

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**Al/ANODİK SiO₂/Si (MOS) YAPILARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ISISAL TAVLAMA,
AKIM YOĞUNLUĞU VE ELEKTROLİT pH 'ININ ETKİLERİ**

Mustafa SAĞLAM

Yönetici: Doç. Dr. Abdulmecit TÜRÜT

Doktora Tezi

ÖZET

Bu çalışmada, [100] doğrultulu, 15-25 ohm-cm öz dirençli ve 500 µm kalınlıklı p-tipi silisyum kristali kullanılarak 0,1 M KOH elektrolitinde anodik oksidasyon metoduyla Al/Anodik SiO₂/Si MOS yapısı elde edildi. Oksidasyon işlemi dört farklı pH (=5; 6; 7 ve 8) değerinde ve herbir pH değerine karşılık üç farklı akım yoğunluğunda (J=3; 5 ve 7 mA/cm²) veya üç farklı akım yoğunluğunda ve her bir akım yoğunluğuna karşılık dört farklı pH 'da yapıldı. Anodik oksidasyon işlemi sonucunda farklı kalınlıklı homojen oksitler elde edildi.

Al/Anodik SiO₂/Si MOS yapısının C-V_G karakteristikleri, oda sıcaklığında ve f=50 kHz 'de alındı. C-V_G karakteristiklerinin hepsinde, oksit içerisindeki sabit pozitif yükten dolayı deneysel eğrilerin negatif gerilimlere doğru kaydığı görüldü (ideal C-V_G eğrilerine göre). Bu kaymadan yararlanarak, oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{OX}, Si-SiO₂ arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff}, arayüzey yük yoğunluğu ΔQ_{SS}, düz bant histeresis yükü ΔQ_{HisFB} ve maksimum histeresis yük yoğunluğu ΔQ_{HisMAX} değerleri hesaplandı. Yine bütün C-V_G karakteristiklerinde, elektronik veya iyonik karakterli histeresisler gözlemlendi.

Oda sıcaklığında yüksek frekans (HF) C-V_G ölçümleri alınan Al/Anodik SiO₂/Si MOS yapılar, daha sonra 10⁻⁵ Torr 'luk vakumda 500 °C 'de beş dakika bekletilerek tavlandı. Tavlanmış numunelerin tekrar HF C-V_G ölçümleri, T=300 K ve f=50 kHz 'de alındı. Yine, deneysel HF C-V_G eğrilerinin ideal C-V_G eğrilerine göre negatif gerilimlere doğru kaydığı görüldü ve bu kaymadan yararlanarak ΔQ_{OX}, ΔQ_{eff}, ΔQ_{SS}, ΔQ_{HisFB} ve ΔQ_{HisMAX} değerleri hesaplandı. Tavlamadan sonra bazı numunelerde histeresis tiplerinin değiştiği gözlemlendi. Yine tavlamadan sonra ΔQ_{OX}, ΔQ_{eff}, ve ΔQ_{SS} yük değerlerinin azaldığı gözlemlendi. Bu yük miktarlarındaki azalma, tavlama etkisiyle Si-SiO₂ arayüzeyindeki doymamış bağların bir kısmının ortadan kalkmasına atfedildi.

Bütün numunelerde, tavlamadan önce ve sonra, arayüzey hal yoğunlukları silisyumun yasak enerji bant aralığına göre hesaplandı. Hesaplanan arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım eğrileri hem pH (pH=5 'de J=3; 5 ve 7 mA/cm² gibi) hem de akım yoğunluğuna göre (J=3 mA/cm² 'de pH=5; 6; 7 ve 8 gibi) gruplandırılarak değerlendirildi. Bunun neticesinde, tavlamanın MOS yapılar üzerindeki

iyileştirici etkisi açık bir şekilde gözlemlendi. Akım yoğunluğunun arayüzey parametreleri üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı, ancak pH değerlerinin etkili olduğu sonucuna varıldı.

Ayrıca, Al/Anodik SiO₂/Si MOS yapıların HF C-V_G ve arayüzey hal dağılım karakteristikleri, anodik oksidasyonda kullanılan silisyumla aynı özelliklere (doğrultu, tip, kalınlık ve taşıyıcı yoğunluğu) sahip olan silisyumdan yapılan Al/Termal SiO₂/Si MOS 'un HF C-V_G ve arayüzey hal dağılım karakteristikleriyle karşılaştırıldı. Bunun sonucunda, tavlamadan önceki anodik MOS yapıların arayüzey hal yoğunluk eğrilerinin hem biçim hem de yoğunluk mertebesi bakımından Termal MOS 'un dağılım eğrilerine yakın bir şekilde benzediği görüldü. Fakat tavlamadan sonra, anodik MOS yapılarda arayüzey hal yoğunluğu termal MOS yapılara göre daha düşük değerli dağılım eğrisi verdi. Aynı zamanda, HF C-V_G ve arayüzey hal dağılım eğrilerinin hem biçim hem de mertebesi olarak başka araştırmacılar tarafından verilen sonuçlarla uyum içinde olduğu görüldü.

SUMMARY

p-type silicon crystal with [100] direction, 15-25 ohm-cm resistivity and 500 μm thickness was used in our study and Al/Anodic SiO_2/Si MOS structure was obtained by using anodic oxidation method in 0.1 M KOH electrolyte. Oxidation process was made at four different values of pH the electrolyte (=5; 6; 7 and 8) and in three different current density ($J=3; 5$ and 7 mA/cm^2) in return for each of pH value or in four different values of the electrolyte pH in return for each current density. In result of anodic oxidation process, homogenous oxides with different thickness was obtained .

$C-V_G$ characteristics of Al/Anodic SiO_2/Si MOS structures were measured at room temperature and $f=50 \text{ kHz}$. It was seen that the experimental $C-V_G$ curves shifted to more negative values of gate bias in respect to ideal $C-V_G$ curves owing to fixed positive charge in oxide. Values of fixed positive charge density in oxide, ΔQ_{OX} , total charge density in the Si- SiO_2 interface ΔQ_{eff} , interface charge density ΔQ_{SS} , flat band hysteresis charge density ΔQ_{HisFB} and maximum hysteresis charge density ΔQ_{HisMAX} were calculated by means of this shifts of $C-V_G$ curves. Electronic or ionic type of the hysteresis were observed in the whole $C-V_G$ characteristics.

These Al/Anodic SiO_2/Si MOS structures whose high frequency (HF) $C-V_G$ measurements were made at room temperature were annealed in vacuum of 10^{-5} Torr at $500 \text{ }^\circ\text{C}$ for five minutes. Again, HF $C-V_G$ measurements of the annealed samples were made at $T=300 \text{ K}$ and $f=50 \text{ kHz}$. It was seen that the experimental $C-V_G$ curves of the annealed samples shifted to the negative values of gate bias and by benefiting from this shifts, the values after annealing of ΔQ_{OX} , ΔQ_{eff} , ΔQ_{SS} , ΔQ_{HisFB} and ΔQ_{HisMAX} were calculated for these samples. After annealing, it was observed that the types of hysteresis changed . After annealing, it was observed that the values of ΔQ_{OX} , ΔQ_{eff} , ΔQ_{SS} were reduced. This decrease in amount of charges was attributed to that a part of dangling bonds in Si- SiO_2 interface were disappeared by annealing effect.

Before and after annealing the interface state densities according to forbidden band gap of silicon were calculated for all of the samples. Then, the interface state density distribution curves according to pH (same as $J=3; 5$ and 7 mA/cm^2 at $\text{pH}=5$) and current density

(same as pH=5; 6; 7 and 8 at $J=3 \text{ mA/cm}^2$) were drawn and classified. Consequently, discussion of these was made and it was clearly observed that annealing at $500 \text{ }^\circ\text{C}$ in vacuum improves MOS characteristics and current density has negligibly less effect on these characteristics. But, the parameters of MOS structures were seen to be very satisfactory for especially samples with pH=7. In addition, HF C- V_G and the interface state density distributions characteristics of Al/Anodic SiO_2/Si MOS structures were compared with those of Al/Thermal SiO_2/Si MOS structures. Silicon used in anodic and thermal processes has the same properties (orientation, type, thickness and free carrier concentration). Before annealing, the shape of the density distribution curves and the density values of interface states of anodic MOS structures were nearly seen to be the same as those of thermal MOS. But, after annealing, the interface state density in anodic MOS structures gave lower values than those of thermal MOS structure. At the same time, HF C- V_G and the interface state distribution curves were observed to be in agreement with the results of other authors.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Doç.Dr. Abdülmecit TÜRÜT yöneticiliğinde yapılmıştır. Kendisine, çalışmalarım boyunca gösterdiği yakın ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yardımlarından dolayı Sayın Prof.Dr. Y. Kemal YOĞURTCU 'ya, Yrd.Doç.Dr. Hasan EFEOĞLU 'na ve Fizik Bölümünün bütün öğretim elamanlarına teşekkür ederim.

TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Kuantum Elektronik Laboratuvarında (KUEL), doktora tez konuyla ilgili ön çalışma yapmama imkan sağlayan sayın Doç.Dr. Z. Ziya ÖZTÜRK 'e ve yardımcıları Ahmet ALTINDAL ile Mustafa ÖZDEMİR 'e teşekkür ederim. Yine çalışmalarına değerli bilgileriyle katkıda bulunan, Dicle Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden sayın Yrd.Doç.Dr. Tahsin KILIÇOĞLU 'na ve Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümü Öğretim Üyelerinden sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU 'na teşekkürü bir borç bilirim. Bölümümüz Katıhal Fiziği Grubu tarafından sunulan 1992/13 nolu ve "Anodik Oksidli MOS Yapıların Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi " isimli projeyi desteklediği için Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu yöneticilerine de ayrıca teşekkür ederim.

Mustafa SAĞLAM

İÇİNDEKİLER

	<u>SayfaNo</u>
ÖZET	i
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	v
1. GİRİŞ	1
2. MOS YAPISI	7
2.1. İdeal MOS Yapısı	7
2.2. Gerçek MOS Yapısı	13
2.3. MOS Yapısının Arayüzey Özelliklerinin Belirlenmesi	18
2.3.1. Yüksek Frekans Metodu	19
2.3.2. Küçük Frekans Metodu	20
2.3.3. İletkenlik Metodu	22
3. DENEY SİSTEMİ VE ÖLÇÜLER	24
3.1. Kristallerin Hazırlanması ve Temizlenmesi	24
3.2. Anodik Oksidasyon	24
3.3. Metal Kaplama	31
3.4. Kapasite-Gerilim Ölçü Sistemi ve Kapasite-Gerilim Karakteristikleri	32
3.5. Al / Termal SiO ₂ / Si MOS Yapısının Kapasite-Gerilim Karakteristiği	42
3.6. İdeal MOS Yapısının C-V _G Eğrisi	46
3.7. Arayüzey Hal Yoğunluğunun Hesaplanması	50
3.7.1. Herbir pH 'a Karşılık Üç Farklı Akım Yoğunluğunda Çizilen Arayüzey Hal Enerji Dağılım Eğrileri	52
3.7.2. Herbir Akım Yoğunluğuna Karşı Dört Farklı pH Değerleri İçin Çizilen Arayüzey Hal Enerji Dağılım Eğrileri	58
3.7.3. Termal SiO ₂ / Si MOS 'un Arayüzey Hal Dağılım Eğrisi	60

4. SONUÇ VE TARTIŞMA	67
KAYNAKLAR	77
Ek.1. Oksit Kalınlıklarına Göre Renklendirme Tablosu	80



1. GİRİŞ

Metal-Oksit-Yarıiletken (metal-oxide-semiconductor; MOS) elamanları, katıhal fiziğinde metal-yarıiletken kontaklar alanına girmektedir. Metal-yarıiletken kontaklar çağdaş elektronikte önemli rol oynayan yapılardır. Bu yapıların kullanıldığı modern elektronik devre elamanlarının performansı, MOS kalitesine önemli ölçüde bağlıdır. MOS yapılar, çok sayıda yarıiletken devre elamanının (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistör; MOSFET 'ler, Charge-Coupled Device; CCD 'ler, Insulated-Gate Field-Effect Transistör; IGFET 'ler vb.) tabanı olarak günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Edward ve Yang, 1978). Bu yapıların bu kadar geniş bir uygulama alanına sahip olmaları, bu elamanlar üzerinde daha fazla durulmasını gerektirir.

MOS yapısının, metal-oksit ve oksit-yarıiletken arayüzelerindeki davranışları ile oksitin ve yarıiletkenin davranışlarının fabrikasyon teknolojisinde öncelikle bilinmesi gerekir. Fabrikasyon elektronik devre elamanlarında amaç, her zaman için ideal olarak tanımlanan devre performansına ulaşmaktır. Performansın istenilen sınırlara yaklaştırılması ise, devre yapısının bütün hususiyetlerinin belirlenip, arzu edilen değerlerin düzeltilmesi, arzu edilmeyen değerlerin sebep olduğu olumsuzluklardan kurtulmak suretiyle gerçekleştirilebilir. Bundan dolayı elektronik devre elemanlarının fiziksel ve elektronik özelliklerini araştırmak büyük bir öneme sahiptir. Bu yüzden MOS yapıların elektronik özelliklerinin tam olarak belirlenmesi için araştırmalar yıllardır devam etmektedir. Yapılan araştırmaların amacı, bir yandan bu yapıların fiziksel özelliklerini belirlemek ve diğer taraftan bu fiziksel özelliklerden faydalanarak yeni devre elemanları geliştirmektir. MOS yapısının imalinde, yarıiletken üzerine çeşitli metodlarla oksit büyütülür. Oksit büyütme işlemi, yaygın olarak termal oksidasyon ve anodik oksidasyon metoduyla yapılır. Anodik oksidasyon metodunda, bir elektrolit içerisinde anot olarak silisyum ve katot olarak platin batırılıp, elektrotlar arasında bir potansiyel farkı uygulanırsa silisyum yüzeyi üzerinde oksit film büyütülebilir (Nicollian ve Brews, 1982). Anodik oksidasyon metoduyla silisyum üzerinde oksit film büyütme işlemi ilk olarak Guenterschulze ve Betz (1937) tarafından yapılmıştır.

Anodik olarak büyütülen SiO_2 filmler tavlansa, termal olarak büyütülen SiO_2 filmlerle kalite bakımından karşılaştırılabilirler. Tavlanan anodik filmlerle termal olarak büyütülen filmler arasındaki yapısal farklılıklar, x-ışını kırınımı metodları (Schmidt ve Rand ,1966) ve kızıl ötesi spektroskopisi metodlarıyla (Pliskin ve Lehman , 1965) incelemişlerdir. Termal olarak büyütülen filmler kısa mesafe düzenine sahip olmakla birlikte, anodik filmler tam olarak amorf yapıya sahiptirler. Katkı maddelerinin Si-SiO₂ yapısındaki enerji seviyelerini belirlemek için oksit büyütülmesi sırasında oksit içerisine belli tip safsızlıkların katılanması anodik oksidasyonda termal oksidasyona göre çok daha kolaydır. Elektrolit içinde istenilen safsızlık çözülür ve oksidasyon esnasında arayüze yerleştirilir. Schmidt ve Owen (1964), Schmith, et al., (1965) bu metodla silisyum üzerinde fosfor katkılı anodik oksit filmlerin hazırlanmasını incelemişler ve başarılı olmuşlardır. Değişik katkıların silisyum bant yapısı içerisindeki enerji seviyelerinin tayini bu yolla yapılabilir (Nicollian ve Brews , 1982). Anodik filmlerin Si-SiO₂ arayüzeyinin elektriksel özellikleri, anodik oksidasyondan sonra 500 °C 'de hidrojen ortamında tavlama ile termal olarak büyütülen filmlerle karşılaştırılabilirler (Ghezze ve Brown , 1973). Çünkü anodik filmler, termal olarak büyütülmüş oksit filmler kadar geniş çalışılmamış ve anodik filmlerin tavlama sonrası termal büyütülmüş filmlerde olduğu gibi aynı özelliği koruyup koruyamadığı tam olarak bilinmemektedir (Nicollian ve Brews , 1982).

Anodik olarak büyütülen oksit filmlerin en büyük avantajları; 1) Termal oksidasyonda olduğu gibi, Si yüzeyinde kirliliklerin yeniden dağılımı yoktur, 2) Yöntemin tekrarlanması kolaydır, oksit kalınlığı kolayca kontrol edilebilir ve maliyeti düşüktür. Çoğu durumlarda 0.2 µm 'den daha kalın oksitler büyütme pratik değildir. Çünkü yüksek gerilimlere çıktığında oksit kırılır ve kalite zayıflar. Daha kalın oksit filmler büyütme için, önce ince bir anodik film büyütülür ve bu film üzerine termal oksidasyon yapılır (Nicollian ve Brews, 1982). Böylece, daha kalın ve daha kaliteli oksit elde edilmiş olur. Bu tekniğin bir uygulaması, bir toplama devresinde bipolar transistörlerin arasındaki izolasyon bölgesinin oluşturulmasıdır (Uhlir, 1958). Bundan başka anodik oksitleme tekniği, silisyum nitrit filmlerin SiO_2 'e dönüştürülmesi işleminde kullanılır (Schmidt ve Wonsidler, 1967). Anodik oksidasyon metodu p-tipi silisyum için, çeşitli elektrolitlerde başarılı olduğu bulunmuş, ancak hiç birinde Si-SiO₂ arayüzeyinin elektronik özellikleri incelenmemiş ve anodik oksidasyonun oluşum

mekanizması henüz tam olarak anlaşılammıştır(Schmidt, et al., 1965; Mackintosh ve Plattner, 1977).

Anodik oksidasyon metoduyla yapılan MOS yapısının kapasitesini ilk olarak Schmidt ve Michel (1957) ölçmüşlerdir. MOS yapısı ilk olarak Terman (1962) tarafından Si-SiO₂ arayüzeyinin elektronik özelliklerinin ve arayüzey hallerinin yoğunluk veya enerji dağılımının belirlenmesinde kullanılmıştır. Daha sonra kapasitans ve kondüktans metoduyla termal Si-MOS yapıların oda sıcaklığında arayüzey hallerinin yasaklanmış band aralığındaki enerji dağılımları Nicolian ve Goetzberger(1966) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Bir atmosferlik basınç altında ve 80 °C 'de farklı pH 'lı elektrolitlerde akım-potansiyel ilişkileri Hsieh ve Chen (1977) tarafından araştırılmış ve pH artınca akımın negatif potansiyellere doğru değiştiği gözlenmiştir. Termal olarak elde edilen Si-MOS yapılarda farklı metal kontakların, farklı oksit kalınlıklarının ve numune tavlama sıcaklığının arayüzey hal dağılımı üzerine etkisi Kar ve Dahlke (1971) tarafından çalışılarak arayüzey hal dağılım spektrumunda farklı metaller için farklı konumlarda karakteristik pikler görülmüş ve arayüzey hal yoğunluğunun azalan oksit kalınlığıyla ve azalan tavlama sıcaklığıyla arttığı sonucuna varılmıştır. Logan, et al., (1973) sulu H₂O₂ çözeltisiyle basit GaAs MOS yapılar yaparak oksitin elektriksel özelliklerini incelemiştir. Bu araştırmacılar, bu elektrolitte pH 'nın fonksiyonu olarak 100 Volt 'da 10 dakika içerisinde oluşan oksit kalınlığını belirleyerek oksid büyümesinin daha yüksek pH değerlerinde düzgün ve homojen olmadığını buldular. Daha sonra AGW (Glikol ve suyun karıştırılmış bir çözeltisi) elektrolitinde GaAs 'ın verimli, düzgün ve kararlı anodik oksidasyonu için optimum şartlar elde etmek için akım yoğunluğunun ve elektrolitin pH 'sının davranışı Hasegawa ve Hardnagel tarafından (1976) incelenmiştir. Castagne ve Vapaille (1971), termal Si-MOS yapılarda Si ve oksit içindeki kusurlarla (defects) ortaya çıkabilecek olan arayüzey hal yoğunluğunu düşük frekans ve yüksek frekans C-V_G ölçümlerini kullanarak çeşitli metodları karşılaştırarak incelemiştir.

Anodik Si-MOS heteroeklem yapıların arayüzey özelliklerini Abdulayev, et al., (1981) araştırmışlar ve deneysel olarak artan anodik oksit kalınlığıyla arayüzey hal yoğunluğunun azaldığı sonucuna varmışlardır. Anodik ve termal olarak elde edilen polikristal Si-MOS yapılarda akım-voltaj eğrilerini Mende ve Wende (1986) karşılaştırmış ve tartışmışlardır. Miller, et al., (1989) termal olarak büyütülen SiO₂

MOS yapılarında, küçük sinyalli üç kararlı hal metodunu kullanarak yüksek arayüzey hal yoğunluğu ölçümlerinin karşılaştırmasını tartışmışlar ve yüksek-düşük frekanslı kapasite metodunun arayüzey hal yoğunluğunun gerçek değerini verdiği kararına varmışlardır. Metanol ve Glicolde SiO_2 'in büyüme karakteristikleri üzerine anyonların ve su muhtevasının etkilerinin bir karşılaştırması Madou, et al., (1982) tarafından yapılmış ve oksit büyüme karakteristiğinin hem filmlerin tabiatına hem de çözücüye şiddetli bir şekilde bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

I-V, C-V ve Kondüktans-gerilim ölçümlerini kullanarak saf suda p-tipi Si 'un anodik oksidasyonu ile elde edilen ince (thin) SiO_2 tabakaların elektriksel çalışmasını Morfoulli ve Pananakakis (1989) yapmışlar ve hem pozitif hem de negatif yük tuzaklarının oksitte mevcut olduğunu ve ayrıca, arayüzey hal yoğunluğunun silisyumun band aralığında (0,25 eV 'dan 1,05 eV 'a) U biçimli bir dağılımla yeteri kadar düşük değerler (10^{10} 'dan 10^{11} eV⁻¹. cm⁻²) sergilediğini gözlemişlerdir. Bunlardan sonra, Laksmi ve Ramkumer (1989) polikristal termal Si-MOS yapılarında I-V karakteristiklerini incelemek için taşıyıcı iletimi üzerine kurulan bir model açıklamışlardır. Dios, et al., (1990) MOS yapılarında arayüzey hal yoğunluk ölçümü için Nicollian ve Goetzberger (1966) 'ın kondüktans tekniğini kendilerine göre değiştirerek belli bir frekansta sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kondüktans ölçümleri üzerine kurulan kendi tekniklerini kullanmışlar ve elde ettikleri arayüzey hal yoğunluk dağılım eğrisinin DLTS tekniğiyle elde edilen dağılım eğrisiyle çakıştığını bulmuşlardır. Daha sonra, Chanana, et al., (1991) alışılmış (geleneksel-conventional) temizleme işleminden sonra RF plazma (O_2) tekniği vasıtasıyla temizlenen Si yüzeyi üzerine oluşturulan MOS kapasitörün C- V_G ölçümlerini, geleneksel olarak temizlenmiş Si üzerine oluşturulan MOS yapıların C- V_G ölçümleriyle karşılaştırmışlar ve daha az yüzey hal yoğunluğu veren plazma temizlemeli MOS yapıların alışılmış şekilde hazırlanan MOS yapılara fabrikasyon olarak tercih edileceği sonucuna varmışlardır.

Lin ve Hwu (1991) MOS yapılarında arayüzey tuzak yoğunluğunun karakterizasyonu üzerine oksit direncinin etkisini araştırmışlardır. Bunun için, oksit direnç etkili ve etkisiz arayüzey tuzak dağılım eğrilerini karşılaştırarak oksit direncinin etkisini ortadan kaldırdıktan sonra elde edilen sonuçların direnç etkisini kaldırmadan elde edilen sonuçlardan daha uygun olduğunu belirlemişlerdir. Bundan sonra, termal olarak büyütülen oksit tabakası özellikleri üzerine CF_4/H_2 plazmalı temizlemenin etkisini

Chanana, et al., (1992) incelemişlerdir. Bu araştırmacılar, silisyum yüzeylerini CF_4/H_2 plazma temizlemesinden sonra ayrı ayrı O_2 ve H_2 plazma temizlemesine maruz bırakmışlar ve O_2 'yi ihtiva eden temizleme metodu ile elde edilen arayüzey parametrelerinin mikroelektronik endüstrisinde kullanılan diğer temizleme metodlarıyla hazırlanan MOS yapıların parametrelerinden daha uygun olduğunu bulmuşlardır. Tsui ve Chen (1993) termal tavlama esnasında $Pt/SiO_2/Si$ MOS yapılarının oksit dielektrik şiddetini incelemişler ve N_2 ortamında termal tavlama esnasında platinin SiO_2 ile etkileşmediğine inanarak $Pt /SiO_2/ Si$ yapısının oksit dielektrik şiddetinin azaldığını, arayüzey hal yoğunluğunun arttığını gözlemişlerdir. Son olarak, Kılıçoğlu ve arkadaşları (1993) elektrolitin su oranlarının p-Si / anodik oksit (AO) arayüzeyinin özellikleri üzerine etkisini oda sıcaklığında ve 77 K 'de elde edilen C- V_G eğrilerinin analiziyle incelemişler ve oda sıcaklığında valans bandına yakın ortaya çıkan farklı değerli arayüzey hal yoğunluk maksimumlarının 77 K 'da kaybolduğunu gözlemişlerdir.

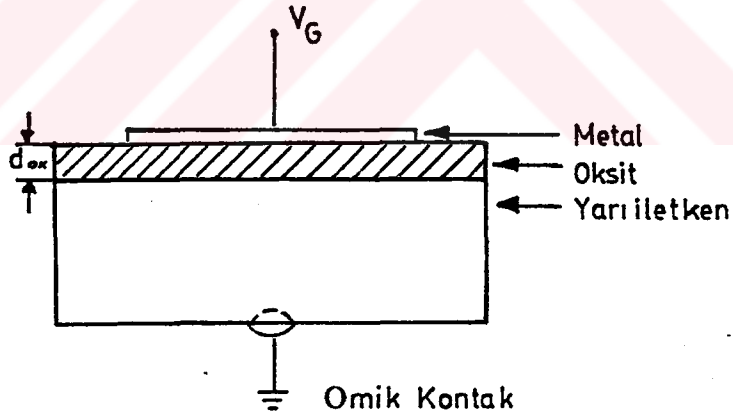
Bu çalışmada 0.1M KOH elektroliti kullanılarak anodik oksidasyon metoduyla Al/anodik SiO_2 /Si yapısı elde edilmiştir. Bu işlem, akım yoğunluğunun etkisini araştırmak için, dört farklı pH(=5; 6; 7 ve 8) ve her bir pH değerine karşılık üç farklı akım yoğunluğunda (pH=7 'ye karşılık $J=3;5$ ve 7 mA/cm^2 gibi) veya pH 'nın etkisini araştırmak için bu akım yoğunluklarında, her bir akım yoğunluğuna karşılık dört farklı pH değerinde ($J=3 \text{ mA/cm}^2$ 'ye karşılık pH=5;6;7 ve 8 gibi) gerçekleştirilmiştir. Anodik oksidasyon işlemi sabit akım şartları altında yapılmıştır. Elde edilen Al / anodik SiO_2 / Si MOS yapılarının oda sıcaklığında C- V_G ölçümleri alındıktan sonra tavlamanın etkisini araştırmak için aynı numuneler, 10^{-5} Torr 'luk vakumda $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de beş dakika bekletilerek tavlannmıştır ve tekrar C- V_G ölçümleri alınmıştır. Her iki C- V_G ölçümleri kullanılarak MOS yapıların çeşitli parametreleriyle beraber arayüzey hal yoğunlukları silisyumun yasak enerji aralığına göre hesaplanmış ve enerji dağılımlarının karşılaştırılması yapılarak pH, akım yoğunluğu ve tavlamanın bu yapılar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, arayüzey hal yoğunluklarının enerji dağılımı, aynı özellikli silisyum üzerinde büyütülmüş termal MOS 'un arayüzey hal dağılımıyla da karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, MOS yapılarla ilgili kaynak özeti, çalışmanın amacı ve kapsamını içermektedir. İkinci bölüm, MOS yapıların teorisini ve MOS yapıların arayüzey özelliklerinin belirlenmesini içermektedir. Üçüncü bölümde deney sistemi, yapılan deneysel çalışmalar ve alınan ölçüler verilmiştir. Dördüncü bölüm, deney sonuçlarına ve ölçümlerden çıkarılan sonuçların tartışılmasına ayrılmıştır.



2. MOS YAPISI

Metal-Oksit-Yarıiletken (Metal-Oxide-Semiconductor) yapısı MOS olarak adlandırılır. Şekil (2.1) 'de MOS yapısı gösterilmiştir. Yapıdaki oksit tabakasının dielektrik özelliğinden dolayı MOS yapılar, paralel levhalı bir kondansatöre benzer ve levhalardan birisinin metal, diğerinin yarıiletken olmasından dolayı asimetrik kondansatör olarak tanımlanabilir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi oksit ve oksit-yarıiletken arayüzey (oxide-semiconductor interface) özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bunun için yapıdaki oksit tabakanın çok kaliteli olmasının yanı sıra oksit ile yarıiletken arayüzeyindeki doymamış bağların (dangling bond) en az düzeyde olması aranan niteliklerdendir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan (impurity) kaynaklanan oksit-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey halleri ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak ortaya çıkan, hareketli iyonlar, tuzaklar (traps), sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MOS yapısının özelliklerini değiştirmekte, böylece MOS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına sebep olmaktadır. Aşağıda ideal MOS yapısı ayrıntılı olarak ele alınacaktır.



Şekil 2.1. MOS yapısının şematik gösterimi

2.1. İdeal MOS Yapısı

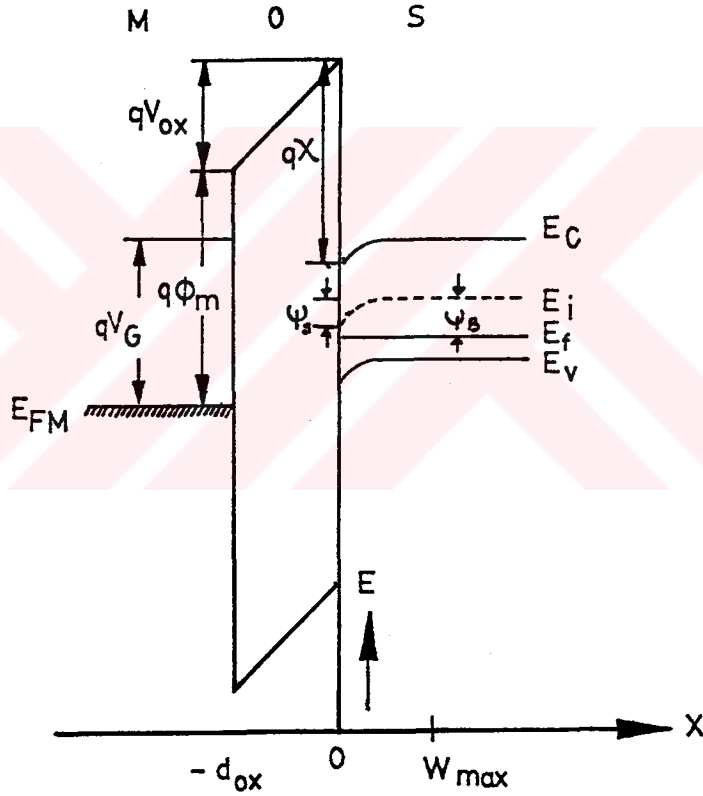
Aşağıda maddeler halinde verilen özellikleri taşıyan eleman ideal MOS yapısı olarak tanımlanmaktadır(Sze,1981; Nicollian ve Brevs,1982).

1) Metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki oksit, bant aralığı çok büyük olduğundan ideal bir dielektriktir. Oksit içinde ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Aynı zamanda oksit-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve arayüzey yükleride bulunmaz.

2) Metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki fark sıfırdır.

3) Oksitin bant aralığı o kadar büyüktür ki oksitin iletim bandında termik yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Bu durum şekil (2.2) 'de şematik olarak enerji bant diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 2.2. MOS yapısının enerji bant şeması (p-tipi yarıiletken için)

İdeal bir MOS yapıda metal elektroda gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır.

Yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü (space charge) Q_{sc} oluşur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yükü potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, yarıiletkende metallere göre serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan gerilime bağlı olarak yük, ya uzay yükü bölgesini yada arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur.

Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da oksit üzerine düşer. Bunun için

$$V_G = V_{ox} + \Psi_s \quad (2.1)$$

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} oksit üzerine düşen gerilim, Ψ_s arayüzeyde bant gerilimidir. Sistemdeki toplam yük için kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Q_m + Q_{sc} = 0 \quad (2.2)$$

Burada Q_m metal yüzeyindeki toplam yük, Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür.

Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MOS yapının kapasitesi C , oksit tabakanın kapasitesi C_{ox} ve uzay yükü kapasitesi C_{sc} olarak gösterilebilir:

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A_{ox} \quad (2.3a)$$

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \quad (2.3b)$$

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\Psi_s} A_{ox} \quad (2.3c)$$

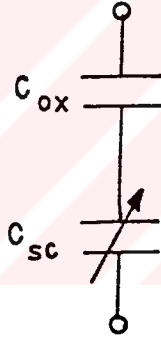
Bu yapıyı şekil (2.3) 'deki gibi bir eşdeğer devre ile gösterebiliriz. Bu devreye göre MOS kapasitesi aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.4)$$

Bu sonuca göre MOS yapısının eşdeğer kapasitesi, C_{sc} ve C_{ox} kapasitelerinin seri bağlanmasına eşdeğerdir. Oksit kapasitesi C_{ox} ise ayrıca

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.5)$$

olarak verilir. Bağtımda ϵ_{ox} oksit tabakasının dielektrik sabiti, d_{ox} oksit kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından C_{ox} değeri uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MOS yapısının kapasitesindeki değişimi sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitesi belirler.



Şekil 2.3. İdeal MOS yapısının eşdeğer devresi

Uygulanan gerilime bağlı olarak MOS kapasitesinde, p-tipi yarıiletken için yük dağılımında aşağıdaki durumlar gözlenir:

i) **Yığılım (Accumulation):** Metal tabakasına bir negatif gerilim ($V_G < 0$) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan holleri yarıiletken arayüzeyine doğru çekecektir (Şekil 2.4a). Değerlik bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandında buna bağlı olarak yukarıya doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmelerinden dolayı " *yığılım* " adı verilir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur (Şekil 2.4a").

ii) **Tükenim (Depletion):** Küçük bir pozitif gerilim ($V_G > 0$) metal tabakasına uygulandığı zaman, oksit içinde oluşan elektrik alan yarıiletken yüzeyindeki holleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki hol yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki hol yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen w genişliğinde bir bölgede, hollerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Bu bölgeye tükenim bölgesi, bu olaya "*tükenim*" olayı denir (Şekil 2.4b). Tükenim durumunda uzay yükü yoğunluğu (Şekil 2.4b') aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$Q_{sc} = qwN_a^- = Q_a \quad (2.6)$$

N_a^- ve Q_a sırasıyla iyonlaşmış akseptör yoğunluğu ve birim yüzeydeki akseptör yüküdür. Tükenim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$w = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.7)$$

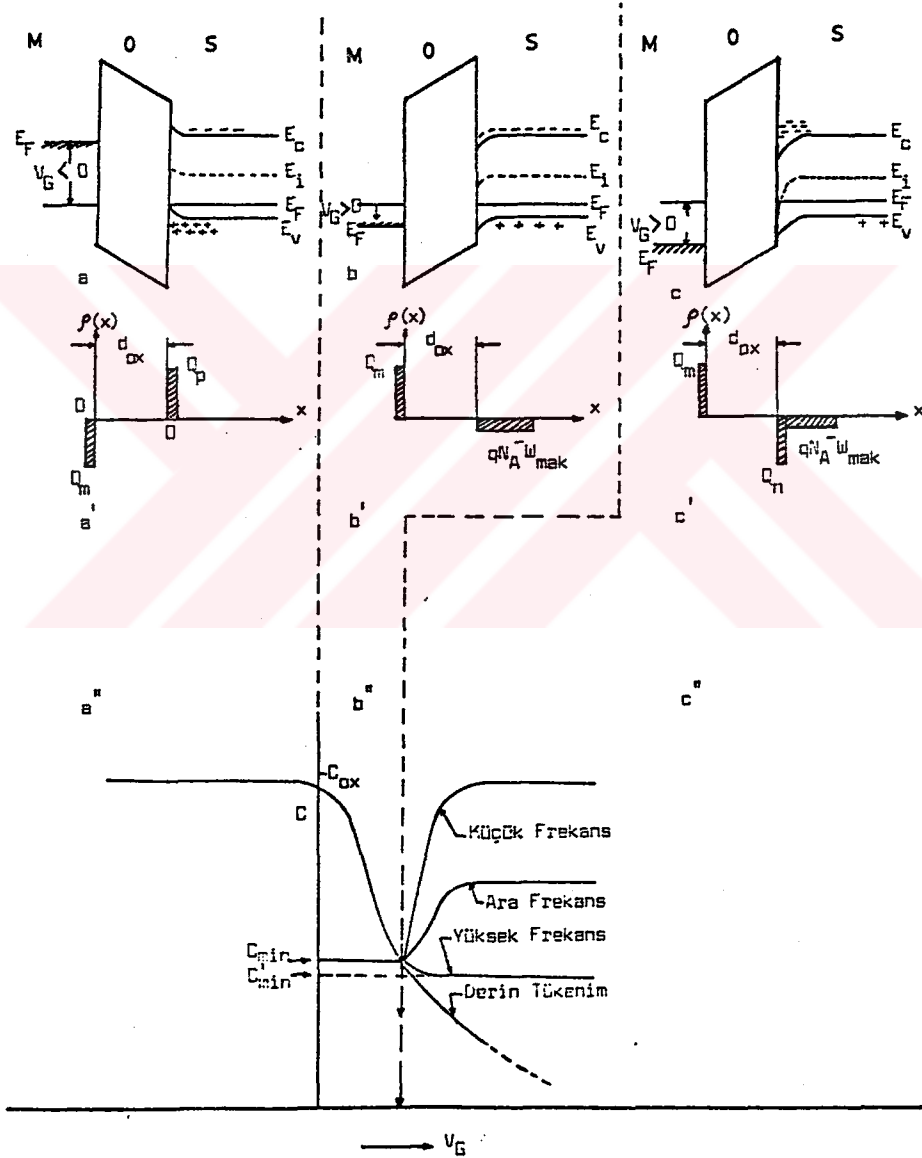
Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede MOS kapasitesini uzay yükü kapasitesi ve oksit kapasitesi belirler (Şekil 2.4b'').

iii) **Tersinim (Inversion):** Metal elektroda daha büyük bir pozitif gerilim uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru daha fazla bükülür. Öz (intrinsic) enerji seviyesi, Fermi seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar. Elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan büyük olur. Yarıiletkenin yüzeyi artık n-tipi bir yarıiletken gibi davranır. Bu olaya yarıiletken yüzeyinin "*tersinimi*" adı verilir. Bu durumda uzay yükü

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \quad (2.8)$$

eşitliğiyle verilir. Bu bağıntıda Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronlardır. Şekil (2.4c) 'de enerji bant şeması, Şekil (2.4c') 'de ise yük dağılımı gösterilmiştir. Bu durumda MOS kapasitesini, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin ac sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu ac sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasite artan gerilimle oksit kapasitesinin değerine

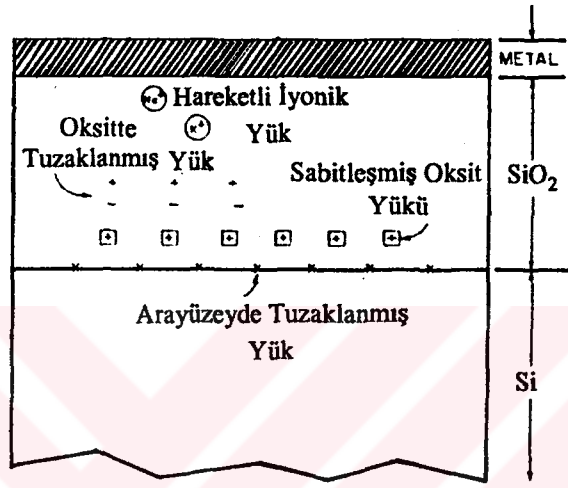
ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür, yüksek frekanslarda ise takip edemez. Yük sabit uzay yükü gibi etki eder ve kapasite C_{min} 'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların rekombinasyon hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'un altında değerler almasına sebep olur. Bu dengesizlik durumu "*derin tükenim*" adını alır(Şekil 2.4c).



Şekil 2.4. MOS yapısının bant şeması, yük dağılımı ve kapasitesi

2.2. Gerçek MOS Yapısı

Gerçek MOS Yapısında arayüzey halleri, iyonlaşmış tuzaklar, hareketli iyonlar, sabit oksit ve arayüzey yükleri gibi sebeplerle ideal MOS yapıdan sapmalar gözlenir (Ghandhi,1983). Bu durumlar şekil (2.5) 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Gerçek MOS yapısı (Sze,1981)

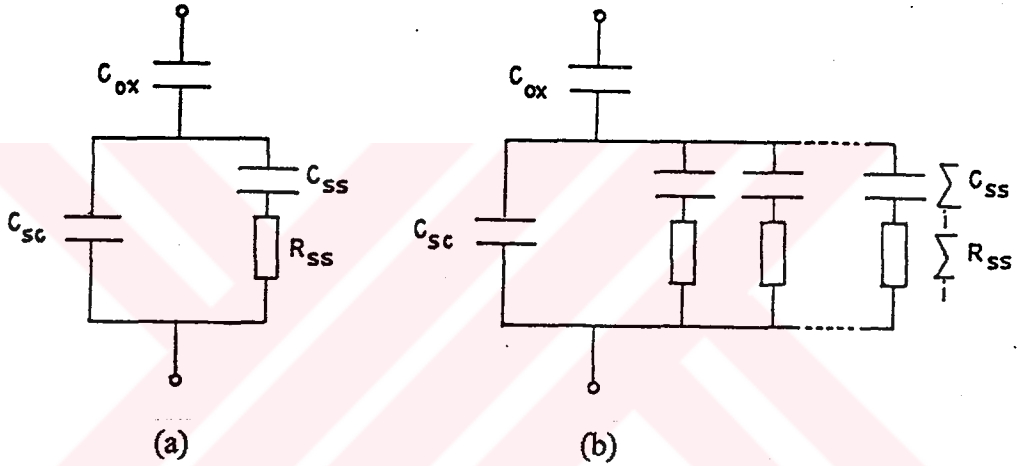
Gerçek MOS yapıda ortaya çıkan sapmalar genel olarak aşağıdaki şekilde ortaya çıkar;

1) **Arayüzey Halleri:** Arayüzey hali (durumu), oksit-yarıiletken arayüzeyinde girilebilir bir enerji seviyesidir. Bir arayüzey hali donör veya akseptör tipinde olabilir. Bir arayüzey tuzağı (seviyesi) eğer doluyrsa nötr (yüksüz) ve bir elektron vermesiyle (bırakmasıyla) pozitif oluyorsa donör gibi düşünülebilir. Bir akseptör arayüzey tuzağı boşsa nötr ve bir elektron almasıyla negatif yüklü olur. Bir gerilim uygulandığı zaman, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken değerlik ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük değiş-tokuşu (mübadesi) yapmasıyla meydana gelir. Bu yük değişimi MOS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MOS eğrisini değiştirir. Arayüzey halleri, genelde arayüzeye çok yakın bulunurlar. Arayüzey hallerinde bulunan yükün yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlığından etkilenmez. Arayüzey halleri uzay yükü kapasitesine

paralel kapasite ve direnç etkisi yaptıklarından temel eşdeğer devre şekil (2.6) 'da gösterildiği gibidir. Devredeki arayüzey kapasitesi C_{ss} ,

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial V_s} A_{ox} \quad (2.9)$$

ile verilir. R_{ss} arayüzey direncidir. C_{ss} ile R_{ss} seri bağlı olduğu için durulma zamanı (relaxation time) $\tau = R_{ss}C_{ss}$ 'dir. Arayüzey halleri $C-V_G$ eğrisinin ideal $C-V_G$ eğrisine göre kaymasına ve yayvanlaşmasına sebep olur.



Şekil 2.6. MOS yapısının eşdeğer devresi,

a) Bir enerji düzeyi için

b) Birbirinden farklı birçok enerji düzeyi için

ii) **İyonlaşmış Tuzaklar:** Oksit içindeki stokiyometrik ve kimyasal yapı bozukluklarından kaynaklanan bu tuzaklar oksit içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alış-verişi yaparlar. Böylelikle oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçerler. İyonlaşmış tuzaklar kapasite-gerilim eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri arasındaki farklılıklardan dolayı kapasite-gerilim eğrisinde histeresis etkisi gözlenir. Heiman ve Warfield(1965) 'in geliştirdiği modele göre p-tipi silisyum MOS yapısının $C-V_G$ eğrisinin histeresisini gözönüne alalım. MOS yapıya silisyum

yüzeyinde hol yığılmasını oluşturan negatif gerilim yeterince uzun süre uygulanırsa oksit içindeki tuzaklar boşalır. Bu boşalma, tuzaklarda bulunan elektronların holler tarafından yakalanmasıyla olur. Eğer oksit tuzakları akseptör tipli ise boşalan tuzaklar yüksüz duruma geçecek ve ölçüme başlandığı andakine göre net yük değişimi olmayacaktır. Metal elektroda pozitif gerilim uygulanırsa Fermi düzeyi iletim bandına doğru kayacak ve oksit tuzakları dolmaya başlayacaktır. Eğer uygulanan gerilim azalırsa Fermi düzeyi tekrar değerlik bandına kayar ve tuzakların elektronları holler tarafından yakalanırlar. Bu suretle tuzaklar boşalır. Dolum-boşalım sırasında tuzaklarda bulunan elektron sayıları arasındaki fark, $C-V_G$ eğrisinin kaymasına sebep olan histeresis yüküdür. $C-V_G$ eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla histeresis yükü yoğunluğu şu bağıntıyla verilir;

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.10)$$

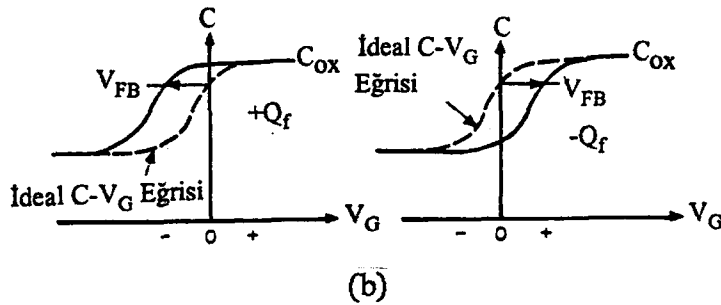
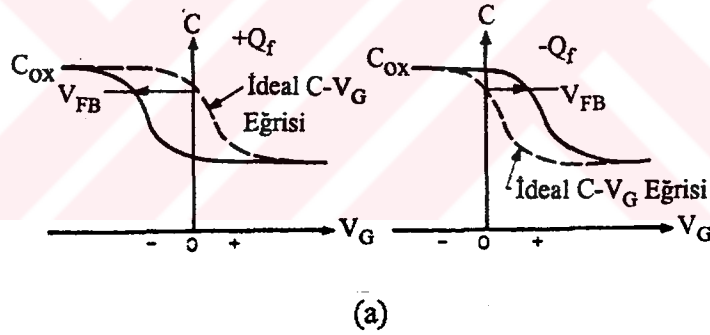
Burada ΔV_{HisFB} düz banttaki kayma miktarıdır.

iii) **Hareketli İyonlar:** Oksit yükünün bir başka tipi, hareketli iyonik yüküdür. Bu yüke çoğunlukla, sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur. Hareketli yükler, ya metal-SiO₂ arayüzeyinde lokalize olmuşlardır (burada bu yükler oksit tabakası dahilindedir) ya da Si-SiO₂ arayüzeyinde lokalize olmuşlardır (burada yükler uygulanan alan altında sürüklenmiştir). Böyle iyonlar, nisbeten düşük sıcaklıklarda SiO₂ 'de hareketli olduklarından dolayı sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırd edilebilir. Numune sınırlı olarak yükselen sıcaklıklarda tutulduğu sürece verilen zaman aralığı için gerilim uygulanır. Oksitte sabitleşmiş yükün yoğunluğu bu işlem esnasında değişebilir fakat bu yük için sorumlu merkezler hareketsizdir. Bununla beraber hareketli iyonik yük, yük boşalımı(discharge) olmaksızın bu muamele ile Si-SiO₂ ve metal-SiO₂ arayüzeyi arasında ileri-geri gidip gelebilir ve bunun neticesinde iyonik akım gözlenebilir.

Hareketli iyonlar çeşitli sebeplerle oksit içinde yer alabilirler (kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuvarz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan

safsızlıklar). Bu yükler uygulanan elektrik alan altında hareketli olduklarından dolayı MOS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar (Öztürk, 1988).

iv) Sabit Oksit ve Arayüzey Yükleri: Sabit oksit yükü şu özelliklere sahiptir; sabit oksit yükleri sabittir ve Ψ_s 'nin geniş değişimine karşı boşalmaz veya değişmezler. Bu yükler Si-SiO₂ arayüzeyinin 30 Å 'lük mesafesi içinde lokalize olmuşlardır. Sabit oksit yükünün yoğunluğu, silisyumdaki kirlilik konsantrasyonuyla, silisyumun tipiyle veya oksit kalınlığıyla çokca etkilenmezler (Sze,1981). Sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına, silikonun yönüne bağlıdır. Artık silisyum (üç değerli silisyum) veya Si-SiO₂ arayüzeyine yakın artık oksijen (desteklenmemiş oksijen) merkezlerinden bir elektronun kaybedilmesi sabit oksit yükünün orijini olarak ileri sürülmüştür. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, Si-SiO₂ arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuş yükler gibi görülebilir. Şekil (2.7), arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri mevcut olduğu zaman yüksek frekans C-V_G eğrilerinin voltaj eksenini boyunca değişimini gösterir.



Şekil 2.7. Pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenini boyunca C-V_G eğrisinin değişimi:

a) p-tipi yarıiletken için b) n-tipi yarıiletken için

n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için, ideal $C-V_G$ eğrisine göre, beslem geriliminin daha negatif değerlerine doğru $C-V_G$ eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_f$), $C-V_G$ eğrisinin daha pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ($-Q_f$) sebep olurlar (Nicollian ve Brevs,1982).

Sabit oksit ve arayüzey yüklerinin sebep olduğu, $C-V_G$ eğrisi ile ideal $C-V_G$ eğrisi arasındaki kaymadan yararlanarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , oksit yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey hal yük yoğunluğu ΔQ_{ss} hesaplanır. ΔQ_{ox} , ΔQ_{eff} ve ΔQ_{ss} aşağıdaki bağıntılarla verilir:

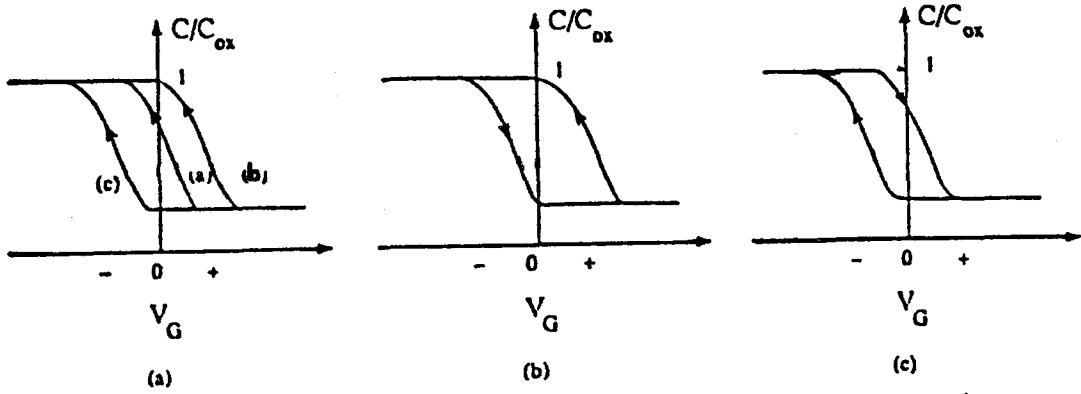
$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.12)$$

$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.13)$$

Bu formüllerde ΔV_{MG} gerçek ve ideal $C-V_G$ eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve ΔV_{FB} düz bant durumunda gerilim kaymasını göstermektedir.

Bazen ölçülen düz bant gerilim kaymasının, oksite enjekte olmuş yüklerden mi yoksa oksit içindeki hareketli yüklerden mi olduğu şüphesi vardır. Bu durumu izole etmek için basit bir kontrol şöyle yapılır; p-tipi yarıiletken ile yapılmış bir MOS kapasitör gözönüne alalım. Şekil (2.8a) 'daki a eğrisi orta uygulama gerilimiyle elde edilmiştir. Bu eğrinin ölçümü esnasında en uygun uygulama geriliminin sonucu olarak ne oksite enjekte yük nede hareketli yük hareketi olduğunu düşünmeyelim. Sonra büyük bir pozitif gerilim uygulayalım. Bu durumda iki etki olabilir: 1) Elektronlar oksite enjekte olabilirler ve 2) oksit boyunca dağılmış pozitif yüklü hareketli iyonlar oksit-yarıiletken arayüzeyine sürüklenebilirler. Oksite enjekte olmuş negatif yük 1 işlemi için pozitif ΔV_{FB} 'ye sebep olur(b eğrisi). 2 işlemi için ters etki gözlenir, çünkü oksit-yarıiletken arayüzeyinde daha pozitif yük daha negatif ΔV_{FB} 'ye sebep olur(c eğrisi).



Şekil 2.8. a) Yük olmadığında düz bant gerilim kayması(a eğrisi), yük enjekte edildiğinde (b eğrisi), hareketli yük durumunda (c eğrisi)
 b) Enjekte olmuş yüke göre $C-V_G$ eğrisi
 c) Hareketli yüke göre $C-V_G$ eğrisi

Bu tip davranışlar şekil (2.8b) ve şekil (2.8c) 'deki $C-V_G$ eğrileriyle ayrıca gösterilmiştir. Şekil (2.8b) 'de pozitif V_G , oksit içine elektron enjeksiyonuna sebep olur ve $+V_G \rightarrow -V_G$ değişimi sola doğru ok işareti ile gösterilir. Büyük negatif uygulama geriliminden dolayı tuzaklanmış elektronlar oksitten enjekte olunabilirler ve hatta oksit içine holleri enjekte etmek bile mümkündür. Ters taramada ($-V_G \rightarrow +V_G$) okun yönü sağa doğru gösterilir. Eğer hareketli yük $C-V_G$ eğrilerini kaydırmışsa, şekil (2.8c) eğrisi elde edilir. Büyük pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar oksit-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler (negatif gerilim kayması vererek). Büyük negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal-oksit arayüzeyine çekilir ve $C-V_G$ eğrisini değiştirmez. Şekil (2.8c) 'deki histeresis döngüsünün yönü şekil (2.8b) 'dekine terstir.

2.3. MOS Yapısının Arayüzey Özelliklerinin Belirlenmesi

Değişik yükler (sabitleşmiş, oksitte tuzaklanmış ve hareketli yükler) bir çok methodla ölçülebilir, ancak bu methodlardan en çok kullanılanı metal-oksit-yarıiletken kapasitörün (MOS-C) kapasite-gerilim ($C-V_G$) ölçümleridir (Schroder,1990). Bu ölçümler yüksek frekans (HF), küçük frekans (LF) ve frekans değerlerinin parametre

olarak kaldığı iletkenlik metodları ile belirlenir. Bu metodlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.3.1. Yüksek Frekans Metodu

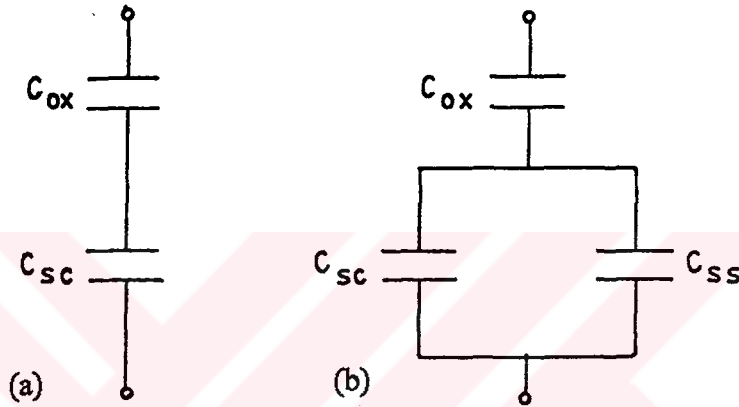
Terman tarafından geliştirilmiş olan (Terman metodu olarakta bilinir) oda sıcaklığında yüksek frekans ($\omega\tau \gg 1$) kapasite metodu, arayüzey tuzak yoğunluğu tesbiti için kullanılan ilk metodlardan biridir (Terman,1962). Bu metotta oksit tabakasının kapasitesi ve depletion(tükenim) bölgesinin kapasitesi birbirine seri bağlıdır. Uygulanan bir *ac* sinyaline cevap vermede, zaman sabiti yükün arayüzey hallerine girip çıkmasına izin vermeyecek kadar uzundur. Arayüzey tuzakları uygulanan *ac* sinyaline cevap veremezlerse nasıl ölçülebilir? Ölçümler, arayüzey hal yüklerinin kapasiteye katkılarının olmadığı kadar yüksek frekanslarda yapılırsa bile arayüzey hallerinin varlığı kapasite-gerilim eğrisinin biçimini değiştirecektir. Belli bir beslemde, arayüzey hallerinde bulunan yükler oksitte bir ilave elektrik alanının oluşmasına sebep olurlar. Bu, oksit tabakası boyunca bir gerilim düşmesini netice verir. Sonuç olarak, kapasite-gerilim eğrisi oksit tabakasında düşen gerilimin miktarı kadar yatay olarak kayacaktır. Yani, arayüzey halleri *ac* sinyaline cevap vermemelerine rağmen yavaşça değişen *dc* gerilimine duyarlıdır ve arayüzey tuzak işgali uygulanan gerilim değişirken, gerilim eksenini boyunca HF kapasite-gerilim eğrisinin yayılmasına sebep olurlar. Tükenim veya tersinim durumunda olan bir MOS-C için uygulanan bir gerilimle metal tarafında yerleşmiş olan ilave yük, ek yarıiletken yüküne sebep olur. Bu ilave yük ΔQ_{ss} , çeşitli bant bükülmesi şartlarında oksit kapasitesinin uçları arasında meydana gelen ilave gerilimin ölçülmesiyle aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir:

$$\Delta Q_{ss} = \frac{C_{ox} \Delta V_G(\Psi_s)}{A_{ox}} \quad (2.14)$$

Yukarıdaki denklemde $\Delta V_G(\Psi_s)$, ideal kapasite-gerilim eğrisinden kayma miktarı gözönüne alınarak ölçülür. $N_{ss} = 1/q(\partial \Delta Q_{ss} / \partial \Psi_s)$ bağıntısından da arayüzey hal yoğunluğu belirlenir.

Arayüzey tuzakları olduğunda belirli bir yüzey potansiyeli Ψ_s için, V_G 'nin artacağı açıktır. Bu da $C-V_G$ eğrisinin kaymasının sebebidir. Yarıiletken bant aralığı boyunca düzgün olarak dağılmış arayüzey tuzakları, oldukça yavaş bir değişim meydana getirir, fakat $C-V_G$ eğrisini bozar.

Yüksek frekans MOS kapasitörün uygun eşdeğer devresi şekil (2.9a) 'daki gibidir. Yani $C_{HF} = C_{ox}C_{sc} / (C_{ox} + C_{sc})$ şeklindedir.



Şekil 2.9. MOS yapısının eşdeğer devresi

- a) Yüksek frekans
b) Küçük frekans

2.3.2. Küçük Frekans Metodu

$\omega\tau \ll 1$ durumudur. Arayüzey hallerinin dolup-boşalmaları bu frekansta ölçülebilmektedir. Bu frekansta relaksasyon zamanı terimi olan τ ortadan kalkıyor. Yani R_{ss} ortadan kalkıyor. Küçük frekans durumunda eşdeğer devre şekil (2.9b) 'deki gibidir. Arayüzey kapasitesi C_{ss} ve yüzey potansiyeli Ψ_s aşağıdaki eşitliklerle verilir:

$$N_{ss} = qN_{ss}(\Psi_s)\Psi_s A_{ox} \quad (2.15)$$

$$\Psi_s(V_G) = \int_{V_a}^{V_{ox}} \left(1 - \frac{C(V_G)}{C_{ox}}\right) dV_G \quad (2.16)$$

N_{ss} ise (2.15) bağıntısından belirlenir.

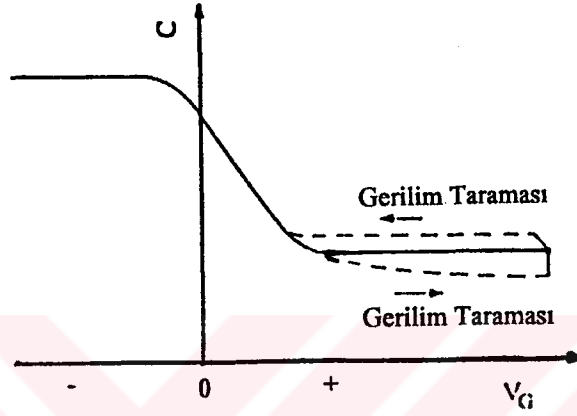
Şekil (2.4) 'te (a", b", c"), ideal yüksek frekans (HF), küçük frekans (LF), ara frekans ve derin tükenim (DD) eğrileri gösterilmiştir. Negatif uygulama gerilimlerinde, HF ve DD eğrileri düşük frekans eğrisi ile aynıdır, fakat pozitif uygulama gerilimleri için sapma meydana gelmektedir. Çünkü tersinim yükü HF durumu için uygulanan *ac* gerilimini takip edemez ve tersinim yükü DD durumu için mevcut değildir. Bu eğriler p-tipi yarıiletkenler içindir. n-tipi yarıiletkenler için eğriler, $V_G=0$ boyunca dik duran aynanın verdiği görüntü gibi olur.

Bu eğrilerin $C-V_G$ ölçümleri esnasında nasıl elde edileceği ölçüm şartlarına bağlıdır. *dc* uygulama gerilimi ile negatiften pozitif gerilimlere doğru taranan bir MOS kapasitör düşünelim. Genliği 10-15 mV olan bir *ac* gerilimi, *dc* gerilimi üzerine ilave edilir. *dc* gerilimi beslem şartlarından belirlendiği halde, *ac* gerilimi kapasite ölçümlerinde gereklidir. Bu kapasitans-gerilim eğrileri, tükenim ve yığılmada benzerdir. Devre tersinime girdiği zaman bu eğriler birbirinden sapar. Eğer *dc* gerilim taraması yeterince yavaş bir şekilde uygulanırsa, tersinim yükü oluşabilir ve bununla birlikte *ac* gerilimi yeterince düşük frekanslı olursa, tersinim yükü *ac* frekansına cevap verebilir ve o zaman düşük frekans eğrisi elde edilir. Yine, *dc* gerilim taraması yeterince yavaş bir şekilde uygulanırsa tersinim yükü oluşur fakat *ac* frekansına tersinim yüküne cevap verebilmesi için yeterince düşük değilse o zaman yüksek frekans eğrisi elde edilir. Tarama oranı çok yüksek ise derin tükenim eğrisi elde edilir fakat tersinim yükü oluşmaz.

Genellikle HF ölçümleri tercih edilir fakat gerçek yüksek frekans eğrisi her zaman kolayca elde edilemez. Şekil (2.10) 'daki $C-V_G$ eğrisini gözönüne alalım. Burada gerçek eğri sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Eğer beslem taraması soldan yapılırsa ($-V_G \rightarrow +V_G$), $C-V_G$ eğrisi kısmi derin tükenime doğru meyilli olur. Bunun sonucunda elde edilen eğri gerçek eğrinin altında olacaktır. Bu özellik yüksek yaşama zamanlı maddeler için doğrudur ve çok düşük *dc* beslem tarama oranlarını gerektirir.

Beslem taraması sağdan sola doğru yapıldığı zaman ($+V_G \rightarrow -V_G$), tersinim yükü madde içine enjekte olur. Tersinim tabakası / uzay yükü bölgesi / yarıiletken eklem doğru beslenmiş olur, ve bunun sonucunda kapasite eğrisi gerçek eğrinin üzerinde olacaktır. Genel olarak gerçek eğri, beslem geriliminin bazı değerlere set edilmesiyle elde edilir ve devrenin dengeye gelmesi için beklenir. O zaman, $C-V_G$ eğrisini elde

etmek için noktadan noktaya bu yöntem tekrarlanır. Eğer noktadan noktaya yöntemi elverişli değilse, o zaman $+V_G \rightarrow -V_G$ gerilim taramasında kapasitenin gerçek değerinden sapması, $-V_G \rightarrow +V_G$ gerilim taramasında kapasitenin gerçek değerinden sapmasından daha az olduğu için $+V_G \rightarrow -V_G$ gerilim taraması tercih edilir.



Şekil 2.10. Yüksek frekanslı MOS kapasitörün, kapasitesi üzerinde tarama yönünün etkisi

2.3.3. İletkenlik Metodu

Bu metod ilk defa Nicollian ve Goetzberger(1966) tarafından kullanılmıştır. Bu metodta frekans sabit bırakılıp kapasite-gerilim ve iletkenlik-gerilim eğrileri elde edilir. Bu metod diğer iki metoddan daha iyidir. Fakat daha fazla hesaplama yapmak gerekir. İletkenlik metodu durumunda eşdeğer devre şekil (2.11) 'deki gibidir. Bu metodda farklı farklı frekanslarda metal elektroda uygulanan gerilimi değiştirmek suretiyle kapasite (C) ve iletkenlik (G) değerleri elde edilir. Paralel kapasite C_p ve paralel iletkenlik G_p aşağıdaki eşitliklerle verilir (Goetzberger, et al.,1976):

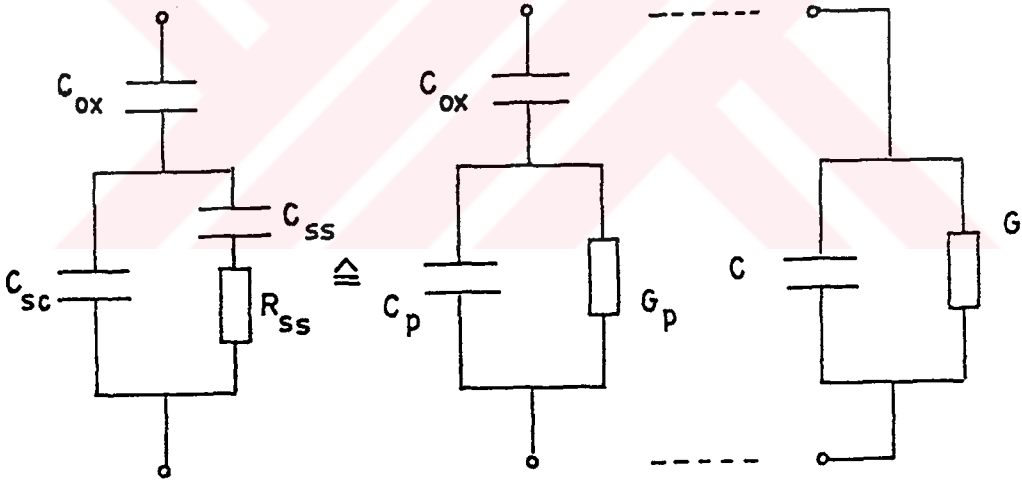
$$\frac{C_p}{C_{ox}} = \frac{1 - \frac{C}{C_{ox}}}{\left(1 - \frac{C}{C_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{G}{\omega C_{ox}}\right)^2} - 1 \quad (2.17)$$

$$\frac{G_p}{wC_{ox}} = \frac{\frac{G}{(wC_{ox})}}{\left(1 - \frac{C}{C_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{G}{wC_{ox}}\right)^2} \quad (2.18)$$

$\frac{G_p}{wC_{ox}} - w$ eğrisi logaritmik ölçekte çizilince, $w\tau=1$ durumunda, eğri bir maksimumdan geçer. Eğrinin maksimumundan yararlanarak hal yoğunluğu

$$N_{ss} = \frac{C_{ox}}{qA_{ox}} \left(\frac{G_p}{wC_{ox}}\right) f_N(\sigma_g) \quad (2.19)$$

ifadesiyle verilir. Burada $f_N(\sigma_g)$ yakalama tesir kesiti fonksiyonudur.



Şekil 2.11. İletkenlik ölçümü durumunda eşdeğer devre

3. DENEY SİSTEMİ VE ÖLÇÜLER

3.1. Kristallerin Hazırlanması ve Temizlenmesi

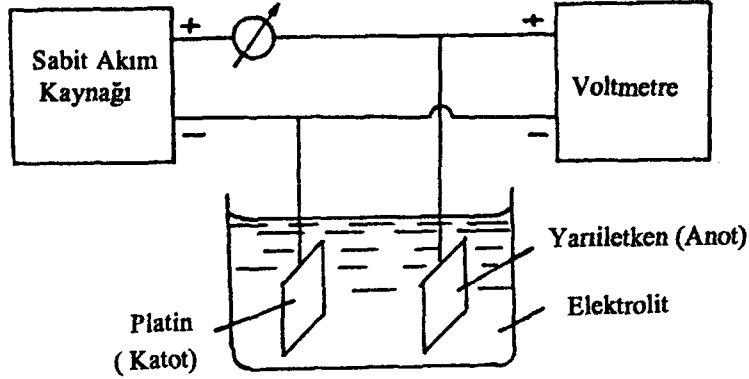
Bu çalışmada, [100] doğrultulu, 15-25 ohm-cm öz dirençli, 500 µm kalınlıklı p-tipi silisyum kristali kullanıldı. Kristalin bir yüzü satıcı firma tarafından parlatılmış ve parlatılmayan yüzü de alüminyum kaplanarak omik kontak oluşturulmuştur. Kristal önce 1 cm² 'lik parçalara bölündü. Bölünen bu parçalar sırasıyla, asetonda, metanol 'de ve deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.

Omik kontaklı kristaller anodik oksidasyon yapılmaya hazırlandılar. Fakat oksidasyon işleminde, elektrolit içine batırılacak olan kristallerde oksidasyonun sadece parlatılmış yüzeyde oluşabilmesi için omik kontak yapılmış diğer yüzeyin ve yan yüzeylerin elektriksel ve kimyasal olarak izole edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kristallerin omik kontak kısmına, öncelikle gümüş pasta kullanılarak teflon kılıflı gümüş tel yapıştırılıp, elektrik kontağı yapıldı ve daha sonra kristalin omik kontak yüzeyi ve kenarlar elektriksel ve kimyasal izolasyon için wax 'la kaplandı. Sonuçta numuneler oksidasyon için hazır duruma geldi.

3.2. Anodik Oksidasyon

Anodik oksidasyon yarıiletken üzerinde dielektrik özelliği olan bir oksit tabakası oluşturmak amacıyla yapılır. Bu işlemin temel prensibi, oda sıcaklığında yapılmasıdır. Temel olarak anodizasyon elektrolitik bir hücredir. Hücre güç kaynağıyla beslenirken yarıiletken anot olarak ve platin elektrot katot olarak kullanılır. Sistem güç kaynağıyla beslendiğinde yarıiletken üzerinde tabii oksiti (native oxide) ürün olarak ortaya çıkar.

Anodizasyon işleminden önce, numunenin parlak yüzünde laboratuvar atmosferinde oluşan oksit tabakasını kaldırmak için, numune seyreltilmiş HF ile (H₂O : HF ; 10 : 1) temizlenerek, deiyonize su ile yıkayıp kurutulduktan sonra şekil (3.1) 'de gösterilen anodik oksidasyon düzeneğinde elektrolit içine yerleştirilerek sabit akım şartları altında oksitleme işlemine tabi tutuldu ve üç farklı akım yoğunluğu seçildi. Akım yoğunluğunun farklı olması oksidasyon işlemini etkilemektedir. Oksit kalınlığının kontrollü yapılabilmesi için güç kaynağının akım kaynağı olması gerekmektedir.



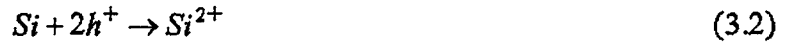
Şekil 3.1. Anodik oksidasyon düzeneği

Silisyumun anodik oksidasyonundaki etkileşmeler aşağıdaki gibidir (Ghandhi, 1983):

i) Elektrolit ortamındaki su, H^+ ve $(OH)^-$ iyonlarına ayrışır.



ii) Silisyum ve elektrolit arasında elektrokimyasal potansiyellerdeki farklılık sonucunda denge oluşana kadar silisyumdan yük transferi olur. Yüzey tabakasında kısmen elektronların tükenmesine yol açar. Anodizasyon esnasında holler, yarıiletken kristalin içlerinden yarıiletken-elektrolit arayüzeyine giderler. Böylece, silisyum yüzey atomları daha yüksek oksitlenme basamağına ilerlerler,



iii) Si^{2+} , $(OH)^-$ ile birleşerek,

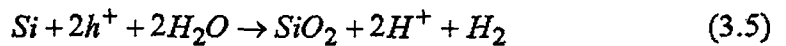


hidroksitini oluşturur.

iv) $Si(OH)_2$ ardışık olarak süreçte hidrojen serbest bırakarak SiO_2 oluşturur:



Toplam reaksiyon



ile verilir. Dış batarya(veya aydınlatma) olmadığında, hollerin reaksiyon arayüzeyine sürekli sağlanması durur. Termal olarak üretilmiş hollerin konsantrasyonu, bir tek tabakadan sonra SiO₂ oluşumu için yetersizdir. Eğer dış batarya(dış gerilim) bağlanırsa, bu anot reaksiyonu için gerekli holleri sağlar ve böylece oksit büyüme süreci desteklenir. H⁺ iyonu katoda sürüklenir ve elektronların eklenmesiyle moleküler hidrojen olarak ortaya çıkar,



Bu bilgilerin ışığında bu çalışmada elektrolit olarak 0.1 M 'lık KOH çözeltisi kullanılmıştır.

Oksidasyon işlemi sabit akım şartlarında, dört farklı pH(=5;6;7 ve 8) ve her bir pH için üç farklı sabit akım yoğunluğunda(J=3;5 ve 7 mA/cm²) gerçekleştirilmiştir. Elektrolitin pH 'sı, hidrojen iyon (H⁺) konsantrasyonunun bir ölçüsüdür. Nötral bir çözelti için pH=7 ve H⁺, (OH)⁻ konsantrasyonlarının herikisi 10⁻⁷ 'ye eşittir. pH=2 için çözelti asidik ve H⁺ konsantrasyonu=10⁻², (OH)⁻ konsantrasyonu=10⁻¹² olur. H⁺ ve (OH)⁻ iyonları çözülme işlemlerini kontrol ve katalize eden ara ürün reaksiyonlarına iştirak ederler.

Elektrolit akımının (OH)⁻ ve/veya (H₃O)⁺ iyonları tarafından taşındığı ve anyon akımının toplam akımdaki değişimle değişmediği basitleştirilmiş durumu gözönüne alalım. Bu durumda oksit büyüme hızı toplam akımla artar fakat çözünme hızı yaklaşık olarak sabit kalır. Bu da, yüksek akım yoğunluğu için, çözülmenin az veya hiç olmadığı, hızlı oksit büyümesinin olduğunu gösterir. Akım yoğunluğu düşük seviyeye indirildiği zaman, oksit büyüme hızı çözülme hızına eşit olur ve yarıiletken yüzeyi üzerinde oksit tabaka oluşmaz (Wilmsen, 1985).

Elektrolit pH 'larında tampon olarak:

pH=5 için, sodyum asetat (CH₃COONa),

pH=6 için, sodyum bi karbonat (NaHCO₃),

pH=7 ve pH=8 için, Tris (trihidroksimetil) aminometan [(HOCH₂)₃CNH₂]

kullanıldı. pH=5 ve pH=6, H₂SO₄ ile pH=7 ve pH=8 ise NH₄OH ile ayarlandı. Oksidasyon işlemi sonucunda oksitlenmiş kristal elektrolitten çıkarılarak Triklor etilen (C₂HCl₃) içerisinde atılarak wax 'ı çözüldü ve hemen arkasından sırasıyla Triklor etilen, aseton ve deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı. Oksidasyon işlemi sonucunda, homojen görünümlü bir oksit rengi elde edilemediğinde, bozuk oksit tabakası seyreltilmiş HF(H₂O : HF ; 10 : 1) ile giderilip kristal deiyonize suyla yıkandıktan sonra yenilenen aynı elektrolitte tekrar büyütüldü.

Oksidasyon sırasında gerilim ve zaman değerleri kaydedildi. Bu değerlerin grafikleri şekil (3.2), (3.3), (3.4) ve (3.5) 'de görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde şu sonuçlara varıldı:

1) pH=5 'e ayarlanmış elektrolitte, J=3 mA/cm² akım yoğunluğu için, akım geçmeye başlar başlamaz anot ve katot arasındaki gerilim 2,5 Volt olup, akımın kesildiği an olan 23 dakika sonunda gerilim 34,7 Volt 'a çıkmaktadır. Burada 3,5-23 dakika aralığında eğri az eğimli doğrusaldır.

J=5 mA/cm² 'lik akım yoğunluğu için, akım verilmeye başlanınca gerilim 1,92 Volt olup, akımın kesildiği an olan 15 dakika sonunda gerilim 41,3 Volt 'a çıkmaktadır. Burada da 3. dakikadan 9. dakikaya (35,6 V) kadar doğrusal bir değişim, bundan sonra ise eğrinin doyuma ulaştığı gözlenmektedir.

J=7 mA/cm² 'lik akım yoğunluğu için, başlangıçta anot ve katot arasındaki gerilim 3,4 Volt olup, biri 1,5. dakikadan 6. dakikaya diğeri 6. dakikadan 10. dakikaya kadar olmak üzere iki doğrusal bölge gözlenmektedir. Birinci doğrunun eğimi ikinci doğrunun eğiminden daha büyüktür. Daha sonra eğri aşağı doğru konkav şeklini almaktadır. Akımın kesildiği anda(15 dakika) gerilim 38,0 Volt değerine ulaşmaktadır.

2) pH=6 'ya ayarlanmış elektrolitte, J=3 mA/cm² 'lik akım yoğunluğu için, akım verilmeye başlanınca gerilim ani olarak 2,6 Volt 'a çıkmaktadır ve biri 3. dakikadan 12. dakikaya, diğeri 12. dakikadan 18,5. dakikaya kadar olmak üzere iki bölgede gerilim zamanla doğrusal değişim göstermektedir. 18,5. dakikadan sonra ise eğrinin doyuma ulaştığı gözlenmektedir. Oksitleme işlemi 25 dakika sürmekte ve gerilim oksidasyon sonunda 41,8 Volt 'a ulaşmaktadır.

$J=5 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğu için, başlangıç gerilimi 1,7 Volt olup, 18 dakika sonunda 53,4 Volt 'a ulaşmaktadır. Yine 1,5-9 dakika aralığında doğrusal değişim vardır ve 9. dakikadan sonra oksidasyon işleminin sonuna kadar eğri aşağı doğru konkav şeklinde devam etmektedir.

$J=7 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğunda, anotla katot arasındaki gerilim 2,7 Volt 'dan başlayıp 20 dakika sonunda 69,7 Volt 'a ulaşmakta ve 3 bölgede doğrusallık göstermektedir. Bu bölgeler, 3-9; 9-12 ve 12-19 dakika aralığında bulunmakta ve 19. dakikadan sonra eğri doyuma ulaşmaktadır.

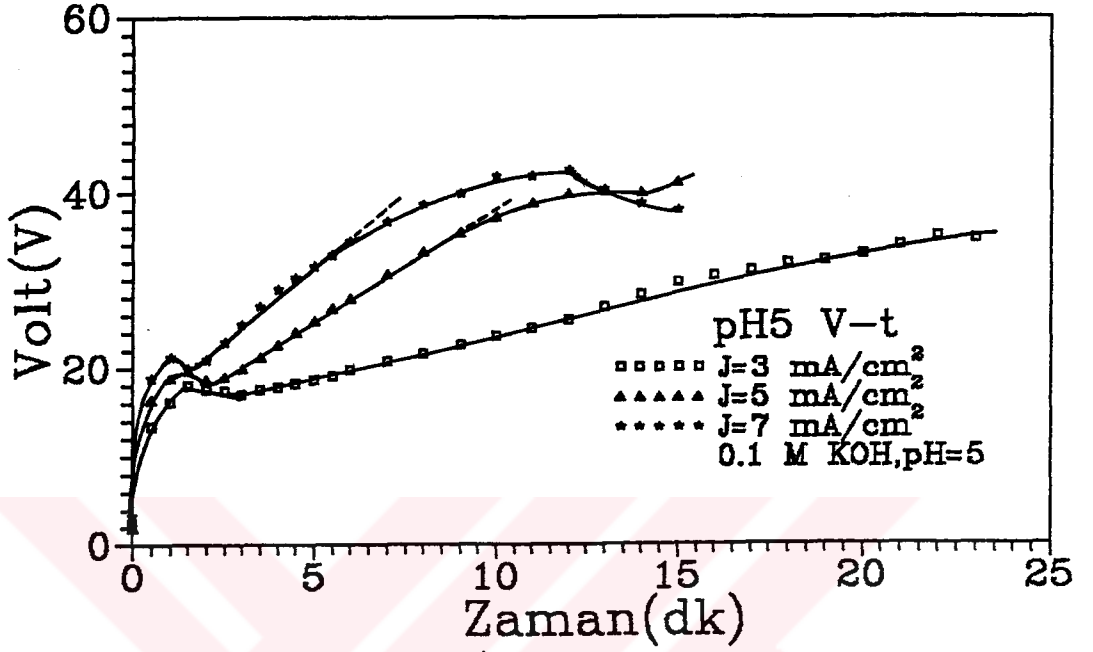
3) $\text{pH}=7$ 'ye ayarlanmış elektrolitte, $J=3 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğu için, gerilim 2,1 Volt 'dan başlayarak 23 dakika sonunda 47,9 Volt 'a ulaşmakta ve 2-14,5 dakika aralığında doğrusal değişim gözlenmektedir. Bundan sonra eğri aşağı doğru konkav şeklinde doyuma ulaşmaktadır.

$J=5 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğunda, gerilim 1,2 Volt değerinden başlayıp 22 dakika sonra 51,6 Volt 'a ulaşarak biri 2. dakikadan 9. dakikaya diğeri, 9. dakikadan 19. dakikaya kadar olmak üzere iki bölgede doğrusal değişim göstermektedir. Bu dakikadan sonra ise oksidasyon işleminin sonuna kadar eğri doyuma ulaşmaktadır.

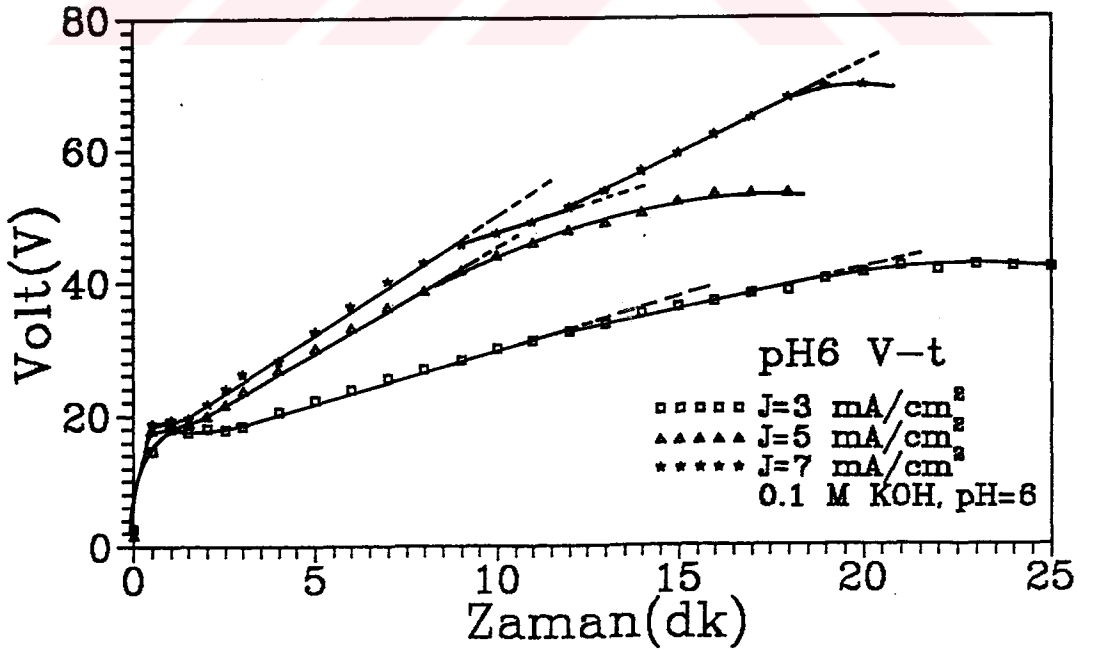
$J=7 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğunda, oksidasyon gerilimi 2,3 Volt 'dan başlayarak 18 dakika sonunda 54,3 Volt 'a ulaşmakta ve 1-11 dakika aralığında doğrusal değişim gözlenmektedir. 11. dakikadan sonra ise oksidasyon işleminin sonuna kadar eğri aşağı doğru konkav şeklinde doyuma ulaşmaktadır.

4) $\text{pH}=8$ 'e ayarlanmış elektrolitte, $J=3 \text{ mA/cm}^2$ 'lik sabit akım yoğunluğu için, anot-katot gerilimi 3,2 Volt 'dan başlayarak, 24 dakika sonra 38,2 Volt 'a ulaşmakta ve biri 1. dakikadan 4. dakikaya kadar diğeri 4. dakikadan 13. dakikaya kadar olmak üzere iki bölgede doğrusal değişim gözlenmektedir. 13. dakikadan sonra oksidasyon işleminin sonuna kadar eğri doyuma ulaşmaktadır.

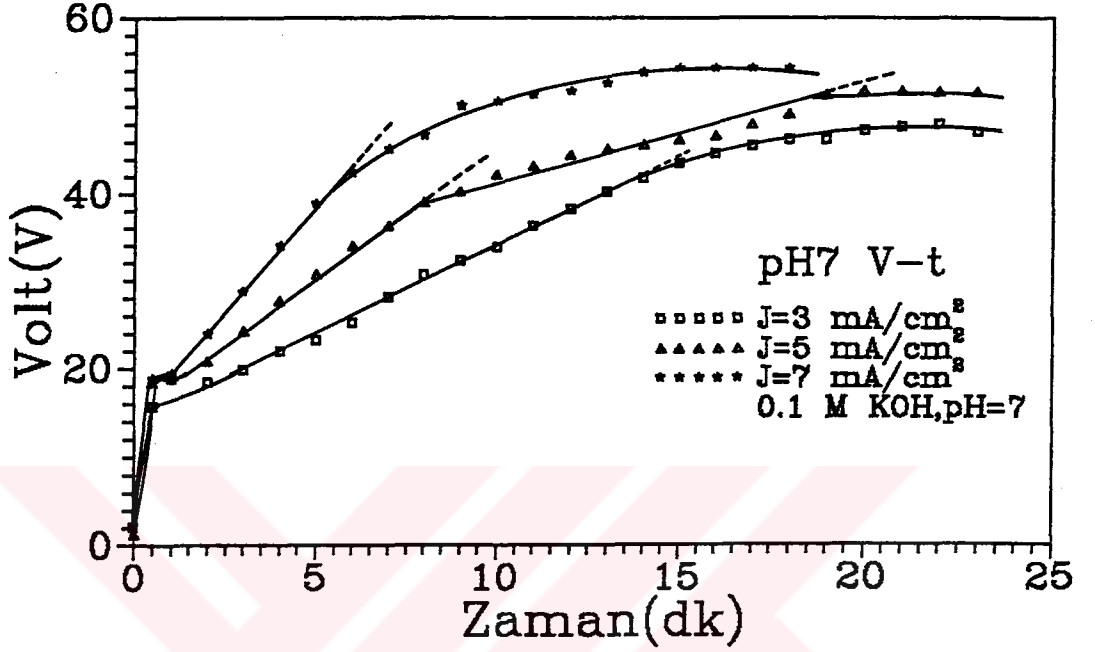
$J=5 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğunda, gerilim 3,3 Volt 'dan başlayıp, oksidasyon sonunda (19 dakika) 51,9 Volt 'a ulaşarak, 2-9 dakikaları aralığında doğrusal değişim göstermektedir ve 9. dakikadan sonra eğri doyuma gitmektedir.



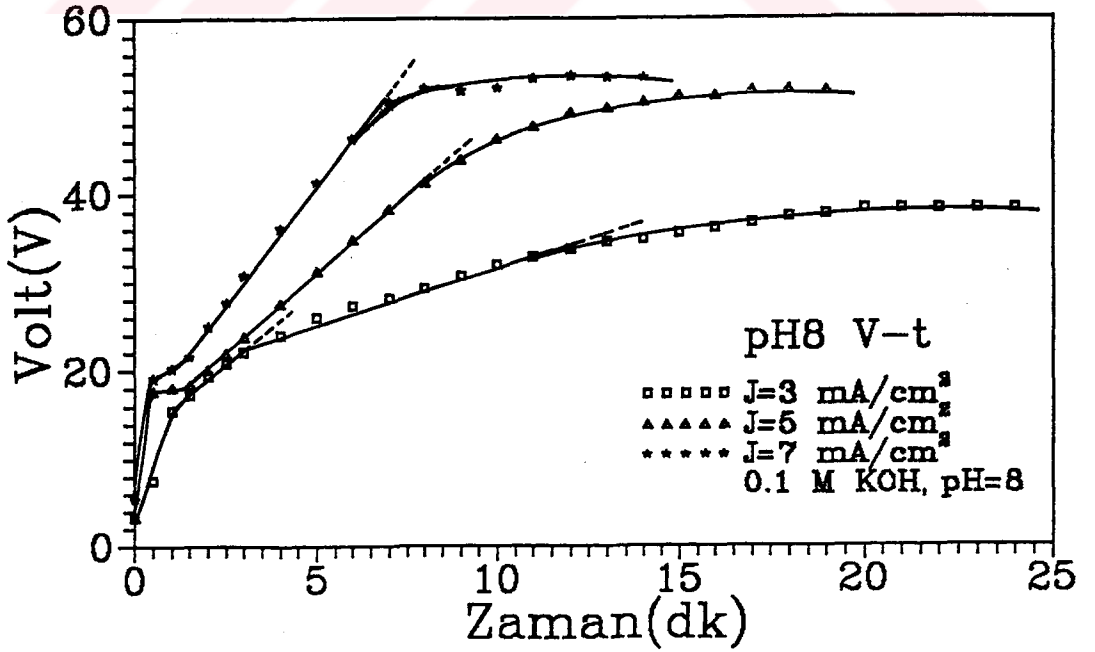
Şekil 3.2. pH=5 'de, J=3; 5 ve 7 mA/cm² için oksit büyüme gerilim-zaman grafikleri.



Şekil 3.3. pH=6 'da, J=3; 5 ve 7 mA/cm² için oksit büyüme gerilim-zaman grafikleri.



Şekil 3.4. pH=7 'de, J=3; 5 ve 7 mA/cm² için oksit büyüme gerilim-zaman grafikleri.



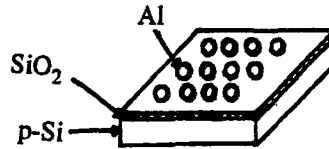
Şekil 3.5. pH=8 'de, J=3; 5 ve 7 mA/cm² için oksit büyüme gerilim-zaman grafikleri.

$J=7 \text{ mA/cm}^2$ 'lik akım yoğunluğunda, akım verilmeye başlanınca anotla katot arasındaki gerilim ani olarak 5,4 Volt 'a yükselmekte ve akımın kesildiği an olan 14 dakika sonunda gerilim 53,3 Volt 'a ulaşmaktadır. Burada da 1-7 dakikalığı aralığında doğrusal değişim söz konusudur ve 7. dakikadan sonra eğri doyuma gitmektedir.

Her bir oksidasyon işlemi sonunda farklı kalınlıklarda homojen oksitler elde edilmiştir. Oksidasyon sürelerine bağlı olarak oksit kalınlıkları Tablo 3.1a 'da verilmiştir. V-t grafiklerinden görüldüğü gibi, büyük akım yoğunluklarında eğrilerin eğimleri daha büyüktür ve ikinci ve/veya üçüncü bölgelerde eğimlerin keskin bir şekilde azalması veya eğrinin doyuma ulaşması, çok düşük de olsa, iyonik akımın katkısından dolayı olabilir (Schmidt ve Michel, 1957).

3.3. Metal Kaplama

Ultrasonda temizlenip kurutulmuş oksitlenmiş numuneler kaplama ünitesine alınarak metal kaplanmıştır. Metal kaplama işlemi 10^{-5} Torr 'luk basınçta gerçekleştirilmiştir. Tungsten potaya % 99.99 saflıkta alüminyum metali konmuş ve numunenin oksitlenmiş yüzü potanın tam üstüne gelecek şekilde oksitli yüzeyde 1mm çaplı kontaklar oluşturacak maskenin üzerine yerleştirilmiştir. Tungsten potanın uçlarına akım verilerek oksit üzerine alüminyum kaplanmıştır. Bu işlemler sonunda Al / anodik SiO_2 / Si yapısı elde edilmiştir. Şekil (3.6) 'da görüldüğü gibi bir numune üzerinde 10-15 MOS elemanı bulunmaktadır. Elde edilen MOS yapılar, ait oldukları pH ve akım yoğunluklarının değerlerine göre isimlendirilmişlerdir. Örnek olarak, Ay3pH5N1; Akım yoğunluğu 3, pH=5 ve bir numaralı nokta (dot), tavlama numunelerinde ise, TA3pH5N1; Tavlanmış, Akım yoğunluğu 3, pH=5 ve bir numaralı nokta.

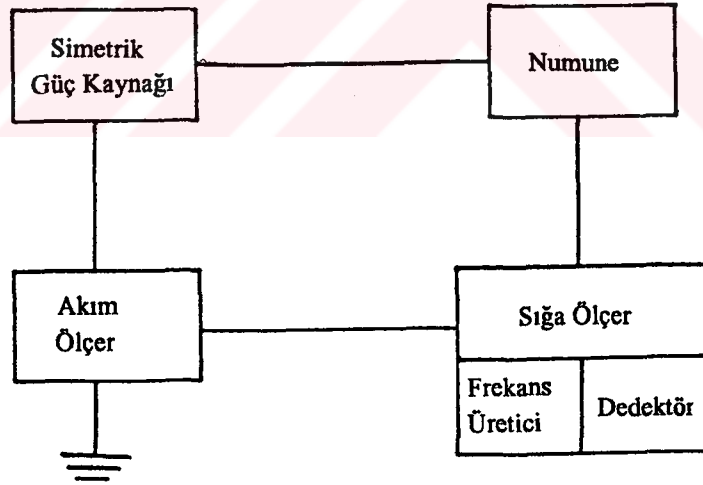


Şekil 3.6. Bir kristal üzerinde elde edilen MOS elemanları.

3.4. Kapasite-Gerilim Ölçü Sistemi ve Kapasite-Gerilim Karakteristikleri

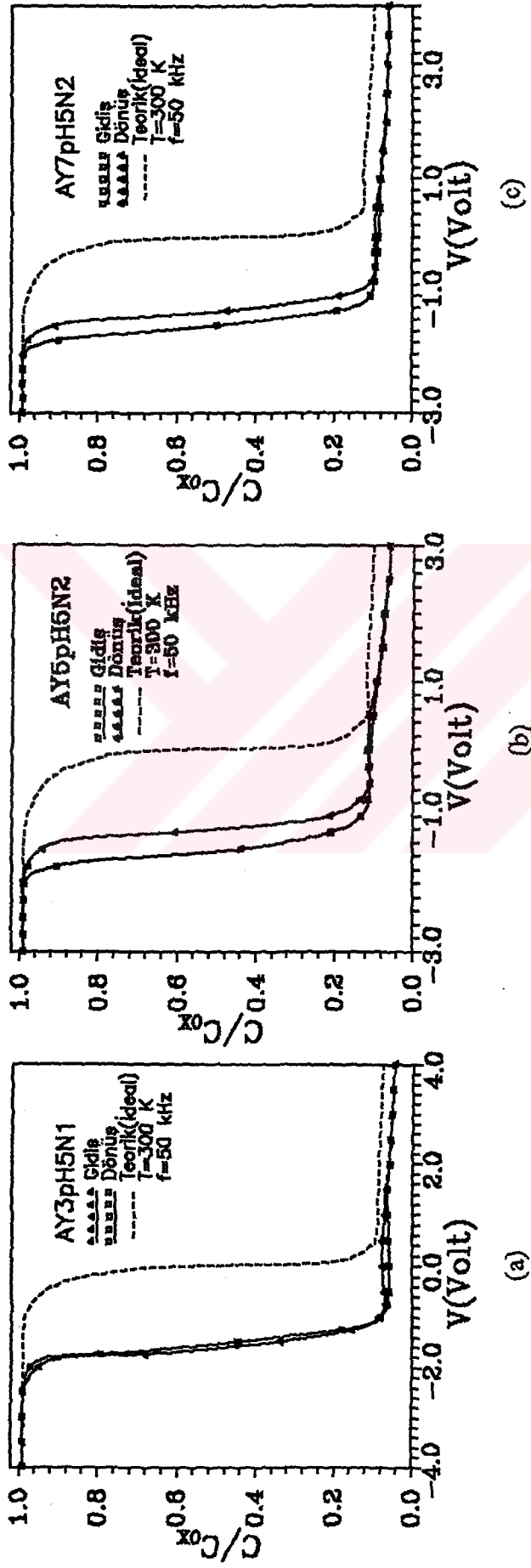
Kapasite-gerilim ölçümlerinde " Weyne Kerr Radio Frequency Bridge B 601, Weyne Kerr Source and Dedector SR 268L, Keitly 171 Digital multimeter ve kendi imalatımız olan simetrik güç kaynağı (gerilim kaynağı)" kullanılmıştır. Al / anodik SiO₂ / Si MOS yapıların kapasite-gerilim (C-V_G) ölçümleri için şekil (3.7) 'de blok diyagramı verilen sistem kullanıldı. Kapasite-gerilim ölçümleri oda sıcaklığında ve sabit frekansta (f=50 kHz) alındı. MOS yapı *dc* gerilimi altında iken, genliği *dc* geriliminden çok küçük olan *w* açısız frekanslı bir *ac* sinyali uygulanarak ölçümler alındı.

Kapasite-gerilim ölçümleri sırasında simetrik gerilim kaynağı sıfır Volt 'dan süratle pozitif maksimum ölçüm yapılacak gerilime getirilmiştir. Oda sıcaklığında bu pozitif maksimum gerilimden başlanarak 0,5 Volt 'luk adımlarla negatif uç gerilim değerine kadar, sonrada negatif uç değerden pozitif uç değere kadar, aynı aralıklarla gerilim değiştirilerek kapasite değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler bitince, gerilim tekrar süratli bir şekilde sıfır Volt 'a getirilmiştir.

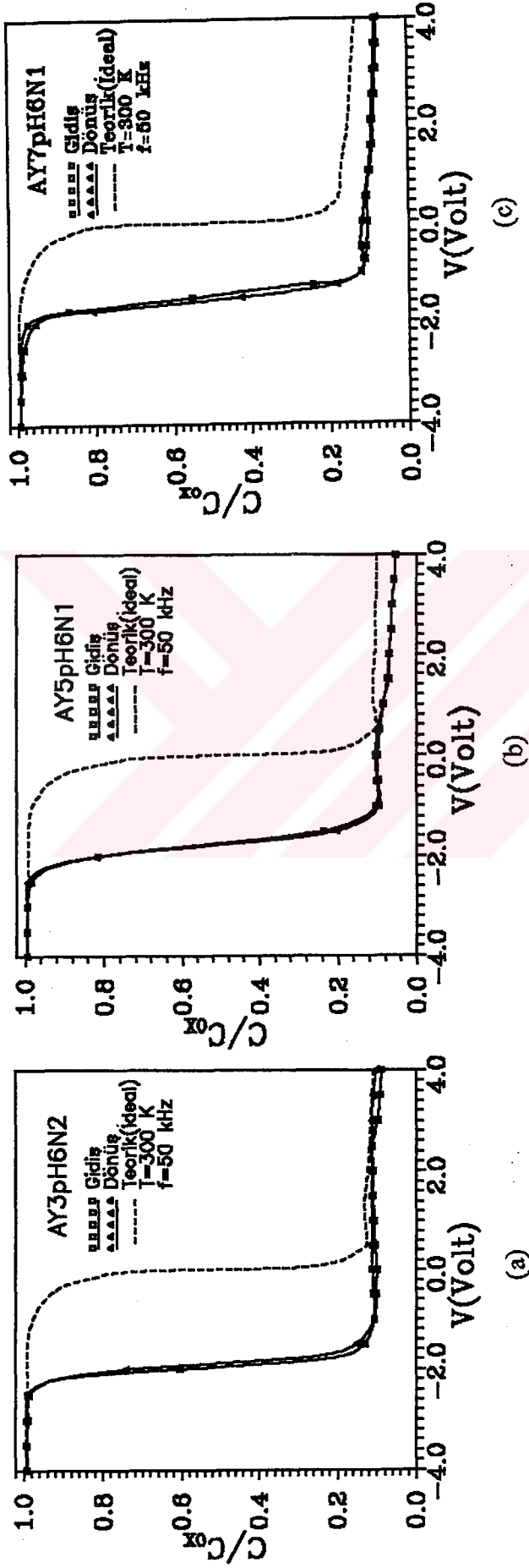


Şekil 3.7. Kapasite-gerilim ölçümlerinde kullanılan sistemin blok diyagramı.

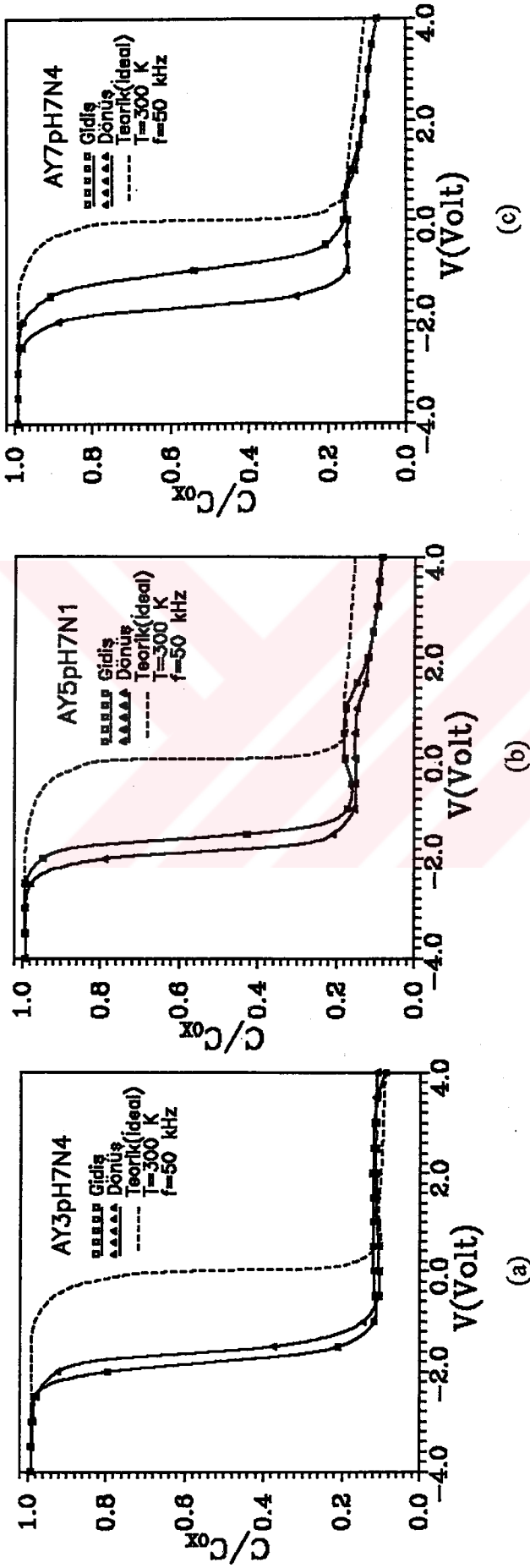
Şekil (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) 'den de görüldüğü gibi bütün numunelerin C-V_G eğrilerinde pozitif gerilimden negatif gerilime giderken elde edilen eğri ile negatif gerilimden pozitif gerilime giderken elde edilen eğri çakışmamaktadır. Dolayısıyla iki



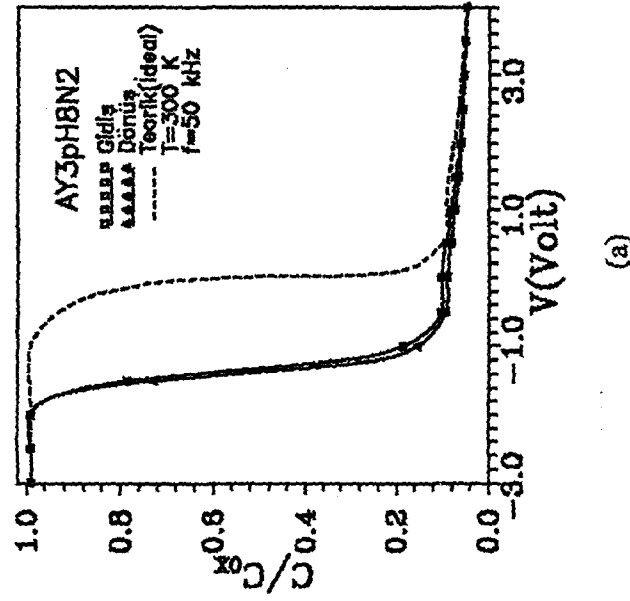
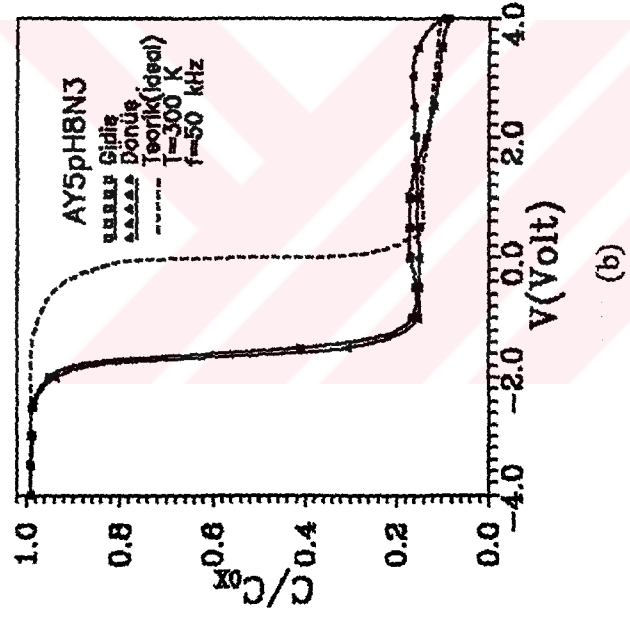
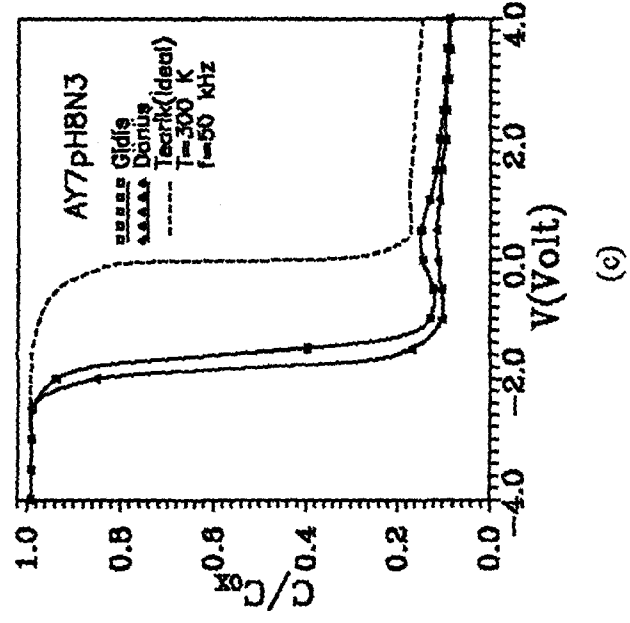
Şekil 3.8. pH=5 'de, a) $J=3$ mA/cm², b) $J=5$ mA/cm² ve c) $J=7$ mA/cm² için C-V_G karakteristikleri.



Şekil 3.9. pH=6 'da, a) $J=3$ mA/cm², b) $J=5$ mA/cm² ve c) $J=7$ mA/cm² için C-VG karakteristikleri.



Şekil 3.10. $pH=7$ 'de, a) $J=3$ mA/cm², b) $J=5$ mA/cm² ve c) $J=7$ mA/cm² için C-V_G karakteristikleri.

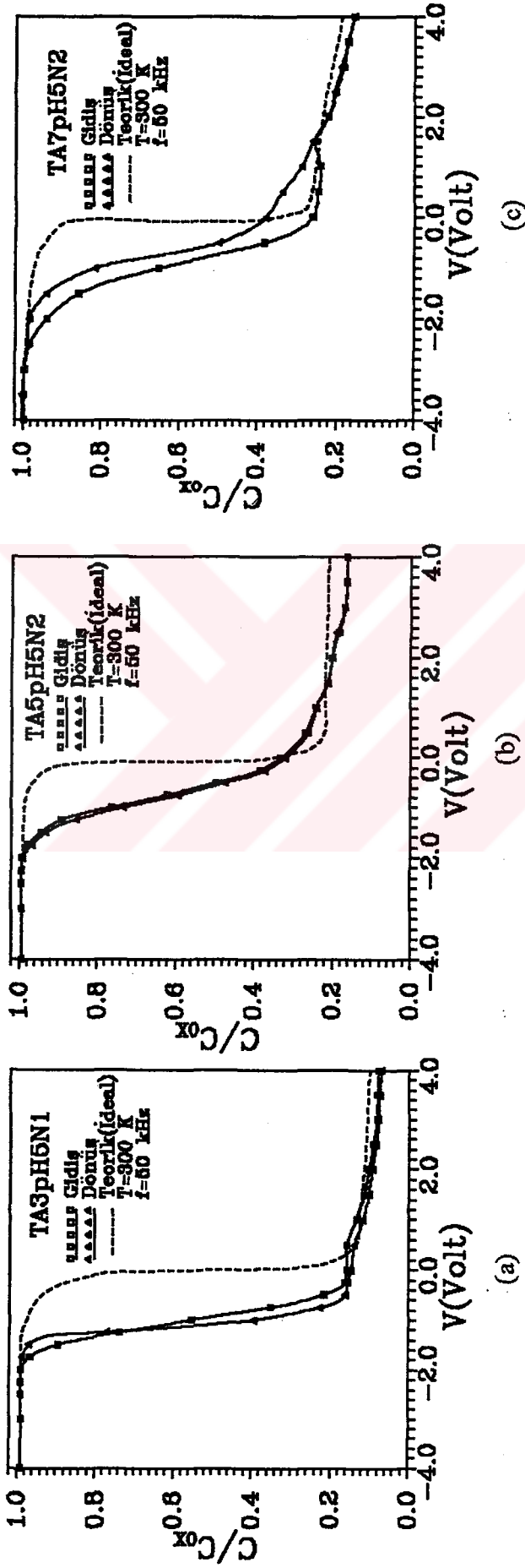


Şekil 3.11. pH=8 'de, a) $J=3 \text{ mA/cm}^2$, b) $J=5 \text{ mA/cm}^2$ ve c) $J=7 \text{ mA/cm}^2$ için $C-V_G$ karakteristikleri.

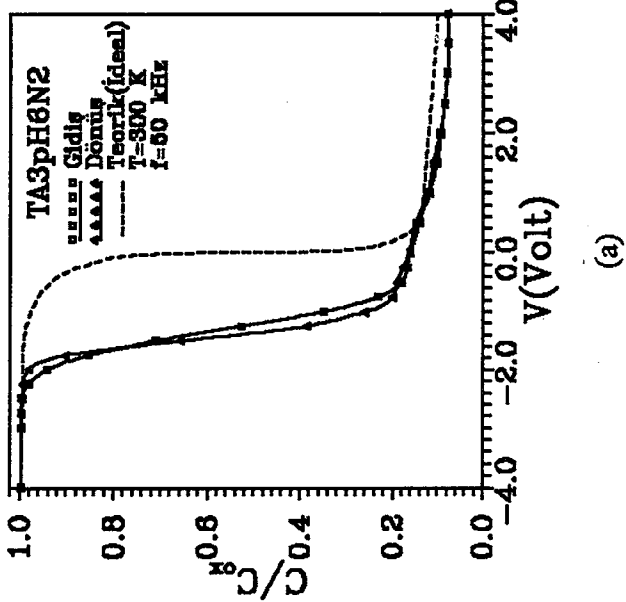
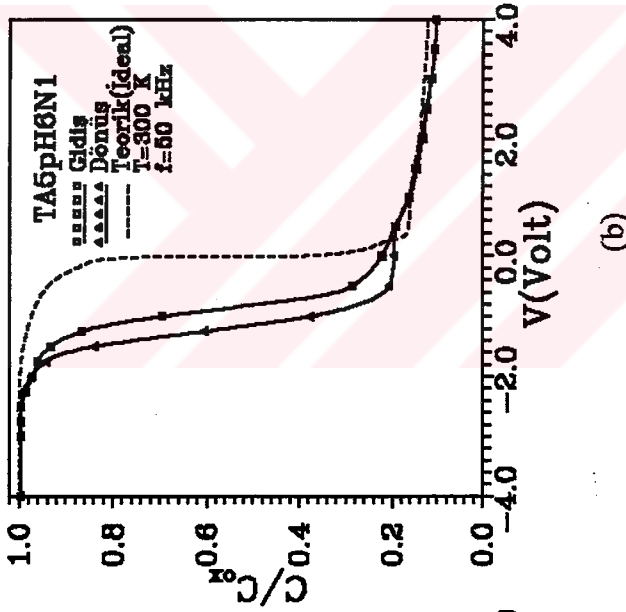
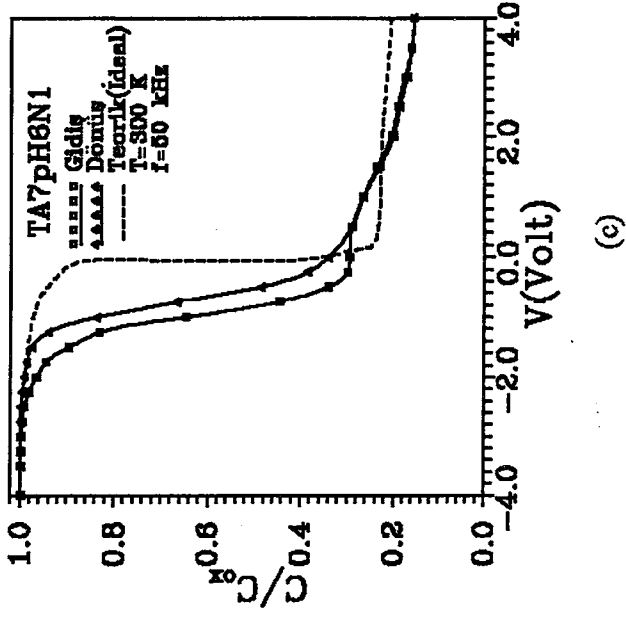
eğri arasında bir histeresis görülmektedir. Bu histeresis oksit içinde bulunan iyonlaşmış tuzaklardan dolayı oluşur. Yine bütün numunelerin kapasite-gerilim eğrilerinin, ideal kapasite-gerilim eğrilerinin soluna doğru kaydığı görülmektedir. Sola kayma oksit içinde sabit pozitif yük bulunduğunu gösterir(Nicollian ve Brews, 1982). İdeal eğriden bu kaymadan yararlanarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , Si-SiO₂ arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu ΔQ_{ss} ; (2.11), (2.12) ve (2.13) denklemleri yardımıyla hesaplanarak Tablo 3.2 a 'da verildi. Yine düz bant gerilim kayması ($\Psi_s=0$ 'a karşılık gelen gerilim değeri) ve histeresisin maksimum durumundaki gerilim kayması kullanılarak, ΔQ_{HISMAX} ve ΔQ_{HISFB} değerleri hesaplanıp Tablo 3.2a 'da verildi.

Bütün numunelerin C-V_G eğrileri dikkate alındığında, histeresis tiplerinin farklı olduğu görülmektedir. Ay3pH5N1, Ay5pH5N2, Ay7pH5N2, Ay3pH6N2 ve Ay3pH7N4 numunelerinin C-V_G eğrilerindeki histeresis iyonik karakterlidir. Yani C-V_G ölçümlerinde, pozitif uç gerilimden negatif uç gerilime doğru giderken elde edilen eğri, negatif uç gerilimden pozitif uç gerilime doğru giderken elde edilen eğriye göre solda kalmıştır ve bu tür histeresisler iyonik histeresis olarak adlandırılırlar(Schroder, 1990). Diğer altı numunede(Ay7pH6N1, Ay5pH7N1, Ay7pH7N4, Ay3pH8N2, Ay5pH8N3 ve Ay7pH8N3) ise, histeresis elektronik karakterlidir. Yani C-V_G ölçümlerinde, pozitif uç gerilimden negatif uç gerilime doğru giderken elde edilen eğri, negatif uç gerilimden pozitif uç gerilime doğru giderken elde edilen eğriye göre sağda kalmıştır ve bu tür histeresisler elektronik histeresis olarak adlandırılırlar(Schroder, 1990). Ay5pH6N1 numunesinde ise histeresis; -0,54 Volt 'dan -1,93 Volt 'a kadar elektronik, -1,93 Volt 'dan -2,92 Volt 'a kadar ise iyoniktir. Yani her iki histeresis tipi de görülmektedir.

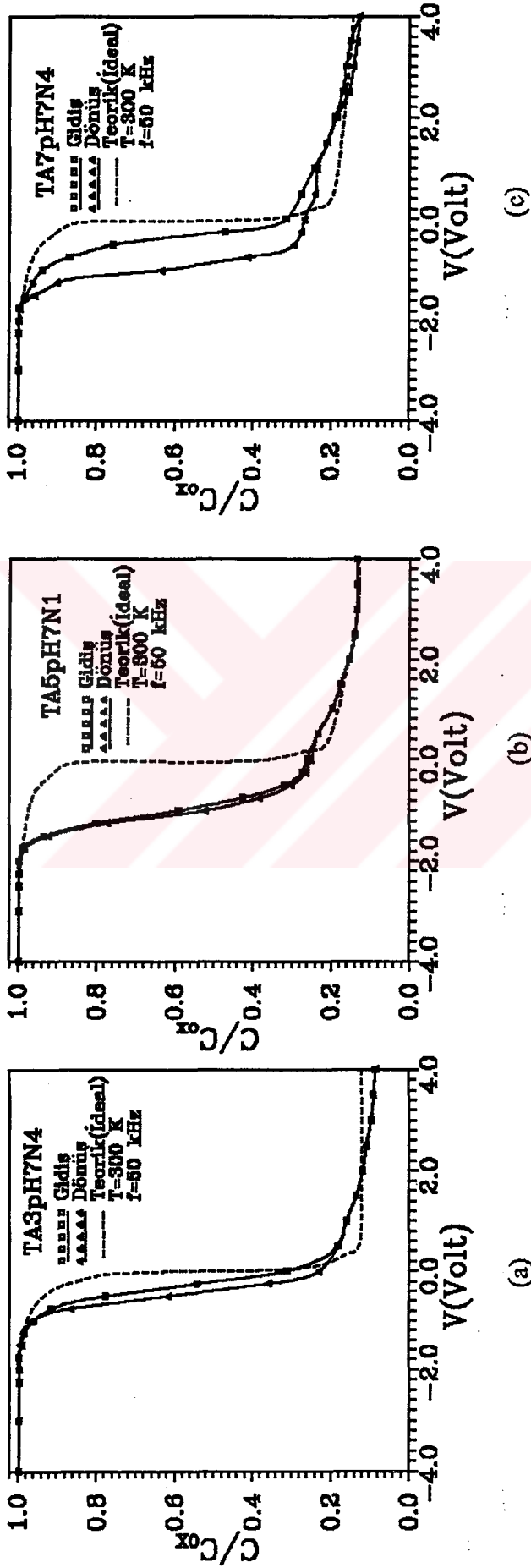
Oda sıcaklığında C-V_G ölçümleri alınan Al / anodik SiO₂ / Si MOS yapılar, daha sonra vakum pompasına alınarak 500 °C 'de tavlammıştır. Tavlama işlemi, numune tungsten ısıtıcı üzerine yerleştirilerek ve sıcaklık kromel-alümel termo çifti ile kontrol edilerek 10⁻⁵ Torr 'luk basınçta yapıldı. Numune düzenli ısıtılmak suretiyle (100 °C/dakika), 500 °C 'ye çıkıldı ve bu sıcaklıkta beş dakika bekledikten sonra aynı hızla soğutuldu. Tavlammış numune 3-5 saat bekletildikten sonra tekrar f=50 kHz, T=300 K 'da C-V_G ölçümleri yapıldı. Bütün numunelerin tavlannması aynı şartlar altında gerçekleştirildi.



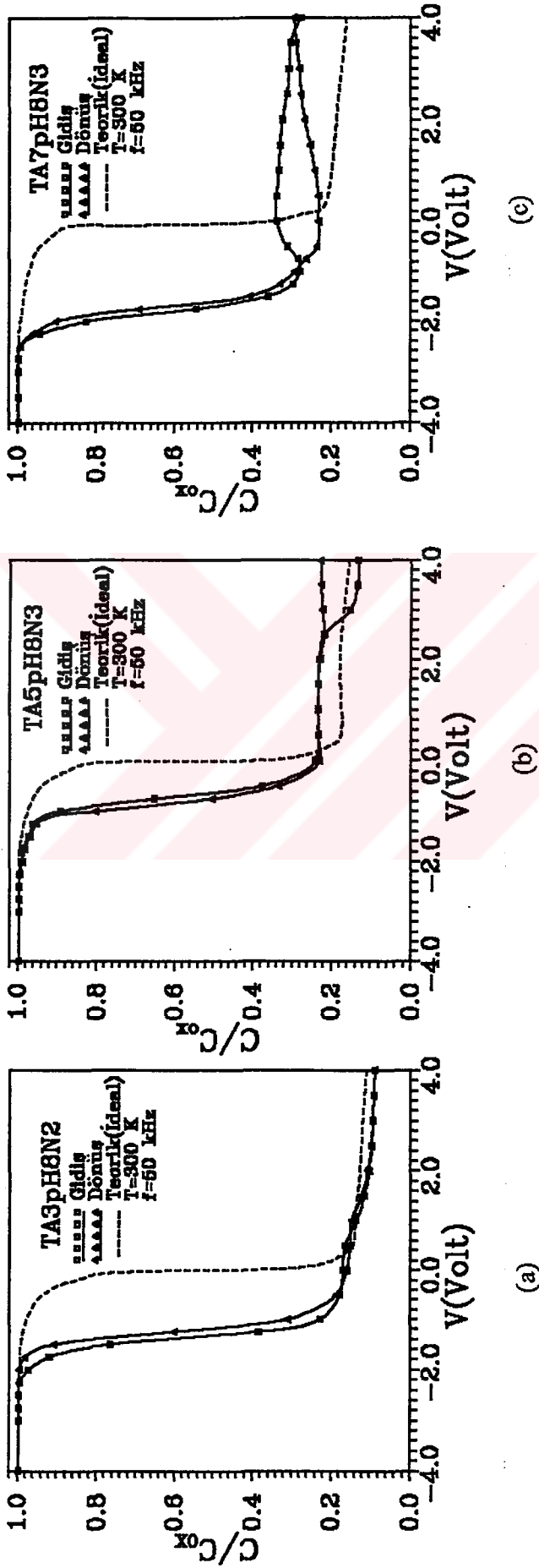
Şekil 3.12. Tavlamadan sonra, pH=5 'de, a) $J=3 \text{ mA/cm}^2$, b) $J=5 \text{ mA/cm}^2$ ve c) $J=7 \text{ mA/cm}^2$ için C-V karakteristikleri.



Şekil 3.13. Tavlama sonrası, pH=6 'da, a) $J=3 \text{ mA/cm}^2$, b) $J=5 \text{ mA/cm}^2$ ve c) $J=7 \text{ mA/cm}^2$ için C-V_G karakteristikleri.



Şekil 3.14. Tavlamadan sonra, pH=7 'de, a) $J=3$ mA/cm², b) $J=5$ mA/cm² ve c) $J=7$ mA/cm² için C-V_G karakteristikleri.



Şekil 3.15. Tavlamadan sonra, pH=8 'de, a) $J=3$ mA/cm², b) $J=5$ mA/cm² ve c) $J=7$ mA/cm² için C-V_G karakteristikleri.

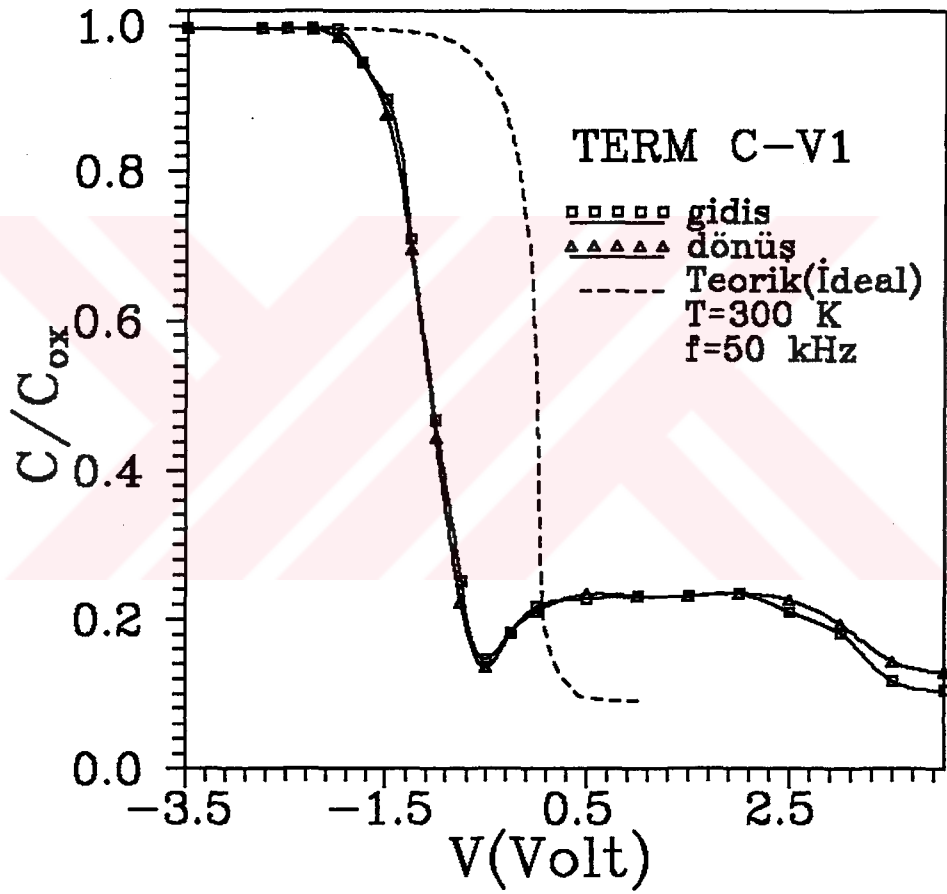
Tavlanmış numunelerin $C-V_G$ karakteristikleri şekil (3.12), (3.13), (3.14) ve (3.15) 'de gösterilmektedir. Oksit kapasiteleri dikkate alınarak ideal $C-V_G$ eğrileri elde edildi ve deneysel $C-V_G$ eğrileri, ideal $C-V_G$ eğrilerinin soluna doğru kaydığı görüldü. Daha önce de belirtildiği gibi bunun sebebi oksit içerisindeki sabit pozitif yüküdür (Nicollian ve Brews, 1982). Deneysel $C-V_G$ eğrileri ile ideal $C-V_G$ eğrileri arasındaki bu kaymadan yararlanarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , Si-SiO₂ arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu ΔQ_{ss} , (2.11), (2.12) ve (2.13) denklemleri yardımıyla hesaplanarak Tablo 3.2 b 'de verildi. Aynı zamanda düz bant gerilim kaymasını ve histeresinin maksimum olduğu durumdaki gerilim kaymasını kullanarak, ΔQ_{HlsFB} ve ΔQ_{HlsMAX} değerleri hesaplanıp Tablo 3.2 b 'de verildi. Hesaplanan bu değerlerin, tavlanmamış numunelere göre belirli oranda azalma gösterdiği gözlemlendi.

Tavlanmış TA7pH5N2, TA7pH6N1, TA3pH8N2 ve TA7pH8N3 numunelerinin $C-V_G$ karakteristiklerinde histeresis iyonik karakterli, TA5pH5N2, TA5pH6N1, TA3pH7N4, TA5pH7N1, TA7pH7N4 ve TA5pH8N3 numunelerinin $C-V_G$ karakteristiklerindeki histeresis ise elektronik karakterlidir. Yine TA3pH5N1 numunesinde histeresis, -0,2 Volt 'dan -1,23 Volt 'a kadar elektronik, -1,23 Volt 'dan -1,96 Volt 'a kadar ise iyoniktir. TA3pH6N2 numunesinde histeresis, -0,6 Volt 'dan -1,68 Volt 'a kadar elektronik, -1,68 Volt 'dan -2,6 Volt 'a kadar ise iyoniktir. Bu iki numunede her iki histeresis tipi de gözlemlenmiştir.

3.5. Al / Termal SiO₂ / Si MOS Yapısının $C-V_G$ Karakteristiği

TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Kuantum Elektronik Laboratuvarından (KUEL) temin edilen ve anodik oksidasyonda kullanılan silisyumla aynı özelliklere (taşıyıcı yoğunluğu, doğrultu, tip ve kalınlık) sahip olan, yaklaşık 500 Å kalınlığında termal oksitlenmiş silisyum, bölüm 3.3'te anlatılan yöntemle alüminyum kaplanarak Al / Termal SiO₂ / Si MOS yapısı oluşturuldu. Bu yapının $C-V_G$ ölçümü de, şekil (3.7) 'de blok diyagramı verilen sistem yardımıyla, T=300 K ve f=50 kHz 'de alındı. Termal MOS 'un $C-V_G$ karakteristiği şekil (3.16) 'da görülmektedir. Bu eğriye dikkat ettiğimizde, yine ideal $C-V_G$ eğrisine göre, deneysel $C-V_G$ eğrisi sola doğru kaymıştır ve deneysel $C-V_G$ eğrisinde gidiş-dönüş arasında elektronik histeresis görülmektedir.

Daha önce de izah edildiği gibi ideal eğriye göre deneysel eğrinin sola kayması, oksit içerisinde sabit pozitif yükün varlığına işaret eder. Önceki hesaplamalarda olduğu gibi, ΔQ_{ox} , ΔQ_{eff} , ΔQ_{ss} , ΔQ_{HfsFB} ve ΔQ_{HfsMAX} değerleri hesaplanarak Tablo 3.2 a 'da verildi.



Şekil 3.16. Al/Termal SiO₂/Si MOS yapısının C-V_G karakteristiği.

Tablo 3.1.a Tavlama Önce Elde Edilen Gerilim Kayma Değerleri ve Diğer Parametreler

pH	J (mA/cm ²)	Oksidasyon Süresi(dk)	d _{ox} (Å)	C _{ox} (pF)	Histeresis Tipi	ΔV _{MG} (V)	ΔV _{FB} (V)	ΔV _(HISmax) (V)	ΔV _(HISFB) (V)
5	3	23	1000	710	İyonik	1,00	1,49	0,09	0,06
	5	15	1500	530	İyonik	1,20	1,57	0,38	0,38
	7	15	1500	501	İyonik	0,98	1,53	0,27	0,23
6	3	25	1500	473	İyonik	1,03	1,95	0,08	0,07
	5	18	1200	590	Elekt-İyonik	1,06	1,75	0,06	0,03
	7	20	3000	293	Elektronik	0,81	1,46	0,12	0,08
7	3	23	1200	601	İyonik	0,94	1,77	0,25	0,19
	5	22	2500	350	Elektronik	0,81	1,58	0,34	0,30
	7	18	2200	430	Elektronik	0,69	0,98	0,75	0,71
8	3	24	1200	650	Elektronik	0,93	1,42	0,05	0,04
	5	19	2200	397	Elektronik	0,81	1,60	0,13	0,06
	7	14	2500	352	Elektronik	0,78	1,59	0,31	0,25
Termal MOS-1		-	500	762	Elektronik	0,71	1,03	0,05	0,03

Tablo 3.1b Tavlamadan Sonra Elde Edilen Gerilim Kayma Değerleri

pH	J (mA/cm ²)	Oksidasyon Süresi(dk)	C ^{ox} (pF)	Histeresis Tipi	ΔV_{MG} (V)	ΔV_{FB} (V)	$\Delta V_{(HISmax)}$ (V)	$\Delta V_{(HISFB)}$ (V)
5	3	23	460	Elekt-iyonik	0,66	0,93	0,22	0,13
	5	15	190	elektronik	0,44	0,35	0,08	0,04
	7	15	182	iyonik	0,50	0,55	1,13	0,44
6	3	25	422	Elekt-iyonik	0,81	0,98	0,20	0,19
	5	18	311	elektronik	0,63	0,65	0,44	0,31
	7	20	200	iyonik	0,56	0,52	0,56	0,50
7	3	23	436	elektronik	0,44	0,20	0,21	0,16
	5	22	224	elektronik	0,56	0,46	0,10	0,06
	7	18	255	elektronik	0,50	0,18	0,64	0,56
8	3	24	421	iyonik	0,81	0,41	0,25	0,13
	5	19	315	elektronik	0,53	0,39	0,13	0,07
	7	14	222	iyonik	0,56	1,52	0,13	0,11

3.6. İdeal MOS Yapısının C-V_G Eğrisi

İdeal MOS eğrisi değişik araştırmacılar tarafından benzer şekilde elde edilmektedir(Goetzberger, et al., 1976; Brown ve Gray, 1968; Blakemore, 1962; Seiwatz ve Green, 1958).

İdeal MOS yapısının C-V_G eğrisini çizebilmek için, ideal MOS yapısının eşdeğer devresinde (şekil 2.3) görüldüğü gibi uzay yükü kapasitesini (C_{sc}) bulmamız gerekir.Böylece uzay yükü bölgesi için,

$$\frac{d^2\Psi'}{dx^2} = -\frac{\rho(\Psi')}{\epsilon_s} \quad (3.7)$$

Poisson denklemi çözülmelidir. Uzay yükü bölgesinde yük yoğunluğu,

$$\rho = \rho_D + \rho_A + q(p - n) \quad (3.8)$$

denklemleriyle verilir. Burada ρ_D iyonlaşmış donör, ρ_A iyonlaşmış akseptör, p hol ve n elektron yoğunluklarıdır. Elektron hol yoğunlukları ise,

$$n = 2 \int_{E_c}^{\infty} D_c(E) f(E) dE \quad (3.9)$$

$$p = 2 \int_{-\infty}^{E_v} D_v(E) [1 - f(E)] dE \quad (3.10)$$

bağıntılarıyla verilirler. Burada $f(E)$ Fermi fonksiyonu olup aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \quad (3.11)$$

$D_c(E)$ ve $D_v(E)$ ise şöyledir:

$$D_c(E) = 2\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (3.12)$$

$$D_v(E) = 2\pi \left(\frac{2m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (3.13)$$

Buradaki m_n^* ve m_p^* sırasıyla elektron ve hol etkin kütleleridir. (3.11), (3.12) ve (3.13) denklemlerini (3.9) ve (3.10) denklemlerinde yerine yazarsak, elektron ve hol yoğunlukları;

$$n = 4\pi \left(\frac{2m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right) \quad (3.14)$$

$$p = 4\pi \left(\frac{2m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} F_{1/2} (E_v - E_F) \quad (3.15)$$

olarak bulunur. (3.14) ve (3.15) denklemleri $A_c = 4\pi \left[(2m_n^* k) / h^2 \right]^{3/2}$,

$A_v = 4\pi \left[(2m_p^* k) / h^2 \right]^{3/2}$ kısaltmaları yapılarak yeniden düzenlenirse,

$$n = A_c T^{3/2} F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right) \quad (3.16)$$

$$p = A_v T^{3/2} F_{1/2} \left(\frac{E_v - E_F}{kT} \right) \quad (3.17)$$

bulunur. İyonlaşmış akseptör N_A^- ve iyonlaşmış donör N_D^+ yoğunlukları;

$$N_A^- = \frac{N_A}{\left[1 + 2 \exp \left(\frac{E_A - E_F}{kT} \right) \right]} \quad (3.18)$$

$$N_D^+ = \frac{N_D}{\left[1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_D}{kT}\right)\right]} \quad (3.19)$$

bağıntılarıyla verilir. Elektron, hol, iyonlaşmış donör ve akseptör yoğunlukları (3.8) denkleminde yerine konursa;

$$\rho = \frac{qN_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_D}{kT}\right)} - \frac{qN_A}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right)} + qA_v T^{3/2} F_{1/2}(E_D - E_F - E_G) - qA_c T^{3/2} F_{1/2}(E_F - E_D) \quad (3.20)$$

denklemi elde edilir. p-tipi bir yarıiletken için $-q\Psi' = E_c(x) - E_F = E_c - E_F - q\Psi(x)$ yazılabilir ve bu durumda Poisson denklemi;

$$\frac{d^2\Psi'}{dx^2} = -\frac{\rho(\Psi')}{\epsilon_s} \quad (3.21)$$

olur. $E = -\frac{d\Psi'}{dx}$ ve $\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{d\Psi} \frac{d\Psi}{dx} = -E \frac{dE}{d\Psi} = -\frac{d}{d\Psi} \left(\frac{E^2}{2}\right)$ kullanılarak poisson denkleminin integrali alınır aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$E_s^2 = \frac{2kT}{\epsilon_s} \left\{ N_A \ln \left[\frac{1 + g_A \exp\left(\frac{q\Phi_s - E_A}{kT}\right)}{1 + g_A \exp\left(\frac{E_F - E_A}{kT}\right)} \right] + N_D \ln \left[\frac{g_D + \exp\left(\frac{E_G - E_D - q\Phi_s}{kT}\right)}{g_D + \exp\left(\frac{E_G - E_D - E_F}{kT}\right)} \right] + A_c T^{3/2} \left[F_{3/2}\left(\frac{q\Phi_s - E_G}{kT}\right) - F_{3/2}\left(\frac{E_F - E_G}{kT}\right) \right] + A_v T^{3/2} \left[F_{3/2}\left(-\frac{q\Phi_s}{kT}\right) - F_{3/2}\left(-\frac{E_F}{kT}\right) \right] \right\} \quad (3.22)$$

$$C_{sc} = \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ \frac{N_A}{1 + \frac{1}{g_A} \exp\left(-\frac{q\Phi_s + E_A}{kT}\right)} - \frac{N_D}{1 + g_D \exp\left(\frac{q\Phi_s - E_G + E_D}{kT}\right)} + A_c T^{3/2} F_{1/2}\left(\frac{q\Phi_s - E_G}{kT}\right) - A_v T^{3/2} F_{1/2}\left(-\frac{q\Phi_s}{kT}\right) \right\} \quad (3.23)$$

Denklem (3.22) ve (3.23) biraz daha düzenlenir ve p-tipi silisyum için $N_A^- \gg N_D^+$ şartı gözönüne alınırsa

$$E_s^2 = \frac{2kT}{\epsilon_s} \left\{ N_A \ln \left[\frac{1 + g_A \exp\left(\frac{q\Psi_s + E_F - E_A}{kT}\right)}{1 + g_A \exp\left(\frac{E_F - E_A}{kT}\right)} \right] + A_c T^{3/2} \left[F_{3/2}\left(\frac{q\Psi_s + E_F - E_G}{kT}\right) - F_{3/2}\left(\frac{E_F - E_G}{kT}\right) \right] + A_v T^{3/2} \left[F_{3/2}\left(-\frac{q\Psi_s - E_F}{kT}\right) - F_{3/2}\left(-\frac{E_F}{kT}\right) \right] \right\} \quad (3.24)$$

$$C_{sc} = \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ \frac{N_A}{1 + \frac{1}{g_A} \exp\left(\frac{-q\Psi_s - E_F + E_A}{kT}\right)} + A_c T^{3/2} F_{1/2}\left(\frac{q\Psi_s + E_F - E_G}{kT}\right) - A_v T^{3/2} F_{1/2}\left(\frac{-q\Psi_s - E_F}{kT}\right) \right\} \quad (3.25)$$

eşitlikleri elde edilir. Yukarıdaki denklemlerde E_s arayüzeyde elektriksel alan, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A_c iletkenlik bandında etkin hal yoğunluğu, A_v değerlik bandında etkin hal yoğunluğu, g_D ve g_A donör ve akseptörler için spin faktörüdür. Silisyum için $g_A=1/4$ ve $g_D=2$ 'dir(Goetzberger et al., 1976). $F_{1/2}$ ve $F_{3/2}$ Fermi-Dirac fonksiyonlarıdır. Fermi-Dirac integralleri değişik aralıklarda farklı formüllerle bulunur(Blakemore, 1962 ; Seiwatz ve Green, 1958).

Yukarıdaki eşitliklerden E_s ve C_{sc} değerleri elde edildikten sonra, teorik kapasite ve teorik gerilim değerleri şu eşitliklerle bulunur;

$$C_{(Ideal)} = \frac{C_{ox}}{1 + \frac{C_{ox}}{C_{sc}C_{ox}}} \quad (3.26)$$

$$V_{G(Ideal)} = \frac{Q_s}{C_{ox}} + \Psi_s \quad (3.27)$$

(3.27) denklemindeki Q_s değeri, $Q_s = \epsilon_s E_s$ 'den bulunur. Bu bağıntılardan bulunan $C_{(Ideal)}$ ve $V_{G(Ideal)}$ değerleri arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilirse C- V_G eğrisi elde edilir.

3.7. Arayüzey Hal Yoğunluğunun Hesaplanması

Arayüzey hal yoğunluğu Terman (1962) metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama işlemi yapılırken sadece yığılım ve tükenim bölgeleri dikkate alınır. Çünkü, yüksek-frekans C- V_G eğrilerinde tersinim bölgesinde herhangi bir değişme gözlenemez. Arayüzey hal yoğunluğunun hesaplanmasında şu sıra takip edilir:

- 1) Uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak deneysel C- V_G eğrisi çizilir.
- 2) Deneysel C- V_G eğrisinden, C²- V_G eğrisi çizilir ve bu eğrinin doğru kısmının eğiminden ve $N_A = 2/q\epsilon[dC^2/dV_G]$ denkleminde yararlanarak yarıiletkenin katkı

yoğunluğu bulunur (Sze, 1981). Bulunan katkı yoğunluğundan yararlanarak silisyumun öz direnci hesaplanır.

3) Deneysel $C-V_G$ eğrisinden faydalanarak oksit kapasitesi (C_{ox}) ve oksit kalınlığı (d_{ox}) hesaplanır.

4) N_A , C_{ox} , d_{ox} ve C_{sc} değerleri (oda sıcaklığında) yukarıda verilen gerekli formüllerde yerlerine konular ve yüzey potansiyeli Ψ_s 'nin fonksiyonu olarak ideal kapasite-gerilim ($C-V_G$) eğrisi elde edilir.

5) Deneysel $C-V_G$ eğrisi ile ideal $C-V_G$ eğrisi aynı grafikte çizilir. Her bir deneysel nokta için, aynı kapasiteye sahip deneysel nokta ile ideal nokta arasındaki ΔV_G gerilim kayması bulunur (aynı kapasite, aynı Ψ_s demektir). ΔV_G 'den yararlanarak Q_{ss} yüzey yükü hesaplanır.

6) Ψ_s ve Q_{ss} değerleri kullanılarak ve $N_{ss}=(dQ_{ss}/d\Psi_s)/q$ (tuzak sayısı/cm² eV) bağıntısından yararlanarak arayüzey hal yoğunluğu hesaplanır.

7) Silisyumun yasak enerji bant aralığına karşı N_{ss} arayüzey hal yoğunluğu çizilir.

Yukarıdaki işlemler sırasıyla takip edilerek arayüzey hal yoğunluğu hesaplanıp, silisyumun yasak enerji bant aralığına göre grafikleri çizildi ve bu grafikler şekil (3.17 a), (3.18 a), (3.19 a), (3.20 a), (3.21 a), (3.22 a) ve (3.23 a) 'da verildi. Ayrıca numuneler tavlandıktan sonra $C-V_G$ ölçümleri alındı ve bu $C-V_G$ karakteristiklerinden yararlanarak tekrar arayüzey hal yoğunluğu hesaplandı ve silisyumun yasak enerji bant aralığına göre grafikleri çizildi. Bu grafikler de şekil (3.17 b), (3.18 b), (3.19 b), (3.20 b), (3.21 b), (3.22 b) ve (3.23 b) 'de verildi. Bu grafikler pH değerlerine ve akım yoğunluğu değerlerine göre gruplandırıldı.

Yine Al/Termal SiO₂/Si MOS 'un $C-V_G$ karakteristiğinden yararlanarak arayüzey hal yoğunluğu silisyumun yasak enerji bant aralığına göre hesaplandı ve grafiği çizilerek şekil (3.24) 'de verildi.

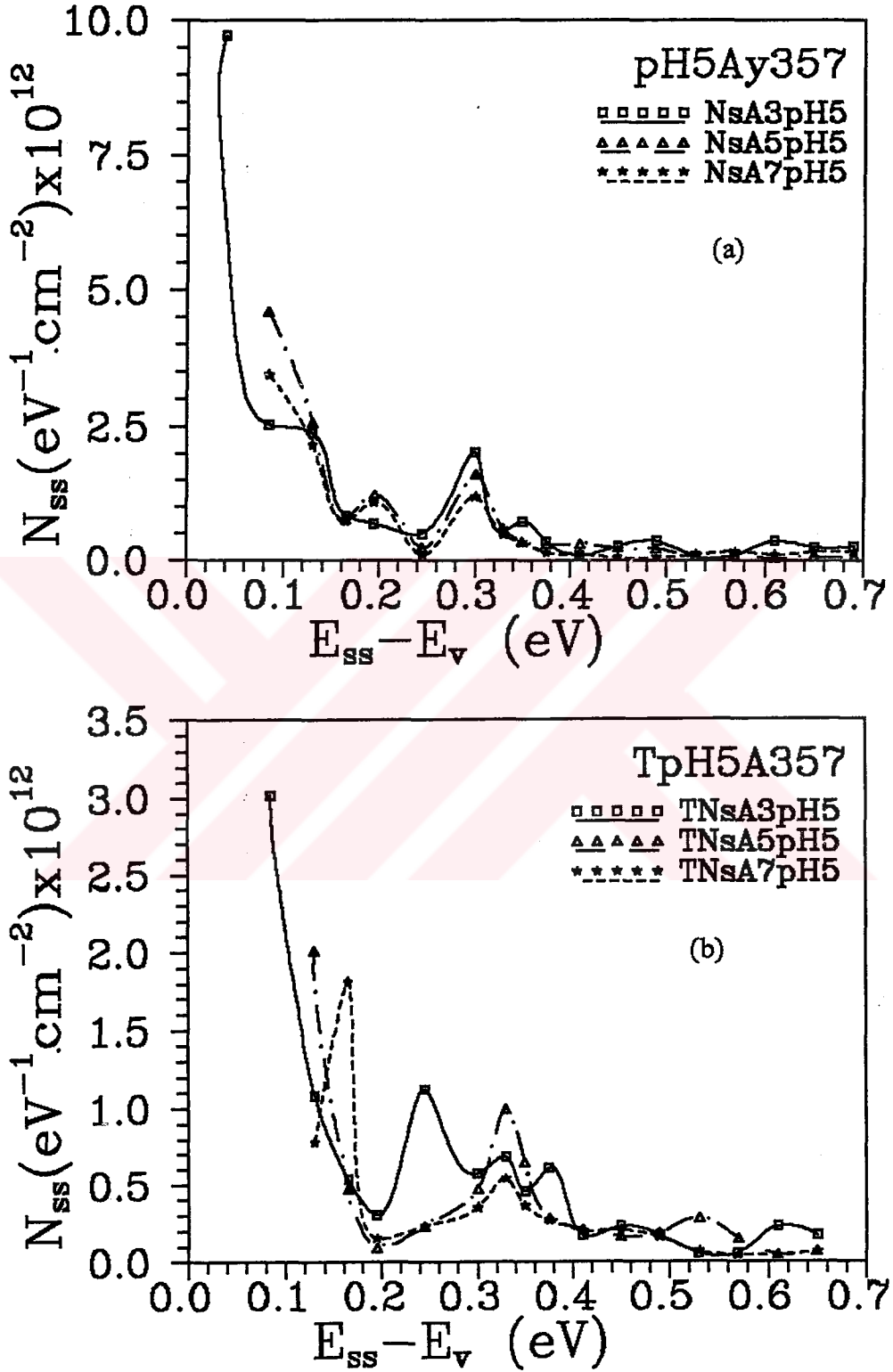
3.7.1. Herbir pH 'a Karşılık Üç Farklı Akım Yoğunluğunda Çizilen Arayüzey Hal Enerji Dağılım Eğrileri

a) pH=5 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamadan Önce:

Yukarıda şekil (3.17) 'den şekil (3.23) 'e kadar verilen grafikleri dikkate alalım. Şekil (3.17 a) 'da, NsA3pH5 (pH=5, J=3 mA/cm²) numunesinin arayüzey hal yoğunluk dağılımı grafiğine baktığımızda 0,04 eV konumunda $9,719 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² değerinde, NsA5pH5 ve NsA7pH5 numunelerinde ise 0.085 eV konumunda sırasıyla $4,6 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² ve $3,444 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² 'lik maksimum arayüzey hal yoğunluğu bulunmaktadır. Burada her üç grafikte de 0.30 eV konumunda pik bulunmaktadır ve bu piklerin değeri, NsA3pH5 için $2,03 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻², NsA5pH5 için $1,61 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² ve NsA7pH5 için $1,195 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² 'dir. Ayrıca NsA5pH5 ve NsA7pH5 grafiklerinde 0,195 eV konumunda sırasıyla $1,23 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻², $1,1 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² değerlerinde pik bulunmaktadır. Yine bu numunelerde bant ortasındaki arayüzey hal yoğunluk ($N_{ss,mid}$) değerleri sırasıyla, NsA3pH5 için $9,38 \times 10^{10}$ eV⁻¹.cm⁻², NsA5pH5 için $6,25 \times 10^{10}$ eV⁻¹.cm⁻² ve NsA7pH5 için $1,641 \times 10^{11}$ eV⁻¹.cm⁻² dir (0.56 eV konumunda).

a') pH=5 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamadan Sonra:

Şekil (3.17 b) 'deki TpH5A357 (Tavlanmış, pH=5, J=3,5 ve 7 mA/cm²) grafiklerini dikkate alalım. Maksimum arayüzey hal yoğunluğu, TNsA3pH5 numunesinde 0,085 eV konumunda $3,021 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻², TNsA5pH5 numunesinde 0,13 eV konumunda $2,009 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² ve TNsA7pH5 numunesinde ise 0,165 eV konumunda $1,813 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² değerindedir. Bu üç numunede de 0,33 eV konumunda pik bulunmaktadır. Bu piklerin değeri sırasıyla, TNsA3pH5 için $6,844 \times 10^{11}$ eV⁻¹.cm⁻² , TNsA5pH5 için $1,05 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² ve TNsA7pH5 için ise $5,46 \times 10^{11}$ eV⁻¹.cm⁻² dir. Ayrıca TNsA3pH5 numunesinde biri 0,245 eV konumunda $1,125 \times 10^{12}$ eV⁻¹.cm⁻² değerinde, diğeri 0,375 eV konumunda $6,104 \times 10^{11}$ eV⁻¹.cm⁻² değerinde olmak üzere iki pik daha bulunmaktadır. Bu grafiklerde N_{ssmid} değerleri ise sırasıyla, TNsA3pH5 için $5,63 \times 10^{10}$ eV⁻¹.cm⁻², NsA5pH5 için $1,516 \times 10^{11}$ eV⁻¹.cm⁻² ve TNsA7H5 için $4,53 \times 10^{10}$ eV⁻¹.cm⁻² dir.



Şekil 3.17. pH=5 'de, $J=3;5$ ve 7 mA/cm^2 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,
a) Tavlamadan önce , b) Tavlamadan sonra.

b) pH=6 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamadan Önce:

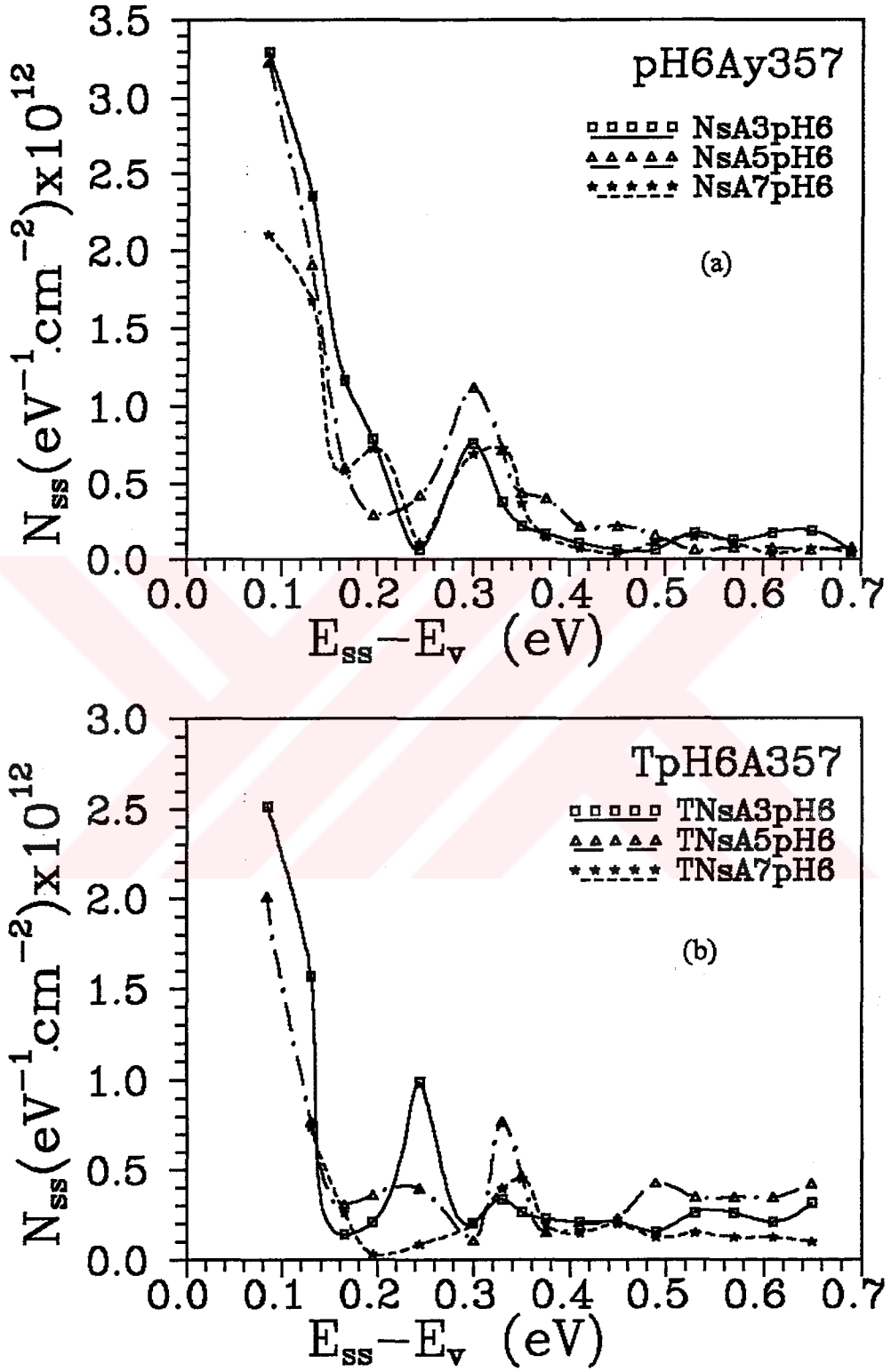
Şekil (3.18 a) 'da verilen pH6Ay357 grafiklerinde, maksimum arayüzey hal yoğunlukları 0,085 eV konumunda bulunmakta ve NsA3pH6 için $3,295 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, NsA5pH6 için $3,225 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve NsA7pH6 için ise $2,1 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerindedir. Bu numunelerden NsA3pH6 ve NsA5pH6 'da 0,30 eV konumunda sırasıyla $7,66 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve $1,15 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerlerinde pikler bulunmaktadır. NsA7pH6 numunesinde ise 0,325 eV 'ta $7,313 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde pik görülmektedir. Bu grafiklerde N_{ssmid} değerleri sırasıyla, NsA3pH6 için $1,25 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, NsA5pH6 için $7,81 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve NsA7pH6 için ise $1,094 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

b') pH=6 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamadan Sonra:

Şekil (3.18 b) 'deki TpH6A357 grafiklerinde, maksimum arayüzey hal yoğunluğu, TNsA3pH6 ve TNsA5pH6 grafiklerinde 0,085 eV konumunda bulunmaktadır ve değerleri sırasıyla $2,52 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $2,013 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir. TNsA7pH6 numunesinde maksimum arayüzey hal yoğunluğu $7,469 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde olup 0,13 eV konumunda bulunmaktadır. TNsA3pH6 ve TNsA5pH6 grafiklerinde 0,245 eV, 0,33 eV konumlarında ikişer pik bulunmaktadır. Bu piklerin değerleri TNsA3pH6 için sırasıyla, $9,90 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve $3,38 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir. TNsA5pH6 grafiğinde ise sırasıyla $3,982 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve $7,75 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerlerindedir. TNsA7pH6 grafiğinde de 0,35 eV konumunda $4,5 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde bir pik bulunmaktadır. Yine bu grafiklerde N_{ssmid} değerleri sırasıyla, TNsA3pH6 için $2,625 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, TNsA5pH6 için $3,484 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve TNsA7pH6 için ise $1,25 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

c) pH=7 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamadan Önce:

Şekil (3.19 a) 'daki pH7Ay357 grafiklerinde, maksimum arayüzey hal yoğunluğu, NsA3pH7 grafiğinde 0,04 eV konumunda $5,973 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde, NsA5pH7 ve NsA7pH7 grafiklerinde ise 0,085 eV konumlarında ve sırasıyla değerleri $8,703 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $1,413 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir. Burada üç grafikte de 0,30 eV konumunda pikler bulunmaktadır ve bu piklerin değerleri sırasıyla NsA3pH7 için



Şekil 3.18. pH=6 'da, $J=3; 5$ ve 7 mA/cm^2 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,
 a) Tavlamadan önce , b) Tavlamadan sonra.

$1,73 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, NsA5pH7 için $8,703 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve NsA7pH7 için ise $1,605 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir. Bu grafiklerde N_{ssmid} değerleri ise NsA3pH7 için $2,344 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, NsA5pH7 için $4,375 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve NsA7pH7 için ise $1,078 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

c') pH=7 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamaadan Sonra:

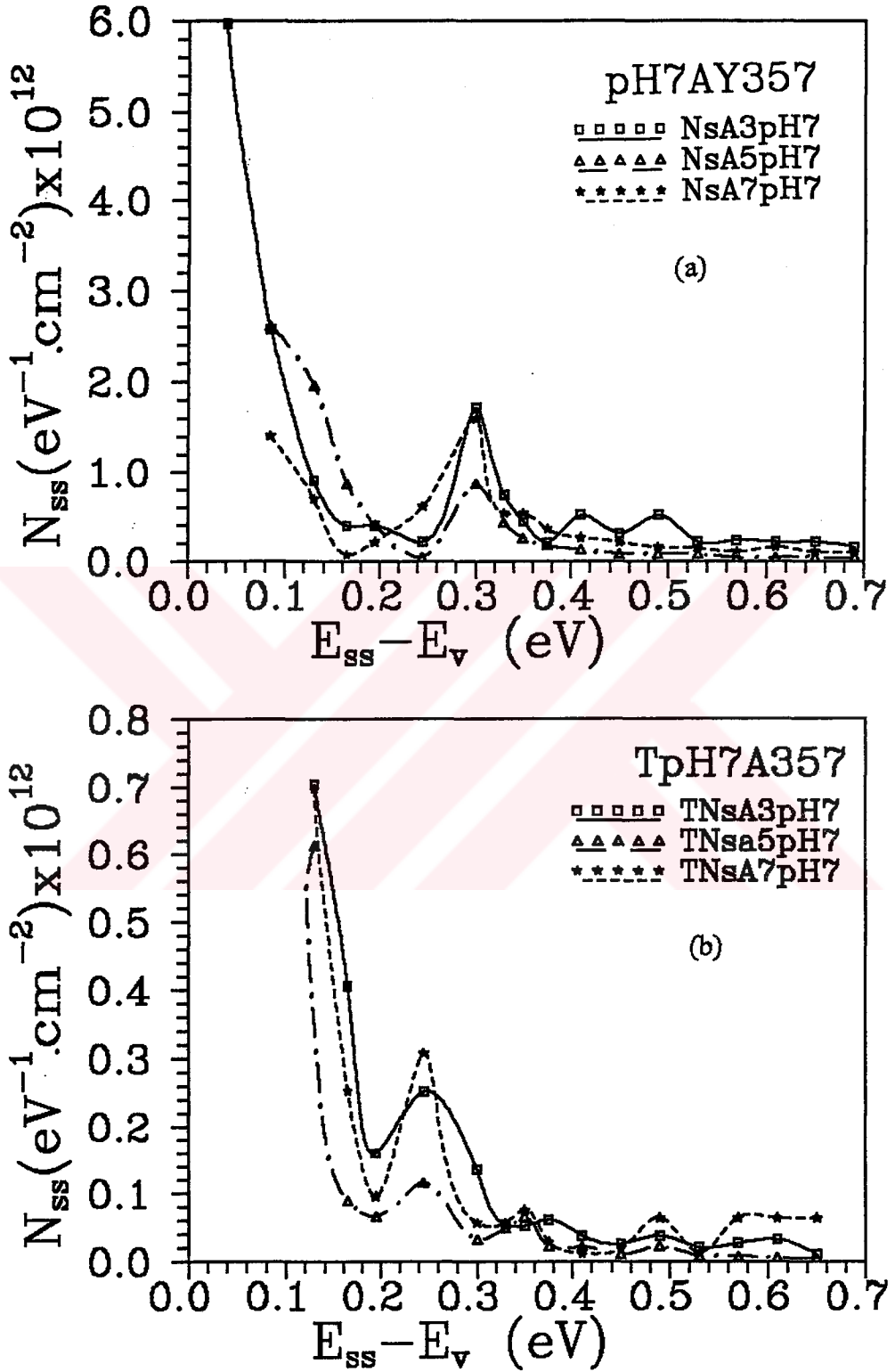
Şekil (3.19 b) 'deki TpH7A357 grafiklerinde, maksimum arayüzey hal yoğunlukları 0,13 eV konumunda bulunmaktadır ve TNsA3pH7 için $7,047 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, TNsA5pH7 için $6,126 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve TNsA7pH7 için ise $6,984 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerindedir. Yine 0,245 eV konumunda üç grafikte de pik mevcuttur ve bu piklerin değerleri sırasıyla, TNsA3pH7 için $2,53 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, TNsA5pH7 için $1,163 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve TNsA7pH7 için ise $3,08 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir. Burada da N_{ssmid} değerleri sırasıyla, TNsA3pH7 için $2,719 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, TNsA5pH7 için $0,844 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve TNsA7pH7 için ise $0,641 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

d) pH=8 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamaadan Önce:

pH8Ay357 grafiklerinde (şekil 3.20 a), maksimum arayüzey hal yoğunluğu, NsA3pH8 için, 0,04 eV konumunda bulunmakta ve $3,527 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerini almaktadır. NsA5pH8 ve NsA7pH8 grafiklerinde ise 0,085 eV konumunda bulunmakta ve $2,766 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $2,803 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerlerini almaktadır. NsA3pH8 grafiğinde 0,22 eV, 0,352 eV ve 0,42 eV konumlarında sırasıyla, $8,1 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $5,656 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve $6,359 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerlerinde üç pik bulunmaktadır. NsA5pH8 grafiğinde 0,195 eV, 0,30 eV ve 0,373 eV konumlarında sırasıyla, $7,896 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $3,453 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve $1,185 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerlerinde üç pik ortaya çıkmaktadır. NsA7pH8 grafiğinde ise 0,332 eV konumunda $8,75 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde pik bulunmaktadır. N_{ssmid} değerleri, NsA3pH8 için $2,813 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, NsA5pH8 için $9,80 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve NsA7pH8 için ise $4,375 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

d') pH=8 (J=3;5 ve 7 mA/cm²), Tavlamaadan Sonra:

Şekil (3.20 b) 'deki TpH8A357 grafiklerinde, maksimum arayüzey hal yoğunluğu, TNsA3pH8 için, 0,085 eV konumunda $3,142 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, TNsA5pH8 için, 0,13



Şekil 3.19. pH=7 'de, $J=3; 5$ ve 7 mA/cm^2 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,
a) Tavlamadan önce, b) Tavlamadan sonra.

eV konumunda $2,411 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve TNsA7pH8 için ise 0,165 eV konumunda $2,871 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerindedir. Yine TNsA3pH8 grafiğinde 0,245 eV konumunda $9,083 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde bir pik bulunmaktadır. TNsA5pH8 grafiğinde 0,30 eV konumunda $8,625 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde pik vardır, TNsA7pH8 grafiğinde ise, 0,35 eV konumunda $4,438 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde pik bulunmaktadır. Bu grafiklerde N_{ssmid} değerleri sırasıyla, TNsA3pH8 için $6,81 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, TNsA5pH8 için $4,313 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve TNsA7pH8 için ise $1,922 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ dir.

3.7.2. Herbir Akım Yoğunluğuna Karşı Dört Farklı pH Değerleri İçin Çizilen Arayüzey Hal Enerji Dağılım Eğrileri

a) $J=3 \text{ mA/cm}^2$ (pH=5;6;7 ve 8), Tavlamadan Önce:

Şekil (3.21 a) 'daki A3pH5678 (Akım yoğunluğu 3 mA/cm^2 , pH=5,6,7 ve 8) grafikleri dikkate alındığında, pH=8 hariç, diğer pH 'larda 0,30 eV konumunda farklı büyüklükte pikler gözlenmiştir, pH=8 için ise pik sola kaymıştır.

a') $J=3 \text{ mA/cm}^2$ (pH=5;6;7 ve 8), Tavlamadan Sonra:

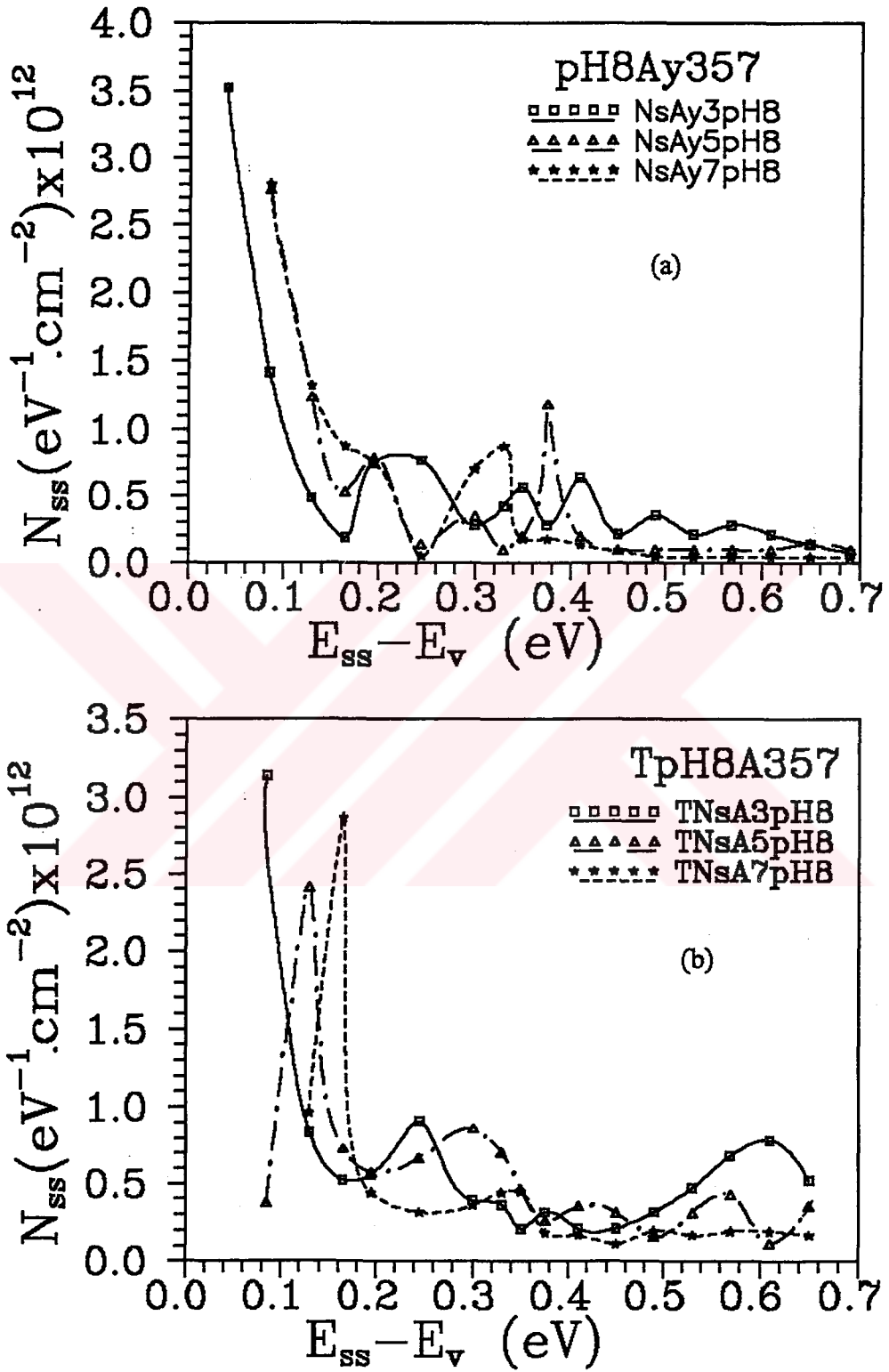
Şekil (3.21 b) 'deki TA3pH5678 (Tavlanmış, Akım yoğunluğu 3 mA/cm^2 , pH=5,6,7 ve 8) grafiklerini gözönüne aldığımızda, maksimum arayüzey hal yoğunluğu, pH=5, pH=6 ve pH=8 için 0,085 eV değerine karşılık gelmekte, pH=7 için ise, 0,13 eV değerinde bulunmaktadır. Ayrıca 0,245 eV 'ta, bütün pH 'lar için farklı değere sahip pikler bulunmaktadır.

b) $J=5 \text{ mA/cm}^2$ (pH=5;6;7 ve 8), Tavlamadan Önce:

Şekil (3.22 a) 'daki A5pH5678 grafiklerinde, bütün pH 'lar için maksimum arayüzey hal yoğunluklarının aynı enerjiye (0,085 eV) karşılık geldiği görülmekte ve yine bütün pH 'larda 0,30 eV 'ta farklı büyüklükte pikler gözlenmektedir.

b') $J=5 \text{ mA/cm}^2$ (pH=5;6;7 ve 8), Tavlamadan Sonra:

Şekil (3.22 b) 'deki TA5pH5678 grafiklerinde ise, maksimum arayüzey hal yoğunluğu, pH=5, pH=7 ve pH=8 için, 0,13 eV 'a karşılık gelmekte ve pH=6 için ise, 0,085 eV 'da



Şekil 3.20. pH=8 'de, $J=3; 5$ ve 7 mA/cm^2 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,
a) Tavlamadan önce, b) Tavlamadan sonra.

bulunmaktadır. Yine pH=5 ve pH=6 'da 0,33 eV 'da pik görülmekte, diğer pH 'larda ise pikler sola kaymaktadır.

c) $J=7 \text{ mA/cm}^2$ (pH=5;6;7 ve 8), Tavlamadan Önce:

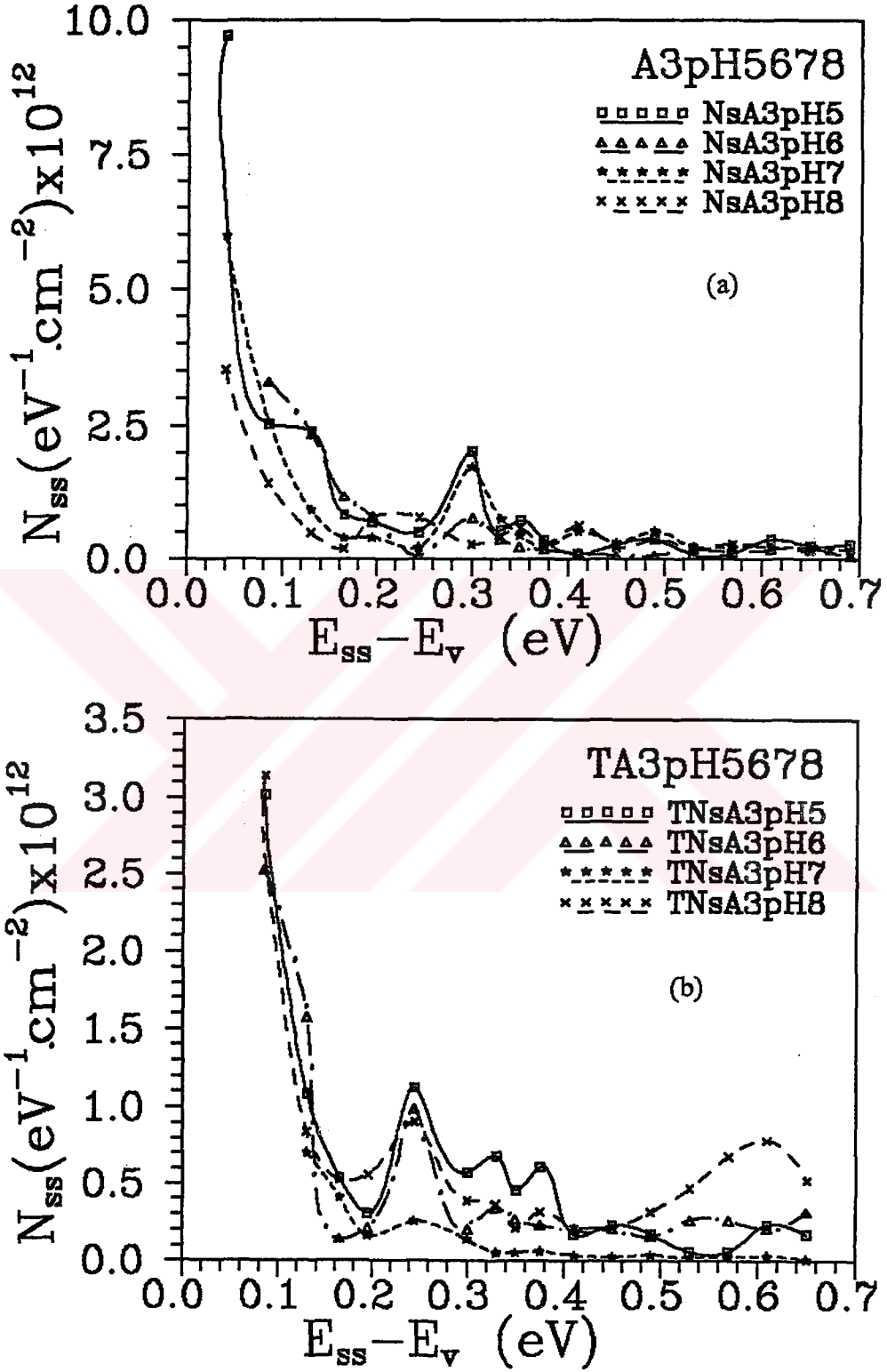
Şekil (3.23 a) 'daki A7pH5678 grafikleri incelendiğinde, bütün pH 'lar için maksimum arayüzey hal yoğunluklarının aynı enerjiye (0,085 eV) karşılık geldiği görülmekte, pH=5 ve pH=7 'de 0,30 eV 'da farklı büyüklüklerde pik gözlenmekte, pH=6 ve pH=8 'de ise pikler sağa kaymaktadır.

c') $J=7 \text{ mA/cm}^2$ (pH=5;6;7 ve 8), Tavlamadan Sonra:

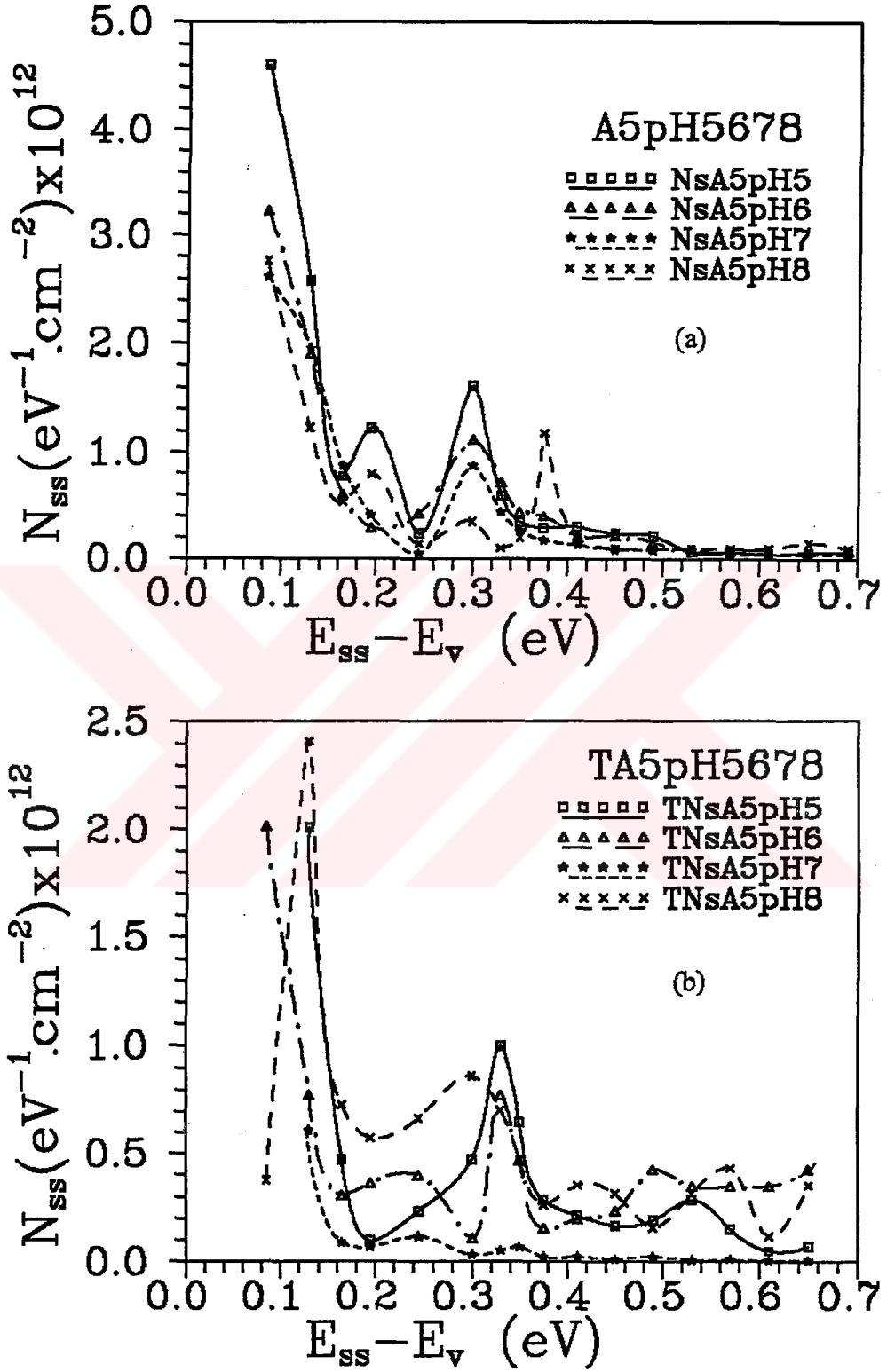
Şekil (3.23 b) 'deki TA7pH5678 grafiklerinde, maksimum arayüzey hal yoğunluğu, pH=5 ve pH=8 'de 0,165 eV 'a karşılık gelmekte, pH=6 ve pH=7 'de ise 0,13 eV 'a tekabül etmektedir. Ayrıca pH=6 ve pH=8 için 0,35 eV değerinde farklı büyüklükte pik görülmekte, pH=5 'te 0,33 eV 'da, pH=7 'de ise 0,245 eV 'da pik bulunmaktadır.

3.7.3. Termal SiO_2/Si MOS 'un Arayüzey Hal Dağılım Eğrisi

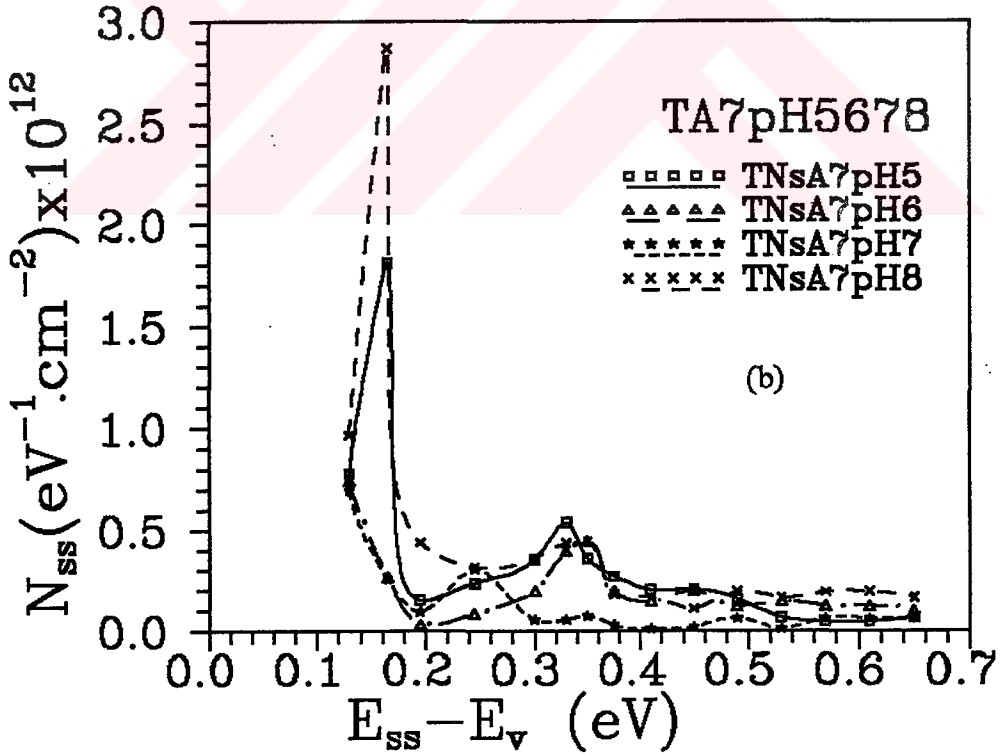
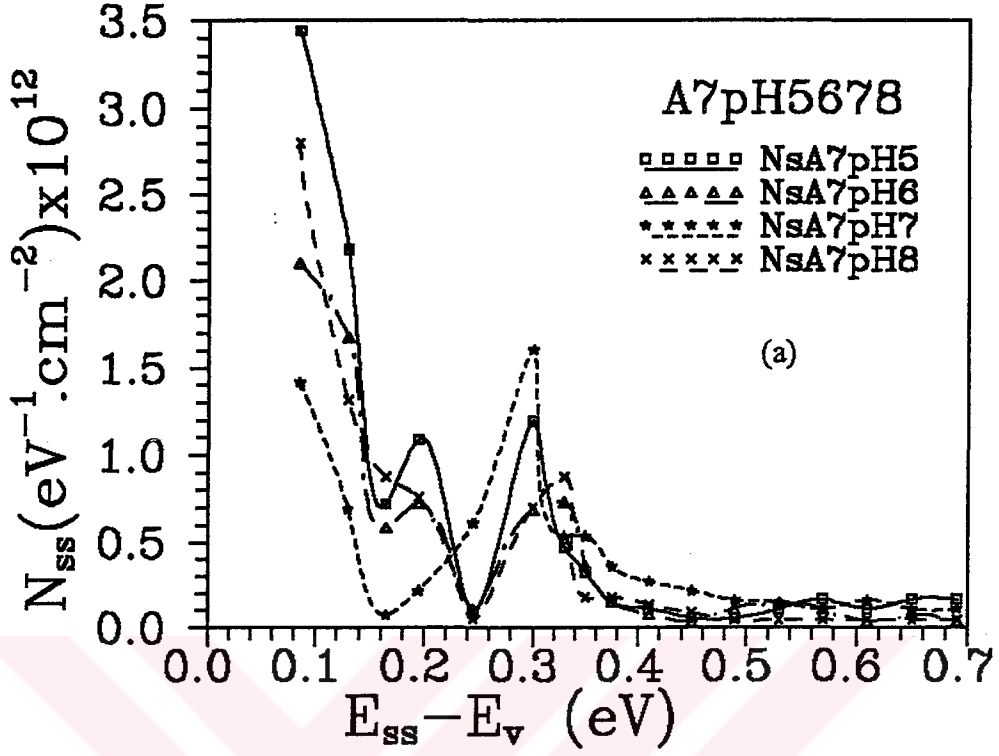
Şekil (3.24) 'de verilen Al/Termal SiO_2/Si MOS 'un arayüzey hal dağılımını gözönüne aldığımızda, 0,005 eV 'da $1,107 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde maksimum arayüzey hal yoğunluğu bulunmakta ve 0,195 eV 'a karşılık $2,696 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde pik bulunmaktadır. Termal oksitli MOS 'un maksimum arayüzey hal yoğunluğu, anodik oksitli MOS 'lara göre daha büyüktür ve konumu daha çok sola kaymıştır. Ancak biçim olarak anodik oksitli MOS 'ların arayüzey hal dağılımı ile aynıdır. Termal oksitli MOS 'da arayüzey hal dağılımının daha sola kayması ise, C- V_G eğrisindeki histeresinin daha büyük negatif voltajlara doğru kayması ile ilgilidir.



Şekil 3.21. $J=3 \text{ mA/cm}^2$ 'de, pH=5; 6; 7 ve 8 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,
a) Tavlamadan önce, b) Tavlamadan sonra.

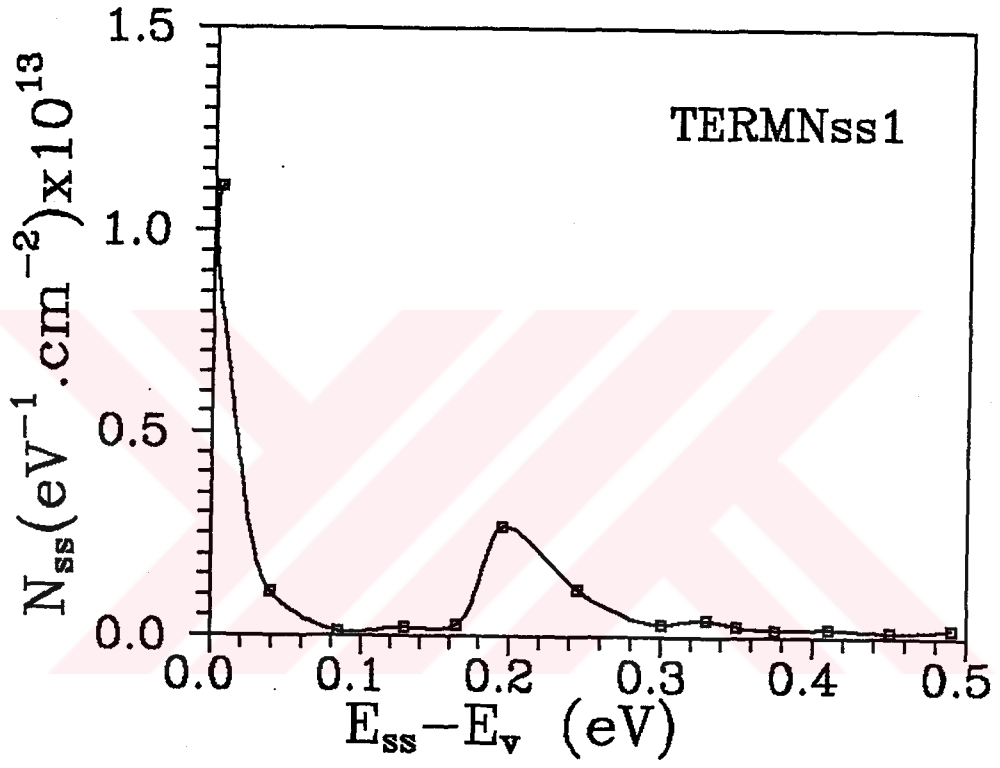


Şekil 3.22. $J=5 \text{ mA/cm}^2$ 'de, pH=5; 6; 7 ve 8 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,
 a) Tavlamadan önce, b) Tavlamadan sonra.



Şekil 3.23. $J=7 \text{ mA/cm}^2$ 'de, pH=5; 6; 7 ve 8 için arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristikleri,

a) Tavlamadan önce, b) Tavlamadan sonra.



Şekil 3.24. Al/Termal SiO_2/Si MOS yapısının arayüzey hal yoğunluk (veya enerji) dağılım karakteristiği.

Tablo 3.2 a Tavlamadan Önce Elde Edilen Yük ve Arayüzey Hal Yoğunlukları Değerleri

pH	J (mA/cm ²)	ΔQ_{HISFB} (cm ⁻²)	ΔQ_{HISmax} (cm ⁻²)	ΔQ_{eff} (cm ⁻²)	ΔQ_{ox} (cm ⁻²)	ΔQ_{ss} (cm ⁻²)	N_{ssmid} (eV ⁻¹ cm ⁻²)	N_{ssmax} (eV ⁻¹ cm ⁻²)
5	3	2,80x10 ⁸	3,9x10 ⁸	6,6x10 ⁹	4,44x10 ⁹	2,16x10 ⁹	9,38x10 ¹⁰	9,72x10 ¹²
	5	1,30x10 ⁹	1,3x10 ⁹	5,2x10 ⁹	3,98x10 ⁹	1,22x10 ⁹	6,25x10 ¹⁰	4,60x10 ¹²
	7	7,20x10 ⁸	8,5x10 ⁸	4,8x10 ⁹	3,07x10 ⁹	1,73x10 ⁹	1,64x10 ¹¹	3,44x10 ¹²
6	3	2,04x10 ⁸	2,2x10 ⁸	5,8x10 ⁹	3,05x10 ⁹	2,75x10 ⁹	1,25x10 ¹¹	3,30x10 ¹²
	5	1,10x10 ⁸	2,3x10 ⁸	6,5x10 ⁹	3,92x10 ⁹	2,58x10 ⁹	7,85x10 ¹⁰	3,23x10 ¹²
	7	1,50x10 ⁸	2,2x10 ⁸	2,7x10 ⁹	1,49x10 ⁹	1,21x10 ⁹	1,09x10 ¹¹	2,10x10 ¹²
7	3	7,10x10 ⁸	9,4x10 ⁸	6,6x10 ⁹	3,52x10 ⁹	3,08x10 ⁹	2,34x10 ¹¹	5,97x10 ¹²
	5	6,60x10 ⁸	7,5x10 ⁸	3,5x10 ⁹	1,78x10 ⁹	1,72x10 ⁹	4,38x10 ¹⁰	2,61x10 ¹²
	7	1,90x10 ⁹	2,1x10 ⁹	2,6x10 ⁹	1,85x10 ⁹	7,50x10 ⁸	1,08x10 ¹¹	1,41x10 ¹²
8	3	1,70x10 ⁸	2,2x10 ⁸	5,8x10 ⁹	3,77x10 ⁹	2,03x10 ⁹	2,81x10 ¹¹	3,53x10 ¹²
	5	1,60x10 ⁸	3,1x10 ⁸	3,9x10 ⁹	2,02x10 ⁹	1,88x10 ⁹	9,80x10 ¹⁰	2,77x10 ¹²
	7	5,50x10 ⁸	6,9x10 ⁸	3,5x10 ⁹	1,72x10 ⁹	1,78x10 ⁹	4,38x10 ¹⁰	2,80x10 ¹²
Termal MOS 1		1,43x10 ⁸	2,5x10 ⁸	4,9x10 ⁹	3,37x10 ⁹	1,53x10 ⁹	2,172x10 ¹¹	1,11x10 ¹³

Tablo 3.2 b Tavlamadan Sonra Elde Edilen Yük ve Ayrayüzey Hal Yoğunlukları Değerleri

pH	J (mA/cm ²)	ΔQ_{HlsFB} (cm ⁻²)	ΔQ_{Hlsmax} (cm ⁻²)	ΔQ_{eff} (cm ⁻²)	ΔQ_{ox} (cm ⁻²)	ΔQ_{ss} (cm ⁻²)	N_{ssmid} (eV ⁻¹ cm ⁻²)	N_{ssmax} (eV ⁻¹ cm ⁻²)
5	3	3,70x10 ⁸	6,30x10 ⁸	2,70x10 ⁹	1,89x10 ⁹	8,10x10 ⁸	5,63x10 ¹⁰	3,02x10 ¹²
	5	5,20x10 ⁷	9,50x10 ⁷	4,20x10 ⁸	5,20x10 ⁸	1,00x10 ⁸	1,52x10 ¹¹	2,01x10 ¹²
	7	5,00x10 ⁸	1,30x10 ⁹	6,30x10 ⁸	5,69x10 ⁸	6,10x10 ⁷	4,53x10 ¹⁰	1,81x10 ¹²
6	3	5,00x10 ⁸	5,30x10 ⁸	2,60x10 ⁹	2,14x10 ⁹	4,60x10 ⁸	2,63x10 ¹¹	2,52x10 ¹²
	5	6,08x10 ⁸	8,55x10 ⁸	1,30x10 ⁹	1,21x10 ⁹	9,00x10 ⁷	3,48x10 ¹¹	2,01x10 ¹²
	7	6,25x10 ⁸	7,00x10 ⁸	6,50x10 ⁸	7,04x10 ⁸	5,40x10 ⁸	1,25x10 ¹¹	7,47x10 ¹¹
7	3	4,30x10 ⁸	5,70x10 ⁸	5,50x10 ⁸	1,19x10 ⁹	6,40x10 ⁸	2,72x10 ¹⁰	7,05x10 ¹¹
	5	8,80x10 ⁷	1,30x10 ⁸	6,40x10 ⁸	7,88x10 ⁸	1,48x10 ⁸	0,84x10 ¹⁰	6,13x10 ¹¹
	7	8,97x10 ⁸	1,02x10 ⁹	2,90x10 ⁸	7,97x10 ⁸	5,07x10 ⁸	0,64x10 ¹⁰	6,98x10 ¹¹
8	3	3,29x10 ⁸	6,58x10 ⁸	3,71x10 ⁹	2,14x10 ⁹	1,57x10 ⁹	6,81x10 ¹¹	3,14x10 ¹²
	5	1,36x10 ⁸	2,46x10 ⁸	7,68x10 ⁸	1,05x10 ⁹	2,82x10 ⁸	4,31x10 ¹¹	2,41x10 ¹²
	7	1,53x10 ⁸	1,73x10 ⁸	2,11x10 ⁹	7,81x10 ⁸	1,33x10 ⁹	1,92x10 ¹¹	2,87x10 ¹²

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, [100] doğrultulu, 15-25 ohm-cm öz dirençli ve 500 μm kalınlıklı p-tipi silisyum kristali kullanıldı. Kristal, 0,1M KOH elektroliti kullanılarak anodik oksidasyon yöntemiyle Al/anodik SiO_2/Si yapısı elde edildi. Oksidasyon işlemi dört farklı pH (=5;6;7 ve 8) 'lı 0,1M KOH elektrolitinde ve her bir pH değerine karşılık üç farklı sabit akım yoğunluğunda ($J=3;5$ ve 7 mA/cm^2) veya üç farklı akım yoğunluğunda ve her bir akım yoğunluğuna karşılık dört farklı pH 'lı 0,1M KOH elektrolitinde gerçekleştirildi. Anodik oksidasyon işlemi sonucunda farklı kalınlıklı homojen oksitler elde edildi (oksit film kalınlıkları Tablo 3.1a 'da verildi). Oksit kalınlıkları Ek.1 'de verilen renkleme tablosundan belirlendi (Ghandhi, 1983). Oksit büyüme grafikleri (gerilim-zaman, $V-t$) şekil (3.2), (3.3), (3.4) ve (3.5) 'de görülmektedir.

Al/anodik SiO_2/Si MOS yapıların $C-V_G$ karakteristikleri $f=50 \text{ kHz}$ 'de, $T=300 \text{ K}$ 'da alındı ve arayüzey hal yoğunluğu N_{ss} , Terman (1962) tarafından geliştirilen yüksek-frekans (HF) metodu yardımıyla hesaplandı. MOS yapıların $C-V_G$ karakteristikleri şekil (3.8), (3.9), (3.10) ve (3.11) 'de verildi. Bu $C-V_G$ karakteristiklerini dikkate aldığımızda, bütün numuneler için, deneysel $C-V_G$ eğrilerinin ideal eğrilere göre negatif gerilimlere doğru kaydığı görülmektedir. HF kapasite-gerilim eğrilerinin negatif gerilimlere doğru kaymasında pozitif yük tuzakları baskın gözükür. Bu pozitif yükler ya donör tipli arayüzey halleri ya da gövde oksit hal tuzakları olabilirler (Wu, et al., 1992). İdeal eğrilere göre deneysel eğrilerin negatif gerilimlere doğru kaymasından yararlanarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , Si-SiO₂ arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu ΔQ_{SS} ; (2.11), (2.12) ve (2.13) denklemleri yardımıyla hesaplanarak Tablo 3.2a 'da verildi. Yine düz bant gerilim kayması ($\Psi_s=0$ 'a karşılık gelen gerilim değeri) ve histeresinin maksimum durumundaki gerilim kayması kullanılarak, ΔQ_{HISMAX} ve ΔQ_{HISFB} değerleri hesaplanıp Tablo 3.2a 'da verildi.

Oda sıcaklığında elde edilen HF $C-V_G$ karakteristikleri dikkate alındığında, histeresis tiplerinin farklı olduğu görülmektedir. Ay3pH5N1, Ay5pH5N2, Ay7pH5N2, Ay3pH6N2, ve Ay3pH7N4 numunelerinin $C-V_G$ eğrilerindeki histeresisi gözönüne aldığımızda; HF $C-V_G$ ölçümlerinde, pozitif uç geriliminden negatif uç gerilimine

doğru giderken elde edilen eğri, negatif uç geriliminden pozitif uç gerilimine doğru giderken elde edilen eğriye göre solda kalmıştır ve bu tür histeresisler iyonik histeresis olarak adlandırılırlar (Schroder, 1990). Ay7pH6N1, Ay5pH7N1, Ay7pH7N4, Ay3pH8N2, Ay5pH8N3 ve Ay7pH8N3 numunelerinin HF C-V_G ölçümlerinde ise; pozitif uç geriliminden negatif uç gerilimine doğru giderken elde edilen eğri, negatif uç geriliminden pozitif uç gerilimine doğru giderken elde edilen eğriye göre sağda kalmıştır ve bu tür histeresisler elektronik histeresis olarak adlandırılırlar (Schroder, 1990). Ay5pH6N1 numunesinin C-V_G eğrisinde ise histeresis; -0,54 Volt 'dan -1,93 Volt 'a kadar elektronik, -1,93 Volt 'dan -2,92 Volt 'a kadar iyoniktir. Yani iki histeresis tipi de görülmektedir. MOS yapılarında histeresis, özellikle iyonik karakterli histeresis istenmeyen bir durumdur. Çünkü hareketli iyonların yapı içinde kararlı bir davranışları yoktur. Böyle oluncada yapının kararlılığı bozulur. Bu özellik elektronik devre elamanlarında kararsızlıklara yol açar (Kılıçoğlu, 1988 ; Nicollian ve Brews, 1982).

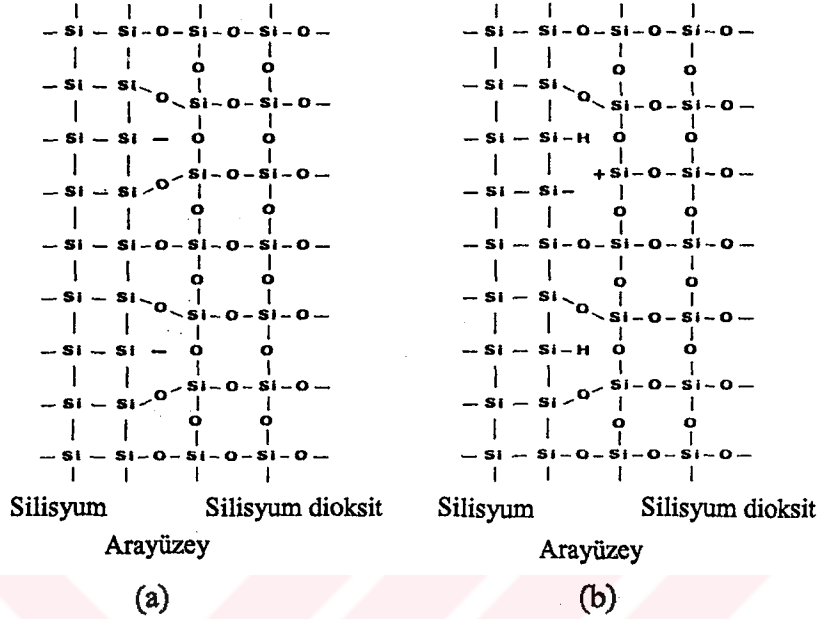
Oda sıcaklığında HF C-V_G ölçümleri alınan Al/anodik SiO₂/Si MOS yapılar, daha sonra vakum pompasına alınarak 10⁻⁵ Torr 'da 500 °C 'de beş dakika bekletilerek tavlandı. Tavlanmış numunelerin tekrar HF C-V_G ölçümleri yapıldı ve C-V_G karakteristikleri şekil (3.12), şekil (3.13), şekil (3.14) ve şekil (3.15) 'de verildi. Bu HF C-V_G karakteristikleri incelendiğinde, yine deneysel C-V_G eğrilerinin ideal C-V_G eğrilerine göre negatif gerilimlere doğru kaydığı görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, HF C-V_G eğrilerinin negatif gerilimlere doğru kaymasında pozitif yük tuzakları baskın gözükür (Wu et al., 1992). Bu kaymadan yararlanarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , Si-SiO₂ arayüzeyünde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu ΔQ_{SS} ; (2.11), (2.12) ve (2.13) denklemleri yardımıyla hesaplanarak Tablo 3.2b 'de verildi. Yine düz bant gerilim kayması ve histeresisin maksimum durumundaki gerilim kayması kullanılarak, ΔQ_{HISMAX} ve ΔQ_{HISFB} değerleri hesaplanıp Tablo 3.2b 'de, gerilim kayma değerleri de Tablo 3.1b 'de verildi.

Tavlamadan önce ve sonra elde edilen HF C-V_G karakteristiklerini dikkate aldığımızda, tavlamadan önceki C-V_G eğrilerine göre, tavlamadan sonraki C-V_G eğrilerinin pozitif gerilimlere doğru kaydığı görülmektedir. Bu da tavlama etkisiyle

oksitte sabitleşmiş pozitif yük yoğunluğunda (ideal $C-V_G$ eğrisine göre deneysel eğrinin sola kaymasına pozitif sabit oksit yükleri sebep olduğu için) azalma olduğunu göstermektedir. Bu azalma, tavlama etkisiyle silisyumun doymamış bağlarının doyurulmasıyla ilgilidir (Nicollian ve Brews, 1982).

Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) yapıların fiziğindeki temel problemlerden biri, oksit-yarıiletken arayüzeyindeki yüzey hal yoğunluk veya enerji dağılımının tayin edilmesidir. Mükemmel bir kristalin, periyodik yapısı yüzeyde ani bir şekilde kesildiğinde yüzey halleri oluşur. Yüzey hallerinin sayısı metalle kaplanmamış (bare) silisyum için, doymamış bağların (dangling bonds) sayısına eşittir (10^{15} cm^{-2} mertebesinde). Bu yüzey üzerinde bir oksit büyütüldüğü zaman doymamış bağların çoğu, oksitin oluşumundan dolayı doyurulur (Cerofolini, et al., 1980). Oksit büyüdükten sonra da arayüzeyde doymamış bağlar mevcuttur. Oksidasyon işleminden sonra doymamış bağların sayısı 10^{12} - 10^{13} cm^{-2} mertebesine iner. Bu sayı, uygun termal tavlama yapmakla 10^{10} - 10^{11} cm^{-2} mertebesine indirgenebilir (Cerofolini, et al., 1980). Bu arayüzey halleri, muhtemelen kayıp oksijen köprülerinin bir kısmından dolayı meydana gelen doymamış bağlardır. Vakum altında MOS yapı tavlansa boş hidrojen atomları silisyumun doymamış bağları ile birleşerek doymamış bağ durumlarını ortadan kaldırırlar. Şekil 4.1.a 'da görüldüğü gibi, bu düşünce aynı zamanda, oksitin ilk 10 \AA 'lük derinliği içerisinde ki, lokalize olmuş sabit pozitif Q_{SS} yükünü açıklar.

Johannesen, et al. (1976) yaklaşık 35 \AA 'lük genişliğe sahip arayüzey yapısını, Auger analizlerini kullanarak göstermişlerdir. İlk 20 \AA , arayüzey düzensizliğine karşılık gelir; bu bölge, 0; 1; 2; 3 ve 4 oksijen atomlarına bağlı silisyum atomlarını gerektirir. Geriye kalan 15 \AA 'lük bölge, silisyum dioksit matrisinde silisyum topluluklarının oluşturduğu adacıklarla şekillenir. Bu modelde, sabit yük silisyumun etrafındaki bağlı bölgelerde bulunduğu halde arayüzey halleri, Si-SiO₂ arayüzeyinde doymamış bağlarla ilgilidir. Şeklin b kısmında, doymamış bağın tavlamadan sonra hidrojenlenmesini gösterir. Anodik oksitte mevcut olan sudan (termal olarak büyütülen oksitlerde bile mevcut olan) bu hidrojen atomu temin edilir (Nicollian ve Brews, 1982). Şekil 4.1b, kalan bir doymamış bağı ve bir sabit pozitif yükü gösterir. Bu bağ çifti, O⁻ iyonu ile köprü kuran bir oksijeni bertaraf ederek ortaya çıkar.



Şekil 4.1 a) İki doymamış bağı gösteren Si-SiO₂ arayüzeyinin şekli

b) Tavlama sonrası Si-SiO₂ arayüzeyi. Şekil, kalan doymamış bir bağı ve bir sabit pozitif yükü gösterir.

İdeal (100) yüzeyi üzerindeki silisyum atomları gövdeye iki bağla bağlıdır. Bununla beraber, Si-SiO₂ arayüzeyinde yapının ideal durumdan bozulması beklenir (Matsumura ve Morrison, 1983). Bu bozulmanın sebebi, (100) düzlemi üzerinde silisyumun bir kaç tek tabakasının (monolayer) genişlemesidir. Bu durumda, silisyum atomları arayüzeyde gövdeye tek bağla ($-Si\langle\frac{O}{O}$), iki bağla ($\rangle Si\langle\frac{O}{O}$) ve üç bağla ($- \rangle Si - O$) bağlanmış olabilirler. Bu sonuca göre Si-SiO₂ arayüzeyi düzlem olmayıp birkaç tabakaya genişler. Böylece, arayüzey türlerinin varlığı önemli derecede bir kalınlık ile "oksijeni-eksik tabaka" olarak gözönüne alınmıştır. Arayüzeylerin kalınlıklarındaki farklılık numunenin hazırlanmasına ve inceleme tekniklerine bağlı olabilir (Matsumura ve Morrison, 1983).

Bir doymamış bağ, yüzeydeki silisyum atomunun yakınında bulunduğu için dolayı, bu doymamış bağın enerjisi muhtemelen yasak enerji aralığında yer alır. Her bir doymamış silisyum atomunun komşuluğundaki elektrik alan, bir atomdan diğerine değiştiği için, yüzey hallerinin enerji seviyesi mahalli alana bağlı olarak değişen miktar

kadar kayar. Yasaklanmış band aralığında farklı konumlarda bulunan arayüzey hallerinin özelliklerini ve işgal derecesini açıklamak için, MOS yapıya bir gerilim uygulamak suretiyle Fermi enerjisinin değeri denge şartları altında değiştirilir. Bu enerji arttırıldığı zaman, arayüzey hallerinin artan sayısı örgüdeki elektronlar tarafından doldurulur (yani, doymamış bağlar zıt spinli iki elektron tarafından işgal edilir).

Yukarıda yapılan açıklamaları dikkate alarak, tavlamadan önceki ve sonraki $C-V_G$ karakteristiklerinden elde edilen, oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , Si-SiO₂ arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} , arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu ΔQ_{SS} , histeresinin maksimum durumundaki yük yoğunluğu ΔQ_{HisMAX} düz bant durumunda histeresin yük yoğunluğu ΔQ_{HisFB} ve arayüzey hal yoğunluğu N_{SS} 'nin karşılaştırılmasını Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 yardımıyla yapabiliriz.

Buna göre tavlamadan sonra, oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , Si-SiO₂ arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu ΔQ_{SS} 'nin tavlamadan öncekilere göre belirli oranlarda azalma gösterdikleri gözlenmiştir. Histeresinin maksimum durumundaki yük yoğunluğu ΔQ_{HisMAX} , TA3pH5N1, TA7pH5N2, TA3pH6N2, TA5pH6N1, TA7pH6N1 ve TA3pH8N2 numuneleri için artmakta, diğer numunelerde ise belirli oranda azalma göstermektedir. Düz bant durumunda histeresin yük yoğunluğu ΔQ_{HisFB} , TA3pH5N1, TA3pH6N2, TA5pH6N1, TA7pH6N1 ve TA3pH8N2 numuneleri için artmakta, diğer numunelerde ise belirli oranlarda azalma göstermektedir. Tavlamadan sonra bazı numunelerde ΔQ_{HisFB} ve ΔQ_{HisMAX} değerlerinin artması, tavlama etkisiyle oksit içerisindeki iyonların daha aktif duruma gelmesiyle ilgilidir. Yine, tavlamadan sonraki HF $C-V_G$ eğrilerinden elde edilen arayüzey hal yoğunluğu N_{SS} , tavlamadan öncekilere göre belirli oranlarda azalma göstermektedir. Bu durum muhtemelen, yukarıda da açıklandığı gibi, numunelerin tavlama ile doymamış bağ durumlarının ortadan kalkmasıyla ilgilidir.

Tavlamadan sonra TA5pH5N2, TA5pH6N1, TA3pH7N4, TA5pH7N1, TA7pH7N4 ve TA5pH8N3 numunelerinin $C-V_G$ karakteristiklerinde histeresin elektronik karakterli, TA7pH5N2, TA7pH6N1, TA3pH8N2 ve TA7pH8N3 numunelerinin $C-V_G$

karakteristiklerinde ise histeresis iyonik karakterlidir. Ayrıca TA3pH5N1 numunesinde histeresis, -0,2 Volt 'dan -1,23 Volt 'a kadar elektronik, -1,23 Volt 'dan -1,96 Volt 'a kadar ise iyoniktir. TA3pH6N2 numunesinde histeresis, -0,6 Volt 'dan -1,68 Volt 'a kadar elektronik, bu bölgede oksite enjekte olmuş elektronlar etkindir ve -1,68 Volt 'dan -2.6 Volt 'a kadar ise iyoniktir, bu bölgede de oksit içerisindeki iyonik yükler etkilidir (Schroder, 1990). Yani bu iki numunede iki tip histeresis gözlenmektedir.

Tavlama öncesi ve sonraki $C-V_G$ eğrilerindeki histeresis tiplerinin karşılaştırılması yapıldığında, Ay7pH5N2, Ay5pH7N1, Ay7pH7N4 ve Ay5pH8N3 numunelerinde histeresis tipi aynı kalmakta, diğer sekiz numunede ise histeresis, tip değiştirmektedir.

MOS yapıların arayüzey hal dağılımları, eğer n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin herikisi de dikkate alınrsa, U şeklinde ortaya çıkar (Kar ve Dahlke, 1971; Morfouli ve Pananakakis, 1989; Trombetta, et al., 1991). Sadece p-tipi yarıiletken dikkate alındığında, yasak enerji bant aralığına göre arayüzey hallerinin yoğunluğu (valans bandına göre) sola dayalı yarım U şeklinde dağılım gösterirler. Herbir MOS için elde edilen arayüzey dağılım eğrilerinin biçimi Castagne ve Vapaille (1971), Chen, et al., (1991), Chanana, et al., (1992), Hsieh, et al., (1993), referanslarında verilen eğrilerin biçimiyle aynıdır.

Arayüzey dağılımında bir pik varsa, bu pik band kenarına yakın ve 0,1 eV civarında olmalıdır (Goetzberger, et al., 1976). Bizim N_{ssmax} değerlerimiz bu konuyla ilgili olabilir. Bazı yapılar, arayüzey hal spektrumunda, 0,1 eV 'dan daha büyük değerlerde pikler verebilirler. Bunların neden kaynaklandıkları tam olarak bilinmemekle beraber, numune hazırlama teknolojisine bağlı olarak safsızlıklardan ileri geldiği söylenebilir (Goetzberger, et al., 1976). Daha sonra yapılan çalışmalarda, arayüzey durumlarının kaynağını Johnson, et al., (1981), [111] doğrultulu üç bağlı p-tipi silisyumu termal yöntemle 1000 °C 'de kuru oksijen ile oksitleyerek araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda, arayüzey hal yoğunluğunun enerji bant şemasındaki değişim eğrisinde 0,30 eV dolayında yaklaşık $7 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 'lik bir maksimum bulmuşlardır (Jimmie, et al., 1989; Kar ve Dahlke, 1971; Castagne, et al., 1971). Daha sonra bu örneği 400 °C 'de vakumda 15 dakika tuttuktan sonra 0,30 eV dolayındaki maksimum değerini azaldığını görmüşlerdir. Bu yapı 450 °C 'de 60 dakika vakumda bekletildikten sonra arayüzey hallerinin incelenmesi sonucunda daha da azaldığını

görmüşlerdir. Böylece elde edilen MOS yapıların arayüzey hal yoğunluğu enerjisinin 0,30 eV dolayındaki yaklaşık 10^{12} eV⁻¹.cm⁻² yükseklikteki hal yoğunluğunun arayüzeydeki doymamış bağlardan ileri geldiğini bulmuşlardır.

Herbir pH 'ya karşılık üç farklı akım yoğunluğu için çizilen tavlamadan önce ki arayüzey hal dağılım grafiklerini dikkate aldığımızda (şekil 3.17a, 3.18a, 3.19a ve 3.20a), pH=5 ve 7 için her üç akım yoğunluğunda çizilen arayüzey dağılım eğrilerinin hepsi hemen hemen $0,30-E_v$ eV konumunda birer pik vermişlerdir. Aynı konumda pH=6 'da $J=3$ ve 5 mA/cm² ve pH=8 için $J=5$ mA/cm² nin dağılım eğrileri pik vermişlerdir. Bu konumdaki pikler, yukarıda açıklandığı gibi, doymamış bağlara atfedilebilir. Tavlamadan sonra bu pikler daha düşük enerji değerlerine (sola doğru) kaymışlardır. Tavlama süresi artırılırsa bu konumdaki pik daha da sola kayarak N_{ssmax} 'ların konumuyla çakışıp ortadan kaybolabilirler. pH=6 ve pH=8 'de diğer akım yoğunluklarına ait eğriler aynı piki farklı konumlarda vermişlerdir. Bu konumlarda arayüzey hallerinin pik değerleri şekillerden de görüldüğü gibi birbirlerinden farklıdır. Tavlamadan önce ve sonraki arayüzey hal dağılımları karşılaştırıldığında, grafiklerden görüldüğü gibi, TNsA7pH8 hariç, diğer onbir tavllanmış numunenin maksimum arayüzey hal yoğunluğunda nisbi olarak azalma vardır ve bu numunelerin on tanesinde N_{ssmax} 'un enerji konumu sağa doğru kaymıştır. TNsA7pH8 grafiğinde ise, arayüzey hal yoğunluğu azalmayıp, çok az bir miktar artmıştır. Ayrıca TNsA3pH6 ve TNsA5pH6 grafiklerinde N_{ssmax} 'un enerji konumu tavlamadan önceki konumunda yer almıştır. Yine tavllanmış numunelerin yedi tanesinde tavlamadan önce 0,30 eV konumunda olan pikler sola doğru kayarak 0,245 eV 'da yer almışlardır. Bu pik konumu, Kar ve Dahlke (1971) 'nin makalesinde tavllanmış termal yapıları Si-MOS yapılar için elde edilen arayüzey dağılım eğrilerinde (onların makalesinde şekil 18) $0,25-E_v$ eV 'da gözlenen pikin konumuyla aynıdır. Beş tanesinde de, tavlamadan sonra, 0,33 eV 'da pikler gözlenmiştir. Tavlamadan önce, pH=5 'de $J=5$ ve 7 mA/cm² 'nin (NsA5pH5 ve NsA7pH5) eğrilerinde 0,195 eV konumunda gözlenen pikler tavlama vasıtasıyla gözden kaybolmuşlardır (Şekil 3.17.b). Yine bu pH 'da tavlamadan sonra, her üç akım yoğunluğu için 0,33 eV 'da ortaya çıkan pikler için, pH=7 'nin tavlamadan sonraki dağılım eğrisine bakarak şunu söyleyebiliriz: $J=5$ ve 7 mA/cm² 'nin tavlamadan önceki 0,30 eV konumundaki pikleri 0,33 eV 'a ve $J=3$ mA/cm² 'nin (NsA3pH5) 0,30 eV 'daki piki de 0,245 eV 'a

kaymıştır. pH=7 'ye baktığımızda, her üç akım yoğunluğu için arayüzey hal dağılım eğrilerinde, tavlamadan önce, 0,30 eV konumundaki piklerin üçü de tavlamadan sonra 0,245 eV konumuna kaymışlardır. Diğer pH 'lar için de tavlamadan önce 0,30 eV konumunda gözlenen pikler tavlamadan sonra, yukarıda söylendiği gibi, ya sağa ya da sola doğru kaymıştır. Bununla beraber, tavlamadan sonra bazı pikler ortadan kalkmış ve bazı yeni pikler ortaya çıkmıştır. Özellikle pH=8 'de şekil 3.20a ve 3.20b 'den görüleceği gibi, tavlamadan önceki piklerin çoğu tavlamadan sonra ya yok olmuş veya ihmal edilecek kadar az bir N_{ss} değerine sahip olmuşlardır. Ortaya çıkan yeni pikler veya doymamış bağlarla ilgili olmayan pikler ya numune hazırlama şartlarıyla ilgili safsızlıklardan (Goetzberger, et al., 1976) veya Nicollian ve Brews (1982) ve Kar ve Dahlke (1968) tarafından işaret edildiği gibi, tavlamadan önce aktif olmayan bazı safsızlıkların tavlama sonucu aktif duruma geçmesinden veya kontak(gate) metalinin oksit ve oksitteki suyla kimyasal olarak reaksiyona girmesinden dolayı ortaya çıkmıştır denilebilir.

Tavlamadan önce, akım yoğunluğuna göre ($J=3 \text{ mA/cm}^2$, pH=5;6;7 ve 8 gibi) gruplandırılan arayüzey hal dağılımı grafiklerinde (şekil 3.21a, 3.22a ve 3.23a); N_{sA3pH8} , N_{sA7pH6} ve N_{sA7pH8} grafikleri hariç, diğer grafiklerde 0,30 eV konumunda pikler gözlenmiştir. Bu konumdaki arayüzey hallerinin pik değeri birbirinden farklıdır. N_{sA3pH8} için pik tavlamadan önceki konumuna göre sola kaymıştır, N_{sA7pH6} ve N_{sA7pH8} 'de ise pikler sağa kaymıştır.

Tavlamadan sonra, akım yoğunluğuna göre gruplandırılan arayüzey hal dağılım grafiklerinde (şekil 3.21b, 3.22b ve 3.23b); TN_{sA3pH5} , TN_{sA3pH6} , TN_{sA3pH7} , TN_{sA3pH8} , TN_{sA5pH7} ve TN_{sA7pH7} 'de 0,245 eV konumunda, TN_{sA5pH8} 'de 0,30 eV konumunda, TN_{sA5pH5} , TN_{sA5pH6} ve TN_{sA7pH5} 'de 0,33 eV konumunda, TN_{sA7pH6} ve TN_{sA7pH8} 'de ise 0,35 eV konumunda pikler mevcuttur. Tavlamadan önceki 0,30 eV 'ta bulunan piklerin konumu ve değeri, tavlamadan sonra değişmiştir.

Tavlamadan önce elde edilen anodik MOS yapıların arayüzey hal enerji dağılım eğrileri hem biçim hem de yoğunluk mertebesi bakımından Al/Termal SiO_2/Si MOS 'un dağılım eğrilerine (şekil 3.24) yakın bir şekilde benzemektedir, fakat termal MOS 'ta maksimum arayüzey hal yoğunluk değeri daha büyük çıkmakta ve 0,005 eV konumuna karşılık gelmektedir. Bu durum, termal MOS 'un arayüzey hal yoğunluk

dağılım eğrisinin, anodik MOS 'un eğrisine göre, valans band kenarına daha yakın olduğunu gösterir. Bu da termal MOS 'un histeresinin daha negatif gerilimlere kaymasıyla ilgilidir. Ayrıca, 0,195 eV konumunda arayüzey hal yoğunluğu $2,696 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinde olan bir pik bulunmaktadır. Tavlama sonrasında, anodik MOS yapılarında arayüzey hal yoğunluğu termal MOS yapılara göre daha düşük değerli dağılım eğrisi vermiştir.

Sonuç olarak, tüm numuneler için arayüzey hal enerji (veya yoğunluk) dağılım eğrilerinden ve yukarıdaki açıklamalardan tavlamanın anodik Si MOS yapılar üzerindeki iyileştirici etkisi belirgin bir şekilde görülmüştür. Mesela, tavlama sonrasında pH=7 'de herbir akım yoğunluğu için arayüzey hallerinin maksimum değerleri tavlama öncesi değerlerinden önemli derecede indirgenmiştir. Özellikle $J=3 \text{ mA/cm}^2$ 'nin N_{ssmax} değeri tavlama öncesi değerinden bir merteye daha azdır. pH ve akım yoğunluğunun arayüzey parametreleri üzerinde istenilen yönde etkisinin olup olmadığını, yukarıdaki kesimlerden ve özellikle bu son kesimdeki sonuçlardan ve tartışmalardan hareketle şunları söyleyebiliriz: pH=7 'de (tavlama sonrasında) üç akım yoğunluğunda (pH=7, $J=3; 5$ ve 7 mA/cm^2) tayin edilen N_{ssmax} 'ların değerleri birbirlerine çok yakın olduğu gibi N_{ssmid} 'lerin değerleri de birbirine çok yakındır ve söz konusu piklerin konumları ve değerleri de birbirine çok yakın ve hemen hemen aynıdır. Bu durum, diğer pH 'lara karşılık gelen akım yoğunlukları için de yaklaşık olarak söylenebilir. O halde akım yoğunluğunun arayüzey hal yoğunluk dağılımı üzerinde büyük bir etkisinin olduğu söylenemez, ancak V-t grafiklerinde görüldüğü gibi, oksit tabakasını elde etmede, aynı kalınlığı daha büyük akım yoğunluğu daha az sürede verebilir. Grafiklere dikkat edilirse, pH=7 'de üç akım yoğunluğu için elde edilen dağılım eğrilerinde tüm konumlardaki N_{ss} değerleri diğer pH dağılım eğrilerindeki değerlerden belirgin bir şekilde düşük çıkmıştır. Bu durum, herbir akım yoğunluğuna karşılık dört pH dağılım eğrilerine ($J=3 \text{ mA/cm}^2$ 'ye karşılık, pH=5; 6; 7 ve 8 gibi) bakıldığında daha açık bir şekilde görülebilir. Daha yukarıda da bahsedildiği gibi MOS yapılarında histeresinin iyonik olması istenmeyen bir durumdur. Çünkü hareketli iyonların yapı içinde kararlı bir davranışları yoktur. pH=7 'de her üç akım yoğunluğunun histeresisi (tavlama sonrasında) elektronik karakterlidir. Bundan dolayı elektronik devre elemanlarında rahatlıkla kullanılabilirler. Böylece, dört farklı pH 'lı 0,1 M KOH elektrolitiyle yapılan p-Si anodik MOS yapılarında, pH=7 elektrolitiyle elde

edilen yapıların arayüzey yük yoğunluğunun değerleri, pH 'nın asidik ve bazik olduğu hallerde elde edilen MOS yapılarından daha düşük ve bu yapıların daha tercih edilebilir olduğu sonucuna vardığımızı söyleyebiliriz.



KAYNAKLAR

- Abdulayev, A.G., Karnaukhov, A.M. and Khanjanov, S.K., 1981, *Thin Solid Films*, 79,113.
- Blakemore, J.S., 1962, *Semiconductor Statistics*, Dover Publications, INC., New York.
- Brown, D.M. and Gray, P.V., 1968, *J. Electrochem. Soc.*, 115,760.
- Castagne, R. and Vapaille, A., 1971, *Surface Science*, 28, 157.
- Cerofolini, G.F., Ferla, G. and Spadini, G., 1980, *Thin Solid Films*, 68,315.
- Chanana, R.K., Dwivedi, R. and Srivastava, S.K., 1991, *Solid-St. Electron.*, 34,1463.
- Chanana, R.K., Dwivedi, R. and Srivastava, S.K., 1992, *Solid-St. Electron.*, 35,1417.
- Chen, I.C., Wei, C.C. and Teng, C.W., 1991, *J. Appl. Phys.*, 70, 1844.
- Dios, A., Caston, E., Bailon, L., Barbolla, J., Lozano, M. and Tamayo, E.L., 1990, *Solid-St. Electron.*, 33, 987.
- Edward, E. and Yang, S., 1978, *Fundamentals of Semiconductor Devices*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Ghandhi, S.K., 1983, *VLSI Fabrication Principles*, John Willey & Sons. Inc., New York.
- Ghezzeo, M. and Brown, D.M., 1973, *J. Electrochem. Soc. (Solid-St. Sci. Tech.)*, 120,110.
- Goetzberger, A., Klausmann, E. and Schulz, M.J., 1976, *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6,1.
- Guenterschulze, A. and Betz, H.,1937, *Elektrolytkondensatören*, Berlin.
- Hasegawa, H. and Hartnagel, L., 1976, *J. Electrochem. Soc. (Solid-St. Sci. Tech.)*, 123, 713.
- Heiman, F.P. and Warfield, G., 1965, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 12, 167.
- Hsieh, S.Y. and Chen, K.M., 1977, *J. Electrochem. Soc. (Electrochem. Sci. Tech.)*, 124, 1171.
- Hsieh, J.C., Fang, Y.K., Chen, C.W., Tsai, N.S., Lin, M.S. and Tseng, F.C., 1993, *J. Appl. Phys.*, 73, 5038.
- Jimmie, A.M., Blat, C. and Nicollian, E.H., 1989, *J. Appl. Phys.*, 66, 716.
- Johnson, N.M., Biegelsen, D.K. and Moyer, M.D., 1981, *Insulating Films on Semiconductors*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Johannesen, J.S., Spicer, W.E. and Strausser, Y.E., 1976, *J. Appl. Phys.*, 47, 3028.
- Kar, S. and Dahlke, W.E., 1968, *Solid-St. Electron.*, 11, 95.

- Kılıçoğlu, T., 1988, Anodik Oksitli Al/SiO₂/Si Yapıların Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır (Yayınlanmamış).
- Kılıçoğlu, T., Öztürk, Z.Z., Ebeoğlu, M.A. and Gülsun, Z., 1993, Indian J. Pure Appl. Phys., 31, 718.
- Lakshmi, M.V.S. and Ramkumar, K., 1989, Phys. Stat. Sol. (a), 111, 667.
- Lin, J.J. and Hwu, J.G., 1991, Solid-St. Electron., 34, 1449.
- Logan, R.A., Schwartz, B. and Sundburg, W.J., 1973, J. Electrochem. Soc.(Solid St. Sci. Tech.), 120,1385.
- Mackintosh, W.D. and Plattner, H.H., 1977, J. Electrochem. Soc., 124, 398.
- Madou, M.J., Gomes, W.P., Fransen, F. and Cardon, F., 1982, J. Electrochem. Soc.(Solid St. Sci. Tech.), 129, 2749.
- Matsumura, M. and Morrison, S.R., 1983, J. Electroanal. Chem., 147, 157.
- Mende, G. and Wende, J., 1986, Thin Solid Films, 142, 21.
- Miller, J.A., Blat, C. and Nicollian, E.H., 1989, J. Appl. Phys., 66, 716.
- Morfouli, P. and Pananakakis, G., 1989, Phys. stat. sol. (a), 111, 529.
- Nicollian, E.H. and Brews, J.R., 1982, MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology, John Willey & Sons, New York.
- Nicollian, E.H. and Goetzberger, A., 1967, Bell Syst. Tech. J., 46, 1055.
- Öztürk, Z.Z., 1988, TU. Fiz. ve Astro. Fiz. D., 12, 97.
- Pliskin, W.A. and Lehman, H.S., 1965, J. Electrochem. Soc., 112, 1013.
- Schmidt, P.F., O'Keefe, T.W., Oroshnik, J. and Owen, A.E., 1965, J. Electrochem. Soc., 112, 801.
- Schmidt, P.F. and Owen, A.E., 1964, J. Electrochem. Soc., 111, 683.
- Schmidt, P.F. and Rand, M.J., 1966, Solid-State Commun., 4, 169.
- Schmidt, P.F. and Michel, W., 1957, J. Electrochem. Soc., 104, 230.
- Schmidt, P.F. and Wonsidler, D.R., 1967, J. Electrochem. Soc., 114, 603.
- Schmidt, P.F., Okeeffe, T.W. and Oroshnik, J., 1965, J. Electrochem. Soc., 112, 800.
- Schroder, D.K., 1990, Semiconductor Material and Device Characterization, John Willey and Sons Inc., Arizona.
- Seiwatz, R. and Green, M., 1958, J. Appl. Phys., 29, 1034.
- Sze, S.M., 1985, Physics of Semiconductor Devices, John Willey & Sons, New York.
- Terman, L.M., 1962, Solid-St. Electron., 5, 285.

- Sze, S.M., 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, John Willey & Sons, New York.
- Terman, L.M., 1962, *Solid-St. Electron.*, 5, 285.
- Trombetta, L.P., Feigl, F.J. and Zeto, R.J., 1991, *J. Appl. Phys.*, 69, 2512.
- Tsui, B.Y. and Chen, M.C., 1993, *Solid-St. Electron.*, 36, 583.
- Uhlir, A., 1958, *Bell Syst. Tech. J.*, 35, 333.
- Wu, S.L., Lee, C.L., Lei, T.F. and Liang, M.S., 1992, *J. Appl. Phys.*, 72, 1378.
- Wilmsen, C.W., 1985, *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*, Plenum Pres, New York and London.



Ek 1 Oksit Kalınlıklarına Göre Renklenme Tablosu (Ghandhi, 1983)

<u>Film kalınlığı (μm)</u>	<u>Renklenme</u>
0,05	Hafif kahverengi
0,07	Kahverengi
0,10	Karanlık mordan kırmızı mora
0,12	Parlak mavi
0,15	Parlak maviden metalik maviye
0,17	Metalikten çok hafif sarı-yeşile
0,20	Hafif altın veya sarı görünümlü metalik
0,22	Altın ile hafif sarı-portakal
0,25	Portakaldan kavuniçine
0,27	Kırmızı-mor
0,30	Maviden mor-maviye
0,31	Mavi
0,32	Maviden mavi-yeşile
0,34	Hafif yeşil
0,35	Yeşilden sarı-yeşile
0,36	Sarı-yeşil
0,39	Sarı
0,41	Hafif portakal
0,42	Karanfil pembesi
0,44	Mor-kırmızı
0,47	Mor
0,48	Mavi-mor
0,49	Mavi
0,50	Mavi-yeşil
0,52	Açık yeşil
0,54	Sarı-yeşil
0,56	Yeşil-sarı
0,57	Hafif sarıdan metalik griye