

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

139835

**Ag-GÖZENEKLİ SİLİSYUM EKLEMLERİN KAPASİTİF
ÖZELLİKLERİ**

139835

Fizik Öğretmeni Gülsüm Aysun GÜVEN

**F.B.E.Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tayyar CAFEROV

[Signature]

Prof. Dr. Emel GİNGİ *[Signature]*

Prof. Dr. Nurlen ÖNLAN *[Signature]*

İSTANBUL, 2003

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ	iii
ÇİZELGE LİSTESİ	v
ÖNSÖZ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2 Gözenekli Silisyumun Yapısı ve Özellikleri	2
1.3 Metal-Gözenekli Silisyum Eklemler	10
1.4 Metal-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Neme Duyarlılık Özellikleri	19
1.5 Metal-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitif Özellikleri	22
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
2.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Elde Edilmesi	27
2.2 Gözenekli Silisyumun Parametrelerinin Ölçümleri	28
2.3 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Elde Edilmesi	29
2.4 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Ölçümleri	31
2.5 $p-n$ Eklemlerin Kapasitans Özelliklerinin Ölçülmesi	31
2.5.1 $p-n$ Eklemdaki Engel Kapasitansı	31
2.5.2 $p-n$ Eklemdaki Katkı Konsantrasyonunun Bulunması	36
2.6 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitans-Voltaj Karakteristiklerinin Ölçümleri	40
2.7 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Neme Duyarlı Kapasitans Karakteristiklerinin Ölçümleri	40
3. BULGULAR	41
3.1 Gözenekli Silisyum Filmin Optik Özellikleri	41
3.2 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Akım-Voltaj Karakteristikleri	44
3.3 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitans-Voltaj Karakteristikleri	46
3.4 Ag-Gözenekli Silisyum Kapasitansına Nemin Etkisi	48
3.5 Ag-Gözenekli Silisyum-Silisyum Eklemlerin Kapasitansının Nem Ortamına Tepki Süresi	52
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	61

Şekil 1.1	p^+ -tipi silisyum katmanından oluşan GS'un elektron mikroskobu ile çekilmiş görüntüsü	2
Şekil 1.2	GS hazırlamak için kullanılan elektrokimyasal bir hücre	2
Şekil 1.3a	p -tipi Si gözenekli yapısının TEM'de çekilmiş görüntüsü.....	4
Şekil 1.3b	n -tipi Si gözenekli yapısının TEM'de çekilmiş görüntüsü.....	4
Şekil 1.3c	p^+ -tipi Si gözenekli yapısının TEM'de çekilmiş görüntüsü.....	4
Şekil 1.3d	n^+ -tipi Si gözenekli yapısının TEM'de çekilmiş görüntüsü.....	4
Şekil 1.4a	İşlem yapılmamış Si kristali yapısının STM'de çekilmiş görüntüsü	5
Şekil 1.4b	Farklı akım yoğunluğunda elde edilen gözenekli yapının STM'de çekilmiş görüntüsü ($I_b < I_c$)	5
Şekil 1.4c	Farklı akım yoğunluğunda elde edilen gözenekli yapının STM'de çekilmiş görüntüsü ($I_b < I_c$)	5
Şekil 1.5	Anodik reaksiyon süresi ile GS tabaka kalınlığı (T_g) arasındaki ilişki	6
Şekil 1.6a	Si örneğin yöneliminin fonksiyonu olarak gözenek konfigürasyonu	7
Şekil 1.6b	Anodizasyon sırasında gözenekler etrafında uzay yükü bölgesinde elektrik alan çizgilerinin şematik dağılımı	7
Şekil 1.7a	Silindirik boşlukları içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş hali	8
Şekil 1.7b	Dikdörtgen boşlukları içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş hali	8
Şekil 1.7c	Silindirik boşlukları içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş hali	8
Şekil 1.7d	Dikdörtgen boşlukları içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş hali	8
Şekil 1.8a	GS üretim şeması	9
Şekil 1.8b	Anodik aşındırma esnasında gözenek yakınındaki kimyasal süreç	9
Şekil 1.8c	Anodik aşındırma esnasında gözenek yakınındaki kimyasal süreç	9
Şekil 1.8d	Gözenekteki ve işlenmemiş Si-GS arasındaki Si elektrolit geçişi için band diyagramı	9
Şekil 1.9a	Metal – n -tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları; doğrultucu kontak, $\Phi_m > \Phi_s$	12
Şekil 1.9b	Metal – n -tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları; doğrultucu olmayan kontak, $\Phi_m < \Phi_s$	12
Şekil 1.10a	Metal – p -tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları; doğrultucu olmayan kontak, $\Phi_m > \Phi_s$	12
Şekil 1.10b	Metal – p -tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları; doğrultucu kontak, $\Phi_m < \Phi_s$	12
Şekil 1.11	İnversiyon tabakalı metal – n -tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı	15
Şekil 1.12	Metal – n -tipi yarıiletken doğrultma kontağının enerji diyagramı	16
Şekil 1.13	Schottky diyodun diyot teorisine (1) ve difüzyon teorisine (2) göre akım-gerilim karakteristiği	18
Şekil 1.14	Bir kapasitif GS nem sensörünün olası elektronik konfigürasyonları: interdiijital elektrotlar (solda), plaka elektrot (ortada) ve ağı plaka elektrot (sağda)	24
Şekil 2.1	GS elde etmek için hazırlanan deney düzeneği	27

Şekil 2.2	GS filmin transmisyonunu incelemek için kullanılan spektrofotometre, “UV/VIS Spectrometer, Lambda 2S-Perkin Elmer” (Katıhal Elektronik Araştırma Laboratuvarı, YTÜ)	29
Şekil 2.3	GS üzerine Ag buharlaştırmak için kullanılan vakum tüpü (Katıhal Elektronik Araştırma Laboratuvarı, YTÜ)	30
Şekil 2.4	Ag-GS eklem yüzey kontakları	30
Şekil 2.5	Akım-gerilim karakteristiği ölçüm devresi (GK güç kaynağı, A anahtar, Ç akım yönünü değiştiren çevirici, R_1 ve R_2 potansiyometrelerdir)	31
Şekil 2.6	$p-n$ eklem oluşması	32
Şekil 2.7	Donörlerin ve akseptörlerin konsantrasyon dağılımları	37
Şekil 2.8	İlk homojen yayılan konsantrasyon	38
Şekil 2.9	Ag-GS eklem kapasitans-voltaj karakteristiklerinin ölçmek için kullanılan aygıt, “4192A, LF Impedance Analyzer, Hewlett Packard, (5 Hz-13 MHz)” (Katıhal Elektronik Araştırma Laboratuvarı, YTÜ)	40
Şekil 3.1	GS filmin optik geçirgenlik spektrumu	41
Şekil 3.2	GS filmin absorpsiyon katsayısı spektrumu	43
Şekil 3.3	GS-Si eklem (1 ve 3 kontaklar arası) aydınlık ve karanlıkta akım-voltaj karakteristikleri	44
Şekil 3.4	Ag-GS eklem (2 ve 3 kontaklar arası) aydınlık ve karanlıkta akım-voltaj karakteristikleri	45
Şekil 3.5	Ag-GS eklem (2 ve 3 kontaklar arası) karanlıktaki kapasitans-voltaj karakteristiği	46
Şekil 3.6	Denk.(2.14) kullanılarak hesaplanan kapasitans-kalınlık eğrisi	47
Şekil 3.7	Ag-GS-Si eklem (1-3 kontaklar arası, paralel) kapasitans-nispi nem eğrileri ($f = 0.05-1$ kHz)	48
Şekil 3.8	Ag-GS-Si eklem (1-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansın frekansla değişimi (% 95 nispi nem)	49
Şekil 3.9	Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) kapasitans-nispi nem karakteristikleri ($f = 0.05-1$ kHz)	50
Şekil 3.10	Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansının frekansla değişimi (% 95 nispi nem için)	51
Şekil 3.11	Ag-GS-Si eklem (1-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansın zamana göre değişimi ($f = 0.05$ kHz)	52
Şekil 3.12	Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansının zamana göre değişimi ($f = 0.05$ kHz)	53

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	Ag-GS eklemde iyonlaşmış akseptörlerin GS'un kalınlığı ile değişimi (d, Ag-GS sınırından uzaklıktır.)47
-------------	--



ÖNSÖZ

Y.T.Ü. Fizik Bölümü Yüksek Lisans programında hazırlamış olduğum “Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitif Özellikleri” adlı tez çalışmamda başta kıymetli danışman hocam Prof.Dr. Tayyar Caferov olmak üzere, Y.T.Ü. Fizik Bölüm Başkanı sevgili hocam Prof.Dr. Emel Çıngı, diğer bütün öğretim üyeleri, araştırma görevlisi arkadaşlar, yakın aile çevrem ve dostlarıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Danışman hocam Prof.Dr. Tayyar Caferov beyefendinin üstün bilgi ve tecrübelerinden istifade etmiş olmam benim için büyük bir şanstır. Ayrıca kendileri, zaman yönetimi ve motivasyon konularında bana ve diğer öğrencilere daima örnek olmuşlardır. Sevgili hocam Prof.Dr. Emel Çıngı hanımefendinin yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarım boyunca daima her yönden sevecen ve hoşgörülü yaklaşımları ve destekleri bana güç vermiştir.

Tez çalışmam süresince laboratuvar çalışmalarında bana birebir yardımcı olan Arş.Gör. Çiğdem Oruç’a ve içten destek ve yardımlarından dolayı Arş.Gör. Süreyya Aydın’a teşekkür ederim. Ayrıca başta Arş.Gör. Murat Çalışkan olmak üzere, Arş.Gör. S.Serkis Yeşilkaya, Arş.Gör. Nimet Yılmaz ve Arş.Gör. Fatih Ongül’e laboratuvarında gösterdikleri her türlü destekleri için teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile aydınlandığım tüm değerli hocalarıma saygı ve sevgilerimi sunarım.

Ayrıca, beni bugünlere getiren, üstün sabır ve sevgisiyle eğitip, yetiştiren, hakkını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim biricik anneciğim Güngör Güven’e en derin sevgilerimi sunar; ellerinden öperim. Yüksek Lisans eğitimim süresince her türlü yardım ve gayretleriyle beni motive eden, aynı zamanda bana bir dost olarak yaklaşan sevgili ablam Ayşe Nur Güven’e çok teşekkür eder; onun da eğitim camiasında başarılarının katlanarak artmasını dilerim. Tez yazıma ivme katan sevgili kardeşim Mehmet Fatih Güven’e yardımlarından dolayı çok teşekkür eder; mezuniyetinin hayatımızda güzelliklere vesile olmasını dilerim. Tez fotoğraflarımın çekimi için gerekli ekipman ve donanımı sağlayıp, tezin düzenlenmesinde önemli katkılara sahip olan sevgili ablacığım Elif Gül ve eşi Yıldırım Hazır’a içten teşekkürlerimi sunar; minik yeğenlerime örnek olmak isterim. Beni Y.T.Ü. Fizik Bölümü Yüksek Lisans programına girmem için teşvik eden, ayrıca eğitim-öğrenimim boyunca destek ve motivasyonu ile yanımda olan sevgili ağabeyim Emin Güven’e çok teşekkür ederim. Ayrıca tez yazımım sırasında kaynak kitap ve tez dökümanları sağlayıp, çevirilerde yardımcı olan sevgili nişanlım Cemal Cengiz Yıldırım’a teşekkür ederim.

ÖZET

Özdirenci 0.006-0.015 Ωcm ve kalınlığı yaklaşık 381 μm olan Sb katkılı *n*-tipi monokristalik silisyumun yüzey bölgesinde elektrokimyasal yöntemle gözenekli silisyum (GS) tabakası oluşturuldu. GS filmin gözenekliliği % 35-50 olarak hesaplandı; kalınlığı 5-20 μm arasında ölçüldü; optik geçirgenliğine spektrofotometre ile 300-1000 nm aralığında bakıldı; soğurma katsayısı hesaplanarak absorpsiyon katsayısı spektrumu çizildi ve yasak enerji aralığı yaklaşık 1.41 eV olarak bulundu.

Elektron demeti yöntemiyle Ag-GS eklemleri elde edildi. Eklemlerin yüzey kontakları yapıp aydınlık ve karanlık ortamlarda akım-voltaj karakteristikleri ölçüldü. Ag-GS eklemin daha yüksek doğrultma katsayısına ve daha küçük ışık duyarlılığına sahip olduğu görüldü.

Ag-GS eklemlerin farklı ortamlarda (normal, aydınlık, karanlık ve nem) 0.05-100 kHz frekanslarda (seri ve paralel olarak) kapasitans-voltaj karakteristikleri ölçüldü. Ag-GS eklemin kalınlığının iyonlaşmış akseptörlerin konsantrasyonu ile ters orantılı olduğu bulundu.

Ag-GS-Si eklemlerin kapasitansına nemin etkisi incelendi. % 35-95 nispi nemlik aralığında kapasitansta 5 nF'dan 800 nF'a kadar keskin bir artış elde edildi. Belli bir nispi nemlikte frekans azaldıkça kapasitansın arttığı gözlemlendi. Nemin etkisi ile Ag-GS-Si eklemin kapasitansındaki artışın, Ag-GS eklemine göre daha keskin olduğu belirlendi.

Ag-GS-Si eklemlerin kapasitansının nem ortamına tepki süresi incelendi. Ag-GS-Si eklemlerin nem ortamından normal oda ortamına çıkarıldıktan sonra kapasitansın ilk değerine ulaşma süresi yaklaşık 10-20 saniye olarak tespit edildi.

Anahtar Kelimeler : Gözenekli Silisyum, Nispi Nem, Kapasitif-Esaslı Sensörler, Ag-Gözenekli Silisyum Eklemler, Nem Sensörleri

ABSTRACT

Porous silicon (PS) layer has been formed by electrochemical method at surface region of Sb-doped *n*-type monocrystalline silicon with 0.006-0.015 Ωcm resistivity and 381 μm thickness approximately. The porosity of PS film has been calculated as 35-50 %; the thickness of PS film has been measured between 5-20 μm ; optical transmission has been investigated at 300-1000 nm interval by using spectrophotometer; absorption coefficient spectrum has been drawn by being calculated absorption coefficient, and energy gap has been found 1.41 eV approximately.

Ag-PS junctions have been obtained by electron beam method. After surface contacts of junctions have been made, current-voltage characteristics have been measured in the light and dark medium. It has been seen that Ag-PS junction has higher rectification coefficient and lower light sensitivity.

Capacitance-voltage characteristics of Ag-PS junctions have been measured in different medium (normal, light, dark, and humidity) at frequencies of 0.05-100 kHz (as series and parallel). It has been found that the thickness of Ag-PS junction is inversely proportional with the concentration of ionized acceptors.

The effect of humidity on Ag-PS-Si junctions' capacitance has been investigated. A sharp increase from 5 nF to 800 nF in capacitance has been obtained at interval 35-95 % relative humidity. The decrease of frequency to the increase of capacitance has been observed at a certain relative humidity. The increase in capacitance of Ag-PS-Si junction with the effect of humidity has been determined sharper than Ag-PS junction's.

The response time of Ag-PS-Si junctions' capacitance to humidity medium has been investigated. After Ag-PS-Si junctions has been taken out from humidity medium to normal room medium, the reach time to the initial value of capacitance has been found 10-20 seconds approximately.

Keywords: Porous Silicon, Relative Humidity, Capacity-Based Sensors, Ag-Porous Silicon Junctions, Humidity Sensors

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

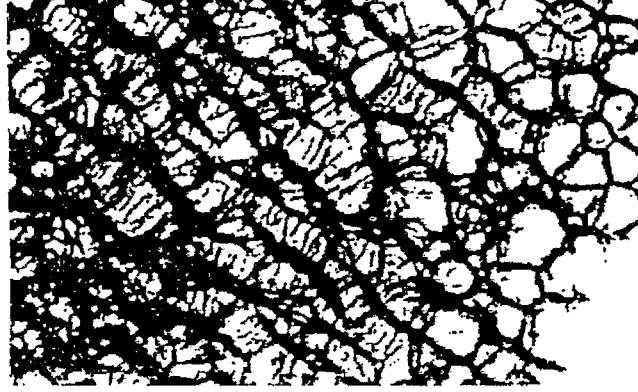
Gözenekli silisyumun (GS) oda sıcaklığında görülür fotoluminesans ve elektrolüminesansından dolayı, bu materyal kaydadeğer bir dikkat çekmiştir. Özellikle, gözenekli silisyumun optik, kimyasal ve elektronik karakteristikleri gaz algılama (sensing) cihazlarında kullanılmaktadır. Doğrusu, büyük iç yüzey ($10^3 \text{ m}^2.\text{cm}^{-3}$), adsorblama (tutma) etkisini güçlendirmektedir.

GS sensörleri önceden de literatürde ele alınmıştır. Kapasitansa dayalı nem sensörleri yapımı, GS yüzey üzerindeki suyun tutulması esnasında meydana gelen dielektrik sabitteki nispi değişikliği kullanarak gerçekleştirilmiştir (Feng ve Tsu, 1994).

Bu çalışmamızda Ag-GS eklemlerin kapasitif karakteristikleri araştırılmıştır. Nispi nem artışı ile kapasitansta yüksek bir artış gözlenmiştir. Dolayısıyla Ag-GS eklemlerin kapasitif nem sensörleri olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

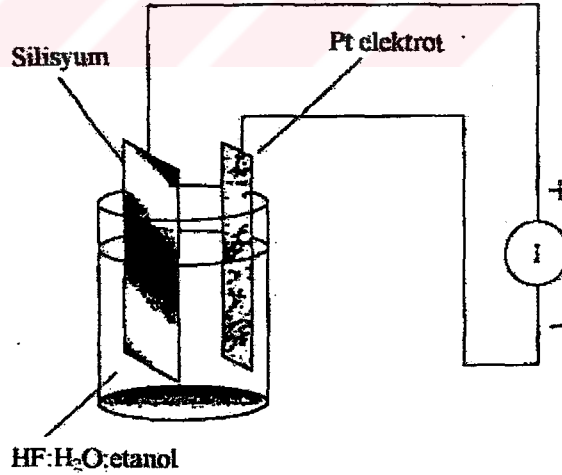
1.2 Gözenekli Silisyumun Yapısı ve Özellikleri

GS, boş alanlarla çevrili nanometre büyüklüğünde silisyum bölgelerinden oluşan bir ağıdır. Şekil 1.1’de anodik aşındırma yoluyla elde edilmiş GS gösterilmiştir (Collins, 1997).



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

Bir GS filmi, silisyum katman yüzeyinin genellikle elektrokimyasal anodizasyonu ile hazırlanır. Şekil 1.2 anodik aşındırma ile gözenekli silisyum hazırlamak için kullanılan elektrokimyasal hücrenin şematik bir diyagramıdır (Collins vd., 1997).



Şekil 1.2 GS hazırlamak için kullanılan elektrokimyasal bir hücre (Collins vd., 1997).

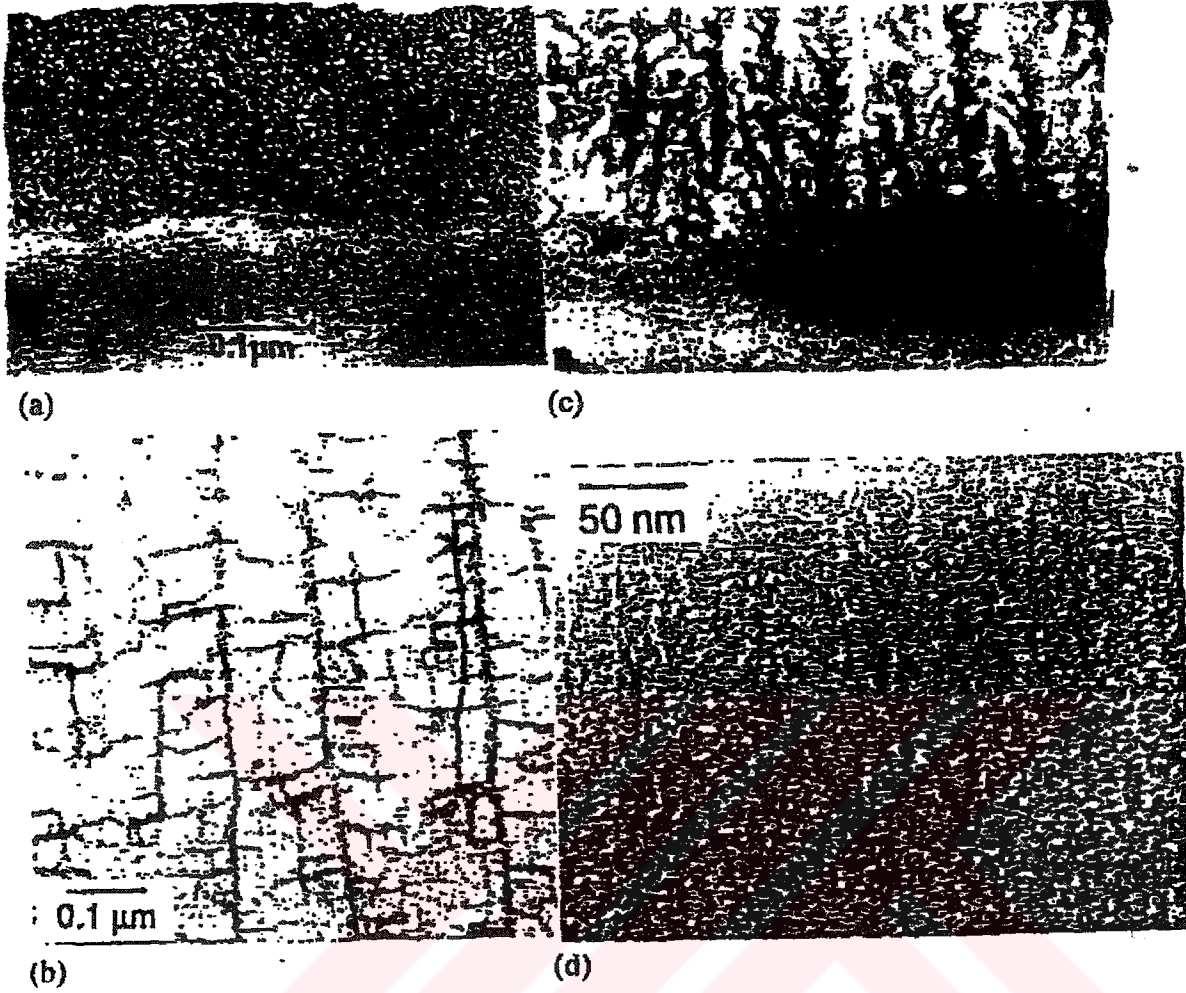
Silisyum katmanlarının elektroparlatılması araştırılırken GS’un oluşumu rastlantı sonucu keşfedildi (Uhlir, 1956). Gözenekli silisyumun fabrikasyon şartları ile yapısal ve elektronik özellikleri arasındaki ilişki sonraki çalışmada kapsamlı bir şekilde incelendi. Buna göre gözenekli tabakanın morfolojisini,

- Akım yoğunluğu,
- Hidroflorik asit konsantrasyonu,
- Aşındırma esnasında aydınlatmanın yapıp yapılmadığı,
- Silisyumun katkılama tipi
- Silisyumun öz direnci

etkiler. Örneğin az miktarda katkılı p-tipi materyal; süngerimsi gözenekli yapı oluşturma eğilimindedir; buna karşın, n-tipi materyal ve çok miktarda katkılı p-tipi silisyum materyal dendritik (sinir lifleri) veya sütunsu özelliklere neden olmaya eğilimlidir. Gözeneklilik (boş alanların kesri), tipik olarak %50'den %90'a kadar bir dağılım gösterir. Gözeneklilik arttıkça, ışık yayımı genellikle daha etkin bir şekilde meydana gelir. (Collins vd., 1997)

Si nanokristallerinin boyut ve şeklinin hazırlama koşullarına bağlı olduğu Kanemitsu (1995) tarafından da bildirilmiştir. Ayrıca, gözenek yapısının Si katmanının tipine (*n*-tipi veya *p*-tipi, öz direnç) ve anodizasyon parametrelerine (HF asit konsantrasyonu, akım yoğunluğu, aydınlatma v.s.) bağlı olduğunu belirtmiştir.

Gözenekli silisyumun yapısı, anodizasyon şartlarından ziyade özellikle silisyumdaki katkı konsantrasyonundan etkilenmektedir (Smith ve Collins, .1992). Çünkü katkı konsantrasyonu, uzay yükü tabakasının genişliğini ve elektrik alan şiddetini değiştireceğinden yapıyı etkileyebilmektedir. Bir potansiyel uygulanması halinde, alan şiddeti azalır ve katkı konsantrasyonunun azalması ile uzay yükü tabakasının genişliği artar. Yüksek katkı konsantrasyonu ise gözenekler arasında daha küçük boşluğa neden olacağından daha küçük gözeneklerin oluşmasına yol açar. Buna göre GS yapılar genellikle *n*, *p*, *n*⁺ ve *p*⁺ olmak üzere dört temel grupta incelenir (Şekil 1.3).



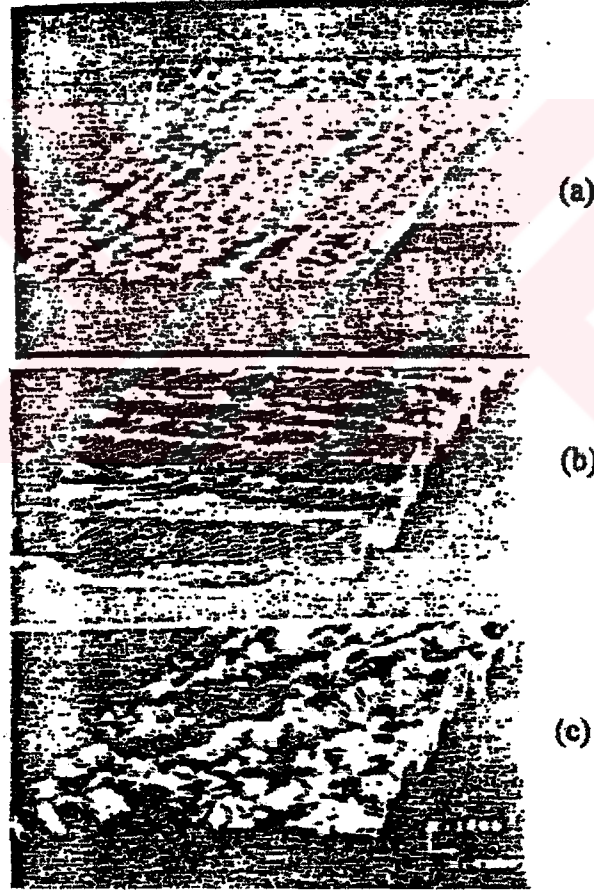
Şekil 1.3 Farklı numune tiplerinin gözenekli yapılarının TEM’de çekilmiş görüntüleri. (a) p -tipi Si, (b) n -tipi Si, (c) p^+ -tipi Si, (d) n^+ -tipi Si (Smith ve Collins, 1992)

p -tipi silisyum örnekteki gözeneklerin çapları ve gözenekler arası mesafe oldukça küçüktür. Şekil 1.3(a)’da GS tabaka nanometre boyutlarındaki bir ağdan oluşmaktadır. Gözenek çapı 10 nm veya biraz daha büyüktür. Gözeneklilik anodizasyon şartlarına bağlı olmakla beraber %30 - %80 arasındadır.

Aşırı katkılı p^+ tipi silisyumda oluşan gözenekli yapı, p -tipi GS’a benzemekle birlikte, katkı konsantrasyonunun artmasıyla gözenek çapları ve de gözenekler arası mesafe artmaktadır. Şekil 1.3(c)’de görüldüğü gibi, gözenek çapı 10 ile 100 nm arasında değişmektedir. Çok küçük dallanmalar gösteren gözenekler yüzeye dik olarak yayılmaktadır. Gözeneklerin kenarlarında birçok küçük tomurcuklanma vardır.

Şekil 1.3(b) ve Şekil 1.3(d)'de görüldüğü gibi, n -tipi GS'da gözenek çapı ve gözenekler arası mesafe katkı konsantrasyonu ile ters orantılıdır. Gözenek çapı p -tipi GS'unkine göre oldukça büyük olup, yaklaşık 100 nm'dir. Düz kanallar şeklinde eğilim gösterir. Ana gözenekler yüzeye dik doğrultuda, yandaki gözenekler ise ana gözeneklerin köşelerinden yayılmaktadır. Aşırı katkılı olan n^+ - tipi GS'un yapısı, aşırı katkılı p^+ -tipi GS'un yapısına benzemektedir; aralarındaki tek fark, gözenek çaplarının 10 nm veya biraz daha küçük olmasıdır (Smith ve Collins, 1992).

Gözenekli tabakanın morfolojisini akım yoğunluğu da etkilemektedir. Şekil 1.4'de anodizasyon işleminden önceki silisyum kristali ve farklı akım yoğunluklarında elde edilmiş GS yapıların STM "Scanning Tunnelling Microscope"da elde edilen kesit görüntüleri verilmiştir.

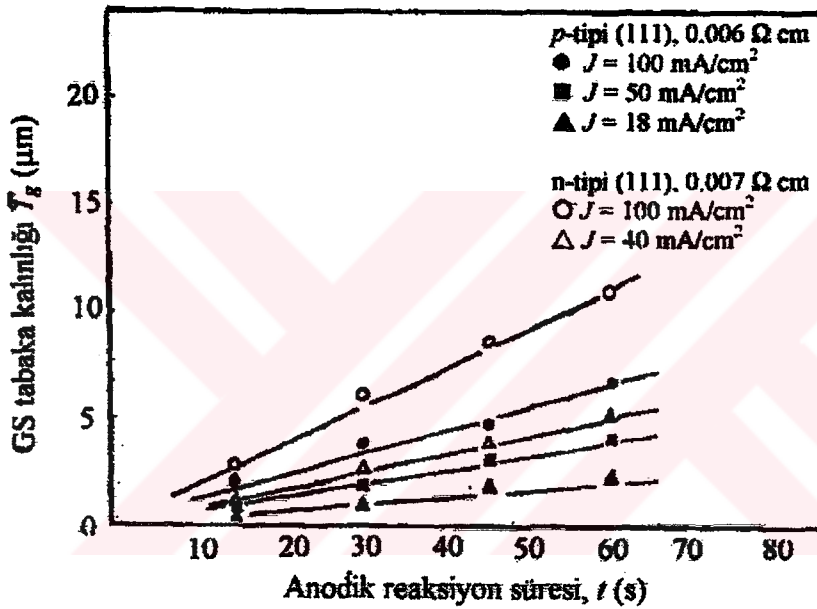


Şekil 1.4(a) İşlem yapılmamış Si kristali yapısı ve (b,c) iki farklı akım yoğunluğunda elde edilen gözenekli yapıların STM'de çekilmiş görüntüleri ($I_b < I_c$) (Patkhutik vd., 1993)

Şekil 1.4(c)'de görüldüğü gibi gözenekler, yüksek akım yoğunluğunda ($J=25 \text{ mA/cm}^2$) lifli olarak dallanmıştır. Şekil 1.4(b)'de görüldüğü gibi ise, düşük akım yoğunluğunda ($J=5 \text{ mA/cm}^2$) gözenekler, sıkı istif edilmiş silindir şeklinde muntazam bir yapıdadır. Bu

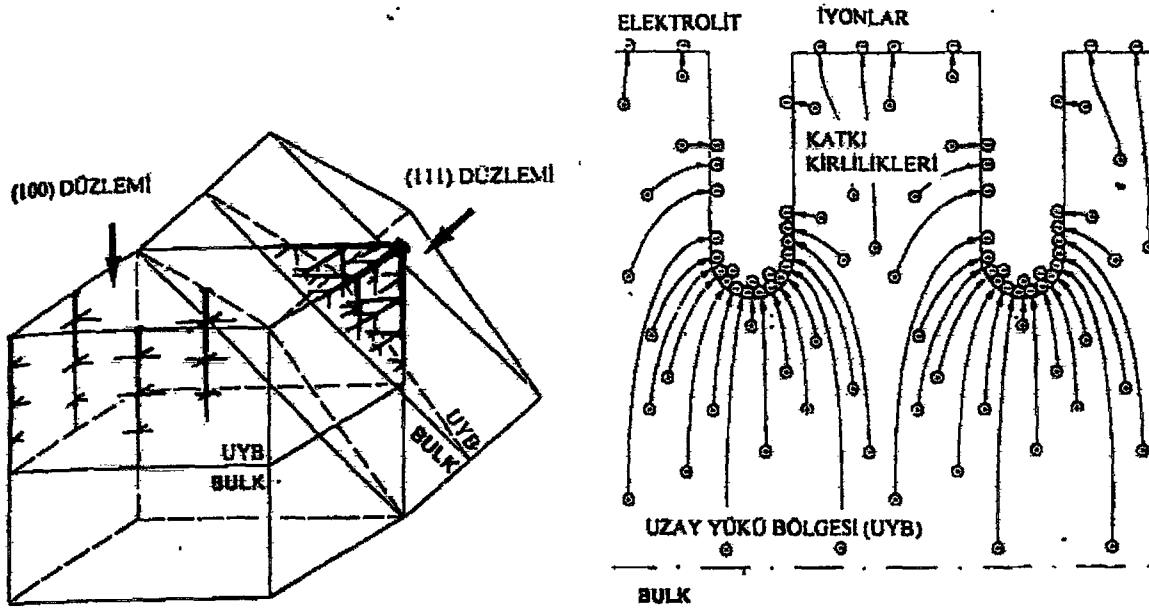
yapı, Şekil 1.4(a)'daki anodizasyon işlemine tabi tutulmamış kontrol numune ile karşılaştırıldığında, gözlenen kabarıklığın oluşan gözeneklerden ileri geldiği sonucuna varılmıştır. Anodizasyon geçirmemiş silisyum kristalinin kesiti yaklaşık 10 Å'luk dikey bir kabarıklık gösterirken, yüksek akım yoğunluğunda oluşturulan GS için 100 Å ve düşük akım yoğunluğunda oluşturulan GS için ise 30-50 Å'dan çok daha küçüktür (Patkhutik vd., 1993).

GS film kalınlığının anodik reaksiyon süresine göre değişimi ise Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Buna göre film kalınlığı anodik reaksiyon süresi ile doğru orantılıdır. Bu durum şekilde farklı akım yoğunlukları için gösterilmiştir (Arita ve Sunohara, 1977).



Şekil 1.5 Anodik reaksiyon süresi ile GS tabaka kalınlığı (T_g) arasındaki ilişki (Arita ve Sunohara, 1977)

GS filmlerin yapısında silisyum kristal düzlemlerinin de önemli bir payı vardır. Uzay yükü bölgesi ile ham (bulk) silisyum arasındaki sınır düzlemi, aşındırılan silisyum yüzeyine paralel olacağından, oluşan gözeneklerin yönünü belirlemede bir etkidir. Bu durum Şekil 1.6(a)'da gösterilmiştir. Şekil 1.6(b)'ye göre ise, oluşan gözeneklerin yönü, uzay yükü bölgesi ile ham (bulk) silisyum arasındaki sınır yüzeyine dik olacaktır.



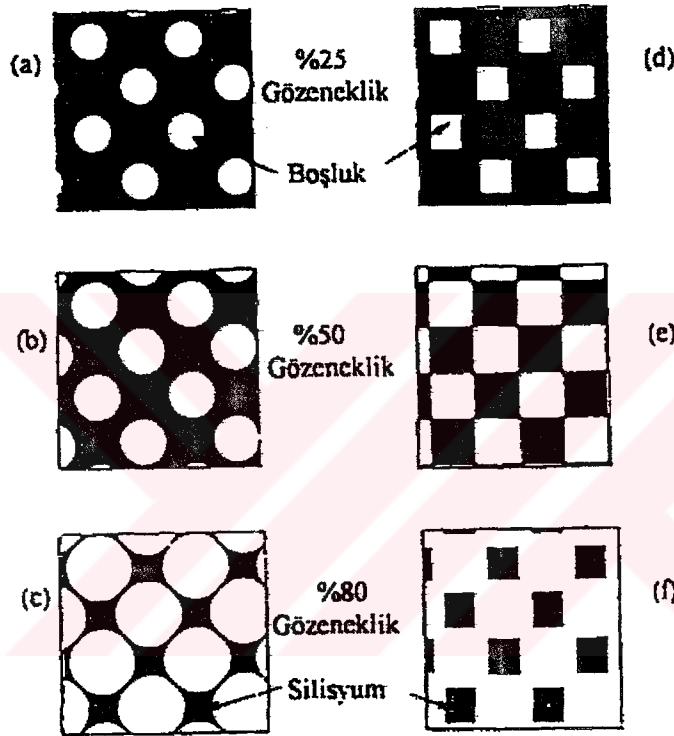
Şekil 1.6 (a) Si örneğin yöneliminin fonksiyonu olarak gözenek konfigürasyonu, (b) Anodizasyon sırasında gözenekler etrafında uzay yükü bölgesinde elektrik alan çizgilerinin şematik dağılımı (Lehmann ve Foll, 1990)

Bu durum (100) yönelimli numuneler için geçerlidir. Gerçekten de ana gözenekler (100) yüzeyinden $\langle 100 \rangle$ yönünde gelişir ve yayılır. Bununla beraber, (111) yönlü numuneler için de gözenekler, (111) yüzeyinden $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ ve $\langle 001 \rangle$ yönlerinde gelişir ve yayılır. (111) yönlü numuneler için bu düzlemler yüzeye dik olmayıp, gözenekler sürekli bölünme sonucunda köknar ağacı şeklini almaktadır. Numune yüzeyinde oluşan gözeneklerin yönlülüğü, görünüş itibarıyla, katkı tipi ve yoğunluğundan ve de elektrik alan yönünden bağımsızdır. Buna karşın, p^+ katkılı tabakalarda oluşan gözeneklerin yönünün, elektrik alan yönü ile ilişkili olduğu gözlenmiştir (Lehmann ve Foll, 1990).

Yıllar boyunca gözenekli silisyumun oluşum parametrelerine bağlı süngerimsi bir mikroyapı ortaya koyduğu gösterilmiştir. Mikroyapı üzerindeki akım yoğunluğu veya HF konsantrasyonu gibi anodizasyon parametrelerinin etkisini açıklamak için pek çok model geliştirilmiştir (Fronhoff vd., 1995). Buna ek olarak mikroyapının katkılama tipine ve katkılama konsantrasyonuna bağlılığı tartışılmıştır. Gözenekli materyaller için genel bir tanım olarak mikro-, mezo- ve makrogözenekli tabakalar farklı parametreler seçilerek oluşturulabilir. Farklı gözenekli tabakalar için kalan silisyum nanokristalinin karakteristik büyüklükleri 2 nm'den daha az, 1000 nm'den daha fazla büyüklükteki pek çok düzenle çeşitlilik gösterir (Amato vd., 1997).

Elbette GS tabakaların fiziksel özellikleri mikroyapıları ile yakından ilişkilidir. Örneğin, 2 nm'den daha küçük çaplı nanoparçacıklardan oluşan mikrogözenekli tabakalar, tek kristalli ham silisyumdan tamamen farklı olan bir dielektrik fonksiyonu ϵ' gösterdi (Rossow vd., 1993).

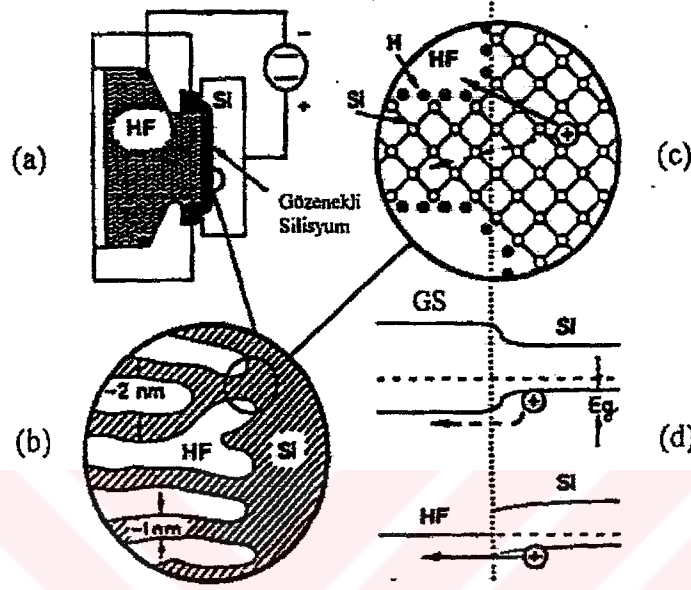
Ham (bulk) silisyum, altlık öz direncine ve anodizasyon koşullarına bağlı olarak mikrogözenekli (gözenek genişliği $< 20 \text{ Å}$), mezogözenekli (gözenek genişliği, $20\text{-}500 \text{ Å}$) veya makrogözenekli (gözenek genişliği $> 500 \text{ Å}$) olarak oluşturulabilir (Canham, 1990).



Şekil 1.7 (a)-(c) Silindirik boşlukları ve (d)-(f) dikdörtgen boşlukları içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş hali (Canham, 1990)

Şekil 1.7(a), hakikaten düşük gözenekli (%25) bir tabakanın anodize edilmiş (100) yüzeyinin mükemmel hale getirilmiş şeklini göstermektedir. Elde edilen verilere göre, az gözenekli, mezogözenekli silisyum; yüzeye dik hareket eden, sabit yarıçaplı, etkileşmeyen silindirik gözenek dizinlerini içeren ham (bulk) malzemeye yakın olabilir. Şekil 1.7(b) ve Şekil 1.7(c), kimyasal çözünme ile her bir gözenegın büyümesine neden olan aşındırıcı vasıtasıyla tabakanın gözenekliliğinin arttığını gösterir. Silindirik gözenekler için % 78.5'dan daha büyük gözeneklilik, en yakın komşu gözeneklerin mevcut birleşmesini ve sonuç olarak silisyum sütunları yoğunluğunun fiziksel izolasyonunu sağlar. ~%80'lik gözeneklilikte bu sütunların genişliği, ortalama gözenek yarıçapı ile karşılaştırılabilir.

Kristalografik etkiler mikrogözenek ve mezogözenek şekiller üzerine etki ederse, anodize edilmiş (100) katmanları için gözenekler Şekil 1.7(a)–(c)’deki gibi dairesel değil, Şekil 1.7(d)–(f)’deki gibi kare biçiminde olacaktır. Düzgün dikdörtgen gözenekler dizini için silisyum sütunlarının fiziksel olarak izole olduğu en düşük gözeneklilik, Şekil 1.7(e)’de gösterildiği gibi sadece ~%50’dir (Canham, 1990).



Şekil 1.8 (a) GS üretim şeması, (b) ve (c) anodik aşındırma esnasında gözenek yakınındaki kimyasal süreç, (d) gözenekteki ve işlenmemiş Si elektrolit geçişi için band diyagramı (Kanemitsu, 1995)

Şekil 1.8, GS üretim hücresi ile gözenekteki ve gözeneğe yakın anodik aşındırmayla ilgili özel süreçlerin şemasını göstermektedir. Boşlukların, silisyumun elektrokimyasal çözünme süreci için gerekli olduğu gerçeğine dayanır. Kuantum sınırlama olayından ötürü, GS’daki band aralığı, ham (bulk) silisyuma kıyasla arttığından, boşluklar gözenekli tabakaya girmek için ek bir E_g enerjisine ihtiyaç duyarlar (Şekil 1.8(d)). E_g , uygulanan gerilimden büyükse, gözenekli tabaka boşluklardan arınmış olur ve ileri derecede çözünme sona erer. E_g , nanokristallerin boyutunun bir fonksiyonu olduğundan, gerilim oluşumunun artmasının band aralığı enerjisinin artmasına ve gözenekli tabakadaki kristal boyutunun azalmasına neden olduğu sonucuna varılabilir. Bu süreç, kendi kendine ayarlanabilir bir süreçtir. Kuantum sınırlama olayı nanokristallerin boyutunu sınırlar (Kanemitsu, 1995).

Aydınlatma, gözenekli tabakada boşlukların oluşmasını ve uygulanan alan altında, gözenekli yapının ileri derecede çözünmesini sağlar. O halde, aydınlatma sırasında

nanokristallerin boyutu kontrol altına alınabilir. *n*-tipi silisyum katman üzerinde aydınlatma ile GS tabaka oluşturulur. Elektrokimyasal aşındırma sırasında aydınlatma için kullanılan ışığın dalgaboyu değiştirilerek, *n*-tipi GS tabakanın fotolüminesans dalgaboyu da kontrol edilebilir (Kanemitsu, 1995). Tavlama sürecinde GS yüzeylerindeki Si-H ve Si-O bağların konsantrasyonunun değişimi gözlenmiştir. (Dzhafarov ve Can, 2000a).

GS tabakaları derinliğe bağlı olarak tam homojen değildir. *p*-tipi altlıklar üzerindeki GS'un elektrokimyasal yöntemle oluşumu sırasında, tabakaların mikroyapısı ve gözenekliliği derinlikle değişir. Silisyum nanokristallerinin boyutunu azaltan ek kimyasal aşındırma süreci (Smith ve Collins, 1992; Halimaoui, 1994), yahut da gözenekliliği artıran HF konsantrasyonunun kalınlıkla azalması bunun sebebidir (Herino vd., 1987; Bomchil vd., 1992; Lehmann, 1993). Kimyasal aşındırma süreci ile çözünen silisyum miktarı gözenekli silisyum tabakanın yüzey alanına ve toplam aşındırma zamanına bağlıdır. HF konsantrasyonunun azalması Fick kanunu ile HF moleküllerinin akısına bağlıdır.

$$F_{HF} = D_{HF} \cdot \frac{C_{üst} - C_{alt}}{d} \quad (1.1)$$

Burada; C_{alt} ve $C_{üst}$, sırasıyla GS tabakanın alt ve üst kısmındaki HF konsantrasyonları, d tabaka kalınlığı, D_{HF} difüzyon katsayısı ve F_{HF} HF moleküllerinin akısıdır. Sabit bir tabaka kalınlığı için, HF konsantrasyonunun tabakanın üst kısmından alt kısmına doğru azalması HF moleküllerinin daha yüksek akısı yani GS oluşumu sırasında yüksek akım yoğunlukları için daha büyüktür.

HF konsantrasyonunun azalmasına bağlı olan derinlik gradyentleri, yüksek akım yoğunluklarının uygulanmasının gerektiği yüksek GS durumlarında beklenir (Thonissen vd., 1996).

1.3 Metal-Gözenekli Silisyum Eklemler

Metal-GS eklemleri Schottky eklemlerine benzer davranışlar göstermiştir. GS'daki yerdeğiştiren taşıyıcıların geçiş mekanizmalarının açıklaması ve akım-gerilim karakteristikleri ile ilgili ayrıntılı çalışmalar mevcut değildir (Dimitrov, 1995).

Dimitrov'un çalışmasında metal-GS-monokristalik silisyumun akım-gerilim karakteristiklerinin analizleri yapılmıştır. Bu çalışmanın önemli özelliği, farklı nispi nemlerde ters akım-gerilim eğrileri (GS tabakası üstüne kaplanan metale uygulanan pozitif potansiyel) vermesidir.

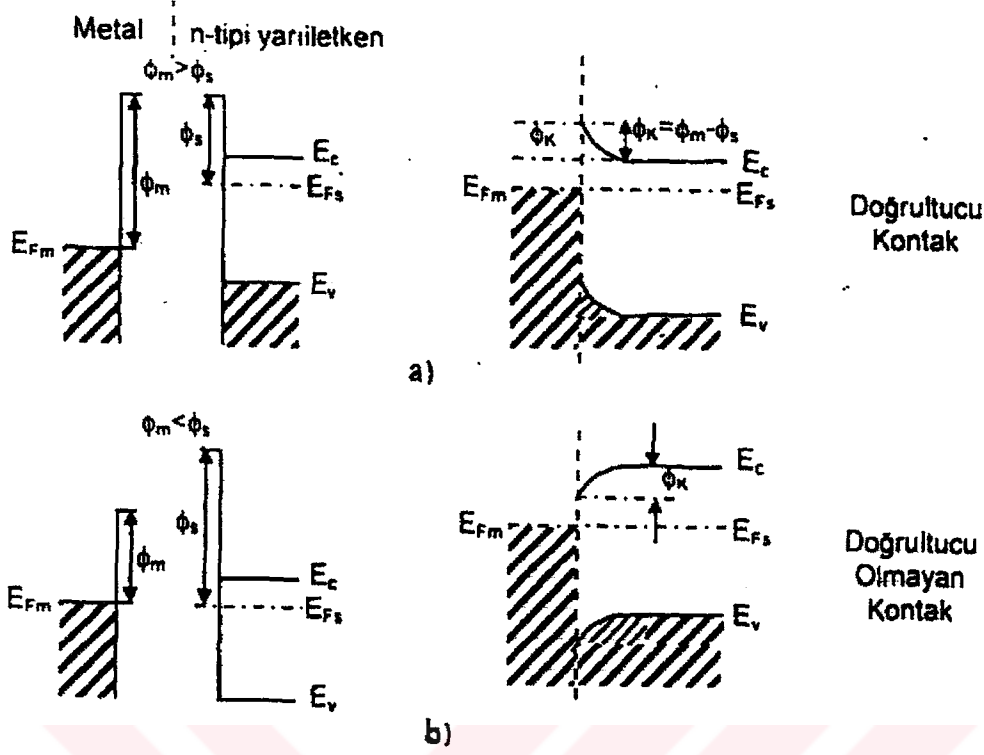
Ayrıca GS, görülebilir ışık emisyonu için ümit verici bir malzeme olarak görülmüştür (Lazarouk, 1996).

Yine, $p-n$ kristal silisyum kavşağına ters kutuplu gerilim etki etmesinden elde edilen oda sıcaklığındaki ışık emisyonu ilk olarak 1955'te yazılmıştır. Her iki durumda ölçülen kuantum verimi ise $\%10^{-5}$ 'i geçmemiştir (Lazarouk, 1996).

Yapılan çalışmaların çoğu, metal ile GS arasında olduğu varsayılan Schottky engeli üzerine yapılmıştır. Bu nedenle düzenden geçen akımın, metal ile GS arayüzeyinde Schottky engeli tarafından kontrol edildiği fikri, araştırmacıları bir diyot denklemine göre elektriksel karakteristikleri açıklamaya yöneltmiştir.

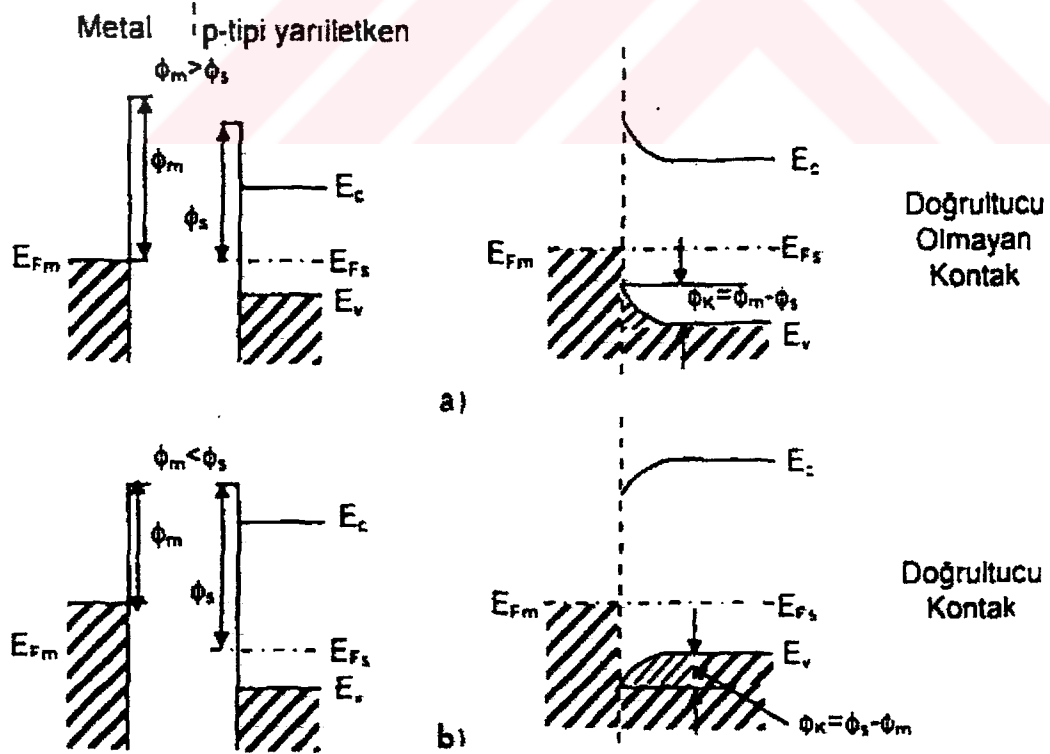
1938 yılında Schottky, daha sonraları Mott tarafından ileri sürülen iki modelin ışığı altında günümüze kadar birçok model göz önüne alınmış olup, metal-yarıiletken kontaklarındaki akım geçiş mekanizması anlaşılmaya çalışılmıştır. Buna göre, metal-yarıiletken kontakların özelliklerinin anlaşılması için metal ile yarıiletkenin enerji bant diyagramlarından yararlanılmaktadır (Algün, 1996).

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 elektronları 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 (Cafer, 2000).



Şekil 1.9 Metal - *n*-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları

- (a) Doğrultucu kontakt, $\Phi_m > \Phi_s$
 (b) Doğrultucu olmayan kontakt, $\Phi_m < \Phi_s$



Şekil 1.10 Metal - *p*-tipi yarıiletken kontağın enerji band diyagramları

- (a) Doğrultucu olmayan kontakt, $\Phi_m > \Phi_s$
 (b) Doğrultucu kontakt, $\Phi_m < \Phi_s$

Şekil 1.9(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 yarıiletkenin 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 yer değiştirmesi, 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 temasta olmadığı durumda, yarı iletkenin herhangi noktasında elektronların enerjisi aynıdır. Metal-yarıiletken kontağın oluşması durumunda, elektrona kontağın elektron alanı tarafından kuvvet uygulanmaktadır. Bu nedenle elektronun elektrik alanda hareket süresi ve potansiyel enerjisi artmaktadır. Elektronun potansiyel enerjisi en büyük değerlere metal-yarıiletken sınırında ulaşır. Yarıiletkenin enerji bandlarındaki eğim, elektronun enerjisinin koordinatla değişimini ifade etmektedir. Elektronları kaybeden, elektronları fakirleşmiş yani elektronlardan arınmış bölgenin (veya uzay yükü bölgesinin) kalınlığı

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

olarak ifade edilir. Burada ε elektrik sabiti, ε_o elektron katsayısı, e elektron yükü, N_d donörlerin konsantrasyonu olup, φ_K kontak potansiyeller farkıdır.

Şekil 1.9'da gösterildiği gibi, yarıiletkenin yüzey bölgesinde enerji bantları yukarı eğilmektedir ve sonuçta yarıiletkenin kontak bölgesinde elektronlardan fakirleşmiş pozitif yüklü tabaka (donor iyonlarından oluşmuş) meydana gelmektedir. Metalin temas bölgesinde ise, yarıiletkenden geçen elektronlarla oluşmuş negatif yüklü tabaka 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 takdirde ($L_o \ll \lambda$), yani fakirleşmiş bölgede elektronlar birbiriyle çarpışmadan 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.

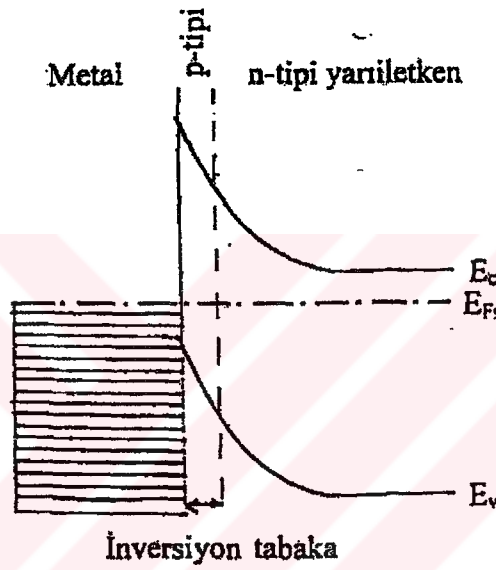
Metalin çıkış işi n -tipi yarıiletkenin termodinamik çıkış işinden daha küçük olduğu durumda ($\Phi_m < \Phi_s$), yarıiletkenin kontak bölgesinde enerji bandı aşağıya eğilmektedir. (Şekil 1.9(b)). O halde yarıiletkenin yüzey bölgesinde elektron konsantrasyonu, iç bölgesindeki konsantrasyonundan daha 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 ($\Phi > \Phi_s$), elektronların p -tipi yarıiletkenden metale geçişleri sebebiyle yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artar ve tabakanın direnci azalır (Şekil 1.10(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 büyükmektedir. Bu tür metal p -tipi yarıiletken kontağı doğrultma özelliğı göstermektedir ve Schottky kontağı olarak tanımlanır.

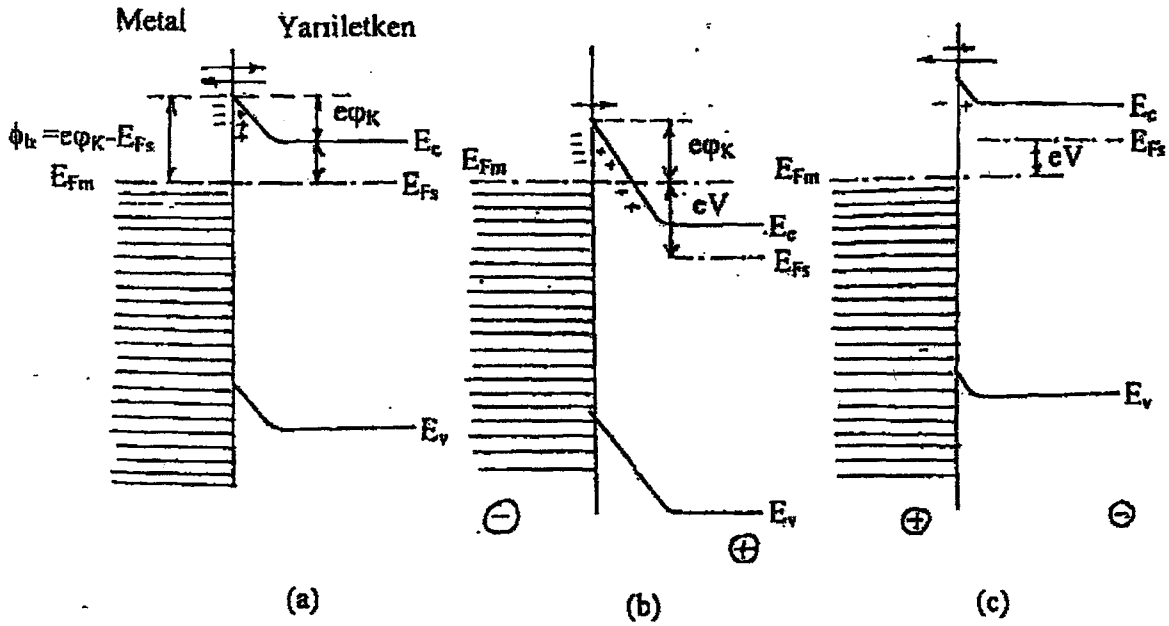
Schottky kontakların oluşma halinde (Şekil 1.9(a) ve 1.10(b)), eğer kontak potansiyelleri farkı ($e\phi_K = \Phi_m - \Phi_s$ veya $e\phi_K = \Phi_s - \Phi_m$) yeterince büyük ise , kontak bçlgesinde yarıiletken bandının eğimi de büyüktür. Bu nedenle yarıiletkenin yüzey tabakasının iletkenlik tipinin değışmesi beklir. Yüzey bölgesindeki bu tür tabaka “inversiyon tabaka” olarak adlandırılır. Şekil 1.11’de metal n -tipi yarıiletken kontak için $(\Phi_m) \Phi_s$) enerji bant diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 1.11 İnversiyon tabakalı metal – n -tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı

Şekil 1.11’de n -tipi 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 diyotlarını (Şekil 1.9(a) ve 1.10(b)) temel özelliğı 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 1.12 Metal – *n*-tipi yarıiletken doğrultma kontağının enerji diyagramı

Sınır bölgesindeki metalden yarıiletkene geçen elektronlar için potansiyel engelin yüksekliği

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

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

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

ile verilir. Denge durumunda kontakta geçmemektedir.

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

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

$$e\phi = e\phi_K - eV \quad (V < 0) \quad (1.6)$$

kadar artmaktadır. Fakirleşmiş veya hacimsel yüklü bölge kalınlığı büyümektedir.

$$L_o = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_o(\phi_K - V)}{eN_d}} \quad (V < 0) \quad (1.7)$$

Doğru yönde gerilim uygulandığında (Şekil 1.9(c)), yarıiletken den metale geçen elektronlar için potansiyel engel azalmaktadır. Potansiyel engel yüksekliği

$$e\phi_{(0)} = e\phi_K - eV \quad (V > 0) \quad (1.8)$$

kadar azalmaktadır ve hacimsel yüklü bölgenin kalınlığı küçülmektedir.

$$L_o = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_o(\phi_K - V)}{eN_d}} \quad (V > 0) \quad (1.9)$$

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

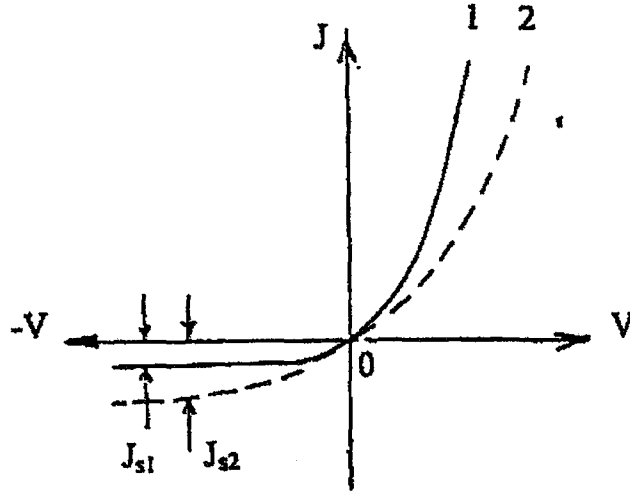
$$J_s = en_s \mu_n E_0 \quad (1.11)$$

denklemleri ile verilir. Burada n_s yük taşıyıcılarının doyma konsantrasyonu , E_0 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 1.13 Schottky diyodun diyot teorisine (1) ve difüzyon teorisine (2) göre akım-gerilim karakteristiği

Şekil 1.13'te 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 hızlı artmaktadır.

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

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

Ters gerilim uygulandığında ($V < 0$), geriliminin 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

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

olarak tanımlanır.

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

1.4 Metal-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Neme Duyarlılık Özellikleri

Gazlı bir ortamdaki su buharı miktarı nem olarak tanımlanır ve yoğunlukla nispi nem “ NN ” (Relative Humidity, RH) olarak ölçülür. Örneğin belirli bir sıcaklıktaki doyma basıncına “ P_d ” bağlı su basıncı “ P_s ”:

$$NN = 100 \frac{P_s}{P_d} \quad (1.16)$$

olarak verilir (Rittersma vd., 2000).

1 m³ havadaki su buharının kütlesine ise mutlak nem denir. Mutlak nem, havadaki su buharının yoğunluğuna eşittir ve havadaki su buharının yoğunluğu “ ρ_{sb} (g/m³)” ile gösterilir.

Kendi suyu ile denge durumunda bulunan buhar, doymuş buhar olarak tanımlanır. Doymuş buharın basıncı kendi kimyasal bileşimine ve sıcaklığına bağlıdır. İşte nispi nem “ NN ” (Relative Humidity, RH), mutlak nemin ve doymuş buhar neminin orantısı ile belirlenir.

$$NN = \frac{\rho_{sb}}{\rho_{db}} \cdot \%100 \quad (1.17)$$

şeklinde verilir. Burada ρ_{sb} su buharının yoğunluğu, ρ_{db} doymuş buharın yoğunluğudur.

Dolayısıyla nispi nem

$$NN = \frac{m_{sb}}{m_{db}} \cdot \%100 \quad (1.18)$$

olarak bulunur. Burada m_{sb} ve m_{db} sırasıyla su buharının kütlesi ve doymuş buharın kütlesidir (Öztemel, 1999).

GS'un neme duyarlılığı gözenekliliğe, gözenek yapısına ve gözeneklerin büyüklük dağılımlarına bağlıdır. Bunlar elektrolit konsantrasyonu, akım yoğunluğu, anodizasyon süresi ve de alt tabakadaki katkılama seviyeleri ile kontrol edilebilir. Nem algılama için en iyi mikroyapı az katkılı *p*-tipi silisyum için elde edilmiştir (O'Halloran, 1999; Beale vd., 1985; Herino vd., 1987). Etkili nem algılama için gözenek büyüklüğü dağılımının düşük nispi nem değerleri için 2-10 nm aralığında, yüksek nispi nem değerleri için ise daha büyük (20-100 nm) gözenek boyutlarını kapsaması gerektiği kanıtlanmıştır (O'Halloran, 1999; Beale vd., 1985; Herino vd., 1987; Seiyama vd., 1983).

Nem algılama materyali olarak gözenekli polisilisyum ve gözenekli SiC 'un uygunluğu araştırılmıştır. Nem algılama için tek kristalli silisyumun uygun olduğunun gösterildiği ve standart silisyum işlemi ile kolaylıkla tamamlanabileceği daha önce yapılan çalışmanın bir devamı niteliğindedir. Nem algılama için en iyi mikroyapı az katkılı *p*-tipi silisyum için elde edilmiştir. Polisilisyum kullanmanın avantajı sadece çok küçük bir sıcaklık direnç katsayısından ötürü (katkılama ile) cevabın ayarlanmasının mümkün olmasıdır (Connolly vd., 2002).

Ayrıca, oksidasyon işlemleri GS materyalinin özelliklerini kuvvetli bir şekilde etkileyebilir. GS'un oda sıcaklığında ve 0.1-10000 dakika zaman aralığında sadece havadaki neme veya havadaki nem ve doymuş piridin buharına maruz bırakılmış GS'un

oksidasyon süreci için FTIR çalışmaları yapılmıştır. Piridin varlığında oksidasyonun daha hızlı olduğu bulunmuştur (Mattei vd., 2002).

Bir başka çalışmada, farklı sıvılarda buharlara maruz kalmasından dolayı ince GS tabakalardaki optik değişimleri incelemek için spektroskopik elipsometri kullanılmıştır. Bu teknik zararlı olmayıp, GS'un optik ve mikroyapıdaki özelliklerini çalışmak için önceden kullanılmıştır (Ferrieu vd., 1992; Rossow vd., 1993). Buna göre, ince GS tabakalar gaz algılama amaçları için bir optik sensör materyal olarak kullanılabilir (Zangooie vd., 1997).

Hidroflorik asit çözeltileri içinde elektrokimyasal anodizasyon ile oluşturulan GS tabakalar, oda sıcaklığındaki fotolüminesansın keşfinden beri dikkatleri üzerine toplamıştır (Canham, 1990). GS içindeki fotolüminesansın fiziksel kavramları henüz tamamiyle anlaşılmamasına rağmen, optoelektronikte GS'un gelecekteki uygulamaları hakkında iyimserlik vardır. Ayrıca, GS kullanımına ve sensör teknolojisi alanındaki geniş iç yüzey alanına artan bir ilgi vardır (Kozłowski vd., 1995; Lang vd., 1995; Taliercio vd., 1995; Motahashi vd., 1995).

Wang ve Arwin (2002)'in çalışmasında ise GS tabakaların alkollere olan elipsometrik buhar duyarlılıkları bakır çöküntü ile geliştirilmiştir.

Geniş iç yüzey alanlarından ve kolaylıkla modifiye edilebilir mikroyapılarından dolayı GS tabakalar, kimyasal sensör uygulamalarında özel bir ilgiye sahiptir. GS'un elektrik ve optik karakteristiklerinin – örneğin, iletkenlik, kapasitans veya kırıcılık indisi – moleküllerin yüzeye tutunmasını etkili bir şekilde değiştirebilmesinin mümkün olduğu bulunmuştur (Stierenard vd., 1995; Motahashi vd., 1996; Zangooie vd., 1997; Snow vd., 1999). Adsorpsiyon – örneğin gaz moleküllerinin ya da protein moleküllerinin adsorpsiyonu (tutunması) – yüzey kimyasal özellikleri kadar esasen GS'un fiziksel mikroyapısı ile belirlenmiştir (Deremes vd., 1995, Zangooie vd., 1998). Örneğin gözeneklilik, kalınlık, ve gözenek boyutları dağılımı gibi GS'un fiziksel yapısı, GS üretmek için kullanılan elektrokimyasal aşındırma metodundaki hidroflorik asit konsantrasyonu, akım yoğunluğu, ve aşındırma süresi değiştirilerek kontrol edilebilir (Herino vd., 1987). Diğer yandan GS'un yüzey kimyasal özellikleri özel uygulamalar için oksidasyon, nitridasyon ve diğer kimyasal işlemlerle modifiye edilebilir (Zangooie

vd.,1998; Morazzani vd., 1996). Son yıllarda GS'un gözenekleri içersine yeni materyaller yerleştirmek için pek çok çaba sarfedilmiştir (Herino, 2000). Metallerin, yarıiletkenlerin ve polimerlerin tabaka örme (spin coating), elektrokimyasal kaplama (deposition) veya sıvı kontak metotları kullanılarak GS'un gözeneklerinin kısmen veya tamamen doldurulduğu bildirilmiştir (Tsuboi vd.,1999; Moreno vd., 1999; Savaniu vd., 1999). Pek çok araştırmacı materyallere bağlı olarak GS'un lüminesansındaki değişimlere odaklanmaktadır.

Tam ve güvenilir nem sensörlerine olan büyük ilgi, gazlı ortamların su buharı içeriğini kontrol etmenin ve izlemenin açık önemini tek başına ortaya koyar. Nem sensörlerinin uygulamaları çevresel ve endüstriyel uygulamalardan iç uygulamalara kadar geniş bir dağılım gösterir. Geçmişte, farklı iletim tekniklerine, materyallerine ve üretim tekniklerine dayalı birçok nem sensörü gösterilmiştir (Traversa, 1995; Sakai vd., 1996; Sberveglieri vd., 1994; Seiyama, 1983; Regtien, 1981; Hijikigawa vd., 1983; Lee ve Park, 1996; Penman, 1955; Yamazoe ve Shimizu, 1986; Heber, 1987). Diğer yandan, nem sensörlerine olan ilgi de nem ölçümünün bazen düşünüldüğü kadar kolay olmadığı gerçeğidir. Nem sensörleri birçok gereksinimi karşılar: Kısa karşılık süresi, yüksek duyarlılık, ihmal edilebilir histerizis, nem ve sıcaklıkta geniş uygulama imkanı. Dahası, uzun vadeli özellikler göstermeleri gerekir. Bu nedenledir ki, hızlı tepkime veren, çok duyarlı ve uzun vadede sağlam, neme duyarlı maddeler üzerinde çalışmalar sadece mantıksal olarak devam etmektedir (Traversa, 1995; Rittersma, 1999).

Yeni çalışma prensibine dayalı olarak metal-GS esaslı nem sensörleri (nemin etkisiyle metal-GS eklemlerinde açık devre voltajın oluşması) araştırılmıştır (Dzhafarov ve Can, 2000b; Dzhafarov vd., 2001; Dzhafarov vd., 2002).

1.5 Metal-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitif Özellikleri

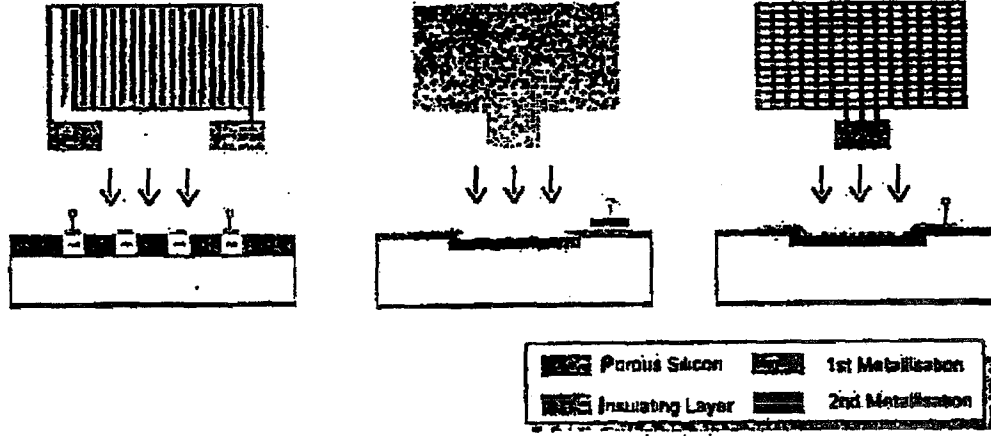
Rittersma vd. (2000)'nin yaptığı çalışmada yeni bir nem sensörünün dizaynı, imali ve karakterizasyonu gösterilmiştir. GS dielektrikli bir kapasitör, iki termorezistör ve bir besleyici dirençten meydana gelen bir aygıt oluşturulmuştur.

Silisyuma dayalı nem sensörleri için yeni çıkmış bir aday, derişik HF içinde elektrokimyasal aşındırma yoluyla ham malzemenin doğrudan şekillendirildiği

mikrogözenekli silisyumdur (Smith vd., 1992; Beale vd., 1985; Bressers, 1995; Eddowes, 1990; Canham, 1990). Mikrogözenekli silisyum, %60 civarında bir boşluk kesri veya gözeneklilikte birkaç nm'lik düzendeki tel ve gözeneklerin iskeletinden oluşur. Ayrıca, bu tür GS'un çoğunlukla serbest taşıyıcılar tarafından tüketilmesi, yüksek bir öz direnç " $\rho_{GS} > 10^5 \Omega \text{ cm}$ " ve vakumda 2-3 civarında düşük bir dielektrik sabiti " ϵ_{GS} " gösterdiğini ifade eder (Ben-Chorin vd., 1995; Anderson, 1992). Su buharının adsorbsiyonu üzerine, ilkin, suyun çok farklı olması yüzünden, ikincisi, yüzey-hacim oranının (YHO) büyük olması ve GS'un gözenek yapısı yüzünden GS'un elektriksel özellikleri şiddetli bir şekilde değişmiştir.

Bu malzemenin potansiyeli buhar tutan duyarlı bir tabaka olarak yeni bir kapasitif nem sensörü şeklinde gösterilmiştir. Bu sensörün dizaynındaki önem, kolay imal edilebilir olması- örneğin parça imallî alet olması-dır.

Kapasitif nem sensörleri bir çift elektrot ile kontaklanmış ince bir film den oluşur, ki bu şekilde elektriksel geçirgenlik ve iletkenlik $NN(RH)$ 'in bir fonksiyonudur. Çünkü ince filmin elektriksel özelliklerinin ve metal-ince film kontaklarının sıcaklığa göre bir zıt-duyarlılık göstermesi mümkün olduğundan, her zaman bulunmasa bile, çip üzerinde sıcaklık ölçümüne karşılık gelen bir yapıya genellikle gereksinim duyulur (Rittersma, 1999). Eğer ince film belirli bir gözeneklilik gösterirse, su molekülleri bu gözenekli dielektrik içersine bol bol adsorbslanır. Koşullar altında, histerizis problemlerinin artmasıyla beraber dielektriğin uzun vadede sağlamlığını yükseltir (Traversa, 1995; Richter, 1992). Bu yüzden bütün adsorblanmış buhar dışarı akıtılıp, ince film temizlenmek suretiyle, sıcaklığa karşılık gelen yapı besleyicinin yanında bir direnç bulundurulabilir (Rittersma vd., 1998). Elbette ki ince filmin adsorbsiyon özelliklerinin bu sıcaklık değişiminden etkilenmemesi gerekir; bu nedenle duyarlı dielektrik seçimi sensör dizaynında çok önemli noktalardan birisidir (Rittersma vd., 2000).



Şekil 1.14 Bir kapasitif GS nem sensörünün olası elektronik konfigürasyonları: inter dijital elektrotlar (solda), plaka elektrot (ortada) ve ağıl plaka elektrot (sağda) (Rittersma vd., 2000)

Sensörün özellikleri yaygın şekilde, elektriksel olarak kontaklanmış GS yoluyla belirlenir. Bu, sadece kapasitörün duyarlılığı için değil, aygıt özelliklerinin tekrar-üretilebilirliği için de doğru değildir. Şekil 1.14'te mümkün üç elektrot konfigürasyonu gösterilmiştir. Solda, inter dijital elektrotlar (IDE) silisyum içine yerleştirilmiş ve bir metal – örneğin, Al buharlaştırılarak – ile kontaklanmıştır (Watanabe vd., 1995). Ortada, paralel plakalı bir kapasitör ince bir metal film tabakası (tipik olarak 10-30 nm Au) çöktürülerek (depositing) üretilmiştir. Bu işlemde bağ yapısını (bond pad) elde etmek için ekstra bir metalleme gerekebilir (Richter, 1992). Sağda, kare şeklindeki elektrot ağlarla sağlanmıştır. Burada, yalıtkan koruyucu tabaka gözenekli bölgeyi tanımlamak için –direnç ve ağ yapılarını içeren- tüm metallemeden önceki anodizasyon üretilmesi vasıtasıyla kullanılabilir. Ayrıca, ortada gösterilen üstteki ince Au elektrot, buhar için difüzyon bariyeri olarak böylece aygıtın geçicici özelliklerinden olumsuz etkilenme olarak işe yarar. Sonuç olarak dikkat edilecek olursa, bu işlemle çok ince gözenekli yapraklar (100-500 nm) kontaklama zorlukları olmaksızın gerçekleştirilebilir (Rittersma vd., 2000).

İlk olarak kontak potansiyel farkı değişimlerinin ölçümleri kullanılarak, bir palladyum-GS hidrojen sensörü geliştirilmiştir. Kontak potansiyel farkı genliği ve tepki hızı; silisyum alt tabakasının tipine, GS hazırlama için kullanılan aşındırma akım yoğunluğuna ve sonradan ortaya çıkan oksidasyona bağlı olması gösterilmiştir. (Polishchuk vd., 1998).

Metal-*n*-tipi yarıiletken ($\Phi_m > \Phi_s$) ve metal-*p*-tipi yarıiletken ($\Phi_m < \Phi_s$) kontaklarda, yük taşıyıcılarının konsantrasyonları metal ve yarıiletken arasında değişmektedir. Sonuçta yarıiletkenin sınır bölgesinde elektronların (*n*-tipi) veya deliklerden (*p*-tipi) fakirleşen

yüksek dirence sahip tabaka meydana gelmektedir. Bu bölgenin kalınlığı (L_0) dışarıdan uygulanan gerilim ile değişmektedir. Gerçekte bu tür metal-yarıiletken kontağın (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 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 olaya 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.

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (1.19)$$

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

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

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_o S}{L_0} \quad (1.20)$$

Burada L_0 hacimsel yüklü bölgenin veya eklem kalınlığı şu şekilde verilir.

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon \epsilon_o \phi_K}{en}} = \sqrt{\frac{2\epsilon \epsilon_o (\Phi_m - \Phi_s)}{e^2 n}} \quad (1.21)$$

(1.20) denklemi, (1.21) denkleminde yerine konursa, Schottky diyotun kapasitansı şu şekilde bulunur.

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_o e n}{2 \phi_K}} \quad (1.22)$$

burada, S diyodun alanıdır.

(1.20) formulünden görüldüğü gibi Schottky diyotlarının kapasitans ölçümlerinden, fakirleşmiş bölgenin kalınlığı (L_o) bulunur.

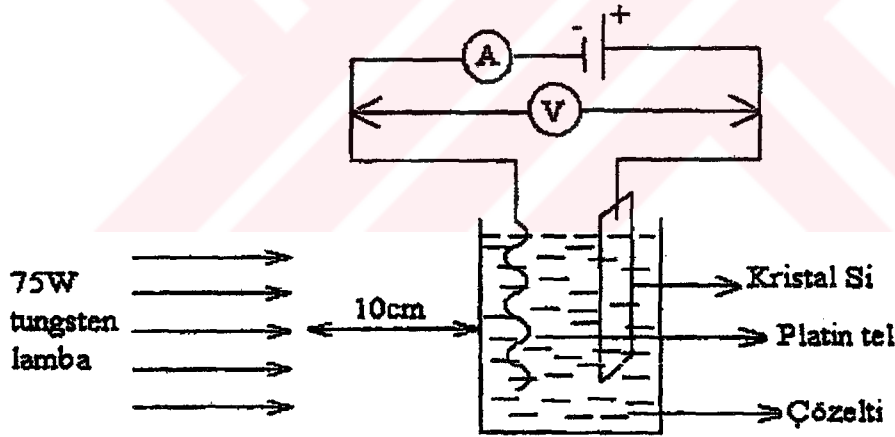


2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Elde Edilmesi

GS elde etmek için tek kristalli silisyum, hidroflorik asit (HF) içerisinde, sabit akım yoğunluğunda, elektrokimyasal anodizasyon yoluyla aşındırılmıştır.

Bu çalışmada öz direnci $0.006-0.015 \Omega\text{cm}$ ve kalınlığı yaklaşık $381 \mu\text{m}$ olan Sb (Antimon) katkılı *n*-tipi monokristal silisyum kullanılmıştır. 1 HF (%25): 3 H₂O (%75-distile su) oranında seyreltik HF (hidroflorik asit) çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltiye daldırılmadan önce silisyum kristalinin yüzey alanı ölçülmüş ve yüzeyi alkolle temizlenmiştir. Gözenekli silisyum oluşturulurken silisyum kristalinin parlak yüzeyi deney düzeneğinden yaklaşık 12 cm uzağa yerleştirilen 75 W halojen lamba ile aydınlatılmıştır. Elektrot olarak ise platin tel kullanılmıştır. Anodizasyon işlemi sırasında doğru gerilim kaynağının pozitif ucuna silisyum kristali, negatif ucuna ise elektrot bağlanmıştır. Şekil 2.1, GS'un oluşturulduğu deney düzeneğini göstermektedir.



Şekil 2.1 GS elde etmek için hazırlanan deney düzeneği

Farklı yüzey alanına sahip silisyum örnekleri için $10-12 \text{ mA/cm}^2$ sabit akım yoğunluğunda 20 dakikada GS elde edilmeye çalışıldı.

Anodizasyon işleminden sonra çözeltiden çıkarılan örnek alkolle temizlendi. Elde edilen bu gözenekli silisyumun yüzeyinin grimsi renkte olduğu gözlemlendi. Örnek üzerine UV ışık düşürüldüğünde tabaka yüzeyinin homojen turuncu renkli lüminesans verdiği gözlemlendi.

GS film elde etmek için GS oluşturulduktan sonra, örnek çözeltiden çıkarılmadan 1-2 dakika boyunca akım yoğunluğu 900-1000 mA/cm²'lere kadar hızlı bir şekilde arttırılmak suretiyle silisyum yüzeyinden zar gibi bir GS tabakası ayrıldı.

2.2 Gözenekli Silisyum Parametrelerinin Ölçümleri

Ayrılan GS tabakasının gözenekliliği % 35-50 olarak hesaplandı.

GS'un gözenekliliği,

$$P(\text{Gözeneklilik}) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \cdot 100 \quad (2.1)$$

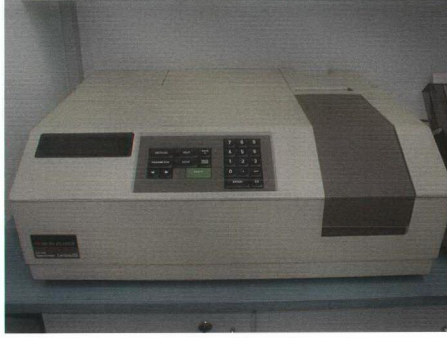
bağıntısından hesaplanır. Bu arada m_1 deneyden önceki silisyumun kütlesi, m_2 deneyden sonra oluşan GS tabakasının kütlesi, m_3 ise GS tabakası ayrıldıktan sonra kalan silisyumun kütlesidir. Bağntı

$$P(\text{Gözeneklilik}) = \frac{m_{Si} - m_{Si+GS}}{m_{Si} - m_{Si-GS}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

şeklinde de yazılabilir.

Ayrılan GS tabakasının bulunduğu çözelti, içinde saf su bulunan petri kabına döküldü. Sökülen tabaka cam üzerine alındı. GS tabakasının kalınlığı mikrometre ile 5-20 µm arasında ölçüldü.

Ayrılan GS tabakasının optik geçirgenliğine "UV/VIS Spectrometer, Lambda 2S-Perkin Elmer" spektrofotometre ile 300-1000 nm aralığında bakıldı. Öncelikle cam üzerine alınmış olan GS film için maske yapıldı. Aletin haznesine yerleşecek büyüklükte bakır kesilip, gönderilecek ışığın örnek üzerinden geçmesi için bakır yüzey matkap ile delindi. Daha sonra cam üzerindeki örnek bu maskeye tutturuldu.



Şekil 2.2 GS filmin transmisyonunu incelemek için kullanılan spektrofotometre, “UV/VIS Spectrometer, Lambda 2S-Perkin Elmer” (Katıhal Elektronikği Araştırma Laboratuvarı, YTÜ)

İlk olarak spektrofotometre Method 5'e getirilip, numune olmadan Back Correction yapıldı. Sonra hazırlanan numune hazneye yerleştirilip alet çalıştırıldı. Numune üzerinden geçen ışığın dalga boyuna bağlı olarak transmisyon grafiği yazıcıdan çıktı alındı. Çizilen grafik yardımıyla soğurma katsayısı hesaplandı.

2.3 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Elde Edilmesi

Ag-GS eklem elde etmek için elde edilen GS örneğin gözenekli yüzeyine vakumda elektron demeti yöntemiyle Ag film kaplandı (Şekil 2.3).

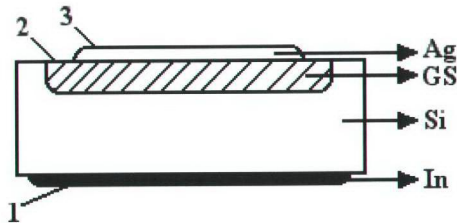


Şekil 2.3 GS üzerine Ag buharlaştırmak için kullanılan vakum tüpü (Katıhal Elektronik Araştırma Laboratuvarı, YTÜ)

Ölçümlerin yapılabilmesi için Ag kaplanmış GS örneğin yüzeylerine kontaklar yapıldı. Öncelikle silisyum örneğin gözenekli olmayan tarafı titizlikle zımparalanarak oksit tabakası temizlendi ve alkol ile silindi. Daha sonra temizlenmiş olan yüzeye dikkatli bir şekilde eritme yöntemiyle (200 °C) indiyum omik kontak yapıldı, “Kontak 1”.

Silisyum örneğin gözenekli yüzeyine de indiyum omik kontak yapıldı, “Kontak 2”.

GS üzerine kaplanmış olan Ag film üzerine ise gümüş kontak (silver paint) yapıp kurumaya bırakıldı, “Kontak 3”.

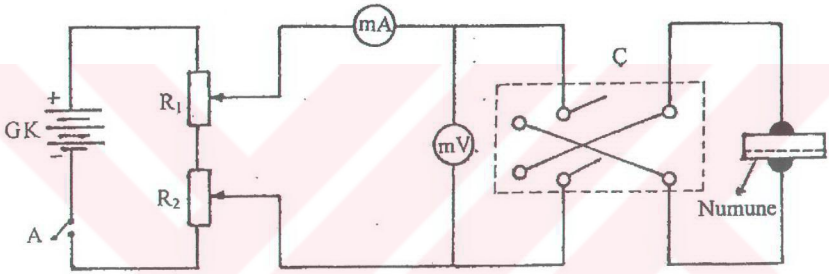


Şekil 2.4 Ag-GS eklem yüzey kontakları

2.4 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Ölçümleri

Örneğin akım-voltaj karakteristiklerini ölçmek için öncelikle altlık hazırlandı. Bakır kesilerek üzerine üç kontak için üç yol bant yapıştırılıp asitte bekletildi. Temizlenip hazırlanan bu altlığa GS'un kontaklarında bulunan kısa teller lehimlenerek oturtuldu. Altlığın diğer tarafına ise sağlıklı ölçüm alabilmek için uzun teller lehimlendi.

Akım-voltaj karakteristikleri karanlık ve $P = 75 \text{ mW/cm}^2$ ışık şiddetinde aydınlık ortamda ölçüldü. Akım-voltaj ölçüm devresi şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Akım-gerilim karakteristiği ölçüm devresi (GK güç kaynağı, A anahtar, Ç akım yönünü değiştiren çevirici, R₁ ve R₂ potansiyometrelerdir)

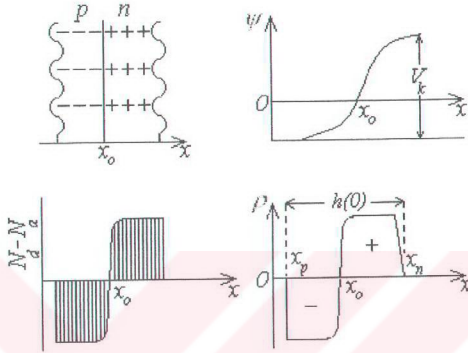
Potansiyometre ile istenen voltaj değerlerine bağlı olarak akım değerleri okundu. Akım-voltaj ölçümlerinde "Thurlby 1503 Multimeter" kullanıldı. Ayrıca bilgisayarda da I-V ölçümleri alındı.

2.5 p-n Eklemlerin Kapasitans Özelliklerinin Ölçülmesi

2.5.1 p-n eklemdaki engel kapasitansı

Yarıiletkenin yüzeyinden x_0 uzaklıkta p-n eklem yerleştiğini tahmin edelim. (Şekil 2.6(a)). n ve p-bölgelerinin termodinamik çıkış işleri (iş fonksiyonları) farklı olduğundan, p-n eklemden kontak potansiyel farkı (V_k) ve elektrik alan (E) oluşmaktadır (Şekil 2.6(b)). Oluşan elektrik alan, elektronları n-bölgesinin içine ve delikleri p-bölgesinin içine iter ve

neticede p ve n -bölgeler arası ince film şeklinde p - n eklem meydana gelir. p - n eklem bölgesinde serbest yük taşıyıcılarının olmaması nedeniyle, bu bölge arınma bölgesi olarak adlandırılır. n -bölgesinde iyonlaşmış donörlerden pozitif yükler Q_+ oluşur ve p -bölgesinde iyonlaşmış akseptörlerden oluşan eşit değerli negatif yükler Q_- oluşur (Şekil 2.6(c)).



Şekil 2.6 p - n eklem oluşması

p - n eklem ters gerilim uygulandığında, p -bölgeye negatif kutup eklemdeki potansiyel engelin yüksekliği uygulanan gerilim kadar artar. p - n eklemdeki elektrik alan da artar. Bunun neticesinde p - n eklem genişler ve n -bölgedeki pozitif yükler (Q_+) ve p -bölgedeki negatif yükler (Q_-) artar.

p - n eklem, doğru gerilim uygulandığında (n -bölgeye pozitif kutup), eklemdeki potansiyel engelin yüksekliği uygulanan gerilim kadar azalmaktadır. Bu durumda p - n eklem genişliği küçülür ve Q_+ , Q_- yükler azalır. Böylece, uygulanan gerilim etkisiyle p - n eklemdeki elektrik yükler değişir, yani p - n eklem, kapasitans gibi davranış gösterir. p - n eklemdeki kapasitans, engel kapasitansı olarak adlandırılır.

Engel kapasitansı hesaplamak için, eklem uygulanan gerilim (V) ve eklemdeki yükler ile Q (burada Q , eklemdeki Q_+ ve Q_- yüklerin mutlak değeridir) p - n eklemdeki potansiyel dağılımı Pousson denklemi ile ifade edilir. Tek boyutlu problem için (x -ekseni p - n eklem düzlemine diktir) Pousson denklemi şu şekilde yazılır

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_o \varepsilon} \quad (2.3)$$

Burada $\psi = \psi(x)$ potansiyel, $\rho = \rho(x)$ hacimsel yük yoğunluğu, $\varepsilon_o = 8,85 \times 10^{-12} F/m$ elektrik sabiti ve ε dielektrik katsayısı.

Katkılar tam iyonlaşmış durumunda hacimsel yük yoğunluğu

$$\rho = e(N_d - N_a + p - n) \quad (2.4)$$

ile ifade edilir. Burada N_d , N_a , p ve n sırasıyla donör, akseptör, delik ve elektronların konsantrasyonudur. $e = 1,6 \times 10^{-19} C$ elektron yüküdür.

Donör ve akseptörlerin konsantrasyonu koordinatın (konumun) fonksiyonudur ve potansiyele bağlı değildir. Buna karşı hareketli elektron ve deliklerin konsantrasyonları (yükleri) potansiyele bağlıdır. Bu olay Denk.(2.3)'ün çözümünü zorlaştırır. Problemi basitleştirmek için, p - n eklem sınırları (x_n ve x_p Şekil 2.6(d)) keskin kabul edilir, yani p - n eklem dışında iyonlaşmış katkılarının yükleri, hareketli yüklerle (elektron ve deliklerle) tam kompanse olmuştur, eklem iç bölgesinde ise hareketli yükler yoktur (p - n eklem tam arınıştır.) Bu halde, p - n eklem içinde hacimsel yük yoğunluğu, hareketsiz donör ve akseptör iyonlarının yükleri ile belirlenir.

$$\rho = e(N_d - N_a) = eN(x) \quad (2.5)$$

p - n eklem sınırlarında ve dışarısında elektrik potansiyeli sıfırdır

$$\psi_x \Big|_{x=x_p} = \psi_x \Big|_{x=x_n} = 0 \quad (2.6)$$

Pozitif ve negatif yüklerin mutlak değeri şu ifade ile verilir

$$Q = eS \int_{x_p}^{x_n} N(x) dx = eS \int_{x_n}^{x_p} N(x) dx \quad (2.7)$$

Burada S , p - n eklem alanıdır.

p - n eklemnin herhangi bir düzleminde uygulanan gerilimin (V) etkisiyle elektrik alan, Denk.(2.3)'ün integrali ile belirlenir (burada elektrik alanın mutlak değeri gözönüne alınır).

$$E(V, x) = \frac{e}{\epsilon\epsilon_o} \int_x^{x_n} \rho dx = \frac{e}{\epsilon\epsilon_o} \int_x^{x_n} N(x) = \frac{e}{\epsilon\epsilon_o S} [Q - |Q(x)|] \quad (2.8)$$

Burada Q , V -gerilim tesirinde olan p - n eklemdaki katkı iyonlarının yükü, $Q(x)$ ise x_o ve x arasındaki katkı iyonlarının yüküdür.

p - n eklemdaki tüm (net) potansiyel farkını, Pousson denkleminde (Denk.(2.3)) iki defa integral işlemi yapıldığında elde etmek mümkündür. Denk.(2.6) ve Denk.(2.7) hesaba katıldığında

$$V + V_k = -\frac{e}{\epsilon\epsilon_o} \int_{x_p}^{x_n} dx \int_{x_p}^x N(\xi) d\xi = -\frac{e}{\epsilon\epsilon_o} \int_{x_p}^{x_n} x N(x) dx \quad (2.9)$$

p ve n -bölgeler arasında potansiyel engelin yüksekliği şu ifade ile verilmektedir

$$V_k = \frac{kT}{e} [\ln p_p / n_i + \ln n_n / n_i] \quad (2.10)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, n_i özden yarıiletkendeki yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, p_n ve n_n deliklerin valans bandındaki ve elektronların iletim bandındaki konsantrasyonudur.

p -bölgesinde $x < x_p$ için $p_p = N_a - N_d$ Denk.(2.10) geçerlidir, $|N_d - N_a| \leq N_k$ olduğunda, Ge ve Si için $T = 200K$ 'de $N_k \cong 10^{19} cm^{-3}$, $T = 300K$ 'de $N_k \cong 2 \times 10^{19} cm^{-3}$ ve $T = 400K$ 'de $N_k \cong 3 \times 10^{19} cm^{-3}$.

Herhangi bir bölgede katkı konsantrasyonu kritik değere (N_k) yaklaşırsa (yozlaşmış yarıletken) bu durumda V_k yaklaşık olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir

$$V_k = \frac{E_g}{2e} + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_n}{n_i} \right) \quad (2.11)$$

Burada E_g yasak band genişliği, $n_n = N_d - N_a$, $x = x_n$ için

Yük değişimini dQ ve gerilim değişimini dV , p - n eklem kalınlığının değişimine bağlı olarak gözönüne alalım. Denk.(2.7)'den türev alarak, aşağıdaki denklemi elde ederiz

$$dQ = eS \left| N(x_p) dx_p \right| = eS \left| N(x_n) dx_n \right| \quad (2.12)$$

Denk.(2.9)'dan türev alarak

$$dV = \frac{e}{\epsilon \epsilon_o} \left[x_n \left| N(x_n) dx_n \right| - x_p \left| N(x_p) dx_p \right| \right] \quad (2.13)$$

elde ederiz.

p - n eklem engel kapasitansı elektrik yükünün gerilime göre türevi olduğundan, Denk.(2.12) ve Denk.(2.13)'ü kullanarak

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon \epsilon_o S}{h} \quad (2.14)$$

Burada $h = x_n - x_p$, p - n eklem kalınlığıdır.

Denk.(2.14)'te görüldüğü gibi, p - n eklem kalınlığı, kapasitans ölçümlerinden elde edilebilir.

Şimdi, p -bölgesindeki deliklerin konsantrasyonunun, n -bölgesindeki elektronların konsantrasyonundan daha büyük olduğu p - n eklemi gözönüne alalım. Bu durumda p -bölgesi, elektrik özelliklerine göre metale benzer ve bu bölgedeki elektrik alan ve potansiyel düşme ihmal edilir. p - n eklem kalınlığını, yaklaşık olarak hacimsel yüklü n -bölgesinin kalınlığına eşit olduğunu kabul etmek mümkündür: $h = x_n - x_o$. Bu durum için sınır şartları şu şekli alır

$$\psi \Big|_{x=x_n} = 0 \text{ ve } \psi'(x_o) = 0 \quad (2.15)$$

Denk.(2.3) üzerinde integral işlemi yapılırsa ve (2.15) şartları hesaba katılırsa

$$V + V_k = -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_o} \int_{x_o}^{x_o+h} (x - x_o) N(x) dx \quad (2.16)$$

elde ederiz. Denk.(2.16)'da h -parametre üzerine türev alındığında

$$\frac{dV}{dh} = -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_o} h N(x_o + h) \quad (2.17)$$

alırız. Burada $N(x_o + h)$, $N(x)$ 'in $x = x_o + h$ olduğundaki değeridir.

Denk.(2.14)'ü ve Denk.(2.17)'yi kullanarak

$$\frac{dC}{dV} = \frac{dC}{dh} \frac{dh}{dV} = -\frac{(\varepsilon \varepsilon_o)^2 S}{eh^3 N(x_o + h)} \quad (2.18)$$

buluruz.

Denk.(2.18) şu şekilde yazılabilir

$$N(x_o + h) = -\frac{C^3}{e \varepsilon \varepsilon_o S^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (2.19)$$

Denk.(2.19)'dan görüldüğü gibi, $C(V)$ bağlantısından, eklemin n -bölgesindeki katkı konsantrasyonunu bulmak mümkündür.

2.5.2 p - n eklemdeki katkı konsantrasyonunun bulunması

Denk.(2.19)'dan görüldüğü gibi, p - n eklemde katkı konsantrasyon dağılımı bilindiğinde, kapasitansın gerilimle bağlantısı bulunabilir. Bazen problemlerde ait amacın çözümü gerekir: Kapasitans-gerilim bağlantısından, p - n eklemdeki katkı konsantrasyonunun dağılımının bulunması: Bunun için kapasitansın (Denk.(2.14)) gerilime göre türevini alalım

$$\frac{dC}{dV} = \frac{d}{dV} \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_o S}{h} \right) = -\frac{\varepsilon \varepsilon_o S}{h^2} \frac{dh}{dV} = -\frac{C^3}{\varepsilon \varepsilon_o S} \frac{dh}{dQ} \quad (2.20)$$

$dh = |dx_n| + |dx_p|$ (Şekil 2.6(d)) ve Denk.(2.12) kullanılarak, Denk.(2.20) şu şekle dönüşür

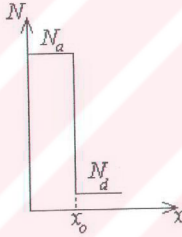
$$\frac{dC}{dV} = -\frac{C^3}{e\epsilon\epsilon_o S^2} \left[\frac{1}{N(x_n)} + \frac{1}{|N(x_p)|} \right] \quad (2.21)$$

Denk.(2.21)'i şu şekilde vermek olur

$$\frac{N(x_n)|N(x_p)|}{N(x_p) + |N(x_p)|} = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_o S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} \quad (2.22)$$

Burada x_n ve x_p , ters gerilimdeki (V) p - n eklem sınırları; $|N(x_p)| = N_d - N_a = N_a - N_d$, $x = x_p$ için; $N(x_n) = N_d - N_a$, $x = x_n$ için.

Denk.(2.22)'den görüldüğü gibi p - n eklemdaki katkı konsantrasyonu dağılımı kapasitans-gerilim bağlantısından elde edilebilir.



Şekil 2.7 Donorların ve akseptörlerin konsantrasyon dağılımları

p - n eklemdaki katkı konsantrasyonunun yayılmasına göre 2 durum aşağıda gözönüne alınacaktır

- (a) Bir bölgede katkı konsantrasyonu, öbür bölgedeki konsantrasyondan çok büyüktür.
(Keskin konsantrasyon dağılımlı p - n eklemi) (Şekil 2.7)

$N(x_p) > N(x_n)$ olduğunda Denk (2.21) ve Denk (2.22) şu şekle dönüşür

$$N(x_n) = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_o S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} = -\frac{C^3}{e\epsilon\epsilon_o S^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (2.23)$$

$N(x_o)$, cm^{-3} biriminde, $C(pF = 10^{-12} F)$, $S(cm^2)$ ve $\frac{dC}{dV} \left(\frac{pF}{V} \right)$ biriminde olduğunda,

Denk.(2.23)

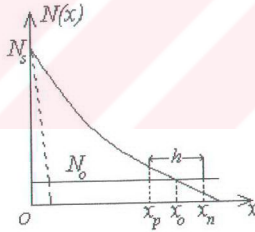
$$N(x_n) = \frac{1,4 \cdot 10^8}{\varepsilon \varepsilon_o S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1} = -\frac{0,71 \cdot 10^8 C^3}{\varepsilon \varepsilon_o S^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (2.24)$$

(b) Difüzyon yöntemiyle hazırlanmış eklemdeki katkı konsantrasyon dağılımı.
(Sürekli konsantrasyon dağılımlı p - n eklem)

Sabit kaynaktan yapılan difüzyonda yarıiletkendeki konsantrasyon dağılımı şu şekilde verilir

$$N_1(x) = N_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (2.25)$$

Burada N_s örneğin yüzeyindeki katkı konsantrasyonu, x yüzeyden uzaklık, D katkının difüzyon katsayısı, t difüzyon zamanı.



Şekil 2.8 İlk homojen yayılan konsantrasyon

n -tipi yarıiletkene akseptör tipi katkısının difüzyonunu gözönüne alalım. Yarıiletkendeki ilk homojen yayılan konsantrasyon N_o tahmin edilmektedir. (Şekil 2.8). Bu durumda katkılarının konsantrasyon dağılımı şu şekilde verilir

$$N(x) = N_d - N_a = N_o - N_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2.26)$$

Aşağıda iki sınır durumları gözönüne alınacaktır.

Birinci, p - n eklem yüzeye çok yakındır (Şekil 2.8, kesikli çizgi, yani merdivene benzer dağılım) (keskin p - n eklem). Bu durumda ($N_s \gg N_o$) kapasitans-gerilim bağlantısı Denk.(2.24) ile ifade edilmektedir.

İkinci durumda, katkı konsantrasyonunun yayılma derinliği büyüktür ve p - n eklemdaki konsantrasyon dağılımı lineer şekildedir (büyük ters gerilimler için) (Sürekli dağılımlı p - n eklem)

$$N(x) = N_d - N_a = a(x - x_o) \quad (2.27)$$

Burada $a = (dN/dx)_{x=x_o}$ p - n eklemdaki katkı konsantrasyonunun gradyanıdır.

Denk.(2.9) ve Denk.(2.14) kullanıldığında aşağıdaki ifade elde edilebilir

$$h = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_o(V + V_k)}{ea}} \quad (2.28)$$

ve

$$\left(\frac{S}{C}\right)^3 = \frac{12(V + V_k)}{ea(\epsilon\epsilon_o)^2} = m(V + V_k) \quad (2.29)$$

$$m = \frac{12}{ea(\epsilon\epsilon_o)^2} \quad (2.30)$$

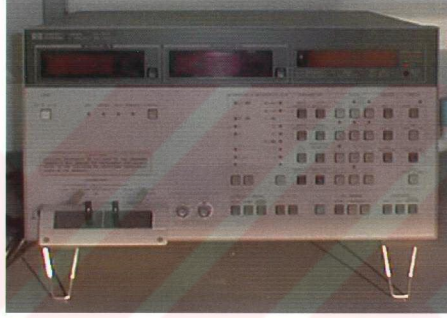
$C(pF)$, $S(cm^2)$, $V_k(V)$, $a(cm^{-4})$ birimlerinde kullanıldığında, m katsayısı şu şekilde verilir

$$m = \frac{1,1 \cdot 10^{15}}{(\epsilon\epsilon_o)^2 a} \quad (2.31)$$

Denk.(2.29) doğru çizginin $\left(\frac{S}{C}\right)^3 - V$ ifadesidir. Bu doğrunun eğimi ($m \rightarrow a$) p - n eklemindeki konsantrasyon gradyanını belirler ve doğru x -ekseninde (V -ekseninde) V_k değerli kontak potansiyelini keser.

2.6 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitans-Voltaj Karakteristiklerinin Ölçümleri

Ag-GS eklemlerin kapasitans-voltaj karakteristikleri “4192A, LF Impedance Analyzer, Hewlett Packard, (5 Hz-13 MHz)” aleti kullanılarak ölçüldü. Kapasitans-voltaj ölçümleri normal, aydınlık, karanlık ve nem ortamlarda 0.05 kHz-100 kHz frekanslarda (seri ve paralel olarak) yapıldı. ($V=0$)



Şekil 2.9 Ag-GS eklemin kapasitans-voltaj karakteristiklerini ölçmek için kullanılan aygıt, “4192A, LF Impedance Analyzer, Hewlett Packard, (5 Hz-13 MHz)” (Katıhal Elektronik Araştırma Laboratuvarı, YTÜ)

2.7 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Neme Duyarlı Kapasitans Karakteristiklerinin Ölçümleri

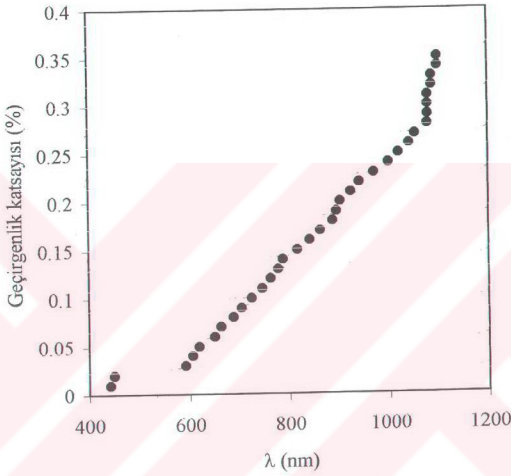
Bu çalışmada Ag-GS kontakları arasında nemin etkisiyle (su buharı moleküllerinin Ag yüzeyine çarpmasıyla) elektrik gerilimin oluşması gözlemlendi.

İlk olarak örneğin nem ortamında zamana göre kapasitans ölçümleri alındı. Örneğin neme duyarlılık karakteristikleri özel yapılmış deney hücrede incelendi. Hücredeki farklı nem ortamı su buharı ile oluşturuldu ve burada C-V ölçümleri alındı. Ortamın nemini ölçmek için “Extech 444701, Hygro-Thermometer” (nem-sıcaklık ölçer) aleti kullanıldı.

3. BULGULAR

3.1 Gözenekli Silisyum Filmin Optik Özellikleri

GS filmlerin optik absorpsiyon katsayısının incelenmesi için, GS yüzeyinden ayrılan filmlerin transmisyon aletinde elde edilmiş $T = f(\lambda)$ spektrumu kullanıldı (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 GS filmin optik geçirgenlik spektrumu

Bilinmektendirki ışığın geçirgenliği,

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; T geçirgenlik katsayısı, R yansıma katsayısı, α soğurma katsayısı ve d gözenekli silisyum filmin kalınlığını göstermektedir. $\alpha d \gg 1$ olduğunda paydadaki $R^2 \exp(-2\alpha d)$ terimi ihmal edilebilir. Bu durumda bağıntı,

$$T = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (3.2)$$

haline gelir. Buradan α soğurma katsayısını bulabilmek için

$$e^{-\alpha d} = \frac{T}{(1-R)^2}$$

$$-\alpha d = \ln \frac{T}{(1-R)^2}$$

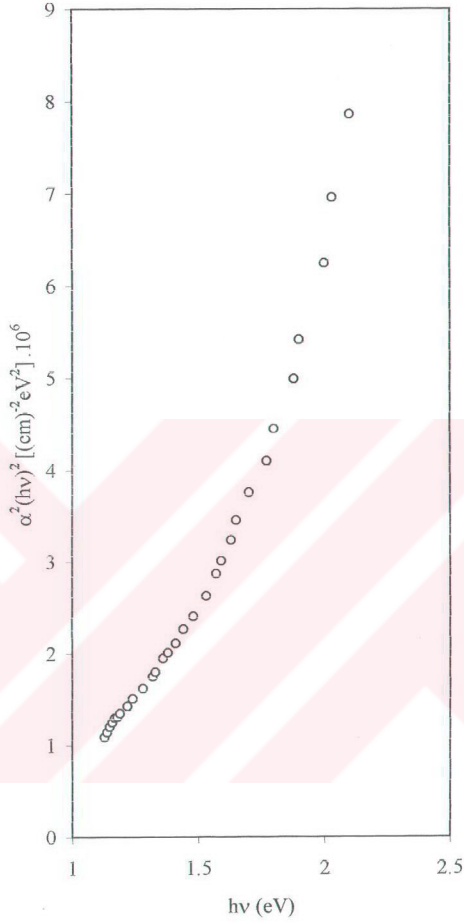
$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \frac{T}{(1-R)^2}$$

işlemleri yapılırsa,

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-R)^2}{T} \quad (3.3)$$

olarak belirlenir. (Pankove, 1971)

GS filmin kalınlığı $d = 6 \mu\text{m}$ ve yansıma katsayısı $R = 0.05$ alınıp, Şekil 3.1'deki grafikten ve Denk.(3.3)'den yararlanılarak α soğurma katsayısının foton enerjisi ile bağlantısı hesaplandı (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 GS filmin absorpsiyon katsayısı spektrumu.

$$E(eV) = \frac{1,24}{\lambda(\mu m)} \quad (3.4)$$

Direk banlı yarıiletkenler için absorpsiyon katsayısının foton enerjisi ile bağlantısı şu şekilde verilir (Pankove, 1971).

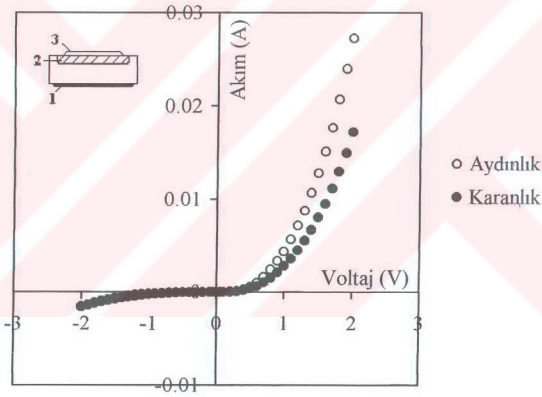
$$\alpha = A \frac{(\hbar\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}}{\hbar\nu} \quad (3.5)$$

Burada E_g enerji bant aralığı ve A sabittir.

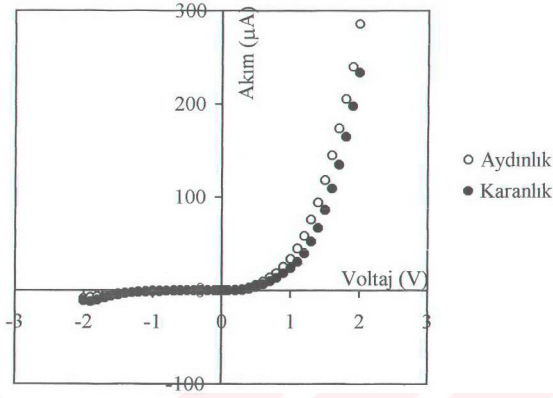
Denk.(3.5) ve Şekil 3.2 yardımıyla yasak enerji aralığı yaklaşık 1.41 eV olarak bulundu.

3.2 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Akım-Voltaj Karakteristikleri

Elde edilen Ag-GS eklemlerin akım-voltaj karakteristikleri Şekil 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 GS-Si eklemin (1 ve 2 kontaklar arası) aydınlık ve karanlıkta akım-voltaj karakteristikleri

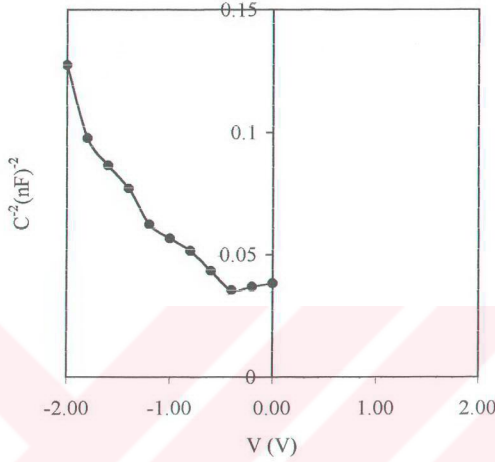


Şekil 3.4 Ag-GS eklem (2 ve 3 kontaklar arası) aydınlık ve karanlıkta akım-voltaj karakteristikleri

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'ten görüldüğü gibi, Ag-GS eklemi daha yüksek doğrultma katsayısına ($\frac{I_{dogru}}{I_{ters}} \cong 12 > 7.5$ $V = \pm 1.5$ V için) ve daha küçük ışık duyarlılığına sahiptir.

3.3 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitans-Voltaj Karakteristikleri

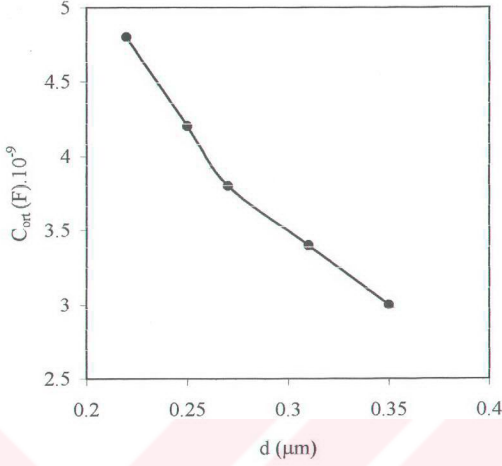
Şekil 3.5'te Ag-GS eklemnin kapasitans-voltaj grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Ag-GS eklemnin (2 ve 3 kontaklar arası) karanlıktaki kapasitans-voltaj karakteristiği

Denk.(2.23)
$$N = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]^{-1}$$
 - burada $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $\epsilon = 2,4$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$

F/m ve $S = 0,5 \text{ cm}^2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ olarak alınmıştır - ve Şekil 3.5'teki veriler kullanılarak farklı ters voltajlarda yük taşıyıcılarının (iyonların) konsantrasyonu hesaplandı. Şekil 3.5'teki belli ters voltaja karşılık gelen kapasitanslar için Denk.(2.14) kullanılarak, eklemnin kalınlığı hesaplandı (Şekil 3.6). Elde edilen akseptörlerin konsantrasyonunun eklemnin kalınlığı ile değişimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.6 Denk.(2.14) kullanılarak hesaplanan kapasitans-kalınlık eğrisi

Çizelge 3.1 Ag-GS ekleme iyonlaşmış akseptörlerin GS'un kalınlığı ile değişimi (d, Ag-GS sınırından uzaklıktır.)

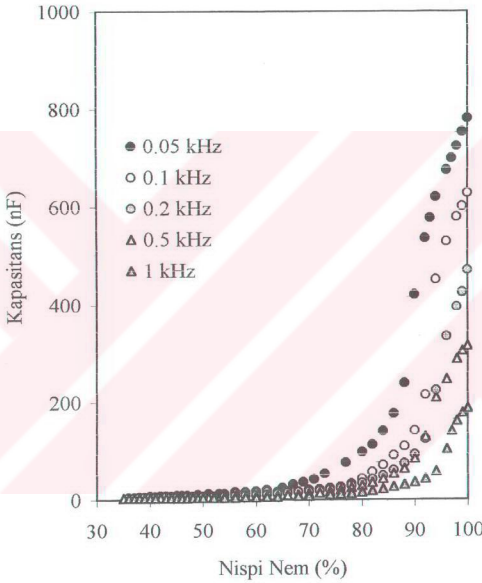
<i>n</i>	$C(F) \cdot 10^9$	$d(\mu m)$	$N(cm^{-3}) \cdot 10^{15}$	$C_{ort}(F) \cdot 10^9$
1	4.8	0.22	5.64	4.8
2	4.2	0.25	0.105	4.2
3	3.8	0.27	2.82	3.8
4	3.4	0.31	5.64	3.4
5	3	0.35	1.645	3

Çizelge 3.1'den görüldüğü gibi eklemenin kalınlığı arttıkça (GS-Si sınırından uzaklaştıkça) iyonlaşmış akseptörlerin (ya da deliklerin) konsantrasyonu azalmaktadır.

3.4 Ag-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Kapasitansına Nemin Etkisi

Ag-GS-Si eklemine nem ortamına yerleştirildiği zaman, önce (yaklaşık olarak 50 saniye içinde) kapasitansın artması ve sonra sabitleşmesi (doyma kapasitansı) gözlemlendi.

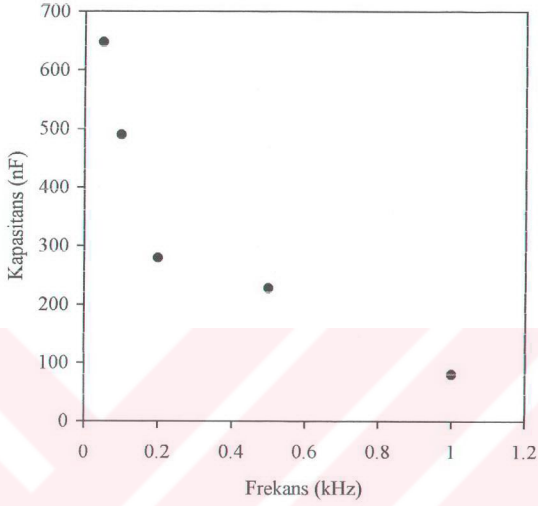
Aşağıda eklemlerin nem ortamında 100 saniyeden fazla tutulduktan sonra (doyma kapasitansı) farklı frekanslar için (0.05-1 kHz aralığında) kapasitans-nispi nem eğrileri gözönüne alınmaktadır.



Şekil 3.7 Ag-GS-Si eklemine (1-3 kontaklar arası, paralel) kapasitans-nispi nem eğrileri ($f = 0.05-1$ kHz)

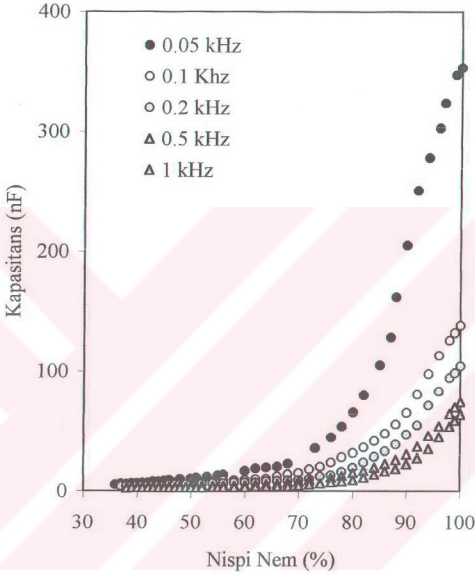
Şekil 3.7'de Ag-GS-Si eklemine (1-3 kontaklar, paralel) kapasitansının nispi nemle değişim grafikleri verilmektedir. Bu grafiklerden eklemine iki önemli özelliği görülmektedir. Birinci özellik, her beş frekans için nispi nemin artması ile kapasitansın artması gözlenmektedir. Örneğin, $f=0.05$ kHz için % 35-95 nispi nemlik aralığında kapasitans 10 nF'dan 800 nF'a kadar artmaktadır. İkinci özellik, belli bir nispi nemlikte

frekans arttıkça kapasitans da azalmaktadır. Şekil 3.8'de % 95 nispi nemlik için kapasitansın frekansla değişimi gösterilmiştir.



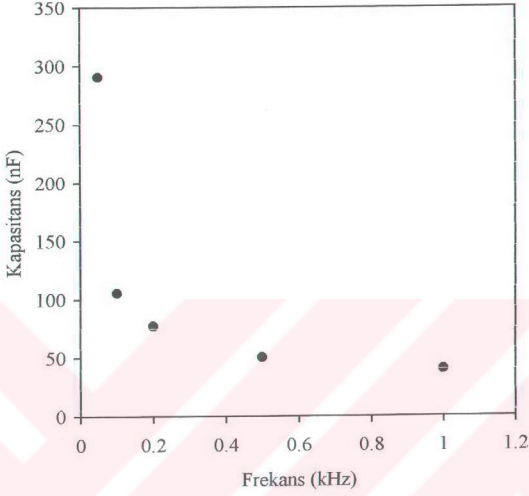
Şekil 3.8 Ag-GS-Si eklem (1-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansın frekansla değişimi (% 95 nispi nem)

Şekil 3.9'da Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) farklı frekanslarda (0.05-1 kHz) kapasitans-nispi nem karakteristikleri gösterilmektedir. Ag-GS-Si eklemlerinde olduğu gibi (Şekil 3.7), Ag-GS eklemlerinde de nispi nem arttıkça kapasitans artar ve frekans azaldıkça kapasitans artar.



Şekil 3.9 Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) kapasitans-nispi nem karakteristikleri ($f = 0.05-1$ kHz)

Şekil 3.10'da Ag-GS eklemine kapasitansın frekansla değişimi verilmiştir (% 95 nispi nem için).

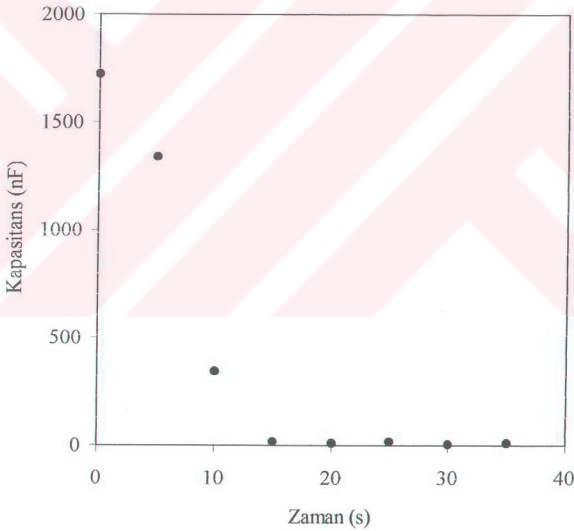


Şekil 3.10 Ag-GS eklemine (2-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansın frekansla değişimi (% 95 nispi nem için)

3.5 Ag-GS-Si Eklemlerin Kapasitansının Nem Ortamına Tepki Süresi

Bölüm 3.4'te kaydettiğimiz gibi eklemler nem ortamına yerleştğinde ve nem ortamında normal oda ortamına uzaklaştırıldığında kapasitansın artışı ve azalması belli süre içinde gerçekleşir. Burada eklemlerin nem ortamından çıkarıldığı andan sonraki zamanla kapasitansın azalma eğrileri incelenecektir.

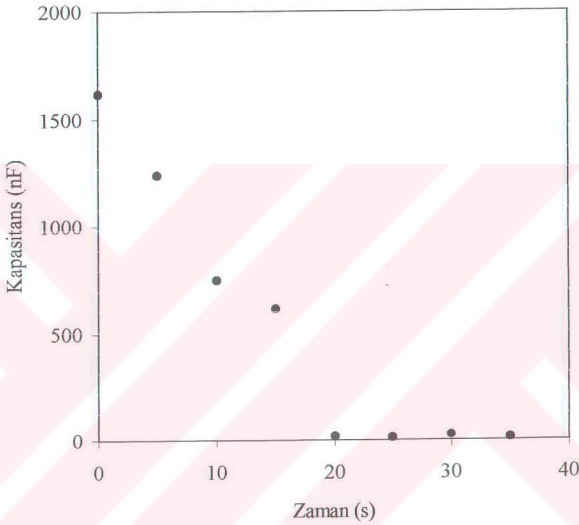
Şekil 3.11'de Ag-GS-Si eklem (1-3 kontaklar arası, paralel) nem ortamında (% 95 nispi nem) çıkarıldıktan hemen sonraki kapasitansın zamanla değişim grafiği verilmiştir ($f = 0.05$ kHz). 15 saniye süre içinde kapasitansın $C = 1750$ nF'dan $C = 5$ nF'a azalması gözlenmektedir. Kaydetmek gerekirken, başka frekanslarda da ($f = 0.1$ kHz, 0.2 kHz, 0.5 kHz ve 1 kHz) kapasitansın azalma süresi yaklaşık olarak 10-15 saniyedir.



Şekil 3.11 Ag-GS-Si eklem (1-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansın zamana göre değişimi ($f = 0.05$ kHz)

Ag-GS ve GS-Si eklemlerinde, nem ortamından normal oda ortamına çıkarıldıktan sonra kapasitansın azalması yaklaşık olarak 10-20 saniye aralığında gerçekleşir.

Şekil 3.12'de Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) C-t eğrisi verilmiştir. 20 saniye süre içinde, nem ortamından çıkarıldıktan sonra, kapasitans, oda şartlarındaki değerine ($C = 5 \text{ nF}$) ulaşır.



Şekil 3.12 Ag-GS eklem (2-3 kontaklar arası, paralel) kapasitansının zamana göre değişimi ($f = 0.05 \text{ kHz}$)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Böylece bu çalışmada elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Nemin etkisi ile Ag-GS-Si eklemlerinde kapasitans keskin artmaktadır ($C = 5 \text{ nF}$ 'dan $C = 800 \text{ nF}$ 'a kadar, % 35-95 nispi nemlik aralığında).
2. Frekans azaldıkça ($f = 1 \text{ kHz}$ 'den $f = 0.05 \text{ kHz}$ 'e kadar) kapasitans artmaktadır ($C = 200 \text{ nF}$ 'dan $C = 800 \text{ nF}$ 'a kadar, % 95 nispi nem için).
3. Ag-GS-Si eklemine kapasitansın nispi nemle artması (Ag-GS eklemine göre) daha keskindir.
4. Ag-GS-Si eklemlerin nem ortamından normal oda ortamına çıkarıldığında kapasitansın ilk değerine ulaşma süresi (ya da eklemnin neme tepki süresi) yaklaşık olarak 10-20 saniyedir.

Ag-GS-Si eklemlerin kapasitansının neme tepkisini şu şekilde yorumlamak olur (Dzhafarov ve Can, 2000b; Dzhafarov vd., 2001; Dzhafarov vd., 2002). Nem ortamındaki su molekülleri eklemnin üzerindeki Ag filmin üstüne konulduğunda, yüzeyle etkileşerek parçalanırlar $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$ ve hidrojen molekülleri $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ iyonlaşırlar.

Hidrojen iyonları (protonlar) Ag filminden GS tabakasına doğru yayılarak (difüz ederek) Ag-GS sınırında toplanır. Pozitif yüklü hidrojen iyonları, n -tipi silisyum altlıktan sınıra doğru elektronları çeker. Neticede kondansatöre benzer, pozitif yüklü H^+ iyonlardan ve negatif yüklü elektronlardan tabakalardan oluşan yapı meydana gelir. Bu yapının özellikleri, özellikle elektrik ve kapasitif karakteristikleri, hidrojen iyonlarının konsantrasyonuna ve difüzyon katsayısına bağlıdır. Nemin etkisiyle Ag-GS-Si eklemlerin kapasitansının artmasının nedenini, hidrojen difüzyonu neticesinde eklemnin dielektrik katsayısının değişimi ile yorumlamak mümkündür.

Eğer kapasitans-zaman eğrilerinden (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12) kapasitansın azalma süresi $t = 10-20$ saniye hesaba katılırsa, hidrojenin gözenekli silisyumdaki difüzyon katsayısı

$$D \approx \frac{x^2}{4t} = 3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \text{ olarak bulunur (Dzhafarov, 1991).}$$

Böylece

Ag-GS-Si eklemlerin kapasitansının yüksek derecede nem ortamına duyarlılığı ve düşük tepki süresi, kapasitif-esaslı nem sensörlerinin hazırlanmasına imkan sağlar.

KAYNAKLAR

- Algün, G., (1996), Gözenekli Silisyumda Elektriksel Olayların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Amato, G., Delerue, C. ve von Bardeleben, H.J., (1997), *Structural and Optical Properties of Porous Silicon Nanostructures*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands.
- Anderson, R.C., (1992), *Formation, Properties and Microsensor Applications of Porous Si*, PhD Dissertation, University of California, Berkeley.
- Arita, Y., Sunohara, Y., (1977), "Formation and Properties of Porous Silicon Film", *J. Electrochem. Soc.*, 124 (2): 285-295.
- Beale, M.I.J., Benjamin, J.D., Uren, M.J., Chew, N.G. ve Cullis, A.G., (1985), "An Experimental and Theoretical Study of the Formation and Microstructure of porous Silicon", *J. Crystal Growth*, 73: 622-636.
- Ben-Chorin, M., Möller, Koch, F., Schirmacher, W. ve Eberhard, M., (1995), "Hopping Transport on a Fractal, as Conductivity of Porous Si", *Phys. Rev., B*, 51: 2199-2213.
- Bomchil, G., Halimaoui, A. ve Herino, R., (1992), *Appl. Surf. Sci.*, 41, 604.
- Bressers, P.M.M.C., (1995), *Silicon Etching. An Electrochemical Study*, PhD Dissertation, State University Utrecht, the Netherlands.
- Cafer, T., (2000), *Katıhal Elektroniği*, 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 (10): 1046-1048.
- Collins, R.T., Fauchet, P.M. ve Tischler, M.A., (1997), "Porous Silicon: From Luminescence to LEDs", *Physics Today*, 50 (1): 24-31.
- Connolly, E.J., O'Halloran, G.M., Pham, H.T.M., Sarro, P.M. ve French, P.J., (2002), "Comparison of Porous Silicon, Porous Polysilicon and Porous Silicon Carbide as Materials for Humidity Sensing Applications", *Sens. Actuators, A*, 99: 25-30.
- Deremes, D., Marissael, V., Stierenard, D. ve Ortega, C., (1995), "Electrical Behaviour of Aluminum-Porous Silicon Junctions", *Thin Solid Films*, 255: 258-261.
- Dimitrov, D.B., (1995), "Current-Voltage Characteristics of Porous-Silicon Layers", *Phys. Rev., B*, 51: 1562-1566.
- Dzhafarov, T.D., (1991), *Radiation-Stimulated Diffusion in Semiconductors*, Moscow, Energoatomizdat.

Dzhafarov, T.D. ve Can, B. (2000a), "The Diffusion and Distribution of Hydrogen and Oxygen in Porous Silicon Films", *J. Materials Science Letters*, 19, 287-289.

Dzhafarov, T.D. ve Can, B. (2000b), "Humidity-Voltaic Characteristic of Ag-PS-Si Structures", *J. Materials Science Letters*, 19, 2193-2195.

Dzhafarov, T.D., Can Omur, B. ve Allahverdiev, Z.A. (2001), "Hydrogen-Stimulated Changes of Properties of Silver-Porous Silicon Interfaces", *Surface Science*, 482-485, 1141-1144.

Dzhafarov, T.D., Can Omur, B., Oruc, C. ve Allahverdiev, Z.A. (2002), "Hydrogen-Sensing Characteristics of Cu-PS-Si Structures", *J. Physics D: Applied Physics*, 35, 3122-3126.

Eddowes, M.J., (1990), "Anodic Dissolution of p- and n-type Silicon. Kinetic Study of the Chemical Mechanism, *J. Electroanal. Soc.*, 280: 297-311.

Feng, Z.C. ve Tsu, R., (Eds.), (1994), "Porous Silicon", World Scientific, Singapore, 347-362
 Ferrieu, F., Halimaoui, A. ve Bensahel, D., (1992), "Optical Characterization of Porous Silicon Layers by Spectroscopic Ellipsometry in the 1.5-5 eV range", *Solid State Commun.*, 84: 293-296.

Frohnhoff, S., Marso, M., Berger, M.G., Thönissen, M., Lüth, H. ve Münder, H., (1995), *J. Electrochem. Soc.*, 142 (2): 615.

Halimaoui, A., (1994), *Surf. Sci. Lett.*, 306, L550.

Heber, K.V., (1987), "Humidity Sensing at High Temperatures", *Sens. Actuators*, 12: 145-157.

Herino, R., Bomchil, G., Barla, K., Bertrand, C. ve Ginoux, J.L., (1987), "Porosity and Pore Size Distributions of porous Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 134: 1994-2000.

Herino, R., (2000), "Nanocomposite Materials from Porous Silicon", *Mater. Sci. Eng., B*, 69-70: 70-76.

Hijikigawa, M., Miyoshi, S., Sugihara, T. ve Jinda, A., (1983), "A Thin-Film Resistance Humidity Sensor", *Sens. Actuators*, 4: 307-315.

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

Kozlowski, F., Huber, B., Steiner, P. ve Lang, W., (1995), "Generating a Microplasma with Porous Silicon", *Transducers 95, Eurosensors IX* (1): 381-384.

Lang, W., Steiner, P. ve Sandmaier, H., (1995), "Porous Silicon: A Novel Material for Microsystems", *Sens. Actuators, A*, 51: 31-36.

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

Lee, S.P. ve Park, K.J., (1996), "Humidity Sensitive Field Effect Transistors", *Sens. Actuators, B*, 35-36: 80-84.

Lehmann, V. ve Foll, H., (1990), "Formation Mechanism and Properties of Electrochemically Etched Trenches in n-type Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 137 (2): 653-659.

Lehmann, V., (1993), *J. Electrochem. Soc.*, 140, 2836.

Mattei, G., Valentini, V. ve Yakovlev, V.A., (2002), "An FTIR Study of Porous Silicon Layers Exposed to Humid Air with and without Pyridine Vapors at Room Temperature", *Surf. Science*, 502-503: 58-62.

Morazzani, V., Cantin, J.L., Ortega, C., Pajot, B., Rahbi, R., Von Bardeleben, H.J., Rosenbauer, M. ve Vazsonyi, E., (1996), "Thermal Nitridation of p-type Porous Silicon in Ammonia", *Thin Solid Films*, 276: 32-35.

Moreno, J.D., Marcos, M.L., Agulló-Rueda, F., Guerrero-Lemus, R., Martín-Palma, R.J., Martínez-Duart, J.M. ve González-Velasco, J., (1999), "A Galvanostatic Study of the Electrodeposition of Polypyrrole into Porous Silicon", *Thin Solid Films*, 348: 152-156.

Motahashi, A., Kawakami, M., Aoyagi, H., Kinoshita, A. ve Satou, A., (1995), "Gas Identification by a Single Gas Sensor Using Porous silicon as the Sensitive Material", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34: 5840-5843.

Motohshi, A., Ruike, M., Kawakami, M., Aoyagi, H., Kinoshita, A. ve Satou, A., (1996), "Identification of Water Molecules in Low Humidity and Possibility of Quantitative Gas Analysis Using Porous Silicon Gas Sensor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35: 4253-4256.

O'Halloran, G.M., (1999), *Capacitive Humidity Sensor Based on Porous Silicon*, Ph.D. thesis, TU Delft, the Netherlands.

Ömür, B.C., (1999), *Gözenekli Silisyumun Elektriksel ve Optik Özellikleri*, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Öztemel, S., (1999), *Metal-Gözenekli Silisyum Eklemlerin Elektriksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Pankove, J.I., (1971), *Optical Processes in Semiconductors*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Patkhutik, V.P., Albella, J.M., Martínez-Duart, J.M., (1993), "Different Types of Pore Structure in Porous Silicon", *Appl. Phys. Lett.*, 62 (4): 366-367.

Penman, H.L., (1955), *Humidity*, Chapman & Hall, London.

Polishchuk, V., Souteyrand, E., Martin, J.R., Strikha, V.I. ve Skryshevsky, V.A., (1998), "A Study of Hydrogen Detection with Palladium Modified Porous Silicon", *Analy. Chem. Acta.*, 375: 205-210.

Regtien, P.P.L., (1981), *Silicon Dew-Point Sensor for Accurate Humidity Measurement Systems*, PhD Dissertation, University of Delft, the Netherlands.

Richter, A., (1992), Kapazitive Feuchtesensoren mit Anorganischen Dielektrika, PhD Dissertation, Munich, Germany.

Rittersma, Z.M., Zaagman, W.J., Zetstra, M. ve Benecke, W., (1998), "A Porous-Silicon Based Microsystem for Humidity Monitoring", Proc. 4th ESSM and 2nd MIMR Conf., 6-8 July 1998, Harrogate, England.

Rittersma, Z.M., (1999), Microsensor Applications of Porous Silicon. From Humidity-Sensitive Sheet to Sacrificial Layer, Shaker Publishing, Maastricht.

Rittersma, Z.M., Splinter, A., Bödecker, A. ve Benecke, W., (2000), "A Novel Surface-Micromachined Capacitive Porous Silicon Humidity Sensor", Sens. Actuators, B, 68: 210-217.

Rossow, U., Münder, H., Thönissen, M. Ve Theiß, W., (1993), "Characterisation of Porous Silicon Layers by Spectroscopic Ellipsometry", J. Luminescence, 57: 205-209.

Sakai, Y., sadaoka, Y. Ve Matsuguchi, M., (1996), "Humidity Sensors Based on Polymer Thin Films", Sens. Actuators, B, 35-36: 85-90.

Savaniu, C., Arnautu, A., Cobianu, C., Craciun, C., Flueraru, C., Zaharescu, M., Parlog, C., Paszti, F. ve Van der Berg, A., (1999), "Tin dioxide sol-gel Derived Films Doped with Platinum and Antimony Deposited on Porous Silicon", Thin Solid Films, 349: 29-35.

Sberveglieri, G., Rinchetti, G., Groppelli, S. ve Faglia, G., (1994), "Capacitive Humidity Sensor with Controlled Performances, Based on Porous Al_2O_3 Thin Film Grown on SiO_2 -Si Substrate, Sens. Actuators, B, 18-19: 551-553.

Seiyama, T., Yamazoe, N. ve Arai, H., (1983), "Ceramic Humidity Sensors", Sens. Actuators 4: 85-96.

Smith, R.L., Collins, S.D., (1992), "Porous Silicon Formation Mechanisms", J. Appl. Phys., 71 (8): R1-R22.

Snow, P.A., Squire, E.K. ve Russell, P.St.J., (1999), "Vapor Sensing Using the Optical Properties of Porous Silicon Bragg Mirrors", J. Appl. Phys., 86: 1781-1784.

Stierenard, D. ve Deresmes, D., (1995), "Are Electrical Properties of an Aluminum-Porous Silicon Junction Governed by Dangling Bonds?", Appl. Phys. Lett., 67: 1570-1572.

Taliercio, T., Dilhan, M., Massone, E., Gué, A.M., Fraisse, B. ve Fouracan, A., (1995), "Realization of Porous Silicon Membranes for Gas Sensor Applications", Thin Solid Films, 255: 310-312.

Traversa, E., (1995), "Ceramic Sensors dor Humidity Detection: The State-of-The-Art and Future Developments", Sens. Actuators, B, 23: 135-156.

Tsuboi, T., Sakka, T. ve Ogata, Y., (1999), "Effect of Dopant Type on Immersion Plating into Porous Silicon Layer", Appl. Surf. Sci., 147: 6-13.

Uhlir, A., (1956), "Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon", *Bell Syst. Tech. J.*, 35: 333.

Wang, G., Arwin, H., (2002), "Modification of Vapor Sensitivity in Ellipsometric Gas Sensing by Copper Deposition in Porous Silicon", *Sens. Actuators, B*, 85: 95-103.

Watanabe, K., Okada, T., Choe, I. ve Satoh, Y., (1995), "Organic Vapour Sensitivity in a Porous Si Device", *Proc. Eurosensors IX*, 25-29 June 1995, Stockholm, Sweden.

Yamazoe, N. ve Shimizu, Y., (1986), "Humidity Sensors: Principles and Applications", *Sens. Actuators*, 10: 379-398.

Zangoie, S., Bjorklund, R. ve Arwin, H., (1997), "Vapor Sensitivity of Thin Porous Silicon Layers", *Sens. Actuators, B*, 43: 168-174.

Zangoie, S., Bjorklund, R. ve Arwin, H., (1998), "Protein Adsorption in Thermally Oxidized Porous Silicon Layers", *Thin Solid Films*, 255: 258-261.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	24.09.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1992-1996	Haydarpaşa Süper Lisesi
Lisans	1996-2000	Marmara Üniversitesi Atatürk Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1999-2000	Marmara Üniversitesi Atatürk Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü Öğrenci Asistan
2000-Devam ediyor	Gülensu İlköğretim Okulu Sınıf Öğretmeni