilim karakteristikleri	49
Şekil 3.7	Ag-GS-Si yapının (Ag-Si arka yüzeyi kontaklar arası) a) Vakum b) %65 N.N. c) %86 N.N.'de doğru yönde ln I-V karakteristikleri	51
Şekil 3.8	Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası gerilim-nispi nem kalibrasyonu	52
Şekil 3.9	Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası akım-nispi nem kalibrasyonu	53
Şekil 3.10	Ag-GS-Si yapının (1-3 kontaklar arası) kapasitans-gerilim karakteristikleri	54
Şekil 3.11	Cu-Si (alt kontak) eklemin ters yön akımının sıcaklıkla değişimi	56
Şekil 3.12	GS-Si (alt kontak) eklemin ters yön akımının sıcaklıkla değişimi	56
Şekil 3.13	Ag-GS-Si yapıda, hidrojen iyonlarının (H^+) difüzyonu ile açık devre geriliminin oluşumunun şematik gösterimi	58
Şekil 3.14	İdeal Ag-pGS-nSi eklemlerin enerji bant diyagramı	59

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Ag-GS-Si eklemnin I-V karakteristiklerinin farklı nem şartları için hesaplanan ideallik faktörü β 'nın değerleri	50



ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince değerli yardımlarını ve vaktini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, bana cesaret veren sayın hocam Prof. Dr. Tayyar CAFEROV'a çok teşekkür ederim.

Tezimin yazım aşamasında bana yardımcı olan ve her türlü desteği sağlayan ağabeyim Ayhan ÖZTEMEL'e teşekkür ederim.

Bana gösterdikleri anlayış ve desteklerinden dolayı sevgili aileme özellikle anne ve babama en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Suna Öztemel

Haziran, 1999

ÖZET

Monokristalik n-tipi silisyumun yüzey bölgesinde, elektrokimyasal yöntemle gözenekli silisyum tabakası hazırlandı. Silisyum altlıktan ayrılmış ince tabakalı (yaklaşık 10 μm kalınlıkta) gözenekli silisyumun iletkenliği p-tipi, öz direnci $\rho=1.8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, deliklerin konsantrasyonu $p=9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ve mobilitesi $\mu=0.36 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak oda sıcaklığında Van der Pauw Yöntemi ile ölçüldü.

Elektron bombardımanı ile buharlaştırma yöntemi ile metal (Ag veya Cu)-gözenekli silisyum (GS)- silisyum eklemleri hazırlandı. Eklemlerin farklı şartlarda akım-gerilim karakteristikleri (karanlıkta, aydınlıkta, nem ortamında), fotoakımın spektral dağılımı ve kapasitans-gerilim karakteristikleri incelendi.

Ag-GS, GS-Si ve Ag-GS-Si eklemlerin doğrultma katsayısı sırasıyla $K_1=40$, $K_2=54$ ve $K_3=196$ olarak bulundu. Bu eklemlerdeki potansiyel engel yüksekliği sırasıyla $\phi_{K1}=0.6 \text{ V}$, $\phi_{K2}=0.4 \text{ V}$ ve $\phi_{K3}=0.7 \text{ V}$ olarak elde edildi. Ag-GS-Si eklemlerin $\lambda=300\text{-}1100 \text{ nm}$ dalga boyu aralığında fotoduyarlılığı bulundu.

Ag-GS-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri farklı nem ortamında incelendi ve nemin etkisiyle ters akımın, doğru akıma kıyasla daha fazla arttığı gözlemlendi.

İlk defa nemin etkisiyle Ag-GS-Si yapılarda açık devre geriliminin oluştuğu gözlemlendi. En iyi örnekte % 85 nispi nem'de $V=300 \text{ mV}$ kadar gerilim elde edildi. Ag-GS-Si yapılarda, nem ortamında açık devre geriliminin oluşma modeli ileri sürüldü.

Elde edilen sonuçlar ve literatürdeki gözenekli silisyuma bağlı parametreler kullanılarak, Ag-GS-Si eklemlerin enerji bant diyagramı çizildi.

ABSTRACT

Porous silicon (PS) has been obtained by electrochemical method at surface region by n-type monocrystalline silicon. The conductivity, resistivity, concentration of pores and mobility of thin PS layer (the thickness is about 10 μm) separated from silicon substrate have been measured by Van der Pauw method at room temperature p-type, $\rho=1.8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, $p=9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ and $\mu=0.36 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, respectively.

The metal(Ag or Cu)-porous silicon(PS)-silicon junctions have been obtained by evaporating method with bombing electrons at vacuum. The current-voltage characteristics at different conditions (in the light, in the dark, at different humidity conditions), the spectral dispersion of photo-current and capacitance-voltage characteristics of junctions have been investigated.

The rectification coefficients of Ag-PS, PS-Si, Ag-PS-Si junctions have been calculated $K_1=40$, $K_2=54$, $K_3=196$, respectively. The potential barrier height of this junctions have been obtained $\phi_{K1}=0.6$, $\phi_{K2}=0.4$, $\phi_{K3}=0.7$, respectively. The photo-sensibility of Ag-PS-Si junctions has been found at the gap of $\lambda=300\text{-}1100 \text{ nm}$ wavelength.

The current-voltage characteristics of Ag-PS-Si junctions have been investigated at different humidity conditions and the increase of reverse current depending on the humidity in comparison to forward current has been observed.

For the first, forming of open current voltage depending on the humidity has been observed and the voltage has been obtained about 300 mV [at the relative humidity ($R_{\text{H}_2\text{O}}=85\%$)] at the best sample. The forming model of open circuit voltage depending on the humidity has been proposed at Ag-PS-Si structures.

Using the obtained results and the parameters depending on PS in literatures, the energy band diagram of Ag-PS-Si junctions has been drawn.

1. GENEL BİLGİLER

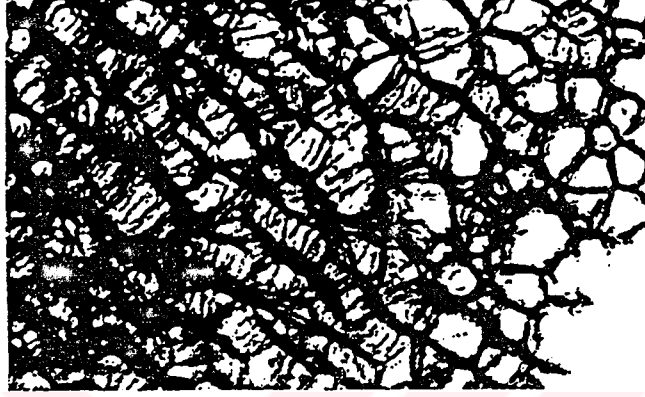
1.1 Giriş

Monokristalik silisyumun yüzey bölgesinde elektrokimyasal yöntemle hazırlanmış ince tabaka şeklinde gözenekli silisyum (GS), 1956 yılından beri incelenmektedir. Gözenekli silisyum, nanometre boyutlarındaki kristalik silisyum sütunlardan ve onların etrafındaki boşluklardan (gözeneklerin genişliği yaklaşık 2-50 nm aralığında) oluşmaktadır. Nanokristalik silisyum bölgelerinin kompozisyonu, hidrid (SiH_n) ve oksijen-silisyum (SiO_m) moleküllerinden oluşmaktadır. 1990 yılında gözenekli silisyumun görünür spektrumunda, şiddetli lüminesansın (ışık saçmanın) görülmesinden sonra, gözenekli silisyumun optoelektronikte kullanılma imkanı doğdu (Canham,1990). Gözenekli silisyumun yapısal, lüminesans, optik, elektrik vb. özellikleri genişçe araştırıldı (Collins,1997). Fakat metal-gözenekli silisyum yapıların incelenmesi ile ilgili, literatürde çok az sayıda yayınlar var. Metal-gözenekli silisyum eklemlerde elektrolüminesans birkaç makalede araştırılmıştır (Lazarouk,1996; Oguro,1997). Nem ortamın, metal-gözenekli silisyum yapıların akım-gerilim karakteristiklerine etkisi sadece bir çalışmada incelenmiştir. Nispi nemin %50-%80 aralığında artmasıyla, ters akımın ($V=20$) 3 mA'den 6 mA'e kadar arttığı gözlenmişti (Dimitrov, 1995).

Bu çalışmada metal-gözenekli silisyum diyotlarda, nemin etkisiyle yüksek değerli açık devre geriliminin (200-300 mV) oluşması keşfedilmiştir. Bu olayın özellikleri ve mekanizması incelenmiştir.

1.2 Gözenekli Silisyum

Kısaca tanımlarsak, gözenekli silisyum nanometre boyutlarında boş yerlerin çevrelediği ağdır. Genellikle gözenekli silisyum filmi, silisyum katman yüzeyinin elektrokimyasal anodizasyon işlemi ile hazırlanır. Anodik aşındırma yoluyla elde edilmiş gözenekli silisyumun yapısı, şekil 1.1'de gösterilmiştir (Collins,1997).



Şekil 1.1 p^+ - tipi silisyum katmanından oluşan gözenekli silisyumun elektron mikroskobu ile çekilmiş görüntüsü (Collins,1997)

Gözenekli silisyumun lüminesans (ışık saçma) özelliği oldukça yeni bir gelişme ise de, gözenekli silisyum 1956'da silisyumun elektroparlatılması metotlarıyla ilgili bir çalışma esnasında keşfedildi. Gözenekli silisyumun yapısal-elektriksel özellikleri ve üretim koşulları arasındaki ilgi, sonraki çalışmada geniş bir şekilde gözden geçirildi. Akım yoğunluğu, HF asit konsantrasyonu, aşındırma sırasındaki aydınlatmanın varlığı veya yokluğu, özellikle aşılama tipi ve silisyumun öz direnci, gözenekli tabakanın morfolojisini etkilemektedir. Örneğin; zayıf katkılı p-tipi malzeme süngere benzer bir gözenek yapısı oluşturmaya eğilim gösterirken, n-tipi ve yoğun katkılı p-tipi silisyum, ağaç gibi ya da sütunsu özelliklerin ortaya çıkmasına neden olur. Gözeneklilik derecesi (porositiy) %50-%90 arasında değişir ve yüksek gözeneklilikte ışık saçma daha etkin bir şekilde ortaya çıkar (Collins,1997).

Uzun yıllar gözenekli silisyumun kimyasal özellikleri üzerinde çalışılmasına rağmen hala oluşum mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır. Gözenekli yapıların oluşumunu açıklamak için çok sayıda farklı model ileri sürülmüştür (Kanemitsu,1995).

1.2.1 Gözenekli Silisyumun Elde Edilmesi

1956'da gözenekli silisyumun keşfinden beri, HF asit içindeki gözenekli silisyumun anodizasyonu sırasında elde edilen deliklerin karışık örgülerine sebep olan mekanizma yoğun bir çalışma konusudur.

Gözenekli tabaka, HF-esaslı elektrolitlerle kimyasal çözünme ile elde edilir. Platinin katodu, silisyumun anodu oluşturduğu devrede, HF ve su karışımı elektroliti oluşturur. Oluşan devreye gerilim uygulandığında, birkaç mikrometre kalınlığında gözenekli tabaka meydana gelir.

Farklı anodizasyon koşullarında elde edilen gözenekli silisyum, çeşitli zengin ve karmaşık yapılar gösterir. Değişen bu davranışların varlığı, silisyumun çözünme elektrokimyasından başka, bazı ilginç fiziksel süreçlerin işlediği görüşüne yol açtı. Gözenekli silisyumda görülen büyütme şekilleri, dengede olmayan büyütme olaylarında gözlenen elektrokimyasal çözünme ve dielektrik bozulma gibi olaylara benzerdir. Silisyumda gözenek büyütmesini açıklamak için öne sürülen modellerin çoğu, tam olarak çözünme kimyası ile ilgilenmez. Fakat gözenekli silisyumun morfolojisindeki anodizasyon koşullarının açıklanmasıyla ilgili fiziksel tartışmalar getirmektedir. Şu da bir gerçektir ki silisyumun detaylı çözünme kimyası karmaşık ve anlaşılır değil. Çok sayıda çözünme mekanizmaları Smith ve Collins (1992) tarafından ileri sürülmüştür.

Gözenekli silisyum yalnız kristallerden veya dar silisyum duvarlarının oluşturduğu kristal zincirlerinden meydana gelir. Önemli bir görüşte, kristaller içindeki hacim özelliğini bırakmasıdır. Doğal olarak oluşan delik geometrileri aşılama tipine, aşılama seviyesine, anodizasyon akımına ve HF konsantrasyonuna bağlıdır. p-tipi silisyum numunesi süngere benzer bir yapı oluşturur. Delikler muntazam ve çok yüksek derecede birbirine bağlı ağ şeklindedir. n-tipindeki delikler sadece aydınlatma altında oluşur ve doğrusaldır. Yozlaşarak aşılama durumlarında (p^+ ve n^+), geometriler birbirine bağlı p-tipi yapıya benzerdir. Fakat delikler daha kısa ve daha geniştir. Yüksek akım yoğunluklarında, delikler daha fazla genişler. Bu durumda n-tipinde lineer delikler boru şeklinde olmaya eğilim

gösterirler. Çok yüksek akımlarda silisyum hep aynı şekilde aşındırılır, elektroparlatmaya kadar gider. Bu ayrıca düşük HF konsantrasyonlarında da meydana gelir (John ve Singh, 1995).

Gözenekli silisyumun morfolojisini tanımlamakta başvurulan parametre numune gözenekliliğidir. Bir silisyum katmanının tamamen gözenekli silisyuma dönüştüğünü farzederek , gözeneklilik (G) şu şekilde hesaplanır

$$G = \frac{\text{Silisyum katmanının kütlesi} - \text{Gözenekli filmin kütlesi}}{\text{Silisyum katmanının kütlesi}} \times 100 \quad (1.1)$$

%60'dan büyük gözenekliliğe sahip numunelerin görünür spektrumda lüminesansı gözlenmiştir.

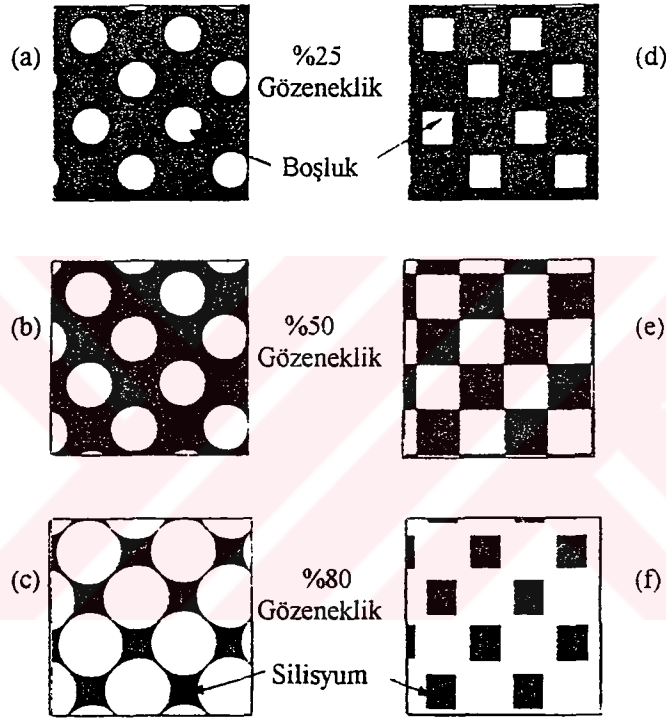
Gözenekli silisyumun oluşumunu açıklamak için birkaç model öne sürülmüştür. Önceki modeller, daha çok silisyum-elektrolit sistemlerinde elektrik alanının yeniden dağılımına dayanan görüşlerin öne sürüldüğü fiziksel olaylardır. Son zamanlarda bilgisayar simülasyonları yapıldı. Böylelikle deneysel koşullara dayalı basitleştirilmiş parametrelili silisyum-HF sistem modeli yapılmaya çalışıldı (John ve Singh,1995).

1.2.2 Gözenekli Silisyumun Yapısı

Düşük akım yoğunluklarında HF esaslı çözeltilerde silisyum katmanlarının anodizasyonu , yüzeye dik hareket eden oldukça küçük boşluk dizinlerinin üretiminde kullanılabilir. Hacimli silisyum altlık öz direncine ve anodizasyon koşullarına bağımlı olarak mikrogözenekli (gözenek genişliği < 20 Å), mezogözenekli (gözenek genişliği 20-500Å), veya makrogözenekli (gözenek genişliği > 500 Å) olarak yapılabilir.

Şekil 1.2 (a) gerçekten düşük gözenekli (%25) bir tabakanın anodize edilmiş (100) yüzeyinin idealleştirilmiş şeklini gösterir. Elde edilen veriler düşük gözenekli

mezogözenekli silisyumun, yüzeye dik hareket eden sabit yarıçaplı etkileşmeyen silindirik gözenek dizinlerini içeren hacimli malzemeye yeterince yaklaşıp olabileceğini gösterir. Gerçekte gözenekte dallanma ve gözenek boyutlarında değişimler, ayrılmalar vardır. Şekil 1.2 (b) ve 1.2 (c) kimyasal çözünme ile her gözeneği genişleten aşındırıcı ile tabakanın gözenekliliğin arttığını gösterir. Silindirik gözenekler için, %78.5'den büyük gözeneklilik, en yakın komşu gözeneklerin mevcut birleşmesini ve sonuç olarak silisyum sütunlarının yoğunluğunun fiziksel izolasyonunu sağlar. ~%80 gözeneklilikte bu sütunların genişliği ortalama gözenek yarıçapı ile karşılaştırılabilir (Canham,1990).



Şekil 1.2 (a)-(c) silindirik boşlukları, (d)-(f) dikdörtgen boşlukları içeren anodize edilmiş (100) silisyum katmanının idealleştirilmiş görüntüsü (Canham,1990)

Eğer kristalografik etkiler mikrogözenek ve mezogözenek şekillerine etki ederse, sonra anodize edilmiş (100) katmanlar için gözenekler, şekil 1.2 (a)-1.2 (c)'de gösterildiği gibi dairesel olmaz, fakat şekil 1.2 (d)-1.2 (f)'de gösterildiği gibi kare olmaya eğilim gösterirler. Silisyum sütunlarında düşük gözeneklilik, fiziksel olarak izole edilmiş düzgün dikdörtgen gözenekler dizininden oluşur. Şekil 1.2 (e)'de gösterildiği gibi gözeneklilik sadece ~%50'dir (Canham,1990).

1.2.3 Gözenekli Silisyumun Özellikleri

Silisyum katman yüzeyinde oluşturulan gözenekli silisyumdan oda sıcaklığında görülebilir fotolüminesans elde edileceği Canham (1990) tarafından bildirildi. Silisyumun bant aralığından yüksek enerjilerde verimli, ayarlanabilir, oda sıcaklığında ışık emisyonu gösteren gözenekli silisyumla ilgili gerçek çalışmalar başlamış oldu.

1991 yılında Lehmann ve Gosele gözenekli silisyumun optik geçirgenlik spektrumunu yayınladı. Bu çalışmanın sonuçları da gözenekli silisyumun bant aralığının kristal silisyumdan fazla olduğunu gösterdi.

Gözenekli silisyum için söylenen lüminesans özellikleri şu nedenlerle tartışmalıydı. Birincisi, yayma enerjisi hacimli silisyum bant aralığının oldukça üzerindeydi. İkincisi, fotonların enerjisi görünür spektrum üzerinde, kırmızı, yeşil ve mavi renk gerektiren durumlar için önemli bir nokta olan hazırlama koşullarını değiştirerek ayarlanabiliyordu. Son olarak da kuantum verimi, direk bant aralıklı yarıiletken bileşiklerine yakındı (Collins vd.,1997).

Canham (1990) makalesiyle o günkü silisyum kökenli optoelektronik teknoloji üzerinde tartışmaların olmasına sebep olurken, gözenekli silisyuma yönelik araştırmalara büyük canlılık getirdi. Lüminesans mekanizmasının temel özelliklerini ortaya çıkarmadaki düzenli gelişmeler hala sürmektedir. Gözenekli silisyum optoelektronik uygulamalarda oldukça kullanışlıdır ve hala araştırma konusudur. Verimi %0.1'den daha büyük olan oda sıcaklığında çalışan LED'ler (ışık saçan diyotlar) üretildi (Collins vd.,1997).

Son yıllarda gözenekli silisyumda fotolüminesansın başka elektrolüminesans olayı da incelenmiştir. (Iyer vd.,1992; Fauchet vd.,1993; Collins vd.,1995). Gözenekli silisyumun optik uyarılma altında yüksek lüminesans verimliliği dikkate değerdir. Fakat eğer malzeme, ışık yayıcı olarak pratik uygulamalara sahip olacaksa yük taşıyıcıların elektriksel injeksiyonu sırasında benzer sonuçlar elde etmek gerekli olacaktır. Gözenekli silisyumdan yüksek verimlilikte fotolüminesans elde edildikten sonra elektrolüminesansa ilgi başladı.

Katıhal kontaklar ile yapılan aygıtlardaki ilk sonuçlar cesaret verici değildi. Böylelikle, sıvı kontaklar gerçek aygıtlarda kullanılabilecek verimliliğin varlığını gösterdi (Bressers vd.,1992; Green vd.,1995).

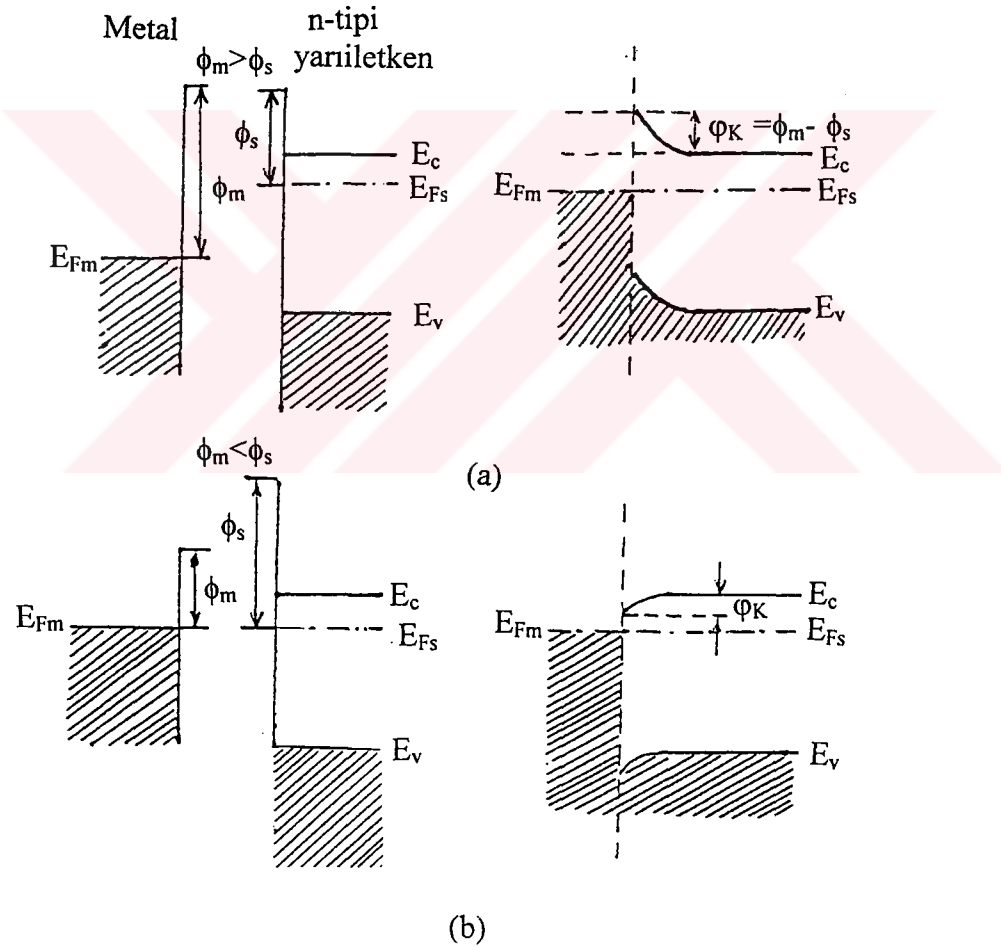
İnce bir metalik elektrodun, gözenekli tabaka üzerinde buharlaştırılması ile elde edilen LED'ler ilk ışık veren aygıtlardır ve karakteristikleri de idealden çok uzaktı. Bir ölçüde ışık yayılımı yüksek gerilim uygulanmasını gerektirdi. Yayınım sık sık ileri ve geri kutuplamada eşit şiddette gözlemlendi ve kuantum verimliliği %0.001'den azdı. Bu şaşırtıcı değildi çünkü gözenekli silisyumdan verimli katıhal LED yapmada zorluklar arttı. Bir fotolüminesans deneyinde, bir fotonun soğurulması, birbirine çok yakın, büyük bir olasılıkla da kolayca bileşecekleri bir nanokristal içinde elektron-boşluk çifti yaratır. Bir LED'de ışık yayılımı, elektron ve boşlukların zıt kenarlarından tekrar bileşecekleri arınma bölgesine ulaşımını içerir. Gözenekli şebeke içinde bu taşıyıcıların karışık bir yol izleyecekleri anlamına gelir. Tam olarak bu ulaşım mekanizması anlaşılamamıştır.

Sonraki çalışmalarda, katıhal aygıtlarda %0.1 veya çok daha az kuantum verimlilikleri elde edildi (Linnros ve Lalic,1995;Tsybeskov vd.,1996). Bu yapılarda, silisyum katman ile p-n eklemi ve daha sonra elektrokimyasal anadizasyon ile eklemin arınma bölgesine yerleştirilen ışık saçan gözenekli tabaka oluşturulmaktadır. Aygıt karakteristrikleri dikkate değer gelişme göstermesine rağmen hala ideal değildir. Örneğin, 2V gibi düşük gerilimlerde elektrolüminesans sadece ileri kutuplama ile gözlemlendi. Yaklaşık 5V'luk çalışma gerilimlerinde maksimum verimlilik elde edildi.

Oda sıcaklığında gözenekli silisyumdan verimli ve görünür fotolüminesansın bulunmasından bu yana lüminesans mekanizmasını anlamada gelişmeler görüldü. Bunlara ilaveten fotolüminesans verimlilikte uyumlu elektrolüminesansı anlamadaki son gelişmeler de ümit vermektedir (Collins,1997).

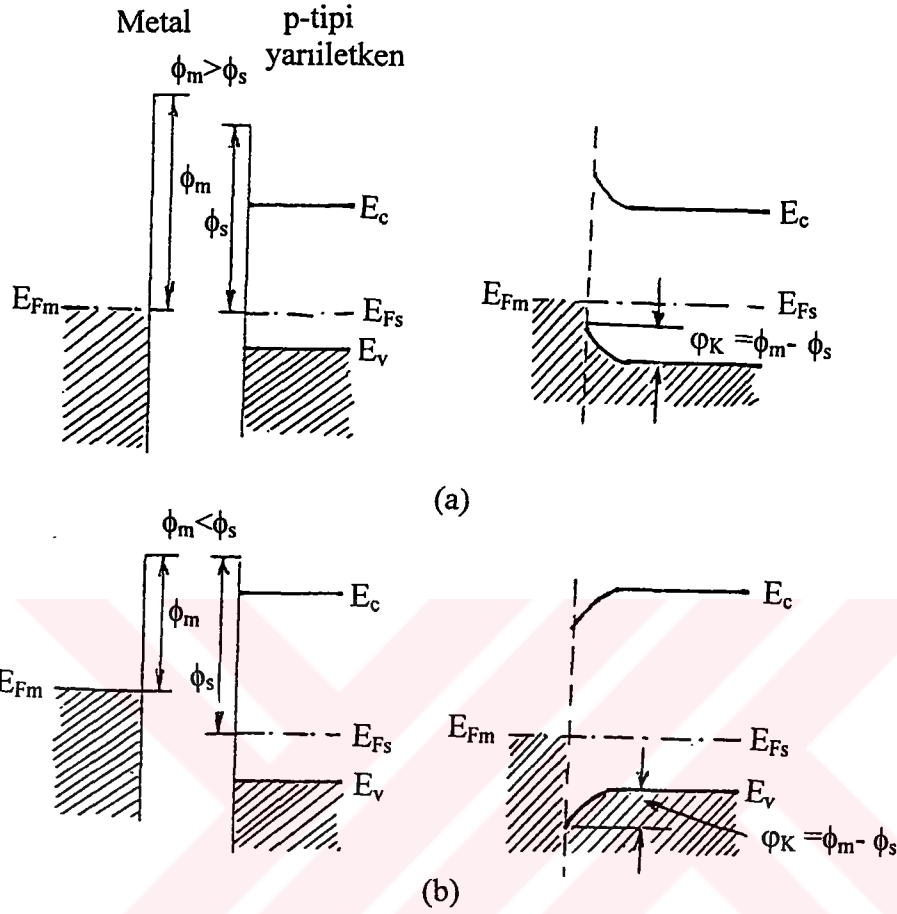
1.3 Metal-Yarıiletken Eklemler

Elektronlar, metal ve yarıiletkenlerin içinde iyonlar tarafından Coulomb elektriksel etkileşmeye maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle kristalin içinde elektronların potansiyel enerjisi serbest elektronların enerjisinden daha küçüktür. Kristalin içinden dışarıya (vakuma) atmak için elektronlara enerji transferi olmalıdır. Elektronu, katı malzemenin içinden dışarıya atmak için gereken en az enerji, iş fonksiyonu (çıkış işi) olarak adlandırılır. Katılarda, termodinamik çıkış işi (Φ), elektronu Fermi seviyesinden vakuma atmak için gereken enerjidir.



Şekil 1.3 Metal-n tipi yarıiletken kontakların enerji diyagramları

- a) Doğrultma kontak ($\Phi_m > \Phi_s$)
- b) Doğrultma olmayan kontak ($\Phi_m < \Phi_s$)



Şekil 1.4 Metal-p tipi kontakların enerji diyagramları
 a) Doğrultma olmayan kontak ($\Phi_m > \Phi_s$)
 b) Doğrultma kontak ($\Phi_m < \Phi_s$)

Şekil 1.3 (a)'da $\Phi_m > \Phi_s$ şartı için (Φ_m metalin çıkış işi ve Φ_s n-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işidir) metal n-tipi yarıiletken temasta olmama (şeklin sol tarafında) ve temas durumu (şeklin sağ tarafında) gösterilmektedir. Metal ve n-tipi yarıiletken temas edecek kadar yaklaştırıldığında, yarıiletkenin termodinamik çıkış işinin metalin çıkış işinden daha küçük olması nedeniyle, elektronlar yarıiletkenden metale geçmektedirler. Böyle geçişlerin sonucunda metalde fazla negatif yük, yarıiletkenin yüzey bölgesinde ise fazla pozitif yüklü iyonlardan oluşmuş bölge meydana gelmektedir. Yük taşıyıcılarının yerdeğiştirmesi, elektrokimyasal potansiyelin metal-yarıiletken sisteminde eşitlenmesine kadar, yani sistemin Fermi seviyesinin kalınlığı sabit oluncaya kadar devam etmektedir.

Elektron geçişleri sonucunda, yarıiletkenin yüzey bölgesinde enerji bandının eğimi oluşmaktadır. Bu tür eğimin derecesi, metalin ve yarıiletkenin çıkış işlerinin farkı ile belirlenmektedir.

$$e \varphi_k = \Phi_m - \Phi_s \quad (1.2)$$

burada φ_k kontak potansiyeller farkıdır.

Metal ve yarıiletken birbiriyle temasda olmadığı durumda, yarıiletkenin herhangi noktasında elektronların enerjisi aynıdır. Metal–yarıiletken kontağın oluşması durumunda, elektrona kontağın elektrik alanı tarafından kuvvet uygulanmaktadır. Bu nedenle elektronun elektrik alanda hareket süresi ve potansiyel enerjisi artmaktadır. Elektronun potansiyel enerjisinin en büyük değerleri metal-yarıiletken sınırındadır. Elektronları kaybeden bölge yani fakirleşmiş bölgenin (arınma veya hacimsel yüklü bölgenin) kalınlığı

$$L_o = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_o \varepsilon \varphi_k}{e^2 N_d}} \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir. Burada ε elektrik sabiti, ε_o dielektrik katsayısı, e elektron yükü, N_d dörnorların konsantrasyonudur ve φ_k kontak potansiyeller farkıdır.

Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, yarıiletkenin yüzey bölgesinde enerji bantları yukarı eğilmektedir ve sonuçta yarıiletkenin kontak bölgesinde pozitif yüklü tabaka (iyonlaşmış dörnorlardan oluşmuş) meydana gelmektedir. Metal ve yarıiletkendeki tabakaların yükleri birbirini karşılıklı dengelemektedir.

Eğer fakirleşmiş bölgenin kalınlığı, elektronların serbest yol uzunluğundan daha büyükse ($L_o \gg \lambda$), o halde elektron hareketleri, difüzyon olayları ile belirlenmektedir. Aksi taktirde ($L_o \ll \lambda$), yani fakirleşmiş bölgede elektronlar birbiriyle arpışmayarak geçerler ve bu durumda diyot olayları hesaba katılmalıdır.

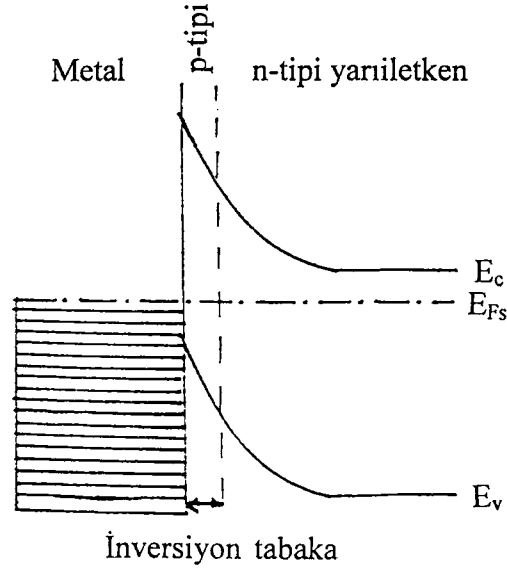
Yarıiletkenin yüzey bölgesinde elektron konsantrasyonu, iç bölgesindeki konsantrasyonundan daha azsa, bu durumda yüzey bölgesinin direnci daha büyüktür. n-tipi yarıiletkenin yüzey bölgesindeki bu tür tabaka, engel tabaka olarak adlandırılır. Bantların yeteri kadar büyük eğilimlerinde, engel tabakası doğrultma kontağın temelini oluşturmaktadır. Metal-yarıiletken doğrultma kontaklar Schottky kontaklar olarak adlandırılır.

Metalin çıkış işi n-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olduğu durumda ($\Phi_m < \Phi_s$), yarıiletkenin kontak bölgesinde enerji bandı aşağıya eğilmektedir (Şekil 1.3.b). O halde yarıiletkenin yüzey bölgesinde elektron konsantrasyonu, iç bölgesindeki konsantrasyonundan daha fazladır. Yarıiletkenin yüzey bölgesinde oluşan küçük dirençli tabaka antiengel tabaka olarak tanımlanır. Bu tür tabakalar omik kontakların temelini oluşturmaktadır.

Metal-p tipi yarıiletken kontakları göz önüne alalım. Metalin çıkış işi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha büyük olduğu durumda ($\Phi_m > \Phi_s$), elektronların p-tipi yarıiletkenden metale geçişleri sebebiyle yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artar ve tabakanın direnci azalır (Şekil 1.4.a). Böylece metal-p tipi yarıiletken yapı, omik kontak özelliği göstermektedir.

Metalin çıkış işi p-tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olması durumunda ($\Phi_m < \Phi_s$), elektronların metalden yarıiletkene kolayca geçişleri sonucunda p-tipi yarıiletkenin kontak bölgesinde pozitif yük taşıyıcıların konsantrasyonu azalmakta ve bu tabakanın direnci büyümektedir. Bu tür metal-p tipi yarıiletken kontağı doğrultma özelliği göstermektedir ve Schottky kontağı olarak tanımlanır.

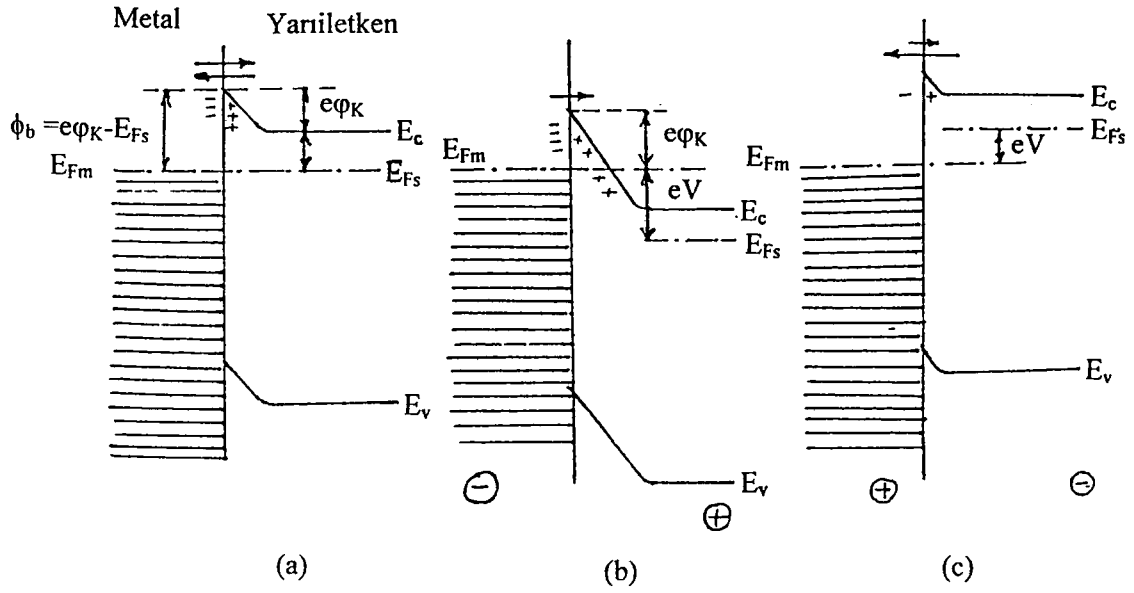
Schottky kontakların oluşma halinde (şekil 1.3.a ve 1.4.b), eğer kontak potansiyelleri farkı ($e\phi_k = \Phi_m - \Phi_s$ veya $e\phi_k = \Phi_s - \Phi_m$) yeterince büyük ise, kontak bölgesinde yarıiletken bandının eğimide büyüktür. Bu nedenle yarıiletkenin yüzey tabakasının iletkenlik tipinin değişmesi beklenir. Yüzey bölgesindeki bu tür tabaka “inversiyon tabaka” olarak adlandırılır. Şekil 1.5’de metal-n tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_m > \Phi_s$) enerji bant diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 1.5 İnversiyon tabakalı metal-n tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı

Şekil 1.5'te n-yarıiletkenin yüzey bölgesinde Fermi seviyesinin valans bandına daha yakın olması nedeniyle tabakanın iletkenlik tipi p'dir. Metal-n tipi yarıiletken kontak bölgesinde bandın fazla eğiminde, n-tipi yarıiletkenin yüzey bölgesinde p-tipi ince tabaka oluşmaktadır. Benzer şekilde metal-p tipi yarıiletken yapının kontak bölgesinde inversiyon tabaka, n-tipi tabaka oluşabilir. Bunun için $e\phi_K = \Phi_s - \Phi_m$ kontak potansiyeller farkının büyük olması gerekir.

Doğrultma metal-yarıiletken kontakların veya Schottky diyotlarının (şekil 1.3.a ve şekil 1.4.b) temel özelliği kontak direncinin dışarıdan uygulanan gerilime bağımlılığıdır. Bu bağımlılık o kadar güçlüdür ki kontakta akım kolayca bir yönde geçer (doğru yön), ters yönde ise zayıf akım geçebilir.



Şekil 1.6 Metal-n tipi yarıiletken doğrultma kontağın enerji diyagramı

a) Denge durumunda b) Ters yönde gerilim uygulandığında (“+” n-tipi yarıiletken) c) Doğru yönde gerilim uygulandığında (“-” n-tipi yarıiletken)

Sınır bölgesindeki, metalden yarıiletkeneye geçen elektronlar için potansiyel engelinin yüksekliği

$$\Phi_b = e \phi_K - E_{Fs} \quad (1.4)$$

ile belirlenir. Karşı yönde, yarıiletkenden metale geçen elektron için potansiyel engelin yüksekliği,

$$E_K = e \phi_K \quad (1.5)$$

ile verilir. Denge durumunda kontakta akım geçmemektedir.

Ters yönde uygulanan gerilimi (şekil 1.6.b) göz önüne alırsak, kontağın direnci devrenin direncinden çok büyük olmasından dolayı, tüm uygulanan gerilim kontağın yarıiletken tarafında dağılmaktadır. Yarıiletken bandındaki enerji düzeyi (eV) kadar aşağıya kayar.

Ters yönde uygulanan gerilimin (V) etkisiyle, yarıiletken den metale geçen elektronlar için potansiyel engelin yüksekliği

$$e \varphi = e \varphi_k - e V \quad (V < 0) \quad (1.6)$$

kadar artmaktadır. Fakirleşmiş veya hacimsel yüklü bölge kalınlığı büyümektedir

$$L_o = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_o (\varphi_k - V)}{e N_d}} \quad (V < 0) \quad (1.7)$$

Doğru yönde gerilim uygulandığında (şekil 1.6.c), yarıiletken den metale geçen elektronlar için potansiyel engel azalmaktadır. Potansiyel engel yüksekliği

$$e \varphi(0) = e \varphi_k - e V \quad (V > 0) \quad (1.8)$$

kadar azalmaktadır ve hacimsel yüklü bölgenin kalınlığı küçülmektedir

$$L_o = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_o (\varphi_k - V)}{e N_d}} \quad (V > 0) \quad (1.9)$$

Uygulanan gerilimin etkisiyle yarıiletken den metale geçen elektronlar için potansiyel engel yüksekliğinin azalması, aynı yönde elektron akımının artmasını sağlamaktadır. Schottky diyotlarının akım-gerilim karakteristikleri, hem difüzyon teorisi hem de diyot teorisi kullanılarak incelenmiştir ve benzer sonuçlar elde edilmiştir

$$J = J_s [\exp (eV / kT) - 1] \quad (1.10)$$

Difüzyon teorisine göre J_s doyma akım yoğunluğu

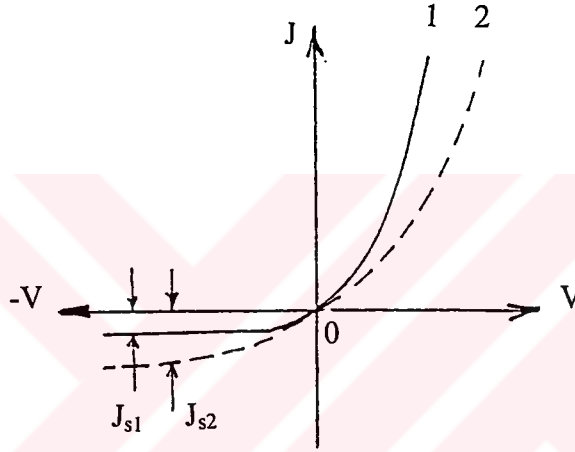
$$J_s = e n_s \mu_n E_o \quad (1.11)$$

denklemleri ile verilir. Burada n_s yük taşıyıcılarının doyma konsantrasyonu, E_o kontağın elektrik alanıdır, μ_n mobilitedir.

Diyot teorisine göre J_s doyma akım yoğunluğu

$$J_s = AT^2 \exp(-\Phi_b / kT) \quad (1.12)$$

ile verilir. Burada Φ_b metalden yarıiletkenine geçen elektronlar için potansiyel engel yüksekliği, A Richardson sabitidir.



Şekil 1.7 Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiği (1) Diyot teorisine göre
(2) Difüzyon teorisine göre

Şekil 1.7’de Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiği, diyot teorisi ve difüzyon teorisi bakımından şematik olarak gösterilmektedir. Her iki eğri de benzer eğrilerdir. Fakat ince fakirleşmiş bölgesi kontağın karakteristiğinin (diyot teorisi) doyma akım yoğunluğu, daha kalın fakirleşmiş bölgesi kontağın karakteristiğinden (difüzyon teorisi) daha küçüktür. Diyot teorisine göre doğru akım yoğunluğu daha hızla artmaktadır.

Schottky diyotuna doğru yönde gerilim uygulandığında ($V > 0$), yarıiletkeninden metale geçen elektronlar için potansiyel engel yüksekliği gerilimle azalmaktadır ve akım-gerilim karakteristiği değişmektedir. Akım yoğunluğu uygulanan gerilim ile exponensiyel değişim göstermektedir

$$J = J_s \exp (eV / kT) \quad (V > 0) \quad (1.13)$$

Ters gerilim uygulandığında ($V < 0$), gerilimin mutlak değerlerinin büyük olması durumunda ($|eV| \gg kT$), (1.10) denkleminde

$$J \approx -J_s \quad (1.14)$$

elde edilir. Akım-gerilim karakteristiğinin ters kolunda ($V < 0$), uygulanan gerilimin büyük değerlerinde, diyottan geçen akım sabittir ve doyma akım yoğunluğu (J_s) ile belirlenmektedir.

Uygulanan akımın belirli bir değerinde, doğru yönde (J_d) ve ters yöndeki (J_t) akım yoğunluklarının oranı, kontağın veya diyotun doğrultma katsayısı

$$K = \frac{J_d}{J_t} \bigg|_{V = \text{sabit}} \quad (1.15)$$

olarak tanımlanır.

Kaliteli diyotlar için doğrultma katsayısı $10^5 - 10^6$ değerleri arasındadır.

1.4 Metal–Yarıiletken Eklemlerin Kapasitansı

Metal-n tipi yarıiletken ($\Phi_m > \Phi_s$) ve metal-p tipi yarıiletken ($\Phi_m < \Phi_s$) kontaklarda, yük taşıyıcıların konsantrasyonları metal ve yarıiletken arasında yeniden değişmektedir. Sonuçta yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronlardan (n-tipi) veya deliklerden (p-tipi) fakirleşen yüksek dirence sahip tabaka meydana gelmektedir. Bu bölgenin kalınlığı (L_o) dışarıdan uygulanan gerilim ile değişmektedir. Gerçekte bu tür metal-yarıiletken kantağın (Schottky diyotun) yapısı, kondansatörün yapısına benzer. Metal-fakirleşmiş yarıiletken-yarıiletken sistemi, iki iyi iletkenin (metal ve yarıiletken) arasında yüksek dirençli tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakanın direnci, yarıiletkenin iç bölgesinin direncinden daha çok büyüktür. Adi kondansatörle karşılaştırıldığında, Schottky diyotunda elektronlardan fakirleşen tabaka, kondansatörün metalik elektrotları arasındaki yalıtkan tabakayı hatırlatmaktadır.

Schottky diyotuna dışarıdan gerilim uygulandığında, devrede ilk anda oluşan akımın etkisiyle, hacimsel bölge sınırında elektrik yükleri değişmektedir. Buradaki olaylar kondansatördeki olaylara benzer. Schottky diyotun kapasitansı, hacimsel yük bölgesindeki potansiyel engel yüksekliğinin değişimine bağlıdır. Bundan dolayı diyotun kapasitansı, engel kapasitansı olarak adlandırılır. Diferansiyel engel kapasitansı şu şekilde verilir

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (1.16)$$

Burada dQ engel bölgesindeki yükün değişimidir, dV uygulanan gerilimin değişimidir.

Metal-yarıiletken yapı düzlemsel kondansatöre benzer. Bu nedenle Schottky kantağın kapasitansı aynı formül ile elde edilebilir

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_o S}{L_o} \quad (1.17)$$

Burada L_o hacimsel yüklü bölgenin veya eklemin kalınlığı şu şekilde verilir

$$L_o = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_o \varphi_K}{e n}} = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_o (\Phi_m - \Phi_s)}{e^2 n}} \quad (1.18)$$

(1.17) denklemini, (1.18) denkleminde yerine konursa, Schottky diyotun kapasitansı şu şekilde bulunur

$$C = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_o e n}{2 \varphi_K}} \quad (1.19)$$

burada, S diyotun alanıdır.

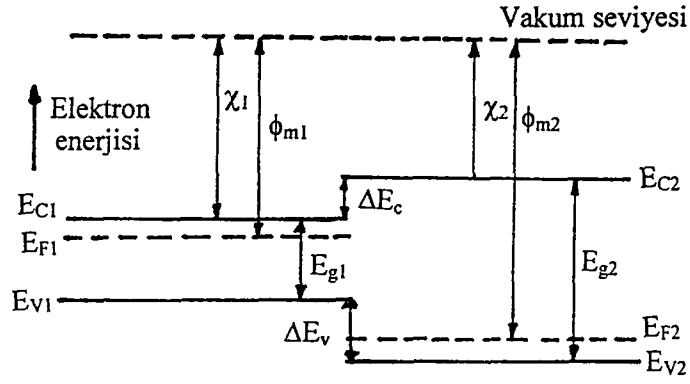
(1.17) formülünden görüldüğü gibi Schottky diyotlarının kapasitans ölçümlerinden, fakirleşmiş bölgenin kalınlığı (L_o) bulunur.

1.5 Heteroeklemler

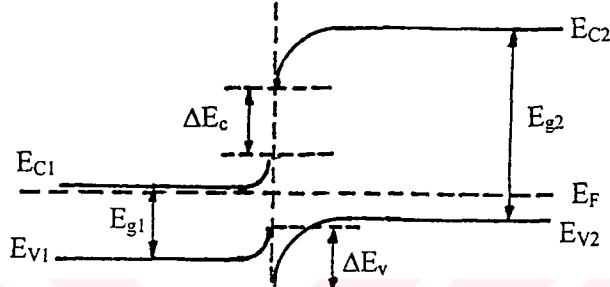
Heteroeklem, farklı enerji bant aralıklarına sahip iki yarıiletken arasında oluşan eklemidir. Heteroeklemlerin birçok uygulamaları vardır. Başlıcaları ışık saçan diyotlar, fotodedektörler, güneş pilleri, lazerler vb. Heteroeklemler çeşitli metotlarla (arayüz-alaşım tekniği, epitaksiyel büyütme tekniği, implantasyon yöntemi) elde edilir. Son yıllarda epitaksiyel büyütme yöntemi (“epitaxi” yönlenmiş büyütme demektir) cihazlarının yapılmasında çok geniş kullanılmaktadır.

Shockley’in önceki çalışmalarına dayalı yüzeysel durumlarından bağımsız, ideal keskin heteroeklemin enerji bant modelini Anderson (1962) önerdi. Bu yük taşıyıcılarının taşınma mekanizmalarının birçoğunu açıklayabilir ve ideal olmayan durumları, örneğin yüzeysel durumlarını izah etmek için modelde önemsiz değişiklikler yapmaya ihtiyaç duyulur. Şekil 1.8(a) izole edilmiş iki yarıiletkenin enerji bant diyagramını gösteriyor. İki yarıiletkenin farklı bant aralığına (E_g), farklı geçirgenliklere (ϵ), farklı termodinamik iş fonksiyonlarına (Φ) ve farklı elektron alınganlığına (χ) sahip olduğunu farzedelim. Elektron alınganlığı — iletkenlik bandının dibinden malzemenin dışına bir yere (vakum seviyesine) elektron taşımak için gereken enerji olarak tanımlanır. İki yarıiletkenin iletkenlik bantlarının enerji farkları ΔE_c ile, valans bantlarının enerji farkları ΔE_v ile ifade edilir.

Bu yarıiletkenler arasında eklem oluştuğu zaman, dengedeki enerji bant diyagramı şekil 1.8 (b)’de gösterilmektedir. Dar aralığa sahip n-tipi yarıiletken ve geniş aralığa sahip p-tipi yarıiletken arasında oluşturulan heteroekleme, n-p heteroeklem denir. Dengeye Fermi seviyesi her iki kenarda eşit olmalıdır ve vakum seviyesi her yerde bant kenarlarına paraleldir ve süreklidir. İletkenlik ve valans bant kenarlarındaki süreksizlik sabittir.



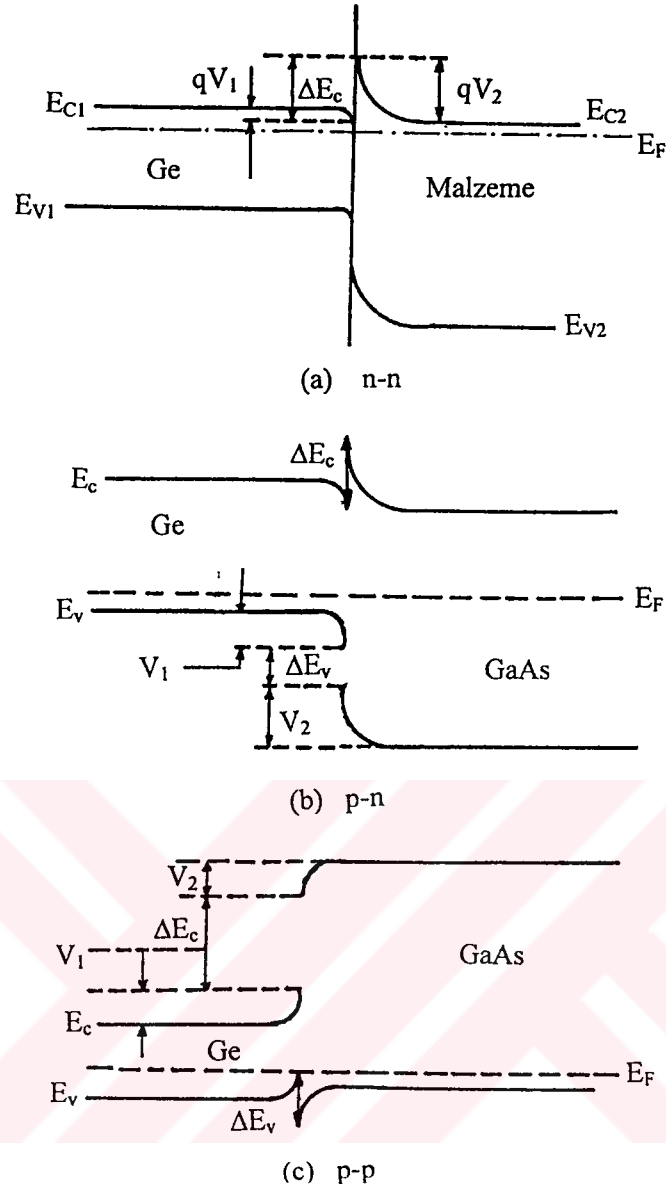
(a)



(b)

Şekil 1.8 (a) İzole edilmiş iki yarıiletkenin enerji bant diyagramı
 (b) Dengede ideal n-p heteroeklemin enerji bant diyagramı
 (Anderson,1962)

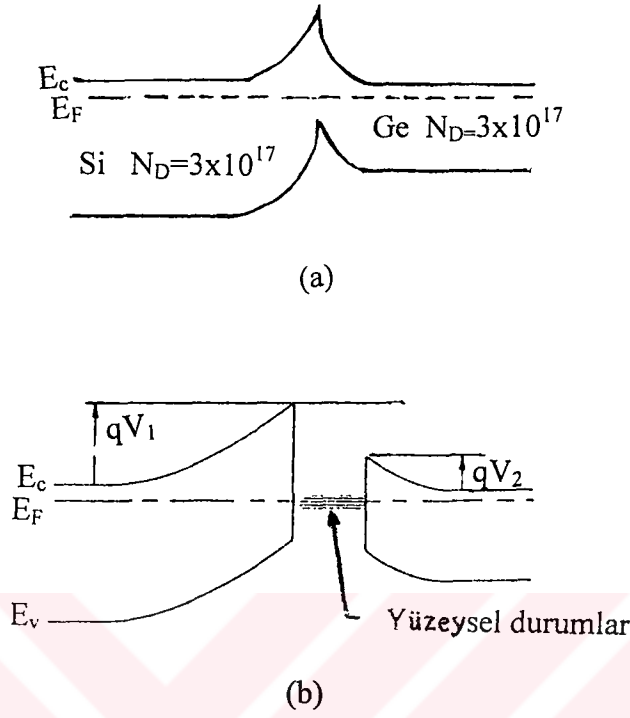
n-n heteroeklemin durumu biraz farklıdır. Geniş aralıklı yarıiletkenin termodinamik iş fonksiyonu daha küçüktür, enerji bantları n-p durumunun tersi olarak bükülür (Şekil 1.9.a). Dengedeki idealleştirilmiş p-n (dar aralıklı p-tipi, geniş aralıklı n-tipi) ve p-p heteroeklemlerin enerji bant diyagramı şekil 1.9.(b) ve 1.9.(c)'de gösterilmiştir.



Şekil 1.9 (a) İdeal keskin n-n heteroeklemin enerji bant diyagramı (Chang,1965)
 (b) ve (c) ideal p-n ve p-p heteroeklemin enerji bant diyagramı
 (Anderson,1962)

Arayüzdeki enerji bandı elektronların varlığı yada yokluğu ile sağlanan yüklerle, aşağı veya yukarı hareket etmek için serbesttir. İletkenlik bandındaki süreksizlik (ΔE_c), elektron alınganlıkları farkına eşittir. Bununla beraber arayüzdeki Fermi seviyesi üzerindeki iletkenlik bandının yüksekliği aslında arayüz durumları ile belirlenir. Şekil 1.10.(a)'da Ge-Si n-n heteroeklemin enerji bant diyagramı gösterilmiştir. Gözlenen eklemin her iki tarafı arınmıştır, arayüzdeki doğal alıcılar tarafından mümkün bir durum yapılır. Arayüz durumu ile n-n heteroeklemin büyütülmüş enerji bant diyagramı şekil 1.10 (b)'de

gösterilmiştir. İki arınma bölgesine sıkıştırılmış ince tabaka olduğu arayüz durumları farzedildi ve bu durumlar generasyon-rekombinasyon merkezleri olarak rol oynar.



Şekil 1.10 (a) Arayüz durumlu Ge-Si n-n heteroeklemin diyagramı
(b) Büyütülmüş arayüz bölgesi (Oldham ve Milnes,1972)

Heteroeklemin akım-gerilim karakteristikleri, arayüz durumlarının yoğunluğuna ve arayüzde süreksizliklere bağlı değişik mekanizmalar tarafından etkilenir. Örneğin, delikler için engeller elektronlardan çok daha yüksek ise, sonra akım tamamen elektronlardan meydana gelecektir. Yada eğer arayüz durumları yoğunluğu çok yüksek ise arayüzden generasyon-rekombinasyon akımı baskın olacaktır. Baskın (dominant) akım, eğer engel genişliği ince ise arayüz metal-yarıiletken kontak olarak rol oynarsa oluşabilir (Sze,1981).

1.6 Metal-Gözenekli Silisyum Yapıların Özellikleri

Yıllarca bilinen elektrokimyasal aşındırma yoluyla monokristalik silisyum maddelerinde, gözenekli silisyum tabakaları oluşturuldu. Önceki çalışmaların birçoğu gözenekli silisyumun çeşitli duyarlı aletlerdeki uygulamalarıyla ilgiliydi. Deneysel olarak gözlenen fotolüminesanstan dolayı, son zamanlarda monokristalik silisyum maddelerde gözenekli silisyuma gösterilen ilgi arttı. Fotolüminesans bilimsel yazılarda geniş bir şekilde tartışıldı. Elektronların kuantum sınırlaması ve kristal silisyum kafesindeki delikler öne sürüldü ve gözenekli silisyum tabakalarının fotolüminesans spektrumu başarılı bir şekilde açıklandı. Bir alternatif teori de fotolüminesansın farklı türlerde artacağını önerdi. Her iki teoriden çıkan sonuçların birçoğu, gözenekli silisyum tabakalarının nitelikleri, optik spektrum analizlerine dayalıdır. Açıkça görülmektedir ki bu araştırmalar fiziksel işlemleri anlamaya yönelmektedir. Özellikle önemli olan elektron ve delik geçiş proselerinin analizleridir. Son zamanlardaki çalışmaların bazıları, metal-gözenekli silisyum-silisyum eklemlerinin akım-gerilim eğrileri hakkındadır. Metal-gözenekli silisyum eklemleri Schottky eklemlerine benzer davranışlar göstermiştir. Gözenekli silisyumdaki yerdeğıştiren taşıyıcılarının geçiş mekanizmalarının açıklaması ve akım-gerilim karakteristikleri ile ilgili ayrıntılı çalışmalar mevcut değildir (Dimitrov,1995).

Dimitrov'un çalışmasında metal-gözenekli silisyum-monokristalik silisyum'un akım-gerilim karakteristiklerin analizleri yapıldı. Önemli özellik farklı nispi nemlerde, ters [gözenekli silisyum tabakası (numunenin tepesi) üstüne kaplanan metale uygulanan pozitif potansiyel] akım-gerilim eğrileri verilmiştir.

Silisyum aletlerden görülebilir ışık emisyonu etme ihtimali, yıllardır önemli bir hedef olarak düşünöldü. Geçmişte ve son yıllarda çeşitli yaklaşımlar denendi. Gözenekli silisyum, görülebilir ışık emisyonu için ümit verici malzeme olarak gösterildi (Lazarouk, 1996).

p-n kristal silisyum kavşığına ters kutuplu gerilim etki etmesinden elde edilen oda sıcaklığındaki ışık emisyonu ilk olarak 1955'te yazıldı. Her iki durumda ölçölen kuantum verimi % 10^{-5} 'i geçmedi (Lazarouk,1996).

1.7 Nemin Metal-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Özelliklerine Etkisi

1 m³ havadaki su buharının kütesine mutlak nem denir. Mutlak nem, havadaki su buharının yoğunluğuna eşittir ve havadaki su buharının yoğunluğu [$\rho_{s.b}$ (gr/m³)] ile belirlenir.

Kendi suyu ile denge durumunda bulunan buhar, doymuş buhar olarak tanımlanır. Doymuş buharın basıncı onun kimyasal bileşimine ve sıcaklığına bağlıdır. Nispi nem [N.N. (Relative Humidity, R_H)] mutlak nemin ve doymuş buhar neminin orantısı ile belirlenir

$$N.N. = \frac{\rho_{s.b}}{\rho_{d.b}} \%100 \quad (1.20)$$

Denkleminde, $\rho_{s.b}$ su buharının yoğunluğu, $\rho_{d.b}$ doymuş buharın yoğunluğudur. Böylece nispi nem (N.N.)

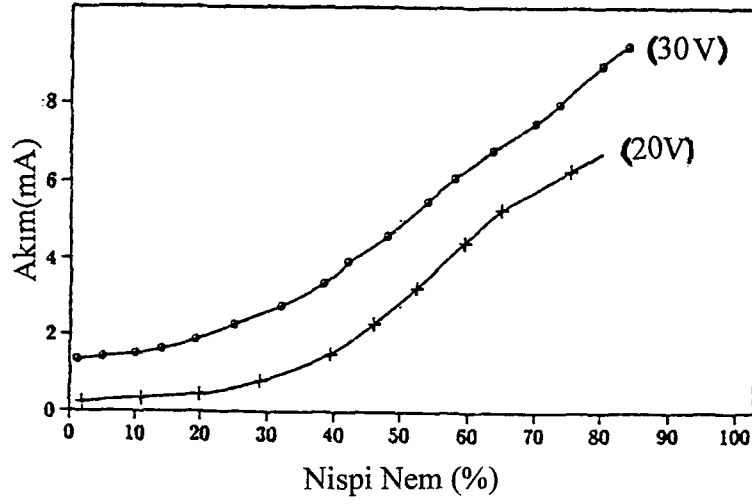
$$N.N. = \frac{m_{s.b}}{m_{d.b}} \%100 \quad (1.21)$$

olarak bulunur. Burada $m_{s.b}$ ve $m_{d.b}$ sırasıyla su buharının kütesidir ve doymuş buharın kütesidir.

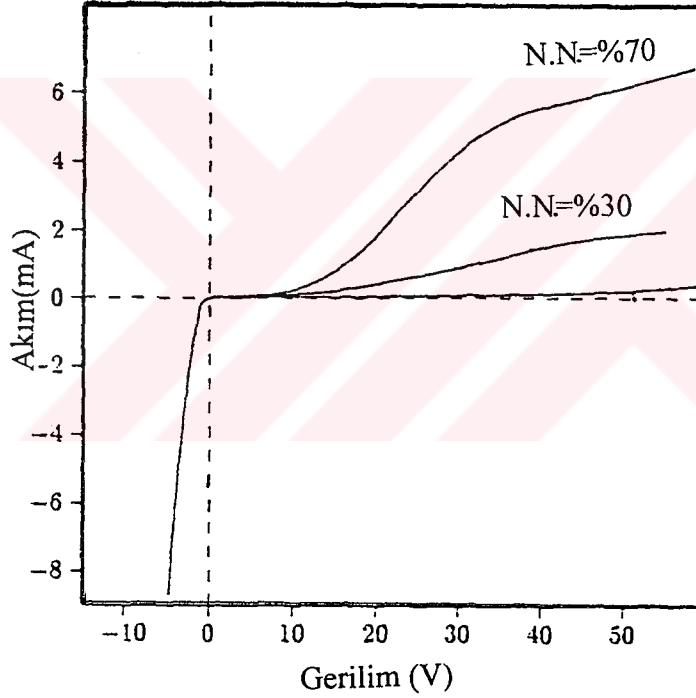
Gözenekli silisyumun lüminesans etkilerine bağlı bazı faktörler üzerinde çalışıldı ve gözenekli yapının geniş iç yüzey alanına bağlı birkaç model önerildi. Yüzey kimyası gözenekli silisyumun düzenleyici özellikleri üzerinde önemli rol oynar. Su ve alkolün büyük rolü vardır. Alkol içinde işlem gören ve daha az mesafede su buharında gözenekli silisyumun lüminesansının söndüğü yazılmıştır. Numuneler suya daldırıldığı zaman fotolüminesans enerjisinin daha kısa dalgalı boylarına doğru değiştiği ve fotolüminesans yoğunluğunun arttığı bilinmektedir. Gözenekli silisyumun fotolüminesans spektrumundaki değişiklik, su ile işlem görmesinden oluştu. Bu da gözenekli silisyumdaki kuantum kristallerinin büyüklüğündeki azalma ile açıklandı. Fakat Tamura (1993) gözlenen enerji değişikliğinin, beklenen nano-kristal boyutlarındaki gerçek azalmadan çok daha az olduğunu gösterdi. Böylece, yüzeyde kimyasal değişim sırasındaki sebep olduğu etki tartışıldı. Fotolüminesans pikinin daha uzun dalgalı boylarına doğru olan değişiklik, kuru numuneye üflenmesi ve iyonize olmayan suya batırılan gözenekli silisyumun bir sonucu olduğu Li (1992) tarafından bildirildi (Balagurov, 1996).

Fotolüminesans spektrum iki tane hemen hemen aynı aralıkla dizilmiş pikleri içerir. Onlar arasında enerji farkı ($\sim 0.15-0.2$ eV), spektral pozisyonlarına çok az bağlıdır. İki fotolüminesans piklerin şiddetlerinin oranı, numunenin gözenekliliğindeki değişikliklerle, tekdüze olarak değişir. Böylece çok gözenekli numunelerde sadece kısa dalgalı boyumlu pik gözlenirken, az gözenekli numunelerde uzun dalgalı boyumlu pik gözlenir. Gözenekli silisyum numunelerin su ile etkileşimi, ilk başta fotolüminesans pik şiddetinde küçük bir azalmaya neden olur ve sonra $0.7 \mu\text{m}$ değerinde yeni bir pik görünür. Bu değişiklik tahminen gözenekli nano-kristal silisyumun yüzeyindeki oksit tabakasıyla bağlantılıdır. Alkol içinde işlem gören gözenekli silisyumun ilk pik şiddeti düşer ve uzun dalgalı boyumlu pik bir dakikadan daha az sürede tamamen kaybolur. %1 gibi küçük miktarda alkol içeren su, yaklaşık $0.7 \mu\text{m}$ değerinde yeni şiddetli pik oluşumuna yöneltir (Balagurov, 1996).

Metal-gözenekli silisyum-silisyum yapıların ters akımları, ölçüm devresindeki nemliliğe duyarlı olur. Sağlanan koşullar altında hazırlanan geniş deliklere sahip numuneler, nispi neme (N.N.) bağlı olarak ters akıma güçlü bir bağımlılık gösterirler. Şekil 1.11'de gösterildiği gibi iki farklı potansiyel altında, nispi nemin %1'den %90'a artması, ters akımın artmasına sebep olur. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi ters akım-gerilim



Şekil 1.11 Metal-gözenekli silisyum-silisyum yapının ters akımının nispi neme bağımlılığı



Şekil 1.12 Farklı nispi nemlerde metal-gözenekli silisyum-silisyum yapının akım-gerilim karakteristikleri

karakteristiklerinin iki dikey yüzeyleri sadece birbirine paralel bir değişim gösterirler. Bundan dolayı, ters akımdaki nemin etkisi, metal-gözenekli silisyum-silisyum yapıda kafeste elektrikle yüklenmiş parçacıkların hareketlerine bağlı olmadığı sonucunu çıkartabiliriz. Bu gerçek gözenekli silisyumdaki suyun kemoabsorbsiyon ve sonra

fizikabsorbsiyon ile açıklanabilir. Su moleküllerdeki hidrojen çift bağla yüzeydeki hidroksillere bağlıdır ve bu nedenle serbest hareket edemezler (Dimitrov,1995).

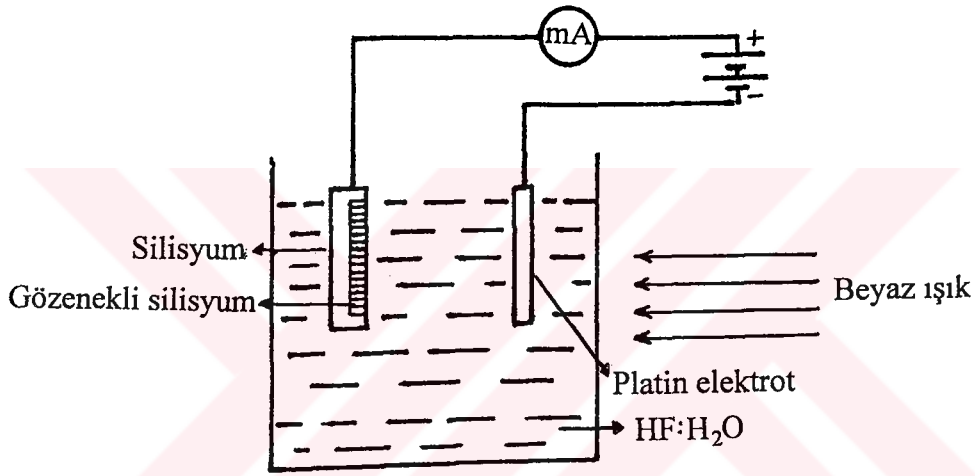
Farklı nemlerde metal–gözenekli silisyum–silisyum yapıların akım-gerilim karakteristikleri şekil 1.12’de gösterilmiştir. Yapının doğru yöndeki akımı neme duyarlı değildir. Doğru yöndeki akımın neme bağımlı olmaması, neme ve hidrojene duyarlı, bilinen diyotlardan ayrılan duyarlı fiziksel mekanizmalarını gösterir. Duyarlılık diyodun empedansın yüküne ve doğru yöndeki akımın yüküne bağlıdır. Güçlü bir şekilde neme bağlı yüklerin oluşturduğu metal-gözenekli silisyum-silisyum yapılarda ters akıma ve hatta yüksek neme rağmen, kapasitans verilen bir gerilim değerinde sabit kalır. Generasyon-rekombinasyon akımı nemin etkisi ile bağlantılıdır. Generasyon-rekombinasyon akımı, gözenekli silisyum tabakası ve metal-elektrot arasında oluşan Schottky fonksiyonunun boş-yük bölge yüzeyi ile ilişkilidir (Dimitrov, 1995).



2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Gözenekli Silisyumun ve Metal-Gözenekli Silisyum Yapıların Elde Edilmesi

Fotoelektrik kimyasal yöntemle, 1HF (%38-40 Hidroflorik asit):3H₂O (destile su) oranında hazırlanan çözelti elektrolit gibi kullanılarak, öz direnci 0.09 Ω .cm, kalınlığı yaklaşık 380 μ m olan Sb katkılı n-tipi monokristalik silisyumun yüzeyinde 10-20 μ m kalınlıkta mikrokristalik yapıya sahip gözenekli silisyum elde edildi (Şekil 2.1). Bu deneylerde devreden 15 dakika süreyle $I=15$ mA akım ve silisyum altlığı beyaz ışıkla ışınlama (50W “Ostram” lamba) verildi (Ömür,1999).



Şekil 2.1 Gözenekli silisyumun hazırlanması için kullanılan devre düzeni

İnce tabakalı gözenekli silisyumun monokristalik silisyum altlığından ayırmak için aşağıdaki yöntem kullanıldı. Sabit akım yoğunluğunda, belli anodizasyon süresinde gözenekli silisyum oluşturulduktan sonra, örnek çözelti içerisinden çıkarılmadan akım yoğunluğu 1-2 dakika yaklaşık 1000 mA/cm² kadar hızlı şekilde arttırıldı. Böylece altlığın yüzeyinden ince bir gözenekli silisyum tabakası ayrıldı. Bu filmin kalınlığı yaklaşık 10-20 μ m ve gözenekliliği %70'tir.

Gözenekli silisyum yapılması işleminden sonra örnekler çözeltiden çıkarıldı ve alkolle temizlendi. Elde edilen gözenekli silisyum örnekleri ultraviyole ışığın etkisi ile ilk anda homojen yeşil lüminesans, çok kısa süre sonra ise turuncu lüminesans verdiği gözlemlendi.

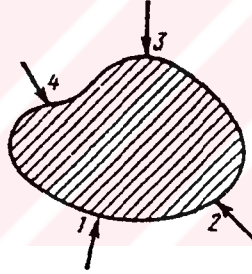
Metal (Ag,Cu)-gözenekli silisyum-silisyum yapılar, elektron bombardımanı ile vakumda (10^{-5} Torr) buharlaşma seti kullanılarak, Ag veya Cu filminin gözenekli silisyum yüzeyine buharlaştırılması ile gerçekleştirildi.

2.2 Özdirenç ve Yük Taşıyıcıların Konsantrasyonlarının Ölçümleri

Monokristalik silisyum altlığından ayrılmış gözenekli silisyum ince tabaka şeklindeki örneklerde özdirenç ve yük taşıyıcıların konsantrasyonu oda sıcaklığında Van der Pauw yöntemi ile ölçüldü (Caferov, 1998)

2.2.1 Van der Pauw Yöntemi ile Özdirenç Ölçümleri

Van der Pauw yöntemi, serbest formlu düzlemsel plaka şeklindeki örneklerin özdirenç ölçümlerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümler için, örnek kenarının dört noktasında omik kontaklar yapılır (şekil 2.2).



Şekil 2.2 Van der Pauw yöntemiyle özdirenç ölçümünde kontakların yerleştirilmesi

Önce 1 ve 4 kontaklarından akım (I_{14}) geçirilir, 2 ve 3 kontakları arası gerilim farkı (V_{23}) ölçülür ve aşağıdaki formülle direnç (R_1) hesaplanır

$$R_1 = \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (2.1)$$

Daha sonra, 1 ve 2 kontaklarından akım (I_{12}) geçirilir, 3 ve 4 kontakları arası gerilim farkı (V_{34}) ölçülür, ve R_2 direnci

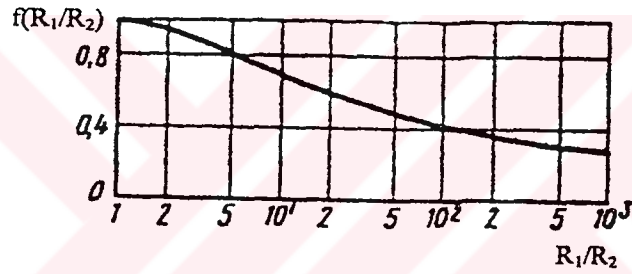
$$R_2 = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (2.2)$$

eşitliğinden bulunur.

Van der Pauw yönteminin teorisine göre, direncin bu iki değeri ve örneğin öz direnci arasındaki ilişki

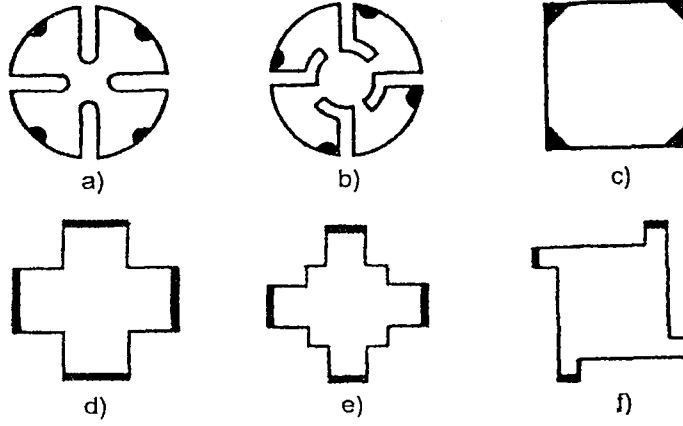
$$\rho = \frac{\pi b}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f(R_1/R_2) \quad (2.3)$$

ile verilir. Burada b örneğin kalınlığı, $f(R_1/R_2)$ düzeltme fonksiyonudur. R_1 ve R_2 dirençlerinin oranı ile bağlı olan düzeltme fonksiyonunun grafiği şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 $f(R_1/R_2)$ düzeltme fonksiyonunun grafiği

R_1/R_2 oranının birden çok az ($\pm 10\%$) farklı olduğu durumda, bu yöntemle örneklerin öz direnci yüksek doğrulukla ölçülmektedir. Kontakların alanı büyüktür ve örneğin kenar yüzeyinden düzlem yüzeyine yayıldığı durumda, öz direnç ölçü hataları artmaktadır. Bu hataların sebeplerini ortadan kaldırmak veya azaltmak için, özel geometrik formlu örnekler kullanılmaktadır (şekil 2.4).



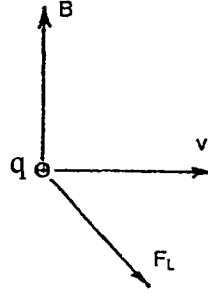
Şekil 2.4 Van der Pauw yöntemi ile öz direnç ölçümlerinde kullanılan örneklerin geometrik formları

Bu ölçümlerde gözenekli silisyum tabakası yalıtkan altlığın üzerine yerleştirildikten sonra, dört kenarından gümüş macun ile yalıtkan altlığa yapıştırıldı. Gümüş macunla yapıştırılan kısımlar aynı zamanda dört omik kontak gibi kullanıldı (Şekil 2.2). Öz direnç hesaplamaları için (2.3) formülü, şekil (2.3)'teki grafikten yararlanıldı.

2.2.2 Yük Taşıyıcılarının Konsantrasyonunun Ölçümleri

1879 yılında Hall, altın örnekte elektrik akımı geçirirken, aynı anda bir magnetik alana yerleştirildiğinde, örneğin iki zıt kenar yüzeyi arasında bir gerilim oluştuğunu keşfetmiştir. Bu olay, Hall olayı olarak tanımlanır ve magnetik alanda hareket eden elektrik yüklerine Lorentz kuvvetinin etkisi ile ilgilidir (Şekil 2.5).

Şekil 2.5, pozitif yüklü serbest parçacığın manyetik alanda hareketi esnasında, parçacığın hareketine etki gösteren Lorentz kuvvetinin (F_L) yönünü göstermektedir. Lorentz kuvvetinin değeri ve yönü, parçacığın hızı (v) ve magnetik indüksiyonun (B) vektör çarpımı ile belirlenir.

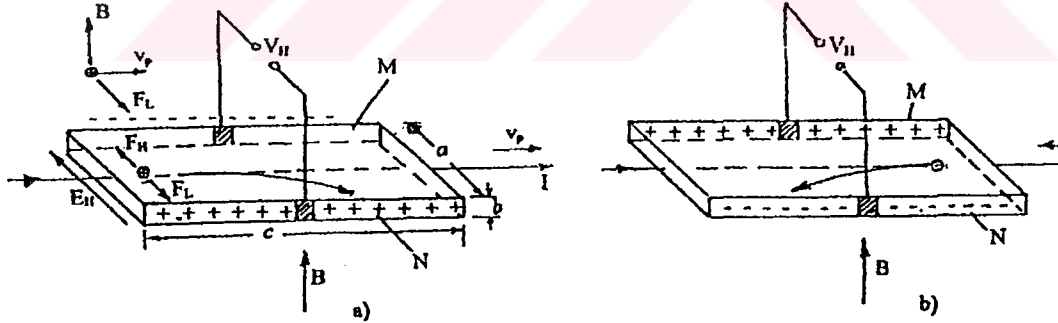


Şekil 2.5 Magnetik alandaki (B), pozitif yüklü parçacığın hızının (v) ve Lorentz kuvvetinin (F_L) yönlerinin gösterimi

$$\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

Şimdi, yarıiletken içindeki yük taşıyıcılarına, magnetik alanda Lorentz kuvvetinin etkisini göz önüne alalım. Önce p-tipi yarıiletkende Hall olayını inceleyelim. p-tipi yarıiletkende akımın ve pozitif yüklü deliklerin hareket yönleri aynıdır (Şekil 2.6a).

Yarıiletkene, şekil 2.6a'da gösterildiği gibi magnetik alan uygulandığında, pozitif yüklü deliklere Lorentz kuvvetinin etkisi aşağıdaki ifade ile verilir



Şekil 2.6. (a) p-tipi ve (b) n-tipi yarıiletkende Hall olayı

$$\vec{F}_L = +e (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.5)$$

burada (+e) deliklerin yüküdür. Deliklerin hızı (v), magnetik indüksiyon vektörüne (B) dik olması nedeniyle (2.5) denklemi

$$F_L = e v B \quad (2.6)$$

yazılabilir.

Magnetik alanda, delikler Lorentz kuvvetinin etkisi ile örneğin N yüzeyi yönünde hareketlenirler. Bu yüzeye karşı, M yüzeyinde ise negatif yüklü parçacıklar toplanırlar. Böylece, yarıiletkenin N ve M yüzeylerinde yük dengesi bozulur ve bu yüzeyler arası Hall gerilimi (V_H) veya Hall elektrik alanı (E_H) oluşur. Pozitif yüklü deliklere etki gösteren Hall alanının kuvveti F_H ile Lorentz kuvveti F_L birbirine zıt yöndedir (Şekil 2.6a). Bu kuvvetler eşitlendiğinde ($F_H=F_L$), başka yük taşıyıcıları toplanması kenar M ve N yüzeylerinde son bulur ve magnetik alan başka yük taşıyıcıların hareketine etki göstermez.

Lorentz kuvveti ve Hall alanının kuvveti denge durumunda

$$F_L = F_H \quad (2.7)$$

$$e v B = e E_H \quad (2.7a)$$

olur. Burada (v) deliklerin ortalama ısısal hızıdır. Hall alanı (E_H) ve Hall gerilimi (V_H) aşağıdaki ifade ile birbirine bağlıdır.

$$E_H = \frac{V_H}{a} \quad (2.8)$$

Burada a örneğin Hall alanı yönündeki boyutudur. Akım yoğunluğunun

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{ab} = p e v \quad (2.9)$$

ile verildiğini biliyoruz. Burada p deliklerin konsantrasyonudur.(2.9) denkleminde bulunan deliklerinin hızının

$$v = \frac{I}{a b p e} \quad (2.10)$$

ve (2.8) ifadesi ile verilen Hall alanını, (2.7a) denkleminde yerine konması ile, örneğin M ve N yüzeyleri arasındaki Hall gerilimi için

$$V_H = \frac{1}{p e} \frac{I B}{b} \quad (2.11)$$

ifadesi bulunur. Burada b örneğin magnetik alan yönündeki boyutudur (örneğin kalınlığıdır).

(2.11) denkleminde görüldüğü gibi Hall gerilimi deliklerin konsantrasyonu (p) ve örneğin kalınlığı (b) ile ters orantılıdır. (2.11) denklemi başka bir şekilde

$$V_H = R_H \frac{B I}{b} \quad (2.12)$$

olarak yazılabilir. Hall sabiti R_H

$$R_H = \frac{1}{p e} \quad (2.13)$$

ile verilebilir.

Şimdi, Hall olayını n-tipi yarıiletkende inceleyelim. n-tipi yarıiletken, elektronların hareket yönü örnekten geçen akım yönüne terstir (Şekil 2.6b). Bu nedenle magnetik alanda, elektronlar N yüzeyinin etrafında toplanırlar ve Hall alanının (E_H) yönü örneğin M yüzeyinden N yüzeyine doğru yönlenmektedir.

n-tipi yarıiletken M ve N yüzeyler arası oluşan Hall gerilimi şu

$$V_H = - \frac{1}{n e} \frac{I B}{b} \quad (2.14)$$

veya

$$V_H = R_H \frac{I B}{b} \quad (2.15)$$

şeklinde verilir. Burada n elektronların konsantrasyonudur ve Hall sabiti

$$R_H = -\frac{1}{n e} \quad (2.16)$$

ile verilir. n-tipi yarıiletkenlerde Hall sabitinin işareti negatiftir.

Böylece, yarıiletkenlerde Hall sabitinin işareti çoğunluk yük taşıyıcılarının işareti ile belirlenir: (“-”) negatif işaret n-tipi iletkenliği ve (“+”) pozitif işaret p-tipi iletkenliği göstermektedir. Hall sabitinin daha doğru ifadesi (A) Hall faktörü olmak üzere

$$R_H = \frac{A}{p e} \quad (2.17a)$$

$$R_H = -\frac{A}{n e} \quad (2.17b)$$

şeklinde verilir.

(2.17) denkleminde görüldüğü gibi, Hall sabiti (R_H) yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ve yük taşıyıcılarının işaretini belirlemektedir. Hall sabitinin, Hall gerilimi ile bağıntısı şu şekilde yazılabilir.

$$R_H = \frac{V_H b}{I B} \quad (2.18)$$

Böylece, Hall sabitini (veya yük taşıyıcılarının konsantrasyonunu) bulmak için, yarıiletken örnekten geçen akım, Hall gerilimini, magnetik indüksiyon ve örneğin kalınlığını ölçmek lazımdır.

Yarıiletkenlerde Hall sabitini ölçmek için, iki yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde ölçümler dikdörtgen formlu örnekte yapılır, ikinci yöntemde ise serbest formlu örnek kullanılabilir (Van der Pauw yöntemi).

Katkılı yarıiletken için, Hall sabiti, yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ve mobilitesi

$$R_H (\text{cm}^3\text{C}^{-1}) = 10^8 \frac{V_H b}{I B} \quad (2.19)$$

$$n, p (\text{cm}^{-3}) = \frac{6.25 \times 10^{18}}{R} \quad (2.20)$$

$$\mu (\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}) = R \sigma \quad (2.21)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Burada birimler şudur: V(mV), I(mA), b(cm), B(Gauss).

Serbest formlu düzlemsel plakalarda Hall gerilimi Van der Pauw yöntemiyle ölçülmektedir. Örneğin kenarlarında dört kontak bulunmaktadır: 1 ve 3 kontaklarından elektrik akımı (I_{13}) geçer, 2 ve 4 kontakları arası gerilim (V_{24}) ölçülür (Şekil 2.2). Bu kontaklar arası gerilim iki defa ölçülür: magnetik alan (B) uygulanmadığı [$V_{24}(0)$] ve örneğin yüzeyine dik yönde magnetik alan (B) uygulandığında [$V_{24}(B)$]. Örnekte magnetik alan etkisiyle oluşan Hall gerilimi, ölçülen bu iki gerilim farkı ile belirlenir ve

$$V_H = V_{24}(B) - V_{24}(0) = R_H \frac{I_{13} B}{b} \quad (2.22)$$

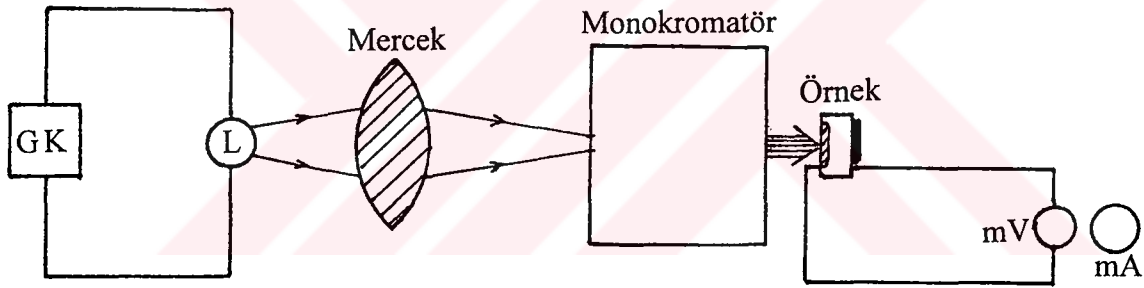
olarak yazılabilir. Burada b örneğin magnetik alan yönündeki boyutudur (örneğin kalınlığıdır).

Hall gerilimi (V_H), örnekten geçen akım (I_{13}), uygulanan magnetik alan (B) ve örneğin kalınlığı (b) ölçümlerinden, (2.22) veya (2.19) formülleri kullanılarak Hall sabiti hesaplanabilir, ve sonra (2.20) denkleminde yük taşıyıcılarının konsantrasyonu bulunur.

Serbest formlu örnekte Hall gerilimi ölçümlerinde, öz direnç ölçümlerindeki gibi, omik kontaklar çok küçük alanlı olmalı ve örneğin tam kenarlarına yerleşmelidirler. Kontak alanı ve kontakların örnekte yerleşmesi ile ilgili hataları küçültmek için, Hall ölçümlerinde, öz direnç ölçümlerindeki gibi, şekil 2.4’de gösterilen özel formlu örnekler kullanılmaktadır (Caferov,1998)

2.3 Fotoiletkenliğin Spektral Dağılım Ölçümleri

Gözenekli silisyum–silisyum yapıların fotoduyarlılık spektral dağılım ölçümleri için, şekil 2.7’de gösterilen devre kullanıldı.



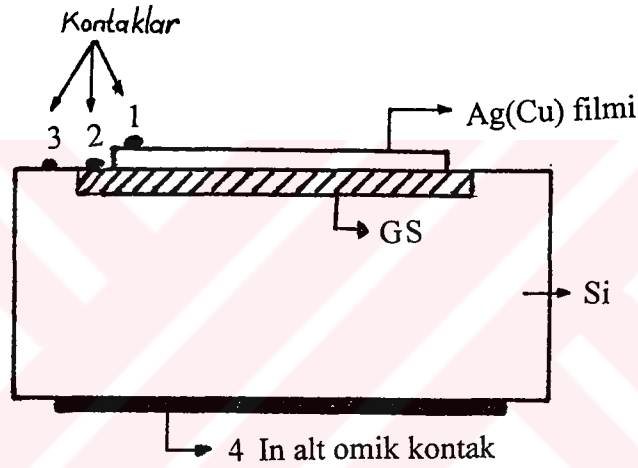
Şekil 2.7 Örneğin fotoduyarlılık ölçümleri için kullanılan devrenin şeması (GK güç kaynağıdır, L lambadır.)

Bu spektrumlar, 300-1000 nm dalgaboyu arasında Oriel (1/8 m)-77250 monokromatör kullanılarak incelendi. 50 W “Osram” lamba ışık kaynağı olarak kullanıldı. Lambadan çıkan ışın ayna ile monokromatörün girişine odaklandı. Monokromatörden çıkan monokromatik ışık gözenekli silisyumun yüzeyine gönderildi. Monokromatik ışığın etkisiyle gözenekli silisyum yapıda oluşan fotoakımın (fotogerilimin) spektral dağılımı (Thurby 1503 Digital Multimeter) ile ölçüldü ve sonra fotogerilim (fotoakım)-dalga boyu eğrisi çizildi.

2.4 Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümleri

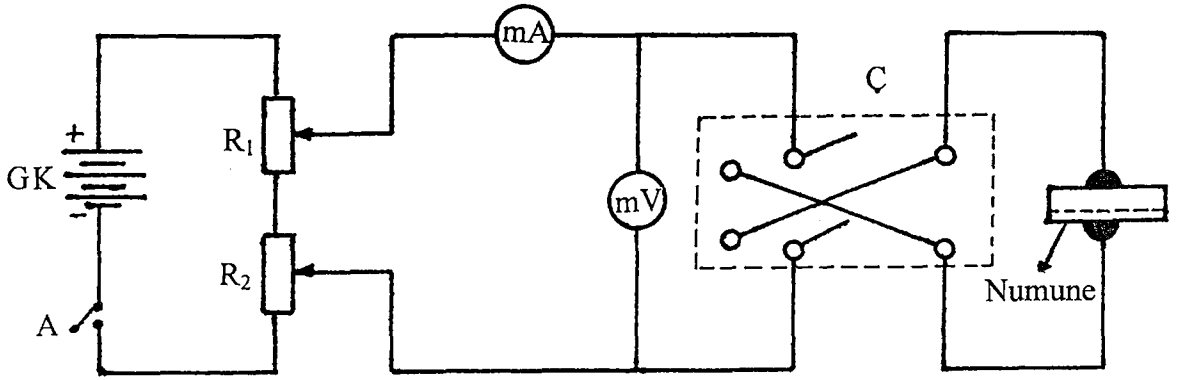
Metal-silisyum yapıların akım-gerilim karakteristiklerin ölçümünde, metal-gözenekli silisyum ve gözenekli silisyum-silisyum kontakların rolünü belirtmek için örneğe dört kontak yapıldı (Şekil 2.8).

Gözenekli silisyuma (2), silisyuma (3 üst kontak ve 4 alt kontak) eritme yöntemiyle İndium omik kontak yapıldı. Metal(Ag,Cu)-gözenekli silisyum eklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi için 1-2 kontakları yapıldı. Gözenekli silisyum – silisyum eklemlerin karakteristikleri için 2-4, metal –gözenekli silisyum –silisyum eklemleri için 1-4 kontakları kullanıldı.



Şekil 2.8 Metal-silisyum yapıların akım-gerilim karakteristiklerinin ölçümleri için örneğe yapılan kontaklar

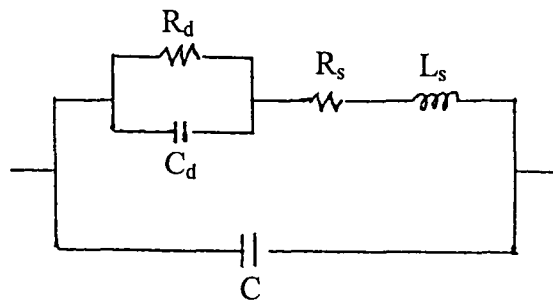
Akım-gerilim karakteristikleri, karanlık ve $P=100 \text{ mW/cm}^2$ ışık şiddetinde aydınlık ortamda oda sıcaklığında ölçüldü. Akım-gerilim ölçme sisteminin devre şeması şekil 2.9’da gösterilmiştir. Bu devrede akım ve gerilim ölçümleri için Thurlby 1503 Digital Multimeter kullanıldı.



Şekil 2.9 Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi (GK güç kaynağı, A anahtar, Ç akım yönünü değiştiren çevirici, R_1 ve R_2 potansiyometredir)

2.5 Kapasitans-Gerilim Ölçümleri

Schottky diyotuna dışarıdan gerilim uygulandığında, kontağın hacimsel yük bölgesinin kalınlığı veya geçiş bölgesinin kalınlığı değişmektedir. Diyot doğru yönde kutuplanırsa, geçiş bölgesinin kalınlığı ve direnci azalmaktadır. Ters yönde uygulanan gerilim, geçiş bölgesinin kalınlığını ve direncini büyötmektedir. Schottky diyotuna uygulanan gerilimin etkisiyle, geçiş bölgesindeki hacimsel yük değişmektedir. Dolayısıyla, Schottky kontağın kapasitansı, gerilim ile değişen bir aygıt gibi kendini göstermektedir.



Şekil 2.10 Schottky diyotun eşdeğer şeması

Şekil 2.10 Schottky diyotun eşdeğer şemasını göstermektedir. Diyotun direnci (R_d) ve kapasitansı (C_d) birbirine paralel olarak birleşmektedir. Diyot bazındaki omik kontaklarının dirençleri, seri direnç olarak (R_s) gösterilmektedir. Diyot indüktansı da (L_s)

seri olarak birleşmektedir. Devre geometrisinden meydana gelen kapasitans (C), diyota paralel birleşmektedir.

Schottky diyotun engel kapasitansını, dışarıdan uygulanan gerilimin etkisinde inceleyelim. Denge durumunda (dışarıdan gerilim uygulanmadığında $V=0$), geçişteki yüklerin dağılımı metal ve yarıiletkenin çıkış işlerinin farkı ($e\phi_K=\Phi_m-\Phi_n$) ile belirlenmektedir. Schottky diyotuna gerilim uygulandığında, geçiş bölgesine düşen potansiyel

$$\phi = \phi_K - V \quad (2.23)$$

ile verilir. Burada $V>0$ doğru gerilim, $V<0$ ters gerilimdir. Bu ifadeyi, (1.19) denkleminde yerine koyarsak,

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 e n}{2 (\phi_K - V)}} \quad (2.24)$$

denklemini elde ederiz. (2.24) denkleminde $d(C)^{-2}/dV$ türev işlemi yapılırsa,

$$n = \frac{2}{\epsilon \epsilon_0 e S^2} \left[\frac{d}{dV} \left(\frac{1}{C^2} \right) \right]^{-1} \quad (2.25)$$

bulunur. (2.25) formülünden görüldüğü gibi, kapasitansın gerilime bağımlılığı $(1/C^2) - V$ skalada çizilir ve grafiğin eğimi bulunarak, Schottky diyotun yarıiletken bölgesinde elektronların konsantrasyonunu hesaplamak mümkündür. Schottky diyotun kapasitans-gerilim eğrisinden ϕ_K 'ın değeri yani metal ve yarıiletkenin çıkış işlerinin farkı ($e\phi_K=\Phi_m-\Phi_n$) belirlenmektedir

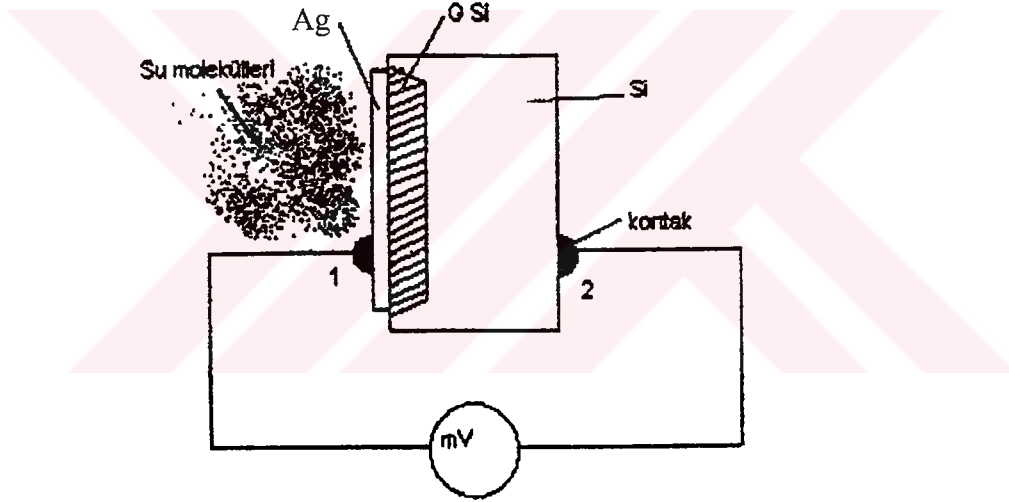
Metal – gözenekli silisyum – silisyum yapıların kapasitans-gerilim karakteristikleri LF Impedance Analizer (Hewlett Packard) aleti kullanılarak incelendi. Kapasitans-gerilim ölçümlerinde eklemdeki yüzey durumlarının etkisini azaltmak için, ölçümler yüksek frekanslarda (3-5 MHz) gerçekleştirildi. Bu ölçümlerden eklemdeki hacimsel yük bölgesinin kalınlığı

$$L_o = S \frac{\epsilon \epsilon_o}{C} \quad (2.26)$$

formülü kullanılarak elde edildi. Burada C gerilimin uygulanmadığı durumda kontağın kapasitansı (Farad), $\epsilon_o=8.85 \times 10^{-14}$ F/cm elektrik sabiti, $\epsilon =12$ silisyumun dielektrik katsayısı, S kontağın alanı (cm^2), L_o eklemin kalınlığıdır (cm).

2.6 Akım – Gerilim Karakteristiklerinin Nem Ortamında Ölçümleri

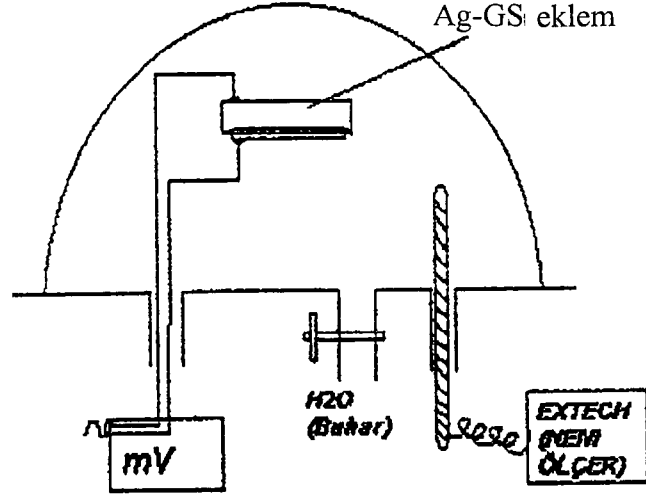
Metal-gözenekli silisyum kontakların arasında nemin etkisiyle (yada su buharı moleküllerinin Ag yüzeyine çarpışmasıyla) elektrik gerilimi oluşmaktadır. Bu çalışmada ortamın nispi nem ölçümleri “Extech” (444701 Hygro-Thermometer) nem ve sıcaklık ölçer ile yapıldı. Nemin etkisiyle 1-2 kontaklar arasında gerilim oluşmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Metal – gözenekli silisyum nem ölçerin şematik gösterimi

Farklı örneklerde gerilimin değerleri 20-200 mV aralığında neme bağlı olarak değişim gösterdi. Metal-gözenekli silisyum yapıların kalibrasyonu (yeni gerilim-nispi nem eğrisinin elde edilmesi) Hygro-thermometer ve gerilim aletleri ile yapıldı (Şekil 2.12). Bunun için Ag-gözenekli silisyum nem ölçer, cam fanusun altına yerleştirildi. Buraya, su buharı bir vana ile kontrol edilerek istenilen oranda gönderildi. Fanusun altındaki ortamı, nem değişimini dışarıdan gönderilen su buharının yoğunluğu belirlemektedir. Bir yandan ortamdaki nem değeri (Extech-44701) nem ölçer ile ölçülürken, diğer yandan gümüş-

gözenekli silisyum eklemin 1-2 kontaklar arasında meydana gelen gerilim değerleri voltmetre ile ölçüldü. Elde edilen veriler kullanılarak çizilen gerilim-nispi nem grafiği eklemin kalibrasyonunu ifade etmektedir. Nispi nem ölçümlerinde hata $\pm \%3$ 'tür.



Şekil 2.12 Metal-gözenekli silisyum nem ölçerin kalibrasyonu için kullanılan devrenin şematik gösterimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Elektriksel Özellikleri

Bu çalışmada gözenekli silisyum tek kristal n-tipi silisyum üzerinde hazırlanmıştır. Antimon (Sb) ile katkılanmış silisyumun öz direnci ve elektron konsantrasyonu Van der Pauw yöntemi ile ölçüldü (Bölüm 2.2.1). Öz direnç ölçümlerinde (2.3) formülü kullanıldı ve $\rho=0.97 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ olarak elde edildi. Elektron konsantrasyon ölçümlerinde (2.20) formülü kullanılarak konsantrasyonunun değeri $n=1.34 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçüldü. İlk kez, altlıktan ayrılmış ince tabaka şeklinde gözenekli silisyumun Van der Pauw yöntemi ile yük taşıyıcıların konsantrasyonu ve mobilitesi ölçüldü. Bunun için altlıktan ayrılmış $10 \mu\text{m}$ kalınlıklı gözenekli silisyum tabakası yalıtkan plaka üzerine yerleştirildi ve dört kenarına Ag macun kullanılarak omik kontak yapıldı. Öz direnç ve konsantrasyon ölçümleri yapıldı. Gözenekli silisyum tabakanın öz direnç ve delik konsantrasyonu sırasıyla $\rho=1.8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ve $p=9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçüldü. Bu değerler ve gözenekli silisyumda yük taşıyıcıların mobilitesi aşağıdaki formül

$$\mu = \sigma R \quad (3.1)$$

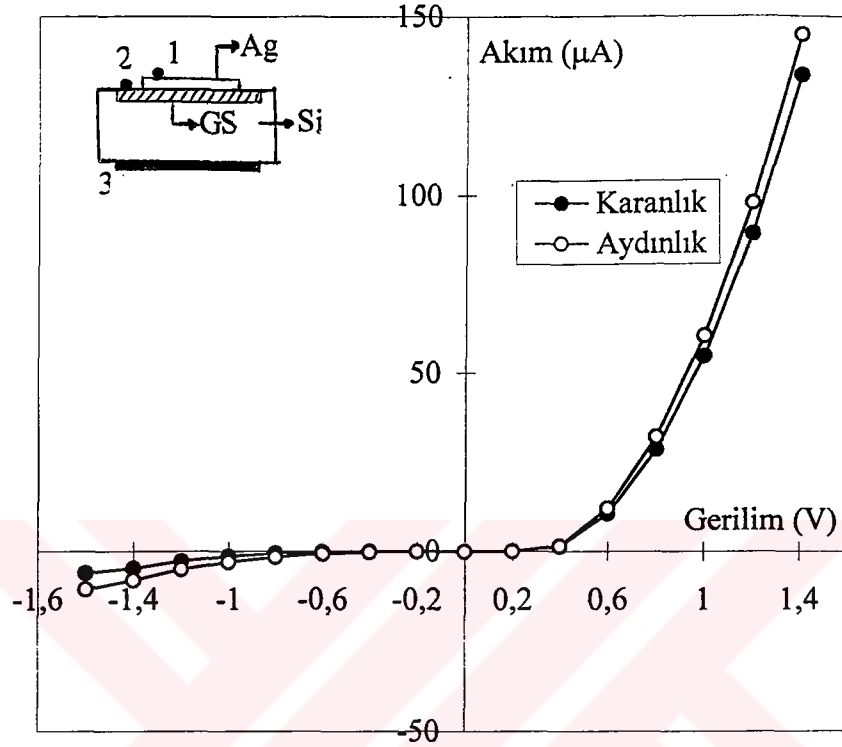
kullanılarak (Burada $\sigma=1/\rho$ iletkenliktir ve $R=6.5 \times 10^5 \text{ cm}^3 \text{C}^{-1}$ Hall sabitidir) $\mu=3.6 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplandı. Hall ölçümlerinde silisyumun iletkenlik tipi p-tipi olarak ölçüldü.

Böylece, silisyum altlığından ayrılmış ince gözenekli filminin ($10 \mu\text{m}$) elektrik karakteristikleri $p=9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $\rho=1.8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu=3.6 \times 10^{-1} (\text{cm}^2/\text{V.s})$ 'dir.

3.2 Ag– Gözenekli Silisyum Yapıların Akım-Gerilim Karakteristikleri

Metal (Ag)–gözenekli silisyum(G.S)–silisyum yapılar buharlaştırma yöntemi kullanılarak hazırlandı. Üç omik kontak (1,2,3) yapıldı ve bu kontaklar kullanılarak Ag(1)–G.S(2) eklemin, Ag(1) – Si(3) eklemin ve G.S(2) – Si (3) eklemin akım-gerilim karakteristikleri incelendi (şekil 3.1). 1-2,1-3,2-3 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri karanlık,

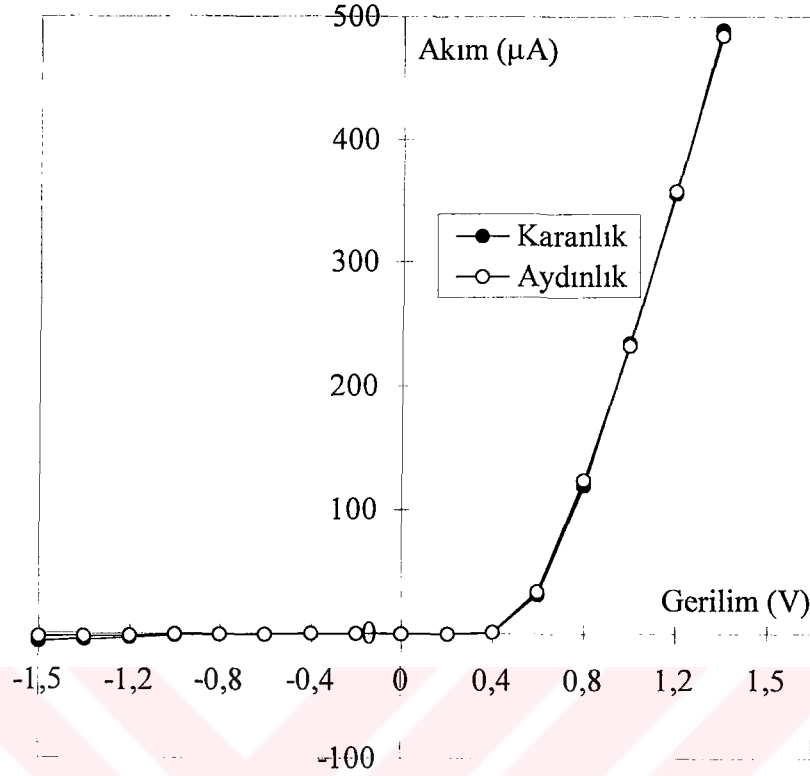
aydınlık ve nem şartlarında ölçüldü. Normal şartlar altında [Nispi Nem (N.N.) %65] ölçülen 1-2, 1-3, 2-3 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri şekil 3.1, şekil 3.2, şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1 Ag-GS-Si yapının 1-2 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri (karanlık ve aydınlıkta)

Şekil 3.1’de Ag-GS-Si eklemine Ag(1)-GS(2) eklemine karanlık ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri gösterilmiştir. Bu ölçümlerde doğru yön akımı, gümüş filmine güç kaynağın “+” kutbunun birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Aydınlık ölçümleri $P=100 \text{ mW/cm}^2$ beyaz ışık altında gerçekleştirildi. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi Ag-GS eklemine karakteristiği doğrultma özelliğine sahiptir. Bu eklemine doğrultma katsayısı, yani akımın doğru ve ters yönlerdeki değerlerinin (eşit değerli doğru ve ters gerilim $V=1 \text{ V}$ için) oranı $K=40$ ’dır. Işığın etkisi şekil 3.1’de görüldüğü gibi küçüktür.

Şekil 3.2’de Ag(1)-Si(3) eklemine karanlıkta ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristikleri verildi. Bu iki karakteristik yaklaşık üst üste gelmektedir. Bu eklem için doğrultma katsayısı $K=196$ ’dır.



Şekil 3.2 Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaktlar arası akım-gerilim karakteristikleri (karanlık ve aydınlıkta)

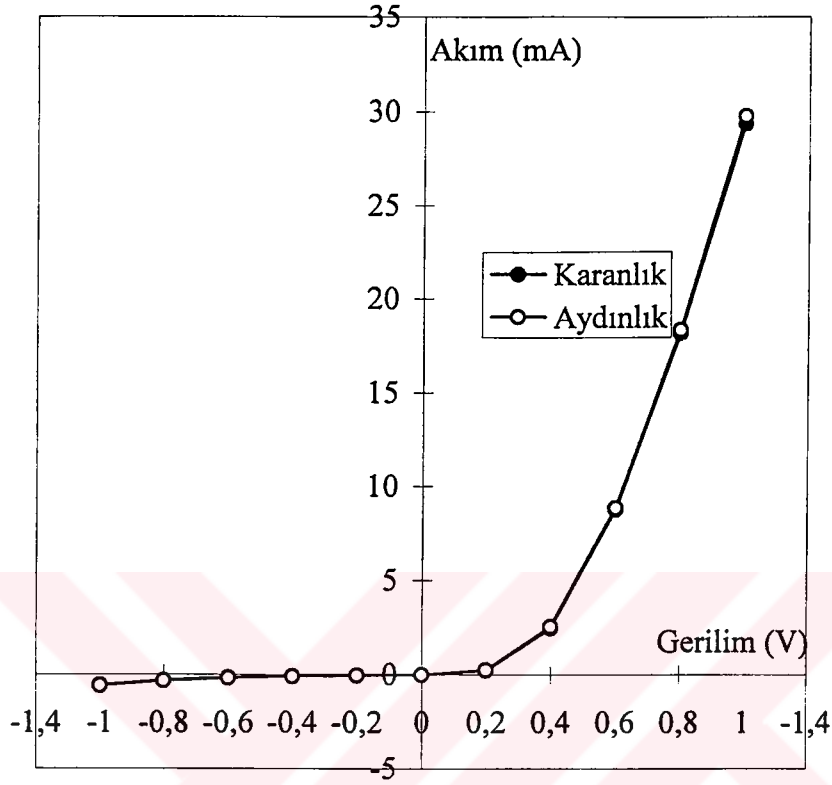
Şekil 3.3'te GS(2)-Si(3) eklemnin karakteristikleri gösterilmiştir. Bu eklem ışığa duyarlıdır ve doğrultma katsayısı $K=54$ 'tür.

Bilinmektedir ki, eklemde büyük doğru akım geçerken, eklem düşen gerilim, kontak potansiyeller farkına yaklaşır ve bu durumda

$$V = \phi_K + IR_b \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir (Caferov,1998). Burada R_b eklem bazının direncidir. Böylece eklemde büyük akım geçerken, I-V karakteristiklerinde lineer bölge görülmektedir (şekil 3.1, şekil 3.2, şekil 3.3). Bu lineer bölgenin uzantısının V-ekseni ile kesintisi ($I=0$ için), kontak potansiyeller farkını (ϕ_K) belirler.

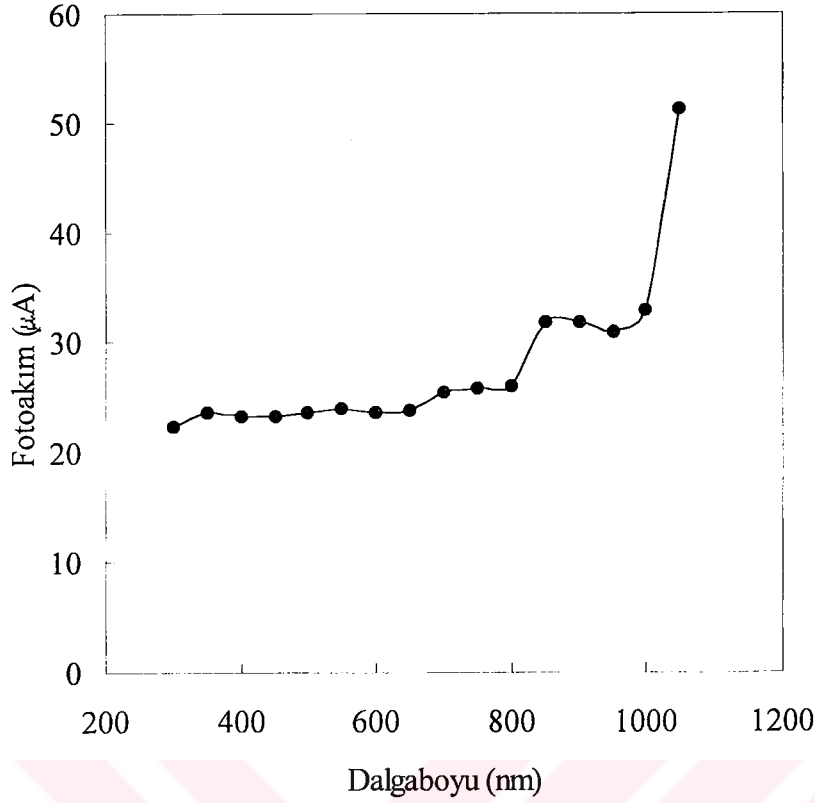
Ag(1)-GS(2), GS(2)-Si(3) ve Ag(1)-Si(3)'ün I-V doğru yön karakteristiklerinde bulunan kontak potansiyeller farkının değerleri seri olarak $\phi_k=0.60$ V; 0.45 V ve 0.75 V'tur.



Şekil 3.3 Ag-GS-Si yapının 2-3 kontaklar arası akım-gerilim karakteristikleri (Karanlık ve aydınlıkta)

3.3 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Fotoduyarlılığının Spektral Dağılımı

Ag-GS-Si yapıda (1-3 kontaklar arası) fotoakımının 300-1100 nm dalgaboyu aralığında spektral dağılımı şekil 3.4'de gösterilmiştir. Bu spektrumda eklemin iki özelliği gözükmemektedir: Fotoduyarlılığın yaklaşık $\lambda_1=800$ nm ve $\lambda_2=1100$ nm dalgaboyunda artmasıdır. $\lambda_1=800$ nm (1.55 eV) kısa dalgaboyundaki artış gözenekli silisyuma ve $\lambda_2=1100$ nm (1.1 eV) uzun dalgaboyundaki artış silisyuma bağlı olabilir.

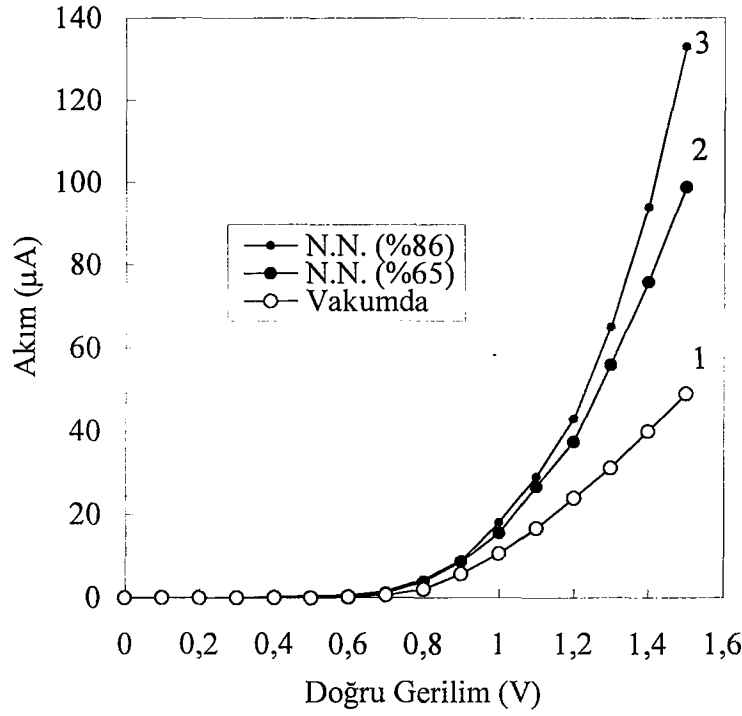


Şekil 3.4 Ag-GS-Si yapının (1-3 kontaklar) fotoakımının spektral dağılımı

3.4 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Akım-Gerilim Karakteristiklerine Nemin Etkisi

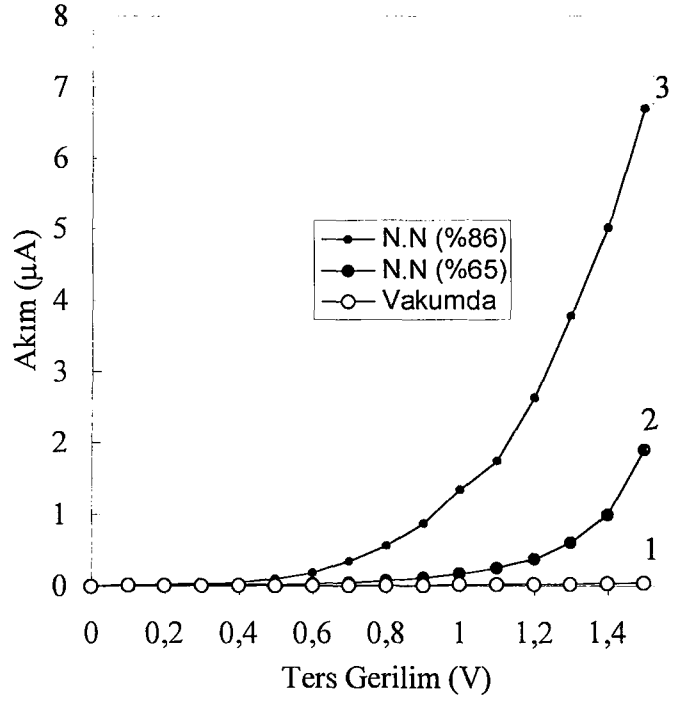
Ag-GS-Si yapıların akım-gerilim karakteristikleri kontrollü nem şartında 1-2, 1-3 ve 2-3 kontaklar arasında incelendi. Bu incelemelerde nemin etkisi 1-2 ve 1-3 kontaklarda görüldü ve en çok 1-3 kontakların karakteristiklerinde meydana çıkmıştır. Şekil 3.5’de Ag-GS-Si yapının doğru yöndeki akım-gerilim karakteristikleri (1-3 kontaklar arası) üç farklı nem şartında verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi belli bir gerilimden sonra ($V > 0.6$ V) nispi nem arttıkça doğru akım artmaktadır.

Şekil 3.5’den elde edilen kontak potansiyeller farkının değerleri, nem arttıkça [1-Vakum (10^{-2} Torr), 2- %65 N.N., 3- %86 N.N.] artmaktadır ($\phi_{K1}=0.90$ V ; $\phi_{K2}=0.95$ V ; $\phi_{K3}=1.0$ V).



Şekil 3.5 Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası farklı nem ortamında doğru akım-gerilim karakteristikleri [1-Vakum (10^{-2} Torr), 2- %65 N.N., 3- %86 N.N.]

Şekil 3.6'da aynı eklem için ters akım-gerilim karakteristikleri verilmiştir. Ters yön akımının nemle değişimi (doğru yön akımına karşı, şekil 3.5) daha keskindir. Örnek olarak $V=-1.5V$ 'da %86 N.N.'de ters akım(vakumdaki ters akıma karşı) 170 defa artmaktadır (%86 N.N.'de $I=6.7 \mu A$, Vakumda $I=40 nA$).



Şekil 3.6 Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası farklı nem ortamında ters akım-gerilim karakteristikleri [1-Vakum (10^{-2} Torr), 2- %65 N.N., 3- %86 N.N.]

Metal-yarıiletken ve p-n eklem akım-gerilim karakteristiğinin denklemi

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{\beta k T}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

olarak ifade edilebilir. Burada β ideallik faktörüdür. İdeallik faktörünü bulmak için

$$\beta = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln J)} \quad (3.4)$$

formülünü kullanmak gerekir.

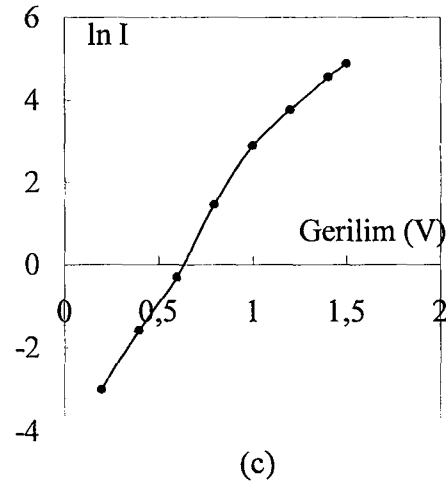
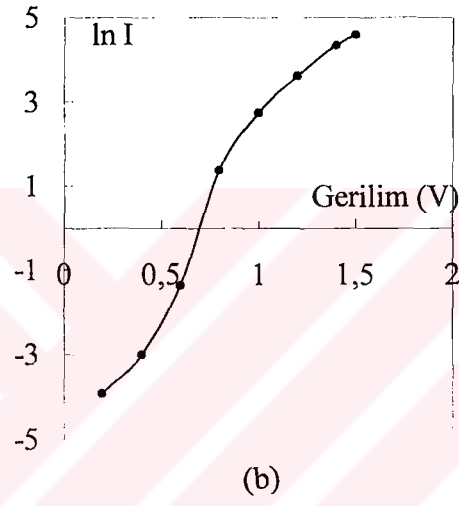
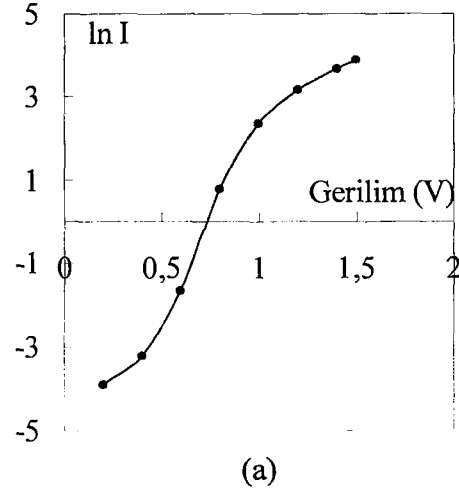
Şekil 3.7’de Ag-GS-Si yapının (1-3 kontaklar arası), şekil 3.5’de gösterilen doğru yön karakteristikleri $\ln I$ -V koordinat sisteminde çizilmiştir. Şekil 3.7’de gösterilen her üç nem

şartı için, $\ln I$ - V eğrileri yaklaşık iki eğim ile karakterize edilir: (0.4-1) V bölgesindeki $\ln$ - V grafiğin eğimi, (1-1.5) V bölgesinin eğiminden daha büyüktür.(3.4) formülünü kullanarak şekil 3.7’den hesaplanan ideallik faktörü β , çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Ag-GS-Si eklemelerin I-V karakteristiklerinin farklı nem şartları için hesaplanan ideallik faktörü β ’nın değerleri

Nem Şartı	β_1 (0.4-1.0) V	β_2 (1.0-1.5) V
Vakum(10^{-2} Torr)	3.5	11.5
% 65 N.N.	4.3	9.8
% 86 N.N.	5.1	10.4

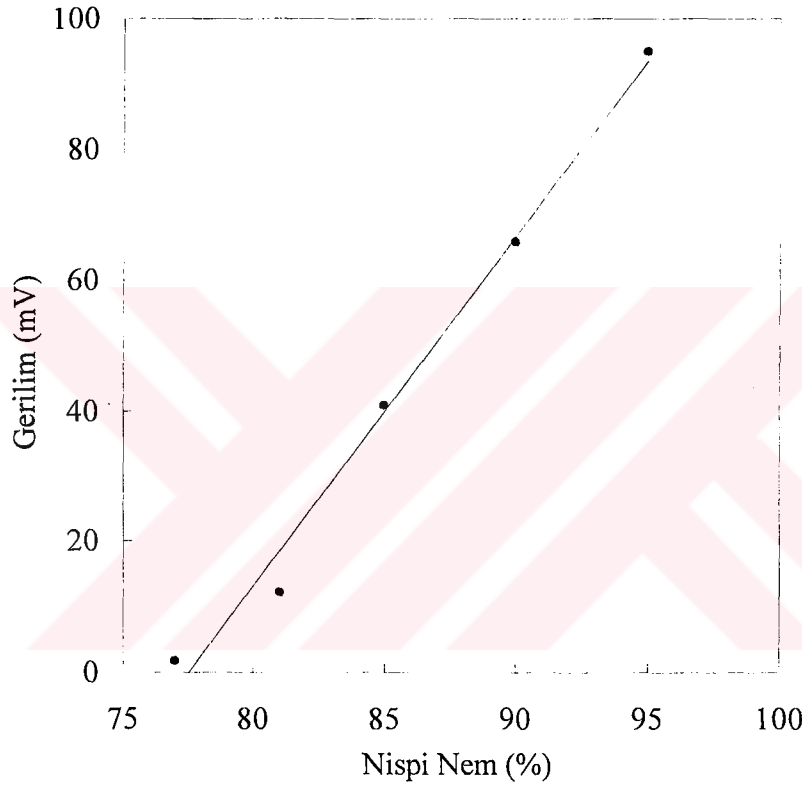
Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi nem arttıkça, (0.4-1.0) V bölgesinde hesaplanan ideallik faktörü değerleri artmaktadır. Bilinmektedir ki doğru akım-gerilim karakteristiğın, küçük gerilimli bölgenin ideallik faktörü, eklemdeki rekombinasyon olayları ile bağılıdır. Bu bölgede ideallik faktörünün artması rekombinasyon olayların yoğunlaşması ile ifade edilir.



Şekil 3.7 Ag-GS-Si yapının (Ag-Si arka yüzeyi kontaklar arası) a-Vakum (1.10^{-2} Torr) b- %65 N.N. c-%86 N.N.'de doğru yönde $\ln I$ -V karakteristikleri

3.5 Ag-Gözenekli Silisyum Yapıların Gerilim – Nem Karakteristikleri

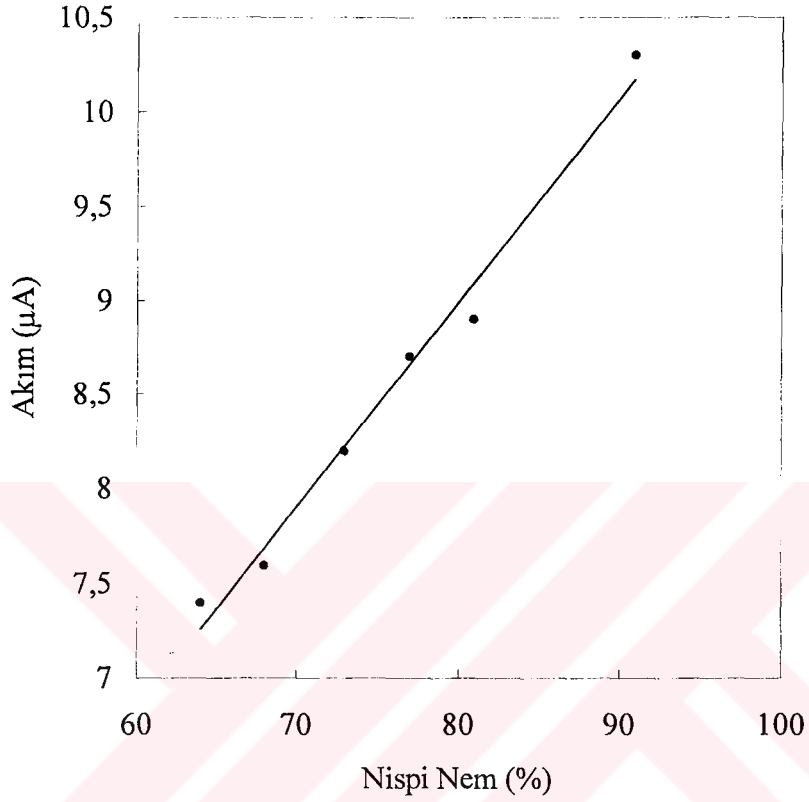
Ag-GS-Si yapılar nem ortamında elektrik geriliminin üretildiği gözlenmiştir. Nemin etkisi ile oluşan açık devre gerilimin en büyük değerleri 1-3 kontaklar arasında meydana gelmiştir. Nem-gerilim kalibrasyonu için şekil 2.12’de gösterilen devre kullanılmıştır. Elde edilen gerilim-nispi nem grafiği şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası gerilim-nispi nem kalibrasyonu

Bu grafiğe göre, gerilimin nispi nem ile değişimi yaklaşık lineerdir. Grafiklerden hesaplanan doğrunun eğimi $5 \text{ mV} / \text{N.N.}(\%)$ olarak hesaplandı. En iyi eklemden 300 mV 'luk ($\%85 \text{ N.N.}$) açık devre geriliminin oluştuğu gözlenmiştir. Bu tür neme duyarlı eklem nem dedektörü gibi kullanılabilir.

Şekil 3.9’da nem ortamıyla kısa devre uyarılan akımın değişimi gösterilmiştir. Nispi nem %65’ten %90’a arttıkça, Ag-GS-Si eklemde oluşan akım $7\mu\text{A}$ ’den $11\mu\text{A}$ ’e kadar arttığı gözlenmiştir. Grafikten doğrunun eğimi $0.16\mu\text{A}/\text{N.N.}(\%)$ olarak hesaplandı.

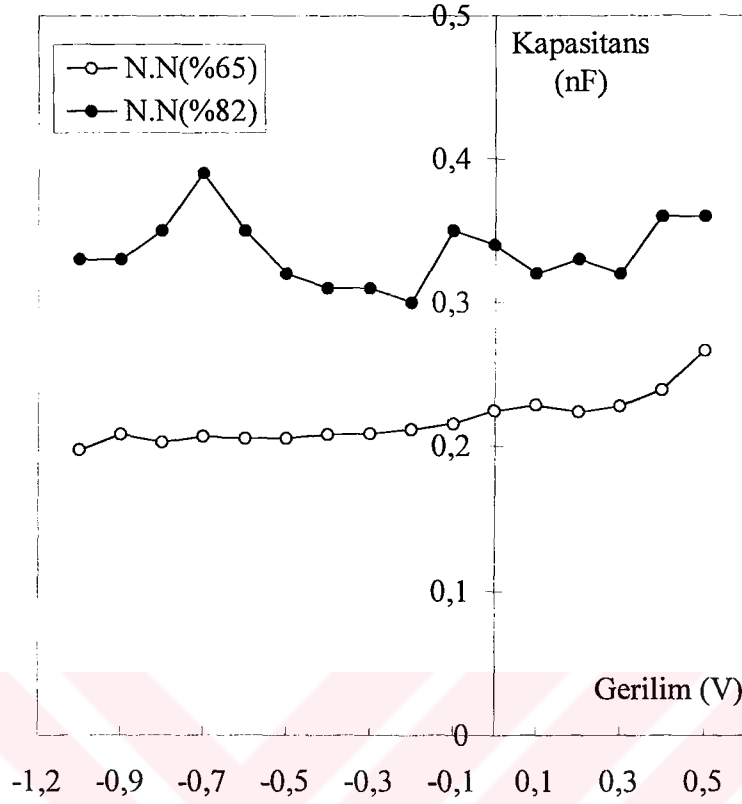


Şekil 3.9 Ag-GS-Si yapının 1-3 kontaklar arası akım-nispi nem kalibrasyonu

Ag-GS-Si yapılar su buharlarından başka, tüp gazına (propan) duyarlıdır. Eklem oksijen gazına ve aseton buharına az duyarlıdır.

3.6 Ag – Gözenekli Silisyum Yapıların Kapasitansı

Şekil 3.10’da Ag-GS-Si yapının %65 N.N. ve %82 N.N.’de kapasitans-gerilim karakteristikleri gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi nem arttıkça kapasitans artmaktadır.



Şekil 3.10 Ag-GS-Si yapının (1-3 kontaklar arası) kapasitans-gerilim karakteristikleri (1- %65 N.N. , 2- %82 N.N.)

Kapasitans ölçümlerinden eklem genişliğini hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmıştır

$$L_o = \epsilon \epsilon_o S \frac{1}{C} \quad (3.5)$$

Burada ϵ dielektrik katsayısı, ϵ_o dielektrik sabiti, S eklem alanı ve C eklem kapasitansıdır ($V=0$). Kapasitans değerleri $C=0.22$ nF (%65 N.N.) ve $C=0.34$ nF (%82 N.N.), (3.5) formülünde yerine konularak eklem kalınlığı $L_o=8$ μm (%65 N.N.) ve $L_o=5.5$ μm (%82 N.N) olarak hesaplandı. Böylece nemin etkisi ile eklem kalınlığı yaklaşık 1.5 defa küçüldüğü belirlenmiştir.

3.7 Cu-Gözenekli Silisyum Yapıların Akım – Gerilim Karakteristikleri

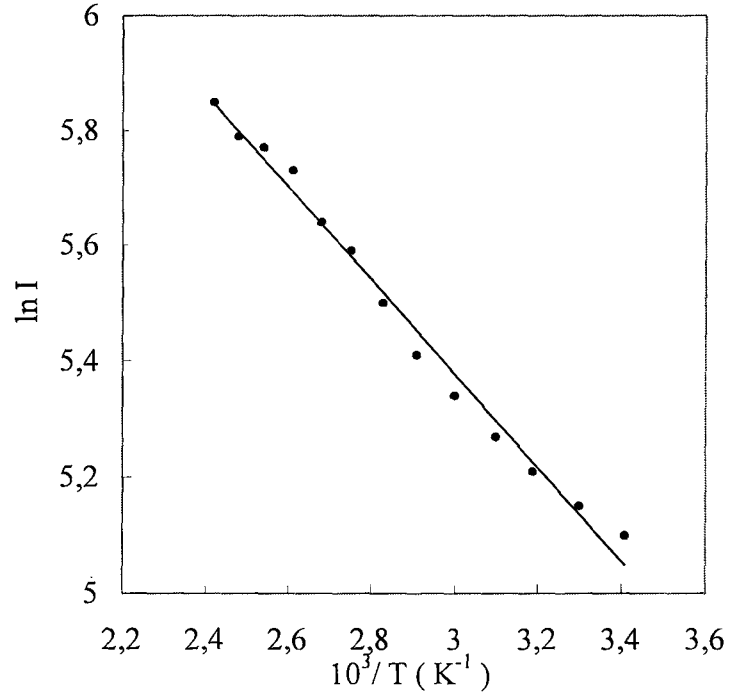
Cu-GS-Si yapıların akım-gerilim karakteristikleri incelendi. Fakat bu eklemlerde duyarlılık gözlenmedi. Cu-GS-Si eklemlerin ters akımının (belirli bir gerilimde $V=1.5\text{ V}$) sıcaklıkla değişim ($30-150^\circ\text{C}$ aralığında) ölçümlerinden, eklemdaki potansiyel engel yüksekliği (Φ_b) bulundu.

(1.12) denkleminde görüldüğü gibi ters akım-gerilim karakteristiğinin doyma akımı, sınırdaki potansiyel engelin yüksekliği ile bağlantılıdır. Bu nedenle doyma akımının sıcaklıkla bağımlılığından, potansiyel engelin yüksekliğini bulmak mümkündür. Aşağıda

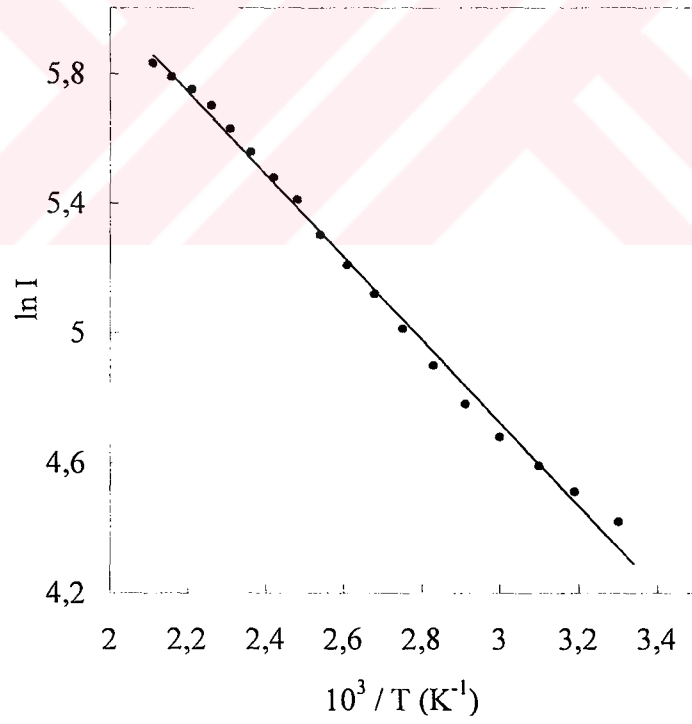
$$\Phi_b = 0.2 \frac{d(\ln I_s)}{d(10^3/T)} \quad (3.6)$$

formülü kullanılarak akım-gerilim karakteristiklerinin $\ln I$ - V eğrilerinin, eklemdaki potansiyel engel yükseklikleri hesaplandı (Caferov,1998). Burada I_s ters yöndeki doyma akımıdır.

Şekil 3.11 ve 3.12’de sırasıyla Cu - Si(alt kontak) ve GS – Si(alt kontak) için $\ln I$ - V eğrileri verilmektedir. Bu eklemlerin potansiyel engel yüksekliği sırasıyla 0.22 eV ve 0.25 eV olarak bulundu.



Şekil 3.11 Cu-Si (alt kontak) eklemnin ters yön akımının sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.12 GS-Si (alt kontak) eklemnin ters yön akımının sıcaklıkla değişimi

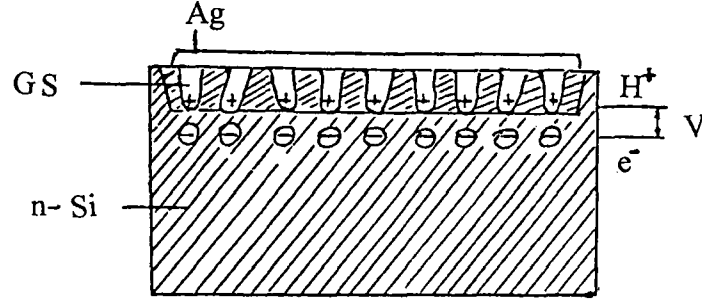
3.8 Ag-GS Yapıların Neme Duyarlılık Modeli

Ag-GS ve Ag-GS-Si eklemlerin I-V karakteristiklerine nemin etkisi keşfedildi. Ters yön karakteristiklerine nemin etkisi, doğru yön karakteristiklerine oranla nispeten daha keskindir. Nispi nem arttıkça, doğru ve ters akımların değerleri artmaktadır. Doğru yön I-V karakteristiklerinin analizinden, ideallik faktörünün nispi nem ile arttığı bulundu (10^{-2} Torr Vakum, % 65 N.N., ve % 86 N.N. için sırasıyla $\beta=3.5$, 4.3 ve 5.1'dir). İdeallik faktörünün artması, nemin etkisiyle eklemden yük taşıyıcılarının rekombinasyonunun artması ile açıklamak mümkündür.

Kapasitans ölçümlerinden ($V=0$), nispi nemin artması ile, Ag-GS-Si eklemlerinin kapasitansının büyüdüğü gözlemlendi yani eklem hacimsel yük bölgesinin kalınlığının ($8 \mu\text{m}$ 'den $5.5 \mu\text{m}$ 'e kadar) azaldığı gözlemlendi. Bu sonuçlar (geçiş bölge kalınlığının nemle azaldığı), yukarıda Ag-GS-Si eklem kontak potansiyeller farkının nemle artmasına (0.9 V 'tan 1.0 V 'a kadar) bağlı sonuçlarla uyumaktadır.

Ag-GS-Si eklemlerde nem ortamında açık devre geriliminin üretimi bulundu. (% 75-% 95) N.N. aralığında eklemden ($10\text{-}100$) mV gerilimi oluşmaktadır. En iyi örneklerde 300 mV kadar (%85 N.N.) açık devre gerilim oluştuğu keşfedildi. Bu tür neme duyarlı eklemler, nem dedektörü gibi kullanılabilir. Ag-GS-Si nem dedektörünün kalibrasyonu (nispi nem-gerilim eğrisi) yapıldı ve dedektörün duyarlılığı yaklaşık $5 \text{ mV} / \text{N.N.}(\%)$ olarak bulundu.

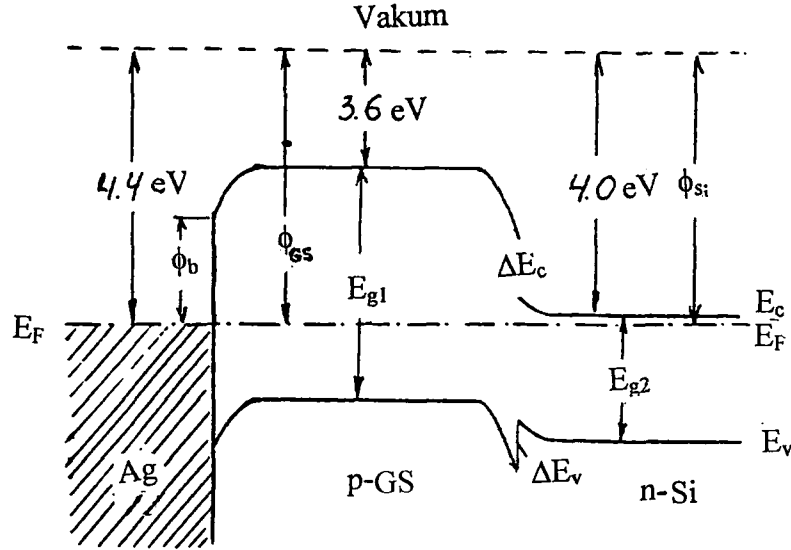
Nem dedektörün çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir. Su moleküllerinin metal-GS yapının üzerine çarparak parçalanmasıyla oluşan hidrojen iyonları (H^+), metalik ince filmde GS altlığına doğru yayılırlar ve gözeneklere yerleşirler (şekil 3.13). Altlığın yüzey kısmında pozitif yüklü hidrojen iyonlarından (H^+) ve negatif yüklü elektronlardan (e^-) iki kat bölge meydana gelir. Bu pozitif ve negatif katmanlı bölge kondansatöre benzer. Bu nedenle eklem metal ve silisyum kontakları arasındaki gerilim değerleri hidrojen iyonlarının yoğunluğuna bağlıdır. Yani oluşan gerilim, hava ortamının nispi neminin fonksiyonudur.



Şekil 3.13 Ag-GS-Si yapıda, hidrojen iyonlarının (H^+) difüzyonu ile açık devre geriliminin oluşumunun şematik gösterimi

3.9 Ag-GS Yapıların Enerji Bant Diyagramı

Ag-GS-Si eklemlerin enerji bant diyagramını göz önüne alalım. Enerji bant diyagramını çizmek için, bu çalışmada elektrik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ve literatürden alınan Ag, GS ve monokristalik silisyumun bazı parametrelerini kullanmak gerekir. Eğer bu çalışmada incelenen gözenekli silisyumda ve monokristalik silisyumda yük taşıyıcılarının konsantrasyonlarını sırasıyla $p=9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ve $n=1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; Ag, GS ve Si'un elektron alınganlığı sırasıyla $\chi(\text{Ag})=4.4 \text{ eV}$, $\chi(\text{GS})=3.6 \text{ eV}$, $\chi(\text{Si})=4.0 \text{ eV}$; GS ve Si'un yasak bant genişliği sırasıyla $E_g(\text{GS}) \approx 2 \text{ eV}$, $E_g(\text{Si})=1.1 \text{ eV}$ (Ünal,1997) olarak alınırsa, o halde ideal Ag-pGS-nSi eklemin (yani sınır bölgelerde yüzey seviyelerinin oluşmadığı durum) enerji bant diyagramı şekil 3.14'deki gibi çizilebilir.



Şekil 3.14 İdeal Ag-pGS-nSi eklemlerin enerji bant diyagramı

Şekil 3.14’de görüldüğü gibi Ag-GS-Si yapı seri birleşmiş (Ag-pGS Schottky diyot ve pGS-nSi heteroeklemden) eklemlerden oluşmaktadır. Bu enerji diyagramı niteliksel olarak akım-gerilim karakteristiğini açıklayabilir. Örneğin; deneysel I-V karakteristiklerinin ölçümünde olduğu gibi, akımın doğru yönü, “+” gümüşe uygulandığı durumda gerçekleşmektedir. Fakat, I-V karakteristiklerinden elde edilen GS-Si heteroeklemindeki potansiyel engel yüksekliği (0.4–0.6 eV), şekil 3.14’de gösterilen ideal enerji diyagramındaki aynı potansiyel engel yüksekliği (0.9 eV) ile uyuşmamaktadır. Yüksek dereceli yapı kusurlarına sahip olan gözenekli silisyumun sınır bölgesinde, yüzey enerji seviyelerinin oluşması, bu farkın sebebi olabilir. Bu tür yüzey seviyeleri, elektron tuzakları rolünü oynamaktadırlar ve heteroeklem bölgesinde enerji bantlarının eğimini değiştirmektedirler.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada tek kristal silisyumun yüzey bölgesinde, elektrokimyasal yöntemle gözenekli silisyum tabakası elde edildi. Silisyum altlıktan ayrılmış ince tabakalı gözenekli silisyumun (yaklaşık 10 μm kalınlıkta) özdirenci, yük taşıyıcıların konsantrasyonu ve mobilitesi Van der Pauw ve iletkenlik yöntemleri ölçüldü. GS için $\rho=1.8 \times 10^6 \Omega.\text{cm}$, $p=9.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ve $\mu=3.6 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{V.s}$ bulundu.

Metal-GS-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri farklı şartlarda (karanlıkta, aydınlıkta,nem ortamında), fotoakımın spektral dağılımı ve kapasitans-gerilim karakteristikleri araştırıldı.

Ag- GS Schottky eklemin, GS-Si heteroeklemin ve bu iki eklemden oluşan Ag-GS-Si iki geçişli yapının akım-gerilim karakteristiklerinin doğrultma özelliğine sahip oldukları gösterildi. Ag-GS, GS-Si ve Ag-GS-Si eklemlerin doğrultma katsayıları $K_1=40$, $K_2=54$ ve $K_3=196$ olduğu bulundu. Ayrıca Ag-GS, GS-Si ve Ag-GS-Si eklemlerin kontak potansiyeller farkı $\phi_{K1}=0.6 \text{ V}$, $\phi_{K2}=0.4 \text{ V}$, $\phi_{K3}=0.7 \text{ V}$ olarak elde edildi. Böylece, incelenen üç tür eklemlerden, en yüksek doğrultma özelliği Ag-GS-Si eklemleri göstermektedir.

Ag-GS-Si eklemlerin, $\lambda=300\text{-}1100 \text{ nm}$ dalga boyu aralığında fotoduyarlılığı incelendi ve fotoakımın spektrumunun iki bölgesinde ($\lambda=800\text{-}1000 \text{ nm}$) ve $\lambda>1000 \text{ nm}$ değişimi görüldü. Işınlama ile uyarılmış bu bölgelerdeki fotoakımın artması, gözenekli silisyumda ($E_1 \approx 1.6 \text{ eV}$) ve monokristal silisyumda ($E_2 > 1.1 \text{ eV}$) valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişleri ile açıklamak mümkündür.

Ag-GS-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristiklerine nemin etkisi gözlemlendi. Nemin etkisiyle doğru akımın artması, yük taşıyıcıların rekombinasyonunun şiddetlenmesi olarak yorumlandı.

Kapasitans ölçümlerinden, nispi nemin artması ile eklemin hacimsel yük bölgesinin kalınlığının azalması (8 μm 'den 5 μm 'ye kadar) bulundu.

Cu-GS-Si eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri incelendi ve potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_b=0.22-0.25$ eV) bulundu. Bu tür eklemler, neme duyarlılık göstermediler.

İlk defa nemin etkisiyle Ag-GS-Si eklemlerde açık devre geriliminin oluştuğu gözlemlendi. En iyi örnekte $V=300$ mV kadar gerilim üretimi (%85 N.N.) ölçüldü. Ag-GS-Si eklemlerin gerilim-nispi nem eğrileri ölçüldü ve eklemin nem ortamına duyarlılığı 5 mV/N.N.(%) olarak bulundu. Böyle neme yüksek derecede duyarlı eklemler, nem dedektörü gibi kullanılabilir. Ag-GS-Si yapılarda nemin etkisiyle gerilim oluşma modeli öne sürüldü. Parçalanmış su moleküllerinden oluşan hidrojen iyonların, GS-Si sınırına doğru difüzyonu ve burada hidrojen iyonlarından (H^+) ve elektronlardan (e^-) oluşmuş iki kat kondansatöre benzer bölgenin meydana gelmesi, modelin temelidir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve literatürdeki gözenekli silisyum'a bağlı parametreler kullanılarak, Ag-GS-Si eklemlerin enerji bant diyagramı çizildi.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

KAYNAKLAR

Anderson, R.L., (1962), "Experiments on Ge-GaAs Heterojunctions" Solid State Electron., 5, 341

Balagurov, L.A., Leiferov, B.M., Petrova, E.A., Orlov, A.F. ve Panasenko, E.M, (1996), "İnfluence of Water and Alcohols On Photoluminescence of Porous Silicon", J.Apply.Phys., 79:7143-7147

Bressers, M.M.C., Knapen, J.W.J., Meulenkamp, E.A. ve Kelly, J.J., (1992), Apply.Phys.Lett., 61, 108

Caferov, T., (1998), "Yarıiletkenler Fiziği-1", Yıldız Teknik Üniversitesi, Basım-Yayın Merkezi, İstanbul

Canham, L.T., (1990), "Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers", Appl.Phys.Lett., 57:1046-1048

Collins, R.T., Fauchet, P.M. ve Tischler, M.A., (1997), "Porous Silicon: From luminescence to LEDs", Physics Today, 50: 24-31

Collins, R.W., Tsai, C.C., Hirose, M., Koch, F., ve Brus, L., (1995), "Microcrystalline and Nanocrystalline Semiconductors", Symp.Proc.vol.358, Materials Research Society, Pittsburg

Chang, L.L., (1965), "The Conduction Properties of Ge-GaAs- xP_x n-n Heterojunctions" Solid State Electron. , 8, 721

Dimitrov, D.B., (1995), "Current-Voltage Characteristics of Porous-Silicon Layers", Phys. Rev. B, 51:1562-1566

Fauchet, P.M., Tsai, C.C., Canham, L.T., Shimizu, I. Ve Aoyagi, Y., (1993), "Microcrystalline Semiconductors: Materials Science and Devices", Symp.Proc.vol.283, Materials Research Society, Pittsburg

Green, W.H., Lee, E.J., Lauerhaas, J.M., Bitner, T.W. ve Sailor, M.J., (1995), Apply.Phys.Lett., 67, 1468

Iyer, S.S., Collins, R.T. ve Canham, L.T., (1992), "Light Emission From Silicon", Symp.Proc.vol.256, Materials Research Society, Pittsburgh

John, G.C. ve Singh, V.A., "Porous Silicon: Theoretical Studies", Physics Reports, 263: 93-151

Kanemitsu, Y., (1995), "Light Emission From Porous Silicon and Related Materials", Physics Reports, 263:1-91

Lazorouk, S., Jaguiro, P. ve Katsouba, S., (1996), "Stable Electroluminescence from Reverse Biased n-type Porous Silicon-Aluminum Schottky Junction Devices", Appl.Phys.Lett., 68:2108-2110

Li, K.H., Tsai, C., Shih, S., Hsu, T., Kwong, D.L. ve Cample, J.C., (1992), J.Appl.Phys. , 72, 3816

Linros, J. Ve Lalic, N., (1995), Apply.Phys.Lett.,66,3048

Oguro, T., Koyama, H., Ozaki, T., Koskida, N., (1997), "Mechanism of The Visible Elektroluminescence From Metal / Porous Silicon-nSi Devices", J.Appl. Phys., 81: 1407-1412

Ömür, B.C., (1999), "Gözenekli Silisyumun Elektriksel ve Optik Özellikleri", İstanbul

Smith, R.L., Collins, S.D., (1992), "Porous Silicon Formation Mechanisms", J.Appl.Phys., 71 (8)

Sze, S.M., (1981), Pyhsics of Semiconductor Devices, John Wiles & Sons, New York

Tamura, T., Takazawa, A. ve Yamada, M., (1993), Jpn.J.Appl.Phys. 32, L322

Tsybeskov, L., Dutttagupta, S.P., Hirschmann, K.D. ve Fauchet, P.M., (1996), Appl.Phys.Lett., 68, 2058

Ünal, B., Bayliss, S.C., (1997), J.Phys.D:Appl.Phys. 30-2763

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.06.1974	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1989-1992	Uluğbey Özel Deneme Lisesi
Lisans	1992-1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	1996-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Fizik Bölümü
Çalıştığı Kurum	1997-Devam ediyor	Serhat Şanlı İlköğretim Okulu

