

57987

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MOS YAPILARDA  $\gamma$ -RADYASYONUNUN ETKİLERİ**

T. C.  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TİMUR CANEL**

*Ana Bilim Dalı : FİZİK*

**OCAK-1996**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MOS YAPILARDA  $\gamma$ -RADYASYONUNUN ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TİMUR CANEL**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:  
Tezin Savunulduğu Tarih :**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Yüksel BEKTÖRE**

*Y. Bektöre*

**Üye**

**Prof. Dr. Emel ÇINGİ**

*Emel Çingİ*

**Üye**

**Y.Doç. Dr.H. Selçuk VAROL**

*Selçuk Varol*

57937

**OCAK-1996**

# MOS YAPILARDA $\gamma$ RADYASYONUNUN ETKİLERİ

Timur CANEL

**Özet:** Bu çalışmada, Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) yapıları incelemeye önce yalıtkan, iletken, yarıiletken ve bant yapıları kısaca anlatılmıştır. Daha sonra n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin kristal yapısı incelenmiştir.

Kullandığımız MOS yapıyı incelemeye önce ideal bir MOS yapının yığılma, fakirleşme ve evirtim bölgelerinin enerji bant diyagramları, elektrik alan dağılımı, yük dağılımı ve potansiyel dağılımı incelenmiştir. Daha sonra Poisson denklemi ile yarıiletkendeki yüzey alan yük yoğunluğu uzaklığa bağlı olarak hesaplanmıştır. İdeal MOS eğrisinden faydalanarak oksit kalınlığı, yarıiletkenin tipi, önemli oksit kusurları ve evirtim tabakasının yeri bulunmuştur.

İdeal olmayan MOS yapıda, yapı içindeki yüzey ve arayüzey durumları, sabit yüzey yükleri, hareketli iyonlar ve iyonize olmuş tuzaklar bulunmuş ve bunların MOS'un C-V eğrisinde oluşturduğu farklılıklar incelenmiştir.

Daha sonra  $\gamma$ -radyasyonunun MOS yapıya etkileri teorik olarak incelenmiştir. Deneysel metot da ise MOS örneklerimize çeşitli dozlarda  $\gamma$ -radyasyonu uygulanmıştır ve C-V eğrileri çizilmiştir. İdeal teorik C-V eğrisi ile  $\gamma$ -radyasyonu uygulandıktan sonra çizilen C-V eğrisinden, Silisyum'un yasak enerji bölgesinde oluşan enerji seviyeleri bulunmuştur.

## $\gamma$ RADIATION EFFECT ON MOS STRUCTURE

Timur CANEL

**Abstract:** In this study, before investigating the Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) structure, the crystal structure of n-type and p-type semiconductor will be explained.

To understand MOS structure, we investigated energy band diagram, electric field distribution, charge distribution and potential distribution of the accumulation, depletion and inversion layers of an ideal MOS structure. After this, the surface space-charge density as dependent on distance of the semiconductor will be calculated by Poisson Equation. Oxide width, semiconductor type, important oxide defects and inversion layer location are found by the use of ideal MOS curve.

In the non-ideal MOS structure, surface and interface states, fixed surface charge, mobile ions and ionized traps in the structure are found and the effect of these on C-V curve of MOS are investigated.

After that, effects of  $\gamma$ -radiation on the MOS structure are investigated theoretically in experimental method, various doses  $\gamma$ -radiation is applied on MOS sample and C-V curves are drawn. Energy levels which are in forbidden gap of Silisium are found by the use of ideal theoretically C-V curve and C-V curves which are applied  $\gamma$ -radiation.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

MOS yapıların kullanım alanları geniştir. Bunların kullanımında karşımıza çıkan sorunlardan en önemlilerinden biri de MOS yapının kullanımı sırasında maruz kaldığı radyasyondur. Bu çalışmada radyasyonun MOS yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Yüksel BEKTÖRE'ye beni bu konuda yönlendiren Y. Doç. Dr. H. Selçuk VAROL'a, laboratuvar çalışmasında yardımlarını gördüğüm Y. Doç. Dr. Süha AKÇİZ'e , GAMMA-PAK Sterilizasyon Sanayive Ticaret A.Ş. ye ve eşim Nurgül'e teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	I
BÖLÜM 2. BANTYAPILARI.....	2
2.1 Enerji Bantları.....	2
2.1.1 Yalıtkan.....	4
2.1.2 İletken.....	4
2.1.3 Yarıiletken.....	5
2.2 Donorlar (Vericiler) ve Akseptorlar (Alıcılar).....	6
2.2.1 Donorlar.....	7
2.2.2 Akseptorlar.....	8
BÖLÜM 3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR.....	10
3.1 İdeal MOS Diyot.....	11
3.1.1 Yığılma.....	12
3.1.2 Fakirleşme.....	13
3.1.3 Evirtim.....	14
3.2 Yüzey Alan-Yükü Bölgesi.....	16

3.3	İdeal MOS Eğrisi.....	20
3.3.1	Eğrinin Tanımlanması.....	22
3.4	İdeal Olmayan MOS Yapı.....	24
3.4.1	Yüzey Durumları.....	25
3.4.2	Yüzey Yükleri ve Alan Yükleri.....	28
3.5	Radyasyon Etkileri.....	30
3.5.1	Boşluk Yakalama Modeli.....	32
3.5.2	Elektron Etkisi Modeli.....	33
BÖLÜM 4.	DENEL METOD.....	34
4.1	Sığa-Gerilim Eğrilerinin Çizilmesi.....	34
4.2	Arayüzey Tuzak Yoğunluğunun ( $N_s$ ) Hesaplanması.....	36
4.3	Terman Metodu.....	36
BÖLÜM 5.	SONUÇLAR.....	49
KAYNAKLAR.....		52
ÖZGEÇMİŞ.....		53

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bir katıda, iletkenlik ve valans bantları ile fermi seviyesi.....	2
Şekil 2.2. Bir katıda enerji düzeylerinin enerji düzeylerinin dolu olma olasılığının enerji ile değişimi.....	3
Şekil 2.3. Yalıtkanın enerji-bant diyagramı.....	4
Şekil 2.4. İletkenin enerji-bant diyagramı.....	5
Şekil 2.5. Soldaki yarıiletken sonlu bir sıcaklıktadır ve yarıiletken içindeki taşıyıcılar ısısal yolla uyarılmıştır. Sağdaki yarıiletkenin içindeki kirlilikler nedeniyle elektronu eksiktir.....	5
Şekil 2.6. Saf silisyum atomlarının kovalent bağları.....	6
Şekil 2.7. Aşılınmış silisyum kristali.....	7
Şekil 2.8. Donor enerji seviyeleri.....	8
Şekil 2.9. Boron ile aşılınmış silisyum kristali.....	8
Şekil 2.10 Akseptor enerji seviyeleri.....	9
Şekil 3.1. MOS yapı.....	10
Şekil 3.2. (a-b) $V=0$ da ideal MOS diyotun enerji bant diyagramı.....	11
a- n-tipi.....	11
b- p-tipi.....	11
Şekil 3.3. Yığılma durumu.....	12
a- Enerji bant diyagramı.....	12
b- Yük dağılımı.....	12
c- Elektrik alan dağılımı.....	12
d- Potansiyel dağılımı.....	12
Şekil 3.4. Fakirleşme durumu.....	13
a- Enerji bant diyagramı.....	13
b- Yük dağılımı.....	13
c- Elektrik alan dağılımı.....	13
d- Potansiyel dağılımı.....	13



Şekil 3.5. Evirtim durumu.....	14
a- Enerji bant diyagramı.....	14
b- Yük dağılımı.....	14
c- Elektrik alan dağılımı.....	14
d- Potansiyel dağılımı.....	14
Şekil 3.6. n-tipi MOS yapı için enerji bant diyagramları.....	15
a- Yığılma.....	15
b- Fakirleşme.....	15
c- Evirtim.....	15
Şekil 3.7. Yarıiletken içinde alan yük yoğunluğunun yüzey potansiyeli ile değişimi..	19
Şekil 3.8. MOS sistemde sığa potansiyel eğrisi.....	21
a- Düşük frekans.....	21
b- Yüksek frekans.....	21
c- Kararsız konum.....	21
Şekil 3.9. Değişik oksit kalınlıkları için ideal MOS diyotun C-V eğrisi. Kesiksiz çizgiler, düşük frekans. Kesikli çizgiler yüksek frekans.....	23
Şekil 3.10. Kirlilik yoğunluğu ile $W_m$ arasındaki ilişki.....	24
Şekil 3.11. İdeal olmayan bir MOS diyotta durum ve yüklerin temel sınıflandırılması.	24
Şekil 3.12. Yüzey durumları etkisini de kapsayan devre.....	27
Şekil 3.13. Yüzey yükleri ve yalıtkan alan yükü ile MOS yapı.....	29
Şekil 3.14. $SiO_2$ içinden yüklü parçacıkların geçerek elektron boşluk çiftini yaratması.....	30
Şekil 4.1. MOS yapının C-V eğrisi.....	38
Şekil 4.2. MOS yapının normalize $C_{nor}$ -V eğrisi.....	39
Şekil 4.3. MOS yapının C-Yüzey potansiyeli değişimi.....	40
Şekil 4.4. 12.68 kGy için $Q_{ss}$ değişimi.....	41
Şekil 4.5. 35.05 kGy için $Q_{ss}$ değişimi.....	42
Şekil 4.6. 41.78 kGy için $Q_{ss}$ değişimi.....	43
Şekil 4.7. 50.61 kGy için $Q_{ss}$ değişimi.....	44
Şekil 4.8. 12.68 kGy için tuzak yoğunluğunun silisyum yasak enerji bölgesindeki dağılımı.....	45

Şekil 4.9. 35.05 kGy için tuzak yoğunluğunun silisyum yasak enerji bölgesindeki dağılımı.....	46
Şekil 4.10. 41.78 kGy için tuzak yoğunluğunun silisyum yasak enerji bölgesindeki dağılımı.....	47
Şekil 4.11. 50.61 kGy için tuzak yoğunluğunun silisyum yasak enerji bölgesindeki dağılımı.....	45
Şekil 5.1. Silisyumun Yasak enerji bant aralığında yer alan tuzakların yerleri ve yoğunluğu.....	50
Şekil 5.2. Silisyumun yasak enerji bant aralığındaki tuzakların yerleri.....	51



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Silisyumun bazı özellikleri.....6

Tablo 4.1. Çeşitli dozlar için oksit yük yoğunluklarıve arayüzey yük yoğunlukları...35



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Geçen 20 yılda Silisyum teknolojisi hızlı bir gelişim sürecine girmiş ve bugün bir santimetre karelik tek kristal silisyum üzerinde bir milyona yakın aktif devre elemanı bulunan çipler seri imal edilebilir duruma gelmiştir. Mikroelektronik olarak adlandırılan bu teknoloji, günümüzde en hızlı gelişen ve öteki teknoloji alanlarını en fazla etkileyen teknoloji olarak kabul edilmektedir. Bu hızlı gelişmeye yol açan etkenlerden biri de silisyum üzerine  $\text{SiO}_2$  nin büyütülebilir olması ve MOS teknolojisinin gelişip yayılmasıdır. Mikroelektronikğin en önemli temel elemanı olan MOS tranzistörlerde Oksit-Yarıiletken arayüzeyinin bu tranzistörlerin elektronik özelliklerinde önemli rol oynadıkları bilinmektedir. Bu çalışmanın amacı Si- $\text{SiO}_2$  eklemlerinde imalat aşamasında ve kullanıldıkları ortamlarda maruz kalacakları radyasyon etkilerinin, arayüzeyin elektronik yapısına yapacağı hasarları incelemektir.

İlk aşamada p-tipi silisyum pullar üzerine temiz ortam şartlarında  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  de bir tüp fırın içinde su buharı yardımı ile  $\text{SiO}_2$  oluşturulmuş, daha sonra 2 mm çapında Alüminyum benekler metal bir maske yardımı ile vakum buharlaştırma yöntemi ile oksit üzerinde meydana getirilmiştir. Bu şekilde elde edilen MOS yapılar bir reaktörde,  $\text{Co}^{60}$  kaynak kullanılarak, değişik dozlarda  $\gamma$ -ışınlarına tabi tutulmuştur.  $\gamma$  radyasyonu uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra yapılan C-V ölçümleri sonucunda, düz-bant kaymalarından arayüzey durumlarında artışlar gözlenmiş ve bunların bant aralıklarında meydana getirdikleri enerji seviyeleri tespit edilmiştir.  $\gamma$  radyasyon dozuna bağlı olarak arayüzey seviye yoğunlukları incelenmiştir.

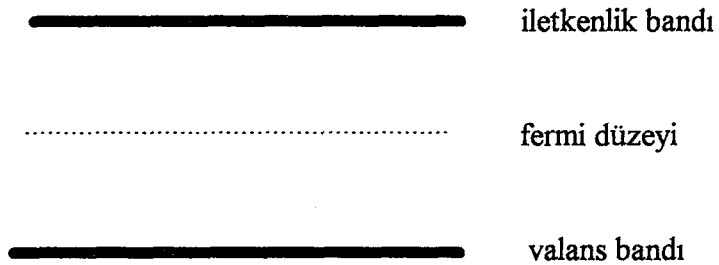
## BÖLÜM 2. BANT YAPILARI

MOS yapılarda fakirleşme, evirtim ve yığılma olaylarını anlayabilmek için, ilk önce Si kristalindeki bant yapılarının anlaşılmasında yarar vardır. İletken, yalıtkan ve yarıiletken malzemelerin bant yapıları bu bölümde incelenecektir.

### 2.1. Enerji Bantları

Bazı atomlarda elektron yörüngelerinin tümü boş veya bir kısmı doludur. Yani kuantum durumları ya hiç doldurulmamış veya kısmen doldurulmuştur. Bu durumda oluşan bantlarda elektron sayısı sıfır veya kuantum durumu sayısından daha azdır. Elektron hareketi veya iletkenlik bu tür boş bantlarda olasıdır. Kuantum durumu sayısına eşit sayıda elektron bulunduğu dolu bantlarda ise elektron hareketi, dolayısıyla elektron iletkenliği söz konusu olamaz. Boş ve dolu bantlara sırasıyla "iletkenlik" ve "valans" bantları adı verilir. Yalçın ve Büget (1981)

İletkenlik bandındaki elektronlarla valans bandındaki boşluklar, denge halindedir. Bu istatistiksel denge "Fermi enerji düzeyi" ile sağlanır. Fermi enerji düzeyinin konumu, iletkenlik ve valans bantlarındaki elektron ve boşluk sayılarına bağlıdır. Herhangi bir nedenle elektron sayısı artarsa, bu seviye dengeyi korumak için, iletkenlik bandına yaklaşır. Eğer boşluk sayısı artarsa, bu seviye valans bandına doğru yaklaşır.



Şekil 2.1 Bir katıda, iletkenlik ve valans bantları ile fermi düzeyi.

Enerjisi E olan bir düzeyin dolu olma olasılığı,

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (2.1)$$

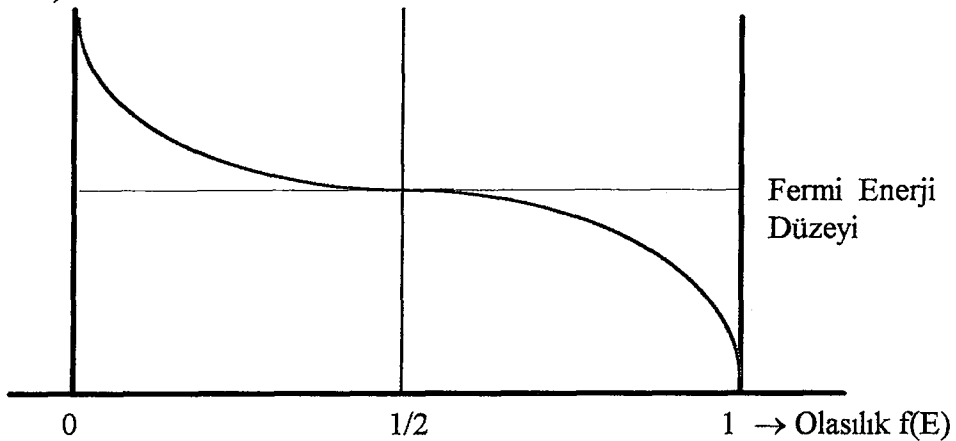
bağıntısı ile verilir. Burada  $E_F$ , Fermi enerjisi, k, Boltzman sabiti, T ise mutlak sıcaklıktır. Bu denkleme göre tüm sıcaklıklarda,

$$E < E_F \text{ için } f(E) \rightarrow 1$$

$$E = E_F \text{ için } f(E) \rightarrow 1/2$$

$$E > E_F \text{ için } f(E) \rightarrow 0$$

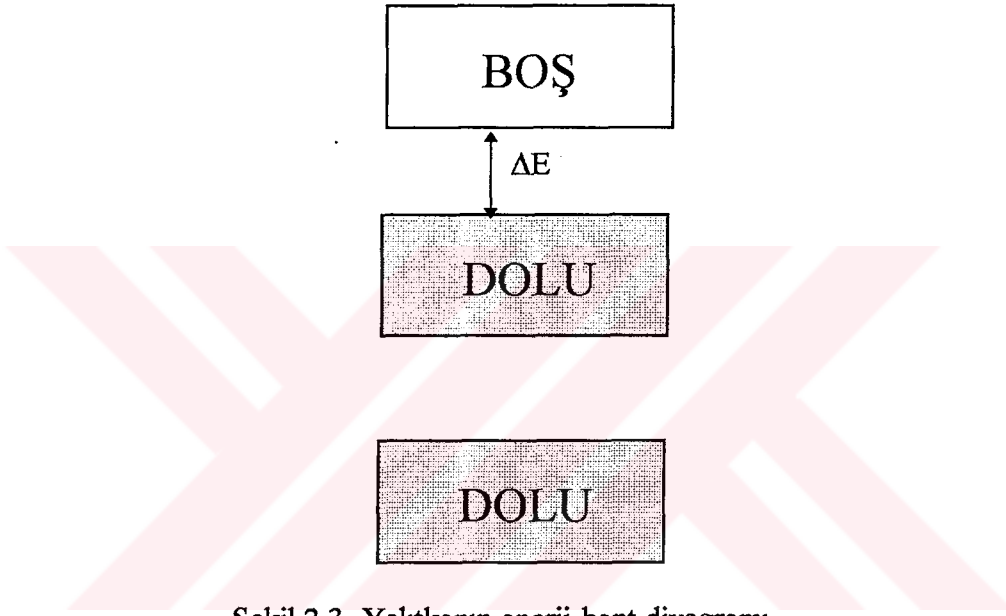
olur. Dolu olma olasılığının enerji ile değişimi Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi fermi enerjisinden yukarı çıkıldıkça veya aşağı inildikçe, olasılık sırasıyla sıfır ve bir değerlerine yaklaşır. Bir katıda, tam olmamakla beraber, boşa veya doluya en yakın enerji bölgeleri, iletkenlik ve valans bantlarıdır. Bu iki bant arasında kalan yasak bölgede elektronun bulunma olasılığı sıfırdır. Oysa katıya karışmış yabancı atomlar, atomların dizilişinde ortaya çıkan düzen bozuklukları, atomların yerlerini kaybetmeleri,... vs. gibi nedenlerle katı içinde serbest elektron yakalayan merkezler oluşur. "Elektron tuzakları" adı verilen bu merkezler, yasak enerji aralığı boyunca uzanan enerji düzeyleri yaratırlar. Bunlardan fermi düzeyinin altında ve üstünde bulunanlar, fermi düzeyine uzaklık derecelerine göre, dolu ve boş olurlar. Yalçın ve Bütet (1981)



Şekil 2.2 Bir katıda enerji düzeylerinin dolu olma olasılığının enerji ile değişimi

### 2.1.1 Yalıtkan

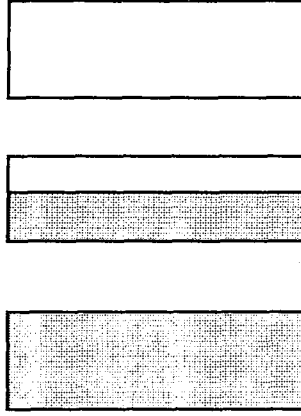
Yalıtkanlarda valans bandı tamamen dolu, iletkenlik bandının da tamamen boş olduğu söylenebilir. Ayrıca bu iki bant arasındaki yasak enerji bölgesi geniştir; dolayısıyla normal oda sıcaklığında elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmeleri olanaksızdır. Bu tür katılar, bu nedenle ısı ve elektriği iletmezler. Yalıtkanlar için  $\Delta E$  yasak enerji bandı yaklaşık olarak 8-10 eV mertebesindedir.



Şekil 2.3 Yalıtkanın enerji-bant diyagramı.

### 2.1.2 İletken

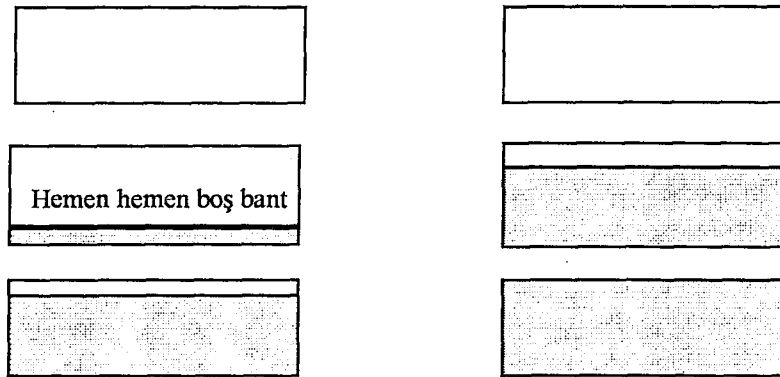
Yasak enerji bölgesi olmayan, yani valans ve iletkenlik bantları üst üste binen katılar iletkendir. Bütün metaller bu gruba girerler. Metallerde fermi enerji düzeyi, çakışan bantların üzerindedir. Bu nedenlere enerji durumlarının yarısı elektronla doludur. İletkenlerde "iş fonksiyonu" bir elektronu fermi enerji düzeyinden söküp, vakum düzeyine çıkarmak, başka bir deyişle, iletken yüzeyi terk etmeye hazır duruma getirmek için verilmesi gereken enerji olarak tanımlanır.



Şekil 2.4 İletkenin enerji-bant diyagramı.

### 2.1.3 Yarıiletken

Yarıiletkenlerde, iletkenlik ve valans bantları arasındaki enerji aralığı ne metallerde görüldüğü kadar dar, ne de yalıtkanlarda olduğu kadar geniştir. Bu nedenle elektronlar, normal oda sıcaklığında valans bandından iletkenlik bandına geçebilirler ve dolayısıyla zayıf iletkenlik sağlayabilirler. Yarıiletkenin iletkenliği genellikle metalinkinden daha küçüktür. Çünkü iletkenlik, elektron ve boşluk yoğunluğuna bağlıdır. Bütün yarıiletkenler mutlak sifira yaklaşan sıcaklıklarda ideal bir yalıtkan olarak davranırlar.



Şekil 2.5 Soldaki yarıiletken sonlu bir sıcaklıktadır ve yarıiletken içindeki taşıyıcılar ısısal yolla uyarılmıştır. Sağdaki yarıiletkenin içindeki kirlilikler nedeniyle elektronu eksiktir.



Kristal yapıya sahip olan bir yarıiletkenin iletkenliği, sadece kovalent bağların kopmasından ileri geliyorsa, bu malzemeye has yarıiletken denir. Kristal içinde bulunan bazı atomlar yasak enerji bandı içinde enerji seviyeleri meydana getirebilirler ve bu, elektriksel iletkenliğin artmasına sebep olabilir. Bu tip iletimin baskın olduğu malzemelere has olmayan yarıiletkenler denir.

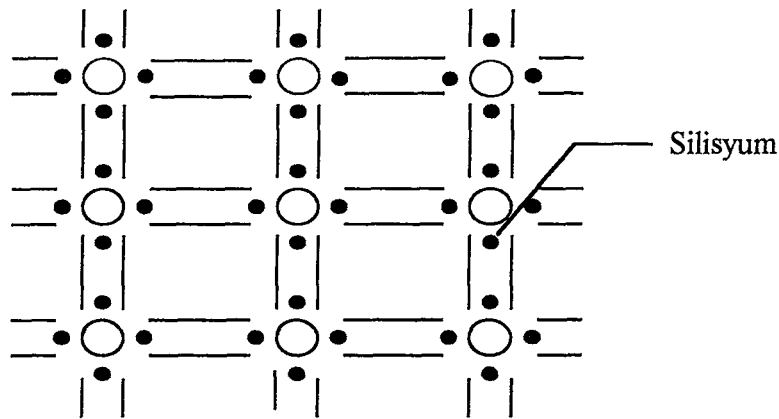
Tablo.2.1 'de Silisyum'un bazı özellikleri verilmiştir. Leblebici (1989)

Özellik	Silisyum	Birim
Atom numarası	14	
Atom ağırlığı	28,1	
Yoğunluk	2,40	$\text{g.cm}^{-3}$
Dielektrik katsayısı	12	
Yasak bölge genişliği	1,12	eV
300 K'de $n_i$	$\approx 1,6 \cdot 10^{10}$	$\text{cm}^{-3}$
300 K'de has öz direnç	$\approx 230000$	ohm.cm

## 2.2. Donorlar (Vericiler) ve Akseptorlar (Alıcılar)

Saf Silisyum ve Germanyum, bir yalıtkan gibi davranır. Silisyum ve Germanyum 4 değerlik elektronuna sahiptir. Saf Silisyumun kristal yapısı Şekil 2.6' da gösterilmiştir.

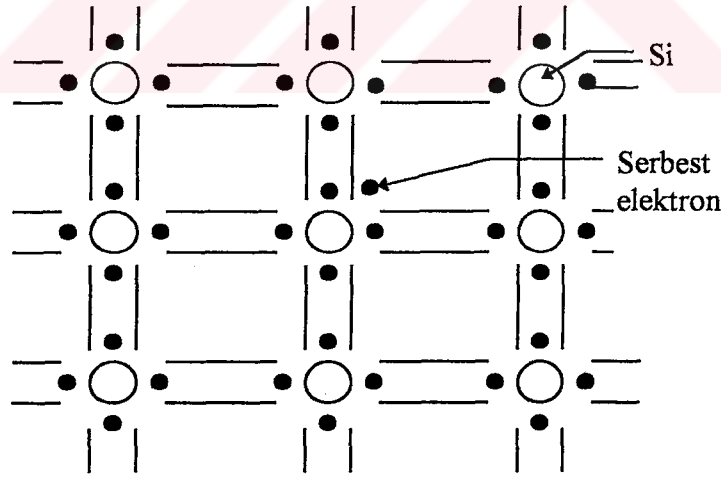
Silisyum atomları elektronlarını ikişer ikişer ortak kullanarak kovalent bağ oluştururlar. Bu durumda Silisyumun serbest elektronu olmadığından yalıtkan gibi düşünebiliriz. Germanyumun da durumu aynıdır.



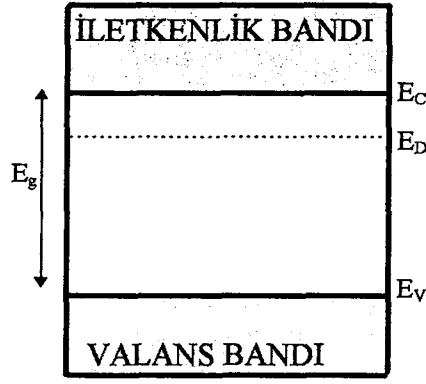
Şekil 2.6. Saf silisyum atomlarının kovalent bağları.

### 2.2.1 Donorlar

Saf Silisyum kristaline 5.grup elementlerinden bir atomu (örn. Antimon-Sb) karıştırırsak, Sb atomunun 5 serbest elektronu olduğundan Silisyum atomları ikişer elektron ortaklaşa kullanarak kovalent bağlarını tamamlayacak ve Sb atomunun 1 elektronu herhangi bir bağ yapmayacaktır. Bağ yapmayan bu elektron, serbest elektrondur. Bu elektron kristal içinde serbest olarak dolaşacak ve kristale elektriksel olarak bir iletkenlik sağlayacaktır. Sb atomu kristale bir elektron verdiği için donör (verici) ve elde edilen yarı iletkene n-tipi yarıiletken denir. Kristal net negatif yüke sahip olduğu için n harfi ile gösterilir. Bu 5.elektronu Sb atomundan koparmak için gerekli enerji, Si için 0,05eV kadardır. Sb atomuna yabancı atom denilmektedir. Eğer donör, kristale aşılırsa Şekil 2.8' de görüldüğü gibi hemen iletkenlik bandının altına enerji seviyelerinin ilave edilmesine sebep olur. Bu enerji seviyelerine donör enerji seviyeleri denir. Yeni ilave edilen enerji seviyeleri, sürekli olmayan kesikli enerji seviyeleridir. Çünkü aşılana yabancı atomlar, kristal yapısından çok uzaktadırlar ve birbirleriyle etkileşimleri çok zayıftır. Hepsisi ısı enerjisi ve başka bir nedenle iletim bandına çıkabilirler.



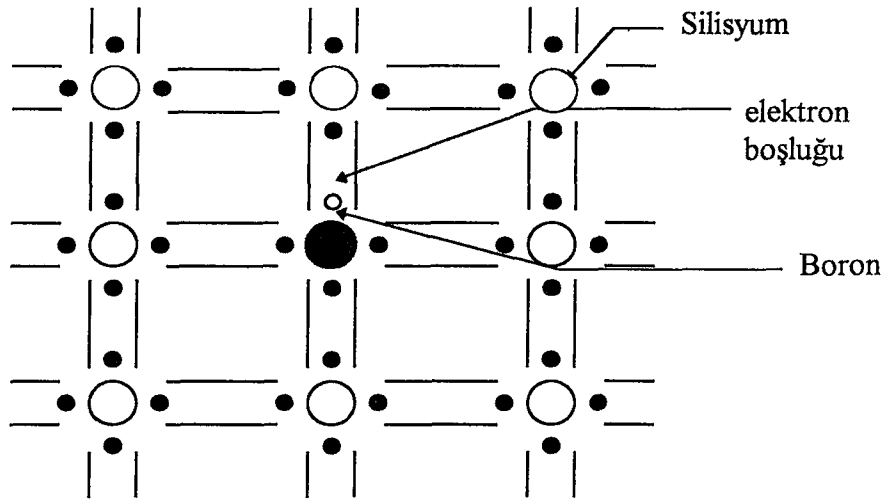
Şekil 2.7. Aşılmalı Si kristali.



Şekil 2.8. Donor enerji seviyeleri.

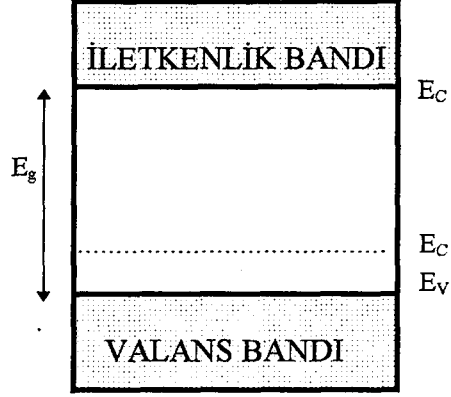
### 2.2.2. Akseptorlar

Saf Silisyum kristaline periyodik cetvelin 3.grup elementlerinden Boron, Galyum, İndiyum atomlarından birini aşılırsak, Boron atomunun 3 serbest elektronu olduğundan, Boron'un 3 elektronu kovalent bağı tamamlar ve kovalent bağın birinde bir eksik ortaya çıkar. (Şekil 2.9) Boron atomu, son kovalent bağını yapabilmek için, komşu Silisyum atomunun bir elektronunu alarak kristalin içinde bir boşluk hareketini sağlayacaktır. Boşluk, yük bakımından pozitif bir yüke eşdeğerdir. Bu durumda kristalin bir pozitif yük hareketi ortaya çıkar. Boron atomu bir elektron aldığı için, buna Akseptor (alıcı) atom denir. Yeni yarıiletken p-tipi yarıiletken denir. Kristal, net yük olarak pozitif olduğu için p harfi ile gösterilir.



Şekil 2.9. Boron ile aşılanmış Silisyum kristali.

Akseptor atomları saf bir yarıiletkeni aşılandığı zaman, bu atomlar hemen valans bandının üzerinde, kesikli enerji seviyeleri yaratırlar. (Şekil 2.10) Az bir enerji ile valans bandındaki bir elektron, bu enerji seviyelerine geçebilir. Sonuçta, valans bandını terk eden elektronlar, geride boşlukları bırakırlar.



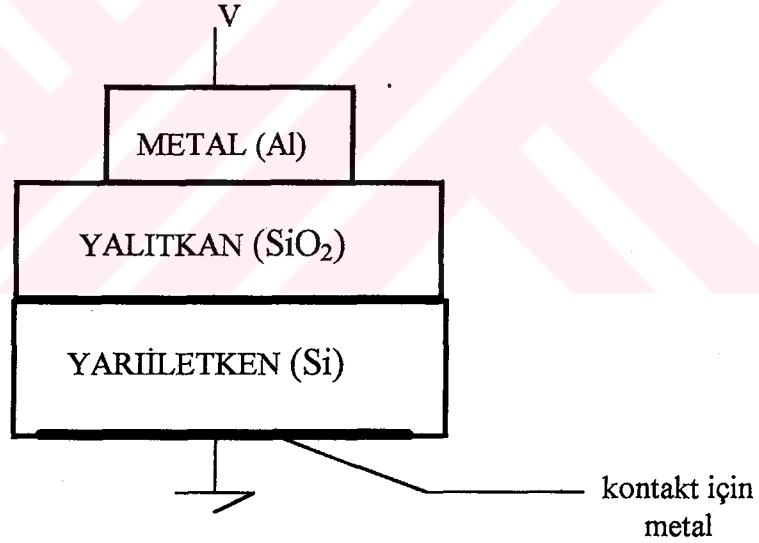
Şekil 2.10. Akseptor enerji seviyeleri.

### BÖLÜM 3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR

Gerçek hayatta üretilen bir MOS'un yapısına geçmeden önce, İdeal bir MOS yapı ele alınacaktır. İdeal MOS yapısı anlatıldıktan sonra, bu yapıya dışarıdan uygulanacak bir potansiyelin metal, yarıiletken arayüzündeki bant yapısına etkileri incelenecektir.

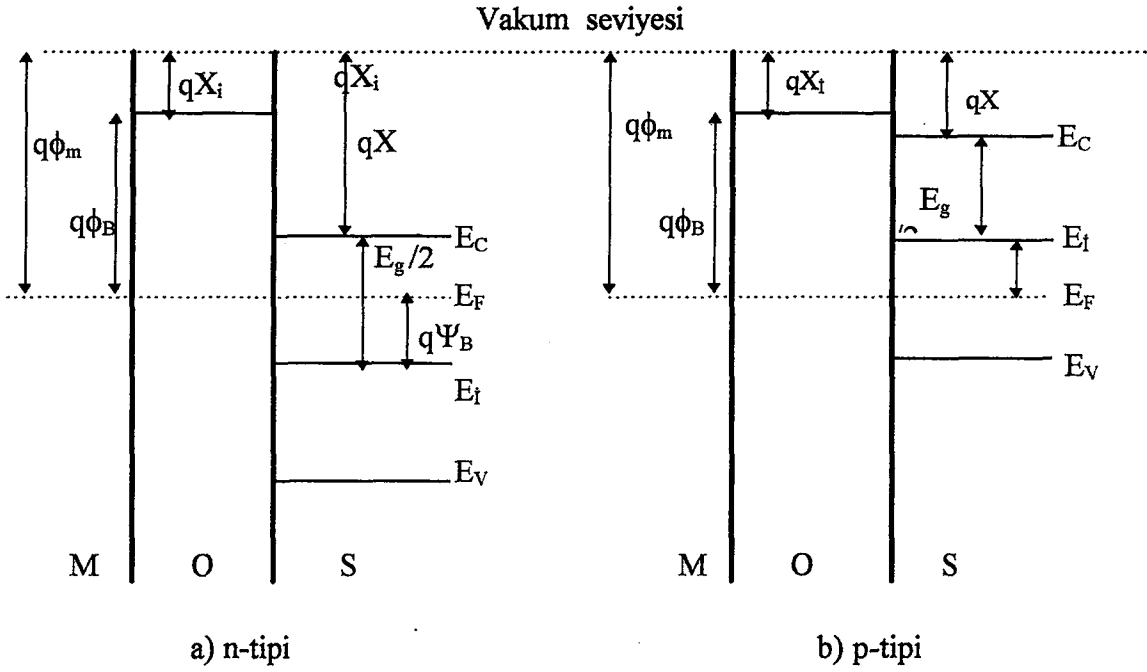
#### 3.1 İdeal MOS Diyot

Metal-Oksit-Yarıiletken yapıları kısaca MOS yapı denir. Bir MOS yapı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu MOS yapıda üst tarafta bulunan metal, Alüminyumdur. Yarıiletken maddesi olarak Silisyum seçilmiştir. Kullanılan oksit ise Silisyumdioksittir. En alt kısımda kontak gerçekleştirilebilmek için metal kaplanmıştır. Bu metal de Alüminyumdur.



Şekil 3.1. MOS yapı

Şekil 3.1'de  $V$ , MOS yapıya uygulanan potansiyel farkıdır. MOS yapıya bir potansiyel farkı uygulanmadığı zaman ( $V = 0$ ), yapının enerji bant diyagramları Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Şekil 3.2.a.'da MOS yapıda kullanılan yarıiletken, n-tipi malzeme; Şekil 3.2.b.'de ise yarıiletken p-tipi malzemedir.



Şekil 3.2.(a-b)  $V=0$  da ideal bir MOS diyotun enerji bant diyagramı.

Burada;

$\phi_m$  = Metalin iş fonksiyonu,

$X$  = Yarıiletken elektron ilgi'si (Afinite )

$X_i$  = Oksitin elektron ilgi'si,

$E_g$  = Bant aralığı,

$\phi_B$  = Metal ve oksit arasındaki potansiyel engeli,

$\Psi_B$  = Fermi seviyesi ile has fermi seviyesi arasındaki potansiyel farkı.

İdeal bir MOS diyotta aşağıdaki şartlar geçerlidir;

1) Potansiyel farkı uygulanmadığı zaman ( $V=0$ ); Metalin iş fonksiyonu  $\phi_m$  ile yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\phi_s$  arasında fark yoktur. Diğer bir deyişle, iş fonksiyonları farkı  $\phi_{mS}$ , sıfır olur.

$$\text{n-tipi için} \quad \phi_{mS} \equiv \phi_m - ( X + E_g / 2q - \Psi_B ) = 0$$

(3.1)

$$\text{p-tipi için} \quad \phi_{mS} \equiv \phi_m - ( X + E_g / 2q + \Psi_B ) = 0$$

Bu şart, düz bant şartı olarak bilinir.

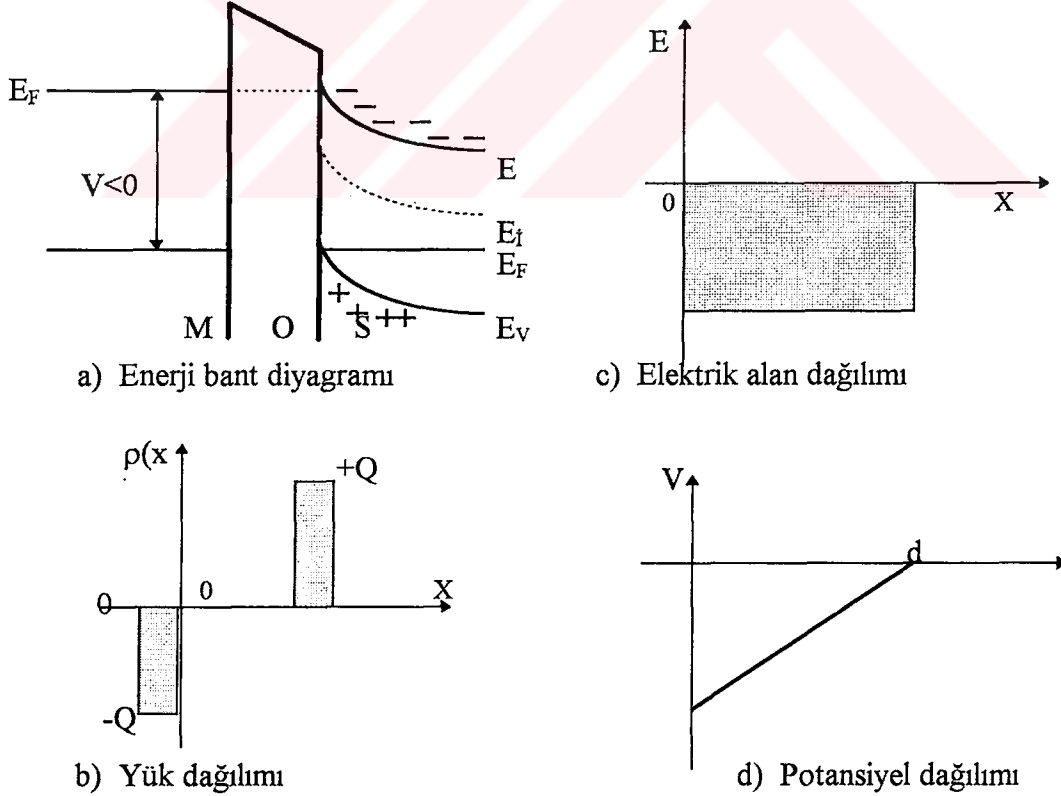
2) Herhangi bir besleme durumunda, yarıiletken yapıda bulunan yüklere eşit miktarda fakat ters işaretli yükler, metalin yarıiletken yüzeyine yakın yüzeylerde yer alır.

3) Herhangi bir DC besleme durumunda veya yalıtkan direncinin sonsuz olduğunda, yalıtkandan taşıyıcı geçişi olmaz. Sze (1981)

İdeal bir MOS diyota pozitif veya negatif voltaj uygulandığında yarıiletken yüzeyinde üç durum meydana gelir. Bunlar p-tipi için şu şekildedir.

### 3.1.1. Yığılma

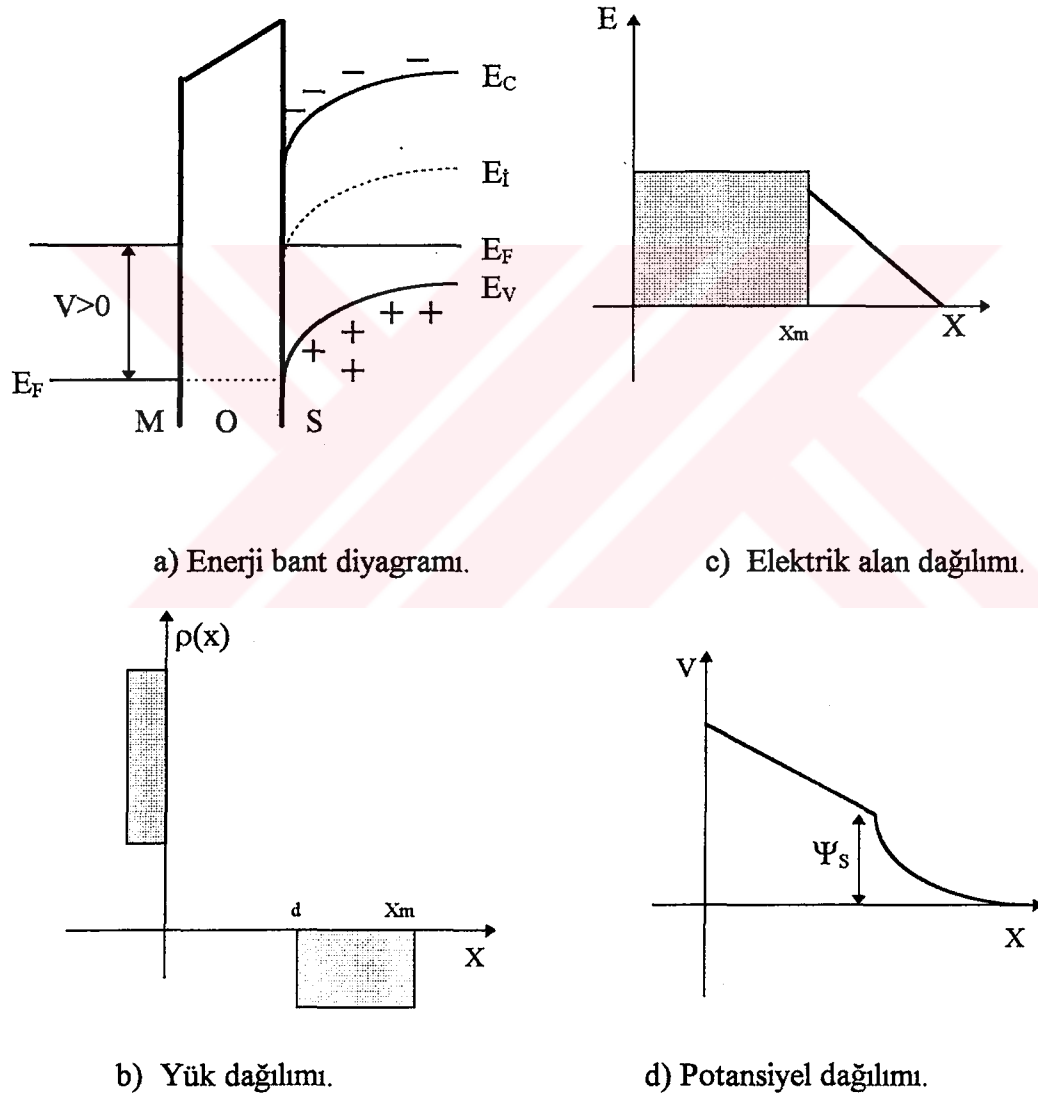
Metal plakaya negatif voltaj uygulandığı zaman; Valans bandı, fermi seviyesine kadar yukarı doğru kıvrılır. İdeal bir MOS diyot için, yapı içinde akım akışı olmaz. Böylece yarıiletkende fermi seviyesi sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu, enerji farkı ( $E_F - E_V$ ) ile eksponensiyel olarak bağımlıdır. Valans bandının fermi seviyesi ile sınırlandırılması, yarıiletken yakınında çoğunluk taşıyıcıları (boşluklar)'ın yığılmasına yol açar. Simmons and Wei (1972)



Şekil 3.3. Yığılma durumu.

### 3.1.2 Fakirleşme

Metal plakaya küçük pozitif voltaj uygulandığı zaman; Oksit içinde oluşan elektrik alan, yarıiletken yüzeyindeki boşlukları yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindeki boşluk yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki boşluk yoğunluğundan az olur. Bantlar aşağı doğru bükülmeye başlar ve çoğunluk taşıyıcıları (boşluklar) azalır. Yarıiletken yüzeyine yakın bölgede  $X_m$  genişliğindeki kısımda oluşan bu bölgeye fakirleşme bölgesi denir. Simmons and Wei (1972)

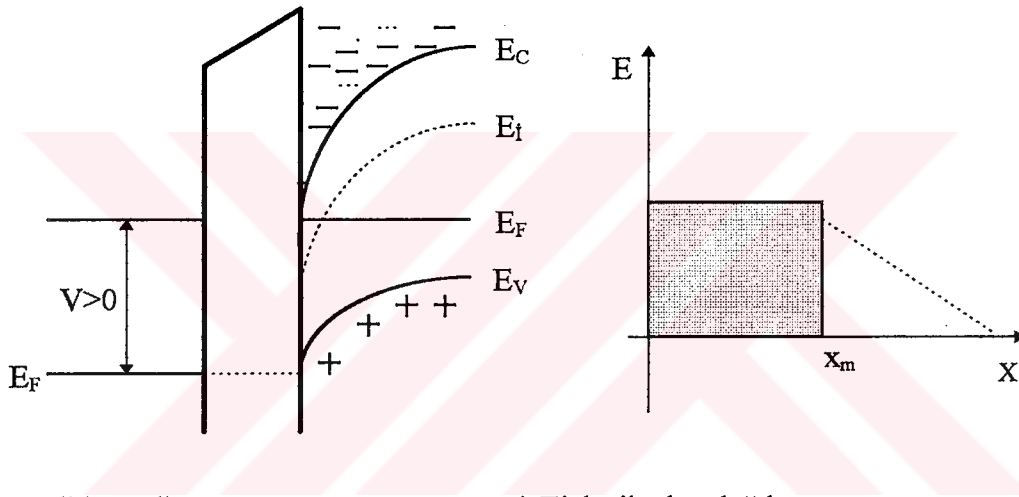


Şekil 3.4. Fakirleşme durumu.



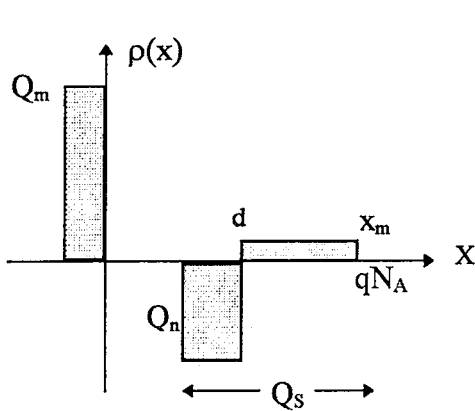
### 3.1.3. Evirtim

Metal plakaya büyük pozitif voltaj uygulandığı zaman; Bantların aşağı doğru bükülmesi devam eder. Has fermi seviyesi ( $E_i$ ), fermi seviyesine ( $E_F$ ) eşit olduğu anda, yarıiletken yüzeyindeki boşluk yoğunluğu, elektron yoğunluğuna eşit olur. Bu durumda yarıiletken yüzeyi, has yarıiletken gibi davranır. Uyguladığımız voltajı biraz daha arttırsak has fermi seviyesi ( $E_i$ ) fermi seviyesini ( $E_F$ ) geçer. Bu durumda yüzeydeki azınlık taşıyıcıları (elektronlar) sayısı, boşlukların sayısından daha fazla olur. Yarıiletken yüzeyi artık n-tipi yarıiletken gibi davranır. Böylece yüzey evirtilmiş olur. Simmons and Wei (1972)

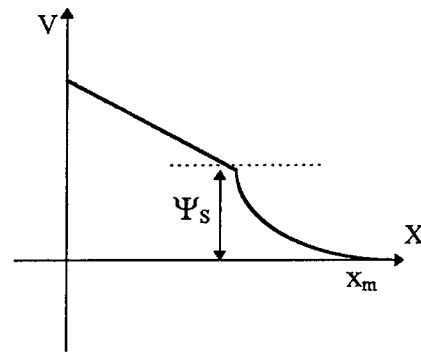


a) Enerji bant diyagramı.

c) Elektrik alan dağılımı.



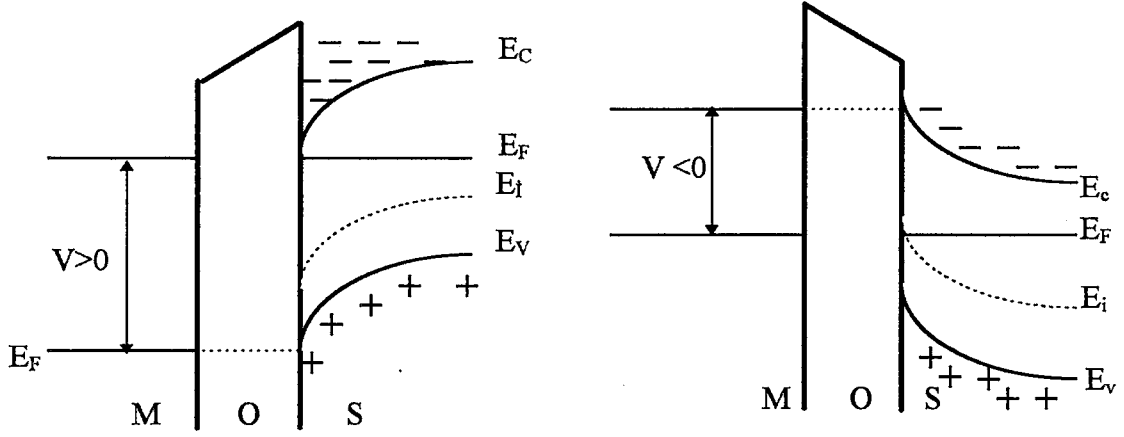
b) Yük dağılımı



d) Potansiyel dağılımı

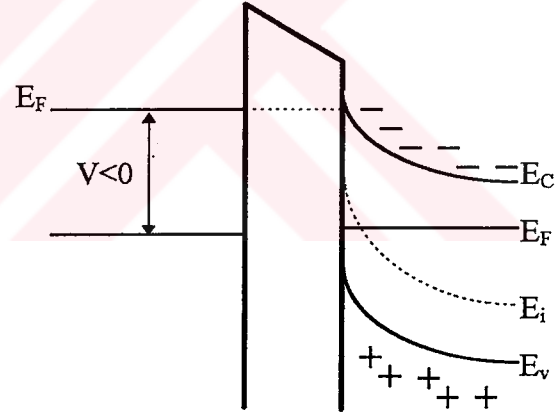
Şekil 3.5. Evirtim durumu.

MOS yapıda, n-tipi yarıiletken kullanıldığı zaman da aşağıdaki üç durum (yığılma, fakirleşme, evirtim) meydana gelir. N-tipi yarıiletken için enerji bant diyagramları Şekil 3.6.'de gösterilmiştir.



a) Yığılma.

b) Fakirleşme.



c) Evirtim.

Şekil 3.6. N-tipi MOS yapı için enerji bant diyagramları.

### 3.2. Yüzey Alan-Yükü Bölgesi

Potansiyelin ( $\Psi$ ) bir fonksiyonu olarak, elektron ve boşluk yoğunluğu şöyledir;

Buradaki  $\Psi$  potansiyeli, herhangi bir potansiyel uygulanma durumunda has fermi seviyesindeki kıvrılma miktarıdır.

$$n_p = n_{po} \exp ( q\Psi / kT) = n_{po} \exp (\beta\Psi) \quad (3.2)$$

$$p_p = p_{po} \exp ( -q\Psi / kT) = p_{po} \exp (-\beta\Psi) \quad (3.3)$$

Burada  $n_{po}$  ve  $p_{po}$  sırasıyla , yarıiletkende bulunan elektronların ve boşlukların denge yoğunluklarıdır. Has yarıiletkende elektron ve boşluk yoğunlukları birbirine eşittir.

Has yarıiletkenin taşıyıcı yoğunluğu  $n_i$  ile gösterilir ve;

$$n_i^2 = n.p \quad (3.4)$$

dir. Bu bağıntı bütün yarıiletkenler için geçerlidir. Has yarıiletkenlerde,  $n_i = n = p$  dir. Her yarıiletkenin kendine ait sabit bir taşıyıcı yoğunluğu vardır. Örnek olarak, 380 °K de Si:  $n_i = 1,6. 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  , Ge:  $n_i = 2,5. 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  dür. Has yoğunluk, sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık arttırılırsa yarıiletkendeki bağları kırmak daha kolay olur. Sıcaklık arttıkça, elektron ve boşluk yoğunlukları artar. Buna bağlı olarak iletkenlik de artar. Sıcaklığa bağlı olarak has yoğunluk;

$$n_i^2 = A_0 T^3 \exp (-E_{g0} / kT) \quad (3.5)$$

ile verilir. Burada  $E_{g0}$  0°K deki yarıiletkenin yasak enerji bandı genişliğidir ve birimi eV dir. Boltzman sabiti k'nın birimi eV/K olarak alınır.  $A_0$  yarıiletkene bağlı bir sabit olup sıcaklıktan bağımsızdır.

N-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları elektronlar, azınlık taşıyıcıları boşluklardır. P-tipi yarı iletkenlerde ise çoğunluk taşıyıcıları boşluklar, azınlık taşıyıcıları elektronlardır.

P-tipi yarıiletken için, bant aşağı doğru kıvrıldığı zaman  $\Psi$  potansiyeli pozitiftir. Burada,  $\beta = q/kT$  dir. Yarıiletkenin yüzeyinde  $\Psi = \Psi_s$  dir ve yüzeyde yoğunluklar şöyle olur;

$$n_s = n_{po} \exp(\beta \Psi_s) \quad (3.6)$$

$$p_s = p_{po} \exp(-\beta \Psi_s) \quad (3.7)$$

Potansiyeli, uzaklığın bir fonksiyonu olarak bulmak için, tek boyutlu Poisson denkleminde başvururuz.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (3.8)$$

burada  $\epsilon_s$ , yarıiletkenin geçirgenliği,  $\rho(x)$  ise toplam alan yükü yoğunluğudur.

$$\rho(x) = q (N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p) \quad (3.9)$$

burada,  $N_D^+$ , iyonize olmuş donörlerin yoğunluğu,  $N_A^-$  ise iyonize olmuş akseptörlerin yoğunluğudur. Yarıiletken yüzeyinden uzak bölgelerin büyük kısmında yük nötrallığı vardır. Böylece  $\rho(x) = 0$  ve  $\Psi = 0$  olur. Bu şartlar altında, Denklem (3.9) dan aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$N_D^+ - N_A^- = n_{po} - p_{po} \quad (3.10)$$

Denklem (3.2) ve (3.3) ' den

$$p_p - n_p = p_{po} \exp(-\beta \Psi) - n_{po} \exp(\beta \Psi) \quad (3.11)$$

$$\rho(x) = q (n_{po} - p_{po} + p_p - n_p) \quad (3.12)$$

$$\rho(x) = q [n_{po} - p_{po} + p_{po} \exp(-\beta \Psi) - n_{po} \exp(\beta \Psi)] \quad (3.13)$$

$$\rho(x) = q [p_{po} (e^{-\beta \Psi} - 1) - n_{po} (e^{\beta \Psi} - 1)] \quad (3.14)$$

Sonuç olarak Poisson denklemi,

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{q}{\epsilon_s} [ p_{po} (e^{-\beta \Psi} - 1) - n_{po} (e^{\beta \Psi} - 1) ] \quad (3.15)$$

$$\int^{\partial \Psi / \partial X} (\partial \Psi / \partial X) d (\partial \Psi / \partial X) = E^2 / 2 = -q / \epsilon_s \int^{\Psi} [ p_{po} (e^{-\beta \Psi} - 1) - n_{po} (e^{\beta \Psi} - 1) ] d \Psi \quad (3.16)$$

$$E^2 / 2 = (q / \epsilon_s) p_{po} [ \beta^{-1} e^{-\beta \Psi} - \beta^{-1} + \Psi ] + (q / \epsilon_s) n_{po} [ \beta^{-1} e^{\beta \Psi} - \beta^{-1} - \Psi ] \quad (3.17)$$

Elde ettiğimiz bu denklemi düzenlersek,

$$E^2 = (2 q p_{po} / \beta \epsilon_s) [ (e^{-\beta \Psi} + \beta \Psi - 1) + n_{po} / p_{po} (e^{\beta \Psi} - \beta \Psi - 1) ] \quad (3.18)$$

$$E^2 = (2 k T / q)^2 (q p_{po} \beta / 2 \epsilon_s) [(e^{-\beta \Psi} + \beta \Psi - 1) + (n_{po} / p_{po}) (e^{\beta \Psi} - \beta \Psi - 1)] \quad (3.19)$$

Bu eşitlikte ;

$$L_D \equiv \sqrt{(2 k T \epsilon_s / p_{po} q^2)} \equiv \sqrt{(2 \epsilon_s) (q p_{po} \beta)} \quad (3.20)$$

$$F(\beta \Psi, n_{po} / p_{po}) = [ (e^{-\beta \Psi} + \beta \Psi - 1) + n_{po} / p_{po} (e^{\beta \Psi} - \beta \Psi - 1) ]^{1/2} \geq 0 \quad (3.21)$$

burada  $L_D$ , boşlukların Debye uzunluğudur. Buna göre elektriksel alan;

$$E = - \partial \Psi / \partial X = \pm \frac{2 k T}{q L_D} = F(\beta \Psi, n_{po} / p_{po}) \quad (3.22)$$

olur .Burada,  $\Psi > 0$  için işaret pozitif,  $\Psi < 0$  için işaret negatif alınır. Yüzeydeki potansiyele  $\Psi = \Psi_s$  dersek, yüzeydeki elektriksel alan şu şekilde olur;

$$E_s = \pm \frac{2 k T}{q L_D} F(\beta \Psi_s, n_{po} / p_{po}) \quad (3.23)$$

Gauss kanununu kullanarak, birim alandaki alan yükünü bulabiliriz.

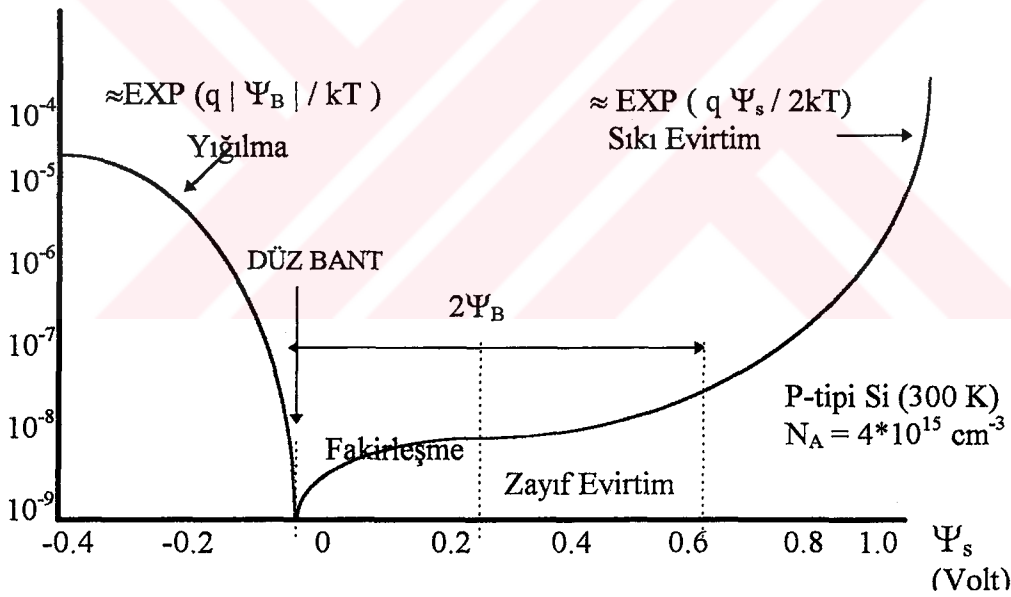
$$Q_s = \epsilon_s E_s = \pm \frac{2 \epsilon_s k T}{q L_D} F(\beta \Psi_s, n_{po} / p_{po}) \quad (3.24)$$

$\Psi$  potansiyel, sıfır ile  $\Psi_s$  (yüzey potansiyeli) arasındayken, birim alandaki boşluk yoğunluğu ( $\Delta p$ ) ve elektron yoğunluğu ( $\Delta n$ )'nun değişimi için aşağıdaki eşitlikler geçerlidir.

$$\Delta p = p_{po} \int (e^{-\beta\Psi} - 1) dx = \frac{qn_{po} L_D}{2kT} \int \frac{(e^{-\beta\Psi} - 1)}{F(\beta\Psi, n_{po}/p_{po})} d\Psi \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (3.25)$$

$$\Delta n = n_{po} \int (e^{\beta\Psi} - 1) dx = \frac{q n_{po} L_D}{2kT} \int \frac{(e^{\beta\Psi} - 1)}{(\beta\Psi, n_{po}/p_{po})} d\Psi \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (3.26)$$

Şekil 3.7.'de, yüzey potansiyeli ( $\Psi_s$ ) fonksiyonuna bağlı alan yükü yoğunluğunun tipik değişimi gösterilmiştir. Bu şekil oda sıcaklığında ve  $N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  olan p-tipi silisyum için geçerlidir.



Şekil 3.7. Yarıiletken içinde alan yük yoğunluğunun yüzey potansiyeli ile değişimi.

$\Psi_B$ , fermi seviyesi  $E_F$  ile has fermi seviyesi  $E_i$  arasındaki farktır. Sze (1972)

Şekilde;

$\Psi_s < 0$  için,  $Q_s > 0$  (Yığılma bölgesi)

$\Psi_s = 0$  için,  $Q_s = 0$  (Düz bant şartı)

$\Psi_B > \Psi_s > 0$  için,  $Q < 0$  (Fakirleşme)

$\Psi_s \gg \Psi_B$  için, (Evirtim)

$$\Psi_s (\text{inv}) \cong 2\Psi_B \cong (2kT/q) \ln(N_A / n_i) \quad (3.27)$$

Diferansiyel sığa ise;

$$C_D = \partial Q_s / \partial \Psi_s \quad (3.28)$$

Eşitlik (3.24)'nın  $\Psi_s$ 'e göre diferansiyeli alınır;

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{L_D} \frac{[1 - e^{-\beta\Psi_s} + (n_{po} / p_{po}) (e^{\beta\Psi_s} - 1)]}{F(\beta\Psi_s, n_{po} / p_{po})} \text{ farad/cm}^2 \quad (3.29)$$

Sonuç olarak;

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{L_D} \frac{[1 - e^{-\beta\Psi_s} + (n_{po} / p_{po}) (e^{\beta\Psi_s} - 1)]}{[(e^{-\beta\Psi_s} + \beta\Psi_s - 1) + (n_{po} / p_{po}) (e^{\beta\Psi_s} - \beta\Psi_s - 1)]^{1/2}} \quad (3.30)$$

### 3.3. İdeal MOS Eğrisi

Örnek olarak p-tipi yarıiletkenlerde evirtim bölgesi için ideal MOS yapının bant diyagramını ele alalım. (Şekil 3.5) Bu sistemde yük nötralliği vardır. Böylece;

$$Q_M = Q_n + qN_A W = Q_s \quad (3.31)$$

burada;  $Q_M$ , metaldeki birim alanda bulunan yükler,

$Q_n$ , evirtim bölgesinde, birim alandaki elektron,

$qN_A$ , alan yükü genişliği  $W$  olduğu zaman, alan yükünde birim alandaki iyonize olmuş akseptörler,

$Q_s$ , yarıiletkende birim alandaki toplam yük sayısıdır. Zaininger and Holmes (1967) Sisteme voltaj uygulandığında, voltajın bir kısmı yalıtıkana, bir kısmı silisyuma ve bir kısmı da metal ve silisyumun iş fonksiyonu olarak dağılır.

$$V = V_i + \Psi_s + \phi_{ms} \quad (3.32)$$

burada  $V_i$ , yalıtıkandaki potansiyel farkıdır.

$$V_i = Q_s \cdot d / \epsilon_i \equiv (Q_s / C_i) \quad (3.33)$$

MOS sistemde iki kapasitör görülmektedir ve bunlar seri olarak bağlıdır. Toplam sığa ise;

$$C = \frac{C_i \cdot C_D}{C_i + C_D} \quad \text{farad/ cm}^2 \quad (3.34)$$

burada;  $C$ , toplam sığayı,

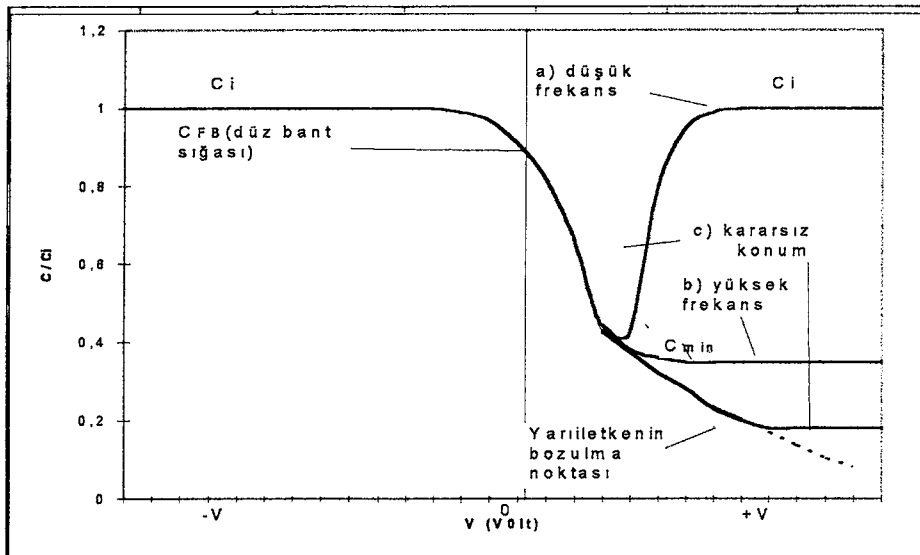
$C_i$ , yalıtkanın sığasını ( $= \epsilon_i / d$ )

$C_D$ , silisyumun alan yük sığasını göstermektedir.

Burada verilen sığalar birim alandaki sığalardır. Düz bant şartında ( $\Psi_s = 0$ ), toplam sığa aşağıdaki gibidir.

$$C_{FB} (\Psi_s=0) = \frac{\epsilon_i}{d + 1/\sqrt{2(\epsilon_i / \epsilon_s)} L_D} = \frac{\epsilon_i}{d + (\epsilon_i / \epsilon_s)(kT\epsilon_s / p_{po}q^2)^{1/2}} \quad (3.35)$$

burada,  $\epsilon_i$  ve  $\epsilon_s$  sırasıyla yalıtkan ve yarıiletkenin geçirgenliğidir.



Şekil 3.8 . MOS sistemde sığa - potansiyel eğrisi. a) Düşük frekans. b) Yüksek frekans. c) Kararsız konum



### 3.3.1 Eğrinin Tanımlanması

Sol tarafta (negatif voltaj) boşlukların yığılması vardır. Toplam sığa, yalıtıkandaki kapasitörün sığasına hemen hemen eşittir. Negatif voltaj yeterince yükseltildiğinde; Yarıiletken yakınında fakirleşme bölgesi oluşur. Burada yalıtkan ile seri bağlanmış dielektrik şeklinde yeni bir kapasitör oluşur. Böylece toplam sığa azalır ve minimum noktasına gider. Fakirleşme bölgesinde potansiyel dağılımı şu şekildedir.

$$\Psi = \Psi_s (1 - X/W)^2 \quad (3.36)$$

burada yüzey potansiyeli şu şekilde verilir.

$$\Psi_s = qN_A W^2 / 2\epsilon_s \quad (3.37)$$

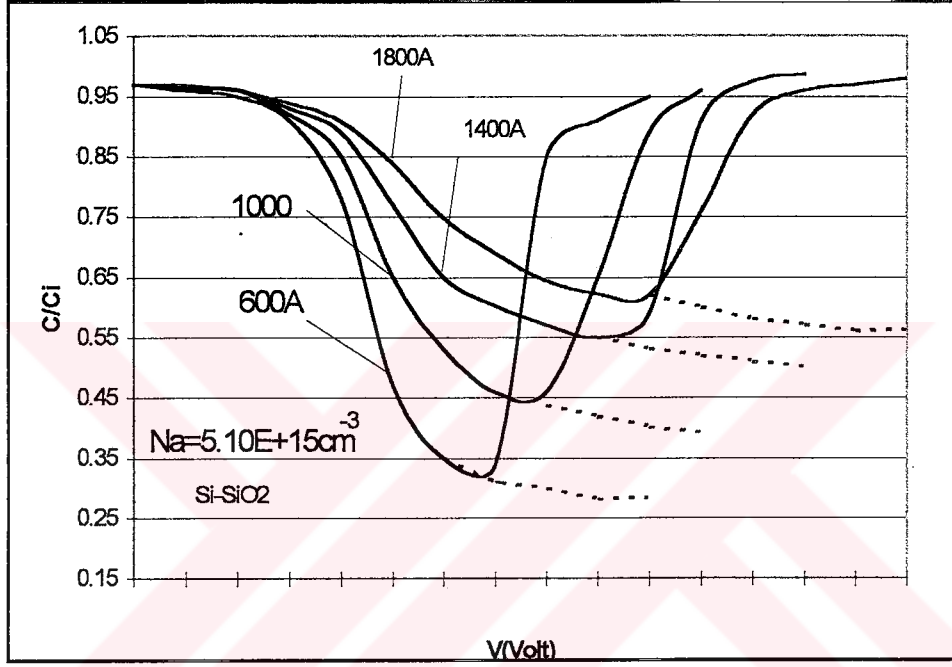
Uygulanan voltaj arttırıldığında,  $\Psi_s$  ve  $W$  de artar. Böylece sıkı evirtim oluşur. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, ideal bir MOS sistemde sıkı evirtim  $\Psi_s(inv) \cong 2\Psi_B$ ’de başlar. Sıkı evirtim olduğunda, fakirleşme tabakasının kalınlığı maksimum olur. Bant kıvrılmasındaki küçük bir artış, evirtim tabakası içinde yük yoğunluğunun büyük ölçüde artmasına sebep olur. Bununla beraber, yüzey fakirleşme bölgesinin maksimum genişliği  $W_m$ , Denklem (3.27) ve (3.36) ile şu şekilde bulunur.

$$W_m \cong \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_s(inv)}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4\epsilon_s kT \ln(N_A / n_i)}{q^2 N_A}} \quad (3.38)$$

Şekil (3.10)’da  $W_m$  ile kirlilik yoğunluğu arasındaki ilişki  $S_i$  için gösterilmiştir. Burada  $N_B$ , p-tipi yarıiletken için  $N_A$ ’ya, n-tipi yarıiletken için  $N_D$ ’ye eşittir. Böylece toplam sığa şöyle olur.

$$C'_{\min} = \frac{\epsilon_i}{d + (\epsilon_i / \epsilon_s) W_m} \quad (3.39)$$

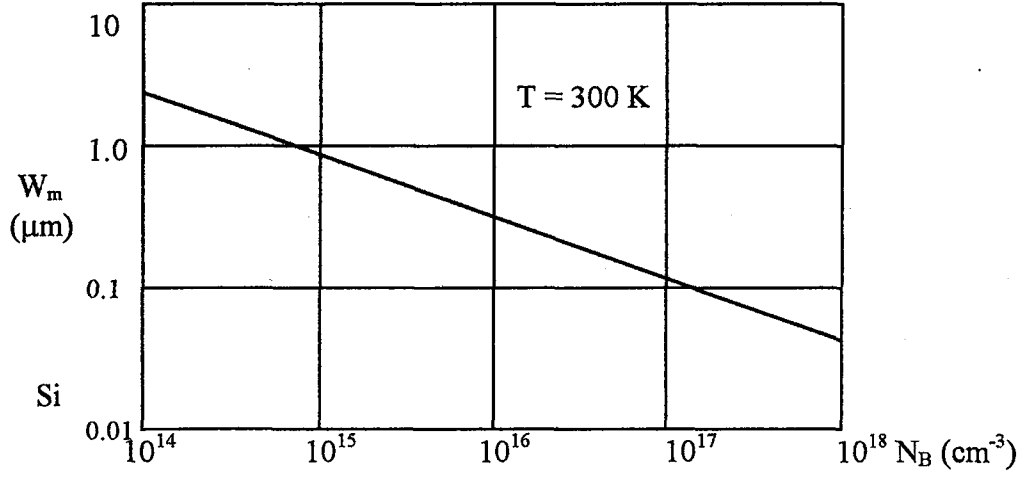
Oksit kalınlıkları veya yarıiletken içindeki katkı yoğunlukları değiştirilirse, MOS sisteminin eğrileri de değişir. Şekil 3.9 de p-tipi silisyumun değişik oksit kalınlıkları için eğrileri gösterilmiştir. Grove (1965)



Şekil 3.9. Değişik oksit kalınlıkları için ideal MOS diyot'un C-V eğrisi. Kesiksiz çizgiler, düşük frekans. Kesikli çizgiler, yüksek frekans.

Şekilde görüldüğü gibi oksit film ince olursa, sığa değişimleri daha büyük olur. Bu durumda C(V) eğrisinden faydalanarak aşağıdakileri bulabiliriz. Gray (1969)

- $C_o$  dan, oksit kalınlığını,
- Yüksek frekans  $C_{\min}$  dan n-tipi veya p-tipi olduğunu veya kirlilik yoğunluğunu,
- Önemli oksit kusurlarını,
- Evirtim tabakasının yerini.

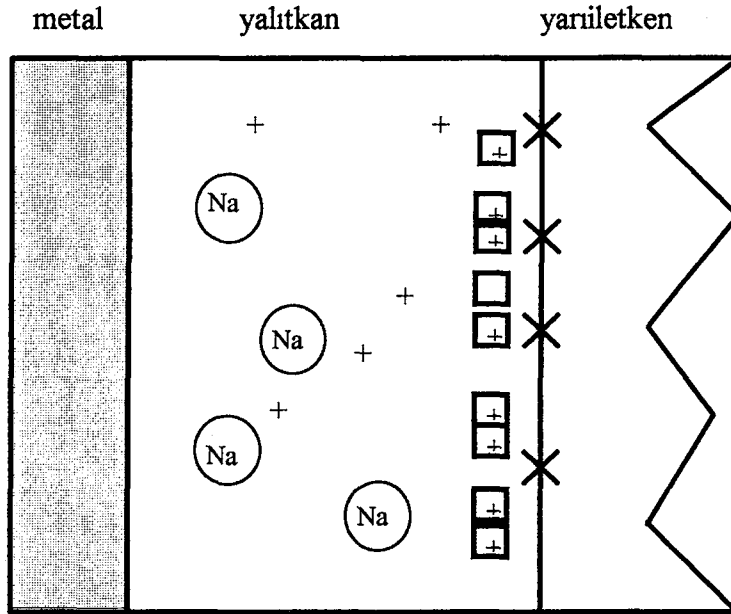


Şekil 3.10 Kirlilik yoğunluğu ile  $W_m$  arasındaki ilişki.

### 3.4. İdeal Olmayan MOS Yapı

Gerçek bir MOS diyotta, birçok durum ve yük vardır. Bunlar, ideal MOS karakteristiğine birçok etki yapar. Bu, durum ve yüklerin temel sınıflandırılması Şekil 3.11 de gösterilmiştir. Bunlar:

- × -- Yüzey ve arayüzey durumları.
- -- Sabit yüzey yükleri.
- ⊙ (Na) -- Hareketli iyonlar.
- + -- İyonize olmuş tuzaklar.



Şekil 3.11. İdeal olmayan bir MOS diyotta durum ve yüklerin temel sınıflandırılması.

Burada;

1) Yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinde bulunan ve yasak enerji bölgesi içerisinde, enerji seviyesi oluşturan ve yarıiletkenle çok kısa sürede yük alışverişinde bulunabilen enerji seviyeleri.

2) Yarıiletkenin yüzeyinde veya yakınında ( $\approx 200 \text{ \AA}$ ) yer alan sabit yüzey yükleri. Bu yükler bir elektrik alan içindeyken de hareketsizdir.

3) Yalıtkan içinde yerleşmiş Sodyum iyonu gibi hareketli yükler.

4) Örneğin x-ışını veya  $\gamma$ -radyasyonu ile meydana getirilebilen iyonize olmuş tuzaklar vardır.

### 3.4.1. Yüzey Durumları

Kristalin periyodik yapısının değişmesinden dolayı Silisyumun yasak enerji bölgesinde yeni enerji seviyelerinin oluşması, yüzey durumlarının varlığının bir göstergesidir.

Yüzey durumları, hızlı ve yavaş yüzey durumları olarak ikiye ayrılır. Hızlı durumlar, iletkenlik veya valans bandı ile hızlı bir şekilde yük alışverişine girebilirler ve yalıtkan ile yarıiletken arayüzeyinde yer alırlar. Yavaş durumlar, yük değişimlerini uzun sürede yaparlar.

İncelediğimiz MOS diyotlarda sadece yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinde yüzey ve arayüzey durumlarının var olduğu kabul edilecektir. Bunların sadece hızlı yüzey durumları olmadıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü düşük sıcaklıklarda çok yavaş yüzey durumları gibi davranış gösterirler. Goetzberger (1967)

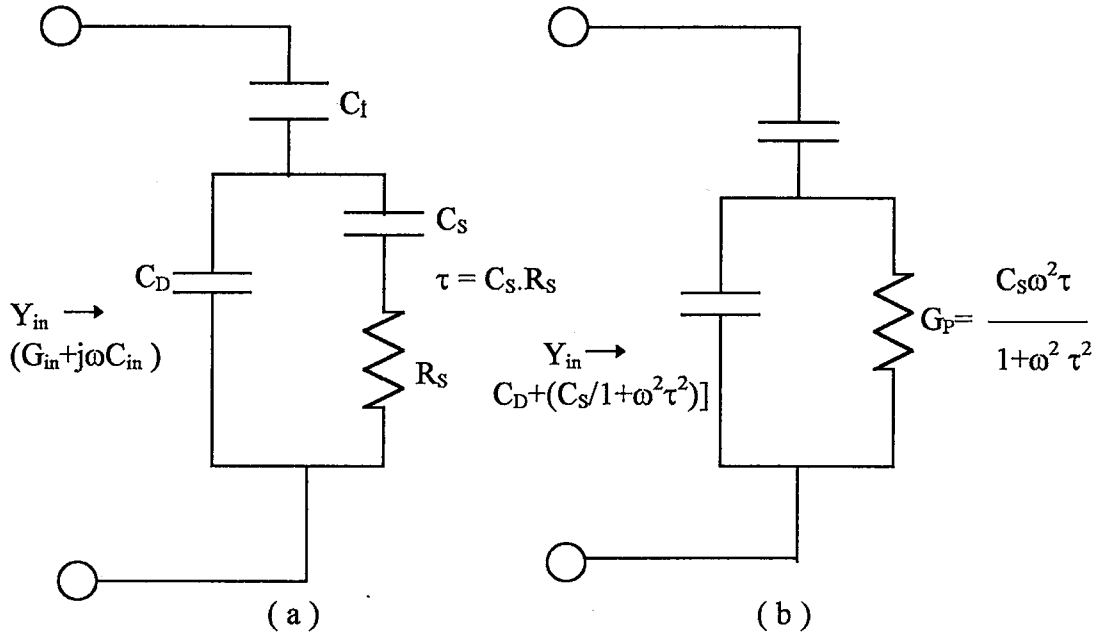
Bir yüzey durumu, eğer nötr veya bir elektron vererek pozitif olmuş ise donör durumudur. Akseptör yüzey durumu ise, nötr veya bir elektron alarak negatif olan durumdur. Bu yüzey durumlarının dağılım fonksiyonu, donör yüzey durumu için;

$$F_{SD}(E_t) = 1 - \frac{1}{1 + (1/g) \exp[(E_t - E_F)/kT]} = \frac{1}{1 + g \exp[(E_F - E_t)/kT]} \quad (3.40)$$

akseptör yüzey durumları için;

$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + (1/g) \exp[(E_t - E_F)/kT]} \quad (3.41)$$

dir. Burada  $E_t$ , yüzey durumunun enerjisi,  $g$ , temel seviye dejeneresidir. Temel seviye dejeneresi, donör için 2, akseptör için 4 tür. Bir MOS diyota voltaj uygulandığında, yüzey seviyeleri, fermi seviyesi sabit kalacak şekilde, iletkenlik ve değerlik bandıyla birlikte aşağı veya yukarı doğru hareket eder. Bu bantlar hareket ederken, fermi seviyesini geçerse yüzey durumlarında yük değişimi meydana gelir. Bu yük değişimi, MOS sığasına etki eder ve ideal MOS eğrisini değiştirir. Bu sistemin devresi Şekil 3.12.a' da gösterilmiştir. Bu şekilde  $C_i$  ve  $C_D$  sırasıyla yalıtkanın sığası ve yariletkenin fakirleşme bölgesinin sığasıdır.  $C_S$  ve  $R_S$ , yüzey durumlarının sığası ve direncidir. Ayrıca  $C_S$  ve  $R_S$ , yüzey potansiyelinin bir fonksiyonudur.  $C_S$  ve  $R_S$  nin çarpımı, yüzey durumlarının ömürleridir. Bu çarpım, yüzey durumlarının frekans davranışını tanımlar. Şekil 3.12.a' daki paralel kollu eşdeğer devre, Şekil 3.12.b' deki gibi frekans bağımlı sığa ( $C_P$ )' nin meydana getirdiği paralel kollu devreye çevrilebilir. Nicollian and Goetzberger (1965)



Şekil 3.12. Yüzey durumlarının etkisini de kapsayan devre.

$$C_P = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.42)$$

burada,  $\tau \equiv C_S.R_S$  dir. Giriş admitansı ( $Y_{in}$ ) şu şekilde verilir.

$$Y_{in} \equiv G_{in} + j\omega C_{in} \quad (3.43)$$

$$G_{in} = \frac{\omega^2 C_S \tau C_1^2}{(C_1 + C_D + C_S)^2 + \omega^2 \tau^2 (C_1 + C_D)^2} \quad (3.44)$$

$$C_{in} = \frac{C_1}{C_1 + C_D + C_S} \left[ C_D + C_S \frac{(C_1 + C_D + C_S)^2 + \omega^2 \tau^2 C_D (C_1 + C_D)}{(C_1 + C_D + C_S)^2 + \omega^2 \tau^2 (C_1 + C_D)^2} \right] \quad (3.45)$$

### 3.4.2 Yüzey Yükleri ve Alan Yükleri

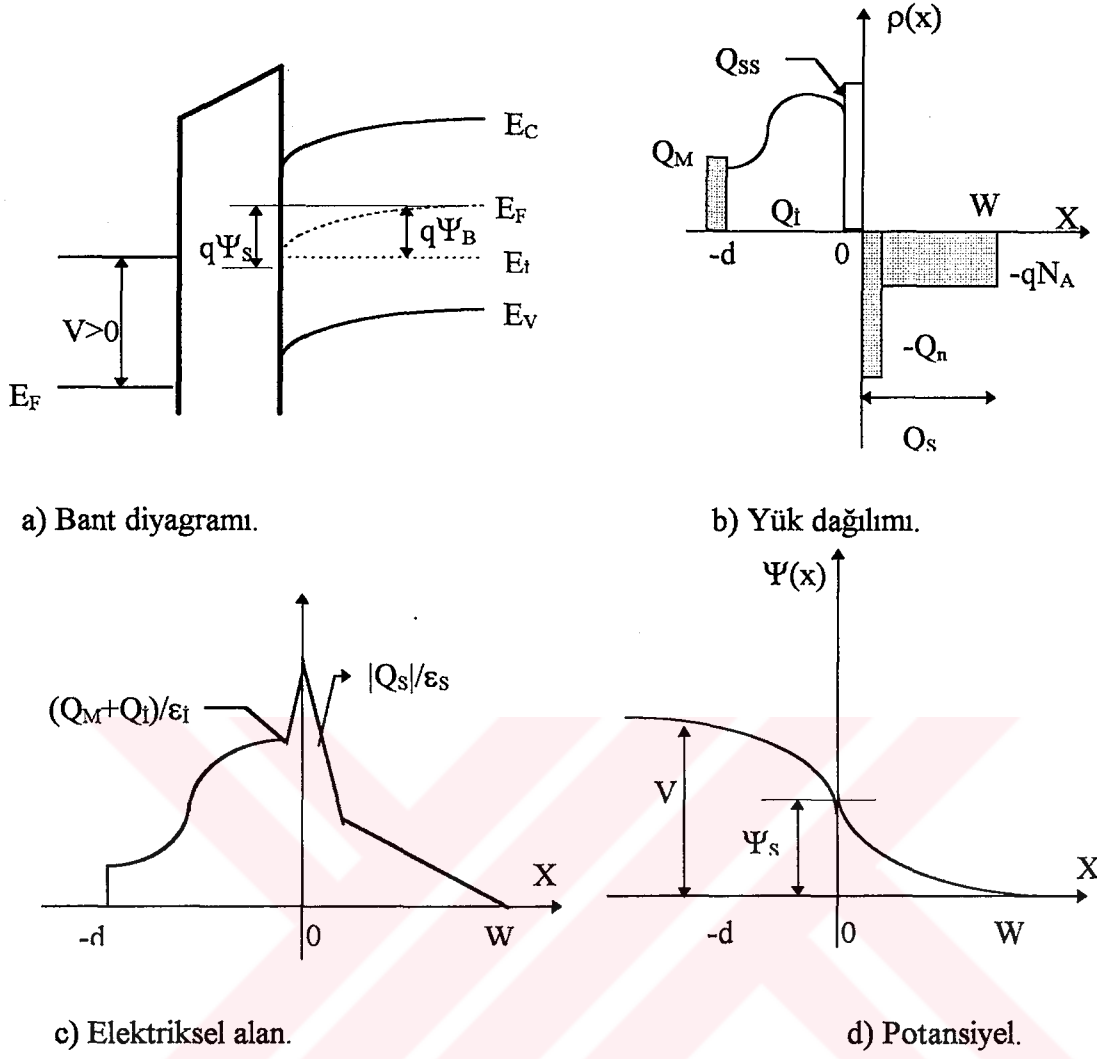
MOS diyot'ta yalıtkan içinde bulunan diğer durum ve yükler ise; Yüzey yükleri, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki veya yakınlarındaki hareketli iyonlar veya iyonize olmuş tuzaklardır. Sabit yüzey yüklerinin şu özellikleri vardır:

Bunlar sabittir ve  $\Psi_s$ 'in büyük değişimlerinde yüklenemezler ve boşaltılamazlar. Bunların yoğunluğu  $Q_{ss}$  yalıtkanın kalınlığı veya yarıiletkendeki kirliliğin yoğunluğundan hemen hemen bağımsızdır.  $Q_{ss}$  oksidin yapılışına, tavlama şartına ve yarıiletkenin oryantasyonuna bağlıdır. Si-SiO<sub>2</sub> sistemindeki sabit yüzey yüklerinin sebebi, oksit içindeki fazla iyonik silisyumdur. Sabit yükler MOS sığası eğrisini, voltaj eksenini üzerinde paralel olarak kaydırır. Kayma değeri  $\Delta V$ ;

$$\Delta V = \frac{Q_{ss}}{C_i} \quad (3.46)$$

dir. Yüzey yükleri pozitif olduğunda, yalıtkindaki elektriksel alan  $E_i$ , yarıiletkendeki elektriksel alandan daha büyüktür. İstenilen yüzey alanını ( $E_s$ ) elde etmek için, metal elektrotta daha fazla yüke ihtiyaç vardır.

Yarıiletkendeki alan yükleri, MOS'un C-V eğrisinde voltaj kaymasına sebep olur. Şekil 3.13 MOS diyot için, yüzey durumları ve yarıiletken alan yükleri ile birlikte, potansiyel, elektriksel alan, yük dağılımı ve bant diyagramını gösterir.



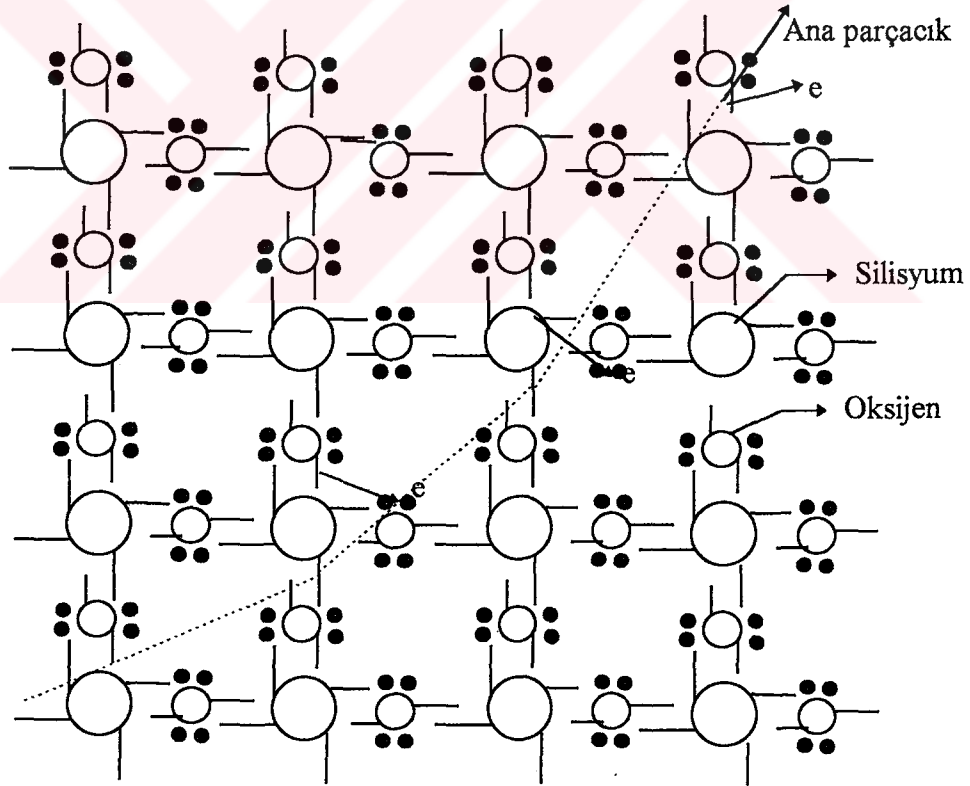
Şekil 3.13. Yüzey yüklerini ve yalıtkan alan yükü ile MOS yapı.

Bu şekli, ideal bir MOS diyotun eğrileri ile karşılaştırsak, aynı yüzey potansiyeli  $\Psi_s$  ve uygulama voltajı  $V$  için C-V eğrisinde negatif voltaja doğru voltaj kayması olduğu görülür. Holstein (1967)



### 3.5 Radyasyon Etkileri

Silisyum-dioksit yüzeyi  $C^{60}$ 'ın gama ışınları ile bombardıman edildiğinde, arayüzey durumları ve oksit yükleri meydana gelir. Bunun sonucunda, kristal içindeki atomlar iyonlaşır ve elektron-boşluk çiftleri meydana gelir. Şekil 3.14' da  $SiO_2$  nin içinden geçen yüklü parçacıkların elektron-boşluk çiftini meydana getirmesi gösterilmiştir. Elektron-boşluk çiftini meydana getirmek için,  $SiO_2$  nin içinden geçen parçacığın enerjisi  $SiO_2$  'nin yasak enerji bandından büyük olmalıdır. Çünkü gelen parçacık, valans bandındaki elektronu iletkenlik bandına çıkarmak zorundadır. Bu şekilde, atomun bir elektronunu koparabilecek enerjili radyasyona iyonize edici radyasyon denir. İyonlaşma, yüklü parçacığın kristalden geçerken bağlara çarpması sonucunda oluşur. Bu çarpışmalar sonucunda valans bandındaki elektronlar uyarılarak iletkenlik bandına geçerler ve geride boşlukları bırakırlar.



Şekil 3.14.  $SiO_2$  içinden yüklü parçacıkların geçerek elektron-boşluk çiftini yaratması

Daha önce de söylendiği gibi, uygulanan radyasyon sonucunda iki olay meydana gelir.

Bunlar;

### 1) Arayüzey Durumları ( $Q_{ss}$ )



burada “-” işareti, kovalent bağı, “•” işareti, bağ yapmamış elektronu göstermektedir.  $\equiv\text{Si}^{\bullet}$  ise üç değerli silisyum merkezidir.

İyonize edici radyasyon, üç değerli silisyumdan ( $\equiv\text{Si}^{\bullet}$ ) OH iyon bağı kırıp OH<sup>-</sup> iyonu serbest bırakır. OH<sup>-</sup> iyonu pozitif elektroda doğru yol alır. Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde arayüzeyi durumlarının yaratılmasından sonra, geriye üç değerli silisyum kalır. Eğer radyasyon uygulanmadan önce, Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde,  $\equiv\text{Si-OH}$  bağları yoksa veya çok az ise radyasyon sonucunda oluşan durum yoğunluğu da küçük olur.

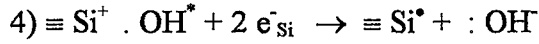
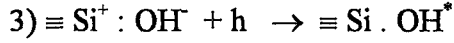
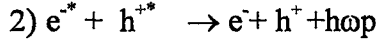
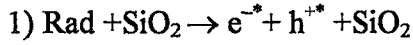
### 2) Oksit Yükleri



buradaki ilk olayda (3.49),  $\equiv\text{Si}^{+}$ , bir elektronu kaybetmiş pozitif yüklü silisyum merkezini,  $e^{-}$  ise elektronu göstermektedir. (3.50)’ de ise  $\text{O}_i$ , kristal yapıda oksijenin bulunması gereken yerde arada kalmış oksijen atomunu göstermektedir.  $\text{O}_i^{+}$  ise bir boşluk yakalamış oksijen atomudur. Oksit yükleri (3.49) ve (3.50) deki iki olay sonucunda meydana gelmektedir.

İyonize radyasyonla arayüzey durumlarının yaratılma olayı için iki model vardır. Bunlar, boşluk yakalama ve elektron etkisi modelleridir.

### 3.5.1 Boşluk Yakalama Modeli

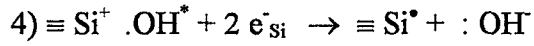
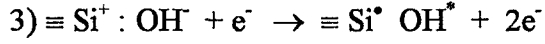
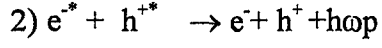
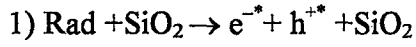


5) : OH<sup>-</sup> ( pozitif elektroda doğru sürüklenir. )

burada “\* ” işareti enerjili bir parçacığı, “.\* ” işareti normal bağ enerjisinden fazla enerjili negatif yüklü parçacığı, “+\*” ise normal bağ enerjisinden fazla enerjili pozitif yüklü parçacığı göstermektedir. “Si<sup>+</sup> : OH<sup>-</sup> ” merkezindeki “:” işareti, oksijenin iki serbest elektronu olduğunu göstermektedir. Oksijen iki serbest elektrona sahip olduğu için negatiftir. Üç değerli silisyum da bir elektronunu kaybetmiş olduğu için pozitif yüklü durumdadır.

Yukarıdaki adımların birincisinde, SiO<sub>2</sub> ye uygulanan iyonlaştırıcı radyasyon, enerjili elektron ve boşluk çiftlerini meydana getirmiştir. Burada e<sup>-\*</sup>, enerjili elektron, h<sup>+\*</sup> ise enerjili boşluktur. İkinci adımda, enerjili elektron ve boşlukların enerjileri plazma titreşimleri ile kaybolur. Üçüncü adımda, enerjisi plazma titreşimleri ile kaybolan boşluk (h<sup>+</sup>), ≡Si<sup>+</sup> : OH<sup>-</sup> merkezinde, serbest iki elektronu olan OH<sup>-</sup> ile tekrar birleştirmiştir. Bu durumda Si -OH bağı kırılır. Böylece, enerjili OH<sup>\*</sup> molekülü nötr olur. Dördüncü adımda silisyumun iletim bandından iki elektron ≡Si<sup>+</sup> . OH<sup>\*</sup> merkezine geçer. Bu elektronlardan bir tanesi pozitif yüklü, üç değerli silisyum merkezi tarafından yakalanır ve nötr duruma geçer. Diğer elektron, .OH<sup>\*</sup> ile bağ yapar ve negatif yüklü :OH<sup>-</sup> iyonu pozitif elektroda doğru sürüklenir. Üç değerli silisyum merkezi ≡Si<sup>•</sup>, tek donör tipi arayüzey durumuna neden olur.

### 3.5.2 Elektron Etkisi Modeli



5) : OH<sup>-</sup> (pozitif elektroda doğru sürüklenir)

Bu modelin boşluk yakalama modelinden farkı, üçüncü adımdadır. Elektronların kütlesi boşlukların kütlesinden çok küçük olduğu için, oksit içindeki elektronlar boşluklardan daha hareketlidir. Dolayısıyla boşlukların yakalanma tesir kesiti çok daha büyüktür. Boşluklar oksit içinden geçerken tuzaklar tarafından yakalanırlar.

## BÖLÜM 4. DENEL METOD:

Kullandığımız MOS'lar, TÜBİTAK Gebze Araştırma Merkezi (TÜGAM), Yarıiletken Teknolojisi Araştırma Laboratuvarlarında (YİTAL) hazırlanmıştır. Al-SiO<sub>2</sub>-Si örnekleri 2mm çapında p-tipi ve < 100 > oryantasyonuna sahiptir. Kullanılan Si pulların öz direnci 10Ω-cm ve kalınlığı 500μ dur. Örnekler, 1000°C de kuru oksijen altında ısı yolla büyütülmüşlerdir. Kontakt elektrodu buharlaştırma yöntemiyle oluşturulmuştur.

MOS yapı içindeki Akseptör yoğunluğu (N<sub>A</sub>) Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Laboratuvarında bulunan HEWLETT 4192 A PACKARD LF IMPEDANCE ANALYZER ile oda sıcaklığında +30 Volt ve -30 Volt arasında gerilim altında elde edilen yüksek frekans (1 Mhz) sığa - gerilim (C-V) eğrilerinden hesaplanarak yaklaşık  $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  olduğu bulunmuştur.

Kullandığımız MOS yapının teorik C-V eğrisi bilgisayar programı ile +30 Volt ve -30 Volt arasında bulundu.

Daha sonra örnekler, Çerkezköy'de bulunan GAMMA-PAK Sterilizasyon Sanayi ve Ticaret A.Ş.de  $\gamma$  (gama) radyasyonu ile çeşitli dozlarda radyasyona maruz bırakıldı. Tekrar, Yıldız Teknik Üniversitesinde örneklerin C-V eğrileri alındı. Teorik eğri ve ölçülen eğriler arasında farklar olduğu gözlemlendi. Radyasyon uygulanan örneklerin C-V eğrilerinde de değişiklikler meydana geldi.

### 4.1 Sığa-Gerilim Eğrilerinin Çizilmesi

Teorik sığa-gerilim eğrileri bir bilgisayar programıyla elde edildi. Bu eğriden düzbant'a (flat-band) karşılık gelen sığa C<sub>FB</sub> ve bant ortasına karşılık gelen sığa C<sub>MG</sub>; değerleri hesaplandı.

Radyasyondan önce ve sonra deneysel yüksek frekans ve teorik, sığa-gerilim eğrileri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 'de gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi radyasyon uygulandıktan sonra sığa-gerilim eğrilerinde değişiklik meydana gelmiştir. Bu değişikliklerden, MOS yapının SiO<sub>2</sub> tabakası ve Si-SiO<sub>2</sub> ara yüzeyinde radyasyonla oluşturulan  $\Delta Q_{ox}$  oksit yük yoğunluğu ve  $\Delta Q_{ss}$  yüzey durum yük yoğunluğunu hesapladık.  $\Delta V_{FB}$  düz bant voltajındaki kayma, radyasyon uygulandıktan sonra Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu hakkında bilgi verir.  $\Delta V_{MG}$  bant ortası voltajındaki kayma, sadece yapıda oluşan yük yoğunluğu hakkında bilgi verir. Oluşturulan etkin yük yoğunluğu ise  $\Delta Q_{eff}$  dir. Elimizdeki MOS örnekleri  $\Delta Q_{OX}$  oksit yük yoğunlukları ve  $\Delta Q_{ss}$  arayüzey yük yoğunluklarının hesaplanan değerleri Tablo 4.1 'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çeşitli dozlar için Oksit yük yoğunlukları ve arayüzey yük yoğunlukları

DOZ (kGy)	$\Delta V_{MG}$ (V)	$\Delta V_{FB}$ (V)	$\Delta Q_{OX}$ (10 <sup>10</sup> ) (cm <sup>-2</sup> )	$\Delta Q_{ss}$ (10 <sup>9</sup> ) (cm <sup>-2</sup> )	$\Delta Q_{eff}$ (10 <sup>10</sup> ) (cm <sup>-2</sup> )	d(A°)
12.68	10.5	13	3.93	9.36	4.87	1831
35.05	12.5	14	4.68	5.61	5.24	1831
41.78	14	16.5	5.24	9.37	6.18	1831
50.61	13.5	15	5.05	5.6	5.6	1831

$\Delta V_{MG}$  ve  $\Delta V_{FB}$  voltaj kaymaları ideal C-V eğrisinden olan kaymalardır. Yapılan hesaplardan elde edildiği gibi radyasyon uygulamadan önceki yük yoğunluğu  $\Delta Q_{OX}$  , yaklaşık 10<sup>11</sup> cm<sup>-2</sup> dir.  $\Delta Q_{ss}$  arayüzey durum yoğunluğu ise sıfır veya sıfıra çok yakındır. Buradan oksidin çok iyi şartlarda büyütüldüğünü anlıyoruz. Uygulanan radyasyonun dozu arttıkça  $\Delta Q_{ss}$  arayüzey durum yük yoğunluğunda arttığı gözlenmektedir. Bunun yanında  $\Delta Q_{OX}$  oksit yük yoğunluğunda fazla bir değişiklik meydana gelmemiştir.

## 4.2 Arayüzey Tuzak Yoğunluğunun (N<sub>ss</sub>) Hesaplanması

Bu bölümde, elimizdeki örnek MOS'lara radyasyon uygulandıktan sonra oluşan arayüzey durum yoğunluğu (arayüzey tuzak yoğunluğu) N<sub>ss</sub>'in hesabı yapılacak. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' de görüldüğü gibi radyasyon uygulamadan önce ve uygulandıktan sonra normalize sığa -gerilim eğrilerinde ideal C<sub>n</sub>-V eğrisinden farklılık göstermektedir. Deneysel eğrilerde, ideal eğrilerden voltaj eksenini boyunca kaymalar görülmektedir. Bu voltaj kaymalarından MOS yapının oksit tabakasında ve Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde radyasyon ile yaratılan yüklerin değerleri hesaplanır.

Arayüzey tuzak yoğunluğu  $N_{ss} = 1 / q ( dQ_{ss} / d\psi_s )$  ile bulunur. N<sub>ss</sub>'in birimi yük/cm<sup>2</sup> eV tur. N<sub>ss</sub> değerleri Terman metodu ile bulunur. N<sub>ss</sub>'i hesaplarırken sadece yığılma ve fakirleşme bölgelerinde işlem yaptık. Çünkü evirtim bölgesinde C-V eğrilerinde hiçbir değişme gözlenmemektedir.

## 4.3 Terman Metodu

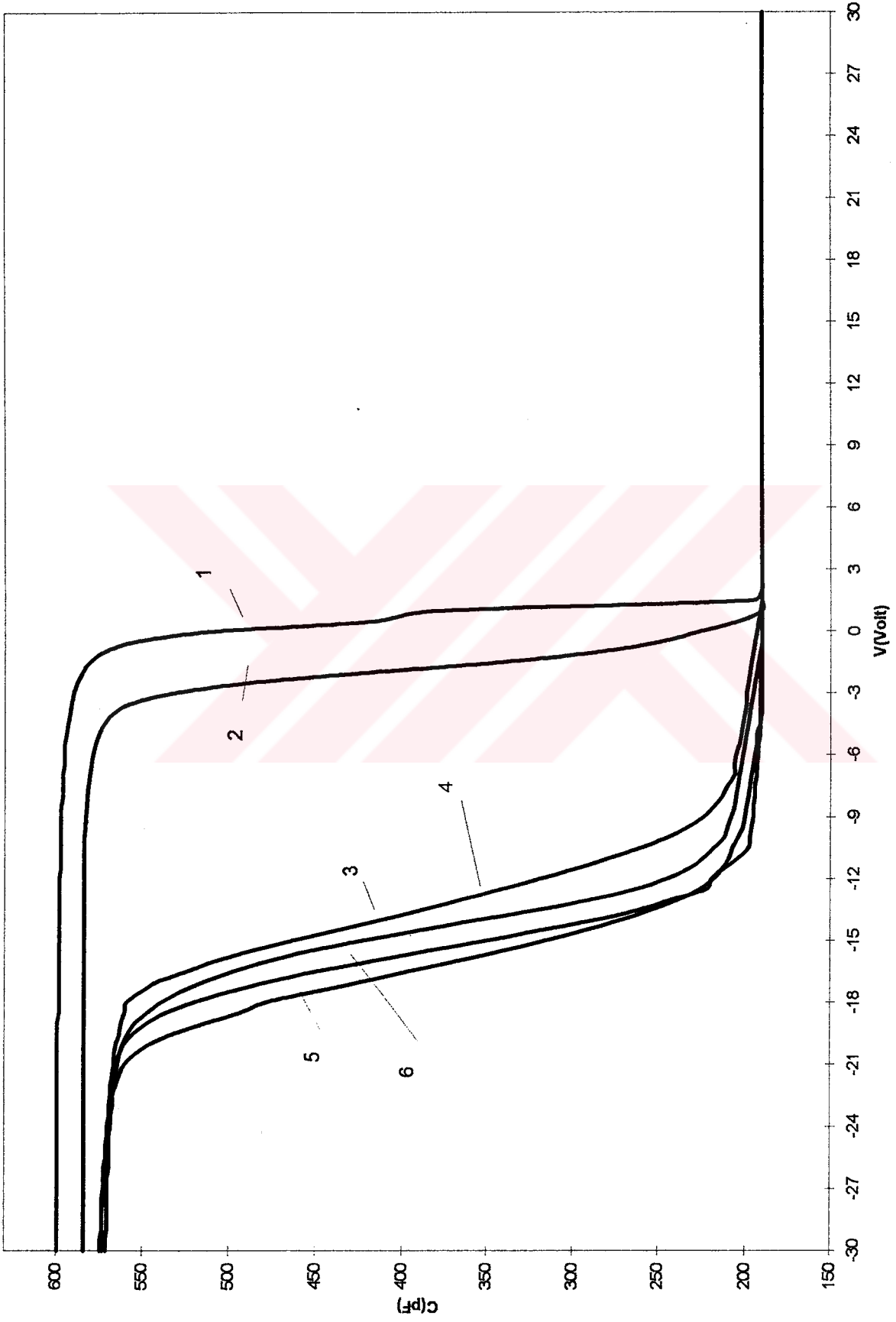
- 1) Yüksek frekans (1Mhz) sığa-gerilim eğrisi çizdirilmiştir. (Şekil 4.1)
- 2) Normalize sığa-gerilim (C<sub>n</sub>-V) eğrisinin değişiminden, yarıiletkenin N<sub>A</sub> katkı yoğunluğu hesaplanmıştır. (Şekil 4.2)
- 3) Deneysel C-V eğrisinden oksit kapasitesi C<sub>ox</sub> ve oksit kalınlığı d<sub>ox</sub> hesaplanmıştır.
- 4) N<sub>A</sub>, d<sub>ox</sub>, C<sub>ox</sub> bilgilerinden faydalanarak ideal teorik sığa-gerilim (C-V) eğrisi bilgisayar programı ile elde edilmiştir.
- 5) Yüzey potansiyeli  $\psi_s$  in fonksiyonu olarak sığa eğrisi çizdirilmiştir. (Şekil 4.3)
- 6) Deneysel C-V eğrisi ile ideal C-V eğrisi aynı grafikte çizdirilir. Her bir deneysel nokta için, deneysel nokta ile ideal nokta arasındaki  $\Delta V$  voltaj kaymaları bulunur.  $\Delta V$  den Q<sub>ss</sub> yüzey yükü hesaplanmıştır. ( Şekil 4.4), (Şekil 4.5), (Şekil 4.6), (Şekil 4.7).
- 7)  $\psi_s$ 'in fonksiyonu olarak Q<sub>ss</sub> çizdirilmiştir.

8) Bu eğrinin eğiminden  $N_{ss} = 1/q(dQ_{ss} / d\psi_s)$  (tuzak sayısı / $cm^2$ -eV) arayüzey tuzak yoğunluğu bulunmuştur.

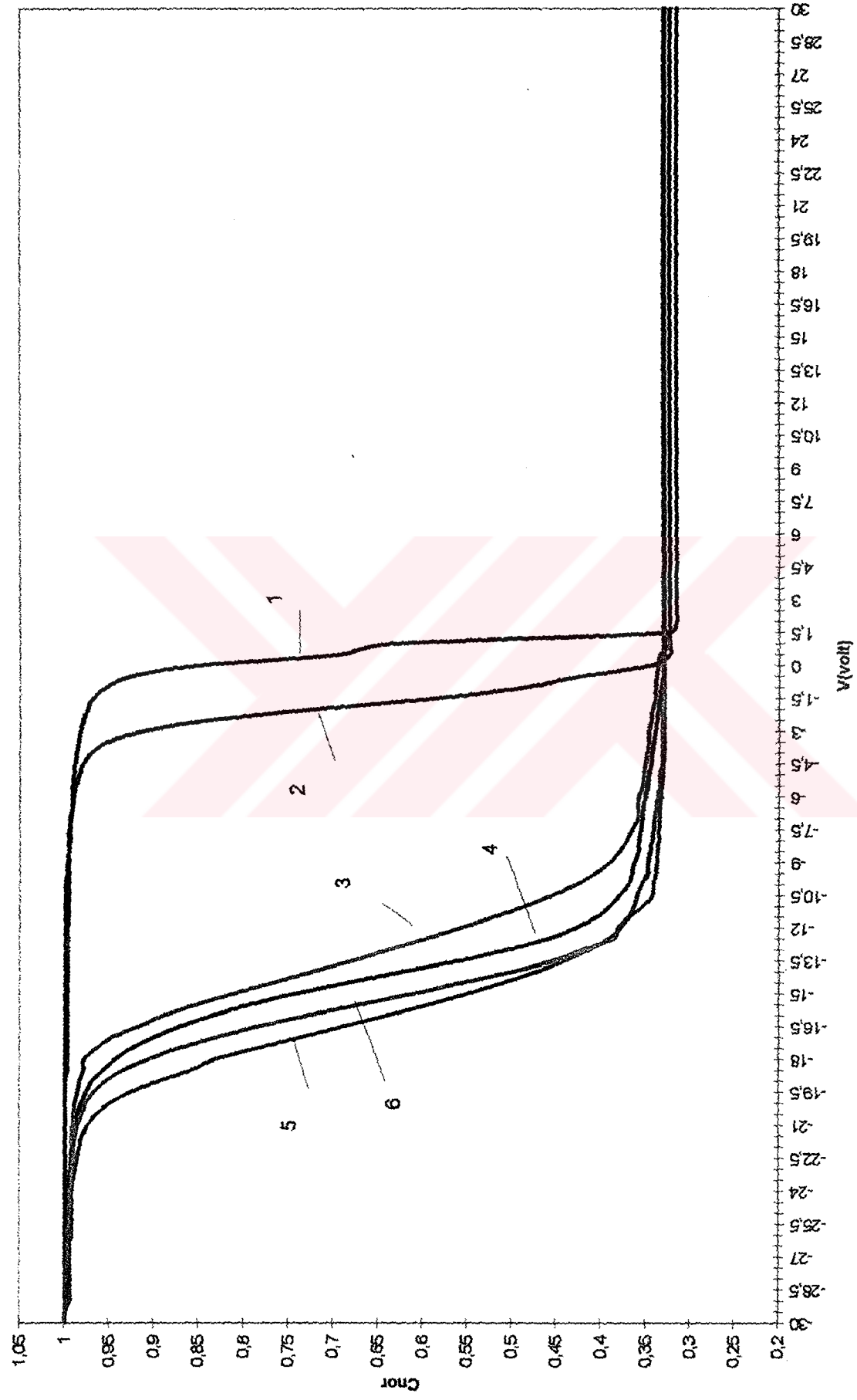
9) Silisyum yasak enerji bölgesinde E(eV) enerjinin fonksiyonu olarak  $N_{ss}$  arayüzey tuzak yoğunluğunun dağılımı çizilmiştir. Terman (1962)

Değişik dozlarda radyasyon uygulanan MOS'ların Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde oluşan arayüzey tuzak yoğunluğunun Silisyum yasak enerji bölgesine dağılımı Şekil 4.8 , Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11' de gösterilmiştir.

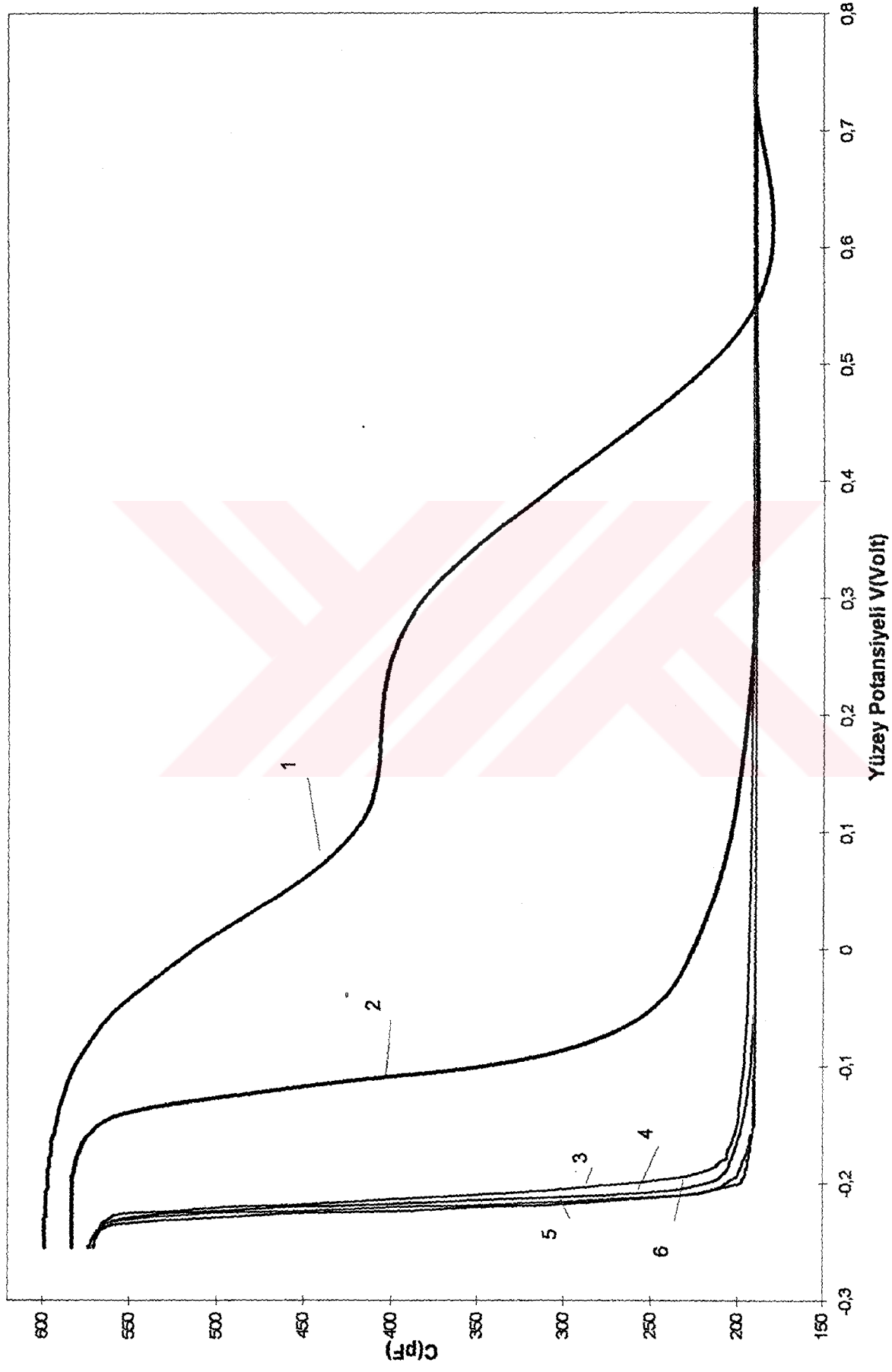




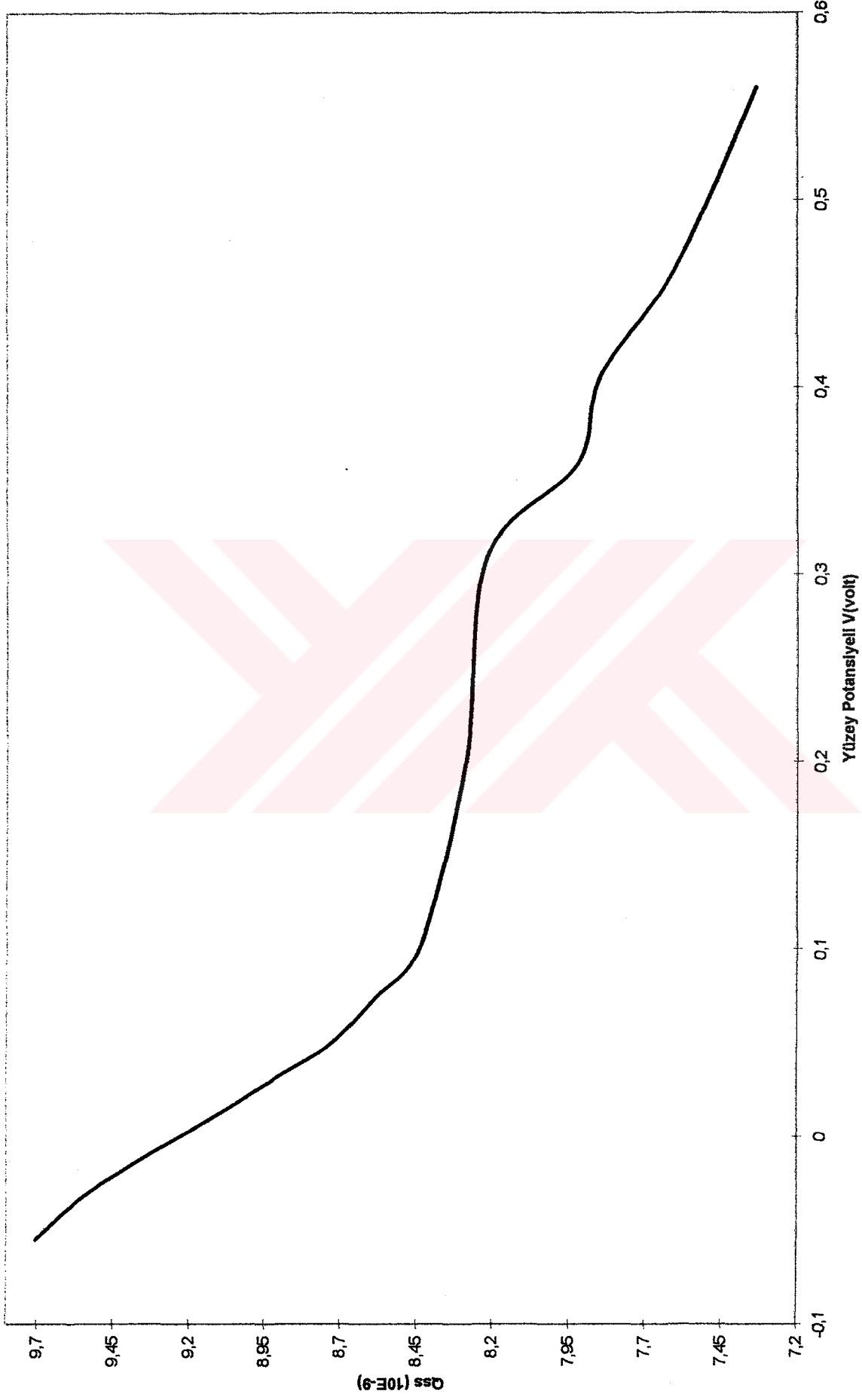
Şekil 4.1. MOS Yapının C-V eğrisi 1) Teorik. 2) Deneysel 3) 12.68kGy 4)35.05 kGy 5) 41.78 kGy 6)50.61 kGy



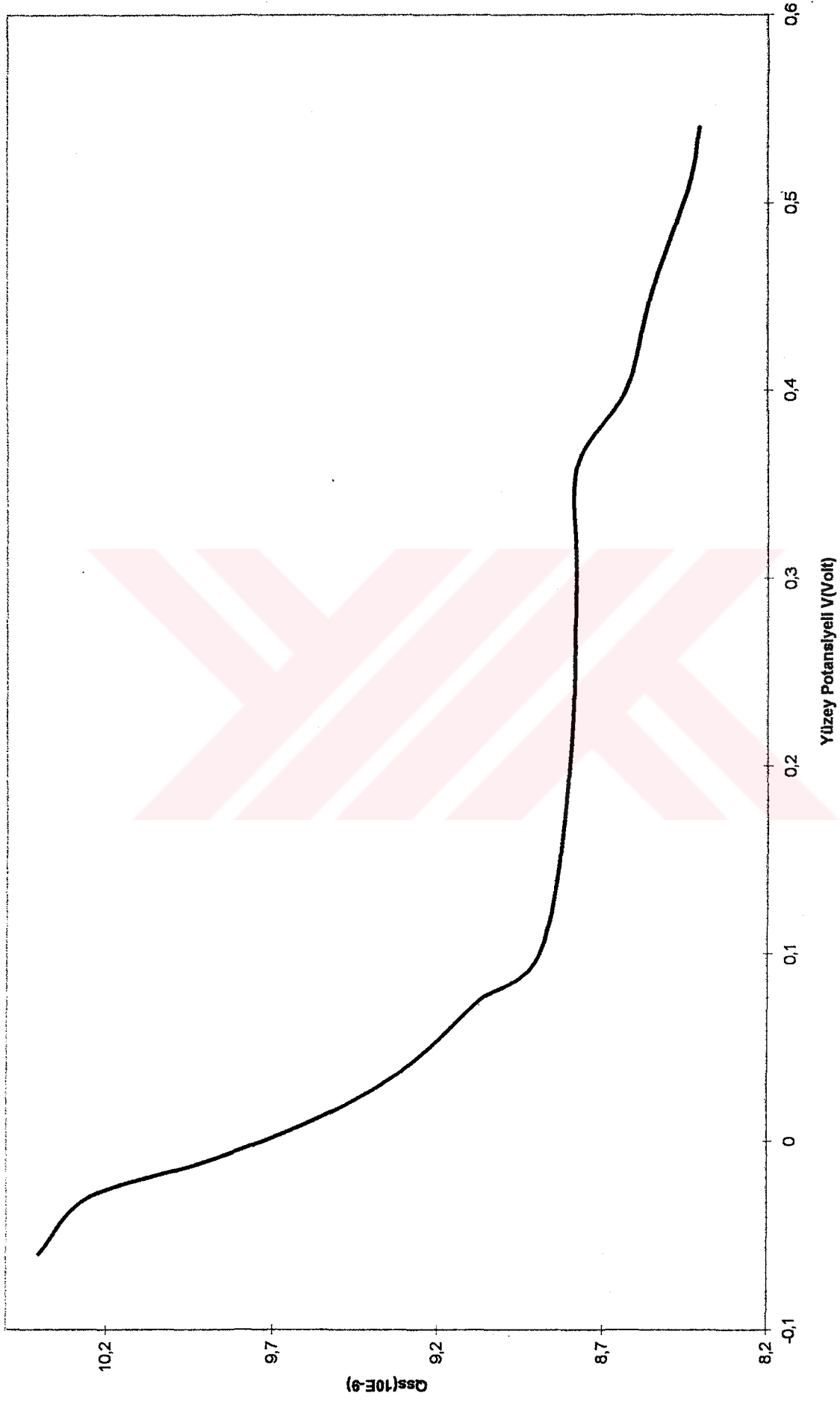
Şekil 4.2. MOS Yapının Normalize Cnorr-V Eğrisi. 1) Teorik 2)Deneyisel 3) 12.68kGy 4) 35.05 kGy 5)41.78kGy 6)50.61 kGy



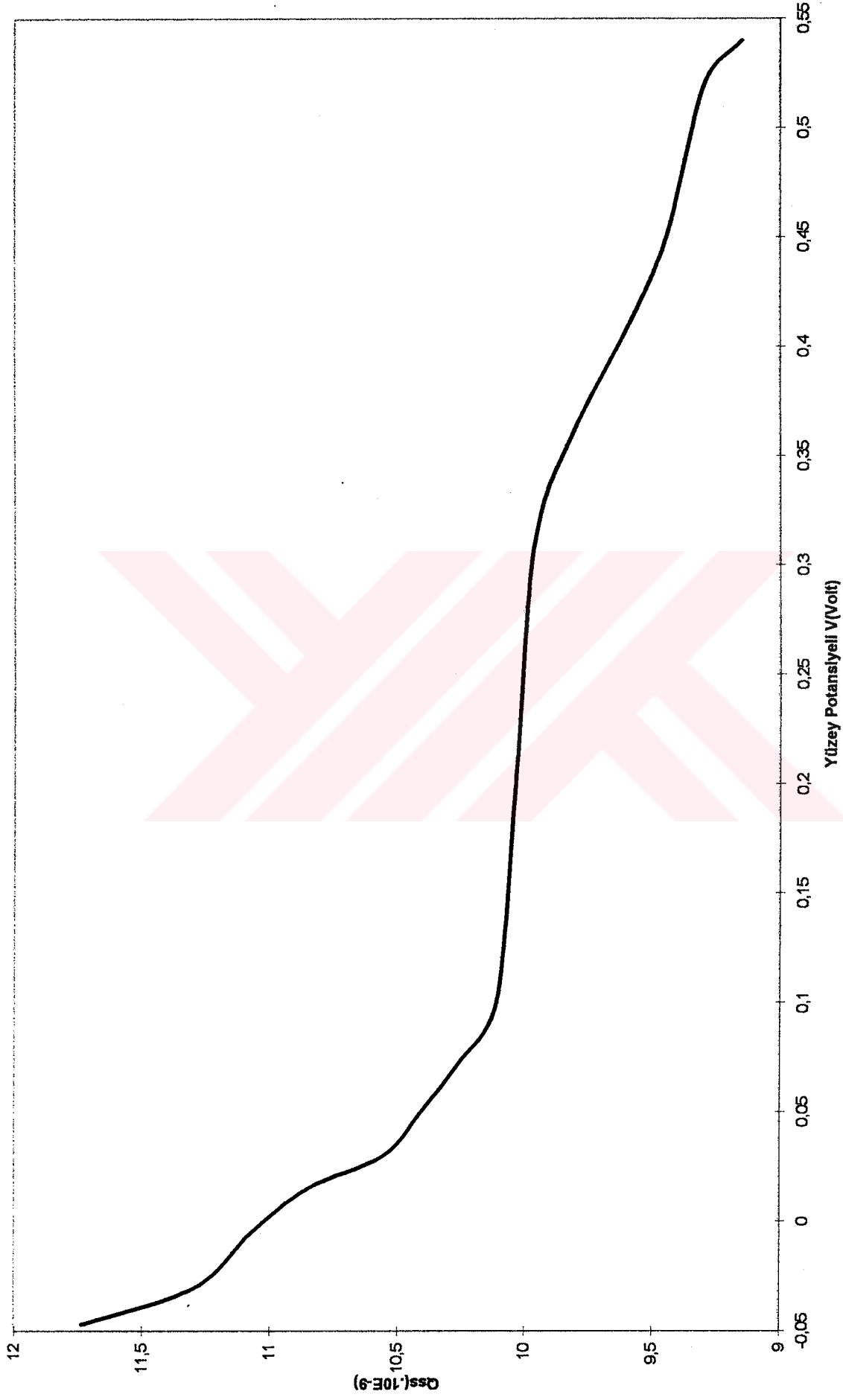
Şekil 4.3 MOS Yapının C-Yüzey Potansiyeli Değişimi. 1) Teorik. 2) Deneysel 3) 12.68kGy 4) 35.05kGy 5) 41.78kGy 6) 50.61 kGy



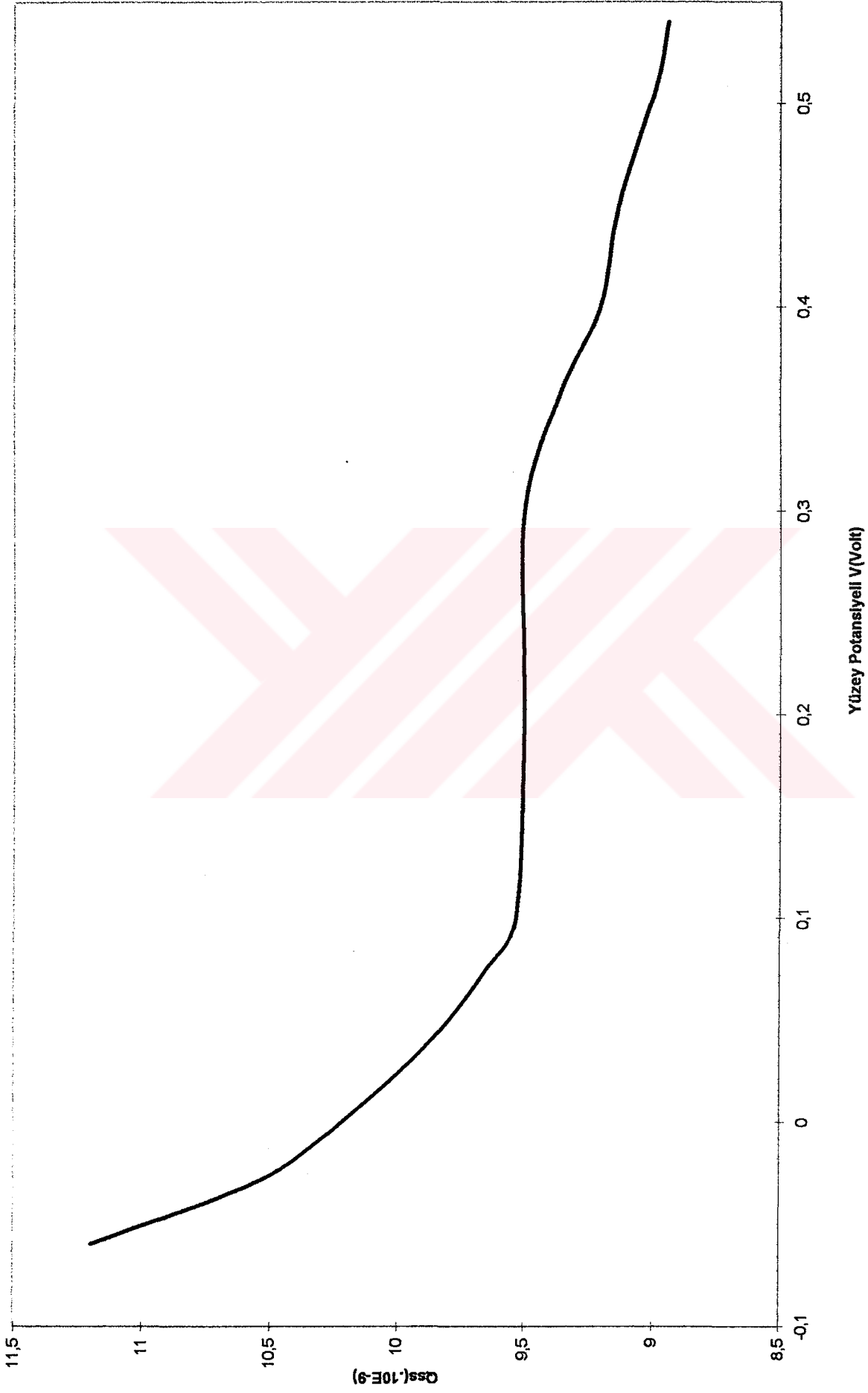
Şekil 4.4. 12.68 kGy için  $Q_{ss}$  değişimi



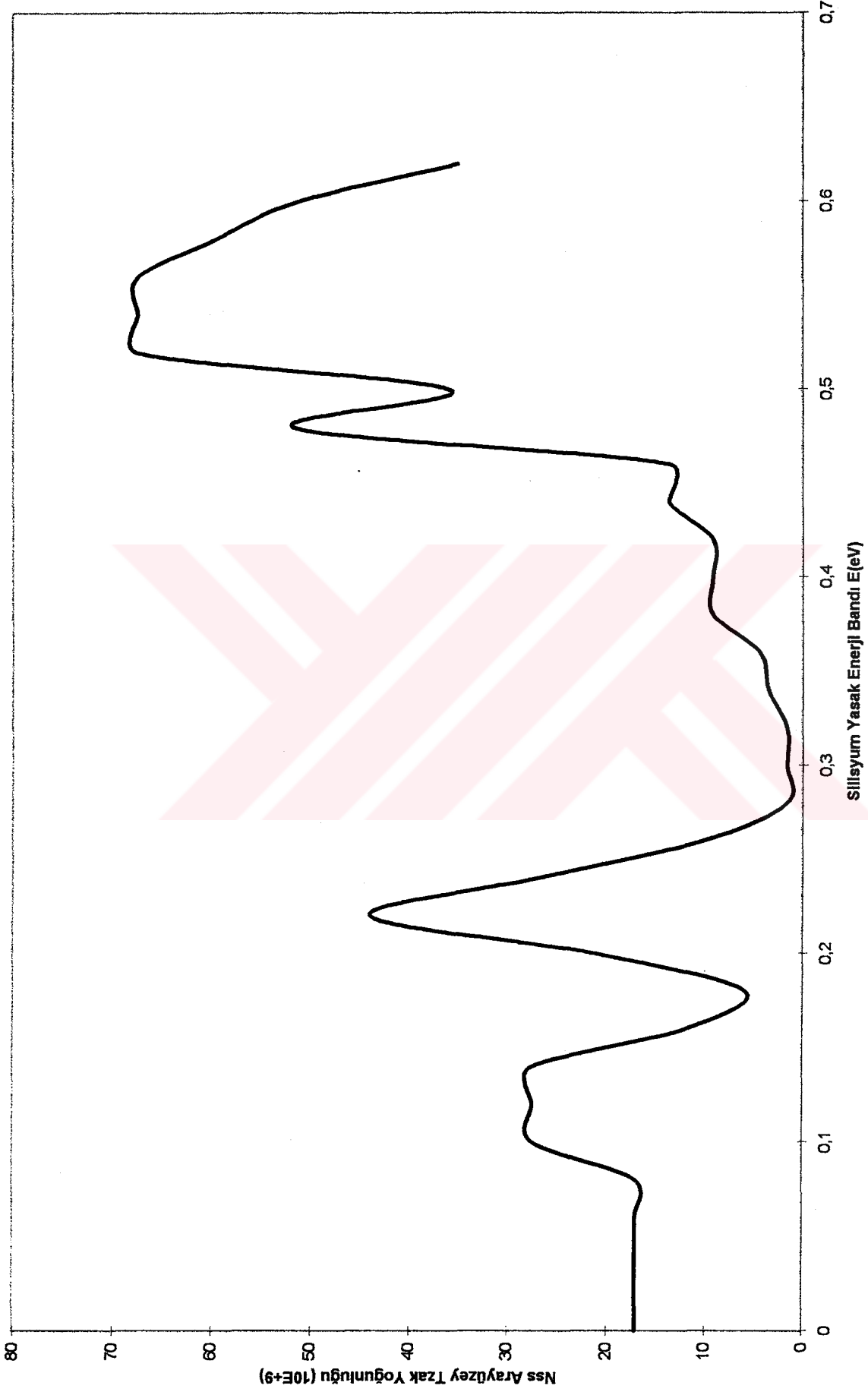
Şekil 4.5. 35.05 kGy için Qss değişimi



Şekil 4.6. 41.78 kGy için  $Q_{ss}$  değişimi

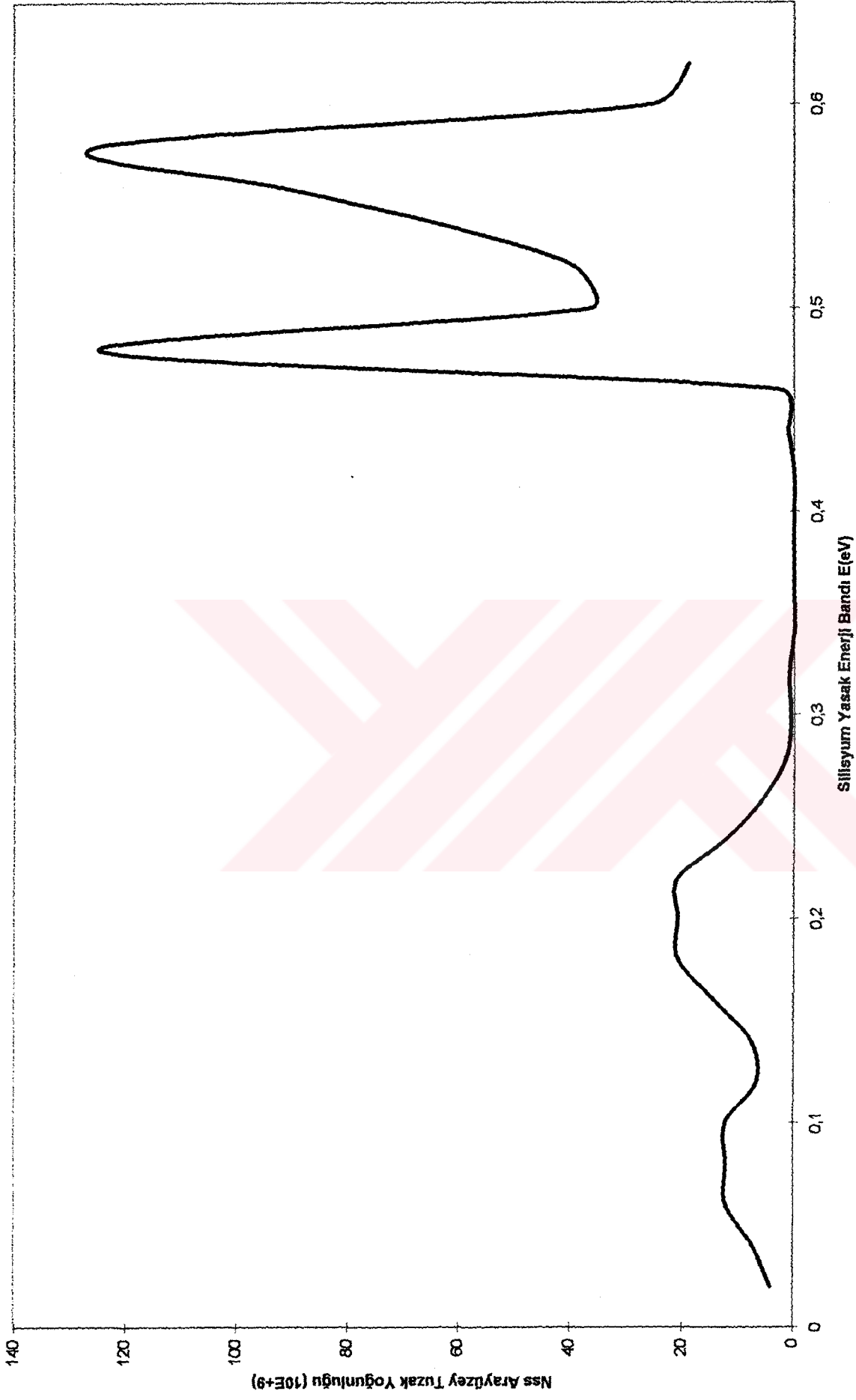


Şekil 4.7. 50.61 kGy için  $Q_{ss}$  değişimi.

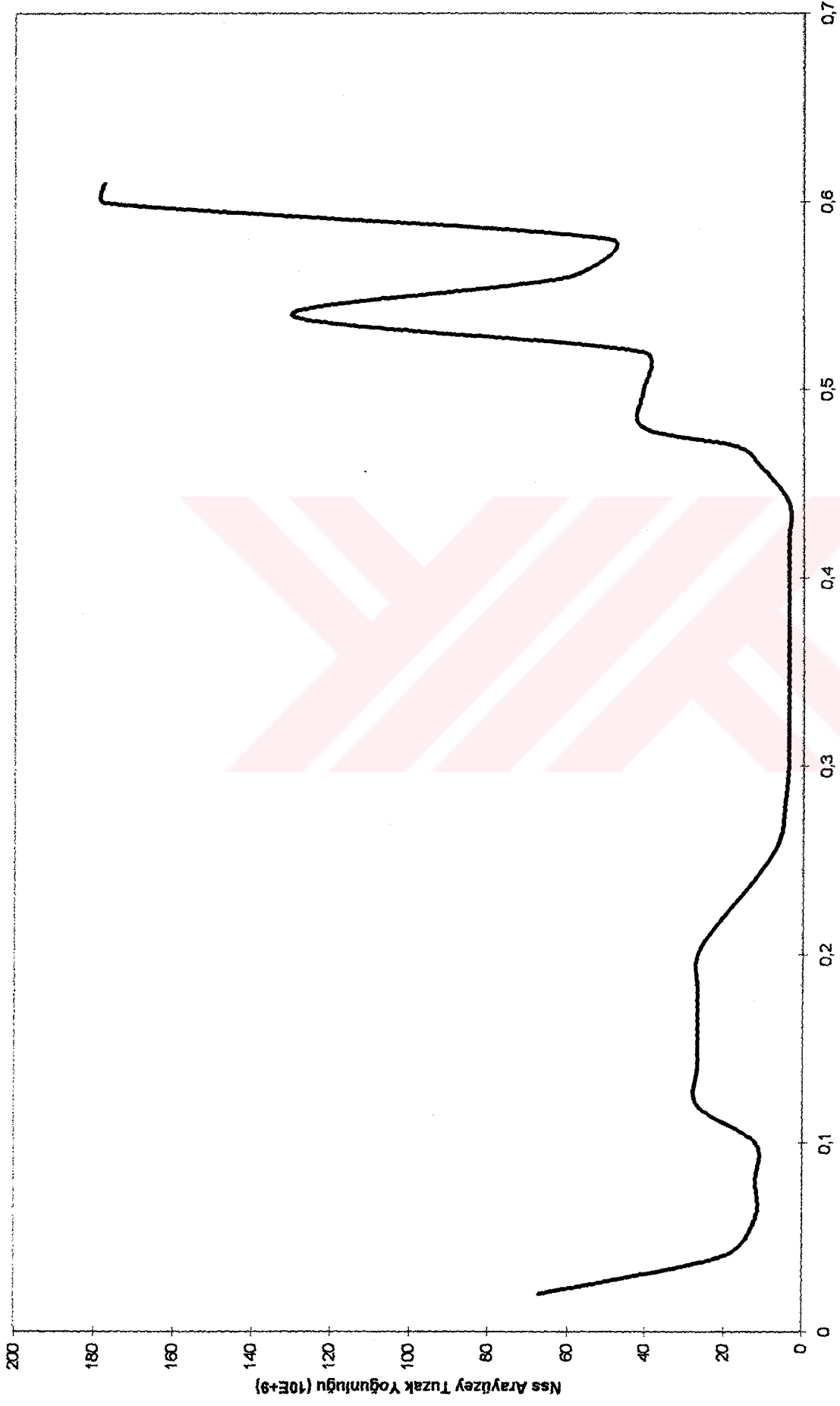


Şekil 4.8. 12.68 kGy için Tuzak Yoğunluğunun Silisyum Yasak Enerji Bölgesindeki Dağılımı

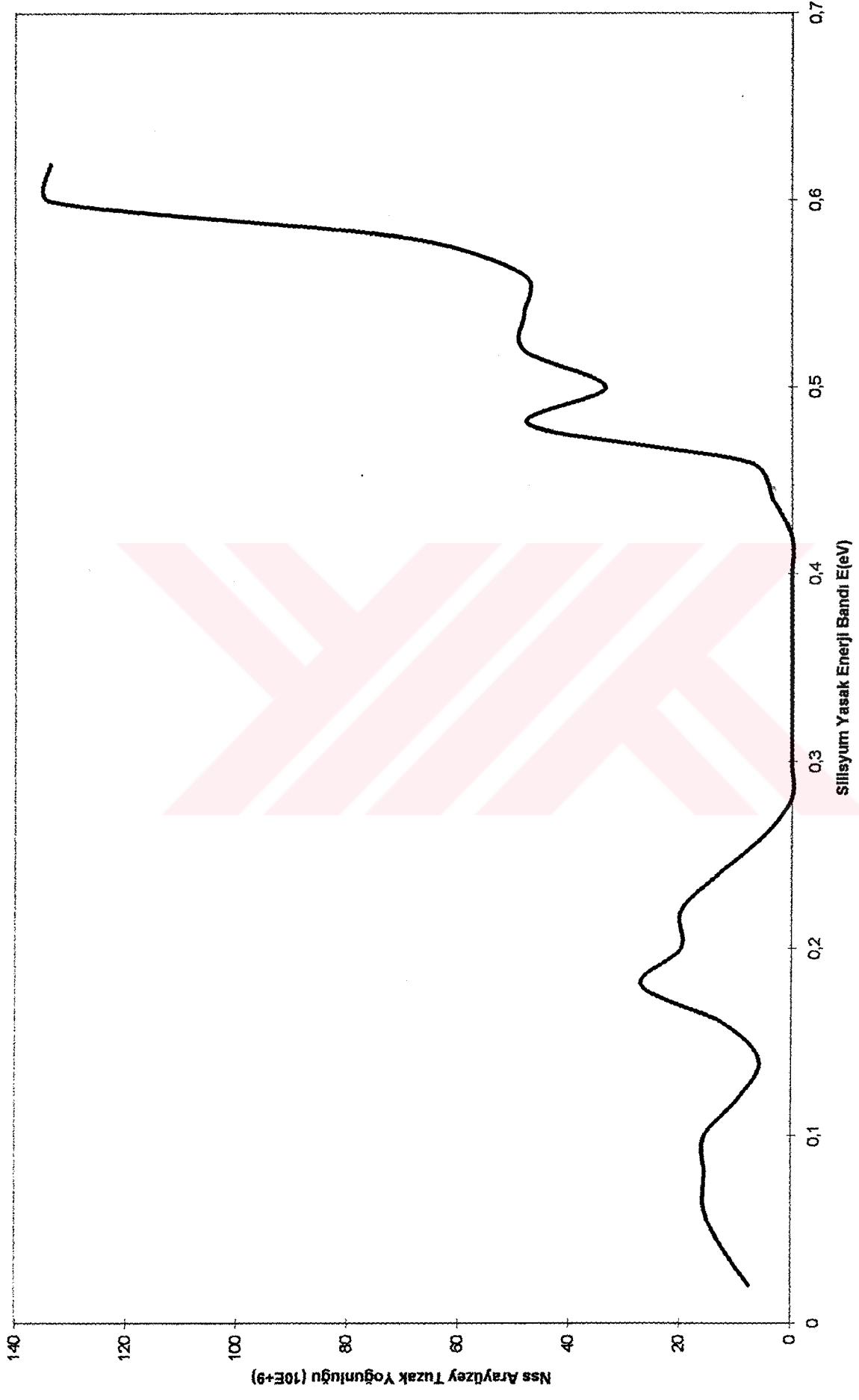




Şekil 4.9. 35.05 kGy için Tuzak Yoğunluğunun Silisyum Yasak Enerji Bölgesindeki Dağılımı.



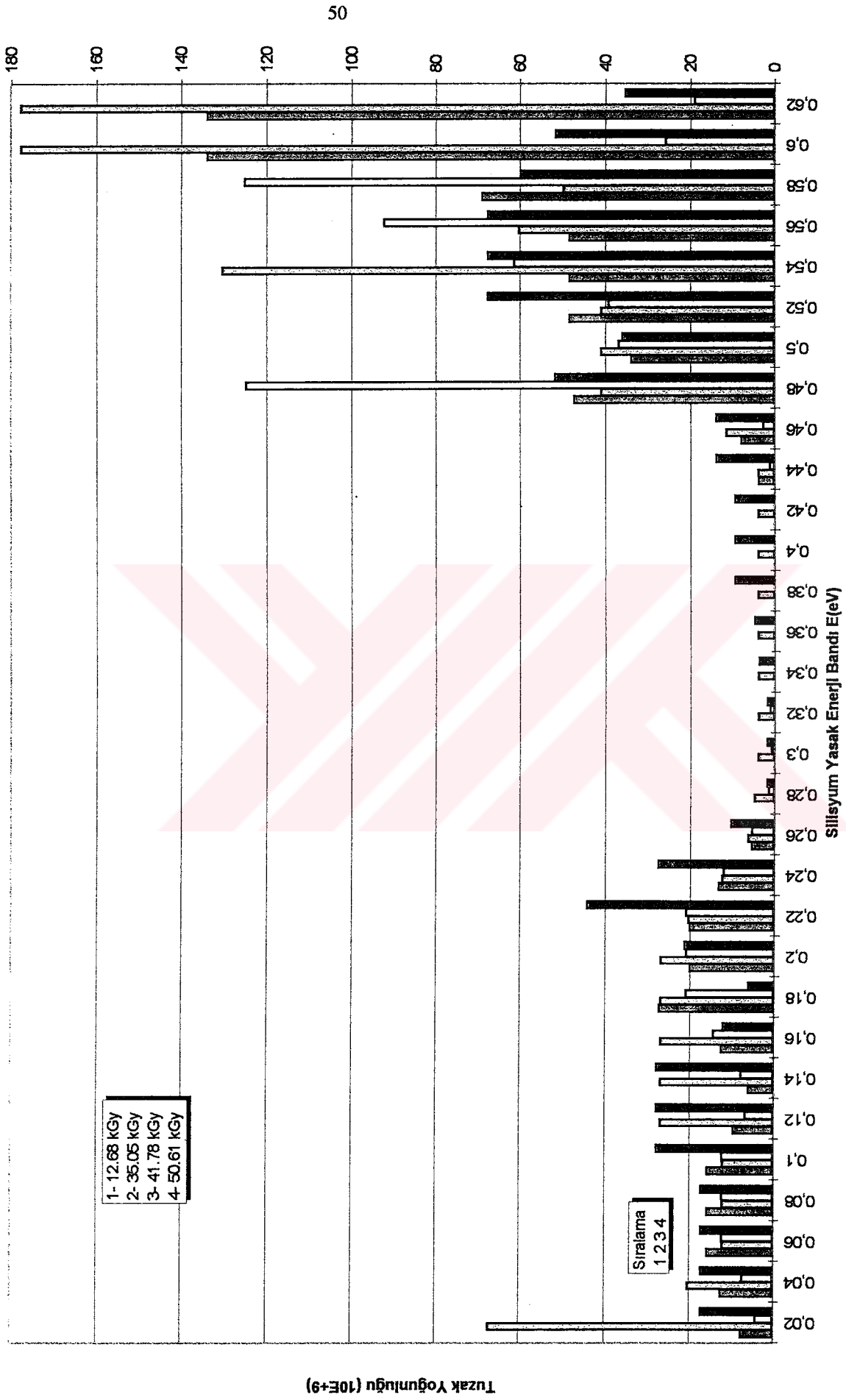
Şekil 4.10. 41.78 kGy için Tuzak Yoğunluğunun Silisyum Yasak Enerji Bölgesindeki Dağılımı.



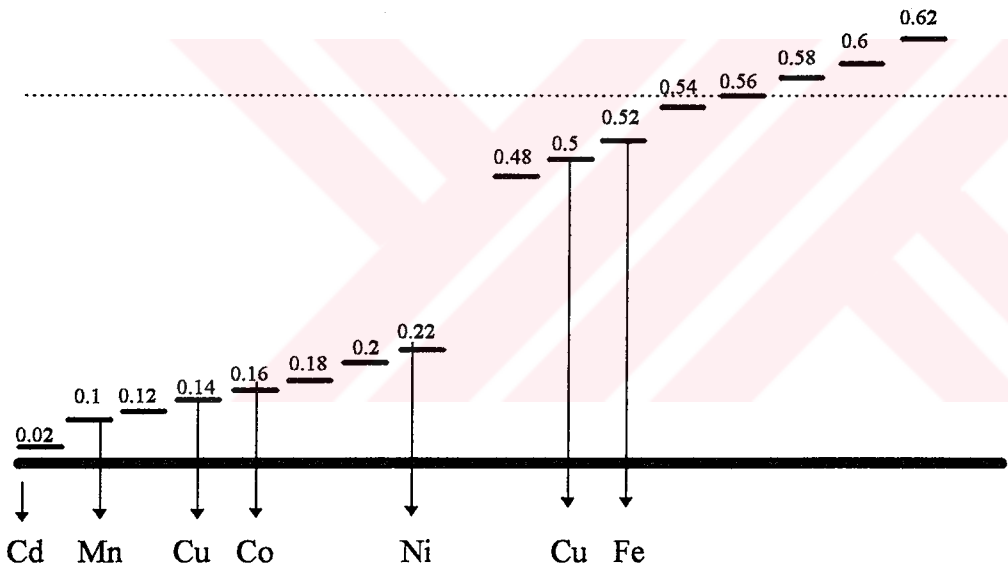
Şekil 4.11. 50 61 kGy için Tuzak Yoğunluğunun Silisyum Yasak Enerji Bölgesindeki Dağılımı.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) yapıya radyasyon uygulamadan önce ve uyguladıktan sonra, enerji band diyagramları incelenmiş ve Si-SiO<sub>2</sub> eklemine imalat sırasında ve kullanıldıkları ortamda maruz kalacakları radyasyon etkileri araştırılmıştır. Kullandığımız MOS örneklerine 12.68 kGy, 35.05 kGy, 41.78 kGy ve 50.61 kGy lik radyasyonlar uygulanmıştır. Terman metodu ile Silisyum'un yasak enerji bant aralığı incelenmiş ve bu yasak enerji bant aralığında yeni enerji seviyeleri gözlenmiştir. (Şekil 5.1) Bu enerji seviyeleri şekil 5.1 de görüldüğü gibi, yüzeye yakın bölgelerde ve has fermi seviyesine yakın bölgelerde daha yoğundur. Radyasyon uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra çizilen MOS C-V eğrisindeki farklılığın sebebi de bu enerji seviyeleridir. Silisyum'un yasak enerji bandı içinde oluşan bu enerji seviyeleri, Silisyum'un içinde bulunan bazı kirlilikler (impurity) tarafından meydana getirilmiş olabileceği gibi Si-O ve Si-Si bağlarının kopması sonucunda da olabileceği anlaşılmıştır. Bu kirlilikler ve seviyeler şekil 5.2 de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi kirliliklerin bazılarının sebepleri saptanmıştır. Diğer enerji seviyelerinin sebebi Si-O ve Si-Si bağlarının kopmasıdır.



Şekil 5.1. Silisyum'un Yasak Enerji Bant Aralığında Yer Alan Tuzakların Yerleri ve Yoğunluğu.



Şekil 5.2. Silisyumun yasak enerji bant aralığındaki tuzakların yerleri.

## KAYNAKLAR

- 1- YALÇIN, C ve BÜGET, N. 1981. Modern Fizik ve Atom Fiziği. M.E.B., p.151-153, İSTANBUL
- 2- LEBLEBİCİ, D. ve LEBLEBİCİ, Y. 1989. Tranzistorlar. İ.T.Ü.,p.29, İSTANBUL.
- 3- SZE, S.M. 1981. Physics of Semiconductor Devices. John Willey & Sons, p.426-427, U.S.A.
- 4- SIMMONS, J.G. and WEI, L.S. 1973. Solid State Electronics. Pergamon Press, Vol. 16, p.43-52, ENGLAND.
- 5- ZAININGER, K. H. and HOLMES, A.G., 1967. A Survey of Radiation Effects in Metal-Insulator-Semiconductor Devices, Symposium on Radiation Effect in Semiconductor Components, FRANCE.
- 6- GROVE, A. S., DEAL, B.E., SNOW, E.H. and SAH, C.T., 1965. Investigation of Thermally Oxidized Silicon Surfaces Using Metal-Oxide-Semiconductor Structure. Solid State Electron.,8,145, U.S.A.
- 7- GRAY, P.V. 1969 The Silicon-Silicon Dioxide System. General Electric Research and Development Center. U.S.A.
- 8- GOETZBERGER, A. 1967. Behavior of MOS Inversion Layers at Low Temperature. IEEE Trans. on Electron Devices, p.787, U.S.A.
- 9- NICOLLIAN, E. H. and GOETZBERGER, A. 1965. MOS Conductance Technique for Measuring Surface State Parameters. Appl. Phys. Letters,7, 216, U.S.A.
- 10- HOFSTEIN, S.R. 1967. Proton and Sodium Transport on SiO<sub>2</sub> Films. Trans. on Electron Devices, p.749, U.S.A.
- 11- TERMAN, L.M. 1962. An Investigation of Surface States at a Silicon/Silicon Dioxide Interface Employing Metal-Oxide-Silicon Diodes. Solid State Electron., p.285, U.S.A.

## ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında Bilecik’de doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini İzmit’te tamamladı 1993 yılında ODTÜ Gaziantep Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl, Kocaeli Üniversitesi Fizik A.B.D da Yüksek Lisans Öğrenimine başladı.

1993 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

